

Utjecaj brzine razvlačenja na mehanička svojstva i početak toka niskougličnog čelika

Furlan, Vjeran

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:115:118005>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-05**



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

Vjeran Furlan

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Vjeran Furlan

UTJECAJ BRZINE RAZVLAČENJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA I POČETAK TOKA
NISOKOUGLJIČNOG ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc.dr.sc. Ivan Jandrić

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

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

Sisak, rujan 2018.

Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2016-0-120 „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

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc.dr.sc. Ivanu Jandrliću na mentorstvu, uloženom vremenu, trudu i savjetima prilikom izrade završnog rada.

Također, zahvaljujem se Tinu Brliću, mag. ing. met. na pomoći i savjetima prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela završnog rada.

SAŽETAK

UTJECAJ BRZINE RAZVLAČENJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA I POČETAK TOKA NISOKOUGLJIČNOG ČELIKA

Čelik danas predstavlja jedan od najvažnijih tehničkih materijala. Niskougljični čelici čine važnu komponentu u raznim konstrukcijama. Niskougljični čelici uslijed zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, dobre deformabilnosti i mogućnosti površinske obrade uvelike se koriste u proizvodnji traka, limova, i žica za gradnju u autoindustriji. Ovaj završni rad kroz teorijski dio daje osvrt na čelike, hladnu deformaciju čelika, te utjecaj brzine deformacije na granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i druga mehanička svojstva niskougljičnih čelika. Kroz eksperimentalni dio istraživana je utjecaj promjene brzine razvlačenja na mehanička svojstva i početak plastičnog toka niskougljičnog konstrukcijskog čelika ST52-3N. Ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom u rasponu brzina razvlačenja uzoraka od 5 – 60 mm/min. Analiza rezultata ispitivanja provedena je korištenjem programskog paketa MATLAB. Dokazano je kako porast brzine razvlačenja utječe na mehanička svojstva ispitivanog čelika. Porastom brzine raste granica proporcionalnosti (R_p) i vlačna čvrstoća (R_m), uz istovremeno smanjenje izduženja. Utjecaj brzine se najbolje očituje iz smanjenja omjera R_p/R_m , što pokazuje da povećanje brzine doprinosi porastu elastične deformacije. Korištenjem Matlab regression learner aplikacije kreiran je jednostavni matematički model koji nastoji prikazati korelaciju između mehaničkih svojstava čelika i različite brzine razvlačenja.

Ključne riječi: Nisko ugljični čelik, hladna deformacija, statički vlačni pokus, matematički model.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF STRAIN RATE ON MECHANICAL PROPERTIES AND BEGINNING OF PLASTIC FLOW OF LOW CARBON STEEL

Today, steel is one of the most important technical materials. Low carbon steels make important component in various constructions. Low carbon steels are widely used in construction and automotive industry for sheets, wires, or strips due to their satisfactory mechanical properties, decent deformability and possibility of surface machining. This final thesis gives an theoretical overview on steels, cold deformation of steels, the effects of strain rate on yield point, ultimate tensile strenght, and other mechanical properties of low carbon steels. The effects of drawing rate on mechanical properties and beginning of plastic flow of low carbon steel ST52-3N, are investigated in experimental part of thesis. Experiments are conducted by static tensile test on samples applying drawing rates in span of 5 – 60 mm/min. The analysis of the test results was carried out using the MATLAB software package. It has been proven that increase in stretching rate effects mechanical properties of tested steel. R_p and R_m increase with increasing strain rate, simultaneously decreasing elongation. The effect of strain rate is best seen in the reduction of R_p / R_m ratio, which indicates that the increase in strain rate promotes elastic deformation. Using a Matlab regression learner application, a simple mathematical model was created that shows the correlation between mechanical properties of steel and different rates of stretching.

Key words: Low carbon steel, cold deformation, static tensile test, mathematical model.

Popis slika

Slika 1.	Udjeli u proizvodnji sirovog čelika za 2016. i 2017. Godinu[4].	2.
Slika 2.	Rezultati statičkog vlačnog pokusa pri različitim brzinama deformacije za standardne uzorke i uzorke sa V-zarezom. Gore – Ovisnost R_e , R_p o $\dot{\epsilon}$; Dolje – Ovisnost R_e/R_m o $\dot{\epsilon}$ [9].	6.
Slika 3.	Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na mehanička svojstva niskougljičnog čelika[10].	7.
Slika 4.	Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na omjer R_e/R_m za čelike različitih kvaliteta[10].	7.
Slika 5.	Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na istežljivost A_5 različitih ispitivanih čelika[10].	8.
Slika 6.	Rezultati mehaničkih svojstava niskougljičnih svojstava pri konstantnoj redukciji i različitoj brzini izvlačenja. a) Granica razvlačenja. b) Vlačna čvrstoća. c) Izduženje pri pucanju[11].	9.
Slika 7.	Dijagram „naprezanje – istežanje“ za čelik.	10.
Slika 8.	Ilustracija valjanog lima iz kojeg su uzimani ispitni uzorci.	15.
Slika 9.	Uzorak pravokutnog poprečnog presjeka za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom.	16.
Slika 10.	Kidalica Zwick 50 kN i mjerna područja.	17.
Slika 11.	Čeljusti kidalice s postavljenim ispitnim uzorkom prije početka ispitivanja.	18.
Slika 12.	Primjer određivanja krivulje ovisnosti izduženja o brzini razvlačenja.	19.
Slika 13.	Postavljanje ulaznih parametara i odabir regresije unutar Regression Learner aplikacije.	20.
Slika 14.	Snimljeni dijagrami sila-produljenje pri različitim brzinama ispitivanja, uzorci uzimani u smjeru valjanja.	21.
Slika 15.	Ovisnost promjene granice proporcionalnosti s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.	25.
Slika 16.	Ovisnost promjene vlačne čvrstoće s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.	26.
Slika 17.	Ovisnost promjene izmjerenog izduženja s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.	26.
Slika 18.	Ovisnost promjene omjera R_p/R_m s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.	27.
Slika 19.	Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti R_p za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).	29.
Slika 20.	Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti R_m za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).	30.
Slika 21.	Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti izduženja za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).	31.

Popis tablica

Tablica 1.	Osnovna podjela čelika[1,2].	3.
Tablica 2.	Podjela matematičkih modela[18].	13.
Tablica 3.	Pristup izradi matematičkog modela[18].	13.
Tablica 4.	Kemijski sastav ispitivanog niskougličnog čelika.	15.
Tablica 5.	Rezultati statičkog vlačnog pokusa na uzorcima uzimanim u smjeru valjanja trake.	23.
Tablica 6.	Rezultati statičkog vlačnog pokusa na uzorcima uzimanim okomito na smjer valjanja trake.	24.

Sadržaj:

1.	UVOD.....	1
2.	TEORIJSKI DIO	2
2.1.	Niskouglični čelik i mehanička svojstva niskougličnih čelika.....	4
2.2.	Plastična prerada niskougličnih čelika	4
2.3.	Utjecaj brzine deformacije na mehanička svojstva niskougličnih čelika pri hladnoj deformaciji.....	5
2.4.	Određivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom.....	10
2.4.1.	Granica proporcionalnosti, R_p (N/mm ²).....	11
2.4.2.	Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm ²)	11
2.4.3.	Istezljivost, A (%).....	12
2.5.	Matematičko modeliranje	12
2.6.	Model.....	13
2.7.	Pristup matematičkom modeliranju.....	13
2.8.	Matlab Machine Learning Toolbox	14
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	15
3.1.	Ispitivani čelik i uzorkovanje.....	15
3.2.	Metode i uvjeti ispitivanja	17
3.3.	Analiza rezultata ispitivanja	19
4.	REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA.....	21
5.	MODELIRANJE OVISNOSTI O BRZINI RAZVAČENJA.....	28
6.	ZAKLJUČAK.....	32
7.	ŽIVOTOPIS.....	33
8.	LITERATURA	34

1. UVOD

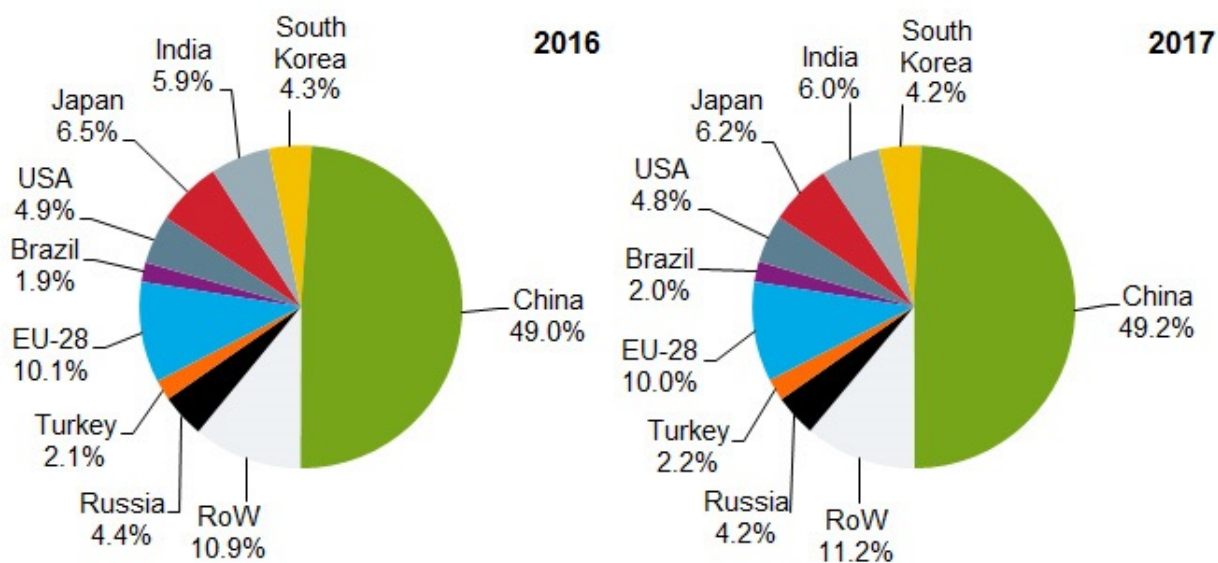
Čelik je metastabilno kristalizirana slitina željeza i ugljika. Maksimalni maseni udio ugljika u čvrstoj otopini iznosi 2,06%, a u svom sastavu sadrži niz pratećih elemenata (Si, Mn, S, P, legirajući elementi, itd.). Neke od tih elemenata možemo smatrati korisnim primjesama (Mn, Cr, Ni, Mo), koje doprinose poboljšanju mehaničkih svojstava čelika. Uz korisne primjese u čeliku su gotovo uvijek prisutni elementi S i P, te tzv. oligoelementi (kao što su Cu, Sn, As, Sb i dr.) koji potječu još od proizvodnje sirovog željeza. Zajedno s nekim plinovima (O₂, N₂, H₂) ovi elementi čine štetne primjese u čeliku i ne mogu se u potpunosti ukloniti iz njega [1, 2].

Poznato je kako se danas preko 85 % proizvedenog čelika u svijetu naknadno prerađuje nekim od postupaka plastične deformacije [3], a sve kako bi dobili određena mehanička svojstva i/ili određeni oblik proizvoda. Pri tome prednjače postupci tople plastične deformacije. Kada se želi postići određena mehanička svojstva ili uže dimenzijske tolerancije, u završnim fazama plastičnog oblikovanja čelika često se provodi se tzv. hladna plastična deformacija. Istraživanja pojava tijekom plastične deformacije čelika su uvelike usmjerena na istraživanje tople plastične deformacije. S druge strane, hladna plastična deformacija čelika još nije u potpunosti istražena. Tako dosadašnja istraživanja nisu u potpunosti opisala utjecaj svakog pojedinog parametra deformacije na početak plastičnog toka i konačna mehanička svojstva čelika pri hladnoj plastičnoj deformaciji.

Kroz ovaj završni rad istražiti će se utjecaj promjene brzine deformacije na mehanička svojstva niskougljičnog konstrukcijskog čelika. U tu svrhu provesti će se statički vlačni pokus na uzorcima pri različitim brzinama razvlačenja. Analizom rezultata statičkog vlačnog ispitivanja i korištenjem programskog paketa MATLAB pojasnit će se utjecaj promjene brzine deformacije, u odabranom interval brzina, na mehanička svojstva ispitivanog niskougljičnog čelika. Također će se istražiti da li pri odabranim brzinama ispitivanja dolazi do promjena u početku plastičnog toka ovog čelika. Korištenjem tzv. mašinskog učenja kroz aplikaciju Matlab regression learner, prvo će se odrediti najoptimalnija metoda regresijske analize, a nakon toga razviti model kojim će se moći predvidjeti ponašanje čelika pri drugim brzinama ispitivanja.

2. TEORIJSKI DIO

Danas čelik predstavlja jedan od najvažnijih tehničkih materijala, samo u 2017. godini proizvedeno je ukupno 1 689,4 Mt. Njegova potrošnja izražena po glavi stanovnika mjerilo je industrijskog razvoja zemlje, pa tako prosjek svjetske proizvodnje za 2015. godinu iznosi 235,0 kg po glavi stanovnika. Slikom 1 prikazani su svjetski udjeli proizvodnje za 2016. i 2017. godinu [4].



Slika 1. Udjeli u proizvodnji sirovog čelika za 2016. i 2017. godinu [4].

Trenutno se može nabrojati oko 3 500 različitih tipova čelika specifičnih fizikalnih, kemijskih, mehaničkih svojstava, a otprilike 75% komercijalno dostupnih čelika je razvijeno u proteklih 20-ak godina. Osnovna podjela čelika dana je tablicom 1.

Tablica 1. Osnovna podjela čelika [1, 2].

Kemijski sastav:	Način proizvodnje:
<ul style="list-style-type: none"> • Zajamčeni i nezajamčeni kemijski sastav. • Nelegirani i legirani (jednostruko/višestruko). • niskolegirani (<5% udjela leg.el.) i visokolegirani (>5 udjela leg.el.). • Prema vrsti legiranih elemenata (Cr, Ni, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, itd.). • Prema kvaliteti: masovni, kvalitetni, plemeniti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konvertorski: Bessemer, Thomas, kisikov konvertor. • Elektročelici • SM čelik (smatra se napušten postupak) • Čelik dobiven sekundarnom metalurgijom (metalurgija lonca): <ul style="list-style-type: none"> ○ VOD – Vacuum Oxygen Degasation ○ AOD – Argon Oxygen Degasation ○ EPT – pretaljivanje pod troskom
Mikrostruktura:	Način lijevanja i dezoksidacije:
<ul style="list-style-type: none"> • Feritni, Feritno – Perlitni, Perlitni, Martenzitni, bainitni, austenitni, ledeburitni, itd. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nesmireni • Smireni • Polusmireni • Posebno smireni
Oblici poluproizvoda:	Primjena:
<ul style="list-style-type: none"> • Šipke, limovi, trake, cijevi, specijalni profili, itd. • Javlja se u stanjima: lijevani, toplovaljani, hladnovaljani, hladnovučeni, brušeni, polirani, itd. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konstrukcijski čelici: za nosive konstrukcije, za strojogradnju, itd. • Posebni čelici: otporni na koroziju, trošenje, toplinski postojani, hladnožilavi, itd. • Alatni čelici: uglavnom visokolegirani čelici za izradu reznih alata.

