

» Usporedba dviju metoda za mjerjenje zaostalih naprezanja u zavarima

Marijana Milković
Nenad Gubeljak
Tomaž Vuherer

U članku su opisane dvije različite metode za mjerjenje zaostalih naprezanja, koje se razlikuju u načelu mjerjenja. Prva metoda primjenjuje atomske ravnine, kao mjerne lističe i djeluje prema načelu odbijanja rendgenske svjetlosti. Ta metoda se naziva energetskom rendgenskom difrakcijom. Druga metoda mjeri zaostala naprezanja s otpornim mjernim listićima, koje zalijepimo na površinu mjernog objekta. Ta metoda se naziva metoda bušenja prvrta. Mjerena su bila obavljena na dva različita zavarena spoja, i to na čeliku Niomol 490 K i na aluminijskoj leguri 7049A. Zavareni spoj na čeliku je bio načinjen lučnim EPP postupkom zavarivanja, a zavar na aluminijskoj leguri postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje (FSW). Mjerena su unatoč različitim načelima mjerjenja pokazala donekle dobro poklapanje u područjima, gdje su naprezanja ujednačena po debljini.

Zaostala naprezanja su ona naprezanja, koja se nalaze u materijalu, kada na njega ne djeluje nikakvo vanjsko opterećenje [1-2]. Nastaju kao posljedica ograničene lokalne plastične deformacije u materijalu, koje mogu biti posljedica proizvodne metode ili samog procesa izrade. Najčešće su to postupci, kod kojih primjenjujemo toplinu kao izvor energije, kao što su zavarivanje, rezanje s pomoću topline, žarenje i razne druge vrste toplinskih obrada. Mogu biti i potpuno mehanički postupci izrade, kao što su primjerice: vučenje, prešanje, savijanje, mehaničko rezanje, brušenje, pjeskarenje itd. Često se dogodi, da je razina zaostalih naprezanja visoka i da se približava naprezanju tečenja. U slučaju, kada bi zaostala naprezanja prekoračila naprezanje tečenja materijala, događa se plastična deformacija, stoga se zaostala naprezanja relaksiraju za veličinu, s kojom su prekoračila naprezanje tečenja. Ona na zavarenim spojevima najčešće djeluju štetno ne samo na zavarenu konstrukciju i zavare, jer snižavaju nosivost zavarene konstrukcije, već utječu i na trajnu dinamičku čvrstoću zavara, zajedno s vodikom mogu uzrokovati vodikove hladne pukotine, stvaraju greške, koje se javljaju u zavarenim spojevima i ZUT (zona utjecaja topline), te uzrokuju elastičnu deformaciju zavarenog dijela i uzrokuju širenje napuklina iz grešaka u prethodno spomenutim područjima. Poznavanje veličine i razdiobe zaostalih naprezanja, koja se superponiraju s radnim naprezanjima, ključno je za određivanje i produljivanje vijeka trajanja zavarenih komponenta. Često se radi toga moramo odlučiti za smanjivanje zaostalih naprezanja, koje možemo relaksirati s pomoću žarenja za uklanjanje naprezanja ili nekim drugim postupkom, kao što je preopterećenje, tlačni pokus ili vibriranje tijekom zavarivanja i nakon njega.

Za mjerjenje zaostalih naprezanja primjenjuju se vrlo različite metode, koje mijere zaostala naprezanja na različitim načelima [1-5].

- Metode, koje primjenjuju mjerne lističe (metoda bušenja prvrta, metoda bušenja kružnog žlijeba, metoda uklanjanja malih površinskih slojeva i metoda rezanja).
- Odbojne – difrakcijske metode (metoda kutne rendgenske difrakcije, metoda energijske rendgenske difrakcije, metoda neutronske difrakcije).
- Magnetske metode (metoda magnetske akustične emisije, metoda inducirane magnetske anizotropije, metoda Barkhausove emisije, metoda inducirane promjene brzine).
- Akustično – ultrazvučne metode (metode, koje primjenjuju različite valove, i to uzdužne, poprečne i Rayleghove površinske valove).
- Optičke metode.

