

# Hladno izvlačenje čeličnih cijevi

---

**Tarandek, Patrik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:115:300627>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-07**



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

Patrik Tarandek

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Patrik Tarandek

HLADNO IZVLAČENJE ČELIČNIH CIJEVI

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc. Stoja Rešković

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

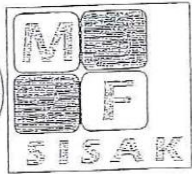
izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić - predsjednik

prof.dr.sc. Stoja Rešković - član

doc.dr.sc. Ivan Jandrić - član

doc.dr.sc. Martina Lovrenić - Jugović – zamjenski član

Sisak, rujan 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Patric  
PREZIME: Tarandek  
MATIČNI BROJ: 0124123980

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:

Hladno izvlačenje čeličnih cijevi

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

Sisak, 04.09.2019.

Patric Tarandek  
(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 financiran od strane Hrvatske zaklade 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 suradnik od 29.04. do 31.09.2019. Web stranica projekta je: [steeldeform.simet.hr](http://steeldeform.simet.hr).

## ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujem svojoj mentorici prof.dr.sc. Stoji Rešković koja mi je svojim znanjem i stručnošću pomogla pri pisanju završnog rada. Svojim strpljenjem, savjetima te zalaganjem uistinu je poslužila kao primjer mentora kojega bih poželio svakom kolegi.

Zahvaljujem se također i doc.dr.sc. Ivanu Jandrliću kao i izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić na pomoći kod ispitivanja rezultata.

Također se zahvaljujem svim radnicima tvrtke Rohrwerk Maxhütte Sisak, a posebno Tihani Perković – Obućina, kao i Saši Kostiću, kao i samoj tvrtki Rohrwerk Maxhütte Sisak na mogućnosti obavljanja rada.

Posebnu zahvalu dajem svojoj obitelji, roditeljima koji su uvijek bili uz mene kad sam ih trebao.

Veliko Hvala svima vama.

## SAŽETAK

### HLADNO IZVLAČENJE ČELIČNIH CIJEVI

Precizno hladno deformirane cijevi proizvode se hladnim izvlačenjem i hladnim pilgerovanjem. Hladno izvlačenje cijevi provodi se na vučnoj klupi, gdje se kroz matricu određenih dimenzija izvlači cijev s većeg promjera na manji. Kako bi se dobila tražena debljina stijenke cijevi i promjera potrebno je prije sljedećeg izvlačenja provesti žarenje. U ovom radu prikazani su rezultati hladnog izvlačenja cijevi. Istraživanja su provedena na čeliku E355. Cijev promjera 30 mm i debljine stijenke 3 mm vučena je na konačnu dimenziju promjera 20 mm i debljine stijenke cijevi 2 mm. Nakon izvlačenja cijevi su ispitivane statičkim vlačnim pokusom i mjerenjem tvrdoće metode po Vickersu. Detaljno je ispitana promjena tvrdoće u zoni deformacije i određen stupanj očvršćivanja tijekom hladne deformacije. Strukturna ispitivanja provedena su na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM).

Ključne riječi: hladno deformiranje, izvlačenje cijevi, očvršćenje, mikrostruktura

## ABSTRACT

### COLD DRAWING OF STEEL TUBES

Precision cold-drawn tubes are produced by cold drawing and cold pilgering. The cold drawing of the tubes is carried out at the draw bench, where the diameter of the tube from a larger diameter to the smaller is drawn through the die of certain dimensions. In order to obtain the required thickness of the tube wall and diameter, it is necessary to carry out the annealing before the next draw. This paper presents the results of cold drawn tubes. Research was carried out on steel E355. The tube diameter of 30 mm and wall thickness of 3 mm is drawn to the final dimension of 20 mm diameter and wall thickness of 2 mm. Metallographic tests on optical microscope, static tensile tests and Vickers hardness tests were used for testing tubes after cold drawing. The hardness change in the deformation zone and the degree of hardening during cold deformation in one draw were examined in detail. Structural testing was performed on a scanning electron microscope (SEM).

Key words: cold deformation, tubes drawing, hardening, microstructure,

## **SADRŽAJ**

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORETSKI DIO</b>	<b>2</b>
2.1. Hladna deformacija	2
<b>3. TEHNOLOGIJE HLADNOG OBLIKOVANJA CIJEVI</b>	<b>4</b>
<b>3.1. Tehnologija hladnog izvlačenja cijevi</b>	<b>4</b>
3.1.1. Kemijska priprema cijevi	4
3.1.2. Hladno izvlačenje cijevi	5
3.1.2.1. Izvlačenje cijevi bez trna	6
3.1.2.2. Izvlačenje cijevi s kratkim trnom	7
3.1.2.3. Izvlačenje cijevi sa dugim trnom	7
3.1.2.4. Izvlačenje cijevi sa plivajućim trnom	8
3.1.3. Žarenje/normalizacija	8
3.1.4. Ravnanje cijevi na ravnalici	8
3.1.5. Ispitivanje cijevi	8
<b>3.2. Tehnologija hladnog pilgerovanja cijevi</b>	<b>9</b>
<b>4. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	<b>10</b>
<b>4.1. Proces izrade cijevi sa plivajućim trnom</b>	<b>10</b>
4.1.1. Kemijska priprema cijevi	10
4.1.2. Hladno izvlačenje cijevi	11
4.1.3. Žarenje/normalizacija	14
4.1.4. Ravnanje cijevi na ravnalici	14
4.1.5. Ispitivanje cijevi metodama bez razaranja	15
<b>4.2. Ispitivanje tvrdoće</b>	<b>16</b>
<b>4.3. Strukturna ispitivanja</b>	<b>19</b>
<b>5. REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA</b>	<b>21</b>
<b>6. ZAKLJUČAK</b>	<b>28</b>
<b>7. LITERATURA</b>	<b>29</b>
<b>8. ŽIVOTOPIS</b>	<b>30</b>

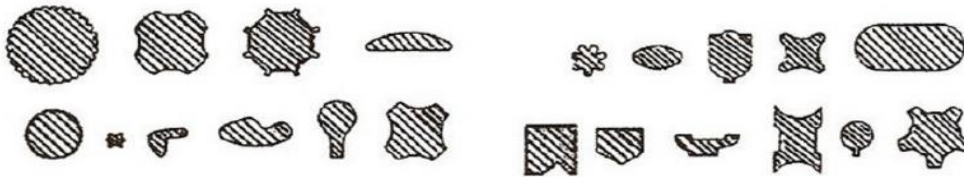


## 1. UVOD

Oblikovanje metala deformiranjem provodi se s ciljem promjene dimenzije i oblika proizvoda bez razaranja. Kod toga se ostvaruju određena fizička i mehanička svojstva metala koji se deformira. Oblikovanje metala deformacijom je najstariji način oblikovanja metala i legura. U sadašnjosti se deformira preko 85% proizvedenog čelika i više od 90% obojenih metala i njihovih legura. Najčešći industrijski postupci kojima se metali i legure oblikuju deformacijom su:

1. Slobodno kovanje i prešanje.
2. Kovanje i prešanje u kalupima.
3. Valjanje.
4. Izvlačenje u hladnom i toplom stanju.
5. Savijanje limova i traka.
6. Prešanje istiskivanjem.
7. Prešanje tečenjem.

Izvlačenjem se oblikuju puni ili šuplji profili različitih oblika. Postupak se provodi uglavnom u toplom i hladnom stanju [1]. Većinom se provodi u hladnom stanju. Ovom tehnologijom se proizvode proizvodi različitih poprečnih presjeka, slika 1. Mogu se dobiti puni profili, žice, trake, šuplji profili, šavne i bešavne cijevi. Prethodno valjani i ekstrudirani profili u toplom i hladnom stanju često se naknadno oblikuju izvlačenjem [2].



Slika 1. Različiti oblici poprečnog presjeka koji se dobivaju postupkom provlačenja [2]

Proces je obično popraćen hladnim očvrnućem. Vrijednosti mehaničkih svojstava značajno rastu, dok se plastičnost smanjuje. To nepovoljno utječe na proces provlačenja jer je mogućnost deformacije ovisna o plastičnim svojstvima metala. Kako bi se povratila plastična svojstva metala, potrebno je provesti toplinsku obradu u nekim fazama procesa provlačenja.

Nakon toplog valjanja šavne i bešavne cijevi se podvrgavaju izvlačenju u hladnom stanju. Hladna deformacija može biti na dva načina: izvlačenje ili hladno pilgerovanje. Izvlačenje i hladno pilgerovanje omogućuje nam smanjenje presjeka cijevi.

Cilj ovog rada je istraživanje ponašanja materijala kod hladnog provlačenja u realnim industrijskim uvjetima. Kod nekih čelika u prvim provlakama dolazi do pojave nehomogenih deformacija na površini cijevi koje su poznate kao Lüdersove linije. Izvlačenje i ispitivanje cijevi metodama bez razaranja provedeno je u tvrtki Rohrwerk Maxhütte, Sisak, a ispitivanje u laboratorijima Metalurškog fakulteta.

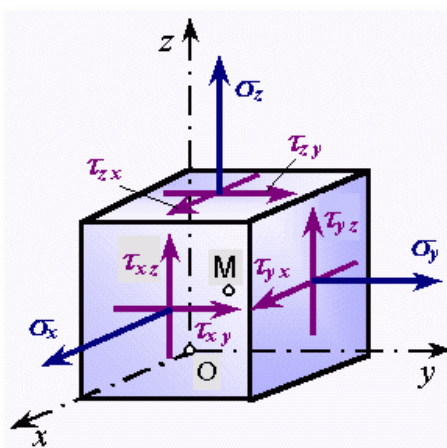
## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Hladna deformacija

Deformaciju možemo definirati kao promjenu položaja atoma u kristalnoj rešetki nekog deformiranog tijela pri čemu se mijenja njegov oblik i dimenzija, ali volumen ostaje konstantan [3]. Može se provoditi u toplom i hladnom stanju. Topla deformacija se provodi iznad temperature rekristalizacije, a hladna ispod temperature rekristalizacije.

Deformacija ovisi o tipu kristalne rešetke, greškama u strukturi materijala i intenzitetu sila kojom se provodi deformacija. Djelovanju vanjskih sila suprotstavljaju se unutarnje sile u materijalu i sprečavaju pomicanje atoma iz njihovog ravnotežnog položaja. Unutarnje sile su naprezanja u materijalu [3,4]. Mogu biti:

1. Normalna naprezanja  $\sigma$
2. Tangencijalna naprezanja  $\tau$



Slika 2. Prikaz normalne i tangencijalne naprezanja [4]

Postoje dvije vrste deformacije, hladna i topla. Topla deformacija se odvija na temperaturama iznad temperature rekristalizacije materijala. Rekristalizacija je proces kod kojeg iz deformiranog kristalnog zrna s velikom gustoćom dislokacija nastaju sitna zrna koja ne sadrže dislokacije [3]. Oporavak je proces kod kojeg se dislokacije poništavaju i na taj način smanjuje njihova gustoća. Ne nastaju nova kristalna zrna. Kod tople deformacije, istovremeno s procesom deformacije, odvija se i dinamička rekristalizacija i oporavak materijala. Nakon tople deformacije odvija se statička rekristalizacija i oporavak.

Kod hladne deformacije temperatura deformacije je niža od temperature rekristalizacije. Zbog toga nema dinamičke niti statičke rekristalizacije [3]. Deformacija se odvija u više faza. Da bi se mogao postići veći stupanj deformacije između pojedinih faza materijal se zagrijava na temperaturu rekristalizacije ili oporavka. Na taj način se smanjuje velika gustoća dislokacija.

