

# Utjecaj mikrolegirajućeg elementa niobija na raspodjelu naprezanja kod hladne deformacije

---

**Komosar, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:115:600170>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Karlo Komosar

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Karlo Komosar

UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆEG ELEMENTA NIOBIJA NA  
RASPODJELU NAPREZANJA KOD HLADNE DEFORMACIJE

ZAVRŠNI RAD

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

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

- prof.dr.sc. Ladislav Lazić, predsjednik
- prof.dr.sc. Stoja Rešković, član
- doc.dr.sc. Ivan Jandrlić, član
- izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar, zamjenski član

Sisak, rujan 2018.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Karlo  
PREZIME: Komosar  
MATIČNI BROJ: BM-2477/14

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:

UTJECAJ MIKROLEGIRAJUĆEG ELEMENTA NIOBIJA NA RASPODJELU

NAPREZANJA KOD HLADNE DEFORMACIJE

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

Sisak, 11.9.2018.

Komosar

(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 27.4. do 31.9.2018. 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 svom stručnom voditelju Tinu Brliću koji je uvijek pronašao vremena za moje brojne upite te me usmjeravao u izradi kvalitetnog rada.

Posebnu zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji, roditeljima i sestri, koji su me uvijek podržavali i motivirali na daljnji trud i rad i u teškim trenucima, jer kako oni kažu: „Znanje je ipak najveća moć.“

Velika HVALA svima!

## **SAŽETAK**

### **Utjecaj mikrolegirajućeg elementa niobija na raspodjelu naprezanja kod hladne deformacije**

Ispitivanje ponašanja niskougljičnih čelika predstavlja veliki interes u znanstvenom svijetu obzirom na njihovo različito ponašanje tijekom procesa deformacije. U ovom završnom radu provedena je termografska analiza niskougljičnih čelika sa i bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija. Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici uz istovremeno korištenje metode termografije. Ispitivani niskougljični čelici sa 0.035% i bez dodatka elementa niobija pokazali su da mikrolegirajući element niobij i brzina razvlačenja imaju utjecaj na raspodjelu naprezanja kod hladne deformacije.

Ključne riječi: mikrolegirani čelici, niobij, statičko vlačno ispitivanje, hladna deformacija, termografija

## **ABSTRACT**

### **The influence of microalloying element niobium on stress distribution in cold deformation**

Testing the behavior of low carbon steels presents a major interest in the scientific world due to their different behavior during the deformation process. In this bachelor thesis a thermographic analysis of low carbon steels was performed with and without the addition of microalloying element niobium. The static tensile test was performed on the testing machine simultaneously using the thermographic method. Examined low carbon steels with 0.035% and low carbon steels without niobium showed that microalloying element niobium and stretching speed have an effect on stress distribution in cold deformation.

Key words: microalloying steels, niobium, static tensile test, cold deformation, thermography

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. MIKROLEGIRANI ČELICI .....	2
2.2. HLADNA DEFORMACIJA .....	6
2.3. PRIMJENA TERMOGRAFIJE KOD ISTRAŽIVANJA ČELIKA .....	9
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	13
3.1. UZORCI .....	13
3.2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE .....	14
3.3. PRIPREMA UZORAKA ZA TERMOGRAFSKA ISPITIVANJA.....	16
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	19
5. ZAKLJUČAK .....	25
6. LITERATURA.....	27
7. ŽIVOTOPIS .....	29



## 1. UVOD

U posljednje vrijeme se oko 12% godišnje proizvodnje čelika (200 milijuna tona) odnosi na mikrolegirane čelike [1]. Mikrolegiranje čelika za cilj ima poboljšanje mehaničkih svojstava, te povećanje otpornosti prema atmosferskoj koroziji u odnosu na konvencionalne ugljične čelike. Riječ je o niskougljičnim čelicima sa dodatkom mikrolegirajućih elemenata do 0.06% [2]. Oni se u čeliku mogu nalaziti kombinirani međusobno ili pojedinačno [3]. Mikrolegiranje je tehnologija bazirana na teoretskom znanju o očvršćavanju mehanizama precipitacije, kontroli veličine zrna i deformaciji čelika [4]. Mikrolegirajući elementi u čelicima su niobij, vanadij, titan i aluminij [2]. Uz njih mikrolegirani čelici sadrže 0.03%-0.15% ugljika i do 1.5% mangana. Mikrolegiranjem se smanjuje sadržaj ugljika u čeliku te postiže bolja zavarljivost i čvrstoća u odnosu na čelike koji su bogatiji ugljikom. Mikrolegirani čelici su pronašli široku primjenu u proizvodnji industrijskih dijelova, jer je njihovim dodatkom znatno snižena cijena proizvodnje [3]. Također se koriste u izgradnji mostova, te u autoindustriji gdje se na račun visokih mehaničkih svojstava može smanjiti težina.

Dodatak niobija u mikrolegirane čelike igra veoma važnu ulogu [2]. Niobijem mikrolegirani čelici u sebi sadrže do 0.06% mikrolegirajućeg elementa niobija [5]. Niobij ograničava rast austenitnog zrna te zaustavlja rekristalizaciju austenita, što znači da se uz pomoć kontroliranog valjanja i kontroliranih tehnika hlađenja može povećati čvrstoća i žilavost čelika. Niobij je najznačajniji mikrolegirajući element u čeliku [2].

Čelici mikrolegirani niobijem intenzivno su istraživani 80-ih godina prošlog stoljeća. Tada nisu mogli biti pojašnjeni svi mehanizmi koji se odvijaju kod tople ili hladne deformacije. Posljednjih nekoliko godina, razvojem digitalne tehnologije, razvijene su nove metode ispitivanja. Za proučavanje procesa deformacije kod čelika koristi se metoda termografije. Razlog tome leži u činjenici da su nedavno razvijeni novi detektori zračenja na termografskim kamerama [6]. Termografija je nedestruktivna (NDT) metoda kojom se provodi analiza naprezanja, temeljeno na mjerenju infracrvenog zračenja koje emitira površinska komponenta izložena dinamičkom ili statičkom, linearnom elastičnom ili plastičnom naprezanju, te njegovom pretvorbom u vidljivu sliku, termogram. Površine koje emitiraju različite količine infracrvenog zračenja prikazane su na termogramu različitim bojama ili osvjetljenjem, dok površine koje emitiraju jednake količine topline imaju istu boju (izotermne površine) [7]. Pomoću termografije je moguće odrediti izvore i intenzitet toplinskog zračenja [8]. Tijekom deformacije u materijalu se odvijaju različita naprezanja, a njihova promjena u zoni deformacije povezuje se sa promjenom temperature.

Analizom podataka izmjerenih metodom termografije moguće je dobiti temperaturne raspodjele tijekom procesa deformacije, a time je moguće pratiti raspodjelu naprezanja u materijalu u zoni deformacije. Metodom termografije moguće je odrediti mjesto lokalizacije deformacije preko maksimalne promjene temperature [6]. Također termografija omogućava predviđanje lokalizacije naprezanja, nastajanja pukotina u metalnim konstrukcijama [8].

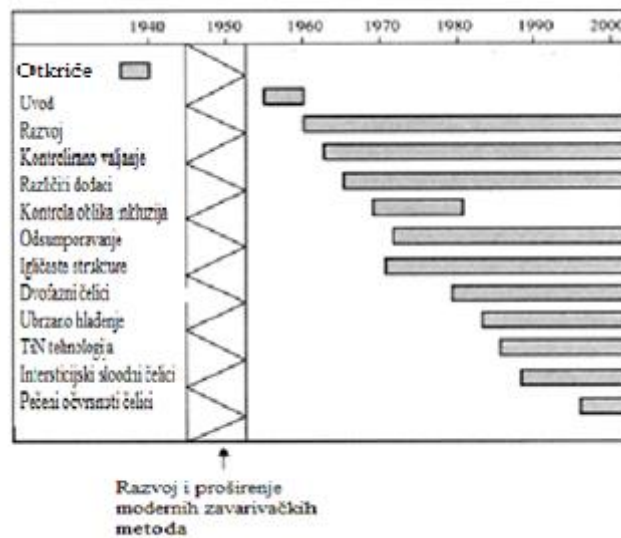
Cilj rada je, koristeći metodu termografije, istraživanje utjecaja brzine razvlačenja na raspodjelu naprezanja u zoni deformacija čelika mikrolegiranog s niobijem i niskougljičnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. MIKROLEGIRANI ČELICI

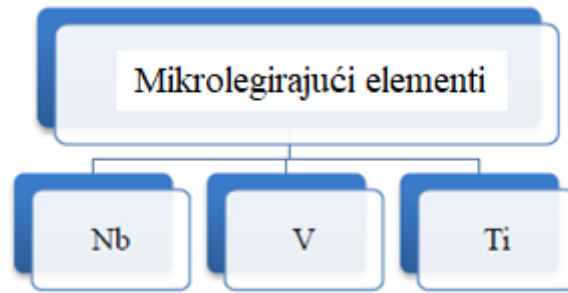
Mikrolegirani čelici danas pronalaze široku primjenu u mnogim poljima kao što su automobilska industrija, brodogradnja, izgradnja cjevovoda, proizvodnja posuda pod tlakom, građevina, te izgradnja mostova i spremnika. Primarna namjena mikrolegiranih čelika bila je za automobilsku industriju u kojoj su trebali zamjeniti niskougljične čelike radi poboljšanja čvrstoće. Potražnja za mikrolegiranim čelicima konstantno raste zbog visoke čvrstoće i odlične žilavosti, te zbog svojstva da se lako oblikuju [9]. Postupak mikrolegiranja temelji se na postupcima i mehanizmima tople deformacije, termomehaničke obrade, precipitaciji i rastu austenitnog zrna [4].

Razvoj mikrolegiranih čelika vezan je za zadnjih 50 godina. Najviše pažnje posvećeno je mikrolegiranju s niobijem. U kasnim 1970-ima i ranim 1980-ima većina istraživanja na niobijem mikrolegiranim čelicima provodila su se u SAD-u i Ujedinjenom Kraljevstvu. Prvi pokusi sa mikrolegiranjem provedeni su 35 godina ranije kada je običnim ugljičnim čelicima dodavana mala količina cirkonija. Vojni sukob bio je pokretačka snaga za razvoj čelika legiranih sa cirkonijem. Vojska je htjela proizvoditi lagane oklope izrađene od čelika legiranih cirkonijem, ali je došlo do prestanka razvoja tih čelika odmah po završetku vojnog sukoba. Veliki preokret u razvoju mikrolegiranih čelika je bila spoznaja koliko mali udio niobija u čeliku povećava njegovu čvrstoću i žilavost. Danas se proizvodi i do 200 milijuna tona mikrolegiranih čelika godišnje, što čini 12% svjetske proizvodnje čelika [1]. Na slici 1 prikazan je razvoj mikrolegiranih čelika u periodu od 1940. do 1960. godine, te njihova sve veća primjena.



