

UTJECAJ NISKOG I VISOKOG POPUŠTANJA NA TVRDOĆU ČELIKA EN 42CRMO4

THE INFLUENCE OF LOW AND HIGH ANNEALING ON THE HARDNESS OF STEEL EN 42CRMO4

Dražen Živković, Igor Gabrić, Slaven Šitić

Stručni članak

Sažetak: Hollomon i Jaffe [1],[2] su dali funkcionalnu ovisnost parametra popuštanja (temperatura i trajanja) $P=f(T, \tau)$. Drugim riječima ako se koriste kombinacije temperature i trajanja popuštanja, koje rezultiraju jednakom vrijednošću parametra, tvrdoća će ostati nepromijenjena. Ova funkcija se odnosi samo na čelike. Za određivanje parametara popuštanja uz postizanje željene mikrostrukture i tvrdoće nakon obrade, potrebno je poznavati dijagram popuštanja promatranog čelika. U ovom radu je istražena mogućnost dobivanja izraza gdje je tvrdoća u funkciji temperature i vremena popuštanja ($H=f(T, \tau)$). Plan pokusa i statistička analiza rezultata su obavljani korištenjem programa „Design expert 6.0“ [3]. Izrađeni su cilindrični uzorci duljine 10 mm i promjera 25 mm. Pokus je obavljen u dva dijela. Prvi dio se odnosio na visokotemperaturno popuštanje, a drugi dio na niskotemperaturno. Ovakav pristup ispitivanju je odabran zbog bitno različitih struktura koje se pojavljuju na niskim i visokim temperaturama popuštanja.

Ključne riječi: toplinska obrada, parametri popuštanja, tvrdoća, statistička analiza

Professional paper

Abstract: Hollomon and Jaffe [1], [2] have given the functional dependence of the annealing parameters (temperature and time) $P = f(T, \tau)$. In other words, if using a combination of temperature and annealing time, resulting in equal parameters value, hardness will remain unchanged. This function refers only on steels. To determine the parameters of annealing for desired hardness after treatment, it is necessary to know the annealing diagram ($H=f(T)$) of the observed steel. This paper investigates the possibility of obtaining a mathematical model where the hardness is function of annealing temperature and time ($H=f(T, \tau)$). Design of experiments and statistical analysis were performed using the program "Design Expert 6.0" [3]. The cylindrical specimens were 10 mm length and 25 mm in diameter. The experiment was conducted in two levels. The first level was related to high temperature annealing, while the second level was related to the low temperature annealing. The reason for this approach was based on significantly different microstructure that appears at low and high annealing temperatures.

Key words: heat treatment, annealing parameters, hardness, statistical analysis

1. UVOD

Kako bi se ubrzao postupak određivanja parametara popuštanja korišten je centralni kompozitni plan pokusa. Pokusima i statističkom analizom određena je matematička funkcija koja povezuje parametre popuštanja i tvrdoću čelika [4].

Centralnim kompozitnim planom određen je minimalan broj uzoraka potrebnih za analizu pojave. Nakon obavljene toplinske obrade, uzorci cilindričnog oblika izrezani su iz šipke. Strojna obrada provedena je nakon toplinske obrade kako ne bi došlo do razugljenja i oksidacije ispitivanog presjeka.

Toplinska obrada je obavljena u komornoj peći (slika 1) bez zaštitne atmosfere. Kaljenje nakon austenitizacije na temperaturi od 850°C u trajanju 10 minuta obavljeno je u ulju. Promjer šipki koje su toplinski obrađivane je bio 25 mm. Nakon popuštanja uzorci su ohlađeni na mirujućem zraku do sobne temperature.



