

ANALIZA UTICAJNIH PARAMETARA NA IZDUŽENJE ŽICE I GENERISANJE MODELA FUNKCIJE METODOM BOX-BEHNKEN DIZAJNA

ANALYSIS OF INFLUENCING PARAMETERS ON THE WIRE ELONGATION AND GENERATION OF FUNCTION MODEL USING BOX-BEHNKEN DESIGN METHOD

Dr.sc. Edin Begović, dipl. inž. maš.,
Nermin Mujanović, dipl. Inž.
Mašinski fakultet,
Univerzitet u Zenici, Zenica, BiH

Dr.sc. Omer Beganović,
Institut „Kemal Kapetanović“,
Univerzitet u Zenici, Zenica, BiH

REZIME

Cilj ovog rada je određivanje modela funkcije po kojoj se mijenja izduženje žice u zavisnosti od promjene uticajnih parametara: početna mjerna dužina žice, prečnik žice i napon do kojeg je žica bila napregnuta kao posljedica djelovanja sile. Eksperimentalna istraživanja su provedena na hladno vučenoj žici izrađenoj od čelika SAE 1008 prema standardu ASTM A 510-03. Box-Behnken eksperimentalni dizajn (BBD) je korišten da se ispita uticaj pojedinih faktora i da se generiše matematički model kojim se uspostavlja veza između ulaza i izlaza posmatranog sistema. Matematički odnos između izduženja i tri nezavisne varijable je definisan kvadratnim modelom. Detaljnom analizom eksperimentalnog dizajna dokazano je da početna mjerna dužina i napon sumarno imaju najveći uticaj na apsolutno izduženje.

Ključne riječi: izduženje žice, Box-Behnken dizajn

ABSTRACT

The aim of this paper is to determine the function model by which elongation of the wire is changed depending on the change of the influencing parameters: the original measuring length of the wire, the original wire diameter and the stress to which the wire was stressed as a result of the loading. Experimental investigations were conducted on a cold drawn wire made of SAE 1008 steel according to ASTM A 510-03. Box-Behnken design (BBD) was used to examine the influence of individual factors and to generate a mathematical model that establishes the connection between the inputs and output of the observed system. The mathematical relationship between elongation and three independent variables is defined with the quadratic model. Detailed analysis of experimental design has shown that the original measuring length and stress have the greatest influence on absolute elongation.

Keywords: wire elongation, Box-Behnken design

1. UVOD

Metalni materijali se pod djelovanjem vanjskog opterećenja postupno deformišu, u početku, pri manjim vanjskim opterećenjima, elastično (privremeno - dok djeluje opterećenje), a nakon toga plastično (trajno). Ovakvo ponašanje se najčešće prezentira dijagramom napon-deformacija (izduženje) koji se dobije ispitivanjem jednoosnim naponskim stanjem na zatezanje. Ukupna