Slika 1. Razvoj mikrolegiranih čelika od 1940. do 2000. [3, 9]

Mikrolegirani čelici razvijeni su s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava, te otpornosti na atmosfersku koroziju u odnosu na obične ugljične čelike. Primarni cilj mikrolegiranih čelika je zadovoljavanje specifičnih mehaničkih svojstava [8]. Mikrolegirani čelici sadrže do 0.06% mikrolegirajućih elemenata niobija, titana i vanadija, slika 2 [2].



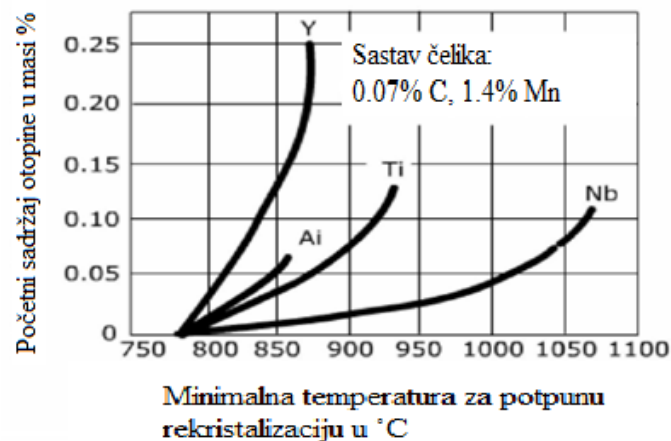
Slika 2. Važni mikrolegirajući elementi u čeliku [2]

Navedeni elementi tvore stabilne spojeve karbide, nitride ili karbonitride, te na taj način povećavaju čvrstoću čelika. Glavna svojstva koja ovi čelici moraju zadovoljiti su određena granica razvlačenja i dobra zavarljivost [3]. Osim navedenih elemenata, mikrolegirani čelici mogu sadržavati i molibden, cirkonij, bor, aluminiј, dušik i rijetke zemne metale. Također mikrolegiranim čelicima se dodaju jako male količine sumpora i telura kako bi se poboljšala njihova obradivost [1].

Svaki element u mikrolegirajućim čelicima ima različit utjecaj na te čelike. Vanadiј očvršćava precipitacijom u čeliku, te zbog dobrog afiniteta prema dušiku tvori vanadiјeve nitride koji su tvrdi i jako teško topivi. Uz njih također tvori i vanadiјeve karbide, ali oni su mekši i lakše topivi od vanadiјevih nitrida.

Dodatkom titana u mikrolegirane čelike smanjuje se zrno u čeliku. Kao i vanadiј, titan u čelicima tvori karbide i nitride [6].

Niobij sa dušikom i ugljikom tvori vrlo stabilne spojeve nitride, karbide i karbonitride [5]. Koči rekristalizaciju prilikom termomehaničke obrade, a topivost mu ograničava sadržaj ugljika i dušika u mikrolegiranom čeliku. Niobijevi spojevi, nitridi i karbonitridi, sprječavaju rast zrna, te koče rekristalizaciju u austenitu. Niobij nema afinitet prema kisiku i sumporu te s njima ne tvori nikakve spojeve. Osim rekristalizacije usporava i faznu transformaciju, a čelici koji su mikrolegirani niobijem pokazuju otpornost na starenje [6]. Na slici 3 prikazani su utjecaji mikrolegiranja pomoću različitih mikrolegirajućih elemenata na temperaturu rekristalizacije.



Slika 3. Utjecaj mikrolegiranja na temperaturu rekristalizacije [2, 10]

Kada se govori o mikrolegirajućim čelicima postoje tri glavna svojstva. Tri najbitnija svojstva mikrolegirajućih čelika su visoka granica razvlačenja i visoka čvrstoća i dobra zavarljivost. Niska prijelazna temperatura žilavosti i visoka granica razvlačenja postižu se rafinacijom feritnog zrna.

Očvršćavanje čvrste otopine veoma je ovisno o topivosti niobija i dušika. Dušik otopljen u feritu koji formira stabilne niobijeve nitrde koji imaju sposobnost rafinacije austenitnog i feritnog zrna.

Mikrolegirani feritno-perlitni čelici imaju jako mali udio (<0.1%) elemenata koji tvore karbide i karbonitride. To su niobij, vanadij i/ili titan, a oni služe za očvršćavanje precipitatima, smanjenje zrna i kontrolu temperature transformacije.

Valjani perlitni čelici obuhvaćaju čelike koji sadrže ugljik i mangan, te mali dodatak ostalih legirajućih elemenata. Dodatkom legirajućih elemenata poboljšavaju se čvrstoća, žilavost, zavarljivost, te ih je lakše oblikovati.

U današnjici se mikrolegirani čelici dobivaju kombinacijom kemijskog sastava i određenih parametara termomehaničke obrade. Glavni cilj mikrolegiranja je postizanje ravnoteže između čvrstoće, deformabilnosti i duktilnosti. Ova svojstva su ovisna o mikrostrukturnim značajkama, dok zavarljivost ovisi o kemijskom sastavu [3]. Nakon provedene termomehaničke obrade toplo valjana traka poprima željenu veličinu zrna, homogenu mikrostrukturu i dobra mehanička svojstva. Nakon toplog valjanja traka se može hladno deformirati kako bi se dobile željene dimenzije i bolja površinska kvaliteta [4].

Postoji više mehanizama za ojačanje čvrstoće čelika:

Prvi mehanizam je ojačavanje pomoću dislokacija. Dolazi do otpora pri pomicanju dislokacija zbog prepreka koje čine druge dislokacije. Ovaj mehanizam je ograničen zbog zasićenja strukture dislokacijama.

Ojačanje granice zrna provodi se jer granice zrna koče kretanje dislokacija. Zrna se usitnjavaju dok se ne postigne vrlo mala veličina. Pomoću ovog mehanizma postiže se jako velika čvrstoća čelika.

Otpor kretanju dislokacija zbog intersticijskih ili supstitucijskih atoma u kristalnoj rešetci dovodi do ojačavanja čvrste otopine. Ovaj mehanizam ograničen je granicom topivosti legirajućih elemenata.

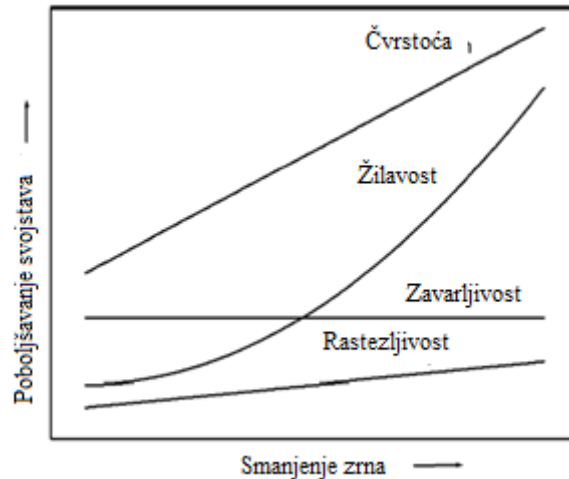
Ojačavanje precipitacijom provodi se obzirom da precipitati pružaju otpor kretanju dislokacija. Precipitati mogu nastati iz superzasićene čvrste otopine.

Ojačanje teksturom pruža otpor pomicanju dislokacija zbog orijentacije zrna. Ovaj mehanizam nije jednako moćan kao ostali mehanizmi očvršćavanja, dok je razvoj teksture otežan u čelicima koji imaju disperznu drugu fazu.

Ojačavanje faznom transformacijom je zadnji mehanizam očvršćavanja. Odnosi se na sprječavanje kretanja dislokacija zbog prisutnosti novoformirane faze koja je uvedena faznom transformacijom, naprimjer transformacijom austenita u feritno-perlitnu strukturu. Ojačanje

deformacijom u dvofaznom području je najnoviji mehanizam koji daje nove mogućnosti u postizanju boljih mehaničkih svojstava.

Najdominantniji od svih mehanizama je jačanje granice zrna, jer se utjecaj na veličinu zrna može postići modifikacijom kemijskog sastava i parametara valjanja [3]. Na slici 4 prikazan je utjecaj veličine feritnih zrna na mehanička svojstva.



Slika 4. Utjecaj veličine feritnog zrna na mehanička svojstva [3,11]

Čelici mikrolegirani niobijem imaju uobičajeni sadržaj tog elementa od 0.02 do 0.06% [5]. Čvrstoća ovih čelika povećava se uslijed očvršćavanja precipitatima. Niobijem mikrolegirani čelici se dobivaju kontroliranim termomehaničkim valjanjem, ubrzanim hlađenjem i izravnim gašenjem [12]. Odgovarajući sadržaj niobija, ugljika i dušika, te parametri termomehaničke obrade, posebno u završnoj fazi, osiguravaju smanjenje veličine zrna ferita i poboljšavaju svojstva valjanog čelika. Tijekom austenizacije, precipitati niobijevih karbida se otpe i ponovno izlučuju na nižim temperaturama valjanja. Niobij se veže u nitride, karbide i karbonitride koji su prepreke gibanju dislokacija, a koje utječu na mehanička svojstva i mehanizme rekristalizacije i oporavka.

Posljednjih godina, zahvaljujući suvremenim eksperimentalnim metodama kao što su termografija, digitalna korelacija slike i magnetska Barkhausenova metoda, istraživanje ponašanja materijala pokazuje nove fenomene na početku plastične deformacije [5]. Termografija pomoću izmjerenih površinskih temperaturnih promjena u zoni deformacije nudi jasnu sliku toka materijala tijekom plastične deformacije. Do sada su termografska istraživanja pokazala da se kod nekih čelika s jasno definiranom gornjom i donjom granicom razvlačenja, sporim statičkim produljenjem javlja lokalizirana plastična deformacija. Deformacija je prikazana kao širenje linija što najnovija ispitivanja povezuju sa formiranjem Lüdersovih linija. Na formiranje i širenje Lüdersovih linija duž zone deformacije utječe više parametara. Ovo područje nije istraženo i danas se intenzivno istražuje. Povezuje se sa brzinom deformacije, početnom strukturom, te dislokacijama u čeliku [5,13].