Unesenom deformacijom povećava se gustoća dislokacija i time unutrašnja energija [4]. Dio unesene energije troši se i na savladavanje trenja između alata i deformiranog materijala što se manifestira kroz zagrijavanje deformiranog materijala i alata.

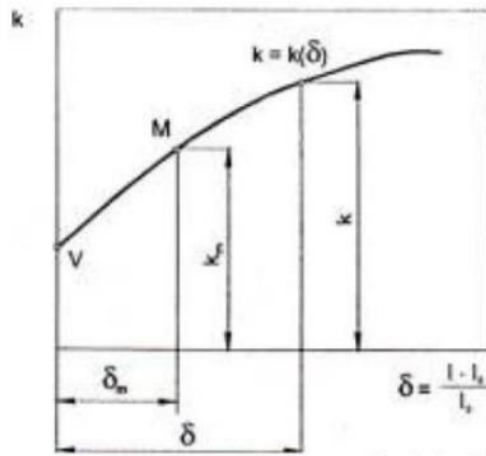
Također se dio energije pohrani kao naprezanje u materijalu, slika 2. Pohranjena energija raste s porastom stupnja deformacije, a također ovisi i o brojnim drugim parametrima, posebno o brzini deformacije. Povećanjem energije koja se pohranjuje u materijalu povećava

se broj dislokacija. Kod hladne deformacije značajno se povećava broj dislokacija u strukturi metala zato što se ne odvija rekristalizacija i oporavak zrna.

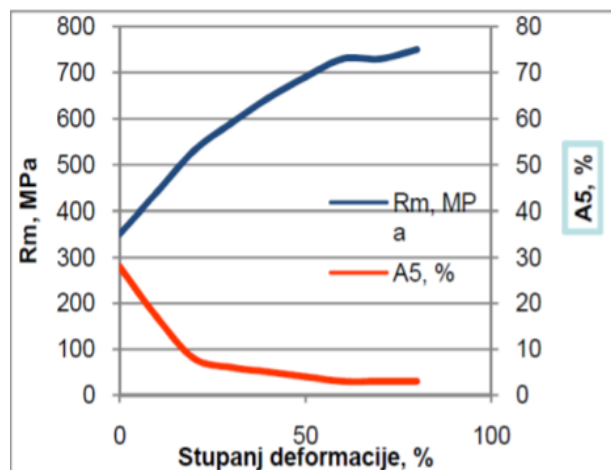
Za hladnu deformaciju karakteristično je deformacijsko očvršćivanje, slika 3. Deformacijsko očvršćivanje raste s povećanjem stupnja deformacije. Deformacijsko očvršćivanje može se izračunati danom formulom:

$$\sigma_{kt} = KA_n$$

$\sigma_{kt}$  – kritično naprežanje tečenja, K, n – konstanta, A – efektivno istežanje



Slika 3. Krivulja očvršćivanja materijala hladnom deformacijom [4]



Slika 4. Mehanička svojstva niskougliječnog čelika u zavisnosti o stupnju deformacije [3]

Deformacija ovisi o različitim parametrima od kemijskog sastava, površine alata, površine deformiranog tijela, temperature, brzine deformacije, utjecaj tlaka, puta klizanja, stupnja deformacije, broja provlaka [3].

### 3. TEHNOLOGIJE HLADNOG OBLIKOVANJA CIJEVI

Cijevi se mogu hladno oblikovati izvlačenjem i pilgerovanjem. To su dva tehnološka postupka kojima se cijevi najčešće oblikuju u hladnom stanju.

Tehnologija oblikovanja metala izvlačenjem je proces izvlačenja kroz otvor matrice, pomoću koje se smanjuje vanjski presjek, a duljina se produljuje. Ovim postupkom se najčešće rade cijevi, žice i profili [1].

Tehnologija hladnog pilgerovanja cijevi provodi se na pilger postrojenjima. Radi se o postupku kod kojeg se cijev valja preko trna s valjcima promjenljivog promjera. Deformacija se odvija valjanjem i kovanjem [1]. Ostvaruje se visok stupanj deformacije.

#### 3.1. Tehnologija hladnog izvlačenja cijevi

Tehnologija oblikovanja cijevi izvlačenjem je proces izvlačenja cijevi kroz otvor matrice, pomoću koje se smanjuje promjer, a duljina cijevi se povećava. Prerađuju se šavne i bešavne cijevi. Promjer cijevi jednak je izlaznom promjeru matrice. Debljina stjenke cijevi može ostati ista, smanjiti se ili povećati. Određuje se unutarnjim alatom – trnom koji se postavlja u cijev [1,5, 6].

Tehnološki proces provlačenja cijevi sastoji se od:

- Kemijske pripreme cijevi
- Izvlačenja cijevi
- Žarenja / normalizacije između provlaka
- Ravnanje cijevi
- Kontrola cijevi
- Skladištenje cijevi

##### 3.1.1. Kemijska priprema cijevi

Da bi se izbjeglo veliko trenje između materijala i matrice cijev bi trebala biti prethodno dobro kemijski pripremljena. Ovom tehnologijom se pripremaju šavna ili bešavna cijev. One na sebi imaju oksidni sloj – kovaninu koji se mora odstraniti [7]. Osim toga mogu na površini imati hrđu i druge štetnih tvari koje se također moraju otkloniti [1].

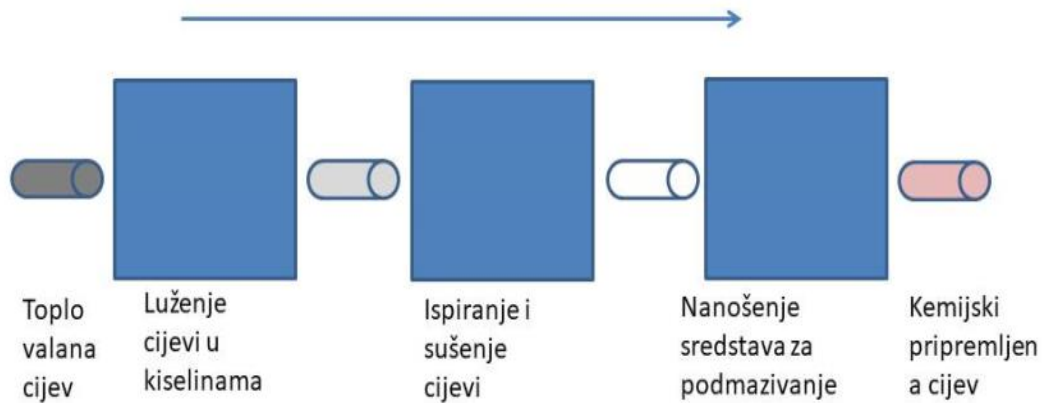
Proces kemijske pripreme sastoji se u luženju u kiselinama, ispiranju cijevi u toploj i hladnoj vodi, sušenju cijevi i nanošenju maziva. Luženje ugljičnih i niskougljičnih čelika provodi se u sumpornoj i solnoj kiselini, slika 5. Nehrđajući čelici luže se u mješavini solne i dušične kiseline (npr. 2% HCl+5% HNO<sub>3</sub>+67% H<sub>2</sub>O) na temperaturi 40-50 °C 15 do 40 minuta. Nakon luženja peru se u vodi i ponovo luže u 8% HNO<sub>3</sub>. Oksidni sloj na površini čelika sastoji se iz tri sloja: FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [1, 7].

Kemijski proces kod luženja u H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

- $FeO + H_2SO_4 = FeSO_4 + H_2O$
- $Fe_2O_3 + 3 H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$
- $Fe + H_2SO_4 = FeSO_4 + H_2$

Kemijski proces kod luženja u HCl:

- $FeO + 2HCl = FeCl + H_2O$
- $Fe_2O_3 + 6HCl = 2FeCl_3 + 3H_2O$
- $Fe + 2HCl = FeCl_2 + H_2$



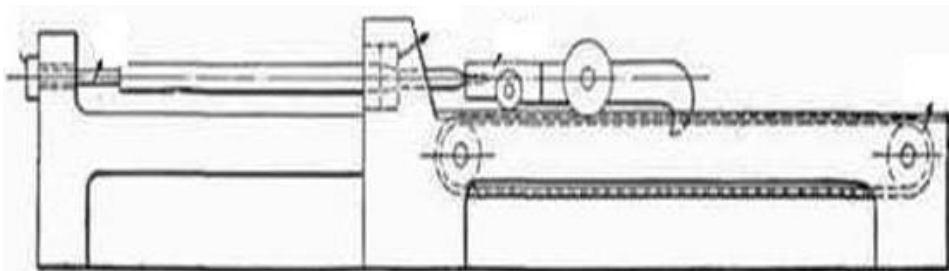
Slika 5. Proces kemijske pripreme cijevi [7]

Do kojih reakcija će doći ovisi o temperaturi i koncentraciji kiseline. Vrijeme luženja je ovisno o temperaturi i koncentraciji kiseline. Nakon luženja cijevi se ispiru u toploj i hladnoj vodi i suše. Na osušene cijevi nanosi se fosfati i sapun radi smanjena trenja pri hladnom izvlačenju [1,7].

### 3.1.2. Hladno izvlačenje cijevi

Uređaj na kojem se provodi izvlačenje cijevi naziva se vučna klupa. Vučna klupa se sastoji od pogonskih motora, kolica, matrice, Gallova lanca, nosača i šaržnog bubnja, slika 6.

**Vučna klupa** se pogoni preko reduktora koji je spojen na elektromotor. Pogonski elementi sastoje se iz dviju međusobno neovisnih jedinica. Svaka jedinica sastoji se od vučnog lanca, spojke između vučenog lanca i užeta za vraćanje.

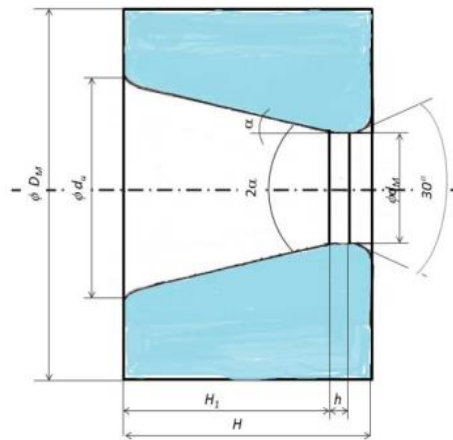


Slika 6. Vučna klupa [8]

Osnovni alat s kojim se cijev oblikuje deformacijom je matrica. Matrica je napravljena od dva dijela: konstrukcijskog i alatnog/radnog dijela. Vanjski dio je dio koji nosi cijelu matricu tj. konstrukcijski dio koji je najčešće napravljen od nekog nehrđajućeg čelika. Radni dio matrice ja napravljen od nekog tvrdog materijala npr. CrNi ili CrMo, a u nekim slučajevima može biti i od dijamanta. Matrice se sastoje od:

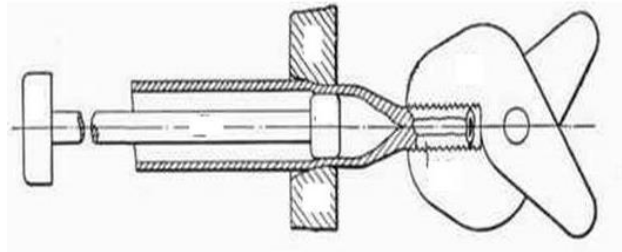
- ulaznog konusa koji osigurava uvlačenje maziva u matricu

- radnog konusa koji reducira presjek materijala
- kalibrirajućeg dijela s laganim konusom koji osigurava točnost mjere
- izlaznog konusa koji sprečava lom matrice i eventualno oštećenje proizvoda



Slika 7. Matrica za hladno izvlačenje [1]

Ulazni dio matrice širi je od ranog dijela zato što se izvlačenjem cijevi presjek smanjuje s većeg na manji promjer. Matrica se obrađuje prije svakog novog procesa izvlačenja radi odstranjivanja prethodnih grešaka na njoj. Izlazni dio matrice veći je od radnog dijela matrice radi smanjivanja naprežanja na izlasku cijevi, slika 8.



