

**UTICAJ VARIRANJA HEMIJSKOG SASTAVA ČELIKA NA  
KVALITET TOPLOVALJANE I VUČENE ŽICE**

**EFFECT OF VARIATIONS IN CHEMICAL COMPOSITION ON  
QUALITY OF HOT ROLLED AND DRAWN WIRE**

Mr. sc. Šaban Žuna, viši asistent      Prof. dr. sc. Aida Mahmutović, vanredni profesor  
Prof. dr. sc. Faik Uzunović, redovni profesor  
Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale  
72 000 Zenica, Bosna i Hercegovina

Dr. sc. Sead Spužić, viši naučni saradnik  
University of South Australia, Division of Information Technology, Engineering and the  
Environment  
Mawson Lakes Campus, Adelaide, Australia

**Ključne riječi:** čelik, hemijski sastav, izduženje, MATLAB, optimizacija svojstava

**REZIME**

*U poređenju sa toplovaljanom hladno vučena žica ima niži odnos zatezne čvrstoće i granice tečenja, te niže vrijednosti izduženja. U ovom radu se prikazuju rezultati istraživanja uticaja variranja hemijskog sastava kontinuirano livenih gredica na mehaničke osobine hladno prerađene žice korištene u proizvodnji armaturnih mreža.*

*Konačne osobine vučene žice zavise uglavnom od iznosa hladne plastične deformacije i variranja hemijskog sastava, prvenstveno udjela C, Mn i Si za konstrukcione i čelike za žicu za vučenje. Predstavljani su rezultati MATLAB proračuna zasnovani na mehaničkim osobinama, u zavisnosti od stepena hladne plastične deformacije i od hemijskog sastava čelika, a prema podacima iz prakse.*

**Keywords:** steel, chemical composition, strain, MATLAB, property optimisation

**ABSTRACT**

*Ratio of ultimate tensile strength and yield stress shows lower values in cold drawn wire than in hot rolled state. The results of research addressing the effect of variations in chemical composition of continuous casted billets on mechanical properties of cold-formed wire used in production of steel mesh are presented.*

*In the case of grades for drawn wire and construction grades, the final attributes of drawn wire depend predominantly on the extent of strain in cold working and the content of C, Mn, and Si. MATLAB computing and programming tool is used for performing statistical analysis and evaluating the resulting inferences.*

## 1. UVOD

Svakodnevno se proizvođači armaturnih mreža susreću sa teškoćama u dobijanju proizvoda sa svojstvima propisanim standardom. Zbog toga je neophodan integralni pristup, tj. kontrola pojedinih faza u proizvodnji čelika od postizanja hemijskog sastava u čeličani, poboljšanja postupaka sekundarne metalurgije, te podešavanja parametara kontinuiranog livenja gredica, zagrijeva gredica prije valjanja, te samog valjanja i termomehaničkog tretmana, kao i na kraju parametara hladne plastične deformacije vučenjem. Dugogodišnja iskustva u praksi pokazuju da se teško mogu postići istovremeno dobre čvrstoćne i dobre duktilne karakteristike žice namjenjene za armaturne mreže, što nameće potrebu za istraživanjem svojstava polaznog materijala, s osvrtom na proizvodne troškove i tehnološke mogućnosti čeličane i valjaonica. Za proizvodnju žice obično se koriste čelici sa sadržajem ugljika do 1%, a za najveći udio proizvedene žice koriste su niskougljični čelici sa udjelom ugljika do 0,1 % [1].

U prvoj fazi prerade konti gredica, toplovaljana žica ima mehanička i druga svojstva prvenstveno kao posljedicu hemijskog sastava, pošto primjenjivani Stelmor termički tretman nakon valjanja ne utiče značajnije na povećanje čvrstoćnih karakteristika toplovaljane žice, već se često zapaža inverzno Hall-Petch ponašanje za ultra fina zrna (posebno za mikrostrukturne promjene u perlitu), tj. smanjenje čvrstoćnih karakteristika, a povećanje duktilnosti proizvedene žice, postignuto značajnim povećanjem brzine hlađenja [2]. Međutim, kada sadržaj ugljika u perlitu varira, ni međulamelarno rastojanje nije više jedina nezavisna varijabla, pošto na zateznu čvrstoću značajno utiče i samo variranje volumskog udjela cementita.

Sličan je problem i sa određivanjem deformacije, npr. maksimalno dozvoljene deformacije pri jednoj provlaci. Postoje različiti teoretski pristupi, ali su rješenja uvijek zasnovana na ispravnim pretpostavkama i pojednostavljenjima [3].

Svojstva toplovaljane žice variraju u okviru vrijednosti propisanih standardima za konstrukcione čelike i čelike za žicu za vučenje.