Od danas dostupnih kvaliteta čelika, ponajveća proizvodnja i potrošnja otpada na opće konstrukcijske čelike. Radi se o niskougličnim čelicima koji se dobro plastično oblikuju i imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva.

2.1. Niskougljični čelik i mehanička svojstva niskougljičnih čelika

Niskougljični čelik najčešći je konstrukcijski i trgovački čelik. Niskougljičnim ga čini raspon masenog sadržaja ugljika od 0.05% do 0.3%, pa se često naziva mekim čelikom. Minimalni sadržaj ugljika često nije strogo definiran, ali imaju zajamčena mehanička svojstva. Uglavnom su nelegirani, ali moguće je legiranje ili mikrolegiranje elementima: Mn, Cr, Nb, V, Ti, itd [5].

Niskougljični čelici tipično su feritne mikrostrukture, pa su svojstvima slični čistom željezu. Dobre su zavarljivosti za sve konvencionalne metode zavarivanja taljenjem. Najveći nedostatak je nemogućnost postizanja visoke tvrdoće kaljenjem. Nedostatak je moguće nadomjestiti površinskom obradom, poglavito karburiranjem ili karbonitriranjem. Primjena ovih čelika je široka u auto industriji, za proizvodnju traka, limova, žica hladnim valjanjem ili vučenjem [1].

2.2. Plastična prerada niskougljičnih čelika

Plastična prerada čelika podrazumijeva da se izljevani čelik, radilo se to o kontinuirano lijevanom komadu ili ingotu, naknadno nekim od postupaka plastične prerade deformiranjem oblikuje u gotov poluproizvod ili proizvod. Tijekom tog procesa odvija se plastična deformacija čelika. Većina poluproizvoda (limovi, trake, ingoti, ploče) deformira se u toplom stanju zbog sniženja otpora deformaciji pri povišenim temperaturama.

Prema definiciji plastična deformacija je promjena oblika i dimenzija uz konstantan volumen djelovanjem vanjske sile na deformirano tijelo. Jedna od teorija procesa plastične deformacije objašnjava kako se plastična deformacija odvija gibanjem dislokacija [3]. Stoga plastičnost, odnosno deformabilnost materijala ovisi o kristalnoj strukturi, greškama u strukturi (intersticijski, supstitucijski atomi, vakancije, uključci), intenzitetu djelovanja sila i temperature na kojoj se odvija deformacija.

Nakon tople plastične deformacije prema potrebi moguće je provesti tzv. hladnu plastičnu deformaciju. U hladnom stanju deformiraju se metalni materijali kada su veći zahtjevi za postizanjem određenog oblika i točnosti dimenzija, čiste površine, određenih mehaničkih svojstava, itd [6].

Hladna plastična deformacija je ona deformacija koja se provodi pri temperaturama nižim od temperature rekristalizacije, što ju čini specifičnom za pojedini materijal. Pri hladnoj deformaciji ne odvijaju se mehanizmi dinamičke rekristalizacije i oporavka, pa se broj dislokacija u materijalu povećava [3, 6, 7]. Gomilanjem dislokacija u materijalu dolazi do deformacijskog očvršćivanja. Stupanj očvršćivanja raste povećanjem stupnja deformacije, jer što je veći stupanj deformacije veća je gustoća dislokacija. Uslijed hladne plastične deformacije dolazi do smanjenja plastičnosti i povećanja deformacijskog otpora [3].

Mehanička svojstva čelika posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje čelika dobiva se obradom određenim tehnološkim postupkom. Izborom materijala i tehnološkog postupka obrade dobije se ciljano mikrostrukturno stanje koje pruža željena mehanička svojstva. Mehanička svojstva određuju mehaničku otpornost za određene eksploatacijske uvjete.

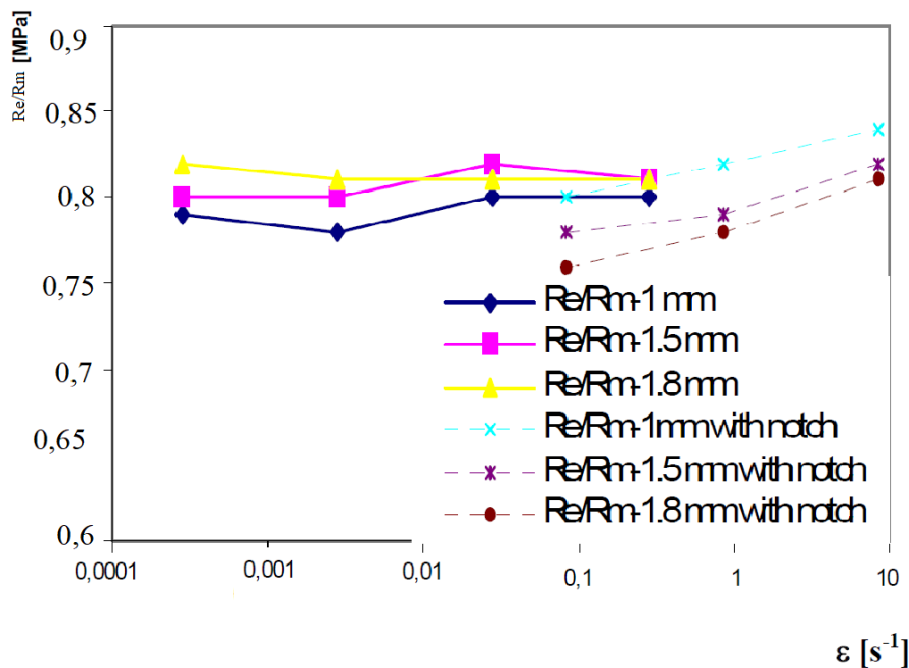
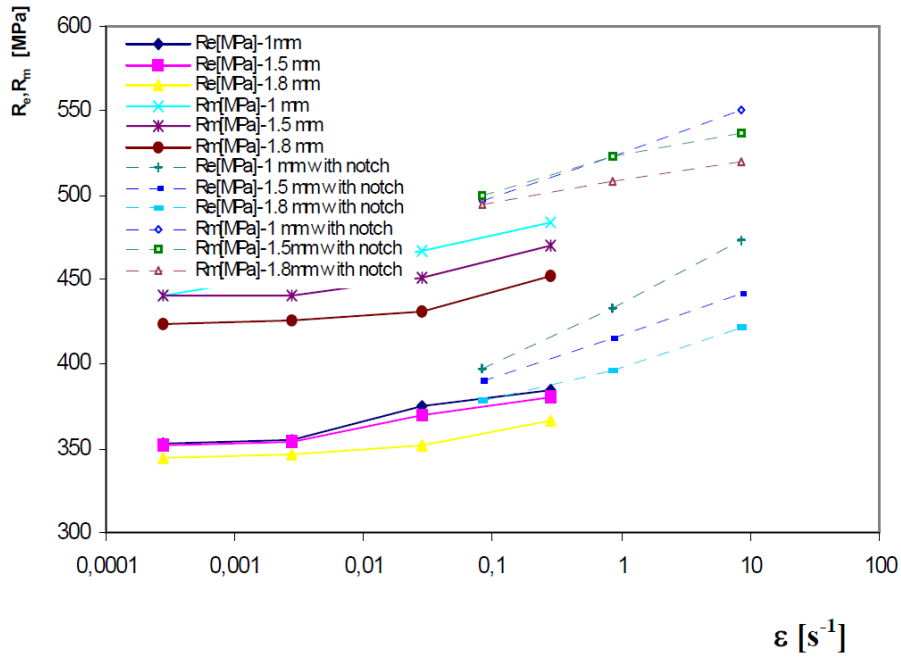
Ovisno o parametrima tijekom plastične prerade čelika ovisit će i konačna mehanička svojstva čeličnih proizvoda. Jedan od najvažnijih parametara tijekom plastične deformacije je svakako brzina deformacije, odnosno brzina kojom se provodi deformiranje prilikom oblikovanja čeličnih proizvoda. Provedena su brojna istraživanja o utjecaju brzine deformacije na mehanička svojstva tijekom tople plastične deformacije [3, 6, 7]. No i dalje je nedovoljno pojašnjen njen utjecaj pri hladnoj plastičnoj deformaciji.

2.3. Utjecaj brzine deformacije na mehanička svojstva niskougličnih čelika pri hladnoj deformaciji

Kako je ranije navedeno, pri hladnoj plastičnoj deformaciji ne odvijaju se mehanizmi rekristalizacije i oporavka, uslijed čega dolazi do znatnog očvršćavanja čelika [7, 6]. Istraživanja su pokazala kako je očvršćavanje hladnom deformacijom niskougličnog čelika izraženije do 50% ukupne plastične deformacije, te pri tome uslijed hladne plastične deformacije dolazi do porasta vlačne čvrstoće i do 80% [8].

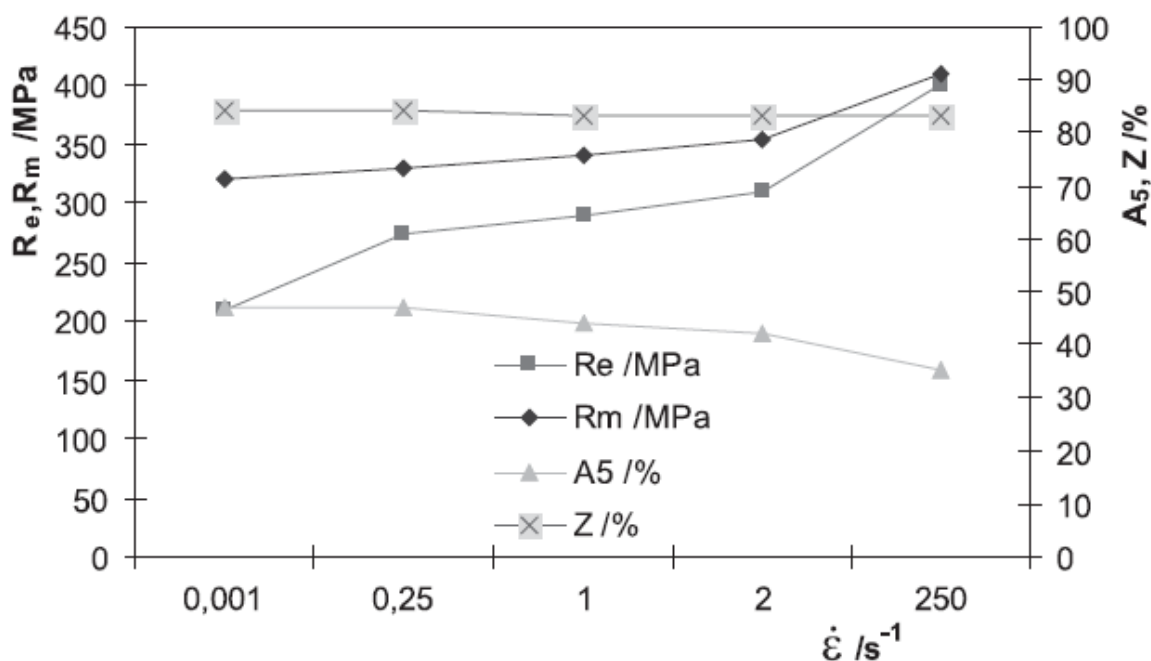
Poznato je kako povećanje brzine deformacije utječe na otpor deformaciji, te on raste s povećanjem brzine deformacije [3, 6]. Kod velikih brzina utjecaj se javlja zbog zaostajanja brzine plastične deformacije u usporedbi s brzinom elastične deformacije. Pri malim brzinama deformacije taj utjecaj nije toliko značajan [3]. Pri istraživanjima utjecaja brzine deformacije pri hladnoj deformaciji, većina istraživača promatra utjecaj brzine na promjene granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće, te njihov odnos [9, 10, 11].

Dokazano je kako se tijekom hladne plastične deformacije odnos granice razvlačenja i vlačne čvrstoće mijenja s porastom brzine deformacije i to na račun porasta granice razvlačenja [10, 12, 9]. U literaturi [9] analiziran je utjecaj brzine deformacije u intervalu 1 do 1000 mm/min i porasta opterećenja na mehanička svojstva i deformabilnosti standardnih ispitnih uzoraka i uzoraka sa zarezima od niskougličnog čelika. Rezultati ovog istraživanja pokazuju kako R_e i R_p rastu porastom opterećenja ispitivanja, a uzorci sa zarezom pokazuju veći porast mehaničkih svojstava nego standardni uzorci. U oba slučaja uočen je porast mehaničkih svojstava, koji je gotovo zanemarivo varirao s obzirom na promjenu debljine uzoraka iz serije. Uzet je u obzir gubitak plastičnosti zbog nehomogenosti (strukture, tolerancije dimenzije, tehnologije obrade), pa je promatran omjer R_e/R_m koji je ovisan o kvaliteti materijala „sheet grade“. Ispitivanja su pokazala kako omjer pokazuje trend rasta porastom brzine deformacije, ali je skok uzoraka sa zarezom znatno veći nego kod standardnih [9].

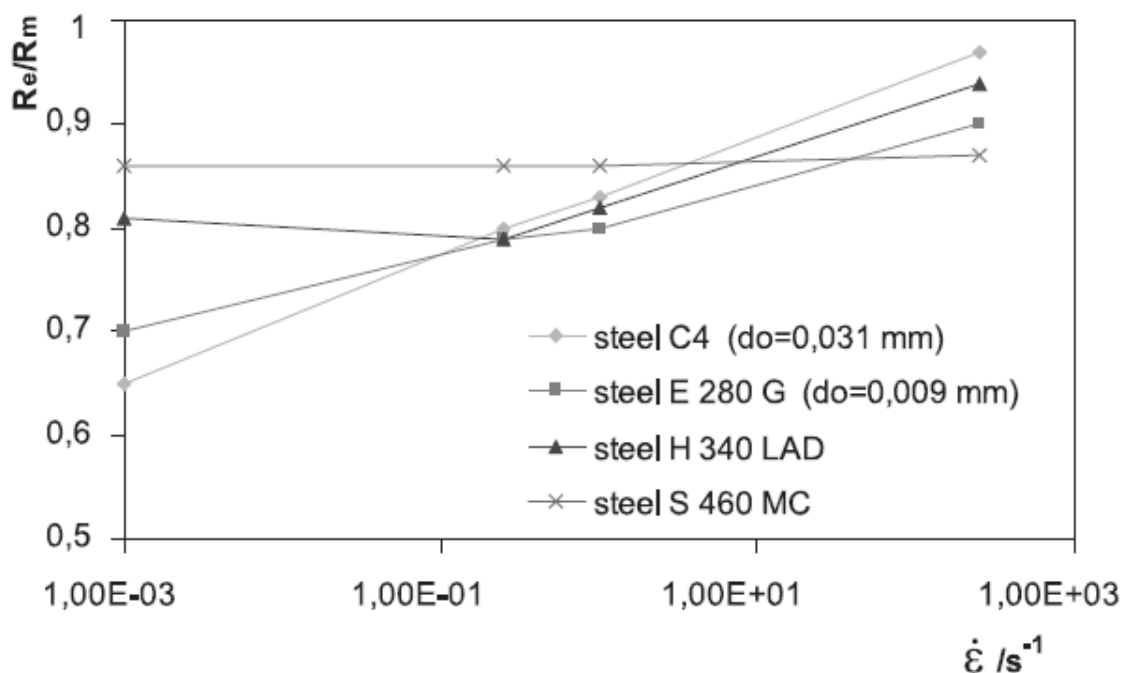


Slika 2. Rezultati statičkog vlačnog pokusa pri različitim brzinama deformacije za standardne uzorke i uzorke sa V-zarezom. Gore – Ovisnost R_e , R_p o $\dot{\epsilon}$; Dolje – Ovisnost R_e/R_m o $\dot{\epsilon}$ [9].