Slika 8. Prihvat uložnog materijala [8]

**Vučni lanci** su povezani s vučnom klupom. Lanci se pokreću pomoću pogonskih lančanika. **Vučni stol**, izrađen je iz nosača s paralelnim pribubicama, koji je pridržavan nosačima. Konstrukcija postolja vučenog stola omogućava slobodno kretanje cijevi prema mjestu za gotove cijevi. **Postolje matrice** izvedeno je kao zatvoreno kućište. **Vučna kolica** izvedena su kao zavarena konstrukcija. Kreću se na 4 kotača manjeg promjera. Vučna kolica pokreću se pomoću Gallovog lanca.

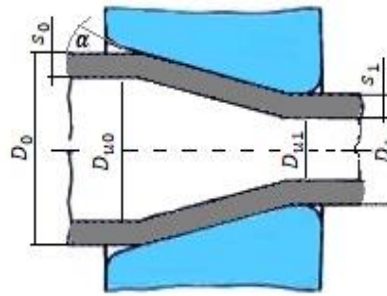
Postoje više načina izvlačenja cijevi i razlikuju se po tome dali se provodi sa ili bez trna:

- bez trna,
- sa kratkom trnu,
- sa dugim trnu.
- sa plivajućim trnu

### 3.1.2.1. Izvlačenje cijevi bez trna

Izvlačenje cijevi bez trna je od tih procesa izvlačenja najlošiji po kvaliteti zato jer se ne može određivati debljina stijenke, slika 9, tj. cijela deformacija nam ovisi o stupnju deformacije, pa je zato najbolje raditi više provlaka s manjim deformacijama, ali kod više provlaka potrebna je i normalizacija da bi svojstva cijevi se uvijek vratila na početna.  $D_0$  na slici prikazuje ulazni

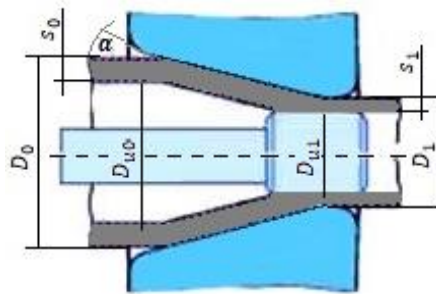
promjer cijevi, a  $D_1$  je izlazni promjer cijevi.  $S_0$  prikazuje početnu debljinu stijenke, a  $S_1$  nam prikazu debljinu stijenke nakon izvlačenje cijevi [1].



Slika 9. Izvlačenje bez trna [1]

### 3.1.2.2. Izvlačenje cijevi s kratkim trnom

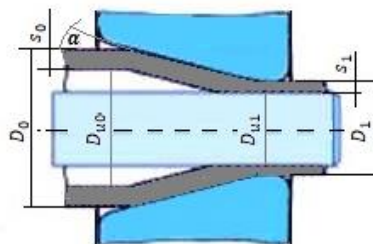
Trn se pričvrsti na nosač i on je fiksiran u zoni deformacije. Kod tog procesa moguća je redukcija od 35 % i dobra kvaliteta površine cijevi, slika 10. Ova tehnologija jedna je od najčešćih u uporabi radi jeftinih troškova procesa.  $D_0$  na slici prikazuje ulazni promjer cijevi, a  $D_1$  je izlazni promjer cijevi.  $S_0$  prikazuje početnu debljinu stijenke, a  $S_1$  nam prikazu debljinu stijenke nakon izvlačenje cijevi [1].



Slika 10. Izvlačenje s kratkim cilindričnim trnom [1]

### 3.1.2.3. Izvlačenje cijevi sa dugim trnom

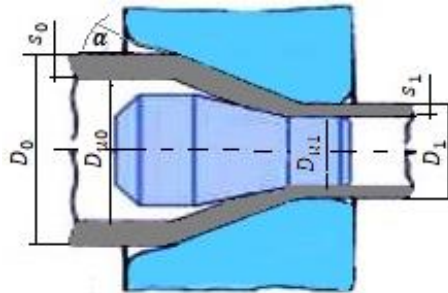
Ova tehnologija omogućuje nam smanjenje debljine stijenke uz veliku redukciju stijenke jer cijeli trn zajedno s cijevi prolazi kroz matricu i tu dolazi do velikih redukcija, slika 11. Ovom metodom moguće su i redukcije do nekih 55 %. Ovom metodom moguća je samo jedna provlaka za razliku od ostalih metoda koje se mogu više puta ponavljati [1].



Slika 11. Izvlačenje cijevi s dugim trnom [1]

### 3.1.2.4. Izvlačenje cijevi sa plivajućim trnom

Vučenje cijevi sa plivajućim (slobodnim) trnom je novija tehnologija, slika 12. Trn je postavljen u cijev i slobodno se kreće u zoni deformacije.



Slika 12. Izvlačenje cijevi sa plivajućim trnom [1]

Postiže se redukcija od 40%. Provodi se u slučajevima kao i kod izvlačenja na kratkom trnu, razlika je u tome što se trn sam podešava u zoni deformacije

### 3.1.3. Žarenje/normalizacija

Kod hladne deformacije nema oporavka i rekristalizacije. Da bi se mogao ostvariti željeni stupanj deformacije potrebno je cijevi zagrijavati kako bi se smanjila gustoća dislokacija i time čvrstoća materijala. Zagrijavanje se provodi u pećima na temperaturama iznad temperature oporavka i rekristalizacije. Peć se sastoji od 3 zone: prva zona je predgrijavanje, druga zona je žarenje, a treća zona je hlađenje. U zoni predgrijavanja cijevi se griju na temperaturu oko 400 °C, ovisno o vrsti materijala. Zona žarenja je glavna zona gdje se cijevi žare na temperaturama normalizacije. U zoni hlađenja cijevi se hlade malom brzinom do sobne temperature. Pri tome se postižu svojstva cijevi kakva su imala prije deformacije.

### 3.1.4. Ravnanje cijevi na ravnalici

Nakon izvlačenja cijevi se ravnaju na postrojenjima koje se nazivaju ravnalice. Brzina ravnanja ovisi o vrsti čelika iz kojeg su cijevi proizvedene, dimenziji cijevi i o stupnju deformacije cijevi.

### 3.1.5. Ispitivanje cijevi

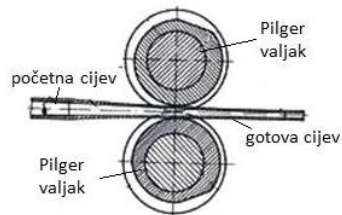
Kontrola cijevi provodi se prema važećim normama za cijevi koje su proizvedene hladnim izvlačenjem. Obvezna je uvijek bar jedna metoda bez razaranja. Najčešće se koriste ultrazvučne i magnetske metode. U nekim slučajevima, posebno ako se radi o šavnim cijevima, koristi se i ispitivanje propuštanjem vode pod visokim tlakom (oko 80 bara) kroz cijev (hidro proba). Prema normi na određenom broju cijevi ispituju se dimenzije. Od cijevi koje su zadovoljile ispitivanje metodama bez razaranja uzimaju se uzorci za mehanička, tehnološka i strukturna ispitivanja. Obvezno se ispituju mehanička svojstva, a strukturna ispitivanja se ispituju samo ako to zahtijeva kupac ili posebno propisuje norma. Nakon kontrole, cijevi odlaze na antikorozivnu zaštitu, pakiranje i skladištenje.



### 3.2. Tehnologija hladnog pilgerovanja cijevi

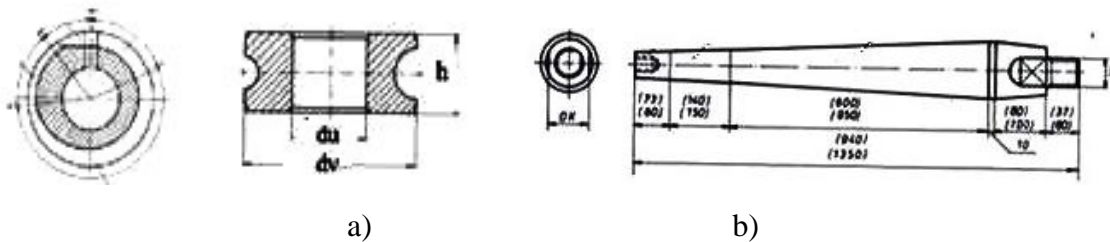
Kako je već rečeno precizne cijevi se mogu dobiti tehnologijom hladnog pilgerovanja. Pilgerovanje je tehnološki postupak obrade cijevi koji se sastoji u istovremenom valjanju i kovanju cijevi. To se ostvaruje s posebnim valjačkim stanovima. Kemijska priprema, ravnanje cijevi, kontrola i zaštita odvija se na isti način kao i kod hladnog izvlačenja.

Hladni pilger je valjački stan za reduciranje cijevi iz legiranih i nelegiranih čelika, te cijevi iz obojenih metala. Pri hladnom pilgerovanju prevladavaju tlačna naprezanja, čime se povećava stupanj deformacije metala i postižu se velike redukcije u odnosu na hladno izvlačenje, slika 13.



Slika 13. Shematski prikaz pilgerovanja [6]

Kao pribor za pilgerovanje se koriste valjci i trnovi, slika 14. a) i b). Kalibracija valjaka je ovisna o vanjskom promjeru i debljini stijenke uložne cijevi, zatim o vanjskom promjeru i debljini gotove cijevi i naravno o kvaliteti materijala koji se valja. Trnovi mogu biti konusni ili kalibrirani [6].



Slika 14. a) Valjci za pilger, b) Trn za pilger [6]

Hladno pilgerovanje je postupak, koji se sve više upotrebljava, zbog niza prednosti pred hladnim izvlačenjem.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Izvlačenje cijevi provedeno je u tvrtki Rohrwerk Maxhütte, d.o.o. Sisak, metodom izvlačenja s plivajućim trnom. Proces izvlačenja cijevi odvija se u više faza: priprema uloška za izvlačenje, priprema alata za izvlačenje, izvlačenje cijevi, normalizacije/žarenja, kontrola cijevi s metodama bez razaranja, ispitivanja cijevi prema normi, zaštite, pakiranja i skladištenja. Kemijska priprema cijevi provodi se u tvrtki Rohrwerk Maxhütte u Njemačkoj. U tvrtki Rohrwerk Maxhütte, d.o.o., Sisak proces započinje od pregledavanja uloška za izvlačenje. Pregledavanje se vrši vizualnom metodom, a promatraju se oštećenja uložnog materijala, točnost naloga ili šarže uložnog komada, broj poslanih i primljenih komada.