Nakon prerade vučenjem, nova orebrena žica je promijenjenog kvaliteta, tj. čelik za armiranje betona u kvalitetu B500A po EN 10080 ili drugim standardima, ima povišene čvrstoćne karakteristike, ali snižen odnos između zatezne čvrstoće i napona tečenja, te niži stepen izduženja. Zbog toga je potrebno iznaći optimum čvrstoćnih i duktilnih svojstava koje proizilaze iz mikrostrukture vučene žice. Na mikrostrukturne parametre se može uticati promjenom hemijskog sastava konti livenih gredica, te parametara hladne plastične deformacije kao prve faze u proizvodnji armaturnih mreža. Elektrootporno zavarivanje na automatskim mašinama, a na mjestima presjeka hladno vučene žice, dodatno dovodi lokalno do daljih promjena mehaničkih i duktilnih svojstava, na što osim jačine struje i trajanja zavarivanja, presudan uticaj ima hemijski sastav čelika (prvenstveno sadržaj ugljika, sumpora, fosfora i dušika).

U cilju proučavanja variranja hemijskog sastava čelika u korelaciji sa variranjem kvaliteta kontinuirano livenih gredica, odnosno toplovaljane i vučene žice, te utvrđivanju modela povezanosti sa čvrstoćnim karakteristikama gotovih proizvoda, posmatrane su osobine toplovaljane žice promjera 9 mm i iz nje proizvedene vučene žice promjera 8 mm.

## 2. OSOBINE POLAZNE TOPLOVALJANE ŽICE PROMJERA 9 mm

Korištena toplovaljana žica promjera 9 mm izrađena je u kvalitetima SAE 1008 i SAE 1010 po ASTM A 510-96, te S 235 JR po EN 10025-2 u okviru kojih su propisane gornje granice za udio pojedinih hemijskih elemenata, ograničenja za granicu tečenja i zateznu čvrstoću, te izduženje. Kvalitet i materijalni izvadak toplovaljane žice se povećavaju u cilju zadovoljenja zahtjeva za optimalno i jednostavno vučenje u tvornicama građevinske armature [4]. Toplovaljana žica promjera 9 mm korištena je kao polufabrikat u postupku hladnog vučenja – hladnog valjanja u cilju dobijanja vučene i orebrene žice promjera 8 mm. Razmatran je hemijski sastav 371 uzorka, a zabilježeno slijedeće variranje sadržaja najuticajnijih elemenata: ugljika od 0,04 do 0,11%, mangana od 0,28 do 0,79% i silicija od 0,07 do 0,15%. Variranje granice tečenja ( $R_e$ ) kretalo se u granicama između 237 i 302 N/mm<sup>2</sup>, a zatezne čvrstoće ( $R_m$ ) između 371 i 442 N/mm<sup>2</sup>. U tabeli 1. predstavljene su minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti za sadržaj ugljika, silicija i mangana, ekvivalentnog sadržaja ugljika, te granice tečenja ( $R_e$ ) i zatezne čvrstoće ( $R_m$ ) toplovaljane žice promjera 9 mm.

*Tabela 1. Karakteristične vrijednosti za hemijski sastav i mehaničke osobine toplovaljane žice promjera 9 mm.*

Red. br.	Osobine	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Prosječna vrijednost
1	C [%]	0,04	0,11	0,071
2	Si [%]	0,07	0,15	0,117
3	Mn [%]	0,28	0,79	0,425
4	$C_{ekv.}$ [%x100]	13,92	24,42	17,07
5	$R_{eTVŽ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	237	302	277,4
6	$R_{mTVŽ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	371	442	394,4

### 3. OSOBINE VUČENE ŽICE PROMJERA 8 mm

Hladnovučena i orebrena žica promjera 8 mm koristi se za izradu armaturnih mreža Q335 i Q503, a proizvodi se iz toplovaljane žice promjera 9 mm uz redukciju poprečnog presjeka između 16,61 i 25,98 %, za navedenog 371 uzorka. Obradom podataka, uvrštavanjem vrijednosti za najuticajnije faktore, te regresionom analizom utvrđena je formula za ekvivalentni sadržaj ugljika:

$$C_{ekv.} = C + Mn/6 + Si/4 \quad \dots(1)$$

, te su izračunate vrijednosti za ( $C_{ekv.}$ ) za svaki uzorak. Minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti za granicu tečenja ( $R_e$ ), zateznu čvrstoću ( $R_m$ ), ekvivalentni sadržaj ugljika ( $C_{ekv.}$ ) i stepen redukcije (Red) pri preradi toplovaljane u vučenu žicu kvaliteta B500A prikazani su u tabeli 2.