Slično, druga istraživanja na hladno-valjanom limu iz niskougličnog čelika, pokazuju kako je ispitivani čelik pokazao osjetljivost na promjenu brzine deformacije u rasponu brzina od 10^{-3} do $2,5 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ [10]. Rezultati ispitivanja pokazali su rast R_e i R_m , s time da je intenzitet rasta R_e veći nego R_m , slika 5 i 6. Pokazalo se kako je materijal osjetljiviji na porast brzine deformacije što je više homogen, jer homogenost podrazumijeva manje prepreka gibanju dislokacija. Granice zrna predstavljaju nepremostivu prepreku, pa je čelik manje osjetljiv na promjenu brzine deformacije ($\dot{\epsilon}$).



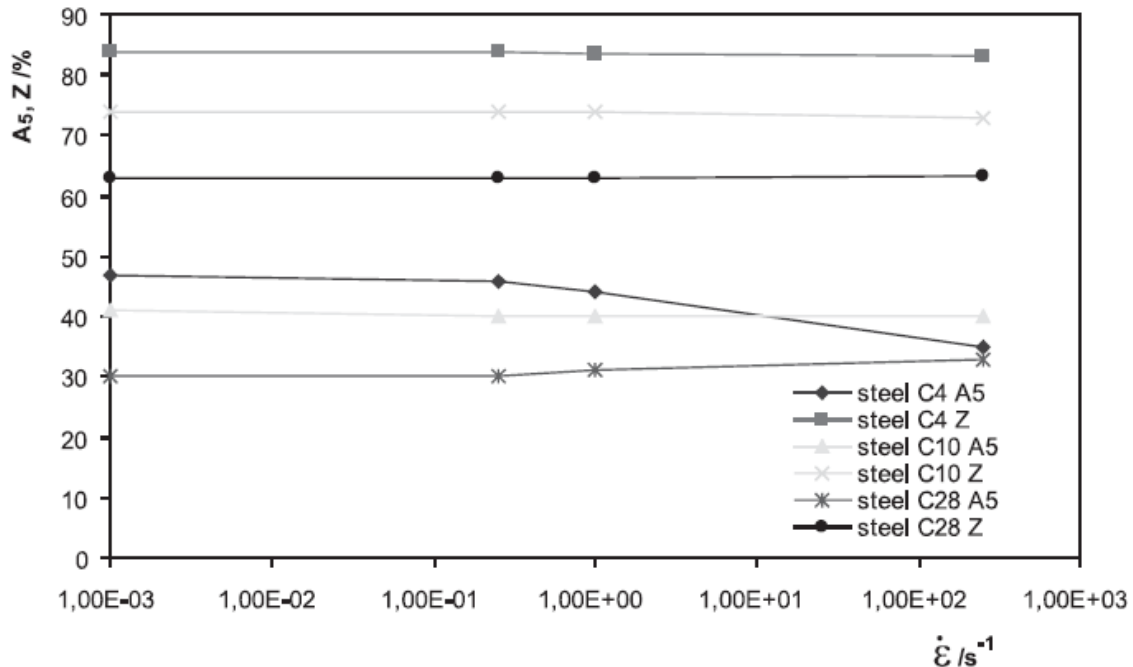
Slika 3. Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na mehanička svojstva niskougličnog čelika [10].



Slika 4. Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na omjer R_e/R_m za čelike različitih kvaliteta [10].

Dijagrami navedeni slikom 4 pokazuju rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava nelegiranih i mikrolegiranih čelika čije su oznake navedene prema ASTM normi. Također su zaključili kako je omjer R_e/R_m najvažniji faktor pri procjeni deformabilnosti čelika [10]. Dokazali su da taj omjer raste s porastom $\dot{\epsilon}$, no različitim intenzitetom ovisno o kvaliteti čelika ispitnog uzorka. Pokazalo se kako je iznos omjera za ispitani niskouglični čelik, slika 6, imao najintenzivniji rast u intervalu brzina od 0,65 do 0,95 s⁻¹.

Na osnovu omjera R_e/R_m testirani čelici podijeljeni su u tri kategorije: čelici sa $R_e < 300$ MPa i $R_e/R_m < 0,7$; čelici sa $R_e > 300$ i $R_e/R_m > 0,7$; čelici sa $R_e > 500$ MPa i $R_e/R_m > 0,8$. Primjećuje se općeniti rast istežljivosti (A_5) većine čelika, samo se za čelike sa $R_e < 300$ i $R_e/R_m > 0,82$ događa drastičan pad istežljivosti porastom $\dot{\epsilon}$ [10].



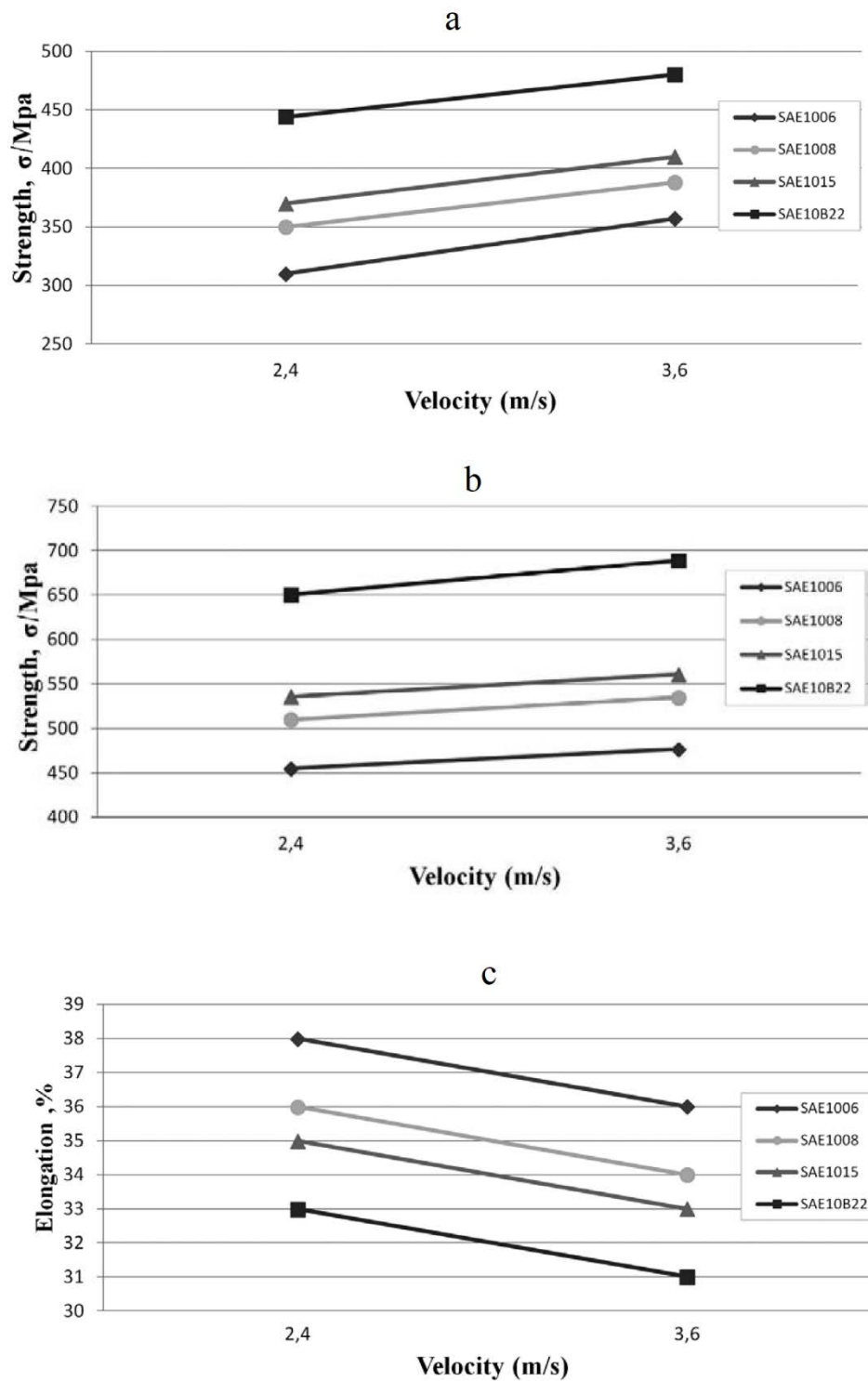
Slika 5. Utjecaj brzine deformacije $\dot{\epsilon}$ na istežljivost A_5 različitih ispitivanih čelika [10].

Istraživanjem je potvrđena pretpostavka o porastu otpornosti materijala prema plastičnoj deformaciji porastom $\dot{\epsilon}$. Intenzitet porasta omjera R_e/R_m porastom $\dot{\epsilon}$ je funkcija strukture materijala, a taj trend rasta je najizraženiji kod čelika kategorije $R_e < 300$ MPa. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost (A_5 i Z) korelira s omjerom R_e/R_m [10].

Izvlačenje žice je primjer tehnologije hladne deformacije na koju se mogu primjeniti spoznaje o mehaničkim svojstvima pri brzini deformacije. Istraživanje [11] je doprinjelo saznanjima o mehaničkim svojstvima i ponašanju niskougličnog čelika pri hladnom izvlačenju.

Upotrebljeni su niskouglični konstrukcijski čelici koji su konvencionalni materijali za izradu šina, opruga, elektrodi, spojnica, čavala, kablova, itd. Istraživanje je provedeno mjerenjem mehaničkih svojstava statičnim vlačnim pokusom za svaki uzorak prije i nakon hladnog vučenja. Žice su izvlačene kroz jednu matricu, a ispitne brzine izvlačenja su 3.6 i 2.4 m/s. Ispitivanja mehaničkih svojstava izvršena su za različite stupnjeve redukcije u intervalu od 0 do 70% [11]. Rezultati ispitivanja pokazali su porast vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, dok se istežljivost u trenu pucanja smanjila za sve ispitane čelike porastom stupnja redukcije (deformacije).

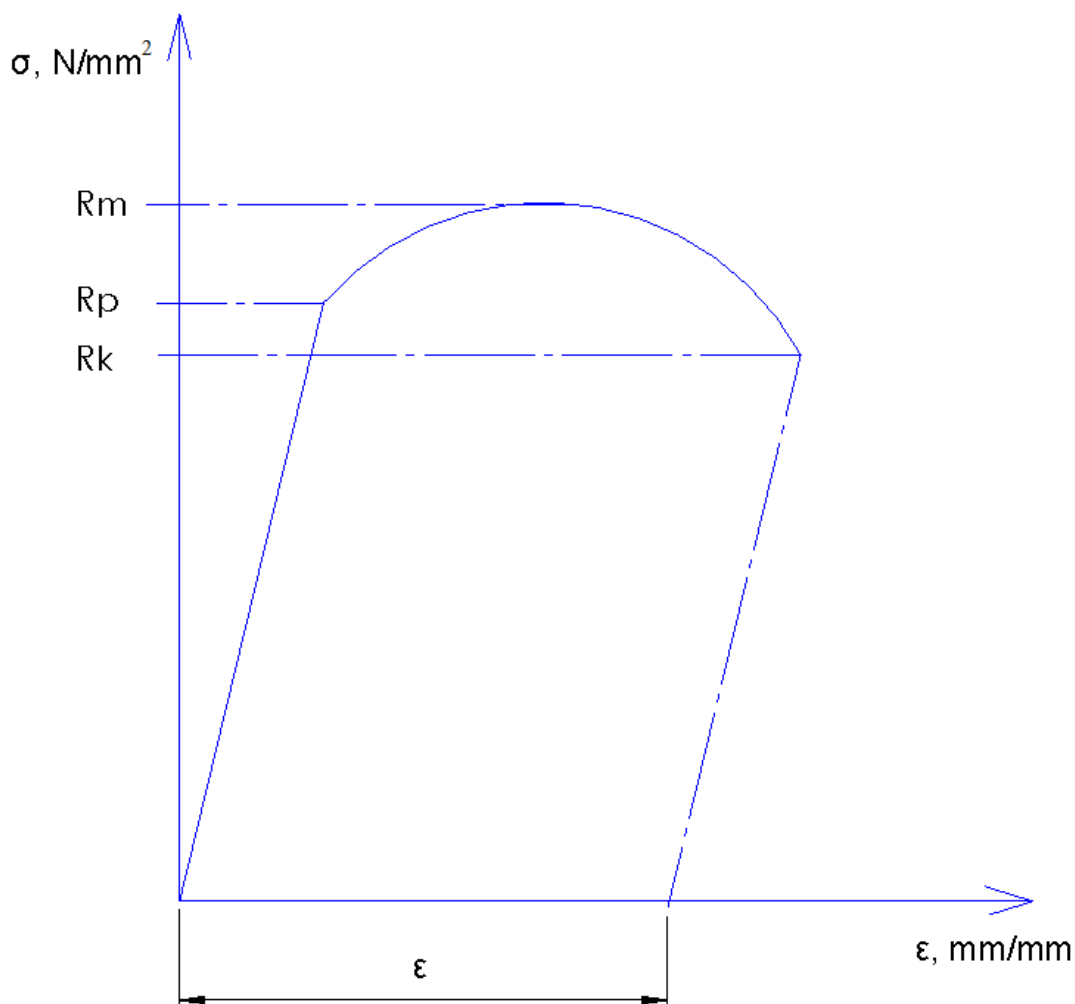
Pokazalo se kako je utjecaj stupnja redukcije (deformacije) veći od utjecaja brzine deformacije na konačna mehanička svojstva žice niskougličnog čelika. Zaključeno je kako se kontrolom parametara izvlačenja može direktno utjecati na porast mehaničkih svojstava žice [11]. Utjecaj brzine deformacije promatran je ispitivanjem žica dobivenim konstantnim stupnjem redukcije (sa $\Phi 5.50$ na $\Phi 4.81$), pri različitim brzinama vučenja (2.4 m/s i 3.6 m/s). Zapažanja su u skadu sa predviđanjima i prikazana slikom 6 [11].



Slika 6. Rezultati mehaničkih svojstava niskougličnih svojstava pri konstantnoj redukciji i različitoj brzini izvlačenja. a) Granica razvlačenja. b) Vlačna čvrstoća. c) Izduženje pri pucanju [11].

