Broj rada: 3.6
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.016

ZAOSTALI NAPONI I DEFORMACIJE U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA

RESIDUAL STRESSES AND DISTORTIONS IN WELDED STRUCTURES

Dragoljub Ilić dip. inž. maš

RB Kolubara, organizaciona celina Kolubara Metal – Diše Đurđevića Rusa 32, Srbija

E-mail: dragoljubilic88@gmail.com

Rezime:

Cilj ovog rada jeste analiza fenomena zaostalih napona i deformacija koji nastaju tokom procesa zavarivanja, kao i razmatranje njihove međusobne povezanosti. Posebna pažnja posvećena je uzrocima njihovog nastanka i karakteristikama ponašanja.

Zaostali naponi predstavljaju unutrašnja naponska stanja u materijalu koja nisu neposredno vidljiva i čije je određivanje često složeno, dok su deformacije nastale usled zavarivanja u većini slučajeva jasno uočljive i merljive. Smanjenje nivoa zaostalih napona i deformacija u zavarenim konstrukcijama zahteva doslednu primenu propisanih procedura zavarivanja, odgovarajuću organizaciju proizvodnog procesa, kao i visok nivo stručnog znanja u oblasti projektovanja i konstruisanja zavarenih konstrukcija.

Projektant, tehnolog zavarivanja, proizvodno osoblje i zavarivač svojim stručnim radom i poštovanjem definisanih procedura značajno utiču na konačne karakteristike i kvalitet izrađene konstrukcije.

Ključne reči: zavarivanje, zaostali naponi, deformacije kod zavarenih spojeva, termički naponi

Abstract:

The aim of this paper is to analyze the phenomenon of residual stresses and distortions generated during the welding process, as well as to examine their mutual interrelationship. Particular attention is devoted to the causes of their formation and behavioral characteristics,

Residual stresses represent internal stress states within a material that are not directly visible and whose determination is often complex, whereas welding-induced distortions are, in most cases, clearly observable and measurable. Reducing the level of residual stresses and distortions in welded structures requires the consistent application of prescribed welding procedures, appropriate organization of the manufacturing process, and a high level of professional expertise in the field of design and fabrication of welded structures.

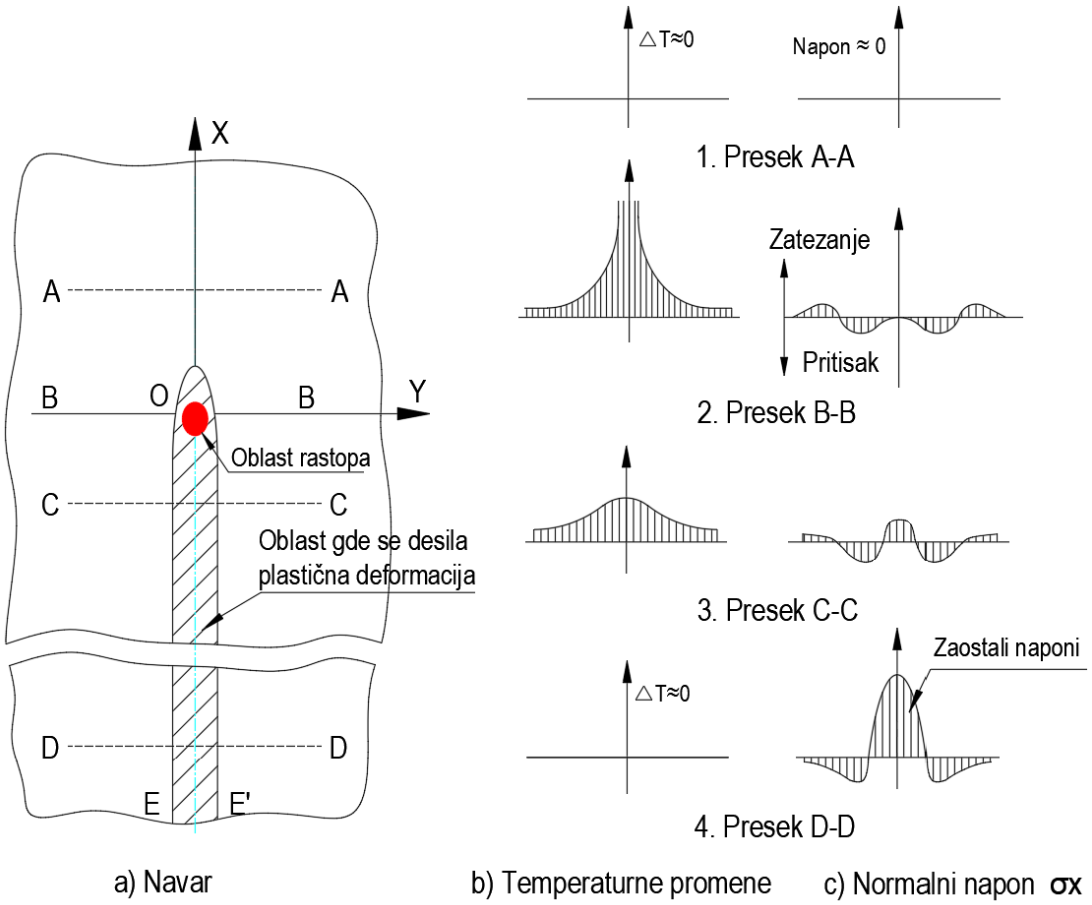
. The designer, welding engineer, production personnel, and welder, through their professional expertise and adherence to defined procedures, significantly influence the final properties and quality of the manufactured structure

Keywords: welding, residual stress, distortion in welding, thermal stresses

1. OPŠTI PREGLED ZAVARIVANJA

Zavarivanje predstavlja tehnološki proces spajanja dva ili više metalnih elemenata u nerazdvojivu celinu, pri čemu se veza ostvaruje lokalnim zagrevanjem i topljenjem osnovnog i dodatnog materijala. U savremenim postupcima zavarivanja kao dominantan izvor toplotne energije često se koristi električni luk. Električni luk predstavlja specifičan oblik električnog pražnjenja kroz jonizovani gasni medijum koji se uspostavlja između dve elektrode, anode i katode.

