

TOPLINSKO RAVNANJE U BRODOGRADNJI

FLAME STRAIGHTENING IN SHIPBUILDING

Vladimir JARDAS¹, Ivan MAJUREC, Sanjin ŠTIMAC

Ključne riječi: brodogradnja, deformacije, toplinsko ravnjanje, nadgrađe

Key words: shipbuilding, deformations, flame straightening, superstructure

Sažetak: Zavarivanje kao postupak spajanja brodskih elemenata danas je nezamjenjiv u procesu gradnje brodskog trupa. Ipak, spajanje zavarivanjem ima i nekih nedostataka. Svako zavarivanje izaziva unošenje topline, a samim tim i unošenje zaostalih naprezanja u konstrukciju i izaziva određene deformacije elemenata konstrukcije. Danas se ti nedostaci uspješno otklanjaju raznim postupcima.

Svrha ovoga rada je osvrt na načine otklanjanja deformacija toplinskim ravnjanjem na pojedinim elementima brodskog trupa, s posebnim naglaskom na ravnjanje nadgrađa.

U radu su prikazani osnovni fizikalni principi toplinskog ravnjanja, načini sprječavanja i smanjenja deformacija te alati koji se koriste za uklanjanje deformacija. Također su prikazane dozvoljene tolerancije odstupanja pojedinih elemenata brodske strukture, dozvoljene temperature zagrijavanja kao i primjeri iz prakse.

Summary: Welding as a main process of joining ship's elements has great advantages and from this point of view, nowadays shipbuilding can't be imagined without welding. However, welding as a process of joining, is not free of certain disadvantages. Welding causes heat input, which causes remaining internal stresses after welding and certain deformations of elements of construction. Today we can successfully solve these problems in many ways.

The main purpose of this paper is to show the solutions of solving deformation problems using flame straightening on typical ship's elements, with special attention to straightening of ship's superstructure. Basic principles of flame straightening, ways to prevent and to decrease deformations and also tools that are used for them, are presented in this article. Maximum allowed deformations on elements and permissible temperatures are also presented, as well as some practical examples.

¹ "3.MAJ" Brodogradilište d.d., Liburnijska 3, Rijeka tel. +385 51 611 137 / fax. +385 51 611 271 e – mail: welding@3maj.hr web : www.3maj.hr

1. UVOD

Pri gradnji brodskog trupa teži se optimalnom izboru postupka zavarivanja, što znači upotrebu onog postupka zavarivanja koji uz zadovoljavajuću kvalitetu zavarenih spojeva omogućuje i veću količinu nataljenog materijala u jedinici vremena (kg/h), čime se povećava produktivnost i smanjuju troškovi procesa.

Stalnim optimiziranjem projektiranja brodske konstrukcije korištenjem metode konačnih elemenata i većom primjenom čelika povišene čvrstoće, optimizirana struktura zahtjeva pravilno razrađenu tehnologiju zavarivanja. Međutim poznato je da i uz pridržavanje gore navedenog može doći do pojave zaostalih naprezanja i deformacija u konstrukciji koju zavarujemo. U konačnici ove pojave zahtjevaju dodatne radove otklanjanja deformacija i mogu znatno utjecati na izgled i kvalitetu brodskog trupa. Daljnja posljedica dodatnih radova očituje se u povećanju troškova izrade broda kao krajnjeg proizvoda koji tada postaje nekonkurentan na tržištu kakvo danas poznajemo.

2. NASTAJANJE DEFORMACIJA KOD ZAVARIVANJA

Poznato je da toplina koja se prilikom zavarivanja dovodi na radni komad uzrokuje njegovo rastezanje, a hlađenje koje slijedi nakon toga izaziva stezanje i napone u radnom komadu na kojem se izvodi zavarivanje. Navedene promjene zbivaju se u užoj zoni uz zavareni spoj i u samom zavarenom spoju, a uzrokuju pojavu unutrašnjih naprezanja i deformacija.