Radi provjere statističkih pokazatelja za regresionu analizu kada se kao ulazne (nezavisne) promjenljive posmatraju regresionom analizom dobijena „fitovana“ redukcija (FitRed) i ekvivalentni sadržaj ugljika ( $C_{ekv.}$ ), a zavisna promjenljiva je granica tečenja vučene i orebrene žice promjera 8 mm ( $R_{eHVŽ}$ ), korištena je funkcija „linest“ u Microsoft Excel-u. Vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  i F-test potvrdili su vrlo dobru povezanost nezavisnih i zavisne promjenljive, te je za utvrđivanje matematičkog modela njihove povezanosti i grafički prikaz korišten MATLAB inženjerski softver.

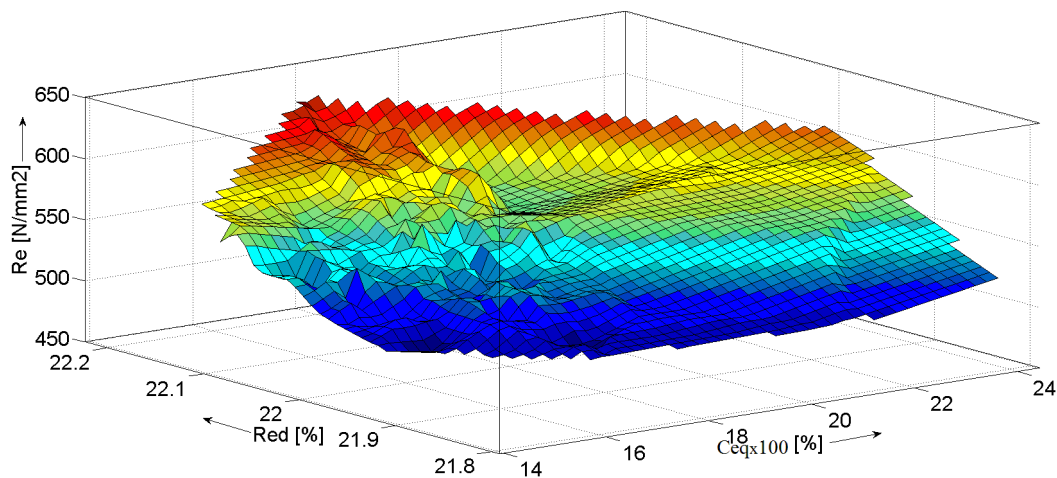
*Tabela 2. Karakteristične vrijednosti za  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $C_{ekv.}$  i Red orebrene žice promjera 8 mm dobijene hladnim vučenjem.*

Red. br.	Osobine	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Prosječna vrijednost
1	$R_{eHVŽ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	498	626	552,8
2	$R_{mHVŽ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	530	652	589,9
3	$C_{ekv.}$ [%x100]	13,92	24,42	17,07
4	Red [%]	16,6	26	22

## 4. MATLAB ANALIZA REZULTATA

### 4.1. MATLAB analiza rezultata iz prakse

MATLAB softverom napravljen je prikaz prikaz praktičnih rezultata u formi površinskog grafikona pri čemu je kao nezavisna promjenljiva prikazana granica tečenja ( $R_e$ ), a zavisna promjenljiva ( $C_{ekv.}$ ) normalizirana sa srednjom vrijednosti 17,07 i standardnom devijacijom od 1,498, a druga zavisna promjenljiva ( $Red$ ) normalizirana sa srednjom vrijednosti 22,02 i standardnom devijacijom od 0,07155.

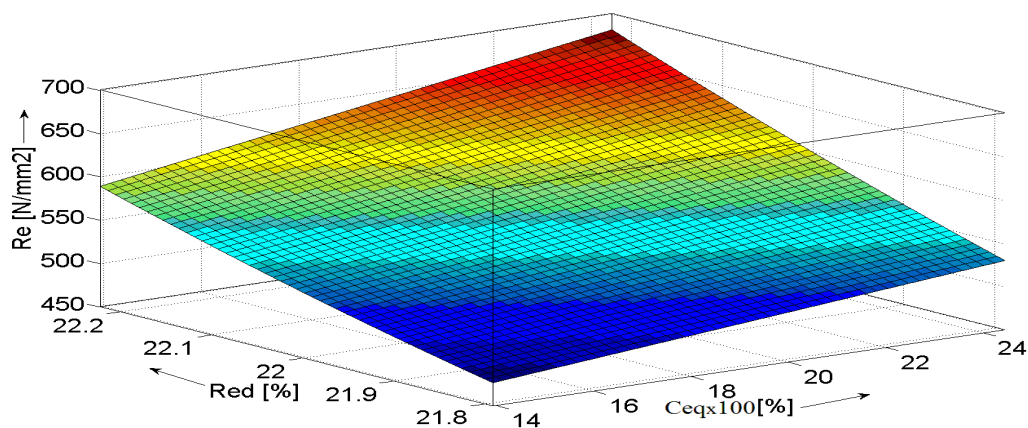


Slika 1. Grafički prikaz praktičnih podataka ( $R_e$ ) vučene žice  $\Phi 8$  mm u ovisnosti od  $C_{ekv.}$  i redukcije [5].