U postupcima elektrolučnog zavarivanja električni luk se uspostavlja između topive ili netopive elektrode i radnog komada, pri čemu predstavlja koncentrisani izvor toplote u kojem se električna energija transformiše u toplotnu energiju. Deo oslobođene toplotne energije koristi se za zagrevanje i topljenje osnovnog i dodatnog materijala, dok se preostali deo energije gubi usled prenosa toplote na okolnu atmosferu, kao i kroz pojave isparavanja i rasprskavanja dodatnog materijala.



Slika 1 : Šematski predstavljanje temperaturne promene i napona tokom zavarivanja

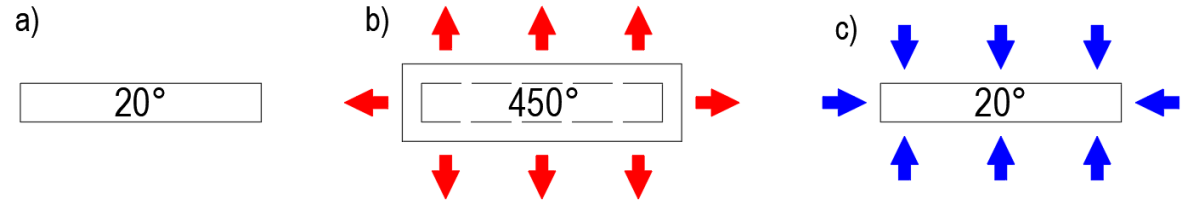
Na slici 1 šematski je prikazan način nastanka termičkih naprezanja tokom procesa navarivanja. Tokom procesa zavarivanja dolazi do lokalnog zagrevanja zavarenog spoja dejstvom električnog luka, usled čega je temperaturno polje neravnomerno raspoređeno i kontinuirano se menja sa napredovanjem procesa zavarivanja. Kao posledica takve neravnomerne raspodele temperature nastaju termička naprezanja u zavarenom spoju, čiji se intenzitet i raspodela takođe menjaju u skladu sa razvojem procesa zavarivanja

2. MEHANIZAM NASTANKA DEFORMACIJA

Uzrok nastanka deformacija pri zavarivanju može se najjasnije i slikovito prikazati na primeru metalne šipke relativno male dužine, analizirajući četiri različita slučaja njenog oslanjanja i unosa toplote

2.1 Slobodno širenje i slobodno skupljanje - zapreminski unos toplote

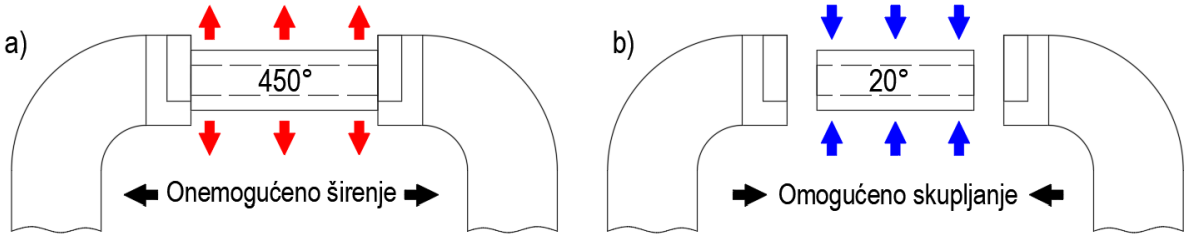
Ako čeličnu šipku relativno male dužine (slika 2a) zagrejemo do određene temperature ona će se proširiti ravnomerno u svim pravcima (slika 2b). Kada se skloni toplotni izvor šipka će se ravnomerno skupiti u svim pravcima (slika 2c). tj vratiće se na dimenzije koja je imala pre zagrevanja. U ovom slučaju šipka se nije deformisala



Slika 2: Slobodno širenje i skupljanje

2.2 Ograničeno širenje i slobodno skupljanje - zapreminski unos toplote

Ako posmatramo primer ograničenog širenja (šipku postavimo u stegu) i slobodnog skupljanja na istom primeru, čelične šipke relativno male dužine, može se primetiti povećanja prečnika usled nemogućnosti širenja u podužnom pravcu (slika 3a). Kada se skloni toplotni izvor doćiće do ravnomernog skupljanja šipke u svim pravcima. Krajnji rezultat je taj da imamo povećan prečnik i smanjenu dužinu šipke u odnosu na pre zagrevanja odnosno drugim rečima rečeno došlo je do deformisanja šipke (slika 3b)



Slika 3: Ograničeno širenje i slobodno skupljanje

2.3 Slobodno širenje i slobodno skupljanje - koncetrisani unos toplote

Lokalni, odnosno koncentrisani unos toplote na istoj čeličnoj šipki male dužine izaziva značajno drugačiji mehanizam deformacije i samim tim dovodi do različitog krajnjeg rezultata u odnosu na slučaj zapreminskog zagrevanja. U ovom slučaju širenje materijala je prostorno delimično ograničeno i neravnomerno, pri čemu se deformacija javlja dominantno u neposrednoj okolini zone delovanja izvora toplote.