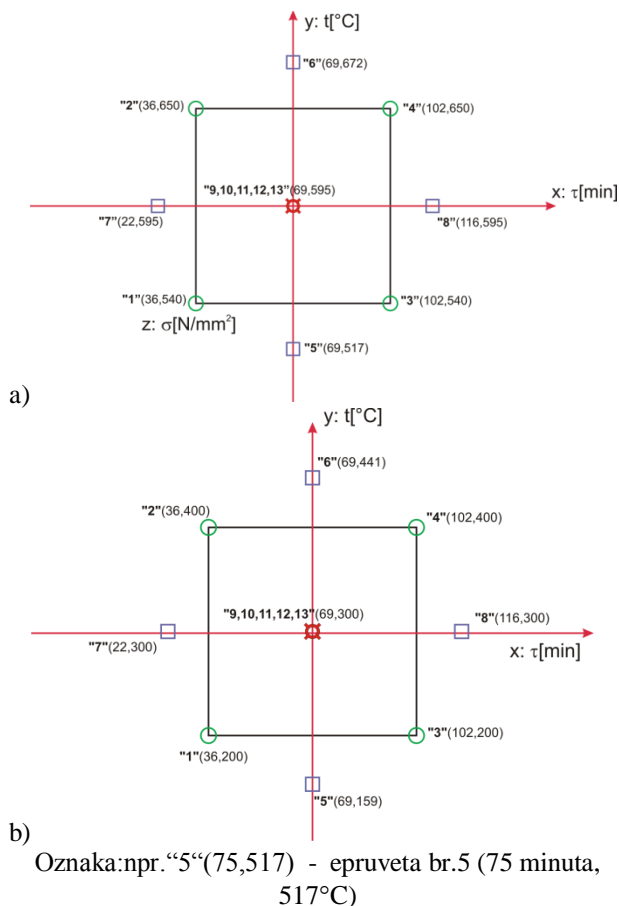
Slika 1. Komorna peč

Ispitivanje je obavljeno mijenjanjem dva parametra toplinske obrade: temperatura i vrijeme popuštanja. Prema centralnom kompozitnom planu korišteno je za prvi dio pokusa visokotemperaturno područje popuštanja 517÷673°C, kao i vremena popuštanja u rasponu od 22÷116 minuta. U drugom dijelu pokusa odabrano je temperaturno područje od 158÷441°C, te vremena popuštanja u rasponu od 22÷116 minuta, kao i u prvom dijelu pokusa.

2. EKSPERIMENTALNO

2.1. Planiranje pokusa

Odobran je centralno kompozitni plan pokusa (central composite design, CCD) [5]. Svaki faktor je mijenjan na pet razina. Svrha plana pokusa je pronalaženje matematičkog modela koji opisuje proces uz minimalan broj potrebnih pokusa. U ovom slučaju mijenjana su dva parametra (vrijeme i temperatura popuštanja). Svaki parametar mijenjan je na 5 nivoa (+ α ; - α ; +1; -1; 0). Na slici 2 prikazana je shema eksperimentalnih točaka pokusa. Simbol „□“ označava centralnu točku gdje razina svakog faktora ima srednju vrijednost, a koja se ponavlja 5 puta. Ovim ponavljanjem se postiže smanjenje varijance i dobra procjena čiste greške. Simbol „○“ označava 4 aksijalne točke udaljene $\alpha=1,41$ od središta, a simbol „□“ označava 4 vršne točke plana pokusa.



Slika 2. Shematski prikaz eksperimentalnih točaka za visokotemperaturno (a) i niskotemperaturno (b) popuštanje

2.2. Ispitni materijal i oblik uzorka

Za izradu uzoraka korišten je materijal iz grupe čelika za poboljšavanje koji je u širokoj primjeni EN 42CrMo4 (Č 4732) kemijskog sastava prikazanog u tablici 1.

Tabela 1. Kemijski sastav čelika EN 42CrMo4

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.41	0.20	0.75	1.05	0.23

2.3. Plan pokusa

Unosom podataka o broju i rasponu pojedinih parametara koji se mijenjaju u programski paket Design expert generirano je 13 stanja pokusa (slika 3). Tablica 2 prikazuje redoslijed izvođenja i parametre obrade za svako stanje pokusa.

Tablica 2. Redoslijed izvođenja pokusa i parametri pokusa za visokotemperaturno (a) i niskotemperaturno (b) popuštanje

broj epruvete	temperatura popuštanja		vrijeme popuštanja	
	a)	b)	sati	minuta
1	540	200	0	36
2	650	400	0	36
3	540	200	1	42
4	650	400	1	42
5	517	158	1	9
6	673	441	1	9
7	595	300	0	22
8	595	300	1	56
9	595	300	1	9
10	595	300	1	9
11	595	300	1	9
12	595	300	1	9
13	595	300	1	9



Slika 3. Uzorci nakon obavljene toplinske obrade

2.3. Ispitivanje tvrdoće

Odzivna veličina, kao rezultat eksperimenta, je postignuta tvrdoća nakon toplinske obrade. Tvrdoća je mjerena Vickers-ovom metodom HV30. Srednje vrijednosti tvrdoća HV30 kao rezultati ispitivanja za visokotemperaturno i niskotemperaturno popuštanje su prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće

