

ISTRAŽIVANJE UTICAJA STEPENA DEFORMACIJE NA KVALITET HLADNO VUČENE ŽICE

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION DEGREE ON THE QUALITY OF THE COLD DRAW WIRE

Ibrahim Plančić
Mašinski fakultet,
Univerzitet u Zenici, Zenica, BiH

Behar Alić
Institut „Kemal Kapetanović“,
Univerzitet u Zenici, Zenica, BiH

REZIME

Značajan uticajni faktor na ojačavanje materijala kod hladnog oblikovanja je ostvareni stepen deformacije. Zato je jako važno utvrditi uticaj stepena deformacije na izlazne karakteristike proizvoda izražene preko njegovih mehaničkih osobina. To omogućava efikasnije projektovanje tehnologije izrade s ciljem postizanja zahtjevanih mehaničkih osobina proizvoda, ali i značajne benefite ostvarene prednostima finalnog oblikovanja u hladnom stanju. U radu su, na primjeru vučenja žice, analizirani efekti ojačavanja nehrđajućeg austenitnog čelika X5CrNiMo 18 12 u zavisnosti od ostvarenog stepena deformacije. Dobijeni rezultati omogućavaju uspostavljanje njihove funkcionalne zavisnosti, a to podrazumijeva stvaranje preduslova za postizanje željenih osobina, odnosno kvaliteta žice izborom odgovarajućeg stepena deformacije.

Ključne riječi: vučenje žice, ojačavanje, stepen deformacije, kvalitet

ABSTRACT

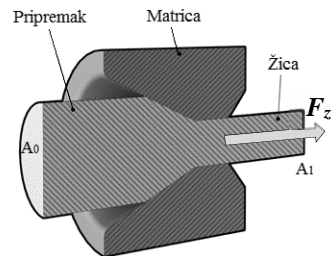
One of the most important factors influencing the material strengthening in cold forming is the degree of deformation. It is therefore very important to determine the effect of the degree of deformation on the output characteristics of the product expressed through its mechanical properties. This allows for a more efficient design of the production technology with the aim of achieving the required mechanical properties of the product with significant benefits achieved by the advantages of final shaping in a cold state. In the paper, the effects of strengthening of stainless austenitic steel X5CrNiMo 18 12 on the example of wire drawing are analyzed, depending on the degree of deformation. The obtained results enable the establishment of their functional dependence, which creates the preconditions for achieving the desired properties of the workpieces for certain values of the degree of deformation.

Keywords: wire drawing, material strengthening, degree of deformation, quality

1. UVOD

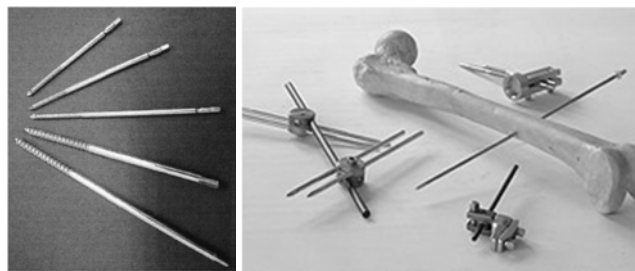
Jedna od ključnih prednosti obrade deformisanjem u hladnom stanju je pojava ojačavanja materijala. Pojava je praćena značajnim promjenama fizičko mehaničkih svojstava metala. Iste se odnose na povećanje čvrstoćnih osobina i smanjenje parametara plastičnosti. Zbog toga se veliki broj proizvoda izrađuje ovim postupkom obrade. Takav je slučaj i sa širokom lepezom proizvoda od nehrđajućih austenitnih čelika, u vidu šipki i žica, koji se oblikuju postupkom vučenja ili izvlačenja. Izvlačenje je tehnološki postupak mašinske obrade metala bez skidanja čestica kojim se vrši izrada i proizvodnja žice, traka, šipki, cijevi, profila i drugih proizvoda