Deformacijama nazivamo promjene oblika i dimenzija zavarenog spoja, dijela zavarene konstrukcije ili čitave zavarene konstrukcije, koje su posljedica zavarivanja, pa često zahtjevaju dodatne radove [3].

Rastezanje i stezanje, izazvano zavarivanjem, djeluju u metalima prostorno, pa se deformacije mogu podijeliti na :

- poprečne deformacije
- uzdužne deformacije
- kutne deformacije – sučeljeni i kutni spoj

Ukoliko je radni komad koji se zavaruje slobodan, rastezanje i stezanje uzrokuje izvijanje i savijanje radnog komada. Što su elementi (limovi i profili) tanjih, to su deformacije veće, a tipičan slučaj javlja se u brodogradnji kod izrade nadgrađa broda. Debljine limova kreću se od 6 – 7 mm, a ukrepe se izrađuju u debljinama od 6 - 14 mm.

Obzirom na izneseno, u radu će detaljnije biti prikazani mehanizmi sprečavanja nastanka deformacija i njihovo otklanjanje.

2.1. Mehanizmi sprečavanja nastajanja deformacija

Pod pojmom sprečavanja deformacija podrazumijevaju se one radnje izvedene prije, tijekom ili nakon zavarivanja, a u svrhu smanjenja deformacija ili njihovog otklanjanja.

Generalno gledajući, za smanjivanje svih vrsta deformacija, potrebno je obratiti pažnju na sljedeće :

- Odabratи pogodan postupak zavarivanja.
- Izvesti dobro zavarivanje pripoja koristeći ispravan redoslijed zavarivanja istih.

- Prije zavarivanja izvesti blokiranje spoja zbog sprječavanje nastanka deformacija.
- Predgrijati spoj prije zavarivanja.
- Ukoliko je moguće izvesti predupinjanje ili preddeformaciju radnog komada.
- Strogo poštivati propisanu tehnologiju zavarivanja te propisani redoslijed zavarivanja.
- Ukoliko je došlo do pojave deformacija nakon zavarivanja, pristupiti ravnjanju na hladno, mehaničkom ravnjanju na toplo ili toplinskom ravnjanju.

U brodogradnji deformacije nastale nakon zavarivanja danas se najuspješnije otklanjaju plinskim plamenom, koristeći pritom neke od sljedećih metoda [2] :

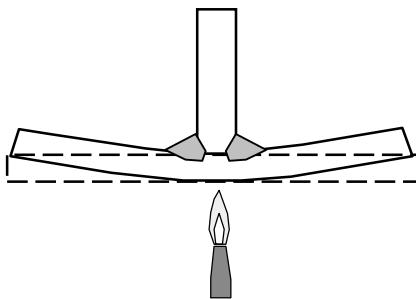
- Ubrzavanje hlađenja zagrijanog područja.
- Sabijanje plastičnog materijala sprečavanjem rastezanja.
- Mehaničko sabijanje zagrijanog područja.

3. TOPLINSKO RAVNANJE U BRODOGRADNJI PLINSKIM PLAMENOM

Pod pojmom toplinskog ravnjanja podrazumijeva se korištenje plinskog plamena za otklanjanje deformacija. Plinskim plamenom otklanjaju se deformacije nastale kao posljedica zavarivanja, dok se za otklanjanje ostalih deformacija koriste još i razni drugi brodograđevni alati.

3.1. Fizikalni princip toplinskog ravnjanja

Stezanje do kojeg je došlo na radnom komadu prilikom zavarivanja uvjetovalo je skraćenje radnog komada u području neposredno uz zavareni spoj, dok su na udaljenijim hladnim zonama dimenzije radnog komada ostale iste, što je rezultiralo pojmom deformacija.



Slika 1. Princip toplinskog ravnjanja

Da bi otklonili nastale deformacije, treba na zavarenom elementu ili produžiti skraćene zone ili skratiti produžene zone. Pošto je rastezanje skraćenih zona u većini slučajeva teško izvedivo, ravnjanje se svodi na skraćivanje dužih zona radnog komada (Slika 1.).