VISOKOTEMPERATURNO POPUŠTANJE		NISKOTEMPERATURNO POPUŠTANJE	
Broj epruvete	Srednja vrijednost tvrdoće HV30	Broj epruvete	Srednja vrijednost tvrdoće HV30
1	342,1	1	606
2	291,9	2	450
3	320,6	3	538
4	270,8	4	419
5	372,3	5	633
6	275,0	6	372
7	366,3	7	522
8	331,3	8	399
9	336,5	9	506
10	320,6	10	418
11	310,6	11	486
12	306,1	12	496
13	320,6	13	501

Tablica 4. Rezultati pokusa za slučaj visokotemperaturnog popuštanja

broj epruvete	Temperatura popuštanja	vrijeme popuštanja		tvrdoća HV30
		sati	minuta	
1	540	0	36	342,1
2	650	0	36	291,9
3	540	1	42	320,6
4	650	1	42	270,8
5	517	1	9	372,3
6	673	1	9	275
7	595	0	22	366,3
8	595	1	56	331,3
9	595	1	9	336,5
10	595	1	9	320,6
11	595	1	9	310,6
12	595	1	9	306,1
13	595	1	9	320,6

2.4. Statistička analiza

Rezultati mjerenja tvrdoća su statistički obrađeni pomoću programskog paketa DESIGN EXPERT 6 te je pomoću navedenog programa izrađen i matematički model. U tablici 4 prikazani su izmjerene vrijednosti tvrdoća za različite temperature visokog popuštanja i vremena popuštanja. U tablici 5 prikazani su analogni rezultati za slučaj niskotemperaturnog popuštanja.

Prvi korak kod statističke analize je bilo određivanje vrste transformacije odzivne veličine. Obzirom na dobivene rezultate nije bilo potrebe za transformacijom. U sljedećem koraku program upućuje na funkciju koja najbolje odgovara ovom slučaju, tablica 6 i 7. Za oba slučaja odabrana je linearna funkcija modela. Nadalje, određena je značajnost modela i članova polinoma pomoću analize varijance (ANOVA). Navedena analiza varijance prikazana je u tablici 8 i 9.

Tablica 5. Rezultati pokusa za slučaj niskotemperaturnog popuštanja

broj epruvete	Temperatura popuštanja	vrijeme popuštanja		tvrdoća HV30
		sati	minuta	
1	200	0	36	606
2	400	0	36	450
3	200	1	42	538
4	400	1	42	419
5	158,58	1	9	633
6	441,42	1	9	372
7	300	0	22	522
8	300	1	56	399
9	300	1	9	506
10	300	1	9	418
11	300	1	9	486
12	300	1	9	496
13	300	1	9	501

Tablica 6. Odabir modela metodom sume kvadrata za slučaj visokotemperaturnog popuštanja

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	P-Vrijednost Prob>F	
Srednja vrijednost	$1.334 \cdot 10^6$	1	$1.334 \cdot 10^6$			
<u>Linearna</u>	<u>8116.72</u>	<u>2</u>	<u>4058.36</u>	<u>12.80</u>	<u>0.0017</u>	<u>Predloženo</u>
2FI	0.040	1	0.040	$1.136 \cdot 10^{-4}$	0.9917	
Kvadratna	650.63	2	325.31	0.90	0.4475	
Kubna	182.44	2	91.22	0.20	0.8286	
Ostatak	2336.47	5	467.29			
Ukupno	$1.345 \cdot 10^6$	13	$1.035 \cdot 10^5$			

Tablica 7. Odabir modela metodom sume kvadrata za slučaj niskotemperaturnog popuštanja

Izvor	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	P-Vrijednost Prob>F	
Srednja vrijednost	3.098E+006	1	3.098E+006			
<u>Linearna</u>	61172.26	2	30586.13	29.20	< 0.0001	<u>Predloženo</u>
2FI	342.25	1	342.25	0.30	0.5948	
Kvadratna	2134.62	2	1067.31	0.93	0.4369	
Kubna	1809.24	2	904.62	0.73	0.5267	
Ostatak	6189.33	5	1237.87			
Ukupno	3.169E+006	13	2.438E+005			

Tablica 8. Određivanje značajnosti modela i članova polinoma analizom varijance za slučaj visokotemperaturnog popuštanja