### 4.1. Proces izrade cijevi sa plivajućim trnom

Cijevi su izvlačene iz čelika E355. Početna dimenzija cijevi je promjera 30 mm i debljine stijenke 3 mm. Cijev je izvlačena na konačni promjer 20 mm i debljinu stijenke 2 mm u dvije provlake.

#### 4.1.1. Kemijska priprema cijevi

Kako je već rečeno cijevi na kojima su provedena ispitivanja kemijski su pripremljene u centralnoj tvornici Rohrwerk Maxhütte u Njemačkoj. U Sisku se također mogu kemijski pripremati. Na slici 15, prikazana je kada za kemijsku pripremu uložnog materijala u Rohrwerk Maxhütte, d.o.o., Sisak.



Slika 15. Kade za luženje cijevi u kiselinama

Nakon odstranjivanja oksidnog sloja i drugih nečistoća sa površine cijevi u kiselinama cijevi se vade iz kade i ispiru u vodi u kadi za ispiranje, slika 16. Nakon ispiranja cijevi se suše, a nakon toga stavlja se na njih fosfati i sapun radi smanjena trenja pri hladnom izvlačenju.



Slika 16. Kada s grijačima za ispiranje cijevi u zagrijanoj vodi

#### 4.1.2. Hladno izvlačenje cijevi

Nakon ulazne kontrole provodi se priprema cijevi za izvlačenje. Priprema cijevi za ulazak u matricu radi se na stroju koji zašilji prvih nekoliko desetaka centimetara cijevi da bi se provukla cijev kroz matricu i da bi ju kliješta za izvlačenje mogla prihvatiti. Šiljenje se provodi u obliku osmice, slika 17.



Slika 17. Zašiljeni uložni materijal

Nakon šiljenja, transportira se uložni materijal do stroja za izvlačenje cijevi – vučne klupe. Zašiljeni dio cijevi postavi se na početak trake na vučnoj klupi na koju se nadovezuje šaržni bubanj u kojem su smještene vodilice radi lakšeg uvođenja cijevi u matricu. Nakon matrice, vučna kolica sa kliještima hvataju zašiljeni dio uložnog materijala cijevi, slika 17.

Cijev promjera 30 mm i debljine stijenke 3 mm trebala je biti izvučena na 20 x 2.0 mm. S obzirom da se to ne može izvesti u jednoj provlaci jer bi bila prevelike redukcija, izvlačenje se odvijalo u 2 provlake. Prva je bila s 30 x 3.0 mm na 25 x 2.5 mm, a druga s 25 x 2.5 mm na 20 x 2.0 mm.

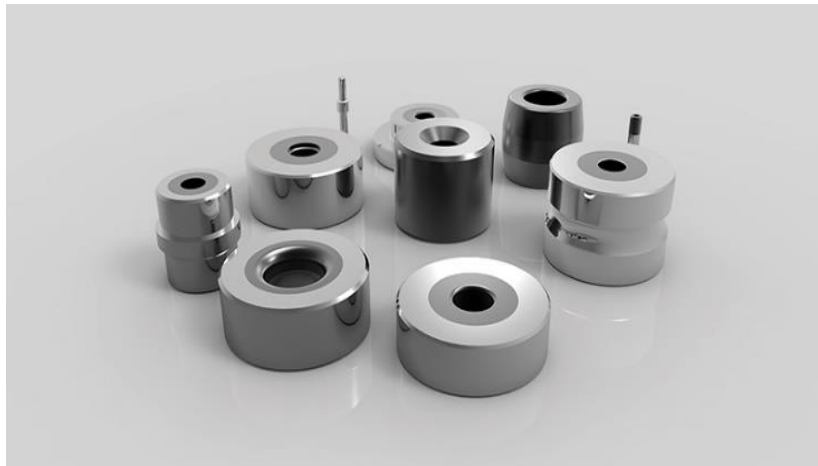
Izvlačenje cijevi provedeno je na vučnoj klupi. Vučna klupa se sastoji od pogonskih motora, kolica, matrice, Gallova lana, nosača i šaržnog bubnja.

Vučna klupa se pogoni preko reduktora koji je spojen na elektromotor. Snage motora ovisna je o veličini vučne klupe. Vučni stol, izrađen je iz nosača s paralelnim prirubnicama, pridržavan nosačima. Postolje matrice izvedeno je kao zatvoreno kućište, slika 18. U postolju matrice smješteni su potporni koluti za lakše uvlačenja cijevi u matricu prije vučenja.



Slika 18. Postolja matrice

Matrica je napravljena od dva dijela: konstrukcijskog i alatnog/radnog dijela. Na slici 19 prikazane su matrice koje se koriste kod izvlačenja cijevi.



Slika 19. Matrice za izvlačenje cijevi

Korištene su matrice kod kojih je vanjski dio koji nosi cijelu matricu napravljen od nehrđajućeg čelika, a radni dio matrice ja napravljen od tvrdog CrNi ili CrMo. Matrica se sastoji od 3 dijela: ulaznog, radnog i izlaznog. Radni dio matrice je se svaki put prije upotrebe polira polirnim prahom finoće 5, 10, 25, 50 i na kraju se nanosi najgušće ulje.

Zašiljeni kraj cijevi postavljen je na radni stol i provučen kroz matricu slika 20. Na vučnim kolicima nalaze se kliješta kojima je cijev prihvaćena istegnuta. Kada vučna kolica stoje ispred postolja matrice, provedeno je stezanje čeljusti pomoću hidraulički aktivirane poluge.



Slika 20. Vučna kolica

Šaržni bubanj sastoji se od više dijelova. Svaki se dio sastoji od krajnjih prirubnica, središnjih prirubnica i 6 nosivih cijevi koji istovremeno služe kao vodilice za vučeni materijal i trnove. U ovom slučaju radi se sa plivajućim trnom. Na prirubnici prednjeg dijela uložnog bubnja smještenog u postolju matrice montirane su uvednice za uvlačenje materijala, slika 21.



Slika 21. Uvlačenje cijevi u bubanj

Prirubnica je s pomoću 4 prečke povezana sa šaržnim bubnjem. Prirubnica i uložni bubanj položeni su radijalno na valjke. Na po dvije prečke pomično su smješteni nosači trnova. Na dvije osne vodilice, ugrađene u kućište, klizi jedan element za vođenje, za premještanje nosača trnova. Pomicanje elemenata za vođenje vrši se preko jednog cilindra.

Brzina izvlačenja odvijala se sporo pošto su se odvijale velike redukcije cijevi. Uložni materijal dimenzija 30 x 3.0 mm izvlačio se na dimenzije od 25 x 2.5 mm.

Smanjivanje presjeka cijevi s većeg na manji nakon izvlačenja na vučnoj klupi rezultira povećanjem neke dimenzije. Pošto je kod deformacije zadovoljen zakon o konstantnosti volumena, smanjenjem promjera i debljine stijenke povećava se dužina cijevi.

Nakon izvlačenja u prvaj provlaci cijevi su žarene i normalizirane.

### 4.1.3. Žarenje/normalizacija

Temperatura cijevi je manja od temperature rekristalizacije toga čelika. Nakon izvlačenja cijevi su transportirane do peći na normalizaciju i žarenje. Proces žarenja odvijao se u 3 faze: predgrijavanje, žarenja i hlađenje, slika 22. Zona predgrijavanja je iznosila približno 400°C. Cijevi zatim ide u drugu zonu, zonu žarenja. Cijevi su normalizirane na temperaturi 920 °C. Nakon toga cijevi prolaze u zonu hlađenja, u komore koje su okružene cijevima u kojoj se nalazi voda koja cirkulira u krug i tako hladi cijevi koje su prethodno bile žarene. Brzina prolaska kroz peć iznosila je oko 1.5 m/h. Proces je trajao oko 8 sati.



Slika 22. Cijevi nakon žarenja u peći

Razlog zbog kojeg je potrebno provesti normalizaciju cijevi je taj što se kod hladnog izvlačenja dešava velika redukcija pa se tu cijevi deformiraju i gube svoja početna svojstva, tj. mehanička svojstva im jako gube vrijednost. S toga idu na normalizaciju da se ponovno zrna rekristaliziraju i dobiju prvobitna mehanička svojstva kao prije izvlačenja.

Nakon šta se cijevi ohlade od prethodne toplinske obrade, transportirane su na ravnalicu. Uslijed hladnog izvlačenja cijevi se deformiraju, pa ih je potrebno izravnati.

Nakon normalizacije provedena je druga provlaka. U drugoj provlaci cijevi su izvučene na konačnu dimenzije 20 x 2.0 mm. Nakon izvučenja provedeno je ravnanje cijevi na uređaj za ravnanje cijevi - ravnalici.

### 4.1.4. Ravnanje cijevi na ravnalici

Ravnanje cijevi provedeno je na ravnalici, slika 23. Postupak s kojim se ravnaju savinute cijevi, slika 23, provodi se između 3 para valjaka pogonjena s 2 motora.



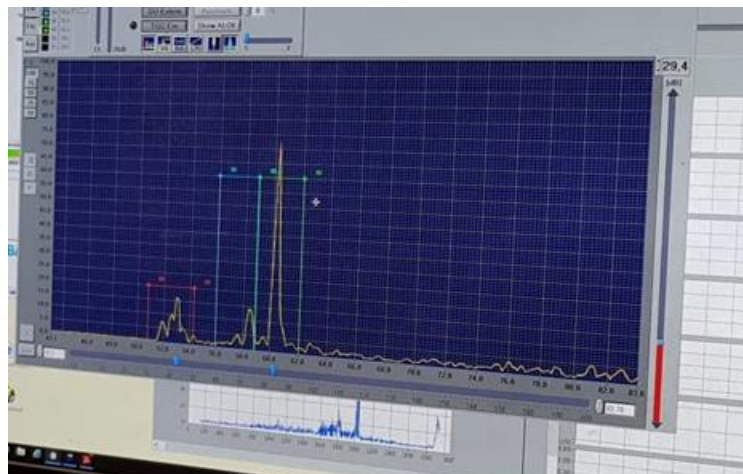
Slika 23. Prikaz ravnalice

Srednji par valjaka zadužen je za kut ravnanja, tj. uz pomoć njega se slaže pod kojim kutom će se cijev ravnati.

#### 4.1.5. Ispitivanje cijevi metodama bez razaranja

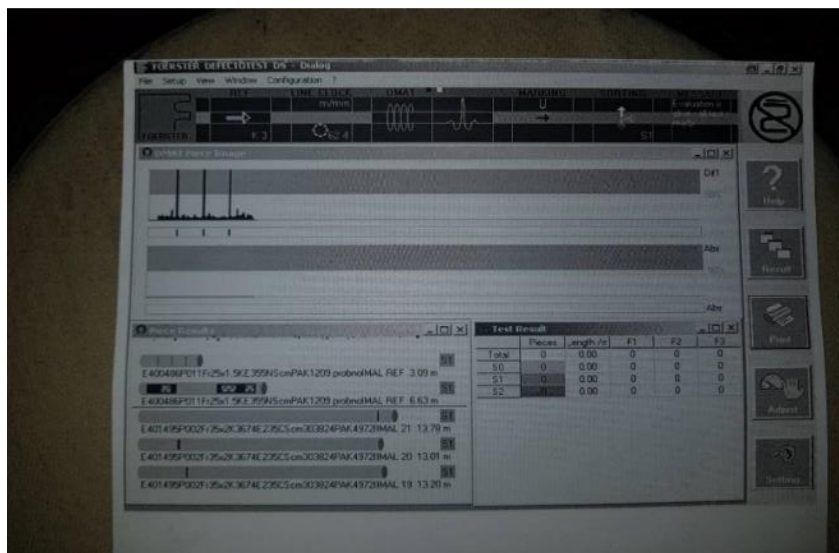
Kontrola cijevi vrši se na defektomatu, ultrazvučnom uređaju i uređaju Fertigmacherbock. Ispitivane cijevi, poslije ravnanja, su kontrolirane na defektomatu i na Fertigmacherbock.