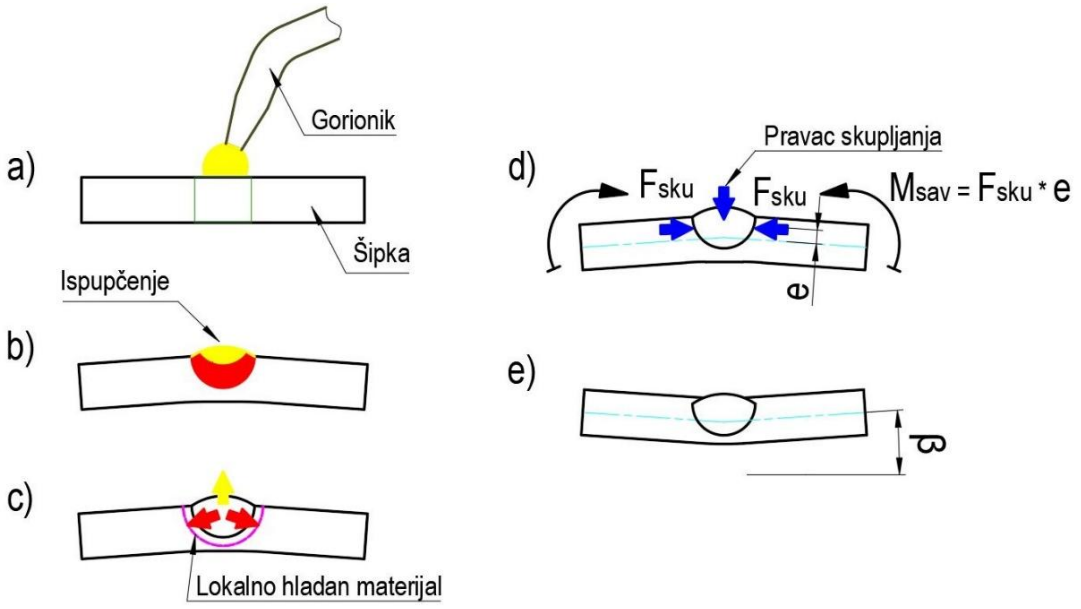
Nakon lokalnog tačkastog zagrevanja (slika 4a), okolni hladniji ili nedovoljno zagrejani materijal predstavlja prirodnu prepreku slobodnom termičkom širenju (slika 4c), jer onemogućava ravnomerno širenje u svim pravcima.

Kao posledica toga, dominantno širenje materijala odvija se u radijalnom pravcu u odnosu na zonu zagrevanja što dovodi do pojave lokalnog ispupčenja površine šipke (slika 4b).

Tokom procesa hlađenja dolazi do lokalnog skupljanja prethodno zagrejanog područja. Sile skupljanja nisu simetrično raspoređene u odnosu na uzdužnu osu šipke, već deluju ekscentrično, što dovodi do pojave momenta savijanja (slika 4d). Posledica ovog momenta je trajno savijanje šipke u smeru suprotnom od lokalnog širenja, odnosno prema gore (slika 4e).

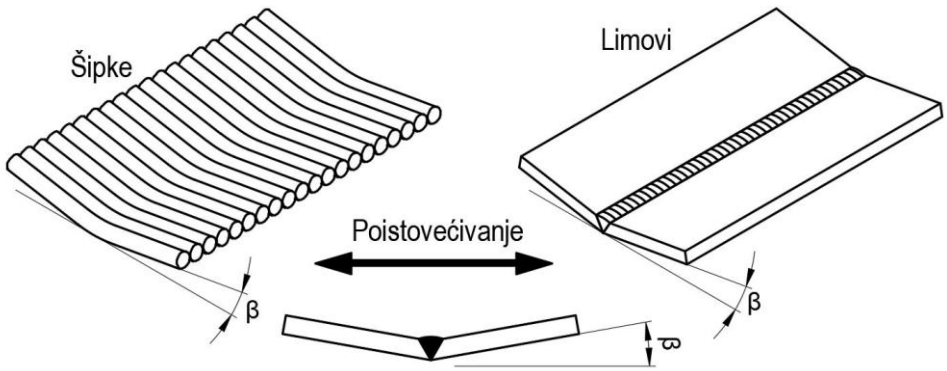
Pri procesu deformacije šipka prolazi kroz ravnotežni horizontalni položaj, ali se zbog prethodno formiranog lokalnog ispupčenja i dalje nastavlja deformisati u istom smeru.

Zbog toga se konačno stanje ne uspostavlja u potpuno ravnom položaju, već se javlja dodatna ugaona deformacija. Ova pojava je posledica neravnomernog i nekontrolisanog termičkog skupljanja, pri čemu nastala deformacija ostaje trajna nakon završetka procesa hlađenja. Ovo nam govori da je napon tečenja dostignut u toj zoni



Slika 4: Ponašanje lokalno jednostrano zagrejane metalne šipke
pri slobodnom širenju i skupljanju

Deformacija šipke usled lokalnog zagrevanja može se poistovetiti sa deformacijom koja nastaje pri sučeonom zavarivanju dva lima (slika 5). Ukoliko se razmatra skup velikog broja međusobno paralelnih šipki postavljenih jedna pored druge, takav sistem može se aproksimirati kao kontinualni lim, čime se omogućava primena istih principa analize deformacija.



Slika 5: Analogija deformacije više paralelno postavljenih šipki primenjena na limove

3. ZAOSTALI NAPONI

Termin „zaostali naponi“ potiče od činjenice da se nakon završetka određenih proizvodnih procesa unutar materijala zadržavaju unutrašnji naponi koji ostaju prisutni i nakon uklanjanja spoljašnjih opterećenja. U proizvodne procese koji mogu dovesti do pojave zaostalih napona ubrajaju se:

- **Sečenje plamenom i grejanje**
- **Zavarivanje**
- Plastično deformisanje
- Metalurške promene (javljaju se pri termičkoj obradi čelika)

Kada se razmatraju zaostali naponi (u nekim literaturama domaćih autora pojavljuje se pojam sopstveni naponi) i deformacije u zavarenim konstrukcijama, neophodno je analizirati i njihov uticaj na ponašanje konstrukcije tokom eksploatacije.

Visoke vrednosti zaostalih napona zatezanja u zonama neposredno uz zavar mogu izazvati pojavu krtog loma, zamora materijala ili pucanja usled naponske korozije. Sa druge strane, visoki zaostali naponi pritiska, u kombinaciji sa početnim deformacijama, mogu dovesti do smanjenja otpornosti vitkih konstrukcija na izvijanje.

