

VPLIV REPARATURNIH ZVAROV NA LASTNOSTI ZVARNEGA SPOJA

INFLUENCE OF REPAIR WELDS ON THE WELD-JOINT PROPERTIES

Tomaž Vuherer, Danilo Rojko, Vladimir Gliha

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
tomaz.vuherer@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-24

V predstavljenem delu smo preučevali vpliv reparaturnega varjenja na mehanske lastnosti in zaostale napetosti. Poseben problem so začetki in konci reparaturnih zvarov. Reparturni zvari so po večini kratki, varimo pa jih na že obstoječi var. Lokalno se spremenijo lastnosti materiala vara, ki v kombinaciji s škodljivimi nateznimi zaostalimi napetostmi lahko pomenijo nevarnost za pojav krhkega loma. V tej raziskavi so bile zaostale napetosti izmerjene pred reparaturnim varjenjem in po njem ter nato primerjane med seboj. Po reparaturnem varjenju dobimo bolj neugodno porazdelitev zaostalih napetosti, ki ji je treba posvetiti posebno pozornost.

Ključne besede: zvarni spoj, reparturni zvar, zaostale napetosti, trdote

The influences of repair welding on the mechanical properties and residual stresses have been studied. Special problems are associated with the start and the end of repair welds. Repair welds are usually short and they are deposited on an existing weld. The mechanical properties can be changed. The interaction between the weak material and the harmful tensile residual stresses increases the risk of brittle fracture. Residual stresses were measured before and after repair welding and they were then compared to each other. The distribution of residual stresses after repair welding is more inconvenient than before the repair welding. This is the reason why special attention has to be devoted to this distribution.

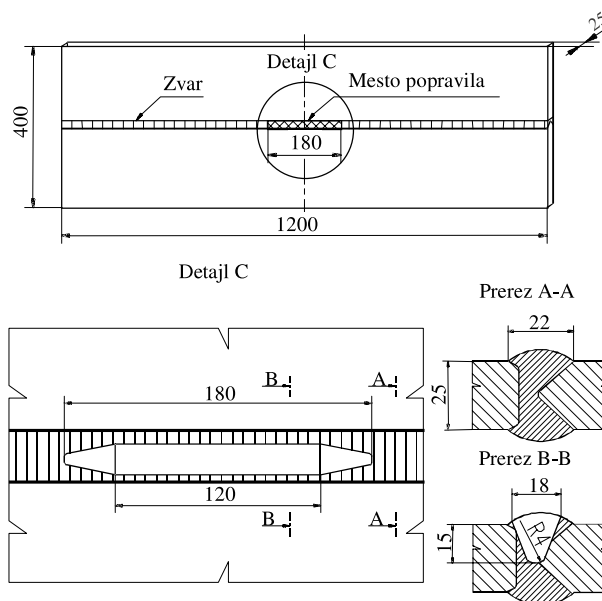
Key words: weld joint, repair weld, residual stresses, hardness

1 UVOD

Varjenje s taljenjem ima za posledico nastanek zaostalih napetosti, ki so po velikosti lahko blizu napetosti tečenja materiala, ki ga varimo¹. Zvarne spoje je treba zaradi napak, ki se pojavijo pri varjenju, pogosto popravljati. Reparturni zvari so večinoma kratki in so zato narejeni na togi komponenti ali celo na vpetem delu varjene konstrukcije, kjer je termično raztezanje omejeno. To ima za posledico dodatno povečanje zaostalih napetosti². Poleg že tako velikih nateznih vzdolžnih komponent zaostalih napetosti postanejo nevarne tudi natezne prečne komponente v varu in na toplotno vplivanem področju (TVP). Velikih konstrukcij z reparaturnimi zvari ponavadi ne moremo žariti, da bi odpravili zaostale napetosti. Uporabimo lahko druge metode za zmanjševanje zaostalih napetosti, ki pa so bolj ali manj uspešne³, vendar se moramo v večini primerov zadovoljiti s stanjem zaostalih napetosti, kakršno nastane po reparaturnem varjenju. Velik problem so začetki in konci reparaturnih zvarov^{3,4}, kjer je povečan odvod toplote. Zaradi tega se na teh dveh mestih spremenijo nekatere mehanske lastnosti, ki se najbolj očitno kažejo pri trdoti.