plastična deformacija epruvete, koja se ispituje zatezanjem, može se podijeliti na dva dijela, dio do dostizanja maksimalnog napona (čvrstoće materijala) i dio nakon dostizanja čvrstoće materijala. Plastična deformacija epruvete do dostizanja napona koji odgovara čvrstoći ispitivanog materijala je ujednačena, odnosno proporcionalna što znači da se svaki dio unutar radnog dijela epruvete jednako deformiše, odnosno u jednakom iznosu se izdužuje i u jednakom iznosu se sužava. Nakon dostizanja zatezne čvrstoće dolazi do lokalizacije deformacije koja se ogleda kroz formiranje vrata na ispitivanoj epruveti tako da je cjelokupna dalja plastična deformacija svedena na lokalno suženje i lokalno izduženje u dijelu epruvete gdje se formira vrat. U ovom radu ispitivane žice su podvrgnute ispitivanju zatezanjem do tri različita napona koji odgovaraju dijelu dijagrama napon-deformacija sa ujednačenom (proporcionalnom) deformacijom. Nakon ostvarenog zatezanja žice do navedenih vrijednosti napona vršeno je mjerenje postignutog izduženja te su analizirani su rezultati. Cilj ovog rada je određivanje modela funkcije po kojoj se mijenja izduženje žice u zavisnosti od promjene uticajnih parametara: dužine žice, prečnika žice i napona do kojeg je žica bila napregnuta kao posljedica djelovanja sile. Klasičan pristup izvođenja eksperimenata podrazumijeva ispitivanje uticaja jedne promjenljive na ponašanje sistema, dok se ostale promjenljive ne mijenjaju. Na ovaj način, međutim, nije moguće utvrditi eventualno postojanje interakcija između promjenljivih. Dizajn Eksperimenta - DOE (eng. Design Of Experiment), sa druge strane, omogućava istovremenu procjenu većeg broja faktora koji mogu uticati na sistem korištenjem minimalnog broja eksperimenata, uz istovremeno dobijanje dovoljne količine informacija o njihovom značaju i međusobnim interakcijama [1]. RSM (engl. response surface methodology) je skup više tehnika za analizu odziva sistema. Jedna od najpopularnijih tehnika za kreiranje eksperimentalnog plana, generisanje modela i opisivanje interakcija velikog broja faktora je Box-Behnken dizajn i zbog toga je korištena u ovom radu. Eksperiment je proveden na uređaju za ispitivanje zatezanjem Instituta "Kemal Kapetanović" u Zenici.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalna istraživanja su provedena na hladno vučenoj žici izrađenoj od čelika SAE 1008 prema standardu ASTM A 510-03. Propisani hemijski sastav ovoga čelika, kao i hemijski sastav žica koje su podvrgnute ispitivanju zatezanjem prikazan je tabeli 1. Inače, ispitivane žice se koriste za izradu čeličnih pletiva koje služe za zaštitu od odrona na putnim komunikacijama. Žice se u pletiva ne upliću u žarenom stanju nego u hladno vučenom stanju sa malim iznosima hladne deformacije. U tabeli 2. prikazane su vrijednosti zatezne čvrstoće i izduženja nakon loma takvih žica utvrđene ispitivanjem zatezanjem. Vrijednosti čvrstoće i izduženja ovih žica u žarenom stanju se razlikuju od ovih prikazanih u tabeli 2., odnosno čvrstoća je nešto niža (do 360 N/mm²), dok je izduženje nakon loma nešto veće (preko 40%) [2] što ukazuje da su ispitivane žice nakon žarenja hladno deformisane vučenjem.

Tabela 1. Hemijski sastav žice od čelika SAE 1008 propisan standardom ASTM A 510-03 i utvrđen hemijskom analizom ispitivanih žica

Sadržaj elemenata, maseni (%)	C	Mn	P	S
SAE 1008 prema standardu ASTM A 510-03	max. 0,10	0,03 - 0,05	max. 0,04	max. 0,05
Ispitivana žica od SAE 1008	0,08	0,32	0,01	0,013

Ispitivane su žice promjera 2,5; 3,0 i 3,4 mm. Od svakog od navedenih promjera isječene su po tri uzorka žice koji su podvrgnuti ispitivanju zatezanjem do tri različita napona (317, 364 i 410 N/mm²) koji odgovaraju dijelu dijagrama napon-deformacija sa ujednačenom (proporcionalnom) deformacijom.

Tabela 2. Zatezne karakteristike vučene žice od čelika SAE 1008

Uzorak	Zatezna čvrstoća Rm (N/mm ²)	Izduženje nakon loma Δl (%)
Žica promjera 2,5 mm	435	16,5
Žica promjera 3,0 mm	421	14,5
Žica promjera 3,4 mm	417	21,0

Na svakoj od isječenih uzoraka žica označeno je 15 mjernih polja, svako dužine po 10 mm, kako bi se moglo odrediti dostignuto izduženje žice za početne mjerne dužine od 50, 100 i 150 mm nakon ostvarene deformacije pri naponima od 317 N/mm², 364 N/mm² i 410 N/mm². Po jedan uzorak žice od svakog promjera je opterećen do napona 317 N/mm², po jedan uzorak žice od svakog promjera je opterećen do napona 364 N/mm², dok je po jedan uzorak žice od svakog promjera opterećen do napona 410 N/mm² u uređaju za ispitivanje zatezanjem. Nakon ostvarenog zatezanja žice do navedenih vrijednosti napona vršeno je mjerenje postignutog izduženja za različite početne mjerne dužine (50, 100 i 150 mm) na način da je vršeno mjerenje dužine svakog mjernog polja, pojedinačno, pomoću mikrometarskog uređaja za mjerenje dužine pri povećanju od 24x.

