



Vukić Lazić¹, Dušan Arsić², Milorad Zrilić³, Srbislav Aleksandrović¹, Milan Đorđević², Nada Ratković¹

EXPERIMENTAL MEASURING OF RESIDUAL STRESSES IN HARD FACED LAYERS OF THE HOT WORK TOOL STEEL

EKSPERIMENTALNO MERENJE ZAOSTALIH NAPONA U NAVARENIM SLOJEVIMA KOD TERMOPOSTOJANOG ČELIKA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Januar 2017.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

Ključne reči: navarivanje, termopostojan čelik, zaostali naponi, otpuštanje.

Rezime

U ovom radu je prikazan postupak eksperimentalnog merenja zaostalih napona u navarenim slojevima kod termopostojanog čelika namenjenog za izradu kovačkih alata. Cilj rada je da se istraži uticaj višeslojnog navarivanja na uzdužne i poprečne zaostale napone tankih i debelih ploča koji u eksploataciji mogu dovesti do pojave prsline. Takođe, praćen je i uticaj otpuštanja na snižavanje nivoa zaostalih napona. Ploče su navarene u 3 sloja a naponi su mereni magnetnom metodom. Dobijeni rezultati su pokazali da su zaostali naponi veći kod debelih ploča kao i da pravilan režim termičke obrade može značajno smanjiti nivo zaostalih napona.

1. UVOD

U ovom radu je prikazan postupak eksperimentalnog merenja zaostalih napona na višeslojno navarenim pločama od termopostojanog čelika. Navarene su ploče različitih debljina: tanke 7.4 mm i debele 29 mm na kojima su mereni zaostali naponi su navarene višeslojno (3) a eksperimentom je praćen i uticaj otpuštanja na nivo zaostalih napona. U nekim ranijim publikacijama [1, 2] autori ovog rada su istraživali uticaj navarivanja i otpuštanja na nivo deformacija na uzorcima. U tim radovima je pokazano se deformacije javljaju i rastu po linearnoj zavisnosti od broja prolaza kao i da otpuštanje nema veliki uticaj na nivo deformacija, naročito kod debelih ploča.

Cilj ovog rada je da ukaže na pojavu i prisustvo zaostalih napona u navarenim slojevima ali i da definiše uticaj višeslojnog navarivanja i naknadnog otpuštanja na nivo zaostalih napona.

Adresa autora / Author's address:

¹) Profesor, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, Srbija, vlazic@kg.ac.rs

²) Istraživač-saradnik, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, Srbija, dusan.arsic@fink.rs

³) Profesor, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, Karnegijeva 4, Srbija

Key words: hard facing, hot work tool steel, residual stresses, tempering.

Abstract

The procedure for experimental determination of the longitudinal and lateral residual stresses in the multi-layer hard-faced plates, made of the hot work tool steel used for forging dies manufacturing, is presented in this paper. The objective of this research was to establish the influence of the multi-layer hard-facing on residual stresses in the thin and thick plates, which could later, in exploitation, cause the appearance of cracks and fracture. The influence of tempering on decreasing the residual stresses was monitored, as well. The plates were hard-faced in three layers, while the stresses were measured by the magnetic method. The obtained results have shown, among others, that the residual stresses are higher in the thick plates, as well as that the proper regime of the heat treatment can significantly reduce the level of residual stresses.

2. IZBOR MODELA (tankih i debelih ploča)

U cilju određivanja nivoa zaostalih napona korišćeni su uzorci u obliku tankih i debelih ploča. Kako bi se eksperimentalna ispitivanja što više približila radnim uslovima, odabrane ploče (dimenzija 394×192×7.4 mm - 4 kom i 394×192×29 mm - 3 kom) su termički poboljšane, a zatim poravnane brušenjem. Osnovni materijal je čelik Č5742 (DIN, EN: 56NiCrMoV7), do sada najčešće upotrebljavan za kovačke alate.

Ploče su navarivane ručnim elektrolučnim postupkom prema tehnologiji datoj u radovima [3, 4], polaganjem tri gusenice navara po sredini ploča u jednom, dva i tri sloja (sl. 1). U tablici 1 dati su parametri navarivanja, pri čemu je za svaki prolaz merena brzina navarivanja. Temperatura predgrevanja, kao i "interpass" temperatura su kontrolisane pomoću digitalnog mernog uređaja



