

ANALIZA ZAOSTALIH NAPONA U ZAVARENOM SPOJU ČELIKA VISOKEČVRSTOĆE

Mirza Manjgo¹, Tomaž Vuherer², Darko Bajić³, Mersida Manjgo⁴

^{1,2} University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering

³ University of Podgorica, Faculty of Mechanical Engineering

⁴ Džemal Bijedić University Mostar, Faculty of Mechanical Engineering

Key words: MAG zavarivanje, visokočvrsti čelik, zaostali naponi

Abstract: Vrlo bitan segment, a koji se javlja kao posljedica zavarivanja, je pojava napona u zavarenim konstrukcijama. Pri zavarivanju dolazi do lokalnog zagrijavanja komada na vrlo visoke temperature dok je dalja okolina ovog mjesta ostala hladna. Ove vrlo velike temperaturne razlike izazivaju, pri hlađenju zbog metanog širenja i skupljanja komada, unutrašnje napone koji u tehnologiji zavarivanja, a i u primjeni zavarenih konstrukcija predstavljaju ozbiljan problem. U radu je prikazno mjerenje zaostalih napona metodom “zabušivanja rupe”.

1 UVOD

Zavarene konstrukcije i njihovi konstruktivni elementi, ovisno o namjeni, tijekom rada su izloženi raznim vanjskim opterećenjima, dinamičkim i statičkim, tako da pri njihovom djelovanju u obliku sila i momenata nastaju odgovarajuća pogonska naprezanja

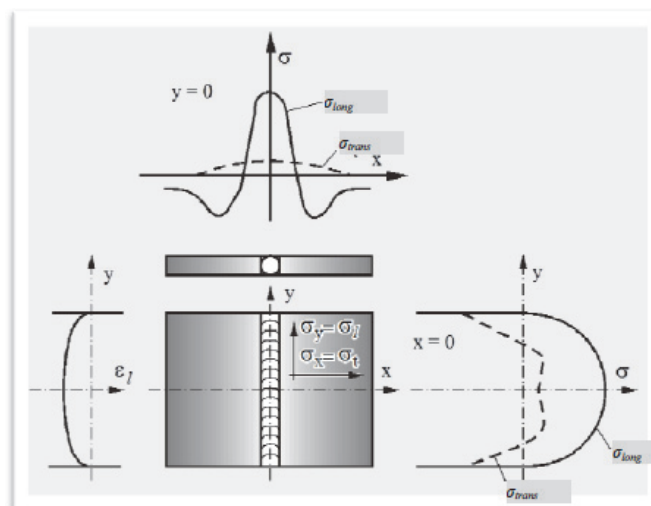
Osim radnih, u materijalu mogu da budu prisutni i zaostali naponi koji nisu rezultat spoljašnjeg opterećenja, već su posljedica drugih faktora kao što su: livenje, zavarivanje, hladna i topla deformacija, mašinska obrada, montaža, itd. Ukupan napon jednak je zbiru zaostalih i radnih napona. Dešava se da vrijednost ukupnog napona prevaziđe granicu tečenja što dovodi do promjene dimenzija mašinskog dijela. Kako radni naponi mogu da se proračunaju, a zaostali naponi da se izmjere, moguće je odrediti ukupni napon i predvidjeti ponašanje konstrukcije u eksploatacionim uslovima.

Utjecaj zaostalih napona kao rezultat postupka zavarivanja u ukupnom naponskom stanju zavarenog spoja ima veliki značaj. Dosadašnja iskustva ukazuju da bi bilo potrebno pogodnom metodom ispitivanja, a koja neće ugroziti strukturni integritet ispitivanih mjesta, dati ocjenu o deformacijskom i naponskom stanju u kritičnim zonama zavarenog spoja.

2 ZAOSTALI NAPONI

Pojava zaostalih napona i deformacija u procesu zavarivanja je neizbježna. Određivanje veličine, znaka i rasporeda zaostalih napona je veoma važno, tim prije što zaostali naponi u zavarenim konstrukcijama mogu bitno da utiču na stvaranje i rast prslina, na pojavu krtoeg loma, zamor materijala, naponsku koroziju, krivljenje itd. [1].