3. PLAN EKSPERIMENTA

Izbor odgovarajućeg eksperimentalnog plana ključan je korak u primjeni postupka dobijanja odzivne površine [3]. Pri izradi ovog rada korišten je Box-Behnken eksperimentalni plan sa tri faktora na tri nivoa i tri ponavljanja u centralnoj tački.

Za opis odzivne funkcije (izduženje žice) primjenjen je polinom drugog reda:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad \dots(1)$$

gdje je: Y-izduženje žice, b_0 - vrijednost u centralnoj tački dizajna, $b_{1\dots3}$, $b_{11\dots33}$ i $b_{12,13,23}$ – linearni, kvadratni članovi i njihove interakcije, $x_{1\dots3}$ – kodirane varijable

Ovakva jednačina omogućava za svaku odabranu vrijednost promjenljivih izračunavanje odgovora bez izvođenja eksperimenata. Konstruisanjem površine odgovora, moguće je uočavanje regiona gde je odgovor maksimalan i u toj oblasti grafički se očitava vrijednost datih promjenljivih. Na osnovu koeficijenata polinoma može se procijeniti koji uticaj faktori i interakcije imaju na odgovor: predznak (+) ukazuje da se povećanjem vrijednosti faktora povećava i odgovor dok predznak (-) ukazuje da se smanjenjem vrijednosti faktora smanjuje i odgovor. Što je veća apsolutna vrijednost koeficijenta, to je veći uticaj datog faktora ili interakcije. Softverski paketi automatski računaju statističku značajnost koeficijenata i ukazuju na značajne faktore i interakcije [1, 4, 5].

Broj eksperimentalnih tačaka za BBD dizajn je:

$$n = 2 \cdot k(k-1) + n_0 = 2 \cdot 3(3-1) + 3 = 15 \quad \dots(2)$$

gdje je: k-broj faktora, n_0 – broj ponavljanja u centralnoj tački

U tabeli 3. prikazan je Box-Behnken plan matrica eksperimenta prema kojoj je eksperiment bio vođen. Nakon što je proveden eksperiment i dobiveni rezultati, provedena je statistička analiza rezultata u programu MINITAB (DEMO verzija).

4. REZULTATI I DISKUSIJA

U tabeli 3. je prikazana plan matrica izvođenja eksperimenta i prikazani su svih 15 eksperimentalnih tačaka u kodiranim vrijednostima i u prirodnim koordinatama sa rezultatima mjerenja za svaku eksperimentalnu tačku, kao i vrijednosti dobivene modelom.

Tabela 3. Plan matrica eksperimenta sa rezultatima

Exp. tačka	Kodirane vrijednosti			Prirodne koordinate			Izduženje nakon deformacije	
	x_1 l (mm)	x_2 d (mm)	x_3 σ (MPa)	x_1 l (mm)	x_2 d (mm)	x_3 σ (MPa)	Eksperiment Δl (mm)	Model Δl (mm)
1	-1	-1	0	50	2,5	364	1,44	1,10
2	-1	1	0	50	3,4	364	1,04	1,30
3	1	-1	0	150	2,5	364	4,31	4,05
4	1	1	0	150	3,4	364	3,11	3,44
5	-1	0	-1	50	3,0	317	0,17	0,34
6	-1	0	1	50	3,0	410	2,48	2,39
7	1	0	-1	150	3,0	317	0,51	0,59
8	1	0	1	150	3,0	410	7,41	7,24
9	0	-1	-1	100	2,5	317	0,33	0,50
10	0	-1	1	100	2,5	410	4,00	4,42
11	0	1	-1	100	3,4	317	0,28	0,14
12	0	1	1	100	3,4	410	4,83	4,65
13	0	0	0	100	3,0	364	3,59	3,60
14	0	0	0	100	3,0	364	3,62	3,60
15	0	0	0	100	3,0	364	3,61	3,60