ujednačene geometrije poprečnog presjeka. Postupak se koristi uglavnom za promjenu dimenzija uključujući prečnik i debljinu stijenke, a rjeđe za promjenu oblika. Primjenjuje se kada je potrebna glađa površina i tačnije dimenzije, ukoliko je presjek proizvoda vrlo malen (žica), kod tankih stijenki i kada se druge metode ne mogu primjenjivati. Najčešće se izvodi u hladnom stanju, usljed čega finalni komadi imaju dobre čvrstoćne karakteristike. Kao posljedica hladnog deformisanja sa smanjenjem dimenzija početnog poprečnog presjeka javlja se ojačavanje materijala zavisno o stepenu redukcije. Na taj način se može vrlo uspješno očvrstnuti, odnosno ojačati materijal koji zbog njegovog hemijskog sastava nije moguće ojačati toplinskom obradom. Uz glačanje površine povisuje se njena tvrdoća, te je i sa aspekta površinske tvrdoće moguće izbjeći toplinsku obradu koja bi mogla izazvati krivljenje izradka. Kvalitet površine radnog predmeta koji je oblikovan izvlačenjem, vrlo često nadmašuje kvalitet površina koje su tretirane postupcima poliranja, brušenja ili lepovanja. Postupkom vučenja, čiji je princip predstavljen na Slici 1. se pripremak u vidu tanke šipke, profila ili žice većeg prečnika, pod dejstvom sile zatezanja, odnosno vučenja provlači kroz konusnu matricu oblikujući žicu manjeg poprečnog presjeka. To je omogućeno konstrukcijom matrice za izvlačenje žice koja nema konstantan presjek po radnoj dužini. Prvi dio matrice čini ulazni konus unutar koga se vrši deformacija metala. Ovisno o namjeni matrice imaju različitu geometriju, a optimalna vrijednost ugla konusa za puni presjek je 5° do 8° . Na drugom pravolinijskom dijelu matrice se vrši kalibracija deformisanog metala na izlazni prečnik žice, dok je treći dio matrice u obliku izlaznog konusa koji omogućava nesmetano izlaženje deformisanog materijala iz matrice. Prolaskom pripremake kroz matricu u postupku vučenja, koje se najčešće izvodi u hladnom stanju, postiže se smanjenje poprečnog presjeka na račun povećanja dužine, tačnost dimenzija, čista i glatka površina, a u kombinaciji sa deformisanjem na hladno i željene osobine izratka. Stoga se pri izvlačenju mora voditi računa o sili izvlačenja, optimalnom uglu vučenja, stepenu redukcije, odnosno stepenu deformacije, brzini izvlačenja i vrsti maziva. U principu, danas se izvlačenje obavlja na mašinama koje omogućavaju izvlačenje ravnih šipki na vučnim klupama, izvlačenje sa namotavanjem kroz jednu matricu na jednostepenim mašinama i višestepenim mašinama sa namotavanjem, koje mogu imati i do 30 matrica. Izvlačiti se mogu čelični i obojeni metali. Nehrđajući austenitni čelici su zbog njihovih izuzetnih karakteristika predmetom mnogobrojnih istraživanja. Ove čelike karakterišu relativno niske vrijednosti napona tečenja, prosječne čvrstoćne karakteristike, visoke vrijednosti duktiliteta i visoka sposobnost ojačavanja pri hladnoj plastičnoj preradi. Stoga je postupkom oblikovanja hladnim vučenjem moguće ostvariti širok spektar mehaničkih i eksploatacionih osobina ovih čelika. Pored poboljšanja čvrstoćnih osobina, što je rezultat ojačavanja materijala, hladno vučena žica se odlikuje visokom dimenzionom tačnošću i dobrim kvalitetom obrađene površine. Ovo su razlozi intenzivne primjene postupka hladnog vučenja nehrđajućih austenitnih čelika u savremenim