U članku ćemo se ograničiti na primjenu metode energijske rendgenske difrakcije i metode bušenja prvrta, koje ćemo primijeniti na dva različita zavarena spoja.

Metoda energijske rendgenske difrakcije

Nerazorno mjerjenje zaostalih naprezanja temelji se na osnovama interakcije valne fronte X-zraka i same kristalne rešetke, što je prikazano na slici 1a.

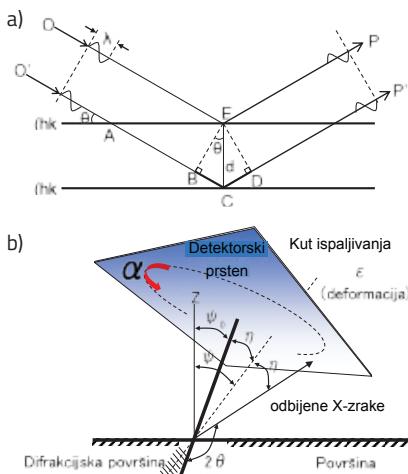
Osnove mjerjenja s energijskom rendgenskom difrakcijom (EXRD) temelje se na osnovi Braggovog zakona, koji se opisuje jednadžbom:

$$n\lambda = 2d \sin \Theta \quad (1)$$

gdje je n cijeli broj „red“ odbijanja, λ je valna duljina x-zraka, d je međuravninski prostor u kristalnoj rešetci i Θ je upadni kut, koji je

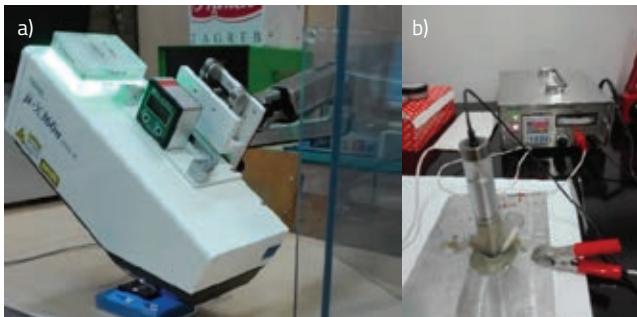


Marijana Milković, Nenad Gubeljak, Tomaž Vuherer •
 Fakultet za strojarstvo, Sveučilišta u Mariboru



» Slika 1: a) Interakcija valne fronte X-zraka i kristalne rešetke, b) ulazna X-zraka se radi polikristalnog materijala odbije u obliku stošca (360°), koji tvori kut s odbijenom X-zrakom

jednak kutu odbijanja (difrakcijskom kutu). Različite kristalne ravni različito snažno odbijaju X-zrake. Svaka kristalna rešetka ima svoj spektar vrhova odbijenih X-zraka obzirom na upadni kut (Slika 1b). Čelik pri sobnoj temperaturi obično ima prostorno centriranu kubičnu rešetku (α -Fe). Najsnažnije odbijanje X-zraka dobivamo za kristalnu ravninu (211) pri kutu od $156,37^\circ$. Kako bismo odredili jednu vrijednost zaostalog naprezanja, u istoj točki moramo dobiti dva dijagrama funkcije i odrediti maksimum odbijenih zraka od kuta 2θ , i to da dva različita simetralna kuta položaja mjernog objekta $\psi_1 = 0^\circ$ i $\psi_1 = 45^\circ$. Tako dobivamo funkciju za različitu udaljenost d između obitelji ravnina (211), iz kojeg određujemo težište (normale) površine obzirom na kut 2θ . Iz pomaka između tih težišnica (normala) obzirom na očekivani vrh od obitelji ravnina (211) za α -Fe dobivamo vrijednost zaostalih naprezanja. Pri mjerenu zaostalih naprezanja primjenom EXRD X-zraka deformacija se mjeri u kristalnim rešetkama. Dakle možemo izmjeriti deformaciju deformaciju kristalne rešetke tako, da je usporedimo veličinu međuravninske udaljenosti neodeformirane rešetke s veličinom deformirane kristalne rešetke radi zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja se određuje iz elastičnih konstanti uz pretpostavku linearno-elastičnog ponašanja određenih ravnina kristalnih rešetki. Radi zračenja određene površine ispitka, mjerenu doprinosi više odgovarajuće usmjerenih kristalnih zrna, čiji broj je ovisan o materijalu, na kojem se izvode mjerena. U ovom članku smo primijenili uređaj Pulstec μ -X360 (Slika 2a) i difrakcijsku metodu $\cos(\alpha)$ za vrijednost zaostalih naprezanja. Difrakcijska metoda je nerazorna metoda i može se primijeniti na polikristalnim materijalima, koji imaju relativno malo kristalno zrno. Najčešće je veličina kristalnih zrna metalnih materijala između $10 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$, što je povoljno za mjerenu zaostalih naprezanja EXRD metodom [6]. Temperatura tijekom mjerena mora biti konstantna.