### 4.2. MATLAB optimiranje rezultata

Primjenom MATLAB inženjerskog softvera analizirani su podaci za vučenu i orebrenu žicu promjera 8 mm.

Rezultat se prikazuje u formi trodimenzionalnog mrežastog grafikona koji pokazuje ovisnost granice tečenja ( $R_e$ ) od ekvivalentnog sadržaja ugljika ( $C_{ekv.}$ ) i stepena redukcije ( $Red$ ), slika 2.



Slika 2. Granica tečenja ( $R_e$ ) vučene žice  $\Phi 8$  mm u ovisnosti od ( $C_{ekv.}$ ) i redukcije [5].

Za vučenu žicu promjera 8 mm optimalna vrijednost za ( $C_{ekv.}$ ) je oko 0,14 % za prosječnu vrijednost stepena redukcije poprečnog presjeka (Red) od 22% utvrđenu na osnovu podataka o 371 uzorku. Na dijagramu se vidi da sniženje redukcije poprečnog presjeka ispod 22% omogućava korištenje čelika sa većim ( $C_{ekv.}$ ) od 0,2% što olakšava postizanje hemijskog sastava tečnog čelika i preradu u toplovaljanu žicu.

MATLAB inženjerski softver olakšava postupak regresione analize i njegovo korištenje omogućava da se u slučaju granice tečenja vučene žice promjera 8 mm dobije slijedeća funkcionalna ovisnost:

$$R_e = 51960 - 185,1 \cdot C_{ekv.} - 4821 \cdot Red + 8,725 \cdot C_{ekv.} \cdot Red + 112,7 \cdot Red^2 \quad \dots(2)$$

## 5. ZAKLJUČCI

- Utvrđeni matematički model omogućava da se odrede ciljani hemijski sastav u smislu odgovarajućeg variranja najuticajnijih elemenata, te također ciljani stepen hladne plastične deformacije, što rezultira postizanjem ciljane mikrostrukture, a time i mehaničkih osobina proizvedene žice.
- Za vučenu žicu promjera 8 mm optimalna vrijednost za ekvivalentni sadržaj ugljika je  $C_{ekv.} = 0,1435\%$ , ali uz mogućnost korištenja čelika sa širim granicama za ( $C_{ekv.}$ ) oko optimalne vrijednosti, što olakšava proizvodnju tečnog čelika i preradu u valjaonicama.
- Za vučenu žicu promjera 8 mm pri uobičajnim stepenima redukcije poprečnog presjeka postoje mogućnosti da se koriste čelici sa širim variranjem hemijskog sastava opisanim variranjem ( $C_{ekv.}$ ), što predstavlja veliku pogodnost u industrijskoj praksi.
- Matematički model dobijen korištenjem MATLAB-a omogućava analizu uticaja hemijskog sastava za bilo koji hemijski sastav, stepen redukcije i promjer žice.

## 6. REFERENCE

- [1] Çetinarşlan C. S., Güzey A.: Tensile properties of cold-drawn low-carbon steel wires under different process parameters, *Materials and technology*, 245 – 252, 47 (2013) 2.,
- [2] Nag S., Sardar P., Jain A., Himanshu A., Mondal D. K.: Correlation between ferrite grain size, microstructure and tensile properties of 0.17 wt% carbon steel with traces of microalloying elements, *Materials Science&Engineering*, 253–263, A 597 (2014).,
- [3] Đukić H., Nožić M.: Limit values of maximal logarithmic strain in multi-stage cold forming operations, *Journal for Technology and Plasticity*, Vol. 40 (2015), Number 1.,
- [4] Uzunović F., Franjić A., Žuna Š.: Optimiranje asortimana njegovim sužavanjem u rehabilitaciji željezara, 9<sup>th</sup> Research/Expert Conference “Quality 2015”, Neum, B&H, June 2015.,
- [5] Žuna, Š.: Doprinos istraživanju uticaja variranja hemijskog sastava konti livenih gredica iz konstrukcionih čelika i čelika za vučenje žice na kvalitet toplovaljane i vučene žice, doktorski rad, izrada u toku.