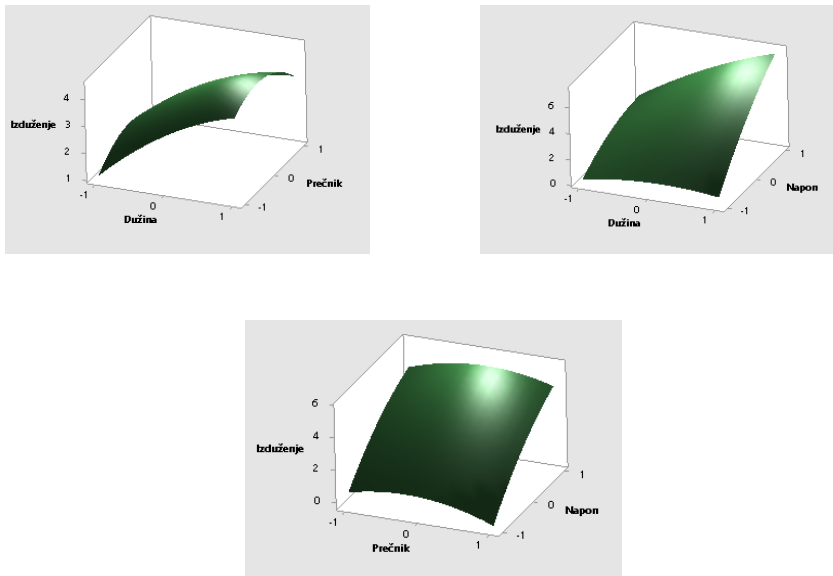
Izračunati regresioni koeficijenti i povezani statistički rezultati su prikazani u tabeli 4. Efekti su statistički signifikantni kada je P-vrijednost, definirana kao najmanji nivo značajnosti koji dovodi do odbijanja nulte hipoteze, manja od 0,05.

Tabela 4. Rezultati regresione analize za BBD

Term	Effect	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	3,607	0,237	15,20	0,000	0,000
x_1	2,553	1,276	0,145	8,78	0,000
x_2	-0,205	-0,102	0,145	-0,71	0,512
x_3	4,358	2,179	0,145	14,99	0,000
x_1*x_1	-0,849	-0,425	0,214	-1,99	0,104
x_2*x_2	-1,414	-0,707	0,214	-3,31	0,021
x_3*x_3	-1,079	-0,540	0,214	-2,49	0,050
x_1*x_2	-0,400	-0,200	0,206	-0,97	0,375
x_1*x_3	2,295	1,147	0,206	5,58	0,003
x_2*x_3	0,440	0,220	0,206	1,07	0,333

Značaj svakog faktora može se odrediti pomoću T-testa i P-vrijednosti prikazanih u tabeli 4. Što veća veličina T-vrijednosti i manja P-vrijednost ukazuju na značaj odgovarajućeg koeficijenta [6]. Slika 1. prikazuje efekat koji imaju uticajni parametri na izduženje žice. Može se vidjeti da faktori sa najvećim uticajem su linearni članovi (početna mjerna dužina i napon), zatim kvadratni efekat prečnika, napona i interakcije početna mjerna dužina*napon. Ostali

članovi se mogu odbaciti i eliminisati iz modela. Sa slike možemo zaključiti da početna mjerna dužina i napon sumarno imaju najveći uticaj na apsolutno izduženje.



Slika 1. Uticaj ulaznih parametra na izduženje žice (3D-prikaz)

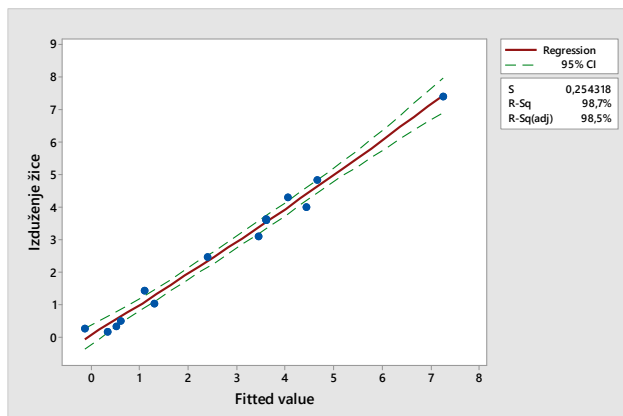
Kad je u pitanju prečnik, on nema nikakav značajniji uticaj na izduženje, izuzev njegov kvadrat. Objašnjenje za ovu pojavu bi moglo biti to da je žica bila opterećena do napona koji nije prelazio maksimalno mogući napon (čvrstoća žice) pa je zbog toga deformacija bila proporcionalna, odnosno ista je po cijeloj dužini žice (uzdužna deformacija) i u svakom poprečnom presjeku (poprečna deformacija). Dakle, nije došlo do formiranja vrata na uzorcima žice, odnosno nije došlo do lokalizacije deformacije kada bi prečnik mogao da ima uticaj na izduženje (u tom slučaju bi se moglo očekivati da za istu početnu mjernu dužinu žica većeg promjera daje veće izduženje u dijelu gdje se formira vrat zbog toga što je moguće veće apsolutno suženje žice većeg promjera u odnosu na žicu manjeg promjera što bi doprinijelo dostizanju većeg izduženja). Zbog ove mogućnosti se kod epruveta za ispitivanje zatezanjem standardno definiše odnos početne mjerne dužine i poprečnog presjeka epruvete $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$. Poprečni presjek žice je $S_0 = d_0^2 \pi / 4$. Poprečni presjek je proporcionalan kvadratu promjera žice. Poprečni presjek žice određuje vrijednost napona jer se djelujuća sila dijeli sa početnom površinom poprečnog presjeka (S_0) da bi se dobio napon. Stoga, ako postoji uticaj presjeka žice (prečnika) na izduženje onda je on indirektan preko uticaja napona, ali bi taj uticaj morao biti jednoznačan, npr. veći promjer veće izduženje i obratno, manji promjer manje izduženje, a ne na način da ovaj uticaj raste pa opada (ili obratno) sa promjenom promjera žice.

