



Mersida Manjgo^{1,a}, Tomaž Vuhere², Mirza Manjgo², Meri Buzić³

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ZAOSTALIH NAPONA U KONSTRUKCIJI METODOM BUŠENJA RUPE

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURE BY HOLE DRILLING METHOD

Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 31. Savetovanja sa međunarodnim učešćem "Zavarivanje 2020" održanog u Kladovu, Srbija od 13. do 16. Oktobra 2021.

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2021.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Jun 2022

Ključne reči: deformacija, zaostali naponi, rozeta

Rezime

Vrlo bitan segment, a koji se javlja kao posljedica zavarivanja, je pojava zaostalih napona u zavarenim konstrukcijama. Efekti zaostalih napona mogu biti korisni ili štetni po konstrukciju, zavisno od njihove veličine, znaka, raspodjele napona u odnosu na napone koji su izazvani samim spoljnim opterećenjem. Samim tim, ispitivanje zaostalih napona je veoma važno jer oni bitno utiču na stvaranje i rast prslina, pojavu krto g loma, zamora materijala, itd. U radu je prikazana procedura ispitivanja mjerenje zaostalih napona metodom "zabušivanja rupe" i mogućnost praktične primjene saznanja o zaostalim naponima u cilju poboljšanja kvaliteta mašinskih dijelova i same konstrukcije.

1. Uvod

U zavarenim spojevima uvijek su prisutni zaostali naponi, kao posljedica neravnotežnog hlađenja metala šava i osnovnog metala. U slučaju kada zaostali naponi premašuje napon tečenja materijala, dolazi do plastične deformacije, pa se zaostali naponi opuštaju za premašeno naprezanje naprezanja materijala [1]. U zavarenim spojevima ta naprezanja najčešće negativno utječu na samu zavarenu konstrukciju i zavarene spojeve. Budući da smanjuju nosivost zavarene konstrukcije, utiču na čvrstoću zamora kod zamora, uzrokuju elastičnu deformaciju zavara kao i rast prslina.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerzitet "Džemal Bijedić" u Mostaru Mašinski fakultet, BiH

² Univerza u Mariboru, Fakultet za strojništvo, Slovenija

³ Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Srbija

E mail: ^amersida.manjgo@unmo.ba

Keywords: deformation, residual stresses, rosette

Abstract

A very important segment, which occurs as a result of welding, is the occurrence of residual stresses in welded structures. The effects of residual stresses can be beneficial or harmful to the structure, depending on their size, sign, and stress distribution in relation to the stresses caused by the external load itself. Therefore, the examination of residual stresses is very important because they significantly affect the formation and growth of cracks, the appearance of brittle fractures, material fatigue, etc. The paper presents the test procedure for measuring residual stresses by the method of "hole drilling" and the possibility of practical application of knowledge about residual stresses in order to improve the quality of machine parts and the structure itself.

Mjerenje zaostalih napona nije moguće sprovesti uobičajenim postupcima za eksperimentalnu analizu naponskog stanja, pošto je senzor deformacije (mjerna traka, fotoelastični premaz, krti lakovi, itd.) potpuno neosjetljiv na napone prisutne u materijalu i mjeri samo promjenu deformacije nakon instalisanja senzora. Da bi se zaostali naponi izmjerili ovim standardnim senzorima, moraju se na neki način "osloboditi" iz materijala, tako da senzor može registrovati promjene deformacije izazvane oslobađanjem napona [2].



Danas, najpouzdanija savremena tehnika za mjerenje zaostalih napona je metoda "zabušivanja rupe". Eksperimentalno je dokazana tačnost i pouzdanost ove metode (tačnost ove metode je $\pm 5\%$), ona je kao takva i standardizovana, Standard ASTM E837 [3] iz 2015 godine i danas predstavlja jedinu verifikovanu metodu za mjerenje zaostalih napona u konstrukcijama.