Defektomat je uređaj koji se bazira na principu vrtložnih struja. Pronalazi površinske greške na cijevima. Ultrazvučni uređaj radi na principu prozvučavanja cijevi. Otkriva površinske i unutarnje greške. Može se provoditi kontrola dimenzije cijevi. Fertigmacherbock je uređaj za automatsku vizualnu kontrolu cijevi. Može se laserom mjeriti promjer, debljina stijenke i duljina cijevi. Jedna cijev ispitana je na ultrazvučnom uređaju. Na slici 24 prikazana je kalibracija ultrazvučnog uređaja.



Slika 24. Signal na ultrazvuk

Cijevi iz čelika E355 ispitivana je na defektomatu. Uređaj je kalibriran, slika 25.



Slika 25. Ispitna cijev na defektomatu

Nakon kalibracije defektomata cijevi se ponovno ispituju. Nisu pronađene nikakve greške na njima.

Sve ispitivane cijevi također su ispitane i na Fertigmacherbock uređaju. Detaljno su kontrolirane dimenzije cijevi; promjer, debljina stjenke i dužina cijevi, te površina cijevi. Nisu pronađene nikakve greške na njima. Nakon toga provedena je i detaljna vizualna kontrola. Posebno je promatrana površina cijevi. Nisu zapažene nikakve greške na cijevima. Od karakteristični cijevi uzeti su uzorci za ispitivanje tvrdoće i za strukturalna ispitivanja. Cijevi koje su prošle kontrolu ide na antikoroziivno zaštitu u ulje i skladištenje.

#### 4.2. Ispitivanje tvrdoće

Za ispitivanje tvrdoće uzeti su uzorci cijevi iz zone prije deformacije, u zoni deformacije i nakon zone deformacije iz svake provlake. Uzorci su uzeti od prve cijevi 30 x 3.0 mm koja je provlačena na dimenziju 25 x 2.5 mm, i druga cijev 25 x 2.5 mm koja je provlačena na dimenziju 20 x 2.0 mm.

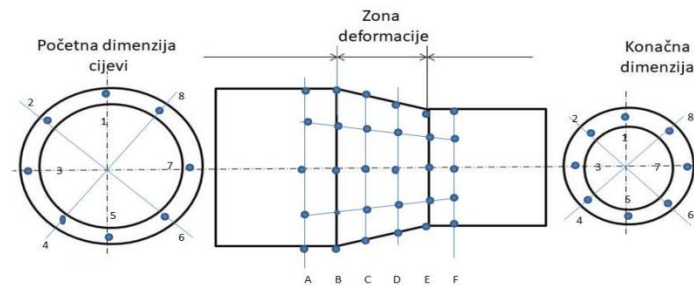
Zona deformacije cijevi prikazana je na slici 26.



Slika 26. Zona deformacije

Mjerenje tvrdoće planirano je prema shemi na slici 27.





Slika 27. Shema rezanja [9]

Rezanje uzoraka za mjerenje tvrdoće provedeno je na uređaju Buehler ABRASIMET 2, slika 28. Komad cijevi, slika 26, izrezan je prema shemi na slici 27. na 4 jednaka dijela.



Slika 28. Buehler ABRASIMET 2 pila za rezanje

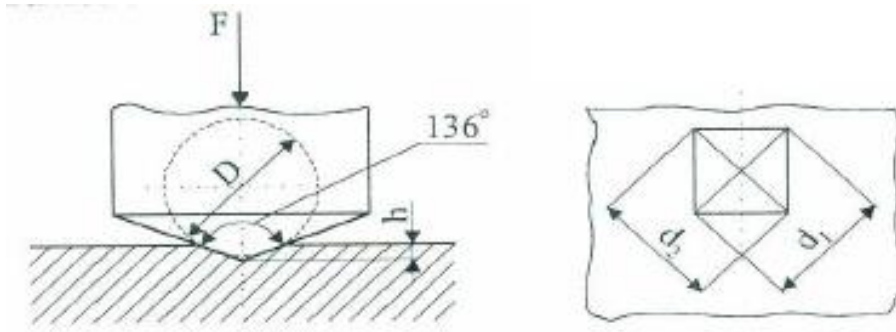
Nakon rezanja uzorci cijevi izgledaju kao na slici 29.



Slika 29. Izrezana cijev

Prije ispitivanja tvrdoće po metodi Vickersa uzorci su brušeni i polirani. Ispitivanje je provedeno na uređaju Vickers mmm.

Mjerilo tvrdoće po Vickersu je odnos sile ispitivanja površine otiska dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$  [10].



Slika 30. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [10]

$$HV = \frac{0,102 \times F}{S}$$

$$S = \frac{d^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{1854}$$

$$HV = \frac{F \times 0,1891}{d^2}$$

**F** – sila utiskivanja, N

**S** – površina otiska nakon rasterećenja, mm<sup>2</sup>

**d** – srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otiska, mm



Slika 31. Vickersov tvrdomjer

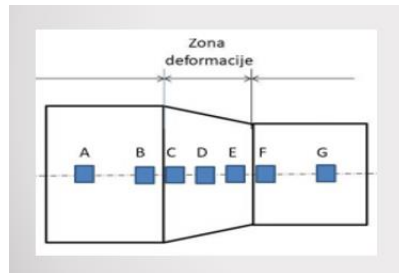
Tijek mjerenja:

- priprema uzorka
- postavljanje uzorka u tvrdomjer
- postizanje potrebnog opterećenja 10 N
- vrijeme trajanja opterećenja 10 s
- rasterećenje
- mjerenje otiska – po dvije dijagonale
- izračunavanje tvrdoće

Tvrdoća po Vickersu je bez dimenzionalna veličina koja se označava se slovnim simbolom HV uz naznaku uvjeta ispitivanja.

### 4.3. Strukturna ispitivanja

Za strukturna ispitivanja uzeti su uzorci prema shemi prikazanoj na slici 32. To su isti uzorci na kojima je mjerena tvrdoća. Veličine su 2-3 cm i sadrže sve 3 zone deformacije, tj. zonu deformacije, prije i nakon zone deformacije. Nakon rezanja uzorak je uloženi u vodljivu masu postupkom vrućeg ulaganja kod kojeg su uvjeti: temperatura 180°C, 250 bara i 5 min. Uređaj na kojem provedeno ulaganje je SimpliMet 1000, slika 33. Nakon ulaganja uzorci su brušeni i polirani na uređaju PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC, slika 34. Brušenje se odvija s različitim gradacijama brusnog papira i na kraju s glatkom tkaninom se polira.



Slika 32. Shema ispitivanja na mikroskopu [9]



Slika 33. SimpliMet 1000 za ulaganje u masu

Uzorak se brusio konstantno na 200 okretaja/min od grublje gradacije prema finijoj, pa se počeo brusiti s 120 na 3 min, 400 na 8 min, 600 na 5 min, 800 na 10 min, 1000 na 10 min i na kraju se polirao s glatkom tkaninom + vodenom otopinom  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.3 mikrona na 10 min i nagrizaio u nitalu 3 sec i dobije se uzorak spreman za metalografsku analizu, slika 35.



Slika 34. PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC



Slika 35. Uzorak spreman za metalograsku analizu

Prema slici 32. ispitivanje strukture provedeno je na elektronskom skenirajućem mikroskopu (SEM), TESCAN VEGA LSH. Ispitivanje je provedeno kod povećanja od 200x, 500x, 1000x, 2000x, 3000x.

Princip rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa se sastoji od skeniranja površine ispitivanog uzorka na koji su fokusirani snopovi elektrona. Kod udara snopa elektrona u ispitivanu površinu uzorka nastaju efekti od kojih se dobivaju slike i analize uzorka. Uzorak se nalazi u samom mikroskopu na nosaču, a katoda je izvor elektrona koja je smještena na vrhu kolone u emisijskoj komori. Elektroda i anoda se nalaze pod velikim naponom i između njih se elektroni ubrzavaju te se fokusiraju i usmjeravaju pomoću magnetskih leća. Pri sudaru atoma s atomskom jezgrom postoji mogućnost odbijanja elektrona natrag, takvi odbijeni elektroni se nazivaju elektroni povratnog raspršenja, a njih se detektira pomoću BSE metode. Elektroni povratnog raspršenja koriste se za proučavanje razlika u kemijskom sastavu. Prilikom izbijanja elektrona iz elektronskog omotača nastaje prazno vakansko mjesto koje se popunjava elektronom iz druge elektronske ljuske. Kod takvog skoka elektrona emitira se x zraka. Energija koja nastaje iz ovakvog zračenja specifična je za svaki kemijski element i ta svrsta zračenja se detektira pomoću EDS detektora i služi za određivanje kemijskog sastava emitiranih na temelju x zraka [11].

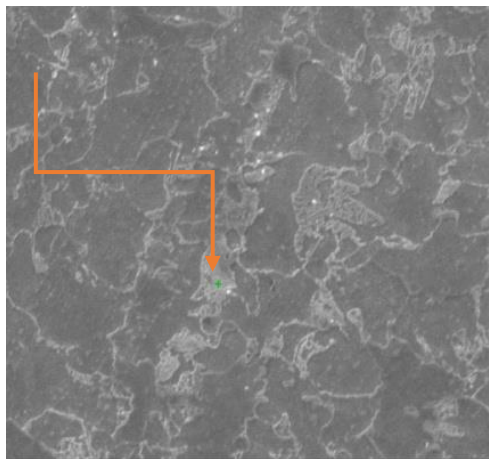
## 5. REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA

Kemijski sastav ispitivane cijevi prikazan je u Tablici 1.

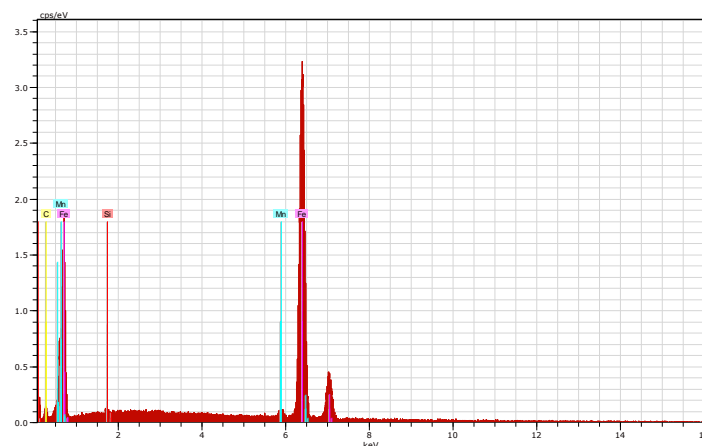
Tablica 1. Kemijski sastav dobiven iz tvrtke

ELEMENT	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	N
Mas .%	0.15	0.32	1.3	0.007	0.005	0.025	0.16	0.0093

EDS metodom potvrđeno je da su svi kemijski elementi navedeni u Tablici 1. nalaze u čeliku. Na slici 36, u točki označenoj zelenom bojom ispitan je kemijski sastav. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 37. Potvrđeno je da su u čeliku nalazi osim željeza, ugljik, mangan i silicij. Udio ovih elemenata u ispitivanoj točki jasno je vidljiv. Ostali elementi metodom EDS-a nisu registrirani zbog njihovog premalog udjela.