Uticaj zaostalih napona u velikoj meri zavisi od mehaničkih svojstava osnovnog materijala. Kod krtih materijala zaostali naponi mogu značajno smanjiti otpornost zavarenog spoja na lom. Nasuprot tome, kod duktilnih materijala, koji imaju sposobnost plastične deformacije pre loma, njihov nepovoljan uticaj je znatno manji.

Osnovni cilj konstruktora i proizvodnog osoblja jeste da se odgovarajućim izborom parametara projektovanja i izrade veličina zaostalih napona i njihov uticaj svedu na prihvatljiv nivo.

Parametri projektovanja obuhvataju pravilan izbor tipa zavarenog spoja (sučeoni, preklopni i ugaoni), debljine limova, oblika pripreme ivica za zavarivanje, kvaliteta osnovnog materijala, definisanje potrebe za termičkom obradom, kao i izbor konstruktivnog rešenja kojim se nastoji da se obim zavarivanja svede na najmanju moguću meru.

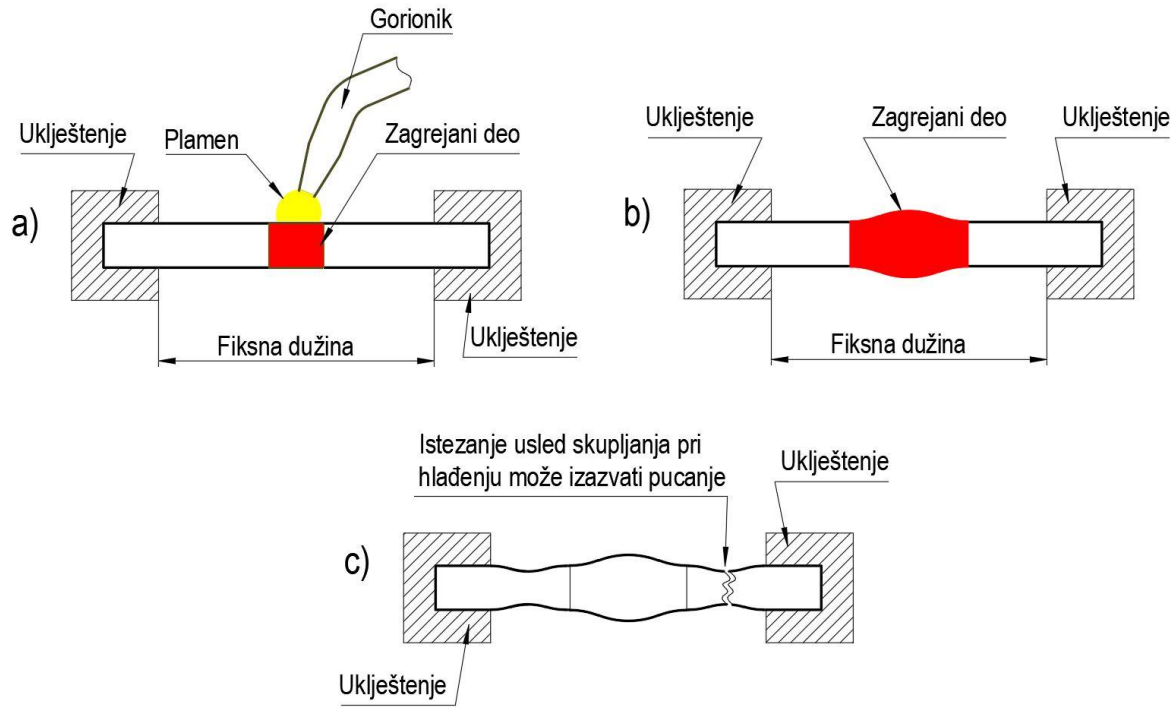
Parametri izrade obuhvataju pravilno sečenje i pripremu ivica za zavarivanje, obezbeđivanje odgovarajućih uslova za izvođenje zavarivanja, angažovanje kvalifikovanih i sertifikovanih zavarivača, izbor odgovarajućeg redosleda zavarivanja, plameno ispravljanje deformisanih delova konstrukcije nakon zavarivanja, kao i primenu odgovarajuće termičke obrade.

Proces smanjenja zaostalih napona i deformacija započinje u fazi projektovanja. Izbor odgovarajućih konstruktivnih rešenja ima značajan uticaj na kasniji tok proizvodnje i kvalitet zavarenih konstrukcija. Zbog toga je neophodno da se već u početnim fazama projektovanja i izrade predvide i otklone potencijalni uzroci nastanka nepravilnosti, uz doslednu primenu propisanih procedura zavarivanja.

3.1 Ograničeno širenje i ograničeno skupljanje - lokalni unos toplote

Posmatrajmo slučaj u kojem su ograničeni i širenje i skupljanje metalne šipke. Ovakav uslov ograničenja nastaje kada su krajevi šipke čvrsto uklješteni, čime je onemogućeno bilo kakvo pomeranje u bilo kom pravcu. Dovođenjem toplote na određeni uzdužni deo šipke (slika 6a), usled sprečenog podužnog širenja, ukupna deformacija se odvija u radijalnom pravcu, što

se manifestuje povećanjem prečnika zagrejanog dela šipke. Na taj način zagrejana zona mora da prihvati celokupnu zapreminsku promenu materijala izazvanu termičkim širenjem (slika 6b).



Slika 6: Ponašanje lokalno zagrejane metalne šipke kada je širenje i skupljanje ograničeno

Povećanje prečnika zagrejanog dela predstavlja plastičnu deformaciju koja se naziva trajna deformacija, budući da se nakon hlađenja šipke ne dolazi do potpunog povratka prvobitnog geometrijskog oblika. Kao posledica ograničenog širenja, tokom zagrevanja u materijalu se razvijaju pritisni naponi (slika 6b), dok se nakon završetka procesa hlađenja javljaju zatezni naponi (slika 6c).

Tokom zagrevanja, deo šipke izložen dejstvu toplote omekšava, pri čemu dolazi do njegovog plastičnog deformisanja u radijalnom pravcu, odnosno do povećanja prečnika zagrejane oblasti (slika 6b). U fazi hlađenja, kruti oslonci sprečavaju slobodno termičko skupljanje materijala. Kao posledica ovog ograničenja, u šipki nakon hlađenja ostaje zarobljen zatezni napon.