Da bi se skratile produžene zone, koristi se isti onaj efekt koji deformacije i izaziva, a to je stezanje i rastezanje metala koji je podvrgnut lokalnom zagrijavanju. Materijal koji se lokalno i brzo zagrijava na određenim mjestima nazvanim »toplinska mjesta«, ne može se slobodno rastezati jer se tome opire hladna okolna zona. Usljed toga dolazi do malog sabijanja hladnijeg područja uz sam rub toplinskog mjesta, a na samom toplinskom mjestu to sabijanje

je intenzivnije izraženo. Prilikom ohlađivanja dolazi do stezanja toplinskog mjesta, uslijed čega se duljina radnog komada smanjuje, pa se na taj način isti izravnava.

Danas je ravnanje još uvijek ručni posao koji zahtijeva određenu snalažljivost radnika – ravnača [2].

3.2. Dozvoljene temperature grijanja

Prema pravilima IACS standarda za izradu brodskog trupa, propisane su maksimalne temperature zagrijavanja površine materijala prema Tablici 1. [1].

Stavka		Standard	Ograničenje	Primjedba
Konvencionalni postupak AH32-EH32 & AH36-EH36 TCMP tip AH32-EH32 & AH36-EH36 (Ceq > 0,38%)	Hlađenje vodom odmah nakon grijanja	Ispod 650°C		
	Hlađenje zrakom nakon grijanja	Ispod 900°C		
	Hlađenje zrakom i naknadno hlađenje vodom nakon grijanja	Ispod 900°C (početna temp. hlađenja vodom mora biti ispod 500°C)		
TMCP tip AH32-DH32 & AH36-DH36 (Ceq ≤ 0,38%)	Hlađenje vodom odmah nakon grijanja, ili hlađenja zrakom	Ispod 1000°C		
TMCP tip EH32 & EH36 (Ceq ≤ 0,38%)	Hlađenje vodom odmah nakon grijanja ili hlađenja zrakom	Ispod 900°C		

Tablica 1. Maksimalne temperature zagrijavanja različitih materijala

3.3. Alati za plinsko ravnjanje

Kod ravnjanja plinskim plamenom toplinsko mjesto se ne smije zagrijati neograničeno, odnosno za uspješno ravnjanje važno je da se ograničeno područje radnog komada vrlo brzo zagrije na temperaturu propisanu prema standardima IACS – a.

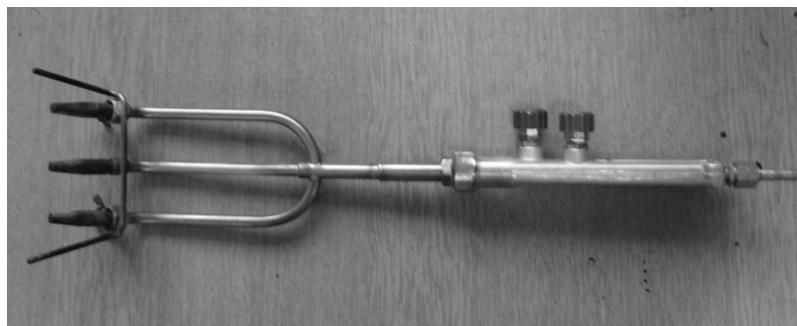
To je jedino moguće izvesti pomoću plamena kisik – acetilen koji u usporedbi s ostalim kombinacijama plinova s kisikom ima najvišu temperaturu plamena.

Plamenici za plinsko ravnjanje razlikuju se prema broju sapnica, pa prema tome postoje :
 - plamenici za plinsko ravnjanje s jednom sapnicom – veličina sapnice 8 (Slika 2.)



Slika 2. Plamenici za plinsko ravnjanje s jednom sapnicom – veličina sapnice 8

- plamenici s više sapnica – veličina sapnice 4 (Slika 3.)



Slika 3. Plamenici s više sapnica – veličina sapnice 4

3.4. Pojačavanje efekta stezanja

Stezanje materijala na zagrijanom mjestu može se pojačati na nekoliko načina :

- Ubrzavanjem hlađenja zagrijanih površina polijevanjem vodom ili hlađenjem komprimiranim zrakom.
- Mehaničkim sabijanjem zagrijanog područja.
- Sabijanjem plastičnog materijala radi onemogućavanja rastezanja.