Slika 1. Princip vučenja žice

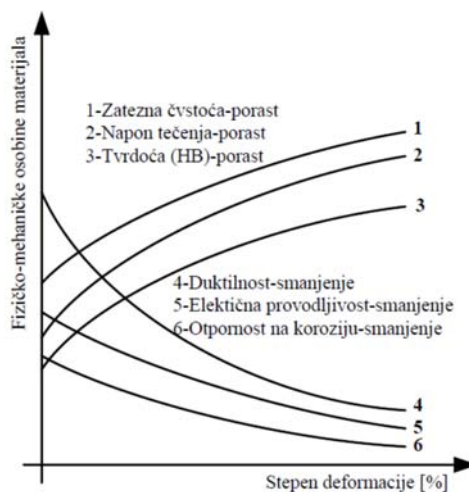
deformisanog materijala iz matrice. Prolaskom pripremake kroz matricu u postupku vučenja, koje se najčešće izvodi u hladnom stanju, postiže se smanjenje poprečnog presjeka na račun povećanja dužine, tačnost dimenzija, čista i glatka površina, a u kombinaciji sa deformisanjem na hladno i željene osobine izratka. Stoga se pri izvlačenju mora voditi računa o sili izvlačenja, optimalnom uglu vučenja, stepenu redukcije, odnosno stepenu deformacije, brzini izvlačenja i vrsti maziva. U principu, danas se izvlačenje obavlja na mašinama koje omogućavaju izvlačenje ravnih šipki na vučnim klupama, izvlačenje sa namotavanjem kroz jednu matricu na jednostepenim mašinama i višestepenim mašinama sa namotavanjem, koje mogu imati i do 30 matrica. Izvlačiti se mogu čelični i obojeni metali. Nehrđajući austenitni čelici su zbog njihovih izuzetnih karakteristika predmetom mnogobrojnih istraživanja. Ove čelike karakterišu relativno niske vrijednosti napona tečenja, prosječne čvrstoćne karakteristike, visoke vrijednosti duktiliteta i visoka sposobnost ojačavanja pri hladnoj plastičnoj preradi. Stoga je postupkom oblikovanja hladnim vučenjem moguće ostvariti širok spektar mehaničkih i eksploatacionih osobina ovih čelika. Pored poboljšanja čvrstoćnih osobina, što je rezultat ojačavanja materijala, hladno vučena žica se odlikuje visokom dimenzionom tačnošću i dobrim kvalitetom obrađene površine. Ovo su razlozi intenzivne primjene postupka hladnog vučenja nehrđajućih austenitnih čelika u savremenim



Slika 2. Izgled i primjer primjene Shanz vijaka za spoljnu fiksaciju proizvedenih na Institutu u Zenici [1]

industrijskim granama. Istraživanja provedena u ovom radu su inicirana potrebom za cjelovitijim sagledavanjem uticajnih parametara na rješavanje problema efikasnije proizvodnje različitih vrsta fiksatora koji se koriste u traumatologiji, ortopediji i hirurgiji za liječenje preloma kostiju. Na Slici 2. prikazani su Shanz vijci za spoljnu fiksaciju proizvedeni na Institutu Kemal Kapetanović (Institut) u Zenici, postupkom hladnog vučenja žice od nehrđajućeg austenitnog čelika X5CrNiMo 18 12.

Posljedice hladne plastične prerade, koja se uobičajeno izvodi na sobnoj temperaturi bez prethodnog zagrijavanja materijala, su znatne promjene mehaničkih i fizičkih osobina metala koje se definišu terminom ojačavanje materijala. Pojava je praćena značajnim promjenama fizičko mehaničkih svojstava metala koje se odnose na povećanje pokazatelja njegovih čvrstoćnih svojstava, te smanjenje parametara plastičnosti, električne vodljivosti, otpornosti na koroziju i sl., kako je predstavljeno na Slici 3. U radu su, na primjeru hladnog vučenja austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo 18 12 analizirani efekti ojačavanja materijala u zavisnosti od stepena deformacije. Sagledavani efekti ojačavanja u znatnoj mjeri opredjeljuju kvalitet hladno vučene žice, ali i finalnih proizvoda koji se iz nje izrađuju.