Naponi koji ostaju prisutni u materijalu nakon prestanka dejstva spoljašnjih opterećenja i završetka procesa hlađenja predstavljaju **zaostale napone ili sopstvene napone**.

U zavisnosti od mehaničkih svojstava materijala i intenziteta nastalih napona, zaostali naponi mogu dovesti do pojave trajnih plastičnih deformacija ili, u slučaju nedovoljne duktilnosti materijala, do pojave prslina i loma (slika 6c)

Termički napon je napon izazvan ograničenim termičkim širenjem ili skupljanjem

Termičko istezanje (dilatacija) se računa po sledećem obrazcu $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$

Termički napon se računao kao $\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \ [N/mm^2]$

Young-ov modul elastičnosti $E = 210000 \ N/mm^2$

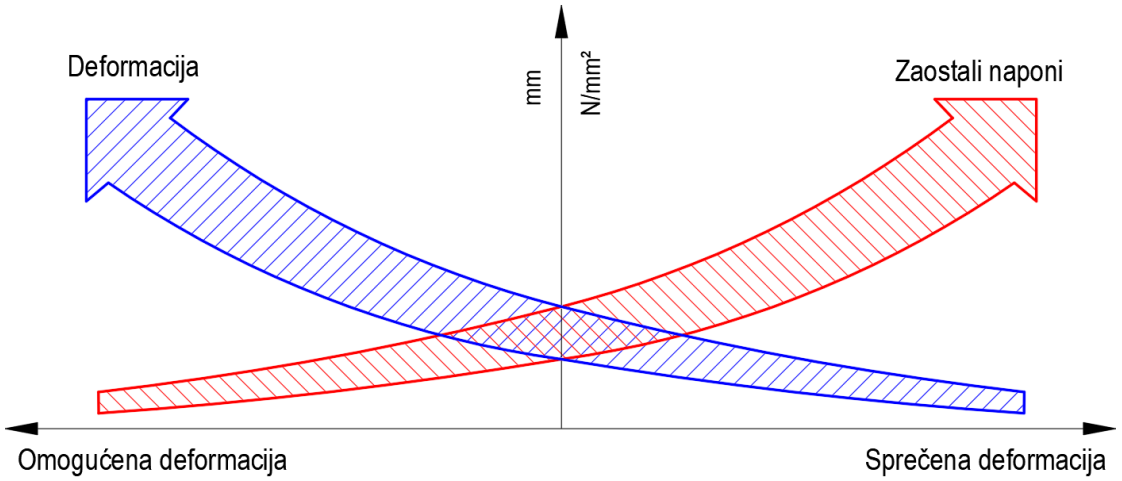
Na primer za opšti konstrukcioni čelik S355J2+N (Č 0563) koji ima tabličnu vrednost minimalnog napona tečenja od 355 N/mm², a po atestnoj dokumentaciji nešto iznad 400N/mm²

može se izračunati temperaturna promena tj porast temperature potreban za dostizanje napona tečenja pri pritisku.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \frac{\sigma}{E \cdot \alpha} = \frac{400\ N/mm^2}{210\,000 \frac{N}{mm^2} \cdot 11{,}8 \cdot 10^{-6}\ \frac{1}{°C}}$$

$\Delta T = 161°C$ iznad sobne temperature

$$\Delta T = t - t_0 \quad \Rightarrow \quad t = \Delta T + t_0 = 161°C + 20°C$$
$$= 181°C \quad temperatura\ zagrevanja\ čelika$$



Slika 7: Zavisnost između deformacije i zaostalih napona

Na slici 7 prikazan je karakterističan odnos između deformacija i zaostalih napona koji nastaju tokom procesa zavarivanja. Najveće vrednosti zaostalih napona javljaju se u delovima konstrukcije u kojima je deformisanje potpuno ograničeno, odnosno gde su termičke deformacije sprečene.

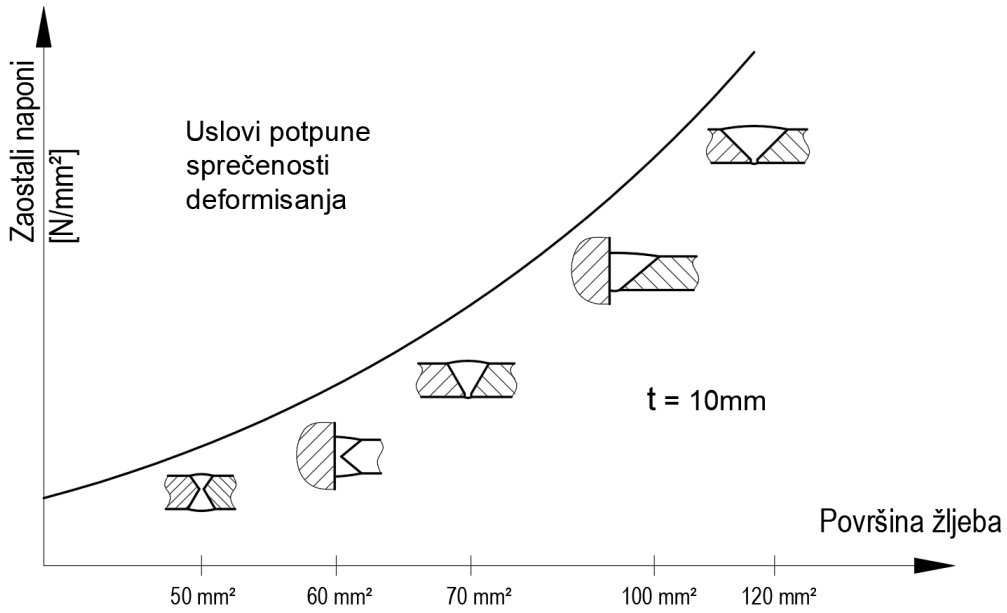
Nasuprot tome, ukoliko je konstrukciji omogućeno slobodno deformisanje, vrednosti zaostalih napona biće znatno manje ili približno jednake nuli. Ovaj princip predstavlja jedan od osnovnih postulata pri analizi deformacija i zaostalih napona u zavarivanju.