Ovim metodama pojačava se efekt ravnjanja [2]. Nužno je obratiti pažnju na kemijski sastav materijala kojeg ravnamo. Vodom se mogu hladiti čelici sa $C_{ekv} \leq 0.38\%$ [1].

3.5. Osnovna pravila rada pri otklanjanju deformacija na tanjim limovima

Pod pojmom tanjih limova u brodogradnji, smatraju se limovi ispod 8 mm debljine. Kod ovih debljina limova deformacije nastale uslijed zavarivanja su znatne. Za uspješno izvođenje ravnjanja potrebno se pridržavati sljedećih pravila :

- Za tanje limove treba koristiti manja toplinska mjesta.
- Uvijek treba pristupiti otklanjanju deformacija na većim površinama odjednom (kompletna paluba, pregrada, stijena nadgrađa i sl.).
- Zagrijavanje treba početi na području sa manjim deformacijama i postupno se približavati područjima s većim deformacijama.

- Najveće deformacije otklanjati posljednje [2].
- Zagrijavanje toplinskih mjesta treba izvoditi brzo (da se spriječi lutanje topline po radnom komadu). Važan je izbor veličine sapnice.
- Ne smije se dva puta zagrijavati isto mjesto.
- Plamenik treba držati uvijek okomito na površinu radnog komada (kod kosog držanja iskoristivost plamena pada za 20 – 30 %).
- Plamenik treba voditi tako da se jezgrom plamena ne dodiruje površina radnog komada (može doći do oštećenja površine radnog komada).
- Kod otklanjanja deformacija u poljima između ukrepa, zagrijavanje treba izvoditi s konveksne strane deformacije (ispupčenje prema plameniku).
- Plamen treba biti sa pretičkom kisika od oko 30 %.
- Otklanjanje deformacija treba započeti nakon što su elementi strukture zavareni i nakon što su izrezani otvori (prozori, vrata, otvori i sl.).
- Temperatura zagrijanog mjesta ne smije ni u kojem slučaju prijeći temperature propisane standardima IACS – a (Tablica 1.).
- Zagrijavanje izvoditi brzo koristeći plamenik s najviše tri sapnice.
- Sa suprotne strane zavarenih ukrepa (pojačanja) nanašati isprekidane toplinske pruge u dužini od 250 – 350 mm. Razmak između toplinskih pruga treba biti oko 100 mm. Ovim načinom ravnjanja postiže se :
 - spriječavanje pojave novih deformacija na već izravnanim dijelovima konstrukcije
 - po potrebi mogu se u nezagrijana područja nanositi dodatne toplinske pruge
 - spriječava se deformiranje ukrepa u suprotnom smjeru
 - spriječava se pojавa poprečnih deformacija u susjednim poljima, koje se inače vrlo teško otklanjaju
- Zagrijavati treba u prvoj fazi svaku drugu ukrepnu.
- Kod jako izraženih deformacija mogu se ukrepe grijati ponovno, ali na taj način da se plamenik pomakne u stranu za $\frac{1}{2}$ razmaka plamenika.
- Umjesto da se drugi put zagrijavaju ukrepe, mogu se zagrijavati polja između ukrepa i to povlačenjem toplinskih pruga dužine 250 – 350 mm preko cijele površine odjednom.
- Toplinska mjesta se ni u kojem slučaju ne smiju preklapati.
- Udaranje čekićem nije dozvoljeno dok je materijal ugrijan. U tom slučaju dolazi do pojave nekontroliranih stezanja, koja mogu prouzročiti pojavu deformacija na susjednim elementima. Kada se lim ohladi na 30 – 40°C, moguće je ravnati upotrebom čekića ali obavezno uz korištenje podmetača.
- Prilikom zagrijavanja paziti da se jedan plamenik uvijek vodi točno sa suprotne strane ukrućenja – između dva kutna zavara – dok se ostali plamenovi vode odgovarajuće prema načinu iskriviljenja susjednog polja [2].