U konstrukcijama čija je debljina znatno manja od dužine i širine izrađenim od čeličnih limova može se smatrati da se u materijalu procesom zavarivanja formira dvoosno naponsko stanje. Pri jednoprolaznom zavarivanju limova, uslijed skupljanja zavara po dužini nastaju podužni i poprečni zaostali naponi raspoređeni duž zavara (y -osa) i duž linijevvertikalne na zavar (x -osa), što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Raspodjela podužnih i poprečnih zaostalih napona i poprečne deformacije duž y i x osa u jednoprolazno zavarenom limu [2]

Podužni zaostali naponi su zatezni naponi unutar zavora i u zoni uticaja toplote (ZUT-u). Ovi naponi su u ravnoteži sa pritiskim podužnim naponima koji vladaju u zoni dalje od sredine zavora. Ako je zavar dovoljno dugačak, zatezni podužni naponi u sredini lima imaju konstantnu vrijednost duž određenog rastojanja. Prema krajevima oni se smanjuju do nule. Ovaj podužni napon je odgovoran za raspodjelu poprečne deformacije, slika 1. lijevo, koja se takođe na krajevima izjednačava sa nulom, a povećava prema sredini. Da bi se spriječila poprečna deformacija po dužinzavara, mora doći do stvaranja zaostalih napona poprečno na zavar [2].

Raspodjela poprečnih napona prikazana je na slici 1. isprekidanom linijom. Njihova veličina je manja od podužnih napona. U dugačkim zavarenim spojevima, poprečne deformacije se povećavaju ka sredini zavora sa odgovarajućim smanjenjem poprečnih zaostalih napona.

3 EKSPERIMENTALNI DIO

Visokočvrsti čelici spadaju u grupu čelika granice razvlačenja od 700 - 1300 N/mm², upotrebljavaju se kod konstruiranja i proizvodnje visokoopterećenih dijelova vozila, kranova, dizalica, viličara, mašina, Visokočvrsti čelici imaju nekoliko puta veću konvencionalnu granicu razvlačenja Rp02 zbog koje se mogu opteretiti znatno većim opterećenjima ili se može smanjiti presjek profila u usporedbi s običnim čelicima [3].

Za eksperimentalna istraživanja korišten je čelik S960QL iz grupe čelika visoke čvrstoće. Hemijski sastav čelika prikazan je u Tabeli 1, a mehanička svojstva u Tabeli 2.

Tablica 1. Hemijski sastav čelika S960QL

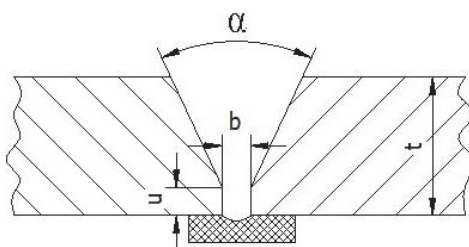
Sastav / %														
C	Si	Mn	P	S	B	Cr	Cu	Mo	N	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,174	0,297	1,070	0,007	0,017	0,027	0,623	0,043	0,612	0,005	0,027	0,052	0,002	0,002	0,001

Tablica 2. Osnovna mehanička svojstva - S960QL

Debljina / mm)	Rp0,2 / min MPa	Rm / min MPa	A / %
15,0	960	980-1150	13

Sniženje svojstava pri zavarivanju visokočvrstih čelika najviše se ogledaju u pojavi grešaka u MZ i ZUT, te u promjeni strukture u tim područjima. Za izbjegavanje grešaka i sniženje svojstava pri zavarivanju čelika potrebno je obratiti pozornost na: čistoću pripremljenog spoja, predgrijavanje, unos toplote, izbor dodatnog materijala.