Na odločitve o popravilih premalo kakovostnih zvarnih spojev, vpliva vrsta dejavnikov. Zelo pomembno je, kakšne vrste napak se lahko pojavijo v zvaru, kakšna je velikost, usmerjenost napak itd. Pri tem ni odveč poznati spremenjene mehanske lastnosti in porazdelitev

zaostalih napetosti po reparaturnem varjenju. Popravitelom je treba nameniti posebno pozornost, saj se zlahka pripeti, da postane reparaturno varjenje neuspešno in imamo lahko po njem še slabše stanje kot prej.



Slika 1: Položaj in priprava mesta popravila

Figure 1: Location and preparation of test panel for repair welding

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Najpej smo z varilnim postopkom T.I.M.E. izdelali vzorec zvarnega spoja. Za osnovni material smo uporabili mikrolegirano visoko trdnostno jeklo Niomol 490 K debeline 25 mm. Kemična sestava jekla je prikazana v **tabeli 1**. Dodajni material, ki smo ga uporabili za varjenje, je bila varilna žica NiMo1-IG ϕ 1,2 mm. Naredili smo kemično analizo vara, ki je prikazana v **tabeli 2**. Mesto popravila smo pripravili tako, da smo žlebili z brušenjem v globino 15 mm na dolžini 180 mm. Položaj in priprava mesta popravila sta prikazana na **sliki 1**. Popravilo je bilo narejeno z varilnim postopkom REO.

Tabela 1: Kemična sestava osnovnega materiala (mas.%)

Table 1: Chemical composition of base material (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Mo
0,07	0,54	0,56	0,008	0,002	0,35
Cr	V	Nb	N	Al	
0,67	0,01	0,062	0,007	0,025	

Tabela 2: Kemična sestava materiala vara (mas.%)

Table 2: Chemical composition of weld material (wt.%)

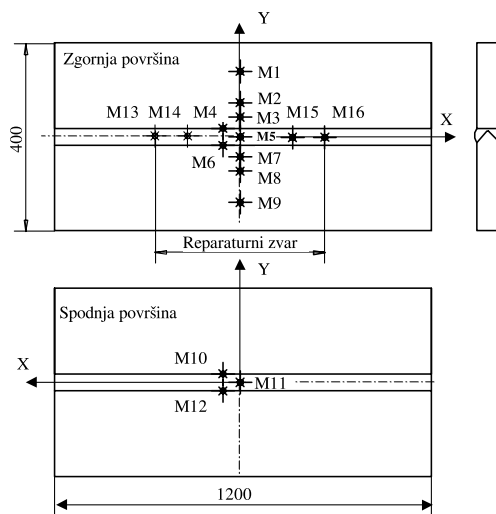
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
0,08	0,37	0,94	0,02	0,01	0,79	0,29
Cr	Cu	V	Ti	Nb	N	Al
0,10	0,10	0,02	0,02	0,01	0,007	0,004

Za dodatni material smo uporabili elektrode EVB NiMo ϕ 3,25 mm. Kemična sestava tega dodatnega materiala je prikazana v **tabeli 3**.

Tabela 3: Kemična sestava dodatnega materiala za popravilo (mas.%)

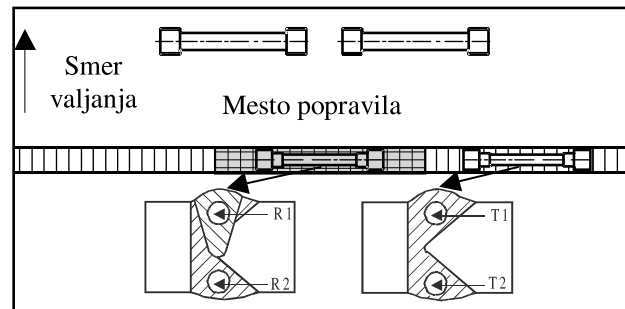
Table 3: Chemical composition of filler material for reparation (wt.%)

C	Si	Mn	Ni	Mo
0,06	0,40	0,90	1,10	0,35



Slika 2: Mesta meritev zaostalnih napetosti

Figure 2: Location of residual stress measurements



Slika 3: Položaj nateznih preizkušancev

Figure 3: Position of tensile test specimens

Po reparaturnem varjenju smo izmerili površinske zaostale napetosti po metodi vrtnja po ASTM E 837⁵. Mesta, kjer smo opravili meritve zaostalnih napetosti, so prikazana na **sliki 2**. Okrogli natezni preizkušanci za določitev mehanskih lastnosti so bili izdelani: iz osnovnega materiala, materiala vara vzorca zvarnega spoja in iz materiala reparaturnega vara. Natezni preizkušanci iz vara so bili ϕ 5 mm, iz osnovnega materiala pa ϕ 6 mm. Položaj preizkušancev prikazuje **slika 3**. Trdote smo izmerili vzdolž in prečno glede na popravilo. Položaj in oznake makroobrusov za merjenje trdot prikazuje **slika 4a**.