2.4. Određivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom

Mehanička svojstva čelika nije moguće odrediti analitički, pa se uzorci materijala podvrgavaju ispitivanjima. Nakon završetka postupaka plastične obrade uzorci se režu na točno propisanim mjestima iz materijala, te se pripremaju tzv. standardne epruvete za statički vlačni pokus. Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog vlačnog opterećenja. Ovakav oblik ispitivanja spada pod metode s razaranjem. Deformacijski otpor predstavlja otpor materijala prema deformaciji i lomu, tj. sposobnost materijala da podnosi naprezanja koja su prouzrokovana vanjskim opterećenjima. Ispitivanja se provode na uređajima kidalicama, a opterećuju se sve do pojave loma. Pri tome je iznos sile, kojom je epruveta opterećena za vrijeme ispitivanja, iskazan na skali uređaja u N ili kN te se snima dijagram sila (F) – produljenje (Δl). Iz tog dijagrama moguće je konstruirati dijagrame naprezanje (σ) – istežanje (ϵ) za ispitivani material. Jedan tipični dijagram naprezanje – istežanje za niskouglični konstrukcijski čelik prikazan je slikom 7 [13, 14].



Slika 7. Dijagram „naprezanje – istežanje“ za čelik.

Ispitivanja statičkim vlačnim pokusom se provode prema normi. Prema normi HRN EN ISO 6892-1 dva su načina upravljanja brzinom ispitivanja. Prvi način je upravljanje samom brzinom istezanja, pomoću povratnih informacija o produljenju dobivenih od ekstenzimetra. Drugi način je upravljanje procijenjenom brzinom istezanja ispitnog dijela epruvete, što se postiže regulacijom brzine pomaka na brzinu jednaku umnošku željene brzine istezanja i duljine ispitnog dijela epruvete.

Ako se materijal deformira homogeno pri konstantnoj sili, brzina prirasta istezanja i procijenjena brzina prirasta istezanja ispitnog dijela epruvete su približno jednake.

Različite su ako materijal pokazuje diskontinuirano ili nazubljeno deformiranje ili u slučaju stvaranja vrata. Ako se sila povećava, procijenjena brzina prirasta istezanja može biti bitno ispod željene brzine istezanja zbog popustljivosti ispitnog uređaja [13, 14].

Statičkim vlačnim pokusom se određuju osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica proporcionalnosti (R_p slika 3), vlačna čvrstoća (R_m slika 7), te kontrakcija (Z) i konačno relativno produljenje (istezljivost) epruvete kod loma (A).

2.4.1. Granica proporcionalnosti, R_p (N/mm^2)

Granica proporcionalnosti (granica razvlačenja) je ono naprezanje pri vlačnom opterećenju koje izaziva znatno istezanje ispitnog uzorka ili epruvete, bez povećanja sile. Granica razvlačenja je uz vlačnu čvrstoću osnovno mehaničko svojstvo na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Ona predstavlja ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnog dijela. Naprezanja veća od R_p uzrokuju trajnu plastičnu deformaciju. Granica razvlačenja za pojedine materijale određuje se statičkim vlačnim ispitivanjem na kidalici, a utvrđuje izrazom (1) [15, 16].

$$R_p = \frac{F_p}{S_0}, N/mm^2 \quad 1.$$

2.4.2. Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm^2)

Vlačna čvrstoća predstavlja omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom ispitivanju i površine početnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka ili epruvete S_0 . Ovu veličinu je pogrešno nazivati maksimalnim naprežanjem, jer je to naprezanje pri maksimalnoj sili. Površina presjeka ispitnog uzorka se počne naglo smanjivati od trenutka postizanja maksimalne sile. Stvarno naprezanje u tom trenutku raste unatoč smanjenju sile. Nakon dostignutog R_m deformacija uzorka više nije jednaka po cijelom ispitnom dijelu nego je lokalizirana. Vlačnu čvrstoću računamo prema izrazu (2) [15, 16].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, N/mm^2 \quad 2.$$

2.4.3. Istezljivost, A (%)

Istezljivost A označava relativno produljenje materijala u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu mjernu duljinu L_0 . Na osnovu istežljivosti materijali se međusobno uspoređuju prema duktilnosti. Općenito se materijali s istežljivošću manjom od 5% smatraju krhkima, a oni s istežljivošću većom od 5% duktilnima. Statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se konačno relativno produljenje, tj. konačno istežanje prema izrazu (3) [15, 16].

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad 3.$$

Istezljivost A je definirana izrazom (4).

$$A = \varepsilon_u \cdot 100\% \quad 4.$$

2.5. Matematičko modeliranje

Matematičko modeliranje i simulacije omogućuju opisivanje i testiranje neke pretpostavke ili uvjerenja o nekoj pojavi u prirodi. Definirati se može kao postupak opisivanja realnog sustava matematičkim jednadžbama. Cilj modeliranja je prevesti model u matematičku formu kako bi se mogao razviti i upotrijebiti za kasnije analize, projekte i optimiranje sustava.

Matematičko modeliranje može se upotrijebiti u različite svrhe. Koliko dobro će se neki cilj ostvariti ovisi jednako o poznavanju sistema koji je potrebno modelirati i izvedbi modela. Za primjer nekih ciljeva može se izdvojiti:

- Razvoj znanstvenog razumijevanja kroz kvantitativno izražavanje trenutnog poznavanja sistema (Prikazivanjem onoga što je poznato, često se može prikazati što je nepoznato.)
- Testiranje efekta promjene u nekom promatranom sistemu.
- Pomoć u donošenju strateških odluka

Simulacija je provođenje ispitivanja na kreiranom modelu. Ideja modeliranja se razlikuje od simulacije. Model smatramo alatom koji simulacijom, tj. radnjom koristimo. Pojmovi su međusobno neizostavni, pa se u praksi često miješaju i podrazumjevaju. Razvoj metoda matematičkog modeliranja omogućio je kreiranje sve kompleksnijih sistema i mogućnost predviđanja ponašanja modela bez fizičkog testiranja. Posljedica implementacije matematičkog modela u proizvodnji je jeftiniji, kvalitetniji i brzo proizveden proizvod [17, 18, 19].

2.6. Model

Model je reprezentacija sustava koji je moguće testirati. Sustav je realna ili apstraktna cjelina koja je odvojena od okoliša i egzistira zasebno. Najčešće ga se definira matematičkim relacijama između ulaznih i izlaznih veličina. Te veličine se nazivaju varijable i predstavljaju neka svojstva sustava (npr. T, t, c_A, v, μ, ρ). Varijable mogu biti: ulazne – izlazne, zavisne – nezavisne, varijable stanja, i slučajne varijable. Varijable, koeficijenti i matematički operatori zajedno čine model [18]. Podjela modela prikazana je tablicom 2.

Tablica 2. Podjela matematičkih modela [18].

Linearni i nelinearni	Deterministički i stohastički
<ul style="list-style-type: none"> Model je linearan ako jednadžbe pokazuju linearno ponašanje u grafičkom prikazu promjenom varijable. Nelinearne je moguće pojednostaviti i linearizirati. Time gube na točnosti, ali jednostavno prikazuju promjene i međusobne zavisnosti među varijablama. 	<ul style="list-style-type: none"> Deterministički modeli sadržavaju skupove varijabli točno određenih parametara. Unutar jednog skupa vrijednosti rezultat je uvijek isti. Stohastički modeli sadrže u sebi slučajnosti. Stanje varijabli nije opisano točnom vrijednosti nego intervalom.
Statički i dinamički	Kontinuirani i diskretni
<ul style="list-style-type: none"> Statički modeli daju matematički opis sustava u stacionarnom stanju. Vrijednosti ulaznih i izlaznih varijabli su konstante, derivacije su jednake nuli i ne ovise o vremenu. Dinamički modeli ovise o vremenu, a promjene varijabli su prikazane diferencijalnim jednadžbama. 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuirani modeli prikazuju se kao funkcije vremena, $f(t)$. Diskretni modeli uzimaju u obzir samo točku u vremenu, jer su vrijednosti varijabli međusobno ne povezane.
Deduktivni, induktivni i „plivajući“	
<ul style="list-style-type: none"> Deduktivni model čini logična struktura utemeljena na teoriji i zaključivanju. Induktivni modeli nastaju iz mjerenja i dokaza. „Plivajući“ model se zasniva na procjeni očekivanih odnosa među varijablama. 	

2.7. Pristup matematičkom modeliranju

Izrada modela zasniva se na četiri načela koji se u realnoj primjeni dijele na sedam koraka prikazano tablicom 3.

Tablica 3. Pristup izradi matematičkog modela [18].

Osnovno načelo	→	Hodogram
<ol style="list-style-type: none"> Definiranje i imenovanje svih vrijednosti varijabli koje opisuju problem. Identifikacija međusobnih odnosa poznatih i nepoznatih varijabli modela. Odnosi su određeni fizikalnim zakonima, intuicijom ili iskustvom. Procjena i predviđanje pretpostavki ugrađenih u model. Opisno rješenje problema, a ono mora biti jasno i razumljivo 	→	<ol style="list-style-type: none"> Detaljni opis problema. Imenovanje svih varijabli sustava. Opis veza među varijablama sustava. Navođenje svih pretpostavki ugrađenih u model. Opis matematičkog problema. Rješavanje definiranog matematičkog problema Izvještaj o rješenju matematičkog problema i rasprava o pretpostavkama.

Sustav nad kojim se vrši modeliranje često je kompleksan, pa je gotovo nemoguće “skočiti” s neke pretpostavke na gotovu matematičku formulaciju. Kada se opisuje sustav i kreiraju pretpostavke, mora se upotrijebiti metodologija. Dijagram toka nudi vizualni pregled strategije koja sadrži hodogram i načela kojima se kreće u matematičko modeliranje sustava.

Dijagram toka može biti podatkovni ili programski. Njegova konstrukcija standardizirana je novim ISO 1028:1973 standardom na osnovu prijedloga ECMA-4 standarda [17, 20].

Dva su moguća ishoda dobro provedenog matematičkog modeliranja:

1. Model je moguće testirati: Moguće je predvidjeti ponašanje sustava u određenim situacijama i uvjetima bez fizičkog ispitivanja.
2. Model je reprezentacija: Nužno je razumijeti sustav da bi ga se moglo s nečime predstaviti, a model sadrži to znanje.

Ove vrijednosti u kombinaciji s alatima digitalne tehnologije stvaraju veliki potencijal u razvoju industrije [19].

2.8. Matlab Machine Learning Toolbox

Softverski alat Statistics and Machine Learning Toolbox, programskog paketa MathWorks Matlab Product Family, omogućuje kreiranje matematičkog modela linearnom regresijom [21].

Regresijska analiza je statistički postupak za procjenu odnosa među varijablama. Cilj istraživanja odnosa među varijablama je utvrditi statističku ovisnost i pokazatelje jakosti takve ovisnosti [22].

Odnosi među pojavama mogu biti funkcionalni (deterministički) i statistički (stohastički):

- Funkcionalni ili deterministički odnosi su postojani, izražavaju zakonitosti koje se iskazuju analitički (formulom, jednadžbom). Svakoju vrijednosti jedne pojave odgovara točno određena vrijednost druge pojave.
- Statistički ili stohastički odnosi su slabiji od funkcionalnih. Jednoj vrijednosti jedne pojave odgovara više različitih vrijednosti druge pojave. Takva odstupanja su u praksi češća.

Regresijska analiza uključuje mnoge tehnike za modeliranje i analizu varijabli, gdje se fokus stavlja na odnosu između zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli.

Regresijska analiza omogućuje promatranje promjene vrijednosti zavisne varijable kada bilo koja nezavisna varijabla varira, dok su ostale nezavisne varijable fiksne.

Regresijska analiza procjenjuje uvjetno očekivanje zavisne varijable s obzirom na nezavisne varijable, odnosno prosječnu vrijednost zavisne varijable kada su nezavisne varijable fiksne.

U regresijskoj analizi važno je karakterizirati varijacije zavisne varijable oko regresijske funkcije, a to se može opisati pomoću distribucije vjerojatnosti [23].

Matlab regression learner stvara matematički model na osnovu ulaznih varijabli nizom metoda regresije, pa konačni rezultat prikazuje modelom koji ima najmanji RMSE. Numeričke vrijednosti uspoređenih varijabli prikazuju se grafički dijagramom rasipanja.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

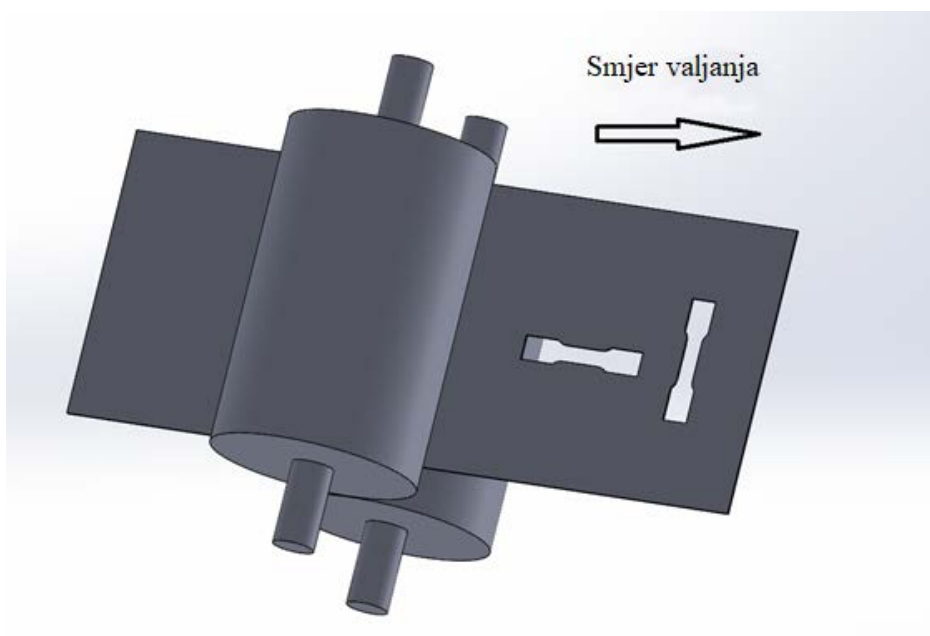
3.1. Ispitivani čelik i uzorkovanje

Za ispitivanja utjecaj brzine razvlačenja na početak plastičnog toka i mehanička svojstva tijekom hladne plastične deformacije korišten je niskouglični konstrukcijski čelik ST 52-3N. oznake prema DIN EN 10025-2 [14]. Ispitivani čelik je povišene čvrstoće, dobre zavarljivosti, i posjeduje odlična svojstva prikladna za hladnu obradu. Kao trgovački proizvod dolazi u obliku lima, ploča ili blokova koji su normalizirani. Kemijski sastav je ranije provjeren ispitivanjem na optičkom vakuumskom spektrometru ARL MA, kemijski sastav dan je tablicom 4.

Tablica 4. Kemijski sastav ispitivanog niskougličnog čelika.