## 2.2. HLADNA DEFORMACIJA

Deformacija je promjena oblika nekog tijela uslijed djelovanja vanjskih sila na to tijelo. Iako dolazi do promjene oblika volumen tijela se ne mijenja. Djelovanju vanjskih sila odupiru se unutarnje sile i one se nazivaju naprezanja. Naprezanja se mogu podijeliti na:

- normalna naprezanja,  $\sigma$  i
- tangencijalna (smična) naprezanja,  $\tau$ .

Deformacija ovisi o strukturi, a metali imaju potpuno određeni geometrijski pravilni i periodički ponovljiv prostorni poredak. Za metale su najčešća tri tipa kristalne rešetke:

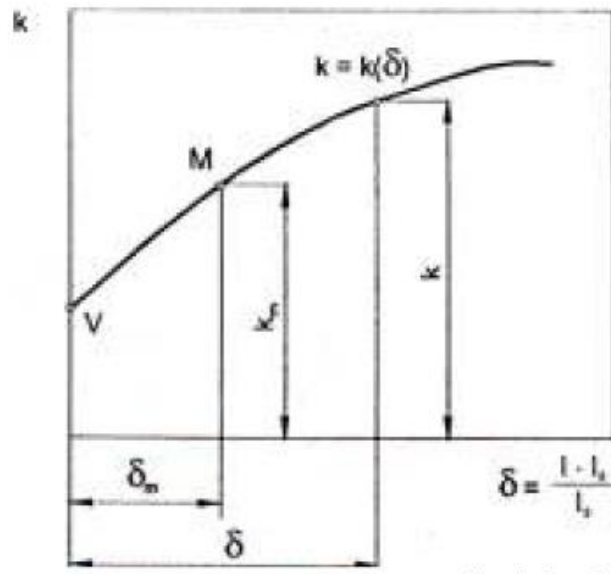
- prostorno centrirana kubična rešetka,
- plošno centrirana kubična rešetka i
- heksagonalna rešetka.

Ovisno o temperaturi na kojoj se odvija deformacija dijelimo ju na toplu i hladnu. Ako je temperatura pri kojoj se provodi deformacija niža od temperature rekristalizacije onda se govori o hladnoj deformaciji [14]. Hladna deformacija se provodi kada se trebaju postići određena mehanička svojstva, točniji oblici i dimenzije proizvoda, te bolja površina gotovog proizvoda. Ova vrsta deformacije se provodi nakon tople deformacije.

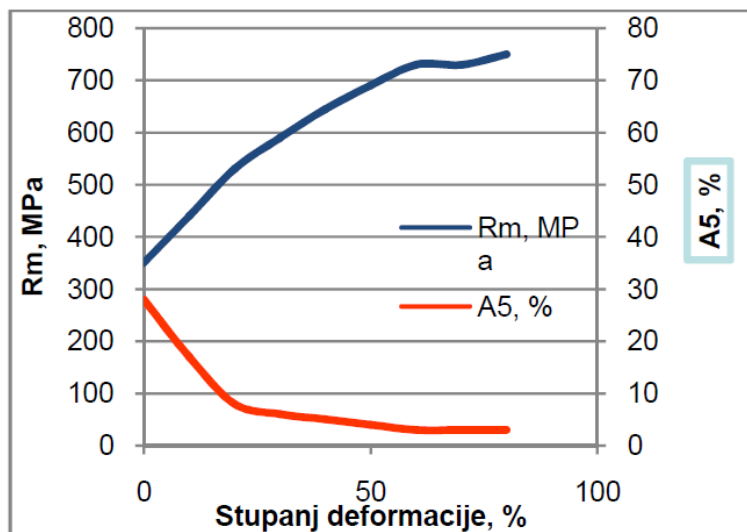
Istraživanja pokazuju [6] da se mikrolegirani čelici drukčije ponašaju od niskougličnih čelika bez dodatka mikrolegirajućih elemenata pri hladnoj deformaciji. Mehanizmi hladne deformacije kod niobijem mikrolegiranog čelika nisu do kraja razjašnjeni. Čelici očvršćavaju uslijed hladne deformacije. Hladna deformacija ne uključuje oporavak i rekristalizaciju, pa čelik zadržava deformiranu strukturu. Dolazi do porasta granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a smanjuje se plastičnost [6]. Mehanička energija koja se utroši na hladnu deformaciju u velikoj mjeri se transformira u unutarnju energiju materijala koji se podvrgava deformaciji. Porast energije s deformacijom očituje se u porastu temperature materijala i alata tijekom i nakon deformacije. Dio energije se pohranjuje u materijalu kao energija naprezanja. Dolazi do porasta pohranjene energije paralelno sa porastom stupnja deformacije, te sa smanjenjem brzine.

Na slici 5 prikazana je krivulja očvršćavanja materijala hladnom deformacijom [14].

Kod hladne deformacije dolazi do sječanja dislokacija uslijed različite orijentacije polikristalnih ravnina klizanja. Na taj se način dislokacije međusobno blokiraju i/ili poništavaju. Kako raste stupanj deformacije, tako dolazi i do porasta stupnja očvršćavanja. To je posljedica veće gustoće dislokacija, koje rastu paralelno sa porastom stupnja deformacije. Sa porastom gustoće dislokacija rastu i unutarnja naprezanja u materijalu [14]. Na slici 6 dan je grafički prikaz mehaničkih svojstva niskougličnog čelika u zavisnosti o stupnju deformacije [14].



Slika 5. Krivulja očvršćavanja materijala hladnom deformacijom [14,15]



Slika 6. Mehanička svojstva niskougličnog čelika u zavisnosti o stupnju deformacije [14,15]

Brzina deformacijskog očvršćavanja smanjuje se sa porastom temperature [14]. Krivulja očvršćavanja može se podijeliti u 3 stadija. Intenzitet i duljina trajanja tih stadija ovisi o vrsti čelika, orijentaciji, temperaturi, veličini kristala i brzini deformacije. Utjecaj brzine deformacije na hladnu deformaciju je ovisan o ispitivanom materijalu. Kod materijala koji su osjetljivi na brzinu deformacije, porastom brzine ispitivanja raste granica proporcionalnosti i vlačna čvrstoća dok plastičnost opada. Omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće mijenja se tako da raste granica razvlačenja.

Istraživanje hladne deformacije metala i legura je većinom bazirano na utjecaju raznih parametara deformacije na pokazatelje plastičnosti i iznose deformacijskog otpora. Uočene su određene promjene koje su povezane sa zakonima plastične deformacije. Međutim te promjene ne mogu pojasniti poznati mehanizmi procesa tijekom hladne deformacije, niti

moгу kvantificirati učinak deformacije na naprezanje i njegovu raspodjelu u zoni deformacije [6].

Zagrijavanjem hladno deformiranog čelika moguće je vratiti njegova fizikalna i mehanička svojstva djelomično ili u potpunosti. Kod zagrijavanja odvijaju se 2 procesa, statička rekristalizacija i statički oporavak. Statički oporavak je proces u kojem se mikrostruktura hladno deformiranih metala ne mijenja znatno. Događa se preraspodjela dislokacija i smanjenje naprezanja u materijalu. Temperatura oporavka ( $T_o$ ) ovisi o sastavu materijala i temperaturi taljenja ( $T_t$ ). Izražava se formulom:

$$T_o = (0,25 \text{ do } 0,3) T_t \quad (1)$$

Za vrijeme hladne deformacije oporavak nije moguć. Odvija se naknadno i zato se naziva statički oporavak. S porastom stupnja deformacije, ubrzava se oporavak materijala. Oporavak metala ovisi o više faktora: temperaturi naknadnog zagrijavanja, trajanju zagrijavanja i stupnju prethodne hladne deformacije.

Iznad temperature oporavka odvija se rekristalizacija. U procesu rekristalizacije iz velikih zrna s puno dislokacija nastaju nova, sitnija zrna. Do rekristalizacije dolazi kada se čelik nakon hladne deformacije zagrije na određenu temperaturu, a njen početak najavljuju rekristalizacijski centri ili klice. Temperatura rekristalizacije je ovisna o temperaturi taljenja, kao i temperatura oporavka:

$$T_R = 0,4 T_t \quad (2)$$

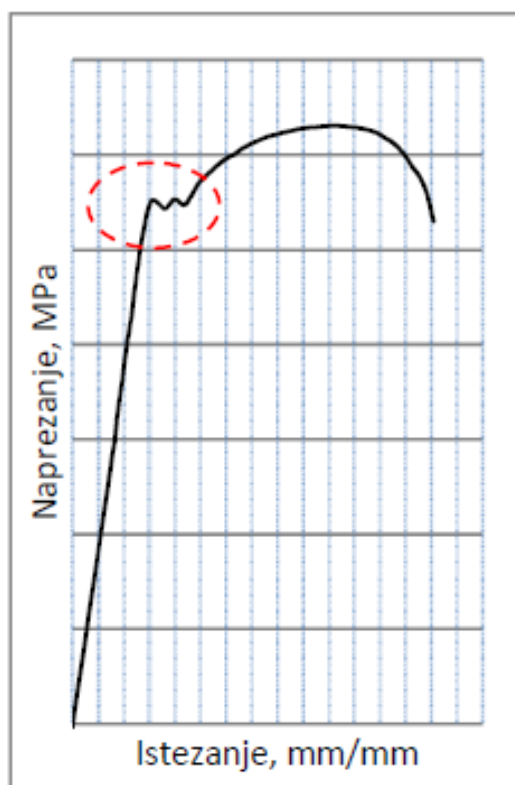
Zrno se smanjuje povećavanjem stupnja deformacije, dok s rastom temperature zagrijavanja raste veličina zrna. Ovisno o stupnju deformacije porast veličine zrna je manji ili veći. Kod sekundarne rekristalizacije može doći do nepoželjnog povećanja zrna [14].