3 REZULTATI

Rezultati nateznih preizkusov v vzdolžni smeri glede na os zvara so v **tabeli 4**. Trdote materiala vara vzdolž osi zvara prikazuje **slika 4**.

Tabela 4: Rezultati nateznih preizkusov

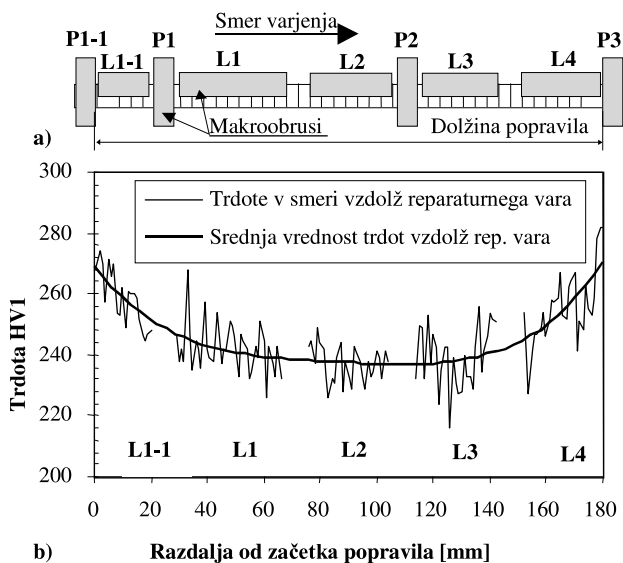
Table 4: Results of tensile tests

Mesto preizkusa	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Z (%)
T1 var zgoraj	698	747	23,3	71,7
T2 var spodaj	664	751	25,0	71,7
R1 var zgoraj	601	671	23,5	71,0
R2 var spodaj	786	817	21,6	73,0
Osn. material	545	651	25,6	75,5

Rezultati meritev zaostalnih napetosti na površini po metodi vrtnja izvrtine po ASTM E 837 so prikazani na **sliki 5**. Na **sliki 5a** in **5b** so prikazane vzdolžne in prečne komponente zaostalnih napetosti na površini, prečno na os varjenja. **Sliki 5c** in **5d** pa prikazujeta vzdolžne in prečne komponente zaostalnih napetosti na površini, vzdolžno na os varjenja v materialu reparaturnega vara.

4 RAZPRAVA

Trdote, izmerjene v reparaturnem varu vzdolž osi, kažejo, da je material trši na začetku in koncu reparaturnega vara za okoli 20%. Toplota, ki je posledica