4. RAVNANJE NADGRAĐA

4.1. Osnove ravnjanja nadgrađa

Prije početka otklanjanja deformacija na nadgrađu treba se pridržavati sljedećih osnovnih pravila:

- Potrebno je napraviti mjerena i označiti deformacije.
- Odrediti oblik, broj i redoslijed zagrijavanja pojedinih toplinskih mjesta.
- Odrediti hladne zone.

Ovih pravila treba se obavezno pridržavati u praksi bez obzira na to s kakvim se plamenicima radi, odnosno kojeg su oblika i debljina radni komadi koje je potrebno izravnati. Također je prije početka ravnjanja potrebno pripaziti i na sljedeće :

- Sa radovima započeti tek kada su završeni radovi zavarivanja.
- Najprije ravnati palubu, oplatu i pregrade ispod nje.
- Sa radovima ravnjanja započeti odozdo i napredovati prema gore.

Nakon povlačenja toplinskih pruga po ukrućenjima, treba pristupiti otklanjanju deformacija u poljima između ukrepa. Redoslijed ravnjanja nadgrađa prikazan je na slici 8.

Kod paluba treba zagrijavati ona polja, koja su ispuštena prema gore, dok kod oplate (bočnih stijena) treba zagrijavati ona polja ispuštena prema vani. Kod ravnjanja vrijedi pravilo da «MANJE DEFORMACIJE VUKU VEĆE DEFORMACIJE», pa se radi toga prvo pristupa otklanjanju manjih deformacija, a nakon toga se ravnaju veće deformacije. Treba se pridržavati sljedećih pravila :

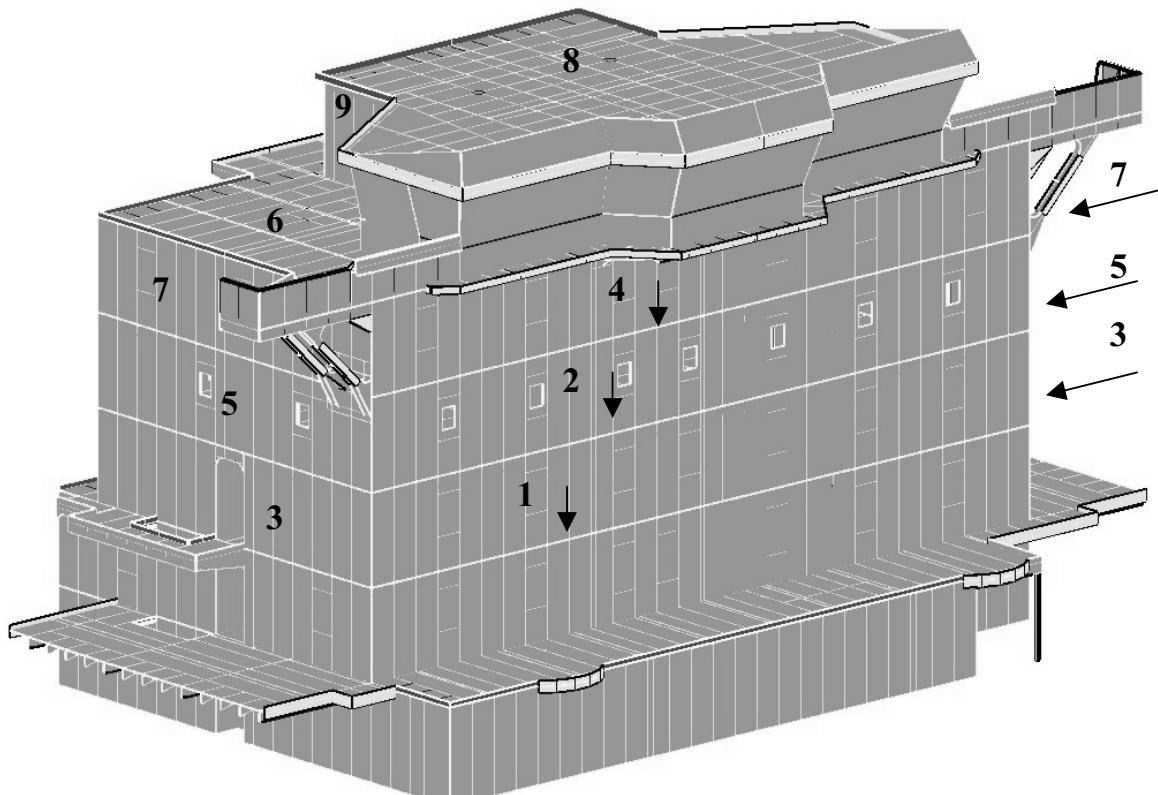
- U polju se ne smije zagrijavati više od dva do tri toplinska mjesta.
- Prvo toplinsko mjesto treba nanijeti točno na sredinu toplinskog mjeseca.
- Istovremeno treba ravnati čim veću površinu.