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	P-Vrijednost Prob>F	Značaj
Model	8116.72	2	4058.36	12.80	0.0017	značajan
A	7056.90	1	7056.90	22.26	0.0008	
B	1059.82	1	1059.82	3.34	0.0974	
Ostatak	3169.57	10	316.96			
Odstupanje od modela	2620.13	6	436.69	3.18	0.1413	neznačajano
Čista greška	549.44	4	137.36			
Ukupno	11286.29	12				

Tablica 9. Određivanje značajnosti modela i članova polinoma analizom varijance za slučaj niskotemperaturnog popuštanja

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Broj stupnjeva slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	P-Vrijednost Prob>F	Značaj
Model	61172.26	2	30586.13	29.20	< 0.0001	značajan
A	51859.67	1	51859.67	49.51	< 0.0001	
B	9312.59	1	9312.59	8.89	0.0138	
Ostatak	10475.43	10	1047.54			
Odstupanje od modela	5232.23	6	872.04	0.67	0.6883	neznačajano
Čista greška	5243.20	4	1310.80			
Ukupno	71647.69	12				

gdje je: A - temperatura popuštanja
B - vrijeme popuštanja

U tablici 10. i 11. su prikazane procjene koeficijenata u kodiranom obliku, stupnjevi slobode, procijenjena standardna devijacija koeficijenta (standardna pogreška), donje i gornje granice intervala povjerenja i faktor inflacije varijance za svaki član modela.

Tablica 10. Procjene koeficijenata za slučaj visokotemperaturnog popuštanja

Član modela	Slobodni član	A-Temperatura	B-Vrijeme
Procjena koeficijenta	320.35	-29.70	-11.51
Stupnjevi slobode	1	1	1
Standardna pogreška	4.94	6.29	6.29
95% Interval povjerenja donja granica	309.34	-43.73	-25.53
95% Interval povjerenja gornja granica	331.35	-15.68	2.51
Faktor inflacije varijance		1.00	1.00

Tablica 12. Procjene koeficijenata za slučaj niskotemperaturnog popuštanja

Član modela	Slobodni član	A-Temperatura	B-Vrijeme
Procjena koeficijenta	488.15	-80.51	-34.12
Stupnjevi slobode	1	1	1
Standardna pogreška	8.98	11.44	11.44
95% Interval povjerenja donja granica	468.15	-106.01	-59.62
95% Interval povjerenja gornja granica	508.16	-55.02	-8.62
Faktor inflacije varijance		1.00	1.00

3. REZULTATI I RASPRAVA

Procijenjeni koeficijenti u prethodnoj tablici se odnose na matematički model sa kodiranim faktorima (+ α ; - α ; +1; -1; 0) gdje je $\alpha=1,41$.

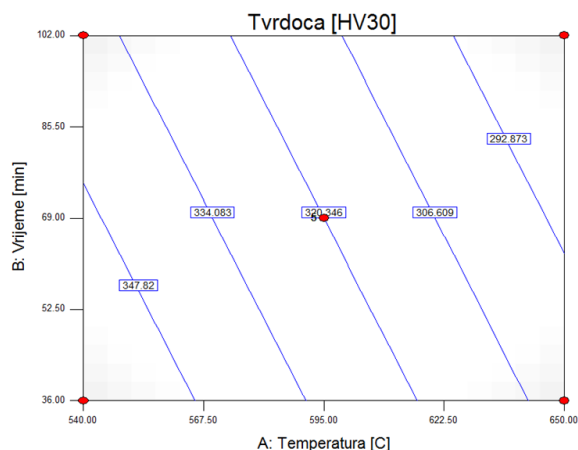
Završni matematički model sa stvarnim faktorima za popuštanje u temperaturnom intervalu od 540 do 650°C :

$$HV_{540-650} = 665,72 - 0,54001 \cdot T - 0,34879 \cdot \tau \quad [1]$$

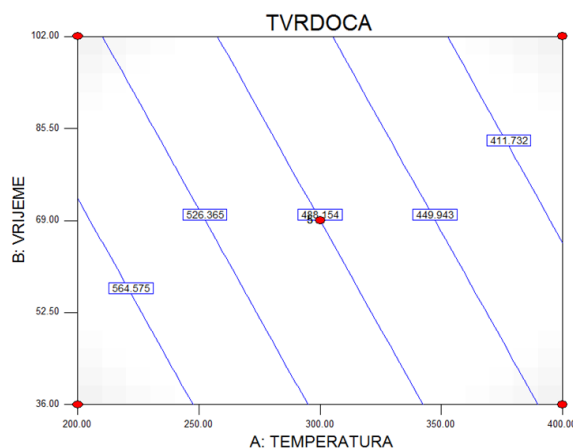
Završni matematički model sa stvarnim faktorima za popuštanje u temperaturnom intervalu od 200 do 400°C :