Predgrijavanje općenito podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline na propisanu temperaturu. Predgrijavanjem se postiže smanjenje zaostalih naprezanja-predgrijavanjem se smanjuje temperaturna razlika između metala zavora i osnovnog materijala. Samim tim smanjuje se razlika u termalnoj kontrakciji te sukladno tome dolazi do manjih iznosa zaostalih naprezanja. Za određivanje temperature predgrijavanja T_0 i međuprolazne T_m temperature možemo koristiti preporuke iz literature, proračunom prema Ito i Bessyo, Seferinau ili drugim formulama.



Slika 2. Priprema spoja za zavarivanje

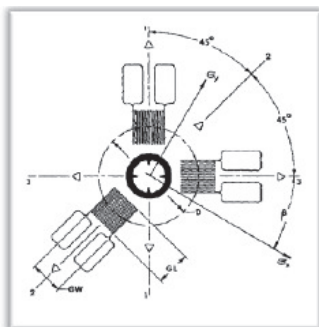
Table 3. Parametri zavarivanja [5]

Welding passes	Process	Size of Filler Metal (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Type of current/ Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Welding Speed*) (cm/min)	Heat input*) (kJ/cm)
1	135	1,0	208	27,5	DC +	10,7	40,0	6,8
2	135	1,0	230	26,5	DC +	11,5	38,0	7,6
3	135	1,0	240	26,8	DC +	12,0	38,0	8,1
4	135	1,0	240	26,8	DC +	12,0	38,0	8,1
5	135	1,0	252	28,0	DC +	14,0	35,0	9,6
6	135	1,0	258	29,0	DC +	14,3	34,0	10,5
7	135	1,0	266	30,0	DC+	16,0	30,	12,7

Za zavarivanje je primjenjen MAG postupak zavarivanja. Priprema spoja je izvedena kao V-spoj pod uglom $\alpha = 50^\circ$, $b = 2 - 3\text{ mm}$, $u = 1\text{ mm}$, $t = 15\text{ mm}$, slika 1.

Kao dodatni material korištena je puna žica prečnika 1,0mm oznake BÖHLER X 90-IG označen standardom EN ISO 16834-A-G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo [4]. Zaštitni plin M21 (18% CO₂). Ploče su zavarene robotom prema parametrima navedenim u tablici 3. Za materijal S960QL debljine 15 mm, temperatura predgrijavanja je $T_{0\min} = 100^\circ\text{C}$, dok je maksimalna $T_{0\max} = 300 (400)^\circ\text{C}$. Zavarivanje je izvedeno robotom u firmi Palfinger d.o.o. Maribor.

Za mjerenje zaostalih napona korištena je metoda “zabušivanja rupe”, metoda je standardizovana, Standard ASTM E837,[6]. Za eksperiment je korištena mjerna rozeta je 6/120 RY 11. gdje je mjerna traka "1" je uzeta kao referentni pravac, slika 3.



Slika 3. Oznacavanje traka u rozeti 6/120 RY 11

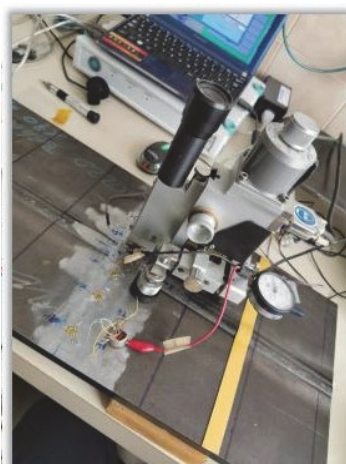
Mark	X	Y	Place
M1	350	-120	BM
M2	350	-70	BM
M3	350	-30	BM
M4	350	-14	HAZ
M5	350	0	WH
M6	350	+14	HAZ
M7	350	+30	BM
M8	350	+70	BM
M9	350	+120	BM



Slika 4. Shema mjernih mjesta [5]

Na slici 4 prikazano je šema mjernih traka, mjerna mjesta.

Nakon lijepljenja, postavljen je alat za centriranje specijalne burgije, te je vršeno zabušivanje rupe. Shema postupka centriranja burgije i zabušivanja rupe je data na slici 5. Bušenje rupe je izvršeno u cilju registrovanja zaostalih (sopstvenih) deformacija.