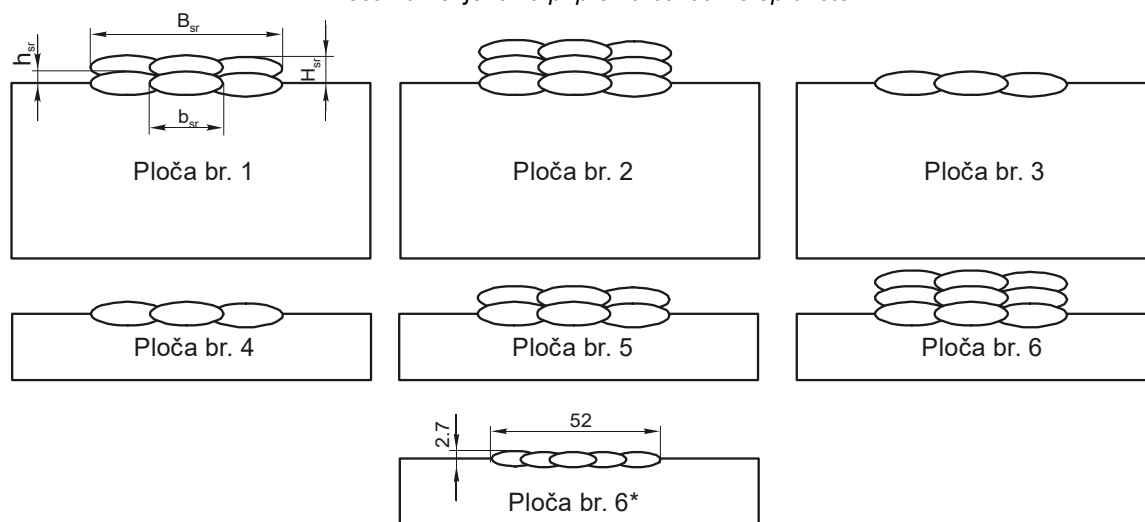
Tasthoterm, odnosno termo-kreda. Tanke ploče su navarivane elektrodom UTOP 38 prečnika $\varnothing 3.25$ mm i UTOP 38 $\varnothing 2.5$ mm (za izradu baždarne

epruvete), a debele elektrodom UTOP 55 prečnika $\varnothing 5.0$ mm.

Oznaka ploče	Debljina s , mm	Broj slojeva	Prečnik elektrode d_e , mm	Struja navarivanja a , I, A	Napon, U, V	Brzina navarivanja a , v_z , cm/s	Pogonska energija, q_l , J/cm
1	29	2	5.00	190	29	≈ 0.23	19165
2	29	3	5.00	190	29	≈ 0.23	19165
3	29	1	5.00	190	29	≈ 0.24	18367
4	7.4	1	3.25	115	26	≈ 0.26	9200
5	7.4	2	3.25	115	26	≈ 0.17	14070
6	7.4	3	3.25	115	26	≈ 0.25	9568
6 ¹ =6*	7.4	1	2.5	80	23	≈ 0.23	6400

Tablica 1. Parametri navarivanja

¹Ploča namenjena za pripremu baždarne epruvete



Slika 1. Shema navarivanja ploča

Posle navarivanja i pratećih merenja, ploče su otpuštane na 520 °C u trajanju od 2h prvenstveno u cilju smanjenja nivoa zaostalih napona i deformacija. Ovaj način termičke obrade je usvojen kako na osnovu preporuka proizvođača čelika [6], tako i na osnovu sopstvenih iskustava i istraživanja [7].

Geometrijske karakteristike gusenice (srednje vrednosti), (b_{sr} i h_{sr}) i ukupna visina (H_{sr}), odnosno širina (B_{sr}) date su u tablici 2. Pri polaganju gusenica izvedeno je njihovo delimično pretapanje ($\approx 1/3b_{sr}$).

Oznaka Ploče	Debljina s , mm	Broj slojeva	Dimenzije navara, mm			
			b_{sr}	h_{sr}	B_{sr}	H_{sr}
1	29	2	≈ 13	3.62	28-38.4	5.91
2	29	3	≈ 13	3.53	27.2-33.6	8.37
3	29	1	≈ 13	3.43	23.7-27.6	3.43
4	7.4	1	≈ 10	2.83	19.4-25.4	2.83
5	7.4	2	≈ 10	2.91	23.7-28.8	5.36
6	7.4	3	≈ 10	3.1	22.1-28.9	8.5
6 ¹ =6*	7.4	1	≈ 8.5	2.7	52	2.7

Tablica 2. Geometrijske karakteristike navarenih slojeva



ODREĐIVANJE NIVOVA ZAOSTALIH NAPONA POSLE NAVARIVANJA I OTPUŠTANJA

3.1 Magnetna metoda merenja zaostalih napona

Magnetna metoda spada u grupu tehnika za merenje zaostalih napona novijeg datuma. Princip rada ove metode zasniva se na zavisnosti magnetne permeabilnosti feromagnetnih materijala od stanja naprezanja, čime se registruje samo trenutno naponsko stanje. Prednosti ove metode se ogledaju u brzom i efikasnom radu, niskoj ceni, mogućnošću merenja na terenu i sl., a mana nešto manja tačnost u poređenju sa drugim eksperimentalnim metodama i mogućnost merenja zaostalih napona samo kod feromagnetnih materijala.

3.1.1 Opis i kalibracija uređaja za merenje zaostalih napona

Pri merenju zaostalih napona u ovom radu korišćen je uređaj SMMT-1, ruske proizvodnje (sl. 2). Uređaj je sa baterijskim izvorom i lako prenosiv u slučajevima terenskog merenja zbog svoje male mase. Princip rada uređaja se zasniva na magnetnoelastičnom efektu. Merni deo je smešten u kućište, a na njemu su:

- digitalni ekran na kome se očitavaju izmerene vrednosti magnetne permeabilnosti,
- odgovarajući prekidači za uključenje uređaja, svetiljke za skalu i izbor opsega merenja i
- priključak za sondu.