Toplinska mjesta treba tako rasporediti da jedna ne ometaju druga [2].

4.2. Toplinska mjesta

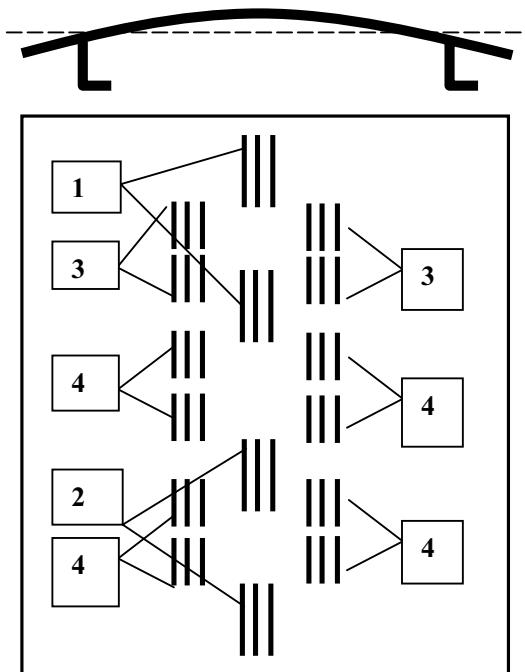
Toplinska mjesta biraju se prema veličini i obliku deformacije, pa ih prema tome možemo razvrstati kao [3] :

- Toplinska točka
- Toplinski krug (toplinska elipsa)
- Toplinska linija
- Toplinska pruga
- Toplinski pojas
- Toplinski klin (toplinski trokut)
- Toplinski polumjesec
- Toplinski krug i križ



Slika 8. Redoslijed ravnjanja nadgrađa

4.3. Ravnanje palube nadgrađa



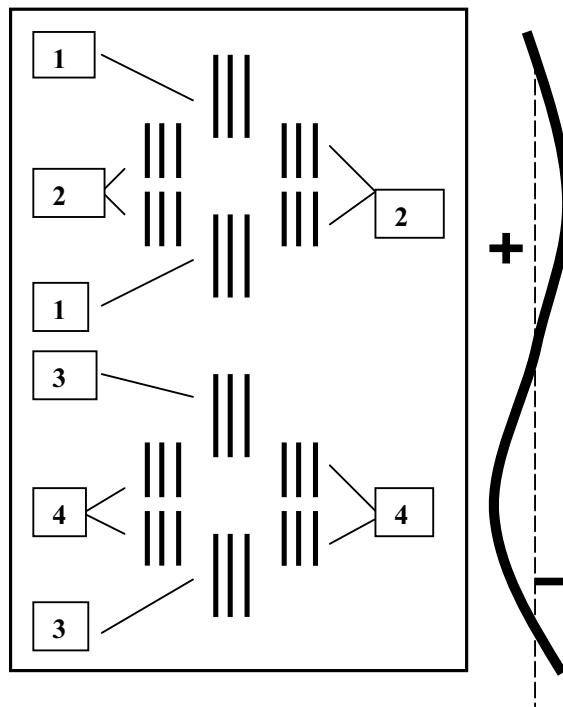
Slika 9. Paluba nadgrađa – redoslijed nanošenja toplinskih pruga na deformiranom polju

Na Slici 9. prikazan je redoslijed nanošenja toplinskih mesta na jedno polje palube, koje je jako ispupčeno prema gore.