Materijali oblikovani hladnom deformacijom imaju bolju dimenzijsku točnost i kvalitetu površine, povećanu čvrstoću, poboljšavaju se mehanička svojstva zbog izduživanja kristalnih zrna u pravcu tečenja materijala, te ne dolazi do gubitaka energije kao kod zagrijavanja. Kod hladne deformacije javljaju se određeni problemi. Veće su sile i rad deformiranja, početne površine poluproizvoda se moraju pažljivo očistiti, iznos deformacije ovisi o duktilnosti i očvršćavanju, a ponekad je za neke operacije potrebno rekristalizacijsko žarenje [16].

Provedena su usporedno ispitivanja mehaničkih svojstava na čelicima mikrolegiranim niobijem i niskougljičnim čelicima. Ona su pokazala mnogo veći iznos tvrdoće kod čelika koji su očvršćeni s precipitatima u odnosu na čelike bez prisutnosti precipitata. Kod čelika mikrolegiranih niobijem znatno su veći iznosi vlačne čvrstoće i granice razvlačenja u odnosu na niskougljične čelike. Prilikom naknadne obrade hladnom plastičnom deformacijom kod čelika mikrolegiranih niobijem ranije se očekuje očvršćavanje u odnosu na niskougljične čelike [6].

Čelici sa dodatkom mikrolegirajućeg elementa niobija pokazuju određene nehomogene deformacije u početku plastične deformacije. Po tome se razlikuju od niskougljičnih čelika istoga baznog kemijskog sastava. Nehomogene deformacije su vidljive tijekom provođenja statičkog vlačnog ispitivanja. Nakon dostizanja granice razvlačenja dolazi do zastoja prilikom porasta naprezanja, slika 7 [6].



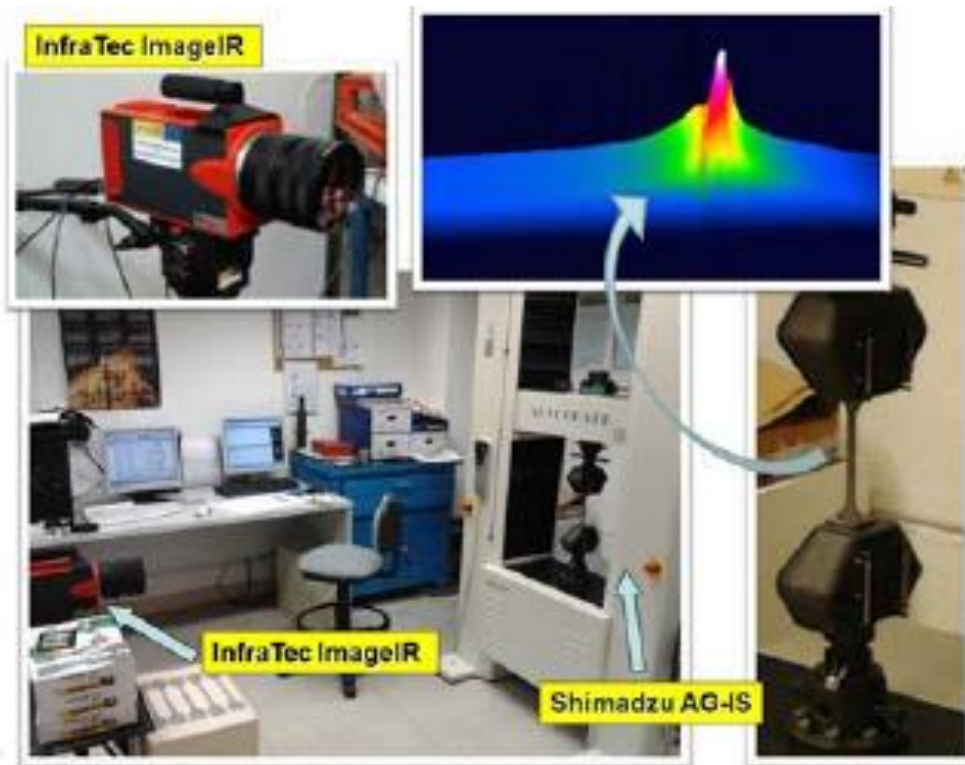


Slika 7. Dijagram istezanje-naprezanje sa specifičnim zastojem nakon dostizanja gornje granice razvlačenja [17]

### 2.3. PRIMJENA TERMOGRAFIJE KOD ISTRAŽIVANJA ČELIKA

Termografija je nedestruktivna (NDT) metoda [7]. Prednost nedestruktivnih metoda je u tome što se u konačnici taj proizvod može iskoristiti, bez njegovog uništavanja, odnosno oštećenja. Nove nedestruktivne metode također se koriste kao dodatno ispitivanje uz standardne metode, posebno u beskontaktnim ispitivanjima složenih struktura [18]. Prva beskontaktna mjerenja provedena su 1967. godine u Belgiji, a prva snimka termokamerom dobivena je 1982. godine. Prva mjerenja su trajala i po nekoliko sati, jer je uređaj za mjerenje provodio pomoću jedne diode i seta pomičnih zrcala. Pomoću zrcala se toplina prenosila s cijele površine uzorka. Metoda se ubrzala razvojem digitalnih detektora zračenja [19].

Metoda termografije se temelji na principu mjerenja infracrvenog zračenja koje emitira površinska komponenta. Komponenta može biti izložena dinamičkom ili statičkom, linearnom elastičnom ili plastičnom napreznju, te se to napreznje pretvara u vidljivu sliku, termogram. Površine koje se razlikuju na termogramu različitim bojama ili osvjetljenjem predstavljaju površine koje emitiraju različite količine infracrvenog zračenja [7]. Na slici 8 prikazana je oprema koja se u današnjici koristi pri termografskim ispitivanjima. Oprema uključuje termografsku kameru, te se na slici također nalazi prikaz ispitivanog uzorka nakon što se provede snimanje termografskom kamerom (termogram). Uz navedenu opremu na slici je prikazana kidalica i ispitni uzorak koji je pričvršćen između čeljusti kidalice.



Slika 8. Oprema koja se koristi kod termografskih ispitivanja [20]

Danas su razvijene dvije metode termografskih ispitivanja, tj. aktivna i pasivna termografija. Aktivna termografija je značajnija za nerazorno ispitivanje kompozita, dok je pasivna termografija više zastupljena kod analize metalnih materijala i konstrukcija [19]. Istraživači su dugo vremena proučavali toplinske učinke povezane s procesima naprezanja. Prve eksperimente vezane za termoelastičnost provodio je Lord Kelvin u 19. stoljeću. Mnogi znanstvenici su radili na teškom problemu procjene razine temperature, tj. topline oslobođene tijekom pocesa naprezanja [20].

Na slici 9 je prikazano termografsko ispitivanje uzoraka pri statičkom vlačnom ispitivanju. Ova metoda se koristi i kod ispitivanja zavora. Područje zavora se pod djelovanjem dinamičkog naprezanja zagrijava i prijelazi topline su vidljivi pomoću termo kamere. Ovom tehnologijom predviđaju se kritične točke kod kojih bi moglo doći do nastanka pukotina. Termografija je postala jedna od najznačajnijih metoda u preventivnom održavanju elektrana, postrojenja za grijanje i sustava za rasplinjavanje [18].

Termografska metoda ima sve važniju ulogu u raznim studijama u kemijskoj i naftnoj industriji. Danas se sve više koristi i u laboratorijskim ispitivanjima deformacije metala. Pomoću termografske metode moguće je odrediti razne izvore toplinskog zračenja, a to omogućava lociranje, npr. mjesta pregrijavanja reaktora ili gubitka toplinske energije zbog loše izolacije.



Slika 9. Ispitivanje metodom termografije [18]

Također termografskom metodom moguće je predvidjeti mjesta lokalizacije deformacije i nastajanja pukotina u metalnim konstrukcijama [8].

Inženjeri metalurgije radili su na stvaranju modela koji omogućuju procjenu evolucije nekih mikrostrukturnih parametara, poput gustoće dislokacije ili veličine zrna. Međutim, kada su procesi naprezanja kvazi-statički ili se provode pri maloj brzini deformacije, temperaturne varijacije su toliko malene tako da se ti procesi mogu smatrati izotermnima [20].

Posljednjih nekoliko desetljeća termografija se koristi za proučavanje ponašanja čelika tijekom naprezanja. Termografska metoda mnogo je kraća od klasičnih metoda koje su se koristile za ispitivanje naprezanja. Primjenom termografske metode postiže se velika ušteda vremena i novca, te su to ujedno i glavne prednosti ove metode [21]. Uz pomoć termovizijske kamere moguće je promatrati tok materijala u zoni deformacije. U zoni deformacije se preko izmjerene maksimalne temperaturne promjene može kvantificirati naprezanje i njegova raspodjela.

Termografija je pogodna metoda za ispitivanje zone deformacije, jer je pri plastičnoj deformaciji prisutna promjena temperature. Metal se tijekom plastične deformacije zagrijava i na termo kameri je moguće vidjeti temperaturne raspodjele. Tako se dobiva uvid u raspodjelu naprezanja u zoni deformacije. Uz naprezanje, termografskom metodom također se može odrediti i početak plastičnog toka materijala, mjesto maksimalne deformacije, te pojava lokalizacije deformacije [6].

Metoda termografije u elastičnom području zasniva se na jednadžbi termoelastičnosti:

$$\Delta T = \frac{-\alpha T}{\rho C_p} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

$\alpha$ -koeficijent temperaturne ekspanzije,

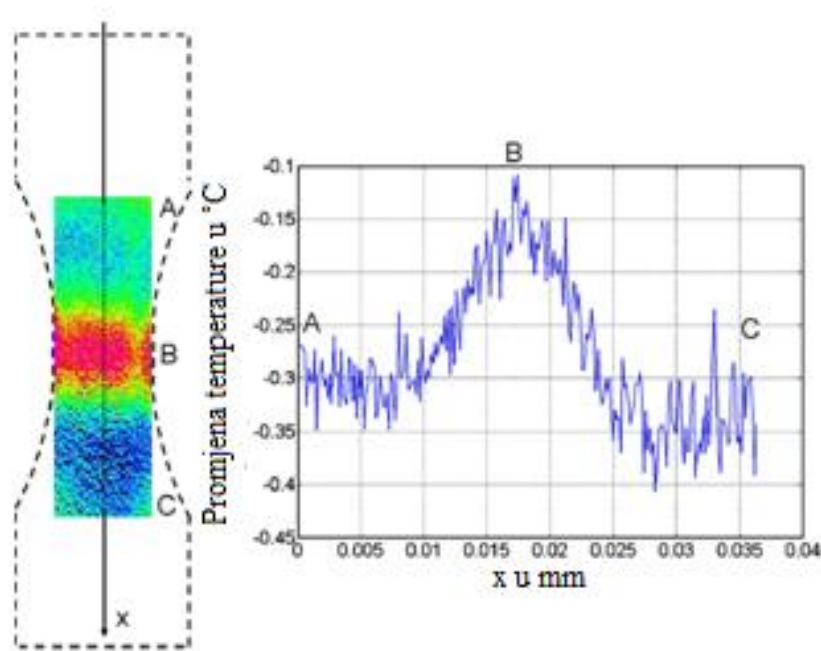
T-sobna temperatura uzorka,

$\rho$ -gustoća,

$C_p$ -toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku,

$\sigma_1$  i  $\sigma_2$ -glavna naprezanja.