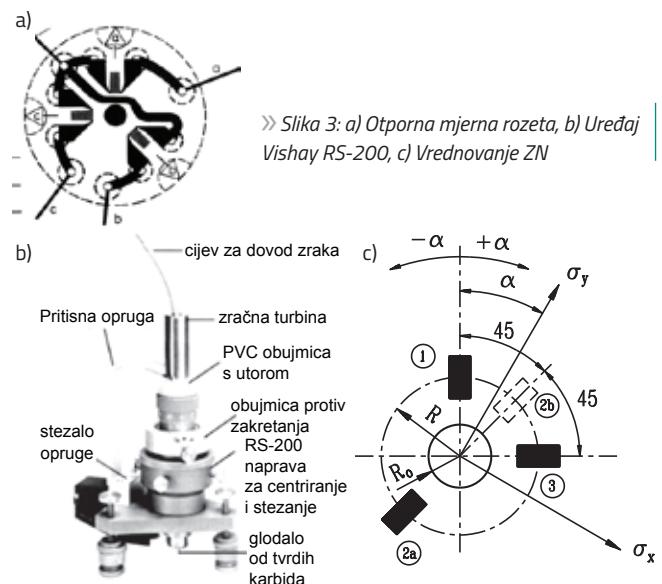
» Slika 2: a) Pulstec μ -X360, b) EP3 uređaj za elektropoliranje

Metoda EXRD zapravo primjenjuje fiksni kut ulaznih X-zraka. Uredaj za mjerenu zaostalih naprezanja Pulstec μ -X360 ima kružnu masku za X-zrake – kolimator, koji ograničava zračenu površi-

nu, na kojoj ćemo provoditi mjerenu. Uredaj ujedno ima i laserski pokazivač, koji na ispitku omogućuje odrediti mjernu površinu i udaljenost između uređaja i ispitka. Većina prijenosnih uređaja ima dva detektora. Sve odbijene X-zrake iz izvora X-zraka Pulstec μ -X360 uređaja, sakupljaju se u dvodimenzionalnom detektoru pri samo jednom zračenju, što omogućuje izradu slike čitavog Debye-Scherrerovog prstena (u 125 točaka), iz kojeg se automatski određuje konačna vrijednost zaostalog naprezanja u smjeru mjerena. Brojni metalni materijali snažno apsorbiraju X-zrake, stoga se intenzitet ulaznih X-zraka snažno smanjuje s dubinom, stoga je mjerenu ograničeno na vrlo malu debljinu na površini. Intenzitet upadnih X-zraka se dakle smanjuje eksponencijalno s dubinom materijala. Posljedično većina odbijenih X-zraka izvire iz tankog površinskog sloja, stoga mjerena zaostalih naprezanja odgovaraju samo tom sloju materijala. Prisutnost plave boje na obojenim metalima može uzrokovati smanjenje intenziteta odbijenih X-zraka, stoga je prvo potrebno boju ukloniti. Kako bi mogli izmjeriti zaostala naprezanja, nužno je ukloniti sloj materijala s pomoću elektropoliranja, koje može biti vrlo lokalizirano. Ključ za uspješno elektropoliranje je pravi izbor elektrolita i parametara elektropoliranja. Za elektropoliranje smo primijenili uređaj EP3 (Slika 2b). Anoda (+) za elektropoliranje je zapravo magnet i postavlja se na površinu mjernog objekta, kojeg želimo elektropolirati. Katodu (-) predstavlja elektroda uređaja EP3. S elektrolitom se među prije spomenutim elektrodama pri elektropoliranju zatvara strujni krug. Dubina elektropoliranja ovisi o stanju površine i materijalu te iznosi oko 50 – $200 \mu\text{m}$.