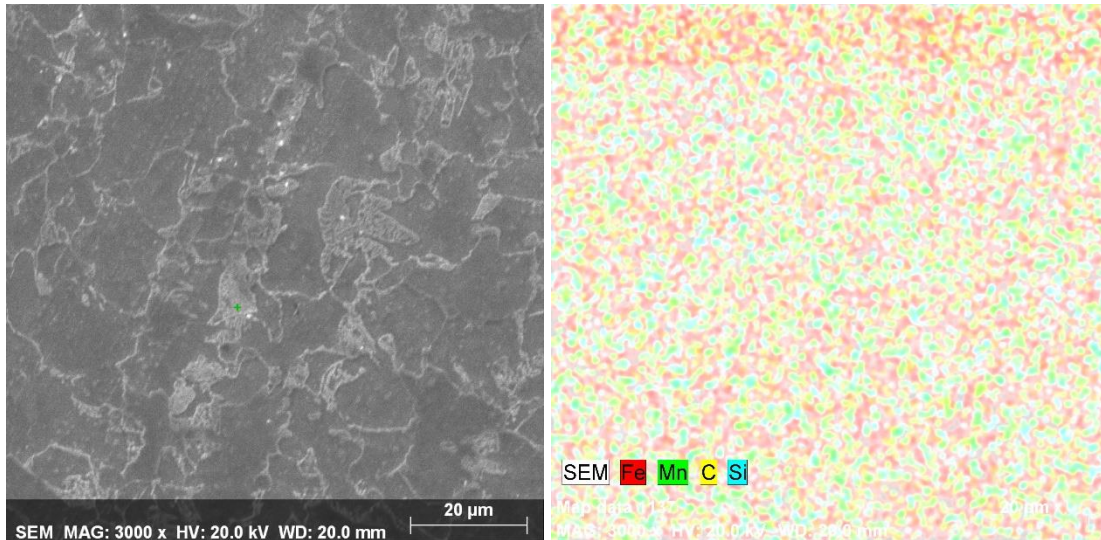


Slika 36. Točka mjerenja kemijskog sastava

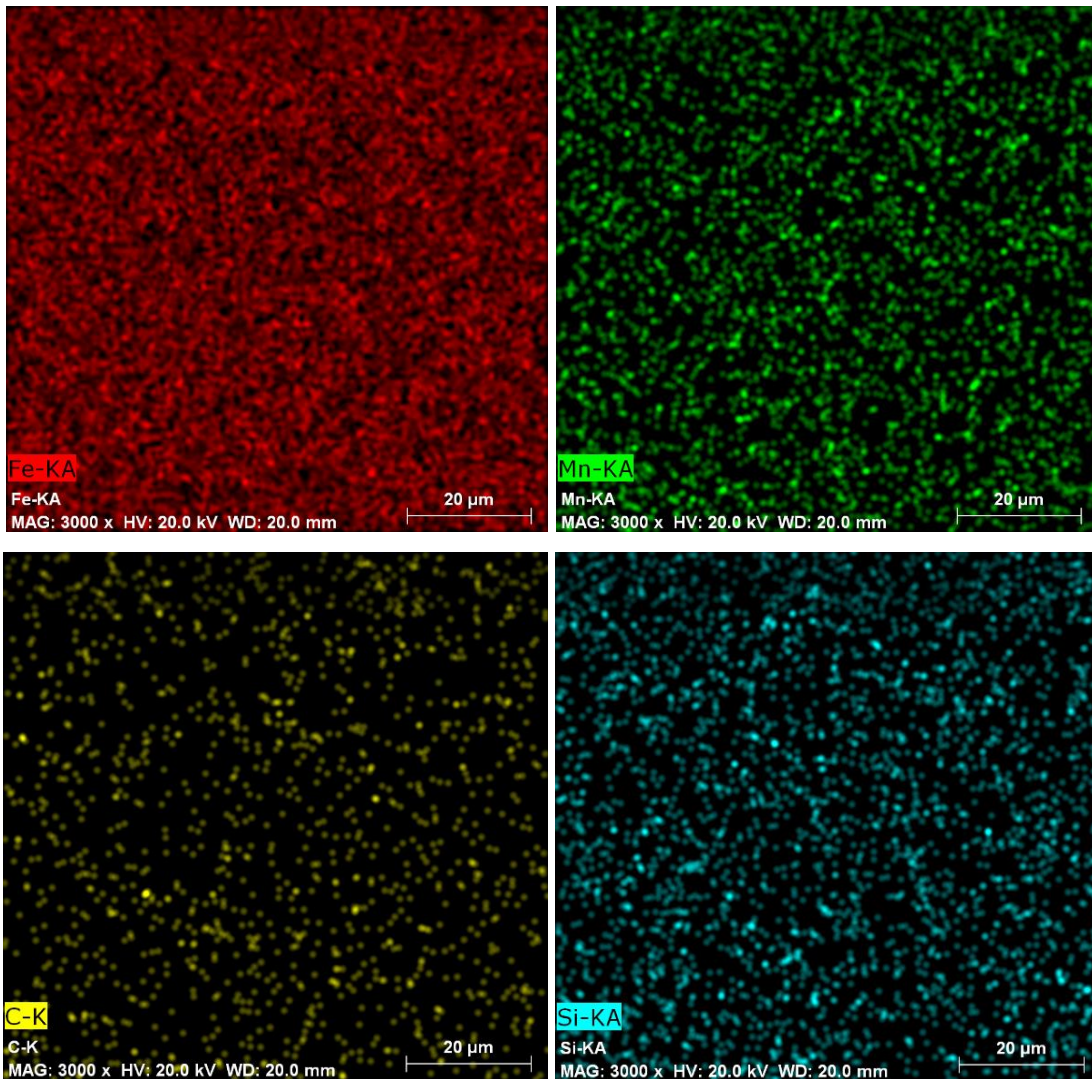


Slika 37. Kemijski sastav prema ispitivanju EDS metodom

Raspodjelu pojedinih elemenata u čeliku moguće je odrediti na SEM mapping metodom, slike 38 i 39.



Slika 38. Raspodjela pojedinih elemenata u čeliku dobiveno mapping metodom



Slika 39. Raspodjela Fe, Mn, C, Si u čeliku

Raspodjela pojedinih elemenata je vidljiva u okviru granica detekcije EDS metodom. Prema mikrostrukturi, slika 36, vidljivo je da se u strukturi nalaze feritna zrna i lamelarni perlit. Zbog male koncentracije ugljika u čeliku na slici 38 feritna i perlitna struktura se vide ali nije jasno izražen struktura lamelnog perlita.

Tehnološki proces izvlačenja cijevi opisan je u eksperimentalnom dijelu. Cijevi dimenzije  $\phi 30 \times 3.0$  mm izvlačena je u dvije provlake na konačnu dimenziju  $\phi 20 \times 2.0$  mm. Parametri izvlačenja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Izračun izvlačenja cijevi

IZRAČUN IZVLAČENJA CIJEVI						
AD	W	Trn/Rupa	Kg/m	$\lambda$	R %	L uložka
30.00	3.00	24.00	1.998			6.00
25.00	2.50	20.00	1.387	1.44	30.56	8.28
20.00	2.00	16.00	0.888	1.56	36.00	12.55

Cijevi su provlačene u dvije provlake. U prvoj provlaci konačna dimenzija cijevi dobivena je  $\phi 25 \times 2.5$  mm pri čemu je ostvarena redukcija od 30.56 %. U drugoj provlaci konačna dimenzija cijevi dobivena je  $\phi 20 \times 2.0$  mm pri čemu je ostvarena redukcija od 36.00%. Vidi se iz tablice 2 da se dobije uložni materijal duljine 6 m i da nakon prve provlake duljina uložka se poveća za 2.28 metara uz izduženje od 1.44 i postotkom redukcije od 30.56%. Također u drugoj provlaci kao i prvoj ostvareno je izduženje i iz cijevi od 8.28 m dobivena je cijev duljine 12.55 m. Ostvarena je ukupna redukcija presjeka cijevi od 55.56 %.

Nakon hladnog izvlačenja sve cijevi su ispitane vizualnom kontrolom i ultrazvučnom metodom. Ni na jednoj cijevi nije pronađena greška. Posebnu pozornost posvećena je vizualnoj kontroli. Utvrđeno je da se na površini cijevi ne javljaju Lüdersove linije. Ovo je bilo važno jer kod nekih mikrolegiranih čelika dolazi do pojave Lüdersovih linija.

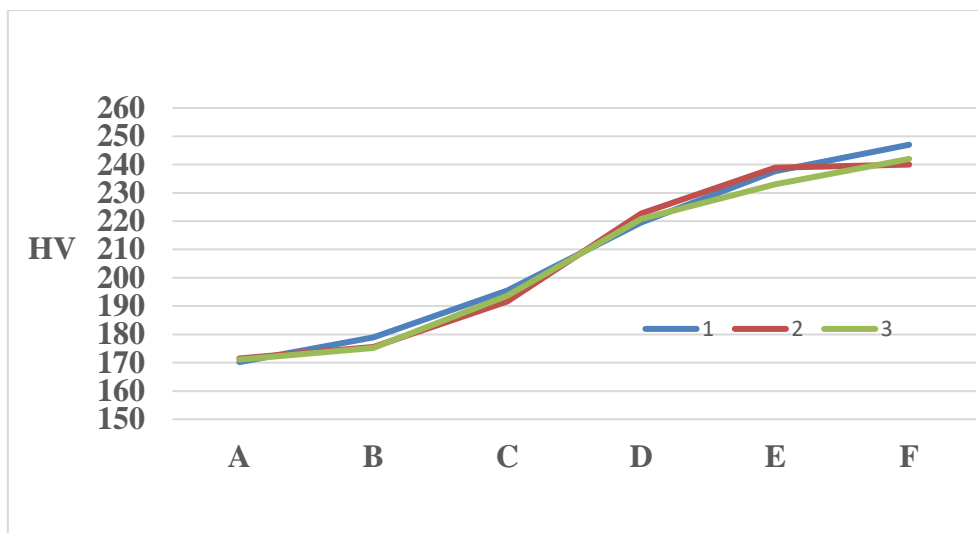
Na uzetim uzorcima cijevi iz zone deformacije u obje provlake, provedeno je mjerenje tvrdoće u cilju ispitivanja očvršćivanja materijala tijekom izvlačenja. Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom po Vickersu.

Rezultati ispitivanja promjene tvrdoće u zoni deformacije cijevi  $\phi 30 \times 3.0$  mm na dimenziju  $\phi 25 \times 2.5$  mm su prikazan u tablici 3. Mjerenja su provedena na točkama 1, 2 i 3 te po dužini zone deformacije od točke A do točke F sukladno slici 27.

Tablica 3. Tvrdoća cijevi nakon prve provlake

Broj mjerenja	A	B	C	D	E	F
1	170.2	179	195.5	219.6	237.6	247
2	171.5	175.6	191.6	222.7	238.9	240
3	171.1	175.2	193.6	220.8	233	242

Iz tablice se vidi da tvrdoća u obje provlake raste s porastom redukcije u zoni deformacije. Porast tvrdoće u zoni deformacije jasno je vidljiv na slici 40. Rezultati izmjerene tvrdoće na mjestima 1, 2 i 3 približno su na istom mjestu jednaki i imaju isti trend rasta kroz zonu deformacije.