Iz ove jednadžbe vidi se veza između temperaturnog prirasta i sume glavnih naprezanja. Jednadžba se može primijeniti jedino u adijabatskom stanju kada se toplina ne dovodi ili ne odvodi. Zbog toga promjene naprezanja moraju biti dovoljno brze kako bi se taj uvjet zadovoljio. Kako bi zabilježili učinak potrebni su odgovarajuća kamera i dovoljno naprezanje kako bi detektor to mogao zabilježiti [19]. Na slici 10 prikazan je termogram i grafički prikaz promjene temperature po uzorku.



Slika 10. Termogram i grafički prikaz raspodjele temperaturnih promjena po uzorku [21]

U metalurgiji se termografska ispitivanja sve više koriste za ispitivanje procesa proizvodnje i prerade metala i metalnih legura. Ovisno o kameri moguća su mjerenja temperature u rasponu od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $2000^{\circ}\text{C}$ . Termografija je pogodna za proučavanje zone deformacije [22]. Termografija se pokazala kao pogodna metoda za određivanje početka plastičnog toka materijala [17]. Metodom termografije se proučava promjena temperature na ispitivanom uzorku tijekom statičkog vlačnog pokusa. Maksimalna promjena temperature se mjeri uz pomoć termografske kamere i nakon toga se dobiva vidljivi prikaz (termogram), slika 10 [23].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom završnom radu priprema i ispitivanje uzoraka provedeno je u prostorijama Laboratorija za obradu kovina deformiranjem na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Provedena su ispitivanja statičkim vlačnim pokusom prethodno pripremljenih uzoraka niobijem mikrolegiranog čelika i niskougličnog čelika bez dodatka niobija uz metodu termografije. Tijekom statičkog vlačnog pokusa uzorci su snimani termografskom kamerom kako bi se pratila promjena maksimalne temperature. Preko izmjerene promjene maksimalne temperature određena je raspodjela naprezanja u zoni deformacije.

#### 3.1. UZORCI

Uzorci na kojima su provedena ispitivanja dobiveni su iz toplovaljane trake. Ispitivanjem na kvantometru-ARL 8660 određen je kemijski sastav ispitivanih uzoraka. Rezultati dobivenog kemijskog sastava prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav ispitivanih čelika

Element	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	N
Niskouglični čelik sa 0 mas.% niobija	0.13	0.77	0.18	0.01	0.019	0.02	-	-
Mikrolegirani čelik sa 0,035 mas.% niobija	0.09	0.75	0.05	0.018	0.014	0.02	0.035	0.0081

Ispitivanja su provedena na dvije vrste uzoraka sa istim baznim kemijskim sastavom. Prva skupina uzoraka su niskouglični čelici bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija, dok je druga skupina mikrolegirani čelik sa dodatkom 0.035% niobija.

Nakon valjanja provedeno je rezanje toplovaljane trake uz pomoć rezalice JET HVBS56M-085E koja je prikazana na slici 11, kako bi se dobili uzorci odgovarajućih dimenzija i pravokutnog poprečnog presjeka.



Slika 11. Rezalica JET HVBS56M-085E

Nakon rezanja uzoraka rezalicom JET HVBS56M-085E i izvršene strojne obrade na CNC glodalici dobiveni su uzorci pravokutnog poprečnog presjeka. Iznos ispitne duljine uzoraka je 45 mm.

### 3.2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

Prilikom odvijanja statičkog vlačnog pokusa na uzorak se djeluje jednoosnim vlačnim opterećenjem. Na taj način se određuju temeljna mehanička svojstva materijala vezana za deformabilnost i otpornost, a to su vlačna čvrstoća, istezljivost, granica razvlačenja, itd. Statičko vlačno ispitivanje provodi se na uređajima koji se nazivaju kidalice, a uzorci za ispitivanje mogu biti okrugli i pravokutnog poprečnog presjeka. Prilikom provedbe statičkog vlačnog pokusa ispitni uzorci se pod djelovanjem vlačnog opterećenja, opterećuju do loma. Tijekom statičkog vlačnog pokusa kontinuiranim mjerenjem dobivaju se iznosi sile koja djeluje na ispitni uzorak, te produljenja ispitnog uzorka. Međuodnos sile i produljenja je grafički predočen u obliku dijagrama i naziva se dijagram kidanja [24].

U ovom istraživanju korištena je kidalica Zwick 50 kN na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu koja je prikazana na slici 12. Ispitivanje je provedeno pri različitim brzinama razvlačenja od 5 i 20 mm/min.



Slika 12. Kidalica Zwick 50 kN na kojoj je provedeno statičko vlačno ispitivanje na Metalurškom fakultetu

Ispitivanje je provedeno na uzorcima pravokutnog poprečnog presjeka istog baznog kemijskog sastava. Jedna skupina uzoraka za ispitivanje sadrži 0.035% mikrolegirajućeg elementa niobija, dok ostali uzorci ne sadrže mikrolegirajući element niobij.

Nakon strojne obrade na CNC glodalici dobiveni su sljedeći uzorci prikazani na slici 13. Prikazana je epruveta pravokutnog poprečnog presjeka.



Slika 13. Uzorak za statičko vlačno ispitivanje prije brušenja

Uzorci su brušeni brusilicom Einhell TC-WD 150/200, slika 14, te ručno brusnim papirom gradacijama 40, 60, 120, jer je za potrebe ispitivanja potrebna čista površina. Uzorak nakon provedene strojne obrade, brušenja na brusilici, te ručnog brušenja gradacijama 40, 60 i 120 prikazan je na slici 15.



Slika 14. Brusilica Einhell TC-WD 150/200

Kvalitetna priprema uzoraka je od velike važnosti radi dobivanja što preciznijih rezultata u kasnijim mjerenjima i ispitivanjima.

### 3.3. PRIPREMA UZORAKA ZA TERMOGRAFSKA ISPITIVANJA

Termografija je nedestruktivna (NDT) metoda koja mjeri temperaturne razlike uz pomoć infracrvene kamere. U ovom istraživanju omogućava uvid u temperaturne razlike na ispitivanim uzorcima kada se na njih djeluje nekom silom. Prilikom provođenja statičkog vlačnog ispitivanja postavlja se termografska kamera i preko snimljenih termograma dobiva se prikaz raspodjele naprezanja po uzorku.

Prije podvrgavanja uzoraka statičkom vlačnom i termografskom ispitivanju, potrebno je nanijeti premaz na pripremljene uzorke. Stanje površine uzorka bitno utječe na rezultate ispitivanja, pa se iz tog razloga nanosi premaz na površinu uzorka prilikom termografskog ispitivanja. Nanošenje premaza povećava faktor emisivnosti koji može imati značajnu ulogu kod dobivanja rezultata ispitivanja [8]. Na slikama 15, 16 i 17 prikazani su uzorci prije i poslije nanošenja premaza.



Slika 15. Uzorak bez premaza





Slika 16. Nanošenje premaza



Slika 17. Uzorak nakon nanošenja premaza

Za vrijeme nanošenja korišten je Lechsys 29141 crni mat premaz, slika 18.



Slika 18. Lechsys 29141 crni mat premaz

Prilikom termografskog snimanja korištena je kamera VarioCAM® M82910 proizvođača JENOPTIK prikazana na slici 19.



Slika 19. Termografska kamera VarioCAM® M82910

Prije mjerenja termografskom kamerom potrebno je podesiti postavke kamere kako bi se dobio kvalitetniji prikaz dobivenih rezultata.

Za analizu dobivenih mjerenja uz pomoć kamere VarioCAM® M82910 korišten je programski paket IRBIS 3 Professional.

#### 4. REZULTATI I RASPRAVA

Mehanička svojstva ispitivanih čelika dobivena provedenim eksperimentalnim ispitivanjima prikazana su u tablici 2. Određen je početak plastičnog toka materijala ( $R_p$ ), vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) i izduženje ( $A$ ).