Sonda se sastoji od dva solenoida koji su pomereni jedan u odnosu na drugi za 90° . Solenoidi imaju jezgra od magnetnog materijala radi ostvarivanja veće magnetne pobude, odnosno bolje sprege sa materijalom čiji se magnetni permeabilitet meri. Magnetni permeabilitet je proporcionalan deformaciji, a ona je srazmerna naponu do $0.8 R_{eH}$, te se merenje napona izvodi u linearnoj oblasti. Uređaj meri magnetni permeabilitet u ravni duž izabranog pravca (jedno jezgro) zbog orijentacije od jednog ka drugom polu. Drugo jezgro meri odziv od 1 kHz poprečno na taj pravac. Jasno je, da se pomoću ovog uređaja mogu određivati glavni naponi u linearnoj oblasti, kao i njihov pravac. Sonda meri usrednjenu vrednost napona na dužini od $\approx 10 \text{ mm}$ i do dubine od $\approx 0.5 \text{ mm}$.

Pre početka merenja, neophodno je izvesti podešavanje "nule" na skali uređaja. To se može uraditi na dva načina: da se nula očita na osnovu kalibracije i tada je sonda dovoljno udaljena od materijala (u vazduhu) ili da se sonda prisloni na kalibracionu epruvetu. Položaj sonde i mesto prislanjanja moraju da odgovaraju kalibracionom položaju. Prema nekim istraživanjima [9, 10] mogućnost pojave greške je manja kod prvog načina. Ne zahteva se posebna priprema mernih površina, osim što je neophodno da su ravne. Položaj sonde pri kome je očitani maksimalni napon odgovara maksimalnom glavnom naponu σ_1 , a napon σ_2 se određuje okretanjem sonde za 90° , pri čemu je moguće približno određivanje ugla glavnih napona [10].

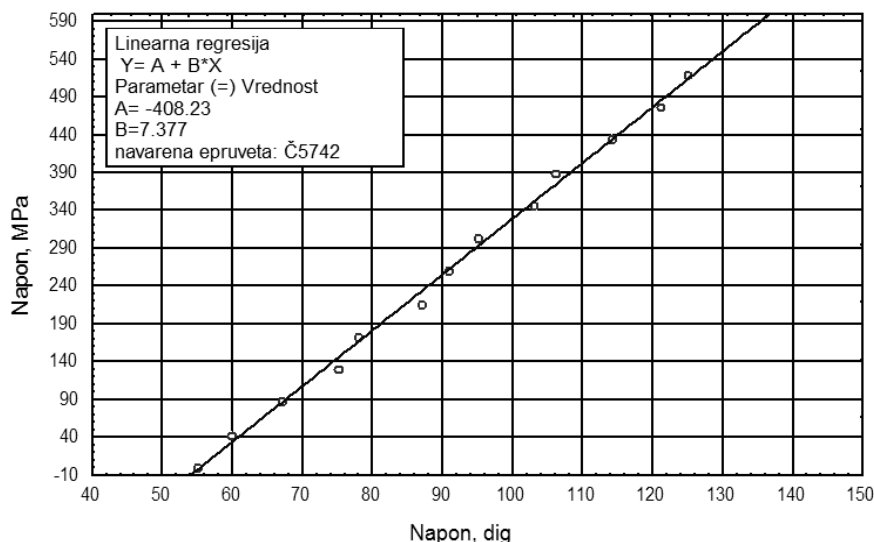


Slika 2. Uređaj za merenje zaostalih napona (SMMT-1)



Do korelacije magnetnih karakteristika i napona dolazi se preko kalibracione krive koju treba uraditi za svaku vrstu materijala. Za određivanje kalibracione krive potrebna je standardna epruveta za zatezanje koja se zateže na kidalici do sile od $0.8 R_{eH}$. Ispitivanje se izvodi stepenastim

uvođenjem opterećenja uz registrovanje odgovarajućih vrednosti opterećenja i magnetne karakteristike izražene u brojkama-digitima (*dig*). Na osnovu tako dobijenih vrednosti, opterećenje se preračunava u napon i formira dijagram kalibracije (sl. 3).

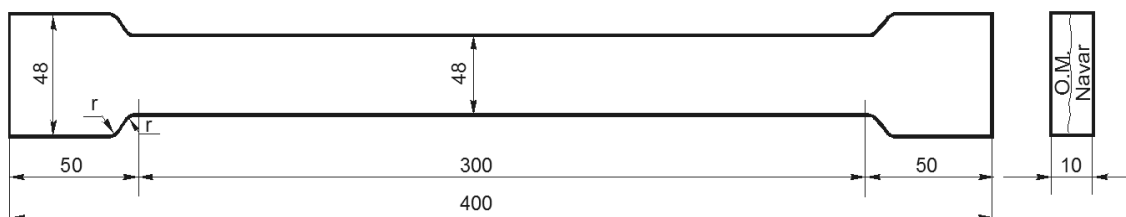


Slika 3. Kalibraciona kriva za čelik 55CrMo 8

Sa dijagrama 3 uočava se da kriva kalibracije ne prolazi kroz koordinatni početak zbog toga što je uređaj podešavan na nulu metodom "nula u vazduhu". Fitovanjem, po zakonu linearne regresije, dobija se kalibraciona jednačina, na osnovu koje se kasnije proračunavaju izmerene vrednosti magnetnih karakteristika.

3.1.4 Priprema baždarnе epruvete

Pre merenja zaostalih napona magnetnom metodom i pre kalibracije uređaja, jedna od tankih ploča ($6^1=6^2$) jednoslojno je navarena po navedenoj tehnologiji elektrodom UTOP 38 – $\varnothing 2.5 \text{ mm}$. Zatim je prema slici 4 iz nje isečena i obrušena epruveta, koja je poslužila za baždarenje.