2. Eksperimentalno određivanje zaostalih napona

Ispitivanja zaostalih napona u eksploatacionim uslovima su rađena sa ciljem da se odredi stvarno naponsko i deformacijsko stanje u eksploataciji, definišu eventualne promjene, a koje treba da budu podloga za procjenu integriteta i preostalog vijeka posude. Za eksperimentalna ispitivanja korišten je mikrolegirani čelik SA 387 Gr. 91 koji spada u grupu Cr-Mo čelika, ima napon tečenja min 450MPa i garantovanu energiju udara na sobnoj temperaturi minimum 41J. Hemijski sastav ispitivanog čelika je dat u tabeli 1 [4].

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanog čelika SA 387 Gr. 91

Table 1. Chemical composition of the tested steel SA 387 Gr. 91

Šarža	Hemijski sastav, mas. %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Cu
	0.129	0.277	0.443	0.001	0.001	8.25	0.874	0.01	0.198	0.056	0.068

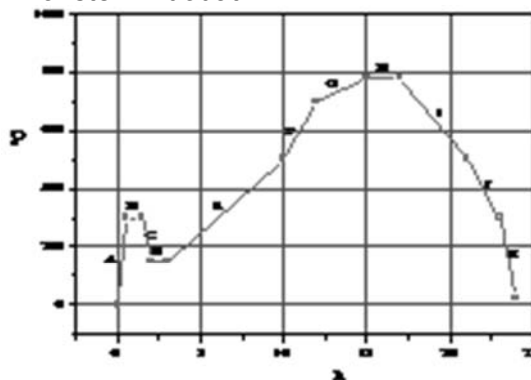
Zavarivanje čeličnih limova je urađeno sa dva postupka zavarivanja i dva dodatna materijala:

1. Korjenski zavar - TIG zavarivanje (postupak 141 prema EN ISO 6947), 4 (četiri) prolaza. Korišteni dodatni materijal za TIG je žica oznake BOEHLER C 9 MV-IG, prečnika 2,4mm.

2. Ispuna - REL zavarivanje (postupak 111 prema EN ISO), ostali prolazi. Korišteni dodatni

materijal za REL je elektroda oznake BOEHLER FOX C9 MV, prečnika 3,50 i 4,00mm

Termička obrada je urađena radi preraspodjele zaostalih napona neposredno nakon završenog zavarivanja. Propisani režim termičke obrade za zavareni spoj je dat na Slici 1.



Slika 1. Dijagram termičke obrade zavarenog spoja [4]

Figure 1. Heat treatment diagram of a welded joint [4]

Temperatura predgrijavanja se kontrolisala pomoću termoparova. Za limove debljine veće od 50 mm obavezno se zahtjeva elektrootporno ili elektroindukcijsko zagrijavanje.

Načelno, termička obrada se obavlja na 720 - 780°C, sa brzinom zagrijavanja do 220°C/h i brzinom hlađenja do 150°C/h. Vrijeme zadržavanja

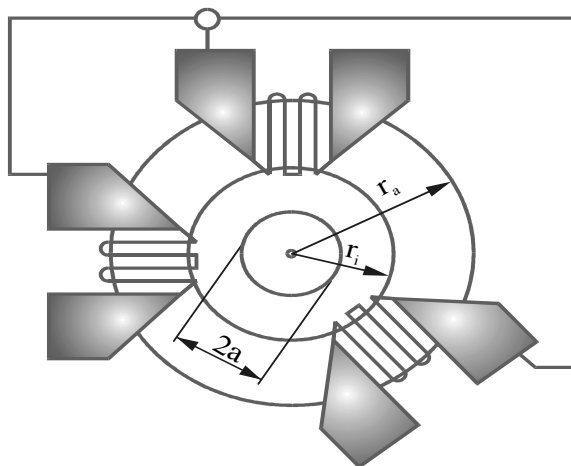
na temperaturi termičke obrade je 5min/1mm debljine zida, a najmanje 2 časa. Širina zone termičke obrade je najmanje jednaka trostrukoj debljini lima, ali nikako ispod 100 mm. Hlađenje se izvodi propisanom brzinom do temperature 300°C, a zatim se zavareni spoj hladi na mirnom vazduhu



Merenje zaostalih napona metodom "zabušivanja rupe"

Najšire korištena i najpouzdanija savremena tehnika za mjerenje zaostalih napona je metoda "zabušivanja rupe". Kod ove metode, poslije instaliranja senzora deformacije (rozeta sa rupom),

Slika 2, na površini ispitivanog dijela, izbuši se mala plitka rupa u površini. Poslije bušenja, mjeri se promjena deformacije u neposrednoj okolini rupe i iz ovako izmjerenih deformacija izračunava oslobođeni zaostali naponi.