$$HV_{200-400} = 801,03 - 0,80514 \cdot T - 1,03389 \cdot \tau \quad [2]$$

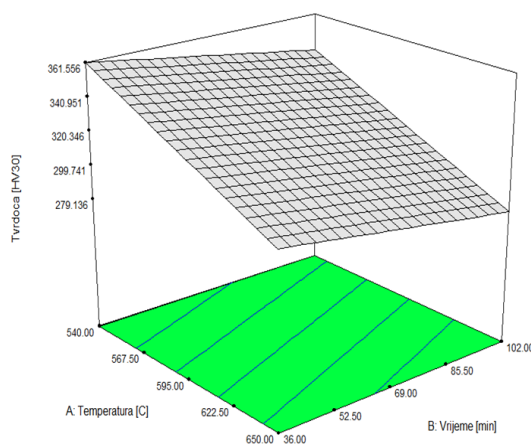
Na slici 4 i 5 prikazani su konturni, a na slikama 6 i 7 trodimenzionalni grafički prikazi matematičkih modela zavisnosti tvrdoće o parametrima popuštanja.



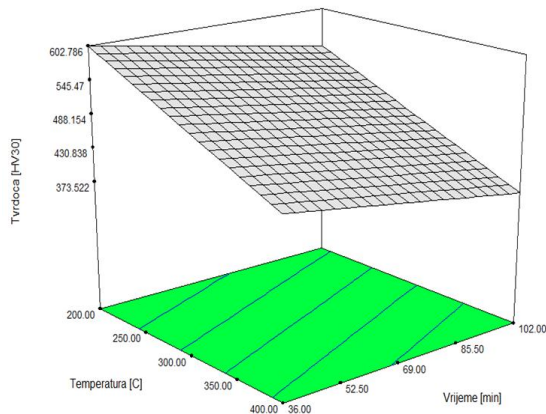
Slika 4. Konturni dijagram matematičkog modela za temperature popuštanja 540 do 650°C



Slika 5. Konturni dijagram matematičkog modela za temperature popuštanja 200 do 400°C



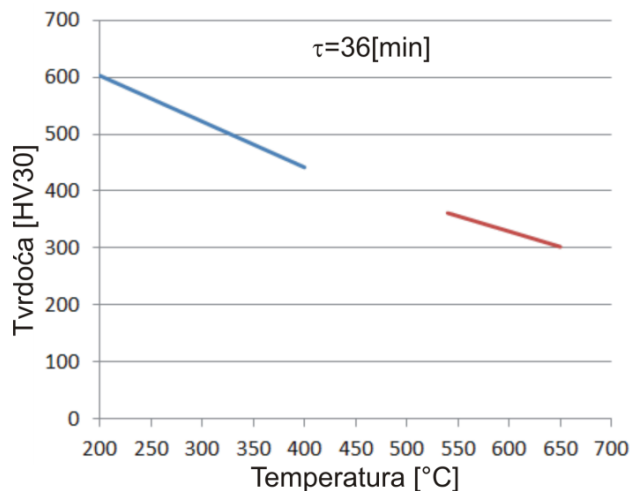
Slika 6. 3D dijagram matematičkog modela za temperature popuštanja 540 do 650°C



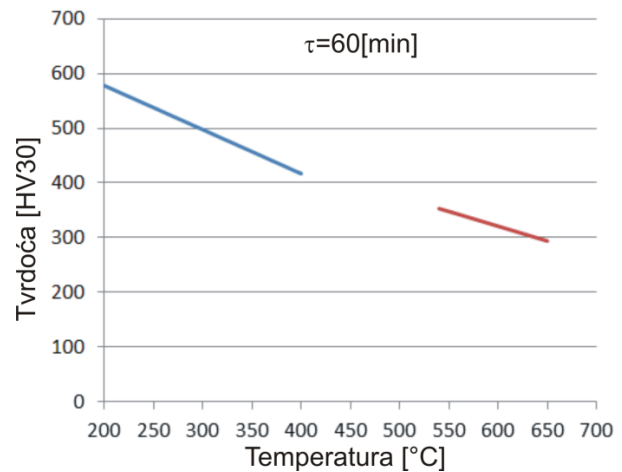
Slika 7. 3D dijagram matematičkog modela za temperature popuštanja 200 do 400°C

Iz slike vidimo utjecaj parametara popuštanja na tvrdoću (porastom temperature i vremena popuštanja opada tvrdoća). Paralelne linije na slikama 5, 6, 7 i 8 povezuju točke različitih kombinacija temperature i vremena popuštanja koje rezultiraju istom vrijednošću tvrdoće.