Metoda bušenja površina

Metoda bušenja provrta je standardizirana metoda za mjerenu zaostalih naprezanja, koja je standardizirana prema normi ASTM E837-13a. Metoda za mjerenu zaostalih naprezanja primjenjuje tri-elementarnu mjernu rozetu, koja sadrži tri otporna mjerna listića. Oni se postavljaju pod kutovima 0° , 45° , 90° ili 0° , 90° , 225° (Slika 3a). Mjerna rozeta se prije mjerena zlijepi na mjesto mjerena na površinu mjernog objekta. Prema načelu metoda je polurazorna, što znači, da moramo tijekom samog mjerena relaksirati zaostala naprezanja. To postižemo bušenjem provrta promjera $1,6 \text{ mm}$ u sredini mjerne rozete. Provrt može biti slijep (dubina do 2 mm), ili prolazni kroz materijal, što ovisi o debljini materijala.



Prije bušenja je nužno centrirati alat za bušenje – turbinesko svrdlo i sredinu mjerne rozete. Prije bušenja mjernu rozetu nuliramo i tijekom samog mjerena primjerimo promjene deformacije oko izbušenog

provrt. Izmjerene deformacije su posljedica relaksiranih zaostalih naprezanja radi bušenja provrta. Mjerenja se obično izvodi u koralima s postupnim bušenjem po 0,1 mm u dubinu. Čitavo vrijeme se mijere deformacije oko izbušenog provrta do konačne dubine bušenja. Tome slijedi i faza vrednovanja, koja se izvodi u skladu sa standardom ASTM E837-13a. Na temelju izmjerениh deformacija za pojedine mjerne listiće možemo izračunati veličinu i smjer glavnih naprezanja.

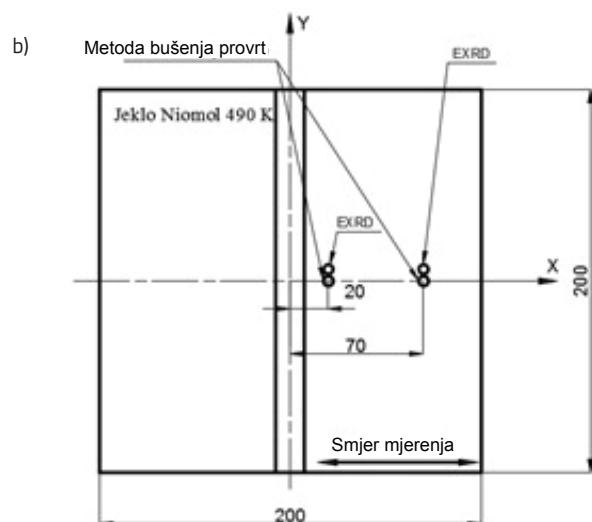
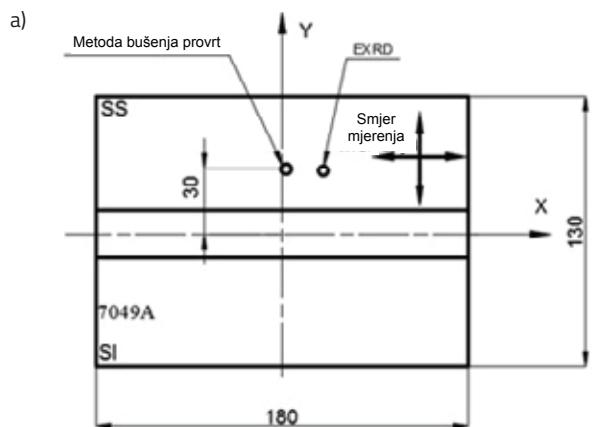
$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 \cdot A} \pm \frac{1}{4 \cdot B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (2)$$

$$\tan \alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (3)$$

Gdje su $\sigma_{x,y}$ glavna naprezanja, a kut glavnih naprezanja, ε_1 , ε_2 i ε_3 izmjerene deformacije u pojedinim mernim listićima, A, B konstante materijala (slike 3b i 3c).