Slika 2. Shematski prikaz rozete sa rupom

Figure 2. Schematic representation of a rosette with a hole

Metod zabušivanja rupe spada u kategoriju polu razarajućih metoda, pošto mala rupa ne može u većini slučajeva primjetno oslabiti integritet konstrukcije. Rupa je obično prečnika 1.5 - 3.0 mm i iste je dubine. Izbušena rupa može biti začepljena, nakon mjerenja zaostalih napona. Bušenje rupe u materijal koji ima zaostale napone, oslobađa napon u zoni mjerenja, na osnovu činjenice da napon normalan na neku slobodnu površinu (u ovom slučaju površina rupe) mora biti nula [5]. Eliminisanje normalnog napona na granici rupe, redukuje napon u neposrednoj okružujućoj oblasti, uzrokujući da se deformacija lokalne površine promjeni. Mjerenje deformacija proizvedenih oslobađanjem napona daje potrebne podatke za izračunavanje stanja prvobitnih zaostalih napona u zoni mjerenja.

Nakon zabušivanja rupe očitavaju se pojedinačne mjerne vrijednosti za sve tri mjerne trake u rozeti. Izmjerene vrijednosti koriste se za kasniju matematičku obradu, određivanja glavnog normalnog napona.

$$\sigma_{1,2} = -A^*(\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c) \pm B^* \sqrt{(\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b)^2 + (\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a)^2} \quad (1)$$

Pored izmjerenih vrijednosti, neophodno je da se odrede konstante A i B. Konstante A i B uzimaju u obzir geometriju traka i prečnik izbušene rupe, a određuju se po formulama:

$$A^* = \frac{a^2 \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot r_a \cdot r_i} \quad (2)$$

$$B^* = \frac{2 \cdot a^2}{r_a \cdot r_i} \left[1 - \frac{a^2 (1 + \nu) \cdot (r_a^2 + r_a \cdot r_i + r_i^2)}{4 \cdot r_a^2 \cdot r_i^2} \right] \quad (3)$$

gdje je:

- ν - Poasonov koeficijent
- r_a - spoljni radijus mrežice mjerne trake
- r_i - unutrašnji radijus mrežice mjerne trake
- a - poluprečnik izbušene rupe

Orijentacioni ugao θ se izračunava po obrascu:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b}{\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b}{\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a} \quad (5)$$

U cilju određivanja zaostalog (sopstvenog) deformacijskog, a samim tim i naponskog stanja korišteni su tenzometri – rozete sa rupom 1,5/120 RY 61. Kompenzacija temperaturnih promjena je izvršena sa mjernom trakom 6/120 LY 11. Mjerna mjesta su tako izabrana da daju uvid u raspodjelu zaostalih napona u zoni posude gdje su rađene sanacije.

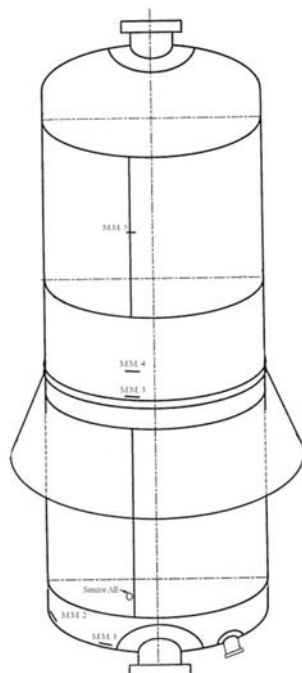
Mjerno mjesto 1 - Zona uticaja toplote, ZUT, saniranog mjesta na dancu posude,

Mjerno mjesto 2 - Zona uticaja toplote, ZUT, zavarenog spoja veze danca,

Mjerno mjesto 3 - Zona neoštećenog dijela osnovnog materijala.