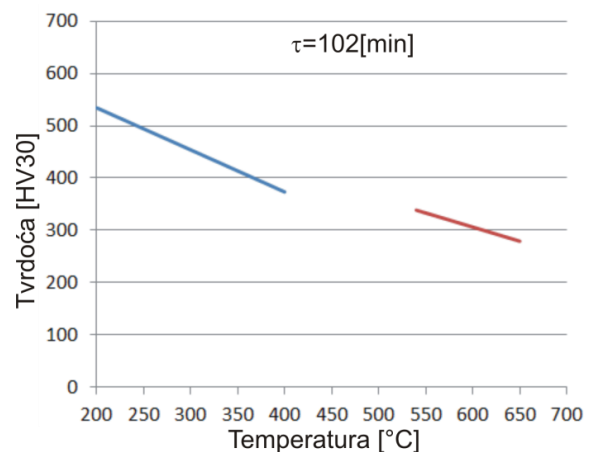
Na slici 8, 9 i 10 prikazane su eksperimentom dobivene funkcije za niskotemperaturno i visokotemperaturno popuštanje i to za trajanje 36, 60 i 102 minute. Za uočiti je nešto veći nagib pravca kod niskotemperaturnog popuštanja i nešto veći pomaci pravaca za duža trajanja popuštanja.



Slika 8. Usporedba matematičkog modela $HV30=f(T, \tau=36 \text{ min})$ visokotemperaturno popuštanje – crvena linija i niskotemperaturno popuštanje – plava linija



Slika 9. Usporedba matematičkog modela $HV30=f(T, \tau=60 \text{ min})$ visokotemperaturno popuštanje – crvena linija i niskotemperaturno popuštanje – plava linija



Slika 10. Usporedba matematičkog modela $HV30=f(T, \tau=102 \text{ min})$ visokotemperaturno popuštanje – crvena linija i niskotemperaturno popuštanje – plava linija

4. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata možemo uočiti utjecaj parametara popuštanja na tvrdoću nakon toplinskog tretmana, te da se različitim kombinacijama temperature i trajanja popuštanja može doći do istog rezultata tvrdoće (Hollomon – Jaffe) [6]. Doprinos ovog rada je dobiveni matematički model koji opisuje utjecaj parametara toplinske obrade na tvrdoću nakon popuštanja čelika EN 42CrMo4.

Na nižim temperaturama popuštanja uočljiv je veći utjecaj vremena držanja na tvrdoću nego u slučaju visokotemperaturnog popuštanja.

Dobiveni rezultati predstavljaju polaznu točku i temelj su za daljnja istraživanja.

5. LITERATURA

- [1] ASM Handbook, (1991), *Vol 4- Heat Treating*, ASM International, Metals Park, OH, USA,
- [2] Deželić R., (1987), *Metali 2*, Sveučilište u Splitu, FESB, Split
- [3] Prabal R., Ratan G., Ashok P., (2002), *Influence of Heat Treatment Parameters on Structure and Mechanical Properties of an HSLA-100 Steel*, Steel Research 73 No. 8, p 347-355 Germany
- [4] Stanić J., (1986), *Metod inženjerskih mjerenja*, Mašinski fakultet, Beograd
- [5] STAT EASE, Inc.: *DESIGN – EXPERT v.6.0.10*, Minneapolis, MN 55413
- [6] Totten G. E., (2006), *Steel Heat Treatment – Metallurgy and Technologies*, Portland State University, Portland, Oregon, U.S.A
- [7] Živković D., Gabrić I., Šitić S., (2012), *Analysis of heat treatment influence on the hardness of steel EN 42CrMo4*, MATRIB 2012, Vela Luka, Korčula

Kontakt autora:

Dražen Živković
Sveučilište u Splitu
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
Ruđera Boškovića bb
21000 Split
drazen.zivkovic@fesb.hr

Igor Gabrić
Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za stručne studije
Livanjska 5
21000 Split
igor.gabric@oss.unist.hr

Slaven Šitić
Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za stručne studije
Livanjska 5
21000 Split
slaven.sitic@oss.unist.hr