Usporedba metoda za mjerenje zaostalih naprezanja

U tablici 1 je dana usporedba primjenjenih metoda za mjerenje zaostalih naprezanja. Obje metode su vrlo primjerene za mjerenje zaostalih naprezanja na zavarenim spojevima.



» Slika 4: Položaj i smjer mjerenja a) na pripremku od Niomol 490 K, b) na pripremku od Al legure 7049A

Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja

Mjerenja smo izvodili na dva različita zavarena spoja. Prvi zavareni spoj bio je zavaren na 12 mm debelom čeličnom limu od Niomola 490 K s pomoću lučnog EPP postupka zavarivanja s

punjrenom žicom. Za dodatni materijal se primjenjuje punjena žica FILTUB 128 promjera 4 mm i prašak za zavarivanje FB TT. Parametri zavarivanja su bili sljedeći: struja zavarivanja 530 A, napon zavarivanja 30 V i brzina zavarivanja 60 cm/min. Zavareni spoj je bio zavaren s tri zavara.

	Metoda energijske XRD	Metoda bušenja provrta
Vrsta naprezanja koje metoda mjeri	I. + II. red ZN	I. red ZN
Rezultat mjerena	Normalna i smična komponenta zaostalog naprezanja na površini u smjeru mjerena	Glavna naprezanja i smjer glavnih naprezanja na površini i do 1,6 mm u dubinu
Točnost metode	ovisi o materijalu na kojem mjerimo	+/- 10 %
Potrebni zahvati prije mjerena	Elektropoliranje	Lijepljenje mjerne otporne rozete
Vrijeme potrebno za mjerena	15 min	1 sat

» Tablica 1: Usporedba metoda za mjerenje zaostalih naprezanja (a)

	Metoda energijske XRD	Metoda bušenja provrta
Dubina mjerena	< 10 µm	2 mm
Površina prosječnih mjerena (merna površina)	Ø 2 mm	Ø 5,13 mm, tj. promjer rozete
Oštećenje na materijalu nakon mjerena	Nerazorna metoda (slijedi elektropoliranja do 200 µm)	Polurazorna metoda (provrt promjera 1,6 mm, dubina 2 mm)
Materijal, na kojima možemo izvoditi mjerena	Polikristalni metalni i keramički materijali	Svi metalni materijali
Izvor za napajanje	220 V za napajanje uređaja i računala	220 V za napajanje mjernog sustava + stlačeni zrak
Nedostaci mjerne metode	Utjecaj mikrostrukture, usmjerena mikrostruktura	Izvođenje mjerena, gdje su veliki gradjeni zaostalih naprezanja
Poteškoće pri mjerenu na zavarenim spojevima	Mikrostrukturne promjene u ZUT i zavaru, potrebne su kalibracije	Izvođenje mjerena, gdje su veliki gradjeni zaostalih naprezanja
Zaštitne mjere	Zaštita radi radioaktivnih X-zraka (do 3 m bez zaštite, do 1,5 m sa zaštitom)	(nema ograničenja)

» Tablica 1: Usporedba metoda za mjerenje zaostalih naprezanja (b)

Metoda	Niomol 490 K		7049A	
	20 mm - poprečno	70 mm - poprečno	30 mm - poprečno	30 mm - uzdužno
EXRD	+145 ± 55 MPa na dubini 200 µm	+125 ± 64 MPa na dubini 200 µm	-8 ± 13 MPa na dubini 110 µm	+19 ± 15 MPa na dubini 110 µm
Metoda bušenja provrta	+130 ± 13 MPa na dubini 1,6 mm	+5 ± 0,5 MPa na dubini 1,6 mm	-11 ± 1,0 MPa na dubini 1,6 mm	+54 ± 5,4 MPa na dubini 1,6 mm

» Tablica 2: Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja

Zaostala naprezanja su bila izmjerena u dvije točke u poprečnom smjeru, i to na udaljenostima 20 mm i 70 mm od sredine zavarivanja (Slika 4a). Prije mjerena s pomoću EXRD metode, točke mjerena su bile eletropolirane s 10 % otopinom NaCl u vodi sa strujom od 0,6 A u trajanju 2 minute i zatim dodatno još 3 minute s otopinom proizvođača Pustec na dubini 200 µm.