Mjerne trake (rozete sa rupom) su zaljepljene prema shemi kako je to prikazano na slici 3.



Slika 3. Pozicija mjernih mjesta: 1, 2 i 3

Figure 3. Position of measuring points: 1, 2 and 3

Nakon lepljenja rozeta sa rupom i povezivanja sa elektronskim uređajem SPIDER-8 izvršeno je bušenje rupa u cilju registrovanja zaostalih (sopstvenih) deformacija. Prvo je postavljen alat kojim se vrši centriranje specijalne burgije, a nakon toga se vrši zabušivanje rupe. Nakon zabušivanja rupe, izvršeno je registrovanje deformacijskog stanja elektronskim uređajem UPM 40 i dobijene su

vrijednosti deformacija na svakoj rozeti: $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$, $\Delta\epsilon_c$. Iz ovih vrijednosti je omogućeno da se izračunaju glavni normalni naponi σ_1 i σ_2 i orijentacioni ugao θ .

Rezultati mjerenja su dati u tabeli 2. gde je sa θ obilježen ugao maksimalnog glavnog zaostalog napona.

Tabela 2. Rezultati mjerenja zaostalih (sopstvenih) napona na posudi

Table 2. Results of measurement of residual (own) voltages on the vessel

Mjerno mjesto	Mjerna traka 1	Mjerna traka 2	Mjerna traka 3	Napon σ_1	Napon σ_2	Ugao θ_1
1	-44	-32	-22	63,1	49,5	-2,6
2	-65	-48	-15	84,5	52,0	8,9
3	-38	-42	-24	60,9	44,8	28,8

Izmjerene mikrodeformacije na mjernim trakama i izračunati stvarni glavni naponi ukazuju na to da ni na jednom mjernom mjestu nije prekoračen napon tečenja, odnosno naponi su u linearno elastičnom području.

3. Zaključak

Mjerenje parametara trenutnog stanja napona u postojećim konstrukcijama i elementima ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona.

Najveći izmjereni glavni napon je na dijelu ZUT, zavarenog spoja veze dance - plašt posude mjerno mjesto 2, odnosno zoni uticaja toplote (ZUT).

3. Conclusion

Measurement of parameters of the current state of stress in existing structures and elements cannot be carried out by conventional procedures of experimental stress analysis.



U radu je predstavljena metoda koja omogućava da se takvo ispitivanje sprovede. Metoda je zasnovana je na činjenici da se neposredno na mjestu gdje se u konstrukciji formira otvor, dolazi do relaksacije napona koja je po svojoj veličina uporediva sa stanjem napona prije početka eksperimenta.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja i izračunatih vrijednosti dobijene su relativno niske vrijednosti zaostalih (sopstvenih) napona u mjernoj zoni, te ne predstavljaju potencijalnu opasnost za eventualne neželjene posljedice.

Literatura / References

[1] T. Vuherer, D. Rojko, V. Gliha, „Uticaj reparature na nivo i raspodjelu zaostalih napona u sučeono zavarenom spoju mikrolegiranog čelika“ Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2/2004, str. 61-65

[2] Mirza Manjgo, Tomaž Vuherer, Darko Bajić, Mjerenje zaostalih napona, 12th International Scientific Conference on Production Engineering Development and Modernization of Production, RIM 2019, Sarajevo, BiH, 2019

The paper presents a method that enables such an examination to be carried out. The method is based on the fact that directly at the place where an opening is formed in the structure, there is a stress relaxation, which is comparable in magnitude to the state of stress before the start of the experiment.

On the basis of experimental tests and calculated values, relatively low values of residual (own) voltages in the measuring zone were obtained, and they do not represent a potential danger for possible unwanted consequences.

[3] ASTM E 837 – 01, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, Annual Book of ASTM Standards

[4] Mersida Manjgo, Meri Burzić, Elaborat po projektu EUREKA, Mostar, Beograd, 2018

[5] M. Manjgo, M. Burzic, LJ. Milović; "Merenje zaostalih napona u zavarenim konstrukcijama", 8th International Scientific Conference on Production Engineering, RIM 2011, str. 39-43, 2011