Najprije se nanesu dva do tri toplinska mesta (zahvat br.1) u jednom polju. Kada se ta dva toplinska mesta ohlade, mogu se u nastavku povući daljnja toplinska mesta (zahvat br.2). Ukoliko nanešena toplinska mesta nisu uspjela izravnati iskrivljenje, treba pristupiti povlačenju novih dodatnih toplinskih pruga, koje se nanose bočno od ranije postavljenih toplinskih mesta. Ovakav redoslijed nanošenja toplinskih pruga vrijedi za jednakomjerna odstupanja od ravne plohe. Ukoliko su ispupčenja više ograničena na sredinu polja može se toplinska mesta postaviti bliže jedno drugome.

Ponekad je potrebno toplinske pruge naknadno poravnati drvenim čekićima ili udaranjem preko čekića podmetača, ali to treba raditi pri temperaturi koju može podnijeti ljudska ruka [2].

4.4. Ravnanje bočne stijene



Slika 10. Bočna stijena nadgrađa.

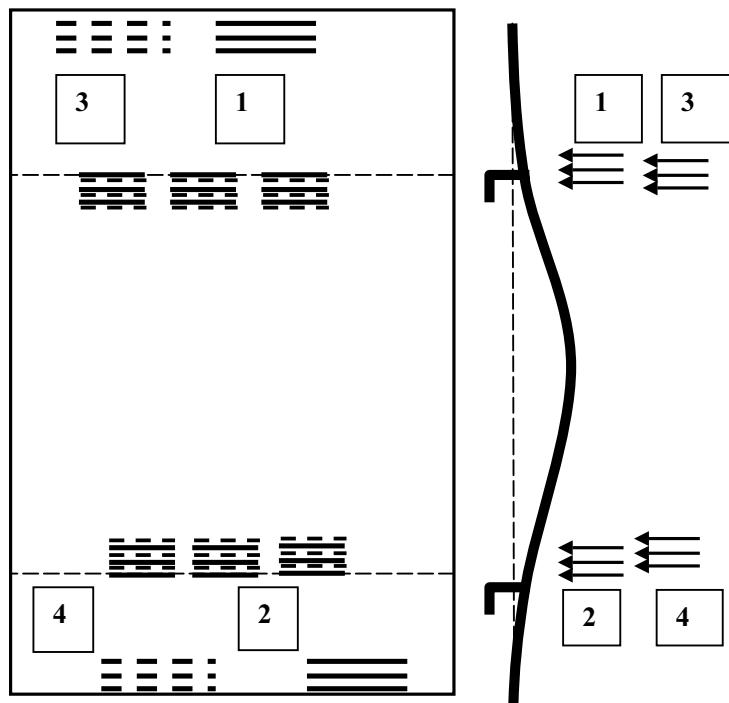
1. i 2. radni zahvati sa vanjske strane
3. i 4. radni zahvati sa unutrašnje strane

Ukoliko je neko polje deformirano tako da je gornji dio ispušten prema vani, a donji dio udubljen prema unutra (česti slučaj kod bočnih stijena nadgrađa), treba pristupiti nanošenju toplinskih mesta prema redoslijedu prikazanom na slici broj 10. Najprije treba pristupiti nanošenju toplinskih mesta na ispušteni dio bočne stijene nadgrađa i to sa vanjske strane (radni zahvati br.1 i br.2).

Donji dio koji je udubljen prema unutra treba ravnati nanošenjem toplinskih mesta iznutra (radni zahvati br.3 i br.4).

Prema potrebi može se u međuprostor nanositi dodatna toplinska mesta, a sa koje strane će se nanašati treba ocijeniti na licu mesta [2].

4.5. Ravnanje kod većih deformacija