Slika 4. Izgled baždarnе epruvete

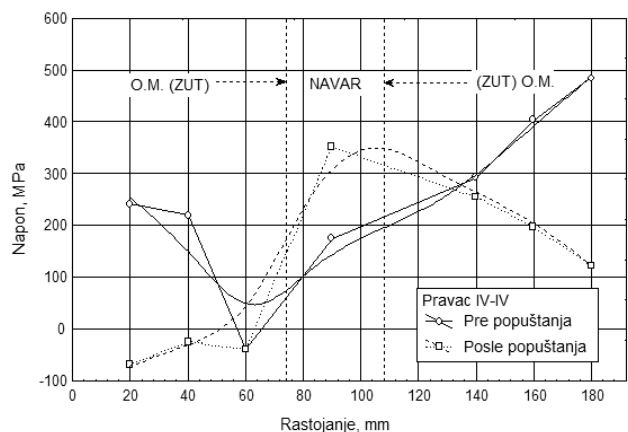
Baždarna epruveta namenjena je za utvrđivanje zavisnosti napona σ (*dig*) - σ (MPa) (sl. 3) na osnovu koje su preračunati naponi pri njihovom merenju magnetnom metodom.

Pre započinjanja merenja napona vrhovi neravnina navara (samo kod debelih ploča 1, 2 i 3) su poravnjani brušenjem, a sve ploče razmagnetisane na specijalnom uređaju. Zatim su mereni naponi u karakterističnim pravcima. Naime, kod navedenih ploča mereni su uzdužni naponi po pravcu III-III i poprečni naponi po pravcima IV-IV, V-V i VI-VI prema shemi datoj u [2, 16]. Kod ploča br. 1, 2 i 3 mereni su i naponi u navaru, dok kod tankih ploča

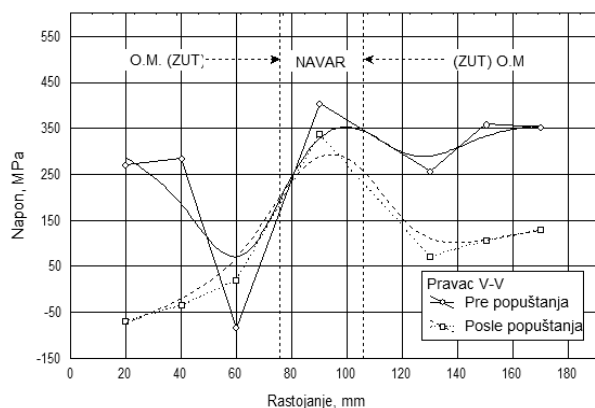
to nije urađeno, kako zbog izraženih deformacija (posebno ugaonih), tako i zbog nešto manje ukupne širine navara.

4. REZULTATI MERENJA ZAOSTALIH NAPONA

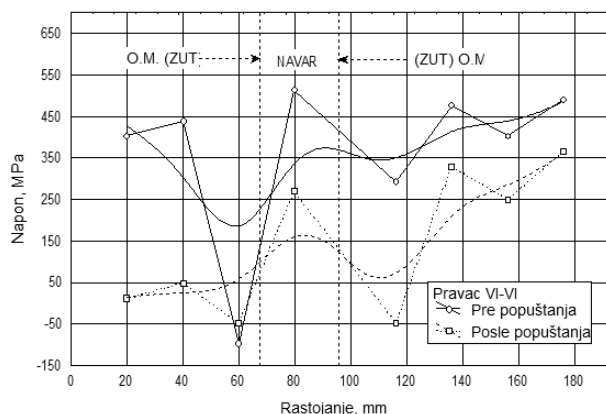
Na slikama 5 do 10 prikazani su rezultati merenja uzdužnih i poprečnih zaostalih napona u navedenim pravcima za svih 6 navarenih ploča pre i posle naknadne termičke obrade (otpuštanja). Uzdužni naponi za ploču broj 2 (sl. 6) nisu mereni zbog zakrivljenosti gusenice.



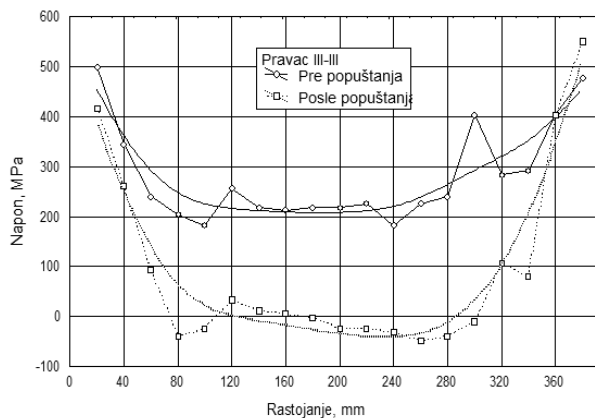
a)



b)

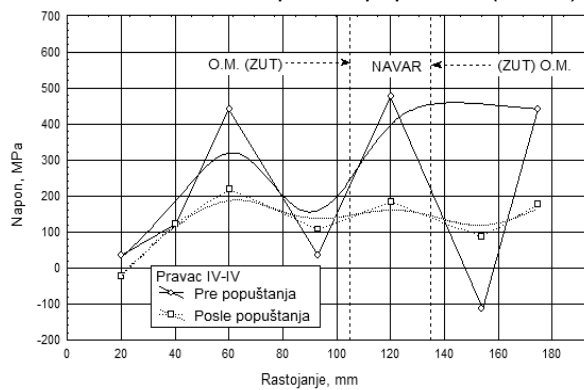


c)