Slika 5. Shema postupka centriranja burgije i zabušivanja rupe [5]

Nakon zabušivanja rupe očitavaju se pojedinačne mjerne vrijednosti za sve tri mjerne trake u rozeti. Registrovanje deformacijskog stanja vrši se elektronskim uređajem UPM 40 i dobijaju se vrijednosti deformacija na svakoj rozeti: $\Delta\epsilon_a$,

$\Delta\epsilon_b$, $\Delta\epsilon_c$. Izmjerene vrijednosti deformacija koriste se za matematičku obradu određivanja glavnog normalnog napona, σ_1 i σ_2 , i ugla, α . [7]

Naponi se računaju prema izrazu:

$$\sigma_{1,2} = -A(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c) \pm B\sqrt{(\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2 \cdot \Delta\epsilon_b)^2 + (\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a)^2} \quad (1)$$

Gdje su konstante A i B:

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

Orijentacioni ugao θ se izračunava po obrascu:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2 \cdot \Delta\epsilon_b}{\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a} \quad (3)$$

Tablica 4. Rezultati mjerenja [5]

		β	σ_{min}	σ_{max}	σ_{long}	σ_{tran}	τ_{xy}	$\sigma_x - \sigma_y$
M9	120	-26,206	-41,312	147,72	-4,4488	110,8568	57,6528	-115,306
M8	70	49,845	-162,126	-42,386	-92,1788	-112,333	-10,0772	20,15432
M7	30	-36,362	-55,54	98,513	-1,38844	44,36144	22,87494	-45,7499
M6	12	-69,419	136,865	553,186	501,7395	188,3115	-156,714	313,4279
M5	0	85,695	-90,33	176,826	175,3206	-88,8246	-132,073	264,1452
M4	-12	-74,811	93,204	644,957	607,0813	131,0797	-238,001	476,0017
M3	-30	59,577	41,33	97,192	82,86783	55,65417	-13,6068	27,21366
M2	-70	49,845	-162,126	-42,386	-92,1788	-112,333	-10,0772	20,15432
M1	-120	65,9	-339,294	-19,096	-72,4838	-285,906	-106,711	213,4224

4 CONCLUSION

Veličina i raspored zaostalih napona zavise od brojnih parametara i to: količine unijete toplote prilikom zavarivanja, brzine kretanja luka, osobina materijala, oblika i dimenzija dijelova kao i njihove krutosti. Poznavanje veličine i raspodjele zaostalih napona koji se preklapaju s radnim naprezanjem, presudno je za utvrđivanje i produljenje života zavarenih konstrukcija

Zaostali naponi usljed zavarivanja u kombinaciji s radnim uvjetima mogu dovesti do stvaranja i napredovanja pukotina do mjere u kojoj se konstrukcija mora popraviti ili čak povući iz upotrebe.

Pokazano je da su izmjereni zaostali naponi znatno niži od napona tečenja osnovnog materijala što pokazuje opravdanost primjenjene tehnologije zavarivanja i izabranog postupka.

5 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] M. Manjgo, T. Vuherer, Naučnoistraživački projekat u okviru naučne i tehnološke saradnje između Bosne i Hercegovine i Republike Slovenije za 2019. i 2020. godinu, PROBLEMATIKA ZAOSTALIH NAPONA U ZAVARENIM SPOJEVIMA ENERGETSKIH POSTROJENJA (član projektnog tima)
- [3] Hrivnjak I. Zavarljivost čelika, IRO "Građevinska knjiga" Beograd, 1982
- [4] http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/B_Boehler%20X%2090IG_de_en_5.pdf?cache=1548334803
- [5] M. Manjgo, ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN BUTT WELD JOINT, Master's thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, 2020.
- [6] ASTM 837
- [7] Mirza Manjgo, Tomaž Vuherer, Darko Bajić, EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF REFINED TENSIONS, 12th International Scientific Conference on production Engineering Development and Modernization of production, 18-20.9.2019, Sarajevo, BiH