Provedena regresiona analiza eksperimentalnih podataka daje sljedeći model za nivo značajnosti 95%:

$$Y = 3,607 + 1,276 \cdot l + 2,179 \cdot \sigma - 0,707 \cdot d^2 - 0,540 \cdot \sigma^2 + 1,147 \cdot l \cdot \sigma$$

Provjera regresionog modela je urađena pomoću koeficijenta determinacije R^2 . U tabeli 3. su prikazani rezultati Box-Behnken dizajna za eksperimentalne vrijednosti kao i vrijednosti koje su predviđene modelom. Slika 2. prikazuje visok stepen korelacije između eksperimentalnih i

vrijednosti predviđenih modelom. Vrijednost koeficijenta determinacije $R^2=98,7\%$ ukazuje na to da samo 1,3 % ukupnih varijacija nije objašnjeno modelom.



Slika 2. Eksperimentalne vrijednosti i vrijednosti predviđene modelom

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu, istraživani su utjecaji tri eksperimentalna parametra na izduženje žice. Uticajni parametri su bili: početna mjerna dužina žice, prečnik žice, i napon do kog je žica bila napregnuta kao posljedica djelovanja sile. Box-Behnken dizajn je korišten sa pretpostavkom kvadratnog modela drugog reda. Rezultati su obrađeni pomoću statističkog softvera MINITAB (DEMO verzija). Na osnovu rezultata obrade zaključeno je da početna mjerna dužina i napon sumarno imaju najveći uticaj na apsolutno izduženje. Kada je u pitanju prečnik, on nema značajan uticaj na izduženje, osim njegov kvadrat, što se objašnjava činjenicom da je ispitivanje vršeno u plastičnom području do napona koji nije prelazio maksimalno mogući napon (čvrstoća žice). Zaključeno je, takođe, da definisani kvadratni model dobro opisuje posmatrani proces. Vrijednost R^2 (98,7%) ukazuje na visok stepen korelacije između odgovora i nezavisnih varijabli za eksperimentalne vrijednosti i vrijednosti modela. Vrijednost R^2 koeficijenta pokazala je da samo 1,3% varijacija nisu objašnjene modelom.

6. LITERATURA

- [1] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons; 2008.
- [2] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=145867c159894de286d4803a0fc0fe0f> (05.03.2019.)
- [3] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandão, E.G.P. da Silva, L.A. Portugal, P.S. dos Reis, A.S. Souza, W.N.L. dos Santos, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, Anal. Chim. Acta **597** (2007) 179–186.
- [4] Kuhfeld W. Experimental design, efficiency, coding, and choice designs. Mark Res methods sas Exp Des choice, conjoint, Graph Tech. 2005;47–97.
- [5] Cotter SC. A Screening Design for Factorial Experiments with Interactions. Biometrika. 1979;66(2):317–20.
- [6] Firuz Fakheri*, Ali Sharif Alam, Shokrollah Mohseni and Ramin Ramezani Kalhor, Application of Box Behnken Experimental Design to Analysis Reaction Conversion of n-Butyl Acetate to n-Butanol