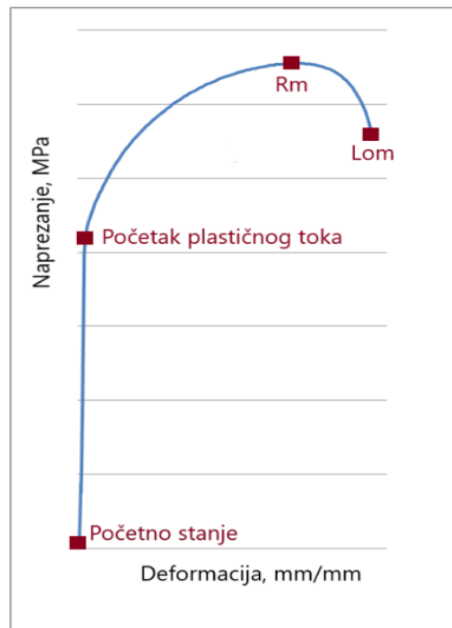
Tablica 2. Mehanička svojstva mikrolegiranog čelika sa 0.035% niobija i niskougličnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija

Uzorak	Čelik	Brzina razvlačenja, mm/min	Dimenzije uzoraka						Mehanička svojstva		
			$a_0$ , mm	$b_0$ , mm	$L_0$ , mm	$a_k$ , mm	$b_k$ , mm	$L_k$ , mm	$R_p$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A$ , %
1	Čelik sa 0 mas.% niobija	5	2.76	20.14	46.64	1.82	15.13	58.96	393.62	553.37	26.42
2			2.83	20.04	45.89	1.79	15.12	59.33	394.62	553.31	29.29
3			2.79	19.90	45.37	1.88	15.04	57.20	395.03	548.79	26.07
4	Čelik sa 0.035 mas.% niobija	20	2.52	19.95	45.56	1.65	15.04	58.38	402.43	544.41	28.14
5			2.64	19.96	46.05	1.73	15.13	57.93	410.02	562.23	25.8
6			2.74	19.99	45.49	1.87	15.08	57.21	398.07	561.49	25.76
7	Čelik sa 0.035 mas.% niobija	5	2.74	19.99	45.3	1.85	16.47	53.12	421.76	655.47	17.26
8			2.6	20.02	46.36	1.47	16.74	54.09	426.84	652.43	16.67
9			2.67	20.01	45.83	1.66	16.61	53.61	424.3	653.95	16.98
10	Čelik sa 0.035 mas.% niobija	20	2.72	19.95	45.54	1.57	17.33	53.31	445.6	666.37	17.06
11			2.65	20.02	46.01	1.64	15.79	54.27	450.71	634.5	17.95
12			2.68	20.01	46.35	1.51	16.89	54.55	445.27	666.99	17.69

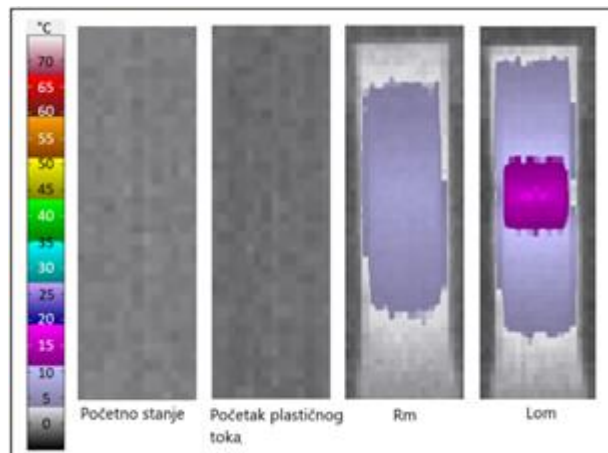
Metodom termografije provedena je kvalitativna i kvantitativna analiza kako bi se odredila raspodjela naprezanja preko izmjerene maksimalne promjene temperature tijekom statičkog vlačnog ispitivanja. Na slikama 20 i 21 prikazani su termogrami mikrolegiranog čelika sa 0.035% niobija i niskougličnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija. Termogrami za analizu uzimani su u početnom stanju odnosno prije početka deformacije, u trenutku početka plastičnog toka materijala ( $R_p$ ), pri dostizanju iznosa vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) i kod loma ispitivanih uzoraka. Kao početak plastičnog toka uzima se porast promjene temperature nakon njenog pada.

Dobiveni termogrami prikazuju temperaturnu raspodjelu odnosno raspodjelu naprezanja tijekom statičkog vlačnog ispitivanja pri čemu su iznosi temperatura prikazani različitim bojama prema skali sa lijeve strane.

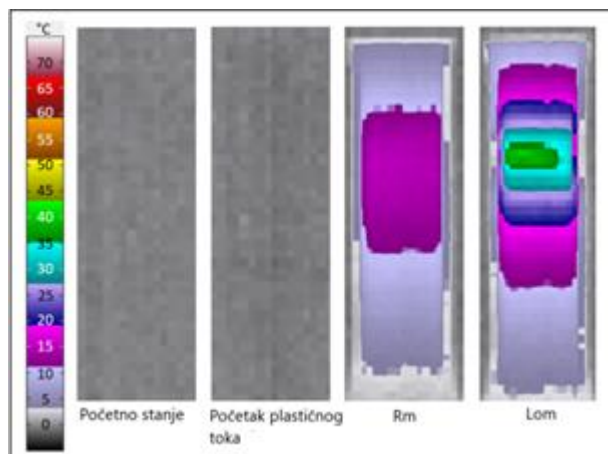
Mikrolegirani čelik 0.035% Nb



5 mm/min

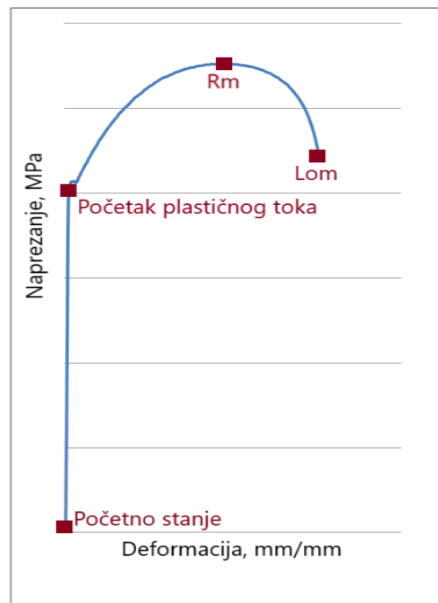


20 mm/min

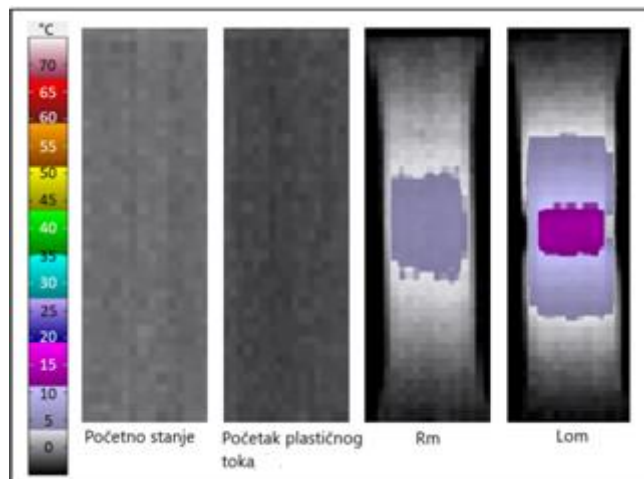


Slika 20. Raspodjela napreznja kod mikrolegiranih čelika sa dodatkom 0.035% niobija pri brzinama razvlačenja 5 i 20 mm/min

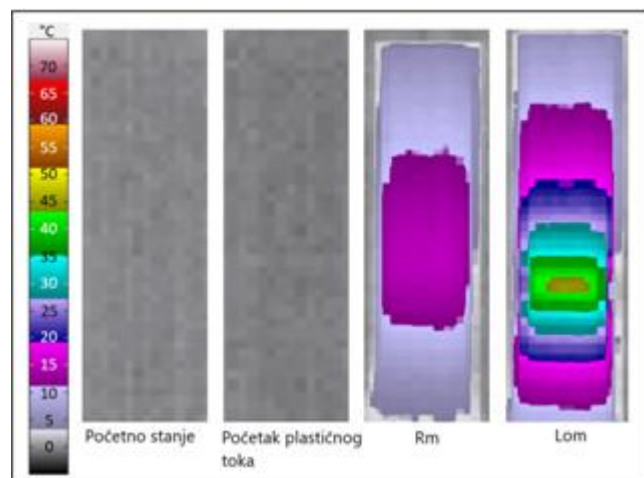
### Čelik bez niobija



5 mm/min



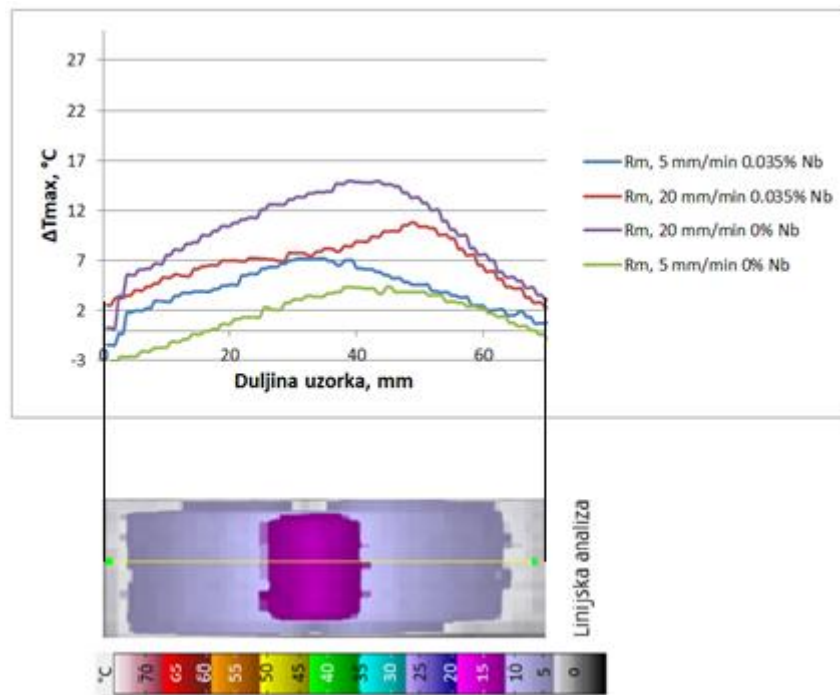
20 mm/min



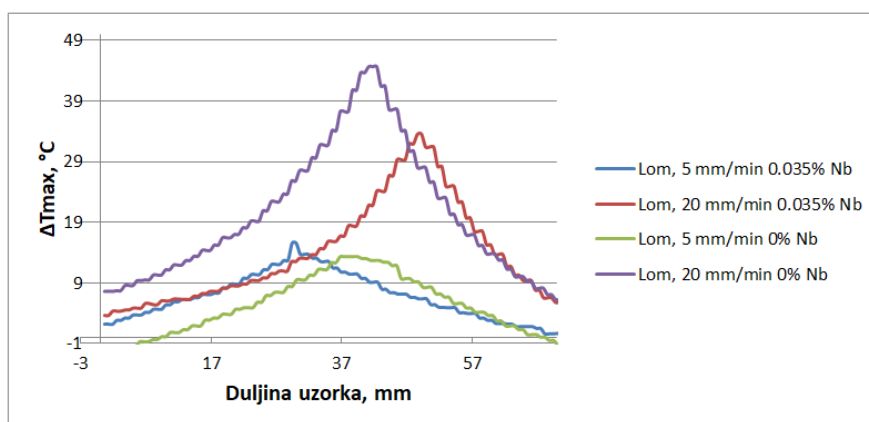
Slika 21. Raspodjela naprezanja kod niskougličnih čelika bez dodatka niobija pri brzinama razvlačenja 5 i 20 mm/min

Dobiveni termogrami jasno pokazuju kako porastom brzine deformacije dolazi do porasta maksimalne promjene temperature, odnosno napreznja u zoni deformacije u trenutku dostizanja vlačne čvrstoće i loma uzorka. Početak plastičnog toka ( $R_p$ ) kod čelika sa i bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija ne pokazuje značajnije veće promjene maksimalne temperature odnosno napreznja obzirom na jednoliko obojenje uzorka u zoni deformacije.