Slika 3. Efekti ojačavanja materijala [2]

2. NAČIN PROVOĐENJA EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

S ciljem određivanja zavisnosti mehaničkih karakteristika čelika X5CrNiMo 18 12 od stepena deformacije, izvršeno je hladno vučenje šipki sa prečnika $d=8$ mm na prečnik $d_1=5$ mm sa različitim parcijalnim, ali približno jednakim ukupnim stepenima deformacije. Na osnovu ovako utvrđenih zavisnosti moguće je projektovanje optimalne tehnologije hladnog vučenja koja će omogućiti dobijanje finalnih izradaka ili polufabrikata sa unaprijed zadanim karakteristikama, odnosno izradaka koji zadovoljavaju specificirane zahtjeve kvaliteta. Polufabrikat za eksperimentalno vučenje, prethodno pripremljene šipke kružnog poprečnog presjeka dobijene su tehnološkim postupkom izrade koji uključuje:

- livenje ingota kvadratnog presjeka, dimenzija: $a=140$ mm do glave ingota, $a_1=110$ mm do pete ingota i visine ingota $H=400$ mm; sa hemijskim sastavom unutar granica propisanih standardom,
- vruću plastičnu preradu ingota postupkom kovanja u gredice stranice $a=35$ mm i dužine $l=400$ do 500 mm, termički tretman, zagrijavanja na 1150 °C u trajanju 30 minuta, a potom gašenja u vodi,
- čišćenje i vruće valjanje gredica kroz 11 provlaka na prečnik $d=12$ mm
- hlađenje na mirnom zraku, zagrijavanje na 1150 °C, progrijavanje cca 20 minuta i gašenje u vodi s ciljem dobijanja homogene austenitne strukture,
- čišćenje površine brušenjem, a zatim hladno vučenje na prečnik $d=8$ mm u pet provlaka.
- naknadno termičko tretiranje šipki prečnika $d=8$ mm, odnosno gašenje u vodi sa 1100 °C.

Provedenim ispitivanjima mehaničkih osobina i strukturnih karakteristika dobijenih priprema prečnika $d=8$ mm potvrđena su identična polazna stanja svih šipki namjenjenih za provođenje

eksperimentalnih istraživanja koja su predmet ovog rada. Priprema za provođenje hladnog vučenja na konačni prečnik obuhvatala je ponovno zagrijavanje na 1150 °C, progrijavanje 10 minuta s ciljem dobijanja homogene austenitne strukture, gašenje u vodi i brušenje površine zbog čišćenja od kovarine i površinskih grešaka.

Prethodno hladno vučenje na prečnik $d=8$ mm i finalno vučenje na prečnik $d_f=5$ mm je izvršeno na vučnoj klupi "Schumag" sa brzinom vučenja 20 m/s, korištenjem vodene suspenzije praha oznake TKT (Holifa Njemačka) u svojstvu nosača maziva i ulja VP3 kao maziva istog proizvođača.

Broj provlaka za odgovarajuće, ostvarene stepene deformacije dati su u tabeli 1. Stepenn deformacije izražen je kontrakcijom presjeka (ψ), odnosno stepenom deformacije II reda ili logaritamskim stepenom deformacije (φ), odnosno stepenom deformacije III reda, kako slijedi:

$$\psi_i = \frac{A_{i-1} - A_i}{A_{i-1}} \times 100[\%], \quad i=1, n; \quad \varphi_i = \ln \frac{A_{i-1}}{A_i} \quad \dots(1)$$

U navedenom obrascu je: ψ_i - stepen deformacije II reda, φ_i -stepen deformacije III reda, A_{i-1} - površina poprečnog presjeka žice prije deformacije i A_i -površina poprečnog presjeka žice poslije deformacije, n-broj provlaka, odnosno faza ili operacija vučenja.