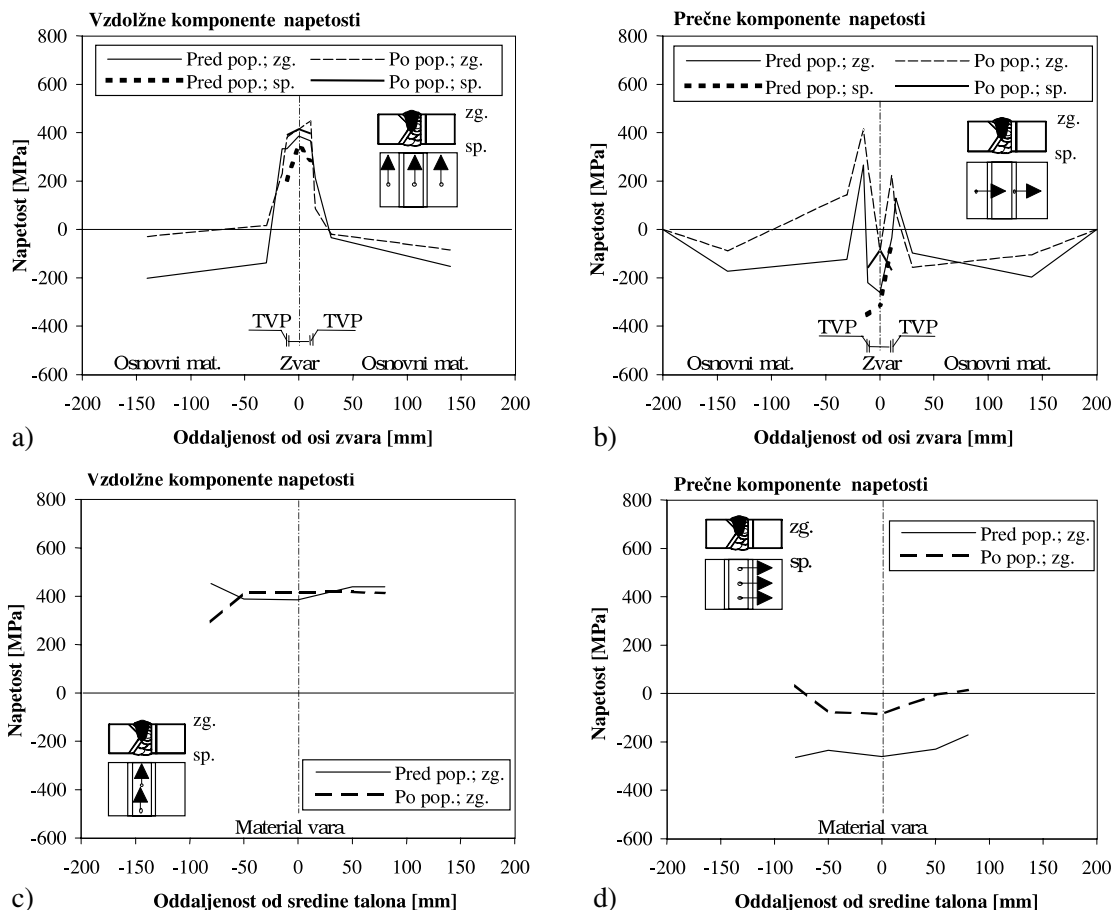


Slika 4: Trdote: a) skica makroobrusov za merjenje trdot b) trdote vzdolž reparaturnega zvara

Figure 4: Hardness: a) sketch of macrosections for hardness measurement b) Hardness in longitudinal direction of repair weld

vnesene energije za talilno varjenje, na začetku in koncu reparaturnega vara hitreje odteka kakor med samim varjenjem. Posledica je hitrejše ohlajanje. To je glavni razlog za povišanje trdot na teh dveh mestih. Temu se pri reparaturnem varjenju ni mogoče izogniti, saj so popravila ponavadi kratka. Zato se začetki in konci reparaturnih varov nahajajo v obstoječem varu, ne pa na iztečnih talonih. Zato se na teh mestih lahko bistveno spremenijo tudi druge mehanske lastnosti, nastanejo lahko lokalna krhka področja, ki neugodno vplivajo na nosilnost celotnega, sicer popravljenega zvarnega spoja.

Pri varjenju s taljenjem se ne moremo izogniti nastanku zaostalih napetosti. Le-te lahko dosežejo nivo meje tečenja materiala, ki ga varimo. Reparaturno varjenje je s stališča zaostalih napetosti toliko večja težava, ker so reparaturni zvari kratki in so varjeni na togo osnovo, ki jo večinoma predstavlja zvarni spoj, ki je bil zavarjen prej. Zaradi vpetja, ki ovira prosto krčenje v prečni smeri, nastanejo v varu in na TVP dodatne natezne prečne komponente zaostalih napetosti. Kot je prikazano na sliki 5b in 5d, so glede na njihov značaj



Slika 5: Rezultati merjenja zaostalih napetosti na površini: a) vzdolžna komponenta napetosti, prečno na os varjenja, b) prečna komponenta napetosti, prečno na os varjenja, c) vzdolžna komponenta napetosti v reparaturnem varu, vzdolžno na os varjenja, d) prečna komponenta napetosti v reparaturnem varu, vzdolžno na os varjenja

Figure 5: Results of surface residual stresses: a) longitudinal component of stress in transversal direction to the weld axes b) transversal component of stress in transversal direction to the weld axes c) longitudinal component of stress in repair weld material in transversal direction to the weld axes d) longitudinal component of stress in repair weld material in longitudinal direction to the weld axes

prečne komponente zaostalih napetosti po reparaturnem zvarnem spoju bolj pozitivne, torej natezne. Vzdolžne komponente zaostalih napetosti niso toliko povečane kot prečne (**sliki 5a**). Zaostale napetosti v varu in na TVP so blizu napetosti tečenja osnovnega materiala. Porazdelitev vzdolžnih komponent zaostalih napetosti v samem osnovnem materialu je večinoma tlačna. Razlog za takšno porazdelitev je v tem, da so zaostale napetosti uravnotežene po celotnem zvarjencu.