Jasnija slika raspodjele napreznja u zoni deformacije dobivena je provedenom linijskom analizom maksimalne promjene temperature u zoni deformacije, slika 22, pri različitim brzinama deformacije i kod uzoraka sa i bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija. Analiza je provedena u identičnim točkama kao i kod termograma: u početnom stanju odnosno prije početka deformacije, u trenutku početka plastičnog toka materijala ( $R_p$ ), pri dostizanju iznosa vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) i kod loma ispitivanih uzoraka.



Slika 22. Linijska analiza maksimalne promjene temperature u zoni deformacije za vlačnu čvrstoću



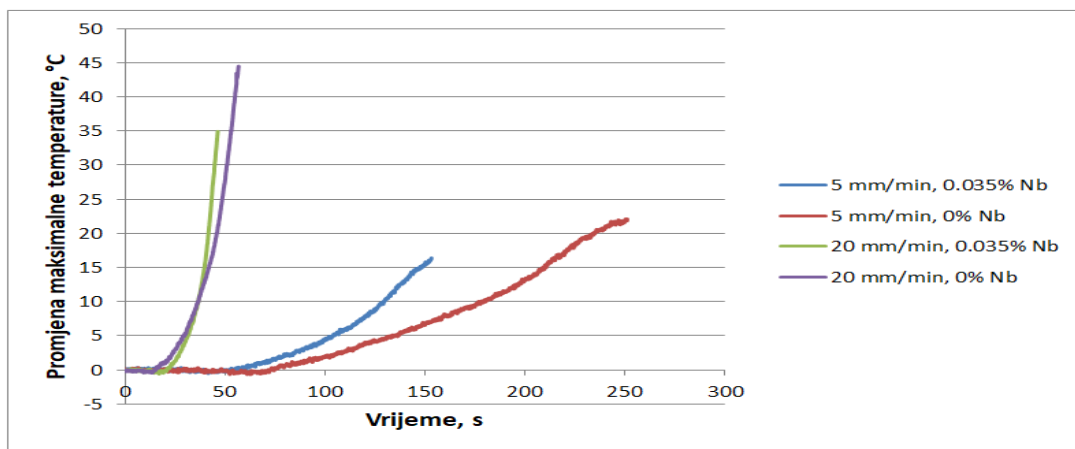
Slika 23. Maksimalna promjena temperature kod loma uzorka

Na slikama 22 i 23 grafički je prikazana promjena maksimalne temperature kod vlačne čvrstoće (slika 22) i kod loma uzorka (slika 23) pri različitim brzinama ispitivanja. Iz dijagrama je vidljiv porast maksimalne promjene temperature, odnosno naprezanja sa porastom brzine ispitivanja.

Analiza maksimalne promjene temperature također je provedena na ispitnom dijelu uzorka tijekom deformacije označavanjem područja interesa ispitivanja s pravokutnikom u zoni deformacije prikazanom na slici 24.



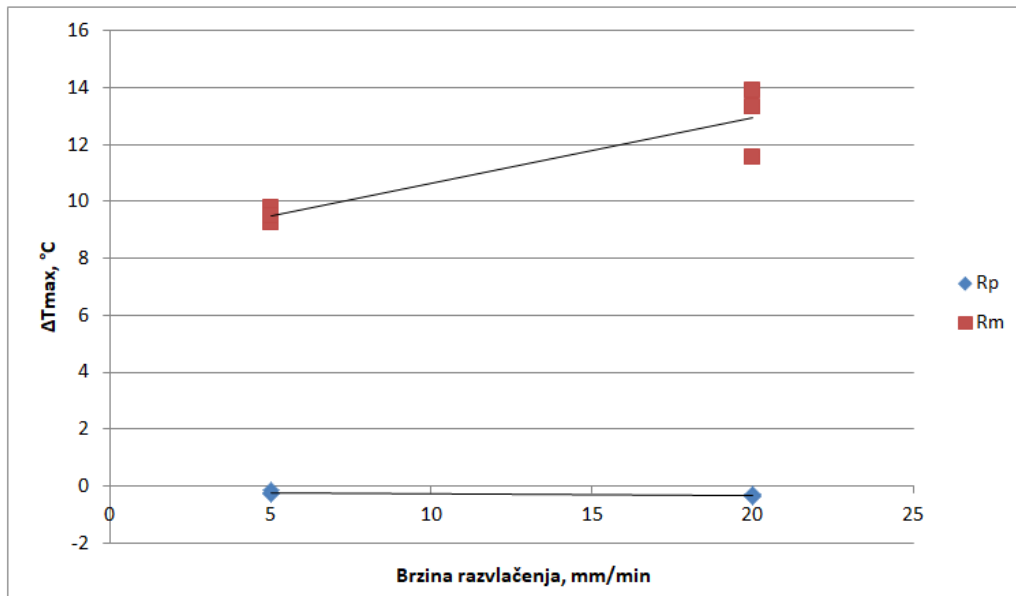
Slika 24. Maksimalna promjena temperature na ispitnom dijelu uzorka



Slika 25. Dijagrami promjene maksimalne temperature nakon dostizanja početka plastičnog toka materijala

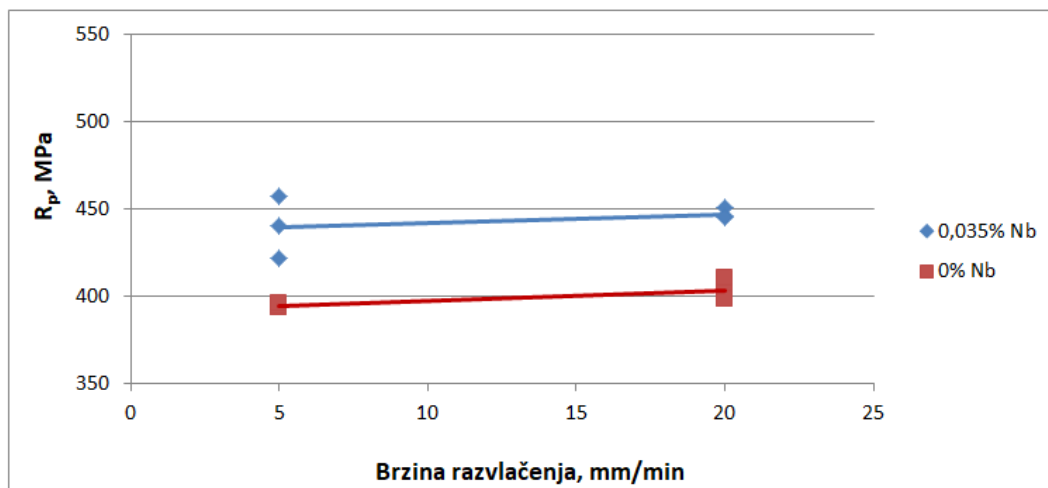
Dobiveni dijagrami jasno pokazuju kontinuirani porast maksimalne promjene temperature, odnosno naprezanja nakon dostizanja početka plastičnog toka materijala, slika 25. Ispitivanja kod mikrolegiranog čelika sa dodatkom 0.035% niobija i niskougličnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija pokazuju da prije dolazi do kontinuiranog porasta maksimalne promjene temperature, odnosno naprezanja kod većih brzina deformacije i da porastom brzine razvlačenja dolazi do povećanja maksimalne promjene temperature u zoni deformacije.

Iz izmjerenih vrijednosti maksimalne promjene temperature analizirane su međuovisnosti promjene temperature, brzine ispitivanja u različitim točkama kod čelika sa i bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija, slike 26-28.



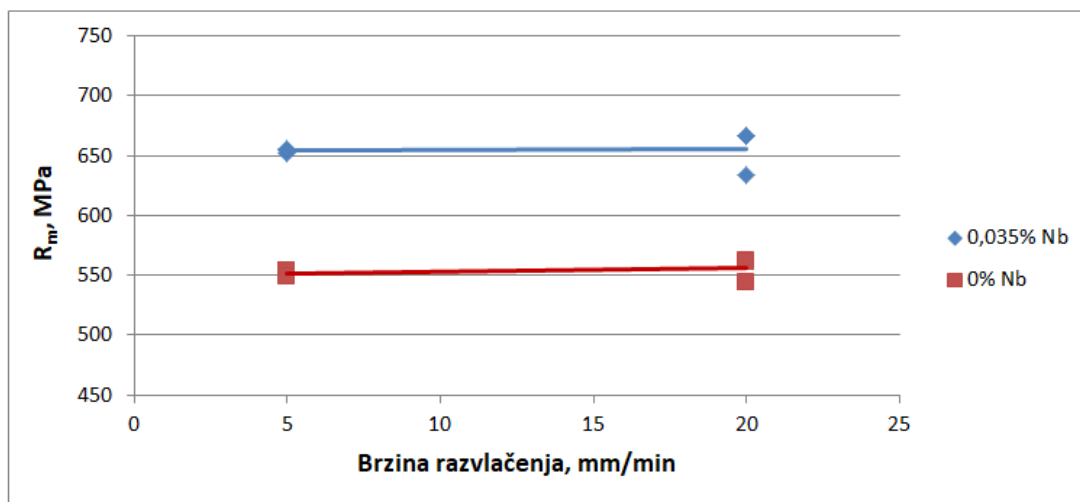
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti maksimalne promjene temperature o brzini deformacije za vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ) i početak plastičnog toka metala ( $R_p$ ) kod niobijem mikrolegiranog čelika

Rezultati dobiveni kod niobijem mikrolegiranog čelika pokazuju porast maksimalne promjene temperature, odnosno napreznja u trenutku dostizanja vlačne čvrstoće s povećanjem brzine ispitivanja, dok kod početka plastičnog toka niobijem mikrolegiranog čelika nije zabilježena značajnija veća razlika maksimalne promjene temperature s povećanjem brzine deformacije. Daljnja istraživanja na niobijem mikrolegiranom čeliku pokazat će postojati li promjene s obzirom na maksimalnu temperaturu, odnosno napreznja na početku plastičnog toka materijala.