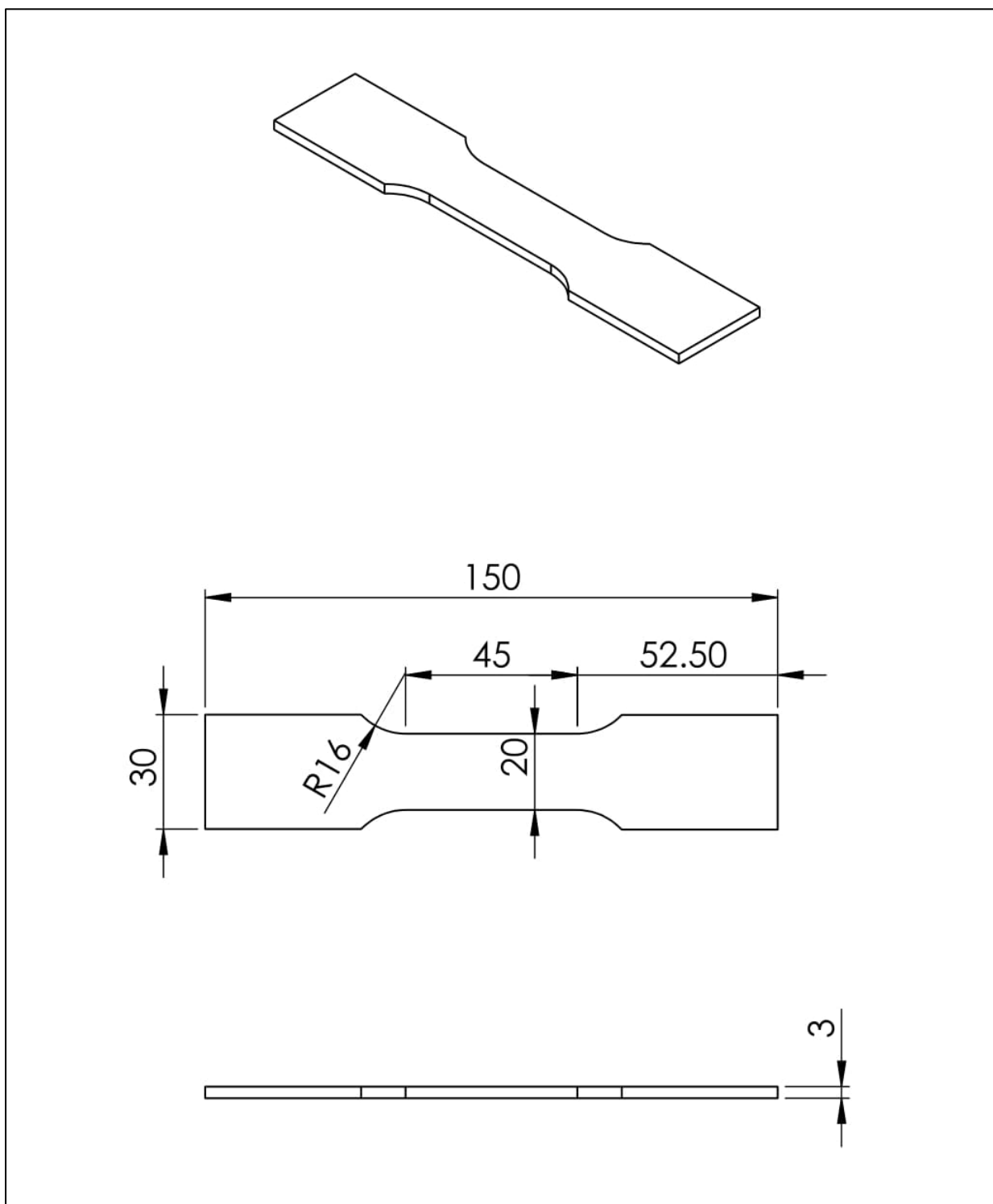
Element	C	Mn	Si	P	S	Al
mas, %	0,13	0,77	0,18	0,010	0,019	0,02

Iz navedenog čelika nabavljen je toplovaljana traka debljine 3 mm, te su uzorci iz nje uzimani u smjeru i okomito na smjer valjanja, slika 8.



Slika 8. Ilustracija valjanog traka iz kojeg su uzimani ispitni uzorci.

Uzorkovanje je provedeno tako da su iz trake izrezane lamele širine 30 mm i duljine 150 mm. Sukladno normi EN 10002_1 za ispitivanja statičkim vlačnim pokusom iz izrezanih traka izrađeni su uzorci pravokutnog poprečnog presjeka, slika 9.



Slika 9. Uzorak pravokutnog poprečnog presjeka za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom.

Priprema ispitne duljine uzoraka je provedena glodanjem na CNC glodalici u Tehničkoj školi Sisak.

3.2. Metode i uvjeti ispitivanja

Ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom pri sobnoj temperaturi, te pri različitim brzinama razvlačenja uzoraka. Za istraživanja korištena je univerzalna kidalica ZWICK s maksimalnim mogućim opterećenjem od 50 kN, slika 10.



Slika 10. Kidalica Zwick 50 kN i mjerna područja.

Uređaj ima mogućnost podešavanja brzine razvlačenja od 0 – 120 mm/ min. Za istraživanje utjecaja povećanja brzine deformacije na početak plastičnog toka i mehanička svojstva čelika odabrano je 9 brzina razvlačenja i to 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 i 60 mm/min. Navedene brzine razvlačenja za odabranu ispitnu duljinu uzoraka odgovaraju području brzina deformacije od

$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ do $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Za svaku odabranu brzinu ispitivanja predviđeno je korištenje minimalno tri uzorka.

Ekperimentalni dio ispitivanja je proveden tako da su uzorci označeni i izmjerene su im početne vrijednosti duljine, širine i debljine ispitnog dijela uzoraka. Na kidalici je odabrano maksimalno opterećenje od 50 kN, te je podešena željena brzina razvlačenja uzoraka. Uzorci su postavljeni u čeljusti kidalice, vodeći računa da su u vertikalnoj ravnini s vodicama kidalice, slika 11.



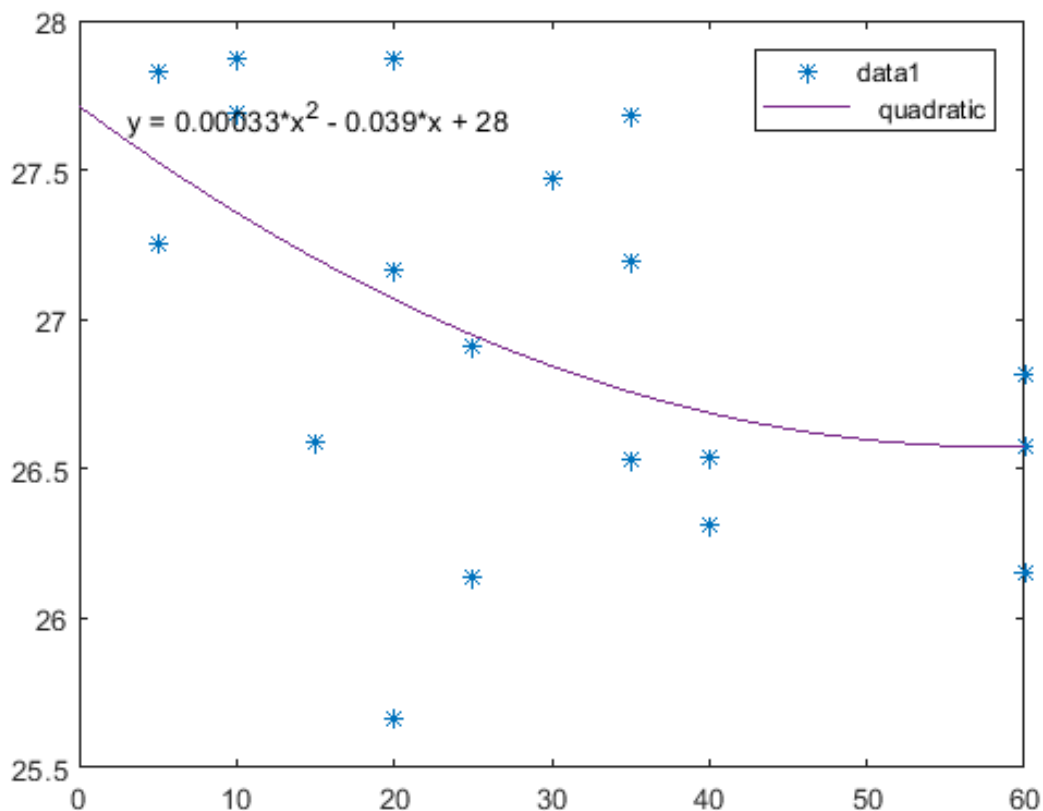
Slika 11. Čeljusti kidalice s postavljenim ispitnim uzorkom prije početka ispitivanja.

Nakon postavljanja uzoraka, mjerna skala je nulirana i postavljeno je pisalo za zapis dijagrama sila – produljenje. Nakon toga uzorci su razvlačeni sve do loma. Nakon loma svaki je uzorak izmjeren te su izmjerene vrijednosti izduženja i očitani iznosi sile dostizanja granice proporcionalnosti i maksimalne sile prije loma uzoraka.

Iz izmjerenih i očitanih vrijednosti izračunate su vrijednosti istezanja, granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće. Vrijednosti su uspoređene za svaku korištenu brzinu razvlačenja kako bi se odredio utjecaj promjene brzine deformacije na navedene vrijednosti, što je detaljnije dano u rezultatima i diskusiji.

3.3. Analiza rezultata ispitivanja

Analiza rezultata ispitivanja vršena je korištenjem programskog paketa MATLAB. Analiza se provela tako da su eksperimentalne vrijednosti unesene u MATLAB te je za svaku mjerenu vrijednost određena ovisnost o promjeni brzine ispitivanja. Na eksperimentalne vrijednosti „fitane“ su krivulje koje pokazuju trend promjene mjerene vrijednosti u ovisnosti o brzini ispitivanja, a nakon toga određene su funkcije pripadajućih krivulja, slikom 8 dan je primjer određivanja krivulje ovisnosti.

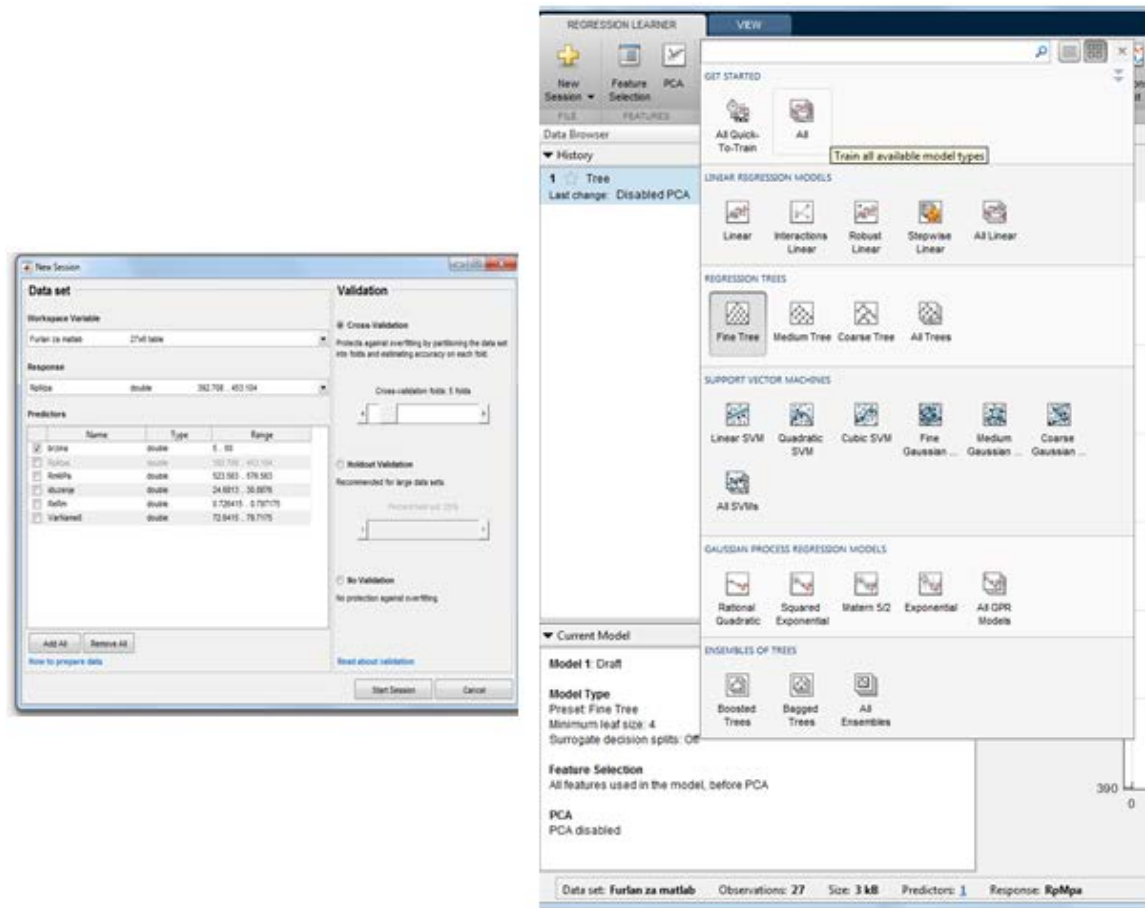


Slika 12. Primjer određivanja krivulje ovisnosti izduženja o brzini razvlačenja.

Rezultati ove analize dani su u rezultatima i diskusiji zajedno s određenim funkcijama za svaki pojedini promatrani parametar.

Nakon provedene analize utjecaja promjene brzine razvlačenja na mehanička svojstva ispitivanog čelika pristupilo se razvoju modela ovisnosti mehaničkih osobina o promjeni brzine razvlačenja. U tu vrhu korištena je ekstenzija u MATLAB-u, točnije aplikacija „Regression Learner App“. Radi se o aplikaciji koja ima mogućnost tzv. mašinskog učenja (engl. machine learning).

Prvi korak je definirati ulazne i izlazne veličine, kao ulazna veličina korištene su brzine na kojima je vršeno ispitivanje. Kao izlazne veličine korištene su izmjerene vrijednosti granice proporcionalnosti, vlačne čvrstoće, izduženja i odnos R_e/R_m . Slikom 13 prikazan je primjer postavljanja varijabli i odabir modela kojim će se vršiti treniranje sustava.