Tabela 1. Stepene deformacije tokom hladnog vučenja sa $d=8$ mm na $d_f=5$ mm [1]

Planirani parcijalni $\psi_{pl.} [\%]$	Ostvareni parcijalni stepeni deformacije nakon i-te provlake (ψ_i)									Ostvareni ukupni $\psi_{uk.} [\%]$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10	9,87	7,84	10,80	8,63	9,02	9,44	11,51	10,52	9,30	59,94
15	16,94	15,97	17,35	15,97	15,69	-	-	-	-	59,14
20	20,75	18,26	20,09	20,82	-	-	-	-	-	59,01
25	25,61	24,39	24,89	-	-	-	-	-	-	57,75

Zbog raspoloživog fonda vučnih matrica došlo je do minimalnih i prihvatljivih odstupanja od planiranih stepena deformacije, te su zahtjevi u pogledu ostvarivanja planiranih parcijalnih stepena deformacije od 10, 15, 20, 25 % i ukupnog stepena deformacije od cca 60% u najvećoj mjeri ostvareni.

3. MEHANIČKA ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

Nakon svake provlake, tokom hladnog vučenja sa prečnika $d_0=8$ mm na prečnik $d_n=5$ mm vršena su mehanička ispitivanja na uzorcima oznaka A, B, C, i D koji su uzeti iz hladno vučenih šipki sa parcijalnim stepenima deformacije 10, 15, 20 i 25 %. Za svaki parcijalni stepen deformacije mjerenje je vršeno na tri uzorka, a sistematizovani rezultati srednjih vrijednosti mehaničkih osobina izradaka su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Promjene mehaničkih osobina tokom vučenja u funkciji stepena deformacije [1]

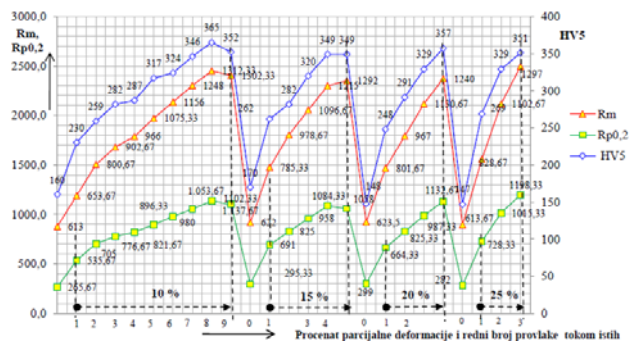
Uzorak/ parc. step.def.	Broj provlake	$d_{žice} [mm]$	Parcijalni φ_i [Ukupni φ_{uk}]	$R_{p0,2} [N/mm^2]$	$R_m [N/mm^2]$	A [%]	Z [%]	Tvrdoća HV5
A, 10 %	0	7,90	0,00	265,67	613,00	56,53	68,90	160
	1	7,50	0,10 [0,10]	535,67	653,67	32,40	72,13	230
	2	7,20	0,08 [0,19]	705,00	800,67	19,30	67,00	259
	3	6,80	0,11 [0,30]	776,67	902,67	14,50	64,10	282
	4	6,50	0,09 [0,39]	821,67	966,00	10,03	62,97	287
	5	6,20	0,09 [0,48]	896,33	1075,33	8,80	60,50	317
	6	5,90	0,10 [0,58]	980,00	1156,00	7,63	59,46	324
	7	5,55	0,12 [0,71]	1053,67	1248,00	7,30	58,33	346
	8	5,25	0,11 [0,82]	1137,67	1312,33	6,93	55,93	365
B, 15 %	9	5,00	0,10 [0,92]	1102,33	1302,33	7,33	55,87	352
	0	7,90	0,00	295,33	622,00	54,10	71,10	170
	1	7,20	0,18 [0,18]	691,00	785,33	22,33	65,70	262