Na slici 8 prikazana je zavisnost između zaostalih napona i površine žljeba za različite geometrije sučeonih spojeva pri istoj debljini lima, u uslovima potpuno sprečene deformacije.

Kao što se može videti na slici 8, površina žljeba za zavarivanje menja se u zavisnosti od toga da li je žljeb jednostrani ili obostrani. Sa povećanjem povšine žljeba, pri uslovu potpune sprečene deformacije, raste vrednost zaostalih napona.

Gore navedena konstatacija može se objasniti činjenicom da je za popunjavanje žljeba velike površine neophodno duže vreme zavarivanja, kao i topljenje veće količine dodatnog materijala, što rezultuje ogromnim unosom toplote u zavareni spoj. Jedna te ista zapremina zavarenog spoja pri različitim temperaturama imaće različite sile skupljanja tokom hlađenja. Intenzitet sila skupljanja je direktno proporcionalan zapremini zavarenog spoja. Zapremina zavarenog spoja je jednaka proizvodu površine žljeba i dužine zavara.

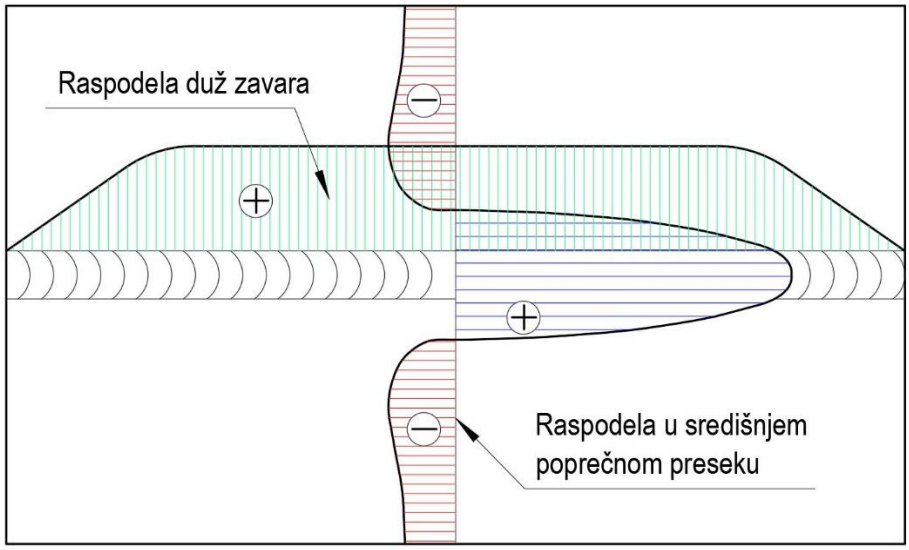
Na osnovu navedenog može se zaključiti da se na smanjenje zaostalih napona može postići odgovarajućim oblikovanjem sučeonog spoja. U tom smislu, preporučuje se primena obostranih žljebova sa minimalnim uglovima otvaranja, čime se smanjuje: zapremina zavarenog spoja, puneta količina toplote a posledično intenzitet zaostalih napona.



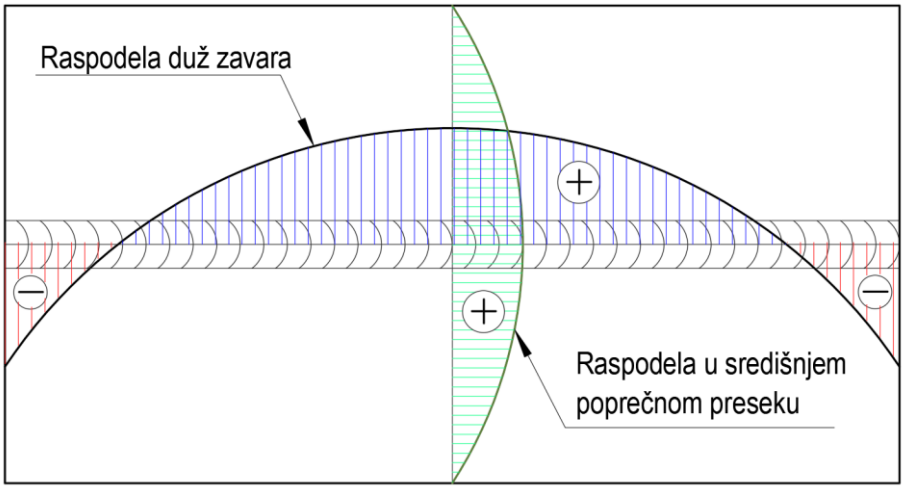
Slika 8: Zavisnost zaostalih napona i površine žljeba za razlučite sučeone spojeve

Vrste zaostalih naprezanja:
- Poprečna naprezanja
- Uzdužna naprezanja

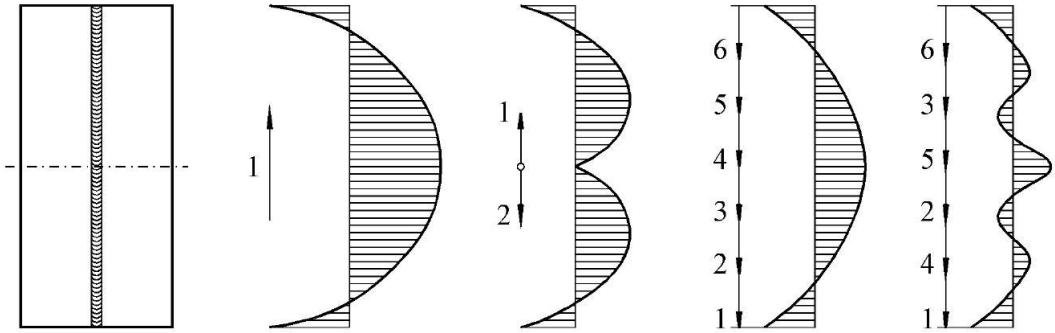
Karakteristična raspodela zaostalih uzdužnih i poprečnih naprezanja u zavarenom spoju nakon hlađenja na sobnu temperaturu prikazana je na slikama 9 i 10. U cilju uspostavljanja ravnoteže naprezanja, zatezna zaostala naprezanja koja se javljaju u pojedinim zonama zavarenog spoja moraju biti uravnotežena odgovarajućim pritisnim zaostalim naprezanjima u okolnim delovima materijala.