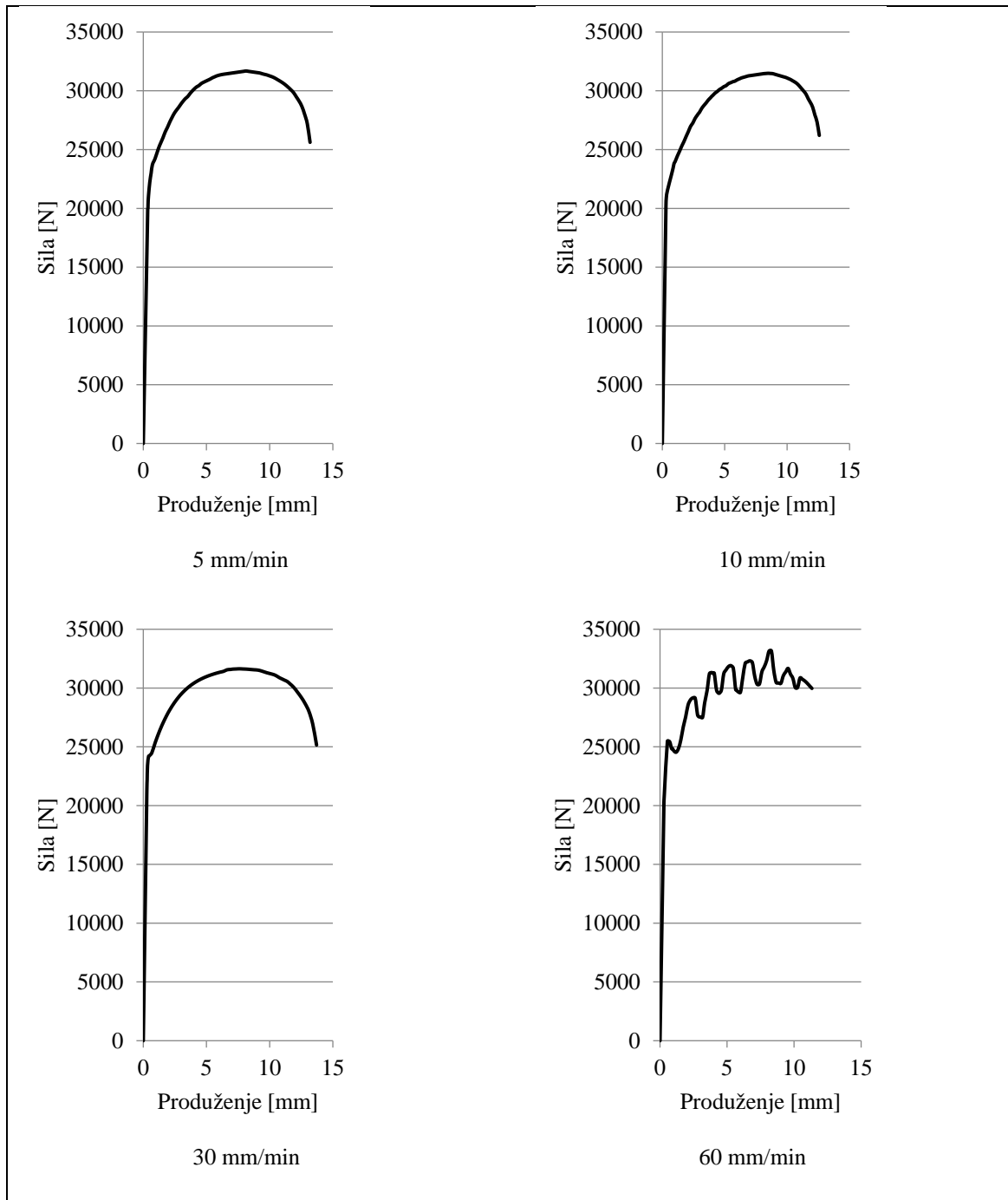
Slika 13. Postavljanje ulaznih parametara i odabir regresije unutar Regression Learner aplikacije.

Nakon unosa varijabli, odabrano je treniranje po svim dostupnim metodama regresije. Za svaku eksperimentalnu vrijednost određena je optimalna metoda regresije i ponovljeno treniranje kako bi dobili pripadajuće modele.

Kroz korištenu aplikaciju nije moguće kvantificirati model i iskazati ga u obliku jednadžbe, već su dobiveni modeli spremljeni za svaki mjereni parametar zasebno. Oni mogu poslužiti za predviđanje ponašanja pojedinih vrijednosti mehaničkih svojstava prilikom drugih istraživanja, ili za kompariranje drugih vrijednosti s pretpostavljenim modelom.

4. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Tijekom statičkog vlačnog razvlačenja uzoraka kontinuirano su snimani dijagrami sila produljenja. Tipični dijagrami sila – produljenje, dobiveni tijekom ispitivanja, prikazani su slikom 14, za različite brzine ispitivanja.



Slika 14. Snimljeni dijagrami sila-produljenje pri različitim brzinama ispitivanja, uzorci uzimani u smjeru valjanja.

Iz snimljenih dijagrama može se uočiti kako se radi o čeliku koji pri manjim brzinama ispitivanja ima blagi prijelaz iz elastičnog u plastično područje deformacije. Pri brzinama od 30 mm/min može se uočiti nešto izražajniji prijelaz, no i dalje bez izražene gornje i donje granice proporcionalnosti. Ista su zapažanja uočena na obje grupe uzoraka, uzimanih u smjeru i okomito na smjer valjanja lima.

Na dijagramima sila – produženje može se uočiti da porastom brzine ispitivanja iznad 35 mm/min nakon početka plastičnog toka dolazi do određenih oscilacija u očitanoj sili opterećenja. To je posebno izraženo pri brzinama 40 i 60 mm/min. Ista su zapažanja bila uočena na uzorcima u smjeru i okomito na smjer valjanja lima. Jedan takav dijagram prikazan je slikom 14, uzorak ispitan pri brzini razvlačenja 60 mm/min, uziman u smjeru valjanja.

Uočene pojave oscilacije sila na dijagramu sila – produženje asocirale su na pojave nehomogenih deformacija što su ranija istraživanja pokazala kod pojedinih niskougličnih čelika [12, 24].

No kako se oscilacije sile nastavljaju tijekom cijelog područja plastične deformacije, te izostanka određenog zastoja u porastu sile pri dostizanju gornje granice proporcionalnosti, uočene pojave se ne mogu povezati s navedenim nehomogenim deformacijama, te također nije povezano sa samim tokom materijala tijekom deformacije. Daljnja analiza ovog područja korištenjem vizualnih metoda ispitivanja moglo bi dati točniji odgovor na uočena odstupanja na dijagramima.

Kako je ova pojava izražena samo kod većih brzina ispitivanja, uslijed izostanka prisutnosti zastoja u porastu sile, te usporedbom dobivenih rezultata s ranijim sličnim istraživanjima provedenim na istom čeliku [12], ovu pojavu objašnjavamo tromošću samog uređaja. Pretpostavka je da pri dostizanju granice proporcionalnosti dolazi do određenog pada u naprezanju, kako je vrlo velika brzina razvlačenja, uteg koji je protuteža na uređaju se zanjše pri tome, te na taj način dolazi do zapisa oscilacija u sili. Ovu tezu moguće je potvrditi ponavljanjem ispitivanja pri višim brzinama razvlačenja na drugom uređaju koji ne koristi uteg kao protutežu prilikom ostvarivanja sile opterećenja.

Iz početnih vrijednosti dimenzija ispitnih epruveta, izmjerenih produženja i očitanih vrijednosti sila razvlačenja određena su osnovna mehanička svojstva ispitivanog čelika pri svim brzinama ispitivanja. Isto je ponovljeno i na uzorcima uzimanim okomito na smjer valjanja lima. Izračunate vrijednosti granice proporcionalnosti, vlačne čvrstoće i izduženja dane su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Rezultati statičkog vlačnog pokusa na uzorcima uzimanim u smjeru valjanja trake.

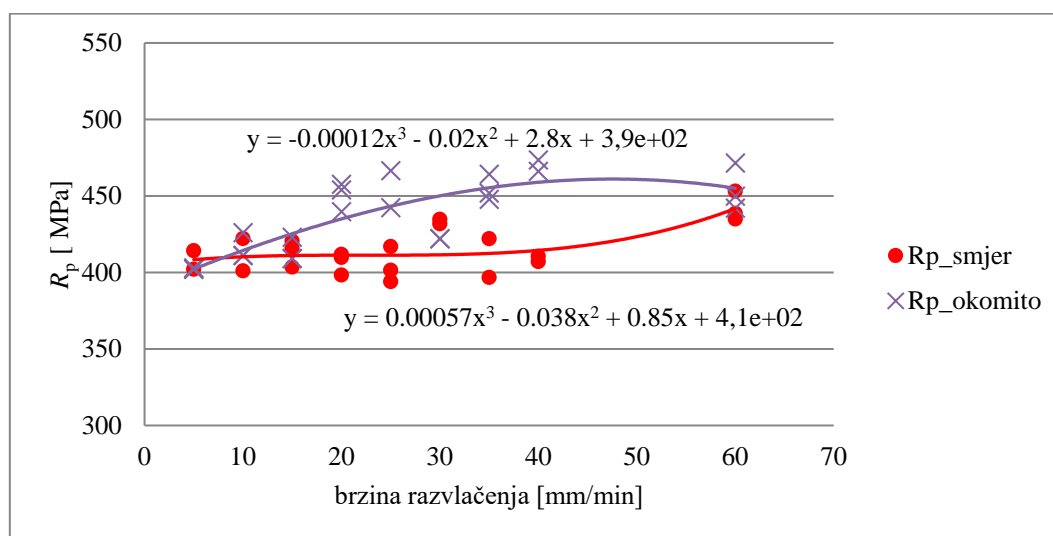
Brzina ispitivanja / mm/min	R_e / MPa	R_m /MPa	Iduženje / mm/mm
5	414	548	29,01
5	402	544	28,57
5	392	536	30,78
10	401	541	26,41
10	422	557	29,38
10	394	542	30,89
15	415	551	28,44
15	420	548	26,64
15	403	539	27,56
20	409	542	27,69
20	398	532	29,91
20	411	546	30,64
25	416	537	24,84
25	401	526	24,75
25	393	523	27,69
30	431	556	26,59
30	426	552	30,13
30	434	576	27,11
35	422	548	27,69
35	426	543	24,68
35	396	524	27,41
40	426	556	29,78
40	410	533	27,14
40	407	538	29,27
60	438	550	30,30
60	453	572	28,80
60	434	565	30,19

Tablica 6. Rezultati statičkog vlačnog pokusa na uzorcima uzimanim okomito na smjer valjanja trake.

Brzina ispitivanja / mm/min	R_e / MPa	R_m /MPa	Iduženje / mm/mm
5	402	541	26,83
5	403	539	27,25
5	402	541	26,83
10	411	543	27,69
10	426	547	27,87
10	411	543	27,69
15	423	546	26,59
15	409	536	26,59
15	409	536	26,59
20	457	581	27,92
20	439	559	26,41
20	453	574	28,63
25	442	566	27,42
25	430	547	30,45
25	466	577	26,42
30	415	537	29,09
30	422	539	27,47
30	422	539	27,47
35	451	579	30,08
35	464	581	29,31
35	447	575	27,49
40	473	589	28,84
40	466	584	28,68
40	445	564	31,49
60	442	548	27,78
60	449	557	26,15
60	471	584	27,14

Daljnjom analizom promatran je utjecaj povećanja brzine razvlačenja, a time i brzine deformacije, na vrijednosti izmjerenih granica proporcionalnosti, vlačne čvrstoće i izduženja. Analiza je izvršena odvojeno na uzorcima uzimanim u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja lima kako bi utvrdili da li postoje razlike u ponašanju čelika ovisno o smjeru valjanja. Analiza rezultata ispitivanja je provedena korištenjem programskog paketa Matlab. Prvo su definirane ulazne i izlazne varijable. Brzina deformacije je korištena kao ulazna varijabla, a izmjerene vrijednosti mehaničkih svojstava kao ovisna izlazna varijabla. Na izmjerene vrijednosti su korištenjem Matlaba prvo fitane krivulje koje najbolje opisuju trend promjene mjerenih parametara u ovisnosti o brzini ispitivanja.

Ovisnosti promjene granice proporcionalnosti o promjeni brzine razvlačenja, za uzorke uzimane u smjeru i okomito na smjer valjanja lima, te pripadajuće krivulje, prikazani su slikom 15.



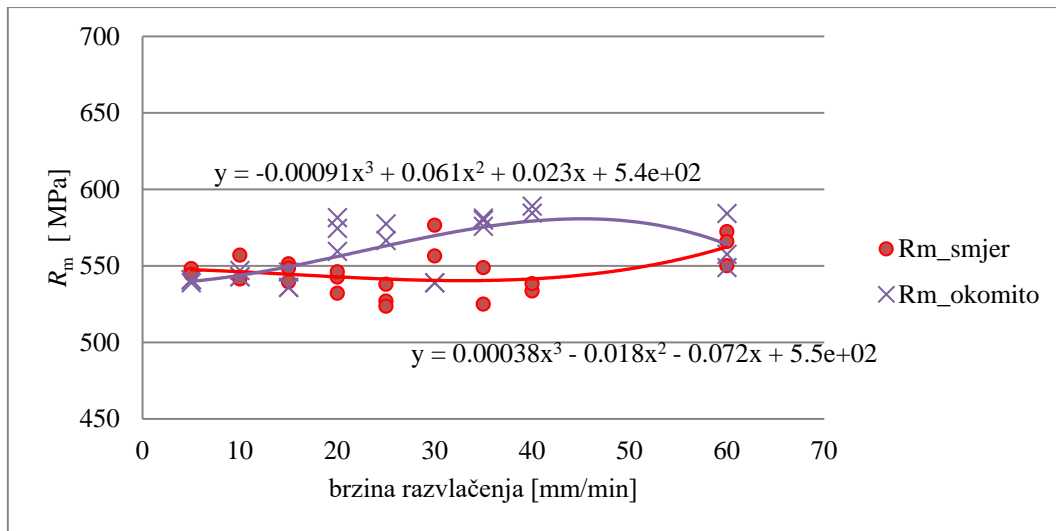
Slika 15. Ovisnost promjene granice proporcionalnosti s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.

Iz prikazanog dijagrama ovisnosti R_p o brzini razvlačenja može se prvo uočiti kako su vrijednosti izmjerenih granica proporcionalnosti veće po iznosu kod uzoraka uzimanih okomito na smjer valjanja lima. Ako promotrimo utjecaj porasta brzine razvlačenja, u rasponu brzina koje smo koristili za ispitivanja, može se uočiti kako porastom brzine razvlačenja, a time i brzine deformacije, dolazi do porasta u izmjerenim vrijednostima granice proporcionalnosti. Slična zapažanja utjecaja brzine deformacije uočena su i kod nekih drugih niskougličnih čelika [9, 10, 11].

Može se zaključiti kako u ovom području brzina ispitivanja dolazi do promjene mehaničkih svojstava ispitivanog čelika. U slučaju uzoraka uzimanih u smjeru valjanja trake, ovisnost o promjeni brzine razvlačenja postaje izražena tek iznad 40 mm/min. Uzorci uzimani okomito na smjer to pokazuju od brzine 5 mm/min, te pri dostizanju brzine 40 mm/min porast postaje slabije izražen.

Rezultati istraživanja pri brzini razvlačenja od 60 mm/min, za uzorke uzimane okomito na smjer valjanja, ne pokazuju očekivano ponašanje. Ovaj pad u vrijednostima R_p i R_m potrebno je dodatno istražiti.

Isti slijed analize je proveden i na vrijednostima izmjerenih vlačnih čvrstoća, a dijagram ovisnosti o brzini deformiranja i pripadajuće krivulje dani su slikom 16.