	2	6,60	0,17 [0,36]	825,00	978,67	11,73	62,00	282
	3	6,00	0,19 [0,55]	958,00	1096,67	9,47	57,83	320
	4	5,50	0,18 [0,72]	1084,33	1215,00	9,27	57,00	349
	5	5,05	0,17 [0,89]	1058,00	1292,00	8,40	55,40	349
	0	8,20	0,00	299,00	623,50	55,28	70,90	148
C, 20 %	1	7,30	0,23 [0,23]	664,33	801,67	21,07	65,87	248
	2	6,60	0,20 [0,43]	825,33	9,67	10,53	62,60	291
	3	5,90	0,22 [0,66]	987,33	1130,67	8,50	58,60	329
	4	5,25	0,23 [0,89]	1132,67	1240,00	6,77	56,60	357
D, 25 %	0	8,00	0,00	282,00	613,67	53,37	68,20	147
	1	6,90	0,30 [0,30]	728,33	828,67	20,80	65,77	269
	2	6,00	0,28 [0,58]	1015,33	1102,67	10,87	58,60	329
	3	5,20	0,29 [0,86]	1198,33	1297,00	6,93	58,30	351

Analizom rezultata mjerenja mehaničkih osobina nakon svake provlake može se uočiti da se pri hladnom vučenju sa navedenim parcijalnim stepenima deformacije postižu njihove približno iste vrijednosti na kraju procesa vučenja, odnosno nakon posljednje provlake. Pokazuje to i sistematizovan grafički prikaz na Slici 4.

To znači da su pri hladnom vučenju predmetnog austenitnog čelika efekti ojačavanja materijala izraženi kroz promjenu mehaničkih osobina uglavnom u funkciji ukupnog stepena deformacije. Shodno tome, očigledno je da parcijalni stepeni deformacije nemaju znatniji uticaj na efekte ojačavanja materijala. Međutim, adekvatan izbor parcijalnih stepena deformacije omogućava smanjenje sile vučenja po

pojednim provlakama, a time i fleksibilniji izbor alata, odnosno vučnih matrica. U cilju utvrđivanja zavisnosti mehaničkih osobina od parcijalnog stepena deformacije izvršena je statistička obrada dobijenih rezultata. U obradi je korištena regresiona analiza. Testiran je linearni, kvadratni i kubni regresioni model, a za obradu je korišten statistički paket SPSS 10.0 for windows. Utvrđeno je da najveći koeficijent korelacije i najmanju standardnu grešku daje regresioni kubni model tipa:



Slika 4. Promjena mehaničkih osobina po broju provlaka za ostvarene parcijalne stepene deformacije za uzorke A, B, C, D [2]

$$Y = \text{const} + B_1 \cdot \varphi + B_2 \cdot \varphi^2 + B_3 \cdot \varphi^3 \quad \dots(2)$$

Pošto je na osnovu rezultata i analize odgovarajućih dijagramskih prikaza utvrđeno da ne postoje statistički značajne razlike u mehaničkim osobinama za različite parcijalne stepene deformacije izvršeno je objedinjavanje podataka u jedinstven skup. Osnovni statistički pokazatelji ovog skupa, regresioni koeficijenti, koeficijenti korelacije i standardna greška regresije su dati u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. Osnovni statistički pokazatelji udruženih uzoraka

Mehaničke osobine	N	X_{min}	X_{max}	X_{sr}	σ
$R_{p0.2}$	25	266	1198	812,7	289,2
Rm	25	613	1312	984,8	246,9
A	25	6,8	56,2	19,24	17,15
Z	25	55,4	72,1	62,4	5,25
HV5	25	148	369	287,5	69,8

Tabela 4. Regresioni koeficijenti, koeficijenti korelacije i standardna greška regresije

Mehaničke osobine	Const.	B ₁	B ₂	B ₃	Koeficijent korelacije R ²	Standardna greška regresije
R _{p0,2}	300,8	2206,4	-2468,2	1163,8	0,980	44,1
R _m	614,1	767,3	607,7	-694,7	0,986	31,1
A	54,3	-224,2	362	-190,7	0,984	2,3
Z	70,1	-12,1	-28,2	27,6	0,947	1,3
HV5	163,9	526,7	-566,1	253	0,977	11,4