Slika 9: Raspodela uzdužnih zaostalih naprezanja.
Sa povećanjem unosa toplote, širi se zona zateznih naprezanja.



Slika 10: Raspodela poprečnih zaostalih naprezanja.
Sa povećanjem dužine zavara, povećava se nivo zateznih zaostalih naprezanja



Slika 11: Uticaj redosleda zavarivanja na vrednost i rasporedelu zaostalih napona

Intenzitet, raspored i znak sopstvenih napona zavise od načina zagrevanja i hlađenja sklopa i menjaju se u podužnom i poprečnom pravcu u odnosu na osu šava.
Redosledom zavarivanja može da se utiče na raspored, znak i intenzitet sopstvenih napona. Na slici 11 prikazano je kako redosled zavarivanja može uticati na smanjenje nivoa sopstvenih napona. Strelicom je označen smer zavarivanja, a brojevima redosled izvođenja.

Na osnovu ove slike se može zaključiti da se ravnomernijim zagrevanjem materijala, odnosno kraćim šavovima, dobijaju niže vrednosti sopstvenih napona nego u slučaju zavarivanja čitavog šava iz jednog prolaza (slika 10)

3.2 Promena zaostalih napona u zavarenim spojevima izloženim zateznom opterećenju

Na slici 12 prikazana je promena raspodele zaostalih napona u sučeonom zavarenom spoju pri dejstvu spoljašnjeg zateznog opterećenja. Kriva 0 predstavlja početnu poprečnu raspodelu uzdužnih zaostalih napona neposredno nakon završetka procesa zavarivanja. Primenom ravnomerno raspoređenog zateznog napona intenziteta $\sigma = \sigma_1$, raspodela ukupnih napona odgovara krivoj 1. U zoni neposredno uz zavar naponi dostižu granicu razvlačenja materijala, dok se najveće povećanje napona registruje u oblastima koje su udaljenije od zavarenog spoja.

Daljim povećanjem primenjenog zateznog napona na nivo σ_2 uspostavlja se raspodela prikazana krivom 2. Povećanjem intenziteta spoljašnjeg opterećenja dolazi do postepenog ujednačavanja raspodele napona preko poprečnog preseka spoja, usled čega se uticaj zaostalih napona nastalih tokom procesa zavarivanja na ukupno naponsko stanje progresivno smanjuje.

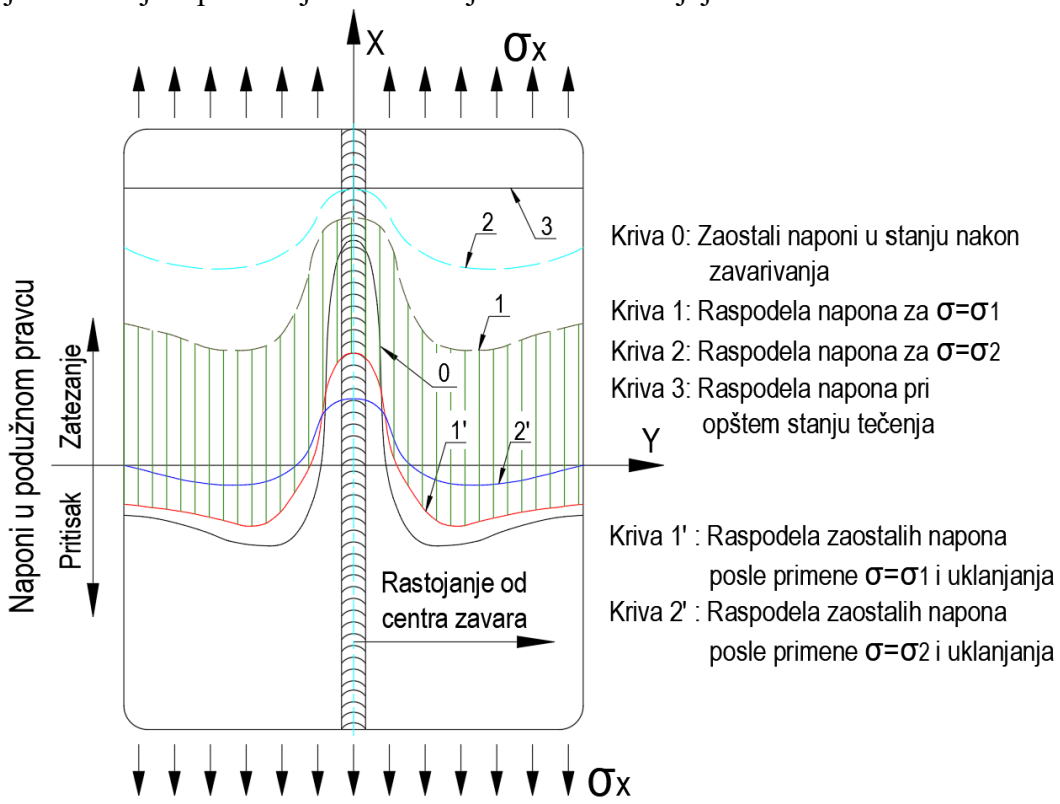
Pri daljem povećanju opterećenja nastupa opšte plastično tečenje materijala, odnosno granica razvlačenja dostiže se u celokupnom poprečnom preseku zavarenog spoja. Raspodela napona u ovom stanju prikazana je krivom 3. Nakon pojave opšteg tečenja, uticaj zaostalih napona na raspodelu ukupnih napona praktično prestaje da bude značajan.