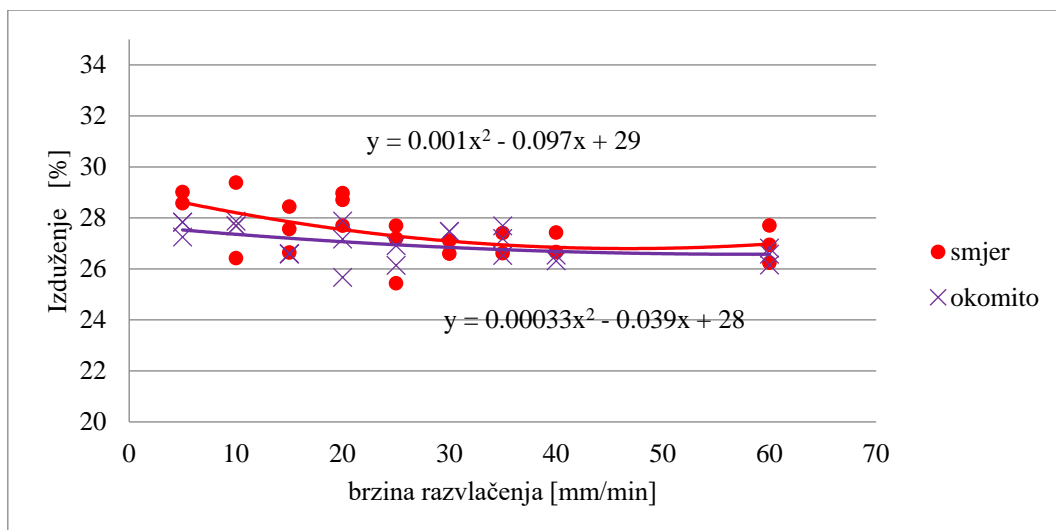


Slika 16. Ovisnost promjene vlačne čvrstoće s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.

Iz prikazanog dijagrama promjene R_m u ovisnosti o brzini razvlačenja može se zaključiti da porast brzine razvlačenja ima isti utjecaj na R_m kao i na R_p . Porastom brzine razvlačenja dolazi do porasta u mjerenim vrijednostima. Isto kao i u slučaju granice proporcionalnosti, vlačna čvrstoća uzoraka uzimanih okomito na smjer valjanja je bila većih iznosa od onih uzimanih u smjeru valjanja lima.

Također se može vidjeti da kod uzoraka rezanih u smjeru valjanja ovisnost o brzini razvlačenja na izmjerene vrijednosti postaje izraženija iznad brzine 40 mm/min. S druge strane vlačne čvrstoće uzoraka uzimanih okomito na smjer valjanja izraženije rastu sve do dostizanja brzine 35 – 40 mm/min. Nakon toga daljnji je porast nešto manje izražen.

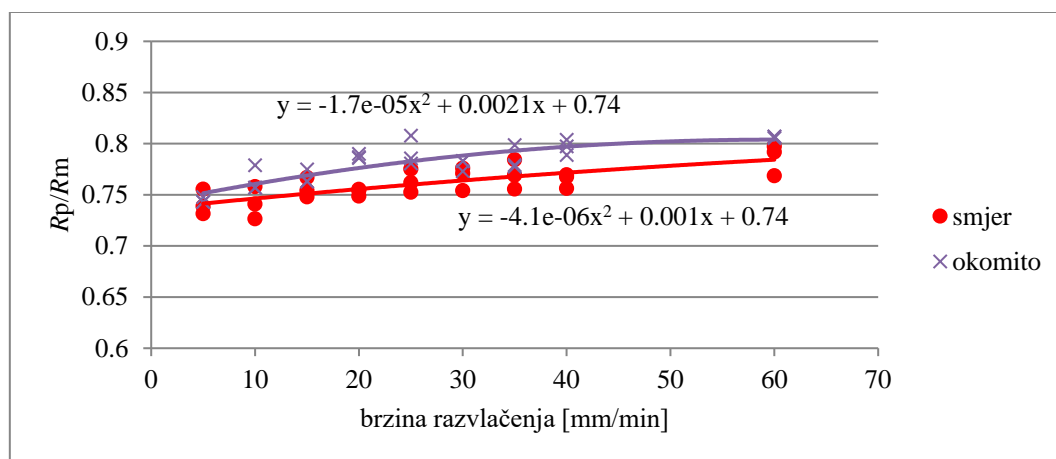
Prema ranijim istraživanjima [9, 10, 11] za očekivati je da uz porast R_p i R_m , čelik ima pad u iznosu izduženja, što je i izmjereno u predloženom istraživanju. Vrijednosti izduženja u ovisnosti o promjeni brzine razvlačenja prikazane su dijagramom na slici 17.



Slika 17. Ovisnost promjene izmjerene izduženja s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.

Iz priloženog dijagrama vidljivo je da izduženje kontinuirano opada porastom brzine razvlačenja. Pad izmjerenih vrijednosti je manje izražen pri većim brzinama razvlačenja od 30 mm/min, no i dalje pokazuje trend pada. Ista su zapažanja uočena neovisno o smjeru uzimanja uzoraka, s tim da su izmjerene vrijednosti izduženja pri lomu nešto manja po iznosu kod uzoraka uzimanih okomito na smjer valjanja.

Pri istraživanjima utjecaja brzine deformiranja na mehanička svojstva čelika i drugih legura, istraživači učestalo određuju odnos R_p/R_m kao pokazatelj utjecaja promjene brzine deformiranja na mehanička svojstva [9, 10]. Slijedom toga izvršena je analiza utjecaja porasta brzine razvlačenja na omjer R_p/R_m , dobivene vrijednosti dane su dijagramom na slici 18.



Slika 18. Ovisnost promjene omjera R_p/R_m s porastom brzine, za uzorke uzimane u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja trake.

Ono što se iz dobivenih vrijednosti vidi je da je omjer R_p/R_m veći po iznosu u kod uzoraka izrezanih okomito na smjer valjanja lima, slično je objavljeno i u istraživanjima u literaturi [9, 10, 11] To prati i ostale vrijednosti mehaničkih svojstava koja su ranije ispitivana kroz ovaj završni rad. Porast odnosa R_p/R_m u ovisnosti o brzini razvlačenja, tj. brzini deformacije, pokazuje da porastom brzine razvlačenja dolazi do promoviranja elastične deformacije.

Iz dijagrama promjene granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće u ovisnosti o promjeni brzine razvlačenja, slika 11 i slika 12, vidljivo je da porastom brzine razvlačenja dolazi do porasta u izmjerenim vrijednostima granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće. No taj porast njihovih vrijednosti nije konstantan, već vrijednosti granice proporcionalnosti pokazuju veći prirast u odnosu na prirast vrijednosti vlačne čvrstoće. Iz tog razloga mjerimo i porast odnosa R_p/R_m prikazan slikom 18. Paralelno ovome, bilježi se pad u izmjerenim iznosima izduženja uzoraka s porastom brzine razvlačenja, slika 17.

To nam ukazuje da porastom brzine deformacije tijekom ispitivanja niskougličnog čelika dolazi u odabranom području brzina do značajnog očvršćivanja. Poznato je iz teorije plastične deformacije da se deformacija odvija kretanjem dislokacija [3, 6, 7]. Kako kod hladne plastične deformacije izostaju procesi oporavka i rekristalizacije, i mali porast brzine deformacije može dovesti do značajnog očvršćivanja, ovisno o čeliku koji se promatra. Do ovog dolazi uslijed nagomilavanja dislokacija koje se multipliciraju tijekom deformacije, te povećavaju deformacijski otpor za daljnju deformaciju. To se očitava kao porast vrijednosti vlačne čvrstoće i smanjenje ukupnog istežanja.

Porast odnosa R_p/R_m vjerojatno je povezan s brzinom kretanja dislokacija. Porastom brzine ispitivanja smanjuje se vrijeme dano dislokaciji da se premjesti. Kako u strukturi čelika postoje različito orijentirana zrna, deformacija se odvija u različito orijentiranim zrnima. Uslijed toga povećanjem brzine razvlačenja, te nedovoljnog vremenskog perioda da se pokrenu dislokacije u ravninama klizanja koje su povoljnije orijentirane [3, 6, 7], dolazi do porasta naprezanja potrebnog za razvlačenje. To se upravo očitava kao porast vrijednosti granice proporcionalnosti. Nakon što započne plastična deformacija, ona se uslijed većeg naprezanja, odvija u više ravnina klizanja, te se „ranije“ dostiže vlačna čvrstoća i pojava mikropukotina u uzorku, što dovodi do loma uzoraka pri znatno manjim ukupnim izduženjima, slika 16. Ovo je pretpostavka izvedena iz rezultata ispitivanja kroz ovaj završni rad i poznavanja osnova teorije oblikovanja deformiranjem. Ova pretpostavka navodi na daljnja istraživanja koja bi dodatno pojasnila razlog porasta omjera R_p/R_m , kako kod ovog čelika, tako i kod drugih tipova čelika.

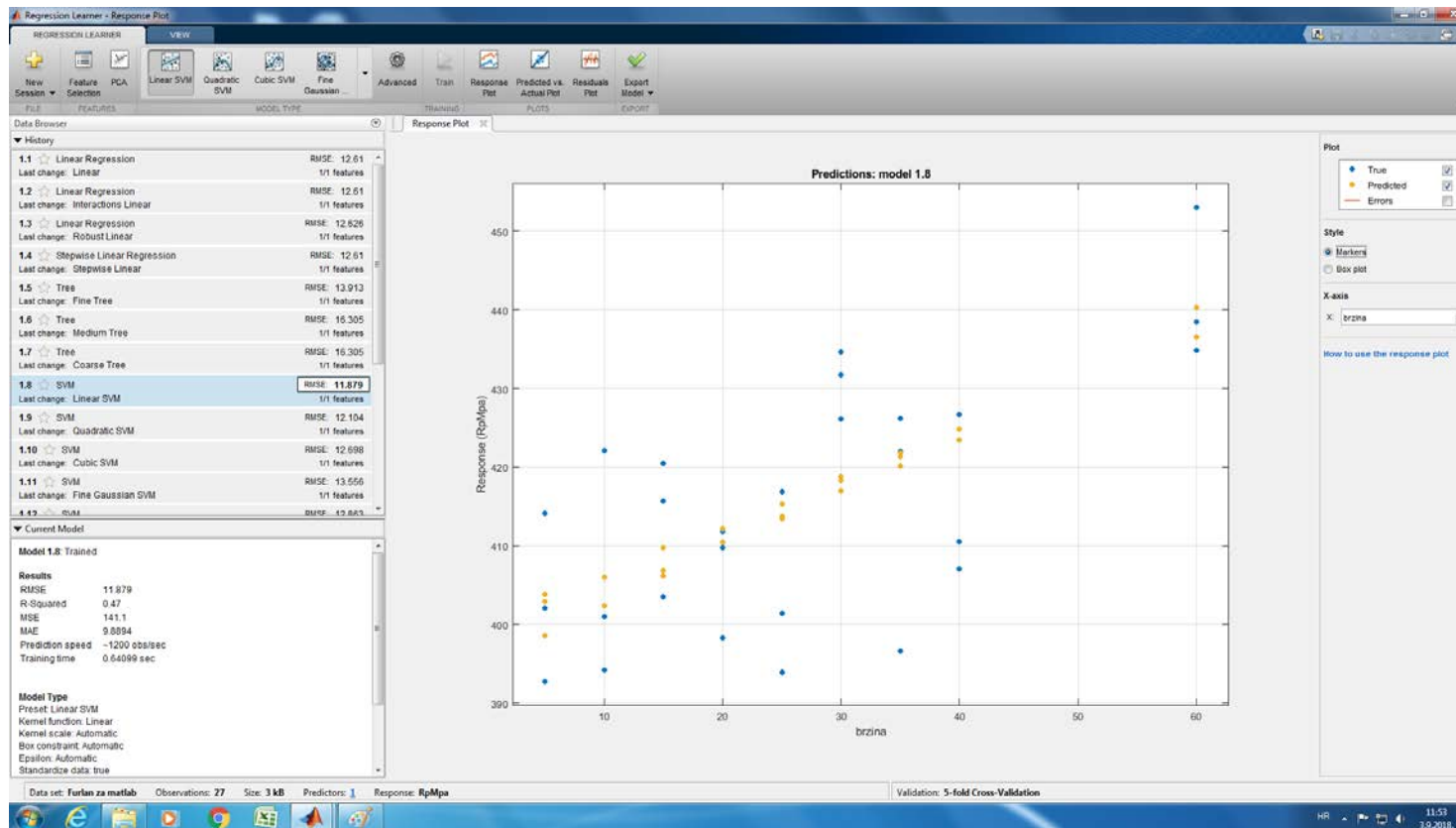
5. MODELIRANJE OVISNOSTI O BRZINI RAZVLAČENJA

Istraživanja kroz ovaj završni rad su provedena u intervalu brzina razvlačenja od 5 mm/min do 60 mm/min. Pri istraživanju korišteni su veći koraci između odabranih brzina razvlačenja. Kako bi utvrdili ponašanje čelika u cijelom intervalu, te pretpostavili ponašanje ispitivanog čelika i van njega, konstruiran je jednostavni matematički model za svaku pojedinu vrijednost mjerenu kroz ova istraživanja.

Za modeliranje je korišten programski paket MATLAB, točnije aplikacija unutar njega pod nazivom Regression Learner App. Kao ulazne varijable (predictor) korištena je brzina razvlačenja. Kao ovisne varijable (response) korišteni su zasebno izmjerene vrijednosti granice proporcionalnosti, vlačne čvrstoće, izduženje i odnos R_e/R_m .

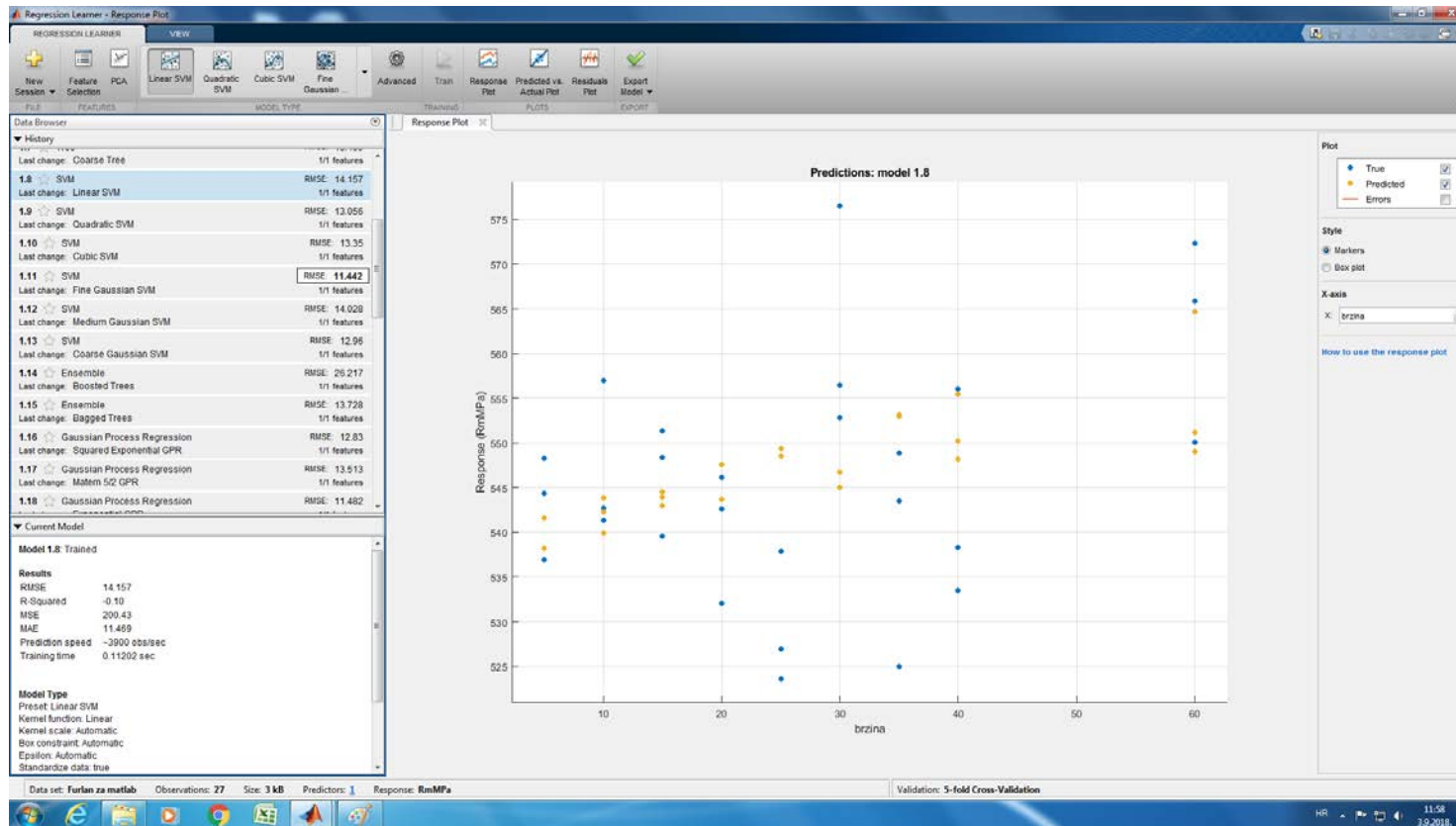
Sama aplikacija regression learner je u osnovi tzv. strojno učenje, kojim se odredi model koji najbolje opisuje ovisnost izlazne varijable o ulazima. Modeliranje je izvršeno na način da se nakon unosa nezavisnih i zavisnih varijabli odabralo treniranje po svim dostupnim metodama regresije. Aplikacija nakon toga provodi i ocjenjuje koja je od dostupnih regresijskih metoda optimalna za odabrani slučaj. Nakon toga sami možemo odabrati od ponuđenih modela, te izvršiti dodatno treniranje i eksportiranje željenog modela. Naknadno model se može koristiti za validaciju drugih izmjerenih vrijednosti ili predviđanje izlazne varijable prema proizvoljnoj ulaznoj varijabli.