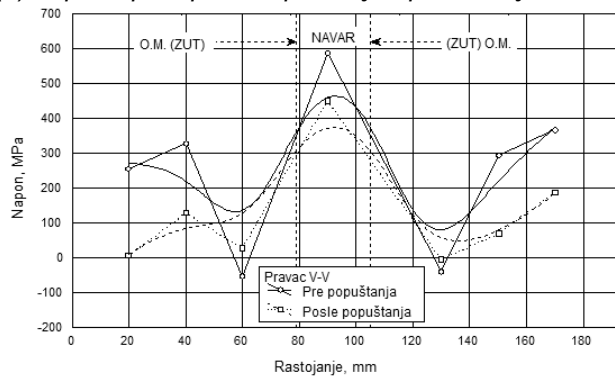


d)

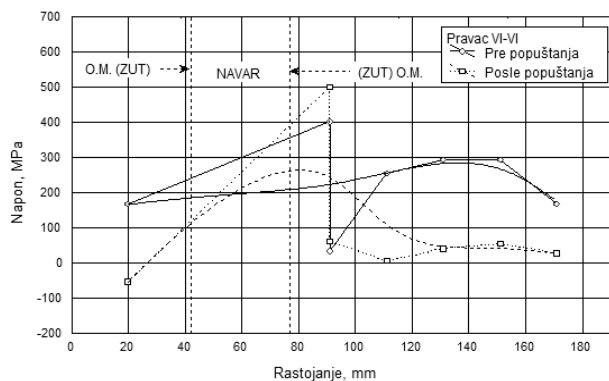
Slika 5. Raspodela poprečnih (a, b, c) i uzdužnih (d) napona pre i posle otpuštanja - ploča broj 1



a)

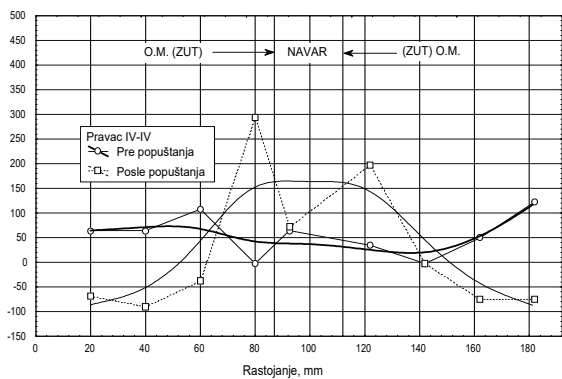


b)

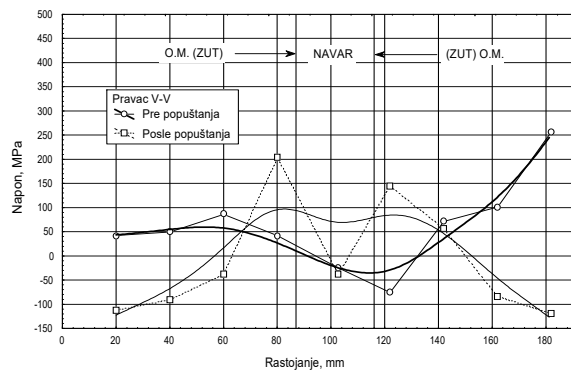


c)

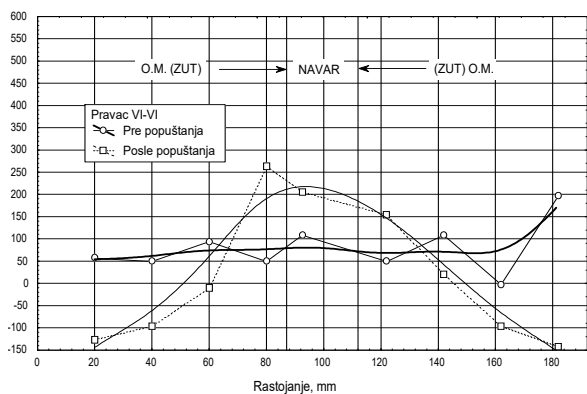
Slika 6. Raspodela poprečnih napona (a, b, c) pre i posle otpuštanja - ploča broj 2



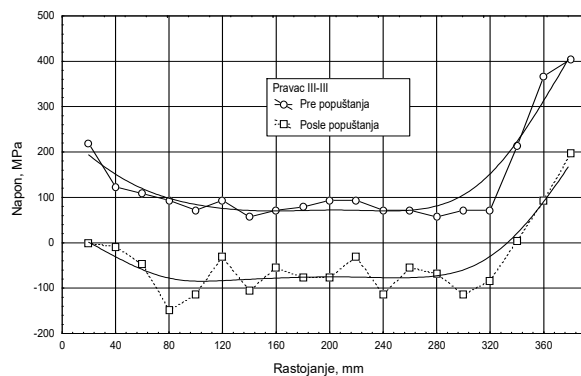
a)



b)