Na osnovu provedene statističke analize i proračuna regresionih koeficijenata, koeficijenata korelacije i standardne greške regresije utvrđeno je da se promjena mehaničkih osobina pri hladnom vučenju odvija po kubnom modelu, kako slijedi:

$$R_{p0,2} = 300,8 + 2206,4 \cdot \varphi - 2468,2 \cdot \varphi^2 + 1163,8 \cdot \varphi^3; \quad R^2=0,980; \quad \sigma_{rez}=44,1 \quad \dots(3)$$

$$R_m = 614,1 + 767,3 \cdot \varphi + 607,7 \cdot \varphi^2 - 694,7 \cdot \varphi^3; \quad R^2=0,986; \quad \sigma_{rez}=31,1 \quad \dots(4)$$

$$A = 54,3 - 224,2 \cdot \varphi + 362 \cdot \varphi^2 - 190,7 \cdot \varphi^3; \quad R^2=0,984; \quad \sigma_{rez}=2,3 \quad \dots(5)$$

$$Z = 70,1 - 12,1 \cdot \varphi - 28,2 \cdot \varphi^2 + 27,6 \cdot \varphi^3; \quad R^2=0,947; \quad \sigma_{rez}=1,3 \quad \dots(6)$$

$$HV5 = 163,9 + 526,7 \cdot \varphi - 566,1 \cdot \varphi^2 + 253 \cdot \varphi^3; \quad R^2=0,977; \quad \sigma_{rez}=11,4 \quad \dots(7)$$

5. ZAKLJUČAK

Provedena ispitivanja i analizirani efekti ojačavanja materijala u zavisnosti od stepena deformacije ukazuju da mehaničke osobine hladno vučene žice od austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo 18 12 zavise od ukupnog, a ne od parcijalnog stepena deformacije. Izvedene regresione jednačine mogu efikasno da posluže za definisanje izlaznih mehaničkih karakteristika, odnosno kvaliteta izradaka u zavisnosti od stepena deformacije. Uz detaljniju tehno-ekonomsku analizu, a korištenjem rezultata istraživanja moguće je izvršiti projektovanje efikasne tehnologije vučenja i izbor varijante izrade sa aspekta primjene optimalnog broja vučnih matrica. Generalno, rezultati istraživanja i izvedene zakonitosti predstavljeni u ovom radu mogu značajno doprinijeti izboru optimalne varijante izrade i efikasnijem oblikovanju proizvoda zahtjevanog kvaliteta izrade.

6. REFERENCE

- [1] Behar Alić, Uticaj stepena deformacije na očvršćavanje nehrđajućeg austenitnog čelika X5CrNiMo 18 12 kod hladne prerade vučenjem, magistarski rad, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2004.
- [2] Ibrahim Plančić, Edin Begović, Behar Alić, Strengthening materials in the function of deformation degree during process cold wire drawing, COMETA 2018, Jahorina, B&H, 27th- 30th November 2018.
- [3] Mustafa Čaušević, Teorija plastične prerade metala, Sarajevo, 1979.
- [4] H.L. Seet, X.P. Li, K.S. Lee, L.Q. Liu, Cold drawing of micro Ni80Fe20/Cu composite wires, Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 350–354.
- [5] P. Tiernan, M.T. Hillery, Dieless wire drawing-an experimental and numerical analysis, Journal of Materials Processing Technology 155–156 (2004) 1178–1183.
- [6] Heinz Tschachtsch, Metal Forming Practise, Processes – Machines – Tools, Paul-Gerhardt-Str. 25 01309 Dresden, Germany, Originally German edition published by Vieweg Verlag, Wiesbaden 2005.
- [7] Wire and rod drawing process for steel, <http://ispatguru.com/wire-and-rod-drawing-process-for-steel/>, pristup 09.05.2019.
- [8] Z. Muskalski, S. Wiewiórska, The Theoretical Analysis of Wire Drawing Process for Hydrodynamic Friction Conditions, Metallurgical and Mining Industry, Vol. 3, No. 7, 2011.
- [9] Stoja Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.