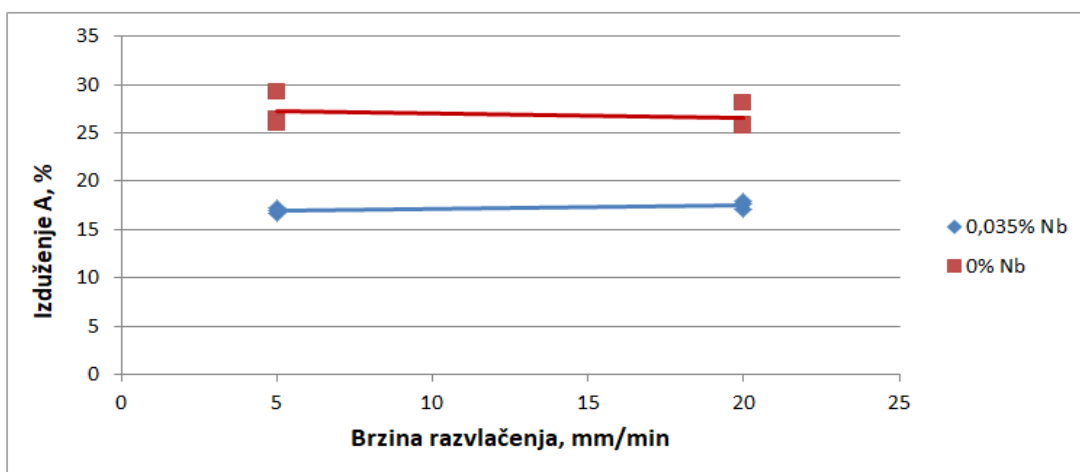
Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti početka plastičnog toka metala o brzini razvlačenja za čelik sa 0.035% niobija i čelik bez niobija





Slika 28. Grafički prikaz ovisnosti vlačne čvrstoće metala o brzini ispitivanja za čelik sa 0.035% niobija i čelik bez niobija

Dobiveni rezultati prikazuju da se početak plastičnog toka metala kod niobijem mikrolegiranih čelika odvija pri većem iznosu naprezanja nego kod niskougličnih čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija. S porastom brzine ispitivanja vidljiv je blagi porast početka plastičnog toka, odnosno naprezanja u oba slučaja, što je vidljivo na slici 27. Iznos vlačne čvrstoće je također veći kod čelika mikrolegiranih niobijem u odnosu na niskouglične čelike. Na slici 28 vidljivo je kako iznos vlačne čvrstoće ne pokazuje veće promjene s porastom brzine ispitivanja.



Slika 29. Grafički prikaz ovisnosti izduženja metala o brzini ispitivanja za čelik sa 0.035% niobija i čelik bez niobija

Na slici 29 je prikazano je izduženje metalnih uzoraka s dodatkom mikrolegirajućeg elementa niobija, te uzoraka bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija. Izduženje je veće kod niskougličnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija u odnosu na čelike sa dodatkom niobija, što je posljedica veće čvrstoće metala koju imaju uzorci s dodatkom mikrolegirajućeg elementa niobija.

## 5. ZAKLJUČAK

Istraživanje utjecaja brzine razvlačenja na raspodjelu napreznja u zoni deformacija čelika provedena su na dvije vrste čelika. Ispitivanja su se provodila na uzorcima koji su sadržavali 0.035% mikrolegirajućeg elementa niobija, te na uzorcima bez dodatka niobija. Hladna deformacija čelika provedena je statičkim vlačnim pokusom.

Određivanjem mehaničkih svojstava utvrđeno je da su iznosi granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće veći kod čelika mikrolegiranih niobijem u odnosu na niskouglične čelike bez niobija, dok je izduženje veće kod uzoraka niskougličnog čelika bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija u odnosu na čelike sa dodatkom niobija.

Raspodjela napreznja u zoni deformacije istražena je metodom termografije. Mikrolegirani čelik i čelik bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija imaju pojavu porasta temperature, odnosno napreznja nakon dostizanja granice proporcionalnosti. U trenutku početka plastičnog toka kod dostizanja granice proporcionalnosti, nema vidljive značajnije temperaturne promjene u zoni deformacije. Porastom sile razvlačenja, nakon dostizanja granice proporcionalnosti, kod oba čelika zapažena je pojava kontinuiranog porasta temperature, odnosno napreznja. Ova promjena jako je ovisna o brzini razvlačenja kod oba čelika. Kod većih brzina dolazi do bržeg kontinuiranog porasta temperature.

Brzina razvlačenja ima utjecaj na raspodjelu napreznja niskougličnih čelika sa i bez dodatka mikrolegirajućeg elementa niobija u cijelom području plastične deformacije. Porastom brzine razvlačenja u zoni deformacije dolazi do porasta maksimalne temperature, odnosno napreznja i u trenutku dostizanja vlačne čvrstoće uzorka ima maksimalnu vrijednost. Daljnjom deformacijom napreznja se koncentriraju i rastu u dijelu zone deformacije gdje dolazi do loma uzorka.

Planirana istraživanja pokazala su jasan utjecaj brzine razvlačenja. Daljnja istraživanja početka plastičnog toka materijala trebala bi dati detaljnije informacije o utjecaju dodatka mikrolegirajućeg elementa i brzine deformacije na sami početak plastičnog toka materijala.

## 6. LITERATURA

- [1] T. N. Baker, *Microalloyed steels*, *Ironmaking & Steelmaking* 43, 4 (2016) 264-307.
- [2] A. Sarkar, S. Panda, A development study of microalloyed (HSLA) steel through experimental exploration, Bachelor thesis, Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2012.
- [3] D. A. Skobir, *High-strength low-alloy (HSLA) steels*, *MTAEC9*, 45, 4 (2011) 295.
- [4] S. Rešković, T. Brlić, F. Vodopivec, V. Novosel-Radović, M. Franz, Influence of finish rolling temperature on the mechanical properties of niobium microalloyed tubes, 16<sup>th</sup> International Scientific Conference on Production Engineering - CIM 2017, (2017), 213-216.
- [5] S. Rešković, I. Jandrić, Influence of Niobium on the Beginning of the Plastic Flow of Material during Cold Deformation, *The ScientificWorld Journal*, (2013) Article ID 723725, 5 pages.
- [6] I. Jandrić, *Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika*, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2015.
- [7] M. Kutin, S. Ristić, Z. Burzić, M. Puharić, Testing the tensile features of steel specimens by thermography and conventional methods, *Scientific Technical Review*, 60, 1 (2010) 66-70.
- [8] I. Jandrić, S. Rešković, Choosing the optimal coating for thermographic inspection, *The Holistic Approach to Environment* 5, 3 (2015) 127-134.
- [9] T. Gladman: *The physical metallurgy of microalloyed steels*, 1st ed., The University Press, Cambridge 1997.
- [10] L. J. Cuddy, *Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite*, TMS of ASME, Warrendale (1982), 129.
- [11] J. R. Paules: Practical considerations in microalloying with vanadium, niobium, or titanium, *Proc. of the Inter. Symp. on Microalloyed Vanadium Steels*, Cracow, (1990), 19–32.
- [12] N. Prakasan, High strength low alloy steels <https://www.slideshare.net/N.Prakasan/hsla-steels> (20.6.2018.)
- [13] S. Rešković, I. Jandrić, F. Vodopivec, Influence of testing rate on luders band propagation in niobium microalloyed steel, *METABK* 55, 2 (2016) 157-160.
- [14] S. Rešković, *Teorija oblikovanja deformiranjem*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [15] I. Mamuzić, *Teorija plastične deformacije metala*, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2000.
- [16] Tehnologija 1 i proizvodne tehnologije, oblikovanje deformiranjem, drugo predavanje [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1447759314-0-tehnologija\\_1\\_2.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1447759314-0-tehnologija_1_2.pdf) (5.7.2018.)
- [17] T. Brlić, S. Rešković, I. Jandrić, Study of inhomogeneous plastic deformation using thermography, *CIM 2017*, 2017.

- [18] M. M. Kutin, S. S. Ristić, M. R. Prvulović, M. M. Prokolab, N. M. Marković, M. R. Radosavljević, Application of thermography during tensile testing of butt welded joints, FME Transactions, 39, 3 (2011) 133-138.
- [19] L. K. Opara, Primjena termografije u analizi pogonskog opterećenja konstrukcija, HDKBR INFO Magazin, 3, 2 (2013) 12-17.
- [20] M. San Juan, O. Martin, F.J. Santos, P. De Tiedra, F. Daroca, R. Lopez, Application of thermography to analyse the influence of the deformation speed in the forming process, The Manufacturing Engineering Society International Conference, 63 (2013) 821-828.
- [21] M.L. Pastor, X. Balandraud, M. Grediac, J.L. Robert, Applying infrared thermography to study the heating of 2024-T3 aluminium specimens under fatigue loading, Infrared Physics & Technology, 51, 6 (2008) 505-515.
- [22] I. Jandrlić, T. Brlić, S. Rešković, Application of thermography in the production and processing of metallic materials, 15<sup>th</sup> International foundrymen conference, 2016.
- [23] I. Jandrlić, S. Rešković, Application of thermographic method in determining the onset of plastic deformation, 13<sup>th</sup> International foundrymen conference, 2013.
- [24] S. Rešković, Ispitivanje materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2009.

## 7. ŽIVOTOPIS

### Osobni podaci:

Ime i prezime: Karlo Komosar

Datum i mjesto rođenja: 29.07.1994. Sisak

Adresa: Capraške Poljane 16, Sisak

e-mail: karlo.komosar.ri@gmail.com

### Obrazovanje:

- 2001.-2009. Osnovna škola Braća Bobetko, Sisak

- 2009.-2013. Gimnazija Sisak, opća gimnazija

- 2015.-2018. Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija

### Vještine:

- dobro poznavanje rada na računalu: MS Office paket, „AUTOCAD“.

- Strani jezici: engleski jezik- odlično poznavanje u govoru i pismu, njemački jezik- osnovno poznavanje u govoru i pismu

### Projekti:

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