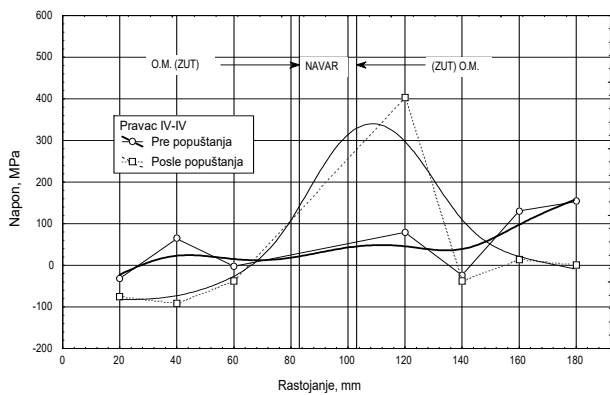


c)

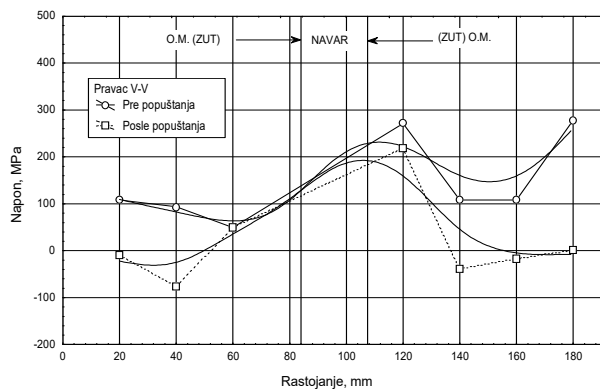


d)

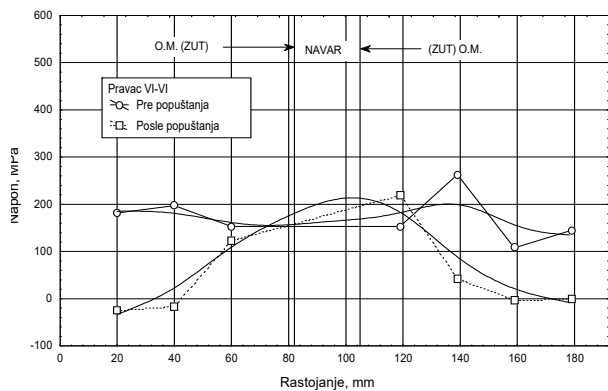
Slika 7. Raspodela poprečnih (a, b, c) i uzdužnih (d) napona pre i posle otpuštanja - ploča br. 3



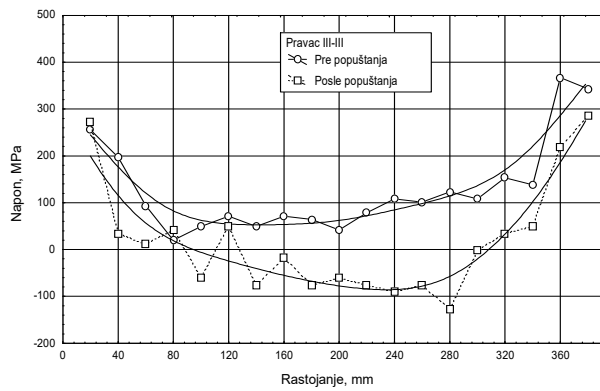
a)



b)

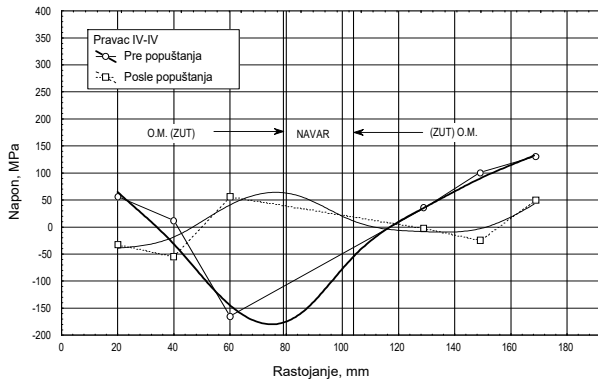


c)

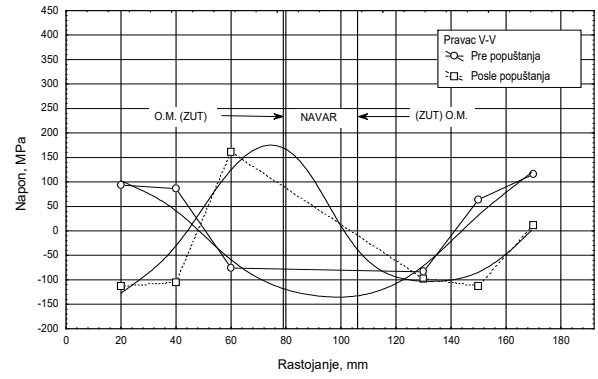


d)

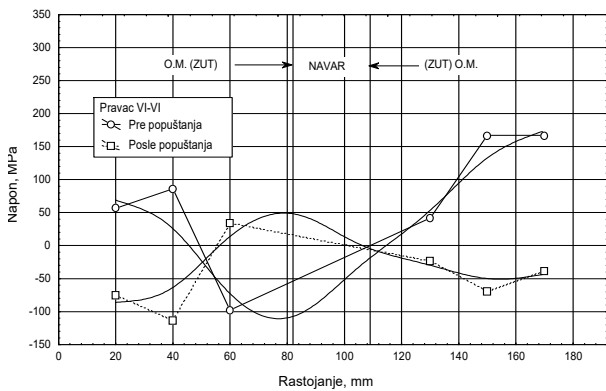
Slika 8. Raspodela poprečnih (a, b, c) i uzdužnih (d) napona pre i posle otpuštanja - ploča br. 4