U nastavku dane su slike provedenih regresijskih analiza i usporedba izmjerenih vrijednosti i vrijednosti dobivenih odabranim modelom regresijske analize.



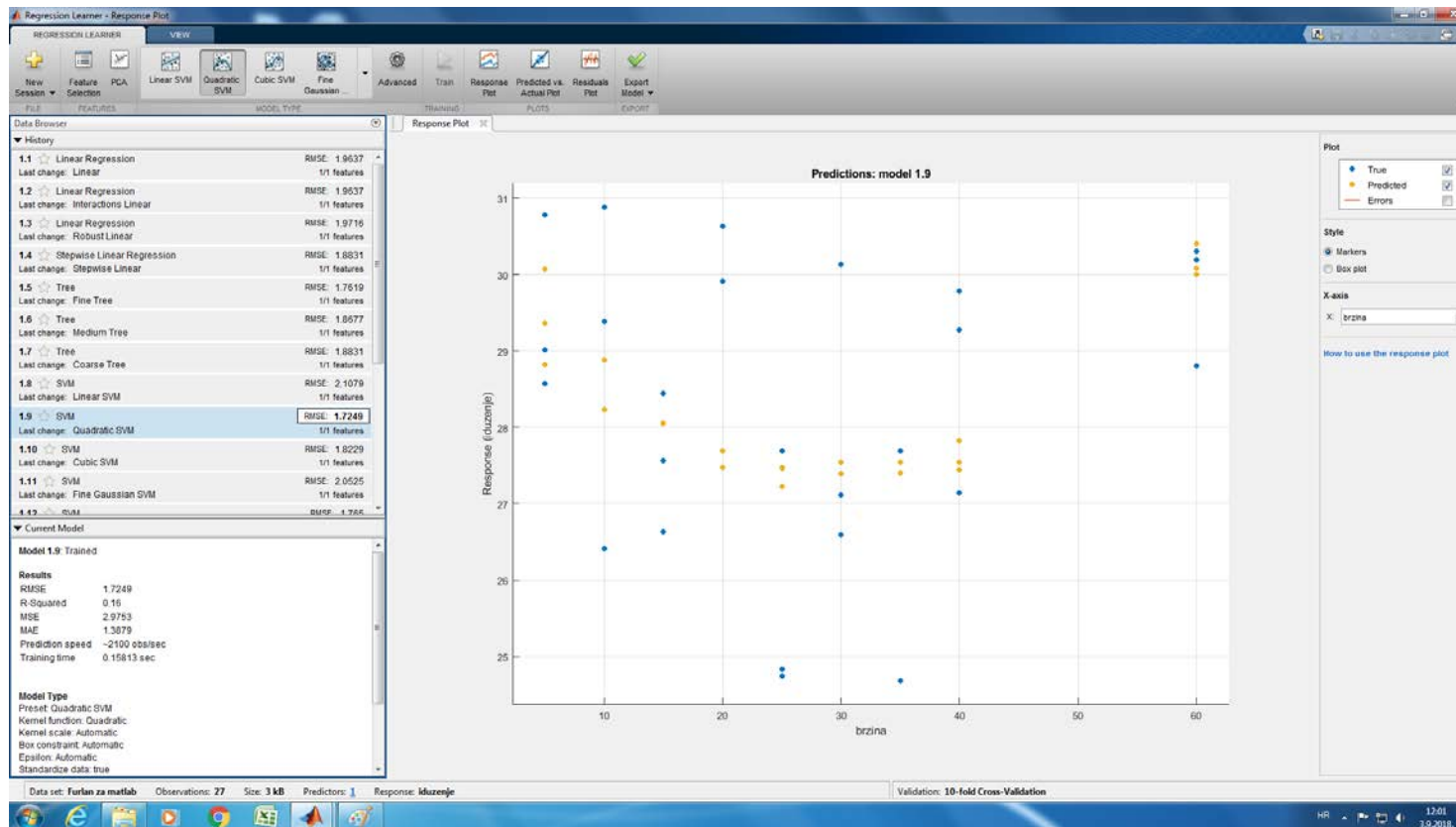
Slika 19. Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti R_p za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).

Za modeliranje ovisnosti promjene granice proporcionalnosti o brzini razvlačenja Regression Learner App je odredio linearnu SVM regresiju kao optimalnu za opis ovisnosti. Model je spremljen, a na slici 14 vidi se usporedba izmjerenih vrijednosti i modelom određenih vrijednosti R_p . Slikom 20 dana je usporedba između izmjerenih i modelom predviđenih vrijednosti R_m .



Slika 20. Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti R_m za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).

Regression Learner App za modeliranje ovisnosti promjene vlačne čvrstoće o brzini razvlačenja predlaže “fine Gaussian SVM” kao optimalnu za opis ovisnosti. Slikom 21 prikazana je usporedba između izmjerenih i modelom predviđenih vrijednosti izduženja.



Slika 21. Izmjerene i modelom predviđene vrijednosti izduženja za uzorke uzimane u smjeru valjanja lima (plava boja – izmjerene vrijednosti, žuta boja predviđene vrijednosti).

U slučaju modeliranja ovisnosti izduženja o brzini razvlačenja, Regression Learner App kao optimalnu postavlja kvadratičnu regresiju. Svi konstruirani matematički modeli su eksportirani za naknadna istraživanja kojima bi se prema potrebi mogao dodatno validirati model.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovom završnom radu ukazuju kako promjena brzine razvlačenja utječe na mehanička svojstva ispitivanog čelika u odabranom području brzina ispitivanja. Analiza rezultata istraživanja provedena je korištenjem programskog paketa MATLAB.

Porastom brzine razvlačenja, time i brzine deformacije, dolazi do porasta granice proporcionalnosti i vlačne čvrstoće ispitivanog čelika. To je posebno uočljivo iz dijagrama ovisnosti R_p/R_m . S druge strane, povećanje brzine deformacije dovodi do pada u iznosu izmjerenih vrijednosti izduženja.

Iz navedenog može se zaključiti kako osim na iznose granice proporcionalnosti, porast brzine razvlačenja nema značajniji utjecaj na početak plastičnog toka ovog čelika u odabranom rasponu brzina ispitivanja.

Može se zaključiti kako porast brzine razvlačenja dovodi do očvršćivanja ispitivanog čelika, te doprinosi porastu iznosa elastične deformacije. Ovo je važno pri korištenju čelika za daljnju hladnu preradu, pošto može dovesti do potrebe za većim silama potrebnih za deformaciju pri povećanju proizvodnosti.

Dalje se može zaključiti kako postoji određena anizotropnost u ispitivanim čeličnom limu. Izmjerene su veće vrijednosti R_p i R_m , uz manje iznose izduženja kod uzoraka uzimanih okomito na smjer valjanja.

Osim većih iznosa granice proporcionalnosti, brzina razvlačenja ne pokazuje drugi značajniji utjecaj na početak plastičnog toka. Iako pri brzinama iznad 30 mm/min, granica proporcionalnosti je nešto izraženija na snimljenim dijagramima sila – produljenje, nije registrirana pojava gornje i donje granice proporcionalnosti. Nadalje, nije uočena ni pojava nehomogenih deformacija u početku plastičnog toka.

Kod brzine razvlačenja od 60 mm/min, u slučaju uzoraka uzimanih okomito na smjer, izmjereni su neočekivani rezultati smanjenja u krivulji porasta R_p i R_m , što je potrebno dodatno istražiti.

Analiza aplikacijom regression learner konstruirani su matematički modeli za svaku mjerenu vrijednost mehaničkih svojstava u ovisnosti o brzini razvlačenja. Razvijeni modeli mogu poslužiti za predviđanje ponašanja ovog čelika u navedenom području brzina razvlačenja.

Istraživanja kroz ovaj završni rad otvorila su dodatna pitanja vezana za pojavu porasta odnosa R_p/R_m s porastom brzine razvlačenja. Dana je pretpostavka o povezanosti ove pojave s mobilnošću dislokacija što se treba detaljnije istražiti, kako na ovom tako i na drugim sličnim čelicima.

7. ŽIVOTOPIS

Vjeran Furlan, rođen 24. svibnja 1992. u Sisku. Završio Gimnaziju Sisak 2011.

2015. godine upisao je dodiplomski studij metalurgije na Sveučilištu u Zagrebu Metalurški fakultet. Trenutno je student treće godine preddiplomskog studija.

Dobro govori i piše engleski jezik i vlada osnovama rada na računalu. Poznaje rad na programskim paketima MS Office, Dassault Systèmes: CATIA i SOLID WORKS, Autodesk: AUTOCAD. Poznaje osnove programiranja u programskom jeziku: C++, VBA. Amaterski se bavio kreiranjem digitalnog sadržaja u programskom paketu Adobe Premiere, Photoshop.

Od lipnja 2016. zaposlen je kao student na mjestu prodavača u tvrtki Tehno 2000 d.o.o. , prodajnog zastupnika za partnere Tele2 d.o.o. ,i Hrvatski Telekom d.d.

Dugogodišnji je član Ronilačkog kluba Sisak i ima položen ispit za ronioca kategorije R2 po CMAS-u.

8. LITERATURA

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček., J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Zagreb: Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [2] M. Gojić, Metalurgija čelika, Sisak: Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [3] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sisak: Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2014.
- [4] The World Steel Association, »The World Steel Association,« 19 07 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>, https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:3e275c73-6f11-4e7f-a5d8-23d9bc5c508f/Steel%2520Statistical%2520Yearbook%25202017_updated%2520version090518.pdf.
- [5] Key to Metals AG , »Classification of Carbon and Low-Alloy Steels,« 05 07 2018. [Mrežno]. Available: <http://www.keytometals.com/Articles/Art62.htm>.
- [6] M. Čaušević, »Teorija plastične prerade metala,« "Svjetlost" OOUR Izdavačka djelatnost, Sarajevo, 1979.
- [7] I. Mamuzić, Teorija plastične deformacije metala, skripta, Sisak: Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2000.
- [8] W. Su-Fen, P. Yan, L. Zhi-Jie, »Work-Hardening and Deformation Mechanism of Cold Rolled Low Carbon Steel,« *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, svez. 5, br. 3, pp. 823-828, 2013.
- [9] M. Mihalikova, »Analysis of the Influence of the Loading Rate on the Mechanical Properties of Microalloyed Steel,« *Journal of Metals, Materials and Minerals.*, svez. 17, br. 1, pp. 25-28, 2007.
- [10] M. Buršák, J. Michel, »Influence of the strain rate on the mechanical and technological,« *Metalurgija* , svez. 49, br. 4, pp. 317-320, 2010.
- [11] C. S. Çetinarşlan, A. Güzey, »TENSILE PROPERTIES OF COLD-DRAWN LOW-CARBON STEEL WIRES UNDER DIFFERENT PROCESS PARAMETERS,« Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Trakya University, Edirne, Turkey, 2012.
- [12] I. Jandrlić, Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, Doktorski rad, Sisak: Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2015.
- [13] S. Rešković, Ispitivanje materijala, interna skripta, Sisak: Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2009.
- [14] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009), Brussels: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2009.
- [15] D. Ćorić, Ž. Alar, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Interna skripta, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, 2015.
- [16] Marko Pongrac, Materijali za tlačne posude, Završni rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, 2016.
- [17] G. Marion, D. Lawson, An Introduction to Mathematical Modelling, Edinburgh: Bioinformatics and Statistics Scotland, University of Bristol, 2008.
- [18] D. Magdić, »Uvod u matematičko modeliranje,« Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek, 2018.

- [19] G. Dubois, Modeling and Simulation Challenges and Best Practices for industry, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018.
- [20] European Computer Manufacturers Association, »Standard ECMA-4 FLOW CHARTS,« European Computer Manufacturers Association, Geneva, 1966.
- [21] MathWorks, 25 07 2018. [Mrežno]. Available: https://www.mathworks.com/help/stats/train-regression-models-in-regression-learner-app.html#bvi2d7_-4.
- [22] A. Štambuk, M. Biljan-August, Regresijska i korelacijska analiza, Rijeka, 2013.
- [23] A. Korenjak, Regresijska analiza, diplomski rad, Maribor, 2010.
- [24] SIN THAI SPECIAL STEEL CO., LTD., »DIN 17100 ST 52-3 N HIGH TENSILE STEEL BAR,« 10 07 2018. [Mrežno]. Available: [http://leongjin.co.th/images/webpage/090326173113_ST52-3\(ROUNDBAR\).pdf](http://leongjin.co.th/images/webpage/090326173113_ST52-3(ROUNDBAR).pdf).
- [25] Dillinger Hütte GTS , »Dillinger,« 21 07 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/8008>.
- [26] [Mrežno]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Stress_in_a_continuum.svg.
- [27] P. Ljubičić, J. Kodvanj, B. Ljubenkov, Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika pri niskim temperaturama, Split: XIX. simpozij Teorija i praksa brodogradnje, in memoriam prof. Leopold Sorta, 2010.
- [28] D. Drobnyak, Fizička metalurgija „Fizika čvrstoće i plastičnosti 1“, Beograd: Univerzitet u Beogradu Tehnološko-Metalurški fakultet, 1981.