Poseban aspekt analize odnosi se na raspodelu zaostalih napona nakon rasterećenja konstrukcije. Kriva 1′ prikazuje raspodelu zaostalih napona koja ostaje nakon uklanjanja opterećenja, ukoliko je spoj prethodno bio izložen zateznom naponu $\sigma = \sigma_1$, dok kriva 2′ predstavlja raspodelu zaostalih napona nakon rasterećenja u slučaju prethodnog opterećenja intenziteta $\sigma = \sigma_2$.

U poređenju sa početnom raspodelom zaostalih napona (kriva 0), raspodele dobijene nakon opterećenja i naknadnog rasterećenja pokazuju izraženiju ujednačenost. Sa porastom nivoa primenjenog opterećenja, raspodela zaostalih napona nakon rasterećenja postaje sve ravnomernija, što ukazuje na postepeno smanjenje uticaja zaostalih napona nastalih tokom zavarivanja na ukupno naponsko stanje konstrukcije.

Na osnovu prethodne analize mogu se izdvojiti sledeći zaključci o uticaju zaostalih napona na ponašanje zavarenih konstrukcija:

1. Uticaj zaostalih napona nastalih tokom zavarivanja najizraženiji je kod pojava koje se manifestuju pri relativno niskim nivoima spoljašnjeg opterećenja, kao što su krt lom i koroziono pucanje pod naponom.
2. Povećanjem intenziteta primenjenog opterećenja značaj zaostalih napona postepeno opada usled preraspodele ukupnog naponskog stanja.
3. Pri nivoima opterećenja koji premašuju granicu razvlačenja materijala, uticaj zaostalih napona na mehaničko ponašanje zavarenih konstrukcija može se smatrati zanemarljivim.
4. Ponavljano ciklično opterećivanje doprinosi relaksaciji zaostalih napona, usled čega se njihov uticaj na ponašanje konstrukcije dodatno smanjuje.



Slika 12: Šematski prikaz raspodele napona u sučeonom zavaru izloženom ravnomernom zateznom opterećenju i rezultujuće raspodele zaostalih napona nakon rasterećenj

ZAKLJUČAK

Često je nemoguće odrediti tačnu i zadovoljavajuću tehnologiju zavarivanja za loše i nezadovoljavajuće konstruktivno rešenje. Konstruktorski posao se ne završava na tabli za crtanje ili kompijuteru. Konstruktor, tehnolog, poslovođa u proizvodnji kao i zavarivač dele odgovornost za konačni kvalitet konstrukcije

Da bi se kontrolisale deformacije i zaostali naponi, neophodno je detaljno razumeti uticaj svakog od ova dva faktora i, u skladu s tim, pažljivo planirati postupak zavarivanja.

Najoptimalnije konstrukciono rešenje za izradu zavarenih konstrukcija predstavlja ono koje zahteva najmanji broj sastavnih elemenata i minimalnu količinu potrebnog zavarivanja. Takav pristup, pored ekonomskih prednosti, doprinosi i smanjenju pojave deformacija, pa se zbog toga preporučuje pri projektovanju zavarenih konstrukcija.

Posebnu pažnju potrebno je posvetiti izboru vrste i načina pripreme spoja, naročito kod slobodnih sučeonih spojeva, jer geometrija pripreme direktno utiče na veličinu ugaonih deformacija koje nastaju usled termičkih uticaja tokom zavarivanja.

Kod spojeva izvedenih ugaonim zavarima mogućnosti promene pripreme spoja su ograničene, pa se optimalnim konstrukcionim rešenjem prvenstveno postiže određivanje minimalnih dimenzija zavara koje obezbeđuju potrebnu nosivost spoja. Na taj način se izbegava nepotrebno povećanje količine zavarenog metala, čime se smanjuju zaostali naponi i deformacije.

Iako se deformacije nastale tokom zavarivanja ne mogu u potpunosti eliminisati samo pravilnim konstrukcionim rešenjem i izborom odgovarajućih detalja spoja, njihova primena značajno doprinosi smanjenju obima problema i olakšava sprovođenje tehnoloških mera tokom izrade konstrukcije radi postizanja zahtevanog kvaliteta i geometrijske tačnosti.

Literatura:

[1] Prof.Dr. N.N.Rykalin: Calculation of heating processes in welding, 1960 god.

[2] J.B.Andrews, M.Arita, K. Masubuchi : Analysis of thermal stress and metal movement during welding, NASA CR-6135, Massachusetts institute of technolgy.

[3] Koichi Masubuchi : Analzsis of welded structures, Massachusetts institute of technolgy USA.

[4] Canadian Welding Bureau CWB Gooderham : Welding for design engineers, Centre for Industrial Learning.

[5] Gesellschaft für Schweißtechnik International: International welding engineer IWE

[6] Nirma University: Distortion in welding.

[7] Fundamentals of Flame straightening, Technical information for flame processes. LINDA Group

[8] Welding processes: AWS Welding Handbook, 7th, Volume 2

[9] Fundamentals of Welding : AWS Welding Handbook, 7th, Volume 1

[10] https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/

[11] Prevention and Control of Distortion in Arc Welding: Lincoln Electric Company Cleveland Ohio

[12] Dr Dragan Buđevac, Mr Zlatko Marković, Mr Dragana Bogavac, Mr Dragoslav Tošić: Metalne konstrukcije, Građevinski fakultet u Beogradu

[13] H. Murakawa, 13 - Residual stress and distortion in laser welding, in Handbook of Laser Welding Technologies, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, edited by S. Katayama (Woodhead Publishing, 2013) pp. 374-398.

[14] Wei Liang, Dean Deng, Shinji Sone, Hidekazu Murakawa: Prediction of Welding Distortion by Elastic FE Analysis Using Inherent Deformation Estimated through Inverse Analysis , IIW Doc. X-1590-2005