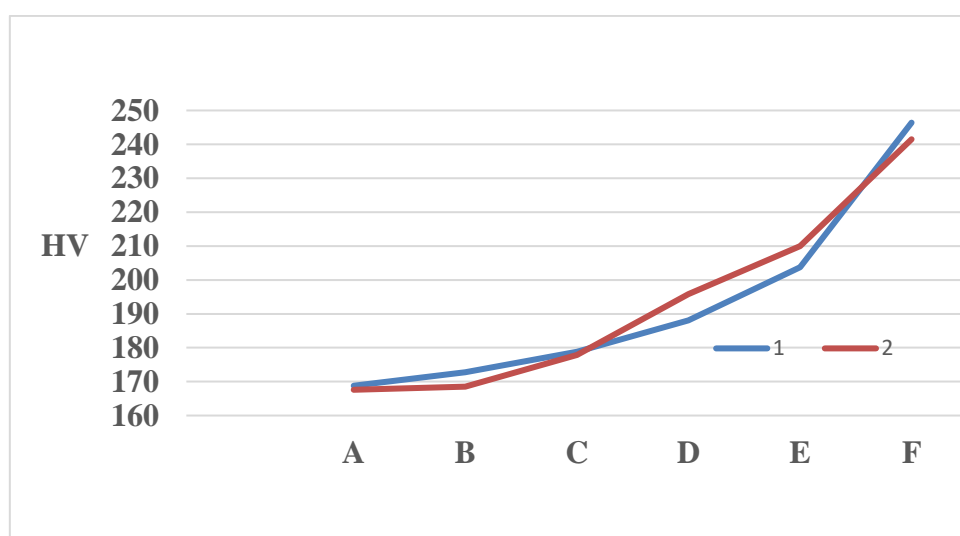
Slika 40. Rezultati mjerenja tvrdoće metode po Vickersu

Slika 40 pokazuje značajno očvršćivanje materijala tijekom deformacije. Tvrdoća čelika prije zone deformacije iznosila je približno 165 HV, a na kraju zone deformacije približno 245 HV.

Nakon prve provlake cijev je žarena na temperaturi od 920°C. Pri tome je ostvareno značajno omekšanje cijevi. Tvrdoća cijevi nakon žarenja približno je jednaka tvrdoći prije prve provlake. To je cilj žarenja cijevi. Nakon žarenja provedena je druga provlaka. Rezultati ispitivanja promjene tvrdoće u zoni deformacije cijevi  $\phi$  25 x 2.5 mm na dimenziju  $\phi$  20 x 2.0 mm su prikazan u tablici 4. Mjerenja su provedena na točkama 1 i 2 te po dužini zone deformacije od točke A do točke F sukladno slici 27.

Tablica 4. Tvrdoća cijevi nakon druge provlake

Broj mjerenja	A	B	C	D	E	F
1	168.8	172.8	178.8	188.1	203.7	246.4
2	167.6	168.5	177.9	195.8	210	241.5



Slika 41. Rezultati mjerenja tvrdoće metode po Vickersu



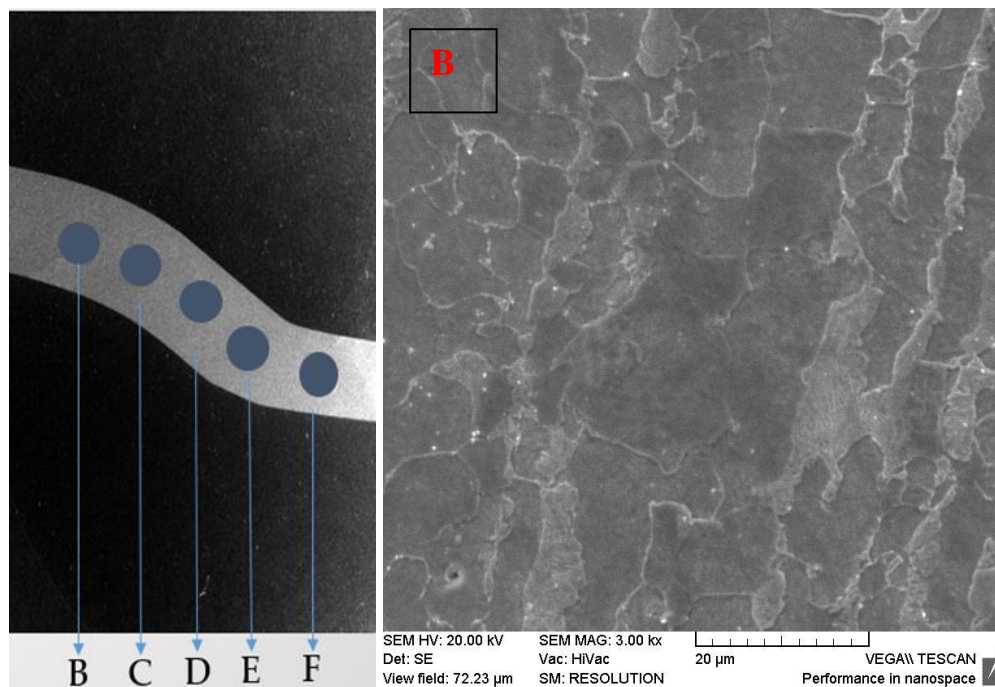
Slika 41 pokazuje značajnu očvršćivanje materijala tijekom deformacije i u drugoj provlaci. Tvrdooća čelika prije zone deformacije iznosila je približno 168 HV, a na kraju zone deformacije približno 250 HV.

U obje provlake ostvaren je približno isti stupanj redukcije. U drugoj provlaci stupanj redukcije je veći za 5.44 %. Na kraju zone deformacije iz druge provlake izmjerena je i nešto veća tvrdoća.

Usporedbom slika 40 i 41 vidi se da se tijekom hladnog izvlačenja ostvaruje značajno ojačanje materijala u zoni deformacije. Posljedica toga su promjene u mikrostrukтури i povećanje gustoće dislokacija.

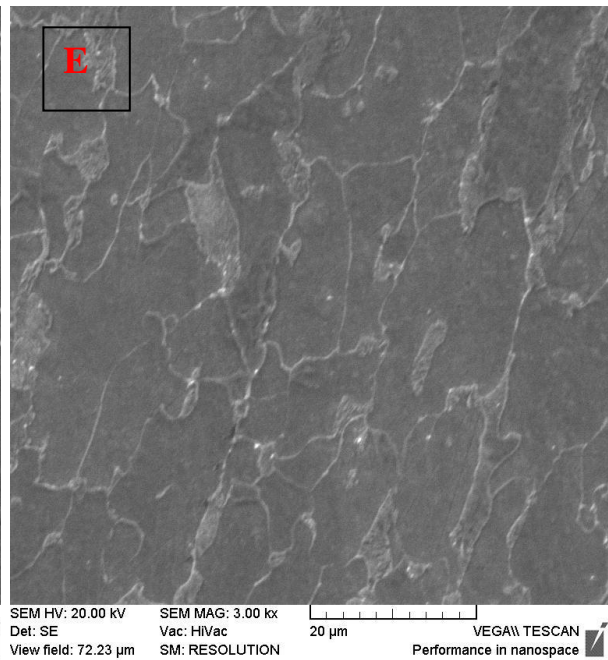
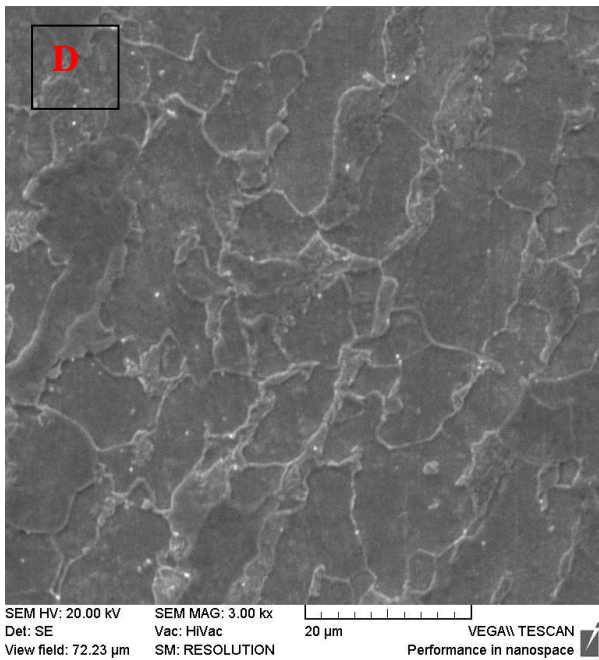
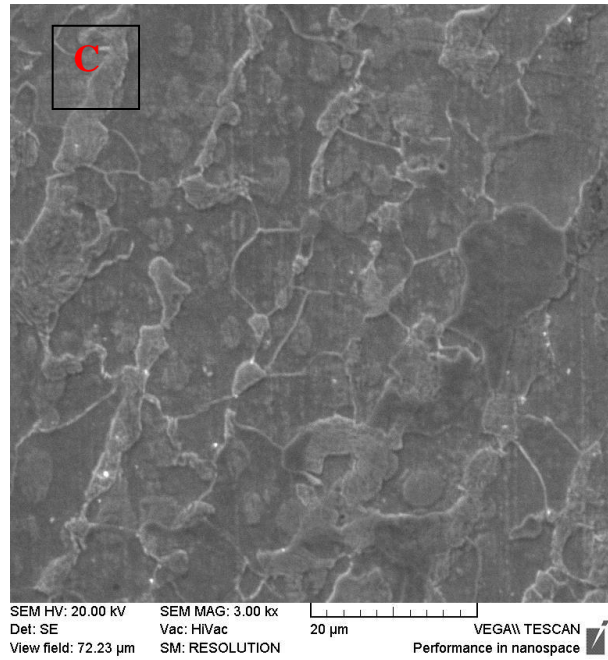
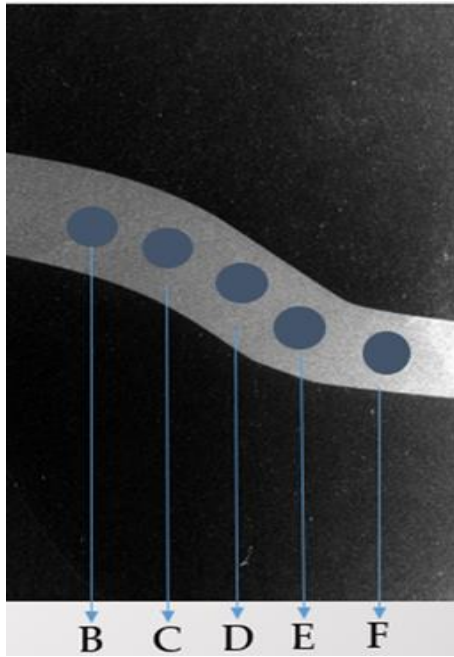
Prema shemi na slici 32. provedena su ispitivanja promjena u mikrostrukтури u zoni deformacije. Da bi se jasnije uočile promjene u produljenju zrna u zoni deformacije ispitivanja su provedena na SEM-u. Ispitivanja su provedena na uzorku uzetom iz zone deformacije u drugoj provlaci kod izvlačenja cijevi  $\phi 25 \times 2.5$  mm na  $\phi 20 \times 2.0$  mm. U prikazanim slikama, slike 42 – 44, vidljiva je promjena između zrna, tj. prolaskom kroz zone deformacije, od zone prije deformacije pa do zone nakon deformacije, uočljivo je da se kristalna zrna izdužuju.