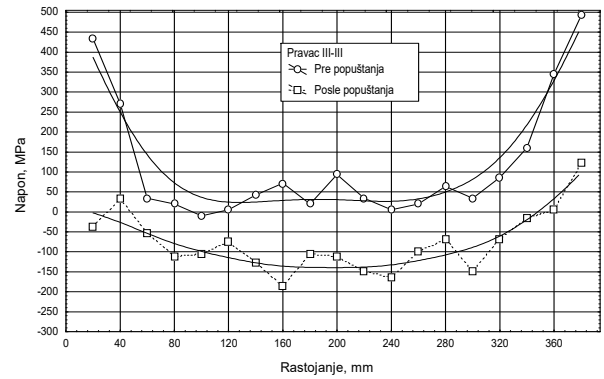
a)



b)

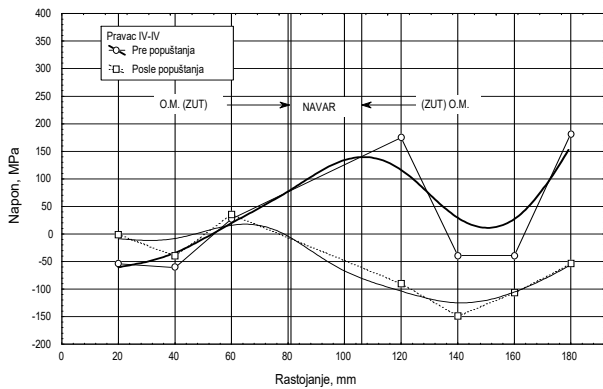


c)

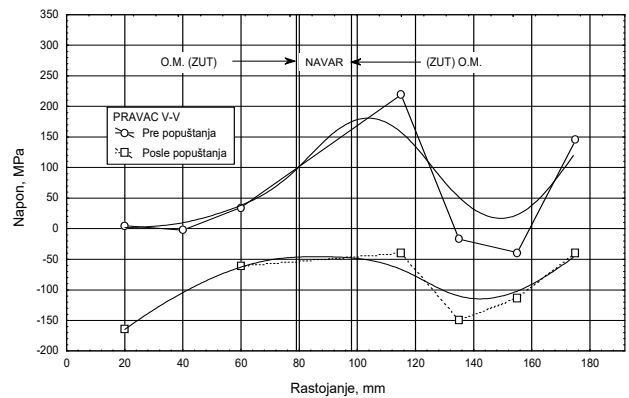


d)

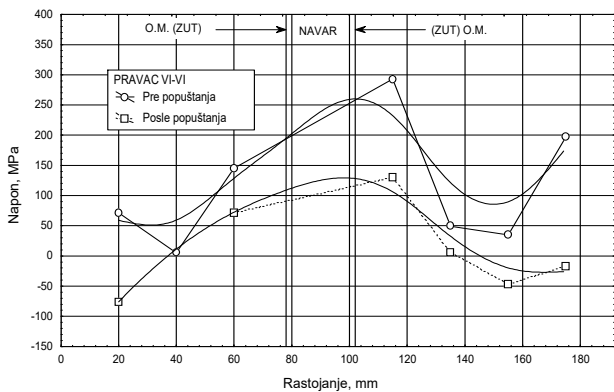
Slika 9. Raspodela poprečnih (a, b, c) i uzdužnih napona (d) pre i posle otpuštanja - ploča br. 5



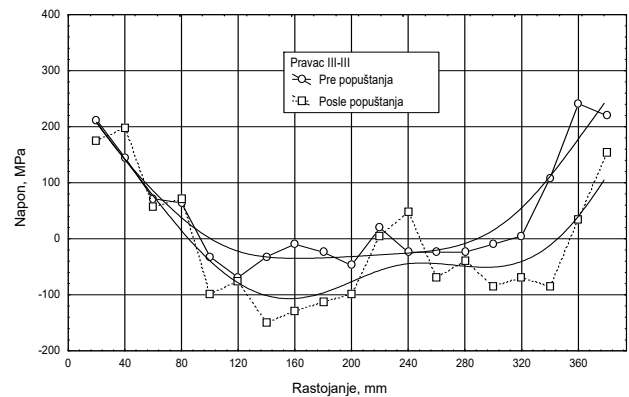
a)



b)



c)



d)

Slika 10. Raspodela poprečnih (a, b, c) i uzdužnih napona (d) pre i posle otpuštanja - ploča br. 6

Razmatranjem dobijenih rezultata (sl. 5 do 10) može se zaključiti da je, u principu, dobijena očekivana

raspodela napona saglasna istraživanjima drugih autora [9-15].