Če gledamo lokalno in upoštevamo mehanske lastnosti vara, TVP in osnovnega materiala v popravljenem zvarnem spoju skupaj z zaostalimi napetostmi, ugotovimo, da se lahko le-te, ki so po velikosti približno enake, bolj ali manj približajo napetosti tečenja materiala, pri katerem jih merimo. Na primer vzdolžna komponenta zaostalih napetosti pred popravilom v varu na **sliki 5c** je po velikosti enaka kot v reparaturnem varu po popravilu, vendar je napetost tečenja reparaturnega vara nižja, in je okoli 600 MPa, kot napetost tečenja vara na vzorcu zvarnega spoja, ki je med 650 in 700 MPa. Torej so po reparaturnem varjenju natezne vzdolžne komponente zaostalih napetosti bližje napetosti tečenja reparaturnega vara, kar neugodno vpliva na vedenje in nosilnost takšnega zvarnega spoja.

Reparaturno varjenje ne vpliva samo na zaostale napetosti, ampak tudi na trdnost in trdoto vara pod reparaturnim varom (**tabela 4**). Natezni preizkušanelec R2 (**slika 3**) ima za okoli 100 MPa večjo napetost tečenja kot predhodni var, na katerega ni vplivalo reparaturno varjenje. S tem se dodatno poveča nevarnost krhkega loma.

Na odločitev o popravilu zvarnega spoja, ki ni imel ustrezne kvalitete, vpliva velikost, usmerjenost in vrsta napake. Pri tem je treba upoštevati še nivo in smer zaostalih napetosti. Če pogledamo potek zaostalih napetosti (**slika 5**) opazimo, da so njihove vzdolžne komponente v varu in na TVP pred reparaturnim varjenjem natezne. To je za nosilnost neugodno, če so morebitne napake prečne. Zaostale napetosti v

kombinaciji z obremenitvijo lahko omogočijo širjenje takšnih napak. Po reparaturnem varjenju pa opazimo, da postanejo natezne tudi prečne komponente zaostalih napetosti. Zaradi vseh omenjenih razlogov je treba popravilo skrbno načrtovati.

5 SKLEP

Trdote vara se povečajo za približno 20%, zaradi hitrejšega odvajanja toplote na začetku in koncu reparaturnega vara.

Vzdolžne komponente nateznih zaostalih napetosti se malo povečajo v reparaturnem varu in na TVP, toda manj kot prečne. Kljub temu pa so še bližje napetosti tečenja materiala, ker ima reparaturni zvar nižjo mejo tečenja kot predhodni zvar.

Prečne komponente zaostalih napetosti so po reparaturnem varjenju po značaju bolj pozitivne, torej natezne. Pojav nateznih prečnih komponent pa neugodno vpliva na nosilnost in vedenje celotnega popravljenega zvarnega spoja.

Reparaturno varjenje ne vpliva samo na zaostale napetosti, ampak tudi na trdnost in trdoto vara pod reparaturnim varom.

6 LITERATURA

- ¹ A. Niku-Lari: *Residual Stresses*. Advances in Surface Treatments, Technology-Application-Effect, volume 4, Oxford, 1987
- ² R. Leggatt: *Residual Stress Measurement at Repair Welds in Pressure Vessel Steels in the As - Welded Condition*, The welding institute I IW 7913,01/86/514.3, Cambridge, 1986
- ³ T. Vuherer: *Analiza zaostalih notranjih napetosti s posebnim poudarkom na ponovnem vnosu toplote in njih meritev v sočelnih zvarnih spojih*. Magistrsko delo, Fakulteta za strojništvo Maribor, 1999
- ⁴ I. Samardžić: *Istraživanje slabljenja u zavarenom spoju na mestu početka i kraja zavara*. Zavarivanje, 1997
- ⁵ Annual book of ASTM standards: *Standard Test for Determination Residual Stress by the Hole Drilling Strain Gage Method*. ASTM E 837, Section 3 volume 03.01