Drugi zavareni spoj je bio načinjen postupkom zavarivanja trenjem uz miješanje (FSW) na Al leguri 7049A debljine 6 mm. Pri zavarivanju su se primjenjivali sljedeći parametri: frekvencija vrtnje trna 800 min⁻¹, brzina zavarivanja 70 mm/min, kut trna 1° i kut konusa trna 5°. Položaj mjerena je bio 30 mm udaljen od sredine zavara. Zaostala naprezanja su bila izmjerena uzdužno i poprečno na smjer zavarivanja (Slika 4b). Prije mjerena s pomoću metode EXRD, točka mjerena je bila elektropolirana s 10 % otopinom NaCl u vodi sa strujom 0,6 A u trajanju 2 minute na dubini 110 µm. Rezultati mjerena s obje metode su prikazani u tablici 2.

Zaključak

Usporedili smo dvije različite metode za mjerjenje zaostalih naprezanja, i to energijsku metodu rendgenske difrakcije (EXRD) i metodu bušenja prvrta.

Mjerena zaostalih naprezanja su se izvodila na zavarenom spaju od Niomola 490 K zavarenog s pomoću lučnog postupka zavarivanja EPP i na zavarenom spaju od Al legure 7049A zavarenog s pomoću zavarivanja trenjem uz miješanje (FSW).

Mjerena zaostalih naprezanja smo izvodili samo u onim područjima na osnovnom materijalu, gdje se vrijednosti zaostalih naprezanja po dubini ne mijenjaju i moguće ih je izravno usporedivati. No sama mjerena ne možemo izravno usporedivati, jer su

izmjerena na različitim dubinama.

U području mikrostrukturnih promjena (zavar i ZUT) na mjerena zaostalih naprezanja s pomoću energijske rendgenske difrakcije utječe promjena mikrostrukture. Isto tako na mjerena utječu zaostala naprezanja II. reda, koja s pomoću metode bušenja ne možemo izmjeriti. Upravo zato izravna usporedna u tim područjima nije moguća odnosno nema smisla.

Usporedba obiju metoda, gdje se naprezanja ne mijenjaju po dubini pokazuje donekle dobro poklapanje.

Metode EXRD i bušenja prvrta treba kombinirati, jer EXRD daje rezultate na površini, čime se nadopunjuju rezultati mjerena s metodom bušenja prvrta.

Literatura

- [1] T. Vuherer, L. Milović, M. Zrilić, "V. Gliha, Nastanek zaostalih napetosti in metode za merjenje zaostalih napetosti – 1. del", 61, 1, Varilna tehnika, 2012, pp. 23–29.
- [2] T. Vuherer, L. Milović, M. Zrilić, V. Gliha, "Nastanek zaostalih napetosti in metode za merjenje zaostalih napetosti – 2. del", 61, 2, Varilna tehnika, 2012, pp. 25–33.
- [3] D. Damjanović, D. Kozak, S. Marsoner, N. Gubeljak, "Residual stress state in pipe cut ring specimens for fracture testing, Materials testing", 59, 6, Carl Hanser Verlag, 2017, pp. 59–530–535.
- [4] T. Vuherer, L. Milović, I. Samardžić, M. Zrilić, "Acceptability of residual stresses measurement methods of butt weldments and repairs", 51, 4, Strojarstvo, 2009, pp. 323–331.
- [5] P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress Part 1 – Measurement techniques", 17 ,Materials Science and Technology, 2001, pp. 355–365.
- [6] M. R. Fitzpatrick, A. T. Fray, at all, "Measurement good practice quide No52", Crown, Teddington 2005, pp. 1–68.



- točkasto zavarivanje
- višetočkasto zavarivanje
- bradavičasto zavarivanje
- kolutno zavarivanje
- sučeno zavarivanje
- automatizacija zavarivanja



Savjetovanje, rezervni dijelovi, potrošni materijal ...