Na slici 42 B, neposredno prije zone deformacije struktura je homogena feritno perlitna s veličinom zrna oko  $10 \mu\text{m}$ .



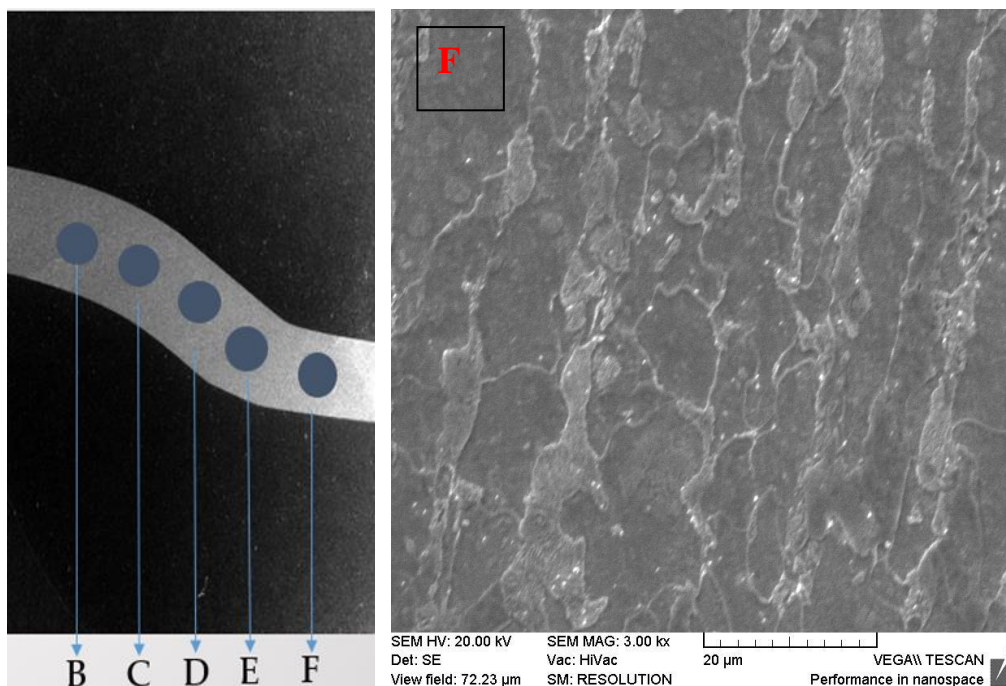
Slika 42. Mikrostruktura cijevi prije zone deformacije (točka B)

Na slici 43, prikazane su strukture u zoni deformacije u točkama C, D i E. Usporedbom slika jasno je vidljiv utjecaj deformacije. Povećanjem stupnja deformacije dolazi do izduženja kristalnog zrna. U točki C vidi se utjecaj deformacije i produljenja zrna. U točki D zrno se još više izdužuje. Na kraju zone deformacije u točki E feritno zrno je produljeno s izduženim trakama perlita.



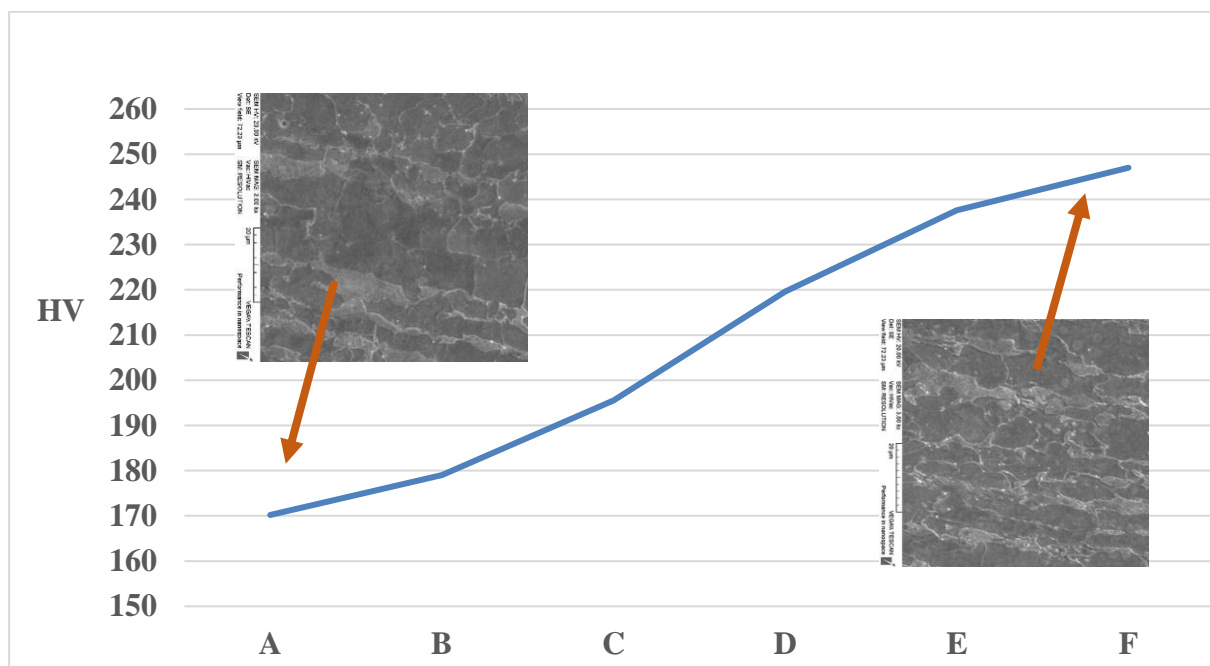
Slika 43. Promjena mikrostrukture cijevi tijekom deformacije

Na kraju zone deformacije slika 44 točka F, kristalno zrno je još više izduženo. Kako se tijekom hladne deformacije ne odvijaju procesi rekristalizacije i oporavka zrna vidljivo je sa slike 44 F, da je struktura s traka izduženih zrna ferita i perlita.



Slika 44. Mikrostruktura na karaju zone deformacije

Na slici 45, prikazana je promjena tvrdoće i promjena strukture na početku i kraju zone deformacije.



Slika 45. Očvršćivanje u zoni deformacije

Slika 45 jasno pokazuje da porastom deformacije dolazi do očvršćivanja čelika. Očvršćivanje je posljedica povećanja gustoće dislokacija. To se manifestira sa povećanjem tvrdoće kroz zonu deformacije. Pošto se ne odvijaju procesi rekristalizacije i oporavka zrna kod hladne deformacije kristalna zrna se izdužuju. Na kraju deformacije jasno je vidljivo izduženje kristalnog zrna i kao posljedica toga trakasta struktura.

## 6. ZAKLJUČAK

Provedena istraživanja su pokazala da je moguće hladnim izvlačenjem s visokim stupnjem deformacije dobiti kvalitetnu hladno vučenu cijev. Kako su ova istraživanja rađena s ciljem pojave Lüdersovih linija koje su vidljive na površini cijevi iz mikrolegiranih čelika u ovom radu posebna pozornost posvećena je kontroli površine cijevi. Vizualnom kontrolom na cijevima nisu zapažene nikakve greške na površini cijevi.

Provedenim ispitivanjem promjene tvrdoće u zoni deformacije potvrđeno je da hladnom deformacijom dolazi do značajnog očvršćivanja čelika. Tvrdoća se značajno povećava od početka do kraja zone deformacije. To je posljedica izostanka procesa rekristalizacije i oporavka zrna. Obzirom da kod visokog stupnja deformacije dolazi do značajnog očvršćivanja čelika potrebno je provesti više provlaka da bi se dobila konačna dimenzija, znatno manja od početne dimenzije. Pri tome je potrebno provesti normalizaciju i žarenje.

Detaljnou analizom mikrostrukture na skenirajući elektronskom mikroskopu potvrđeno je da hladnom deformacijom dolazi do značajnog produljenja kristalnog zrna. Na početku zone deformacije zrno je ravnoosno. Na kraju zone deformacije kristalna zrna su izdužena. Cijevi nakon hladnog izvlačenja imaju izdužena feritna zrna s trakama perlita.

## 7. LITERATURA

- [1] Rešković: Tehnologije oblikovanja deformiranjem, interna skripta, Sveučilišta u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2018.
- [2] M. Math: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Fsb, Zagreb, 2004.
- [3] S. Rešković: Teorija oblikovanja deformiranjem, recenzirana predavanja, Sveučilišta u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2014., [www.simet.hr](http://www.simet.hr)
- [4] Z. Vnućec, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, strojarski fakultet Slavonski brod, Nauka o čvrstoći
- [5] S. Rešković, D. Trninić, D. Kostić, I. Knežić: Probna proizvodnja tankostijenih šavnih cijevi malih promjera, Elaborat, Željezara Sisak, "IRI". d. o. o., Sisak 1993.
- [6] S. Rešković, A. Preloščan, R. Križanić: Hladno vučene šavne cijevi mikrolegirane niobijem za automobilsku industriju, Elaborat, Institut za metalurgiju, Sisak, 1984.
- [7] Rešković, Stoja; Brlić, Tin; Vodopivec, Franc; Novosel-Radović, Vjera; Franz, Mladen: Influence of Finish Rolling Temperature on the Mechanical Properties of Niobium Microalloyed Tubes// 16th International Scientific Conference on Production Engineering - CIM 2017 / Zagreb: 2017. str. 213-216
- [8] MEER, Upute za korištenje strojeva, pogonska dokumentacija,
- [9] S. Rešković: Plan ispitivanja cijevi u industrijskim uvjetima. Dokumentacija projekta . HRZZ IP-2016-06-1270 „Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije“ projekta, Sveučilišta u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2018
- [10] S. Rešković: Ispitivanje materijala, recenzirana predavanja, Sveučilišta u Zagrebu Metalurški fakultet Sisak, 2009., slajd 1-460, [www.simet.hr](http://www.simet.hr)
- [11] Lana Šimeg, Primjena elektronske mikroskopije u karakterizaciji prirodnih materijala završni rad, Sveučilište u Zagrebu Fsb, Zagreb godina (19.05.2019)

## **8. ŽIVOTOPIS**

### **OSOBNI PODACI:**

**Ime i prezime:** Patrik Tarandek

**Datum i mjesto rođenja:** 28.11.1997. Čakovec

**Adresa:** dr. Vinka Žganca 53, Vratišinec

**Telefon:** 0989174002

**Email:** patriktarandek86@gmail.com

### **OBRAZOVANJE**

2012-2016 Tehnička škola Čakovec

2016- 2019 - Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

### **ZANIMANJE**

Računalni tehničar za strojarstvo

### **RADNO ISKUSTVO**

1.02. – 1.03. 2019. Rohrwerk Maxhütte Sisak

1.7. – 27.09.2019. LTH Alucast Čakovec

### **VJEŠTINE**

Rad na računalu: Vrlo dobro poznavanje operacijskog sustava Windowse, rad u programskom paketu MS Office, AutoCAD, CATIA

### **ZNANSTVENO ISTRAŽIVAČKE AKTIVNOSTI**

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

**2.** P. Tarandek “Hladno izvlačenje čeličnih cijevi“ 18th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE Coexistence of Materials Cience and Sustainable Technology in Economic Growth Sisak, May 15th -17th, 2019

**3.** 1. mjesto za izlaganje rada na 18th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE Coexistence of Materials Cience and Sustainable Technology in Economic Growth Sisak, May 15th -17th, 2019