5. ZAKLJUČCI

Na osnovu detaljnije analize sopstvenih ispitivanja proistekle su veoma značajne činjenice koje mogu korisno poslužiti za definisanje tehnologije navarivanja i naknadne termičke obrade. Ta zapažanja mogu doprineti poboljšanju postupka regeneracije kovačkih alata, kako iz aspekta predloženog režima naknadne termičke obrade, tako i u pogledu izbora tehnologije i postupka navarivanja. Nekim od njih je:

- potvrđena raspodela poprečnih napona sa literaturnim (sl. 6b), dok raspodela uzdužnih napona ima nešto drukčiji oblik (sl. 10d);
- pokazano da izmerene vrednosti zaostalih napona pri navarivanju debelih ploča nadmašuju zaostale napone kod tankih ploča (sl. 6a i 10a);
- pokazano da izvođenjem otpuštanja dolazi do sniženja zaostalih napona u gotovo svim slučajevima (sl. 5c); time se dokazuje neophodnost primene ovog vida termičke

obrade, iako u nekim slučajevima napon menja znak (iz zone zatezanja prelazi u zonu pritiska (sl. 8d) i obrnuto);

- pokazano da se predloženim načinom otpuštanja postiže simetričnija raspodela napona u odnosu na navar (sl. 7b i 10c);
- pokazano da je kod debelih - masivnih ploča (delova) i višeslojnih navara, povoljnije visoko otpuštanje, dok se kod tanjih ploča (delova) i jednoslojnih (dvoslojnih) navara preporučuje srednje ili nisko otpuštanje. To znači da bi predloženi ("optimalni") režim otpuštanja trebalo modifikovati, kako u pogledu T_{max} , tako i u pogledu vremena zadržavanja (sl. 8d);
- pokazano da su izmereni zaostali naponi znatno niži od napona tečenja osnovnog materijala, a samim tim od napona tečenja navara, što pokazuje opravdanost primenjene tehnologije navarivanja i izabranog postupka.

LITERATURA

- [1] V. Lazić, D. Arsić, R. Nikolić, S. Aleksandrović, M. Djordjević, B. Hadzima, J. Bujnak, Experimental determination of deformations of the hard faced samples made of steel for operating at elevated temperatures, *Procedia Engineering*, 111(2015), pp. 495-501.
- [2] D. Arsić, V. Lazić, R. Nikolić, S. Aleksandrović, M. Djordjević, B. Hadzima, J. Vičan, Influence of tempering on the deformation level of the multi-layer hard faced samples, *Procedia Engineering*, 111 (2015), pp. 49-56.
- [3] V. Lazić, R. Nikolić, S. Aleksandrović, D. Milosavljević, R. Čukić, D. Arsić, M. Đorđević, Application of hard-facing in reparation of damaged forging dies - Chapter 12 in monograph: *Analysis of Technology in Various Industries*, Published by: Association of Managers of Quality and Production, Oficyna Wydawnicza (SMJiP), Editors: S. Borkowski, R. Ulewicz, 2014, Częstochowa, Poland, pp. 127-143.
- [4] D. Arsić, V. Lazić, A. Sedmak, R. Nikolić, S. Aleksandrović, M. Djordjević, R. Bakić, Selection of the optimal hard facing (HF) technology of damaged forging dies based on cooling time $t_{8/5}$, *Metalurgija - Metallurgy*, 55/1(2016), pp. 103-106.
- [5] V. Lazić, Optimizacija procesa navarivanja sa aspekta triboloških karakteristika navara i zaostalih napona, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2001.
- [6] Katalog firme Železarna Ravne: Alatni čelici za rad u vrućem stanju, Ravne na Koroškem, Slovenija.
- [7] M. Mutavdžić, V. Lazić, D. Milosavljević, S. Aleksandrović, R. R. Nikolić, R. Čukić, G. Bogdanović, Determination of the optimal tempering temperature in hard facing of the forging dies, 19/3 (2012), pp. 95-103.
- [8] M. Stefanović, R. Stanković, Značaj triboloških istraživanja u oblasti toplog kovanja, YUTRIB '95, Četvrta Jugoslovenska konferencija o tribologiji, Herceg Novi, 1995, str. 181-182.
- [9] G. Tatarkin, V. Ilić, N. Filipović, M. Zrilić, Otkrivanje i karakterizacija prslina na zavarenim spojevima u toku eksploatacije, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 46/1 (1997), str. 13-29.
- [10] M. Zrilić, M. Rakin, Lj. Milović-Matić, S. Putić, Određivanje zaostalih napona na rotacionoj peći za izradu klinkera, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 46/3, 1997., str. 219-223.
- [11] M. Jesensky, Measurment of residual stresses in welded joints, *Zvaračske spravy*, 39/4 (1989), pp. 85-92.
- [12] M. Kirić, A. Sedmak, T. Adžijev, Određivanje temperaturskih polja i zaostalih napona u procesu zavarivanja metodom konačnih elemenata, Zbornik radova – Međunarodno savetovanje Zavarivanje '94, Novi Sad, str. 230-236.
- [13] N. Komarica, Nestacionarno temperaturno polje i naponi u elasto-plastičnom području kod trenutnog delovanja izvora toplote, Zbornik radova – Međunarodno savetovanje Zavarivanje '94, Novi Sad, 1994, str. 211-214.
- [14] A. Sedmak, Numerička simulacija procesa zavarivanja – I deo: Temperaturna polja, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 41/1 (1996), str. 5-12.
- [15] A. Sedmak, Numerička simulacija procesa zavarivanja – II deo: Zaostali naponi, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 41/2 (1996), str. 131-138.
- [16] M. Burzić, R. Prokić-Cvetković, M. Manjgo, Lj. Milović, M. Arsić, O. Popović, Effect of vibration on variation of residual stresses and impact energy in butt welded joints, *Integritet i Vek Konstrukcija*, 12/3 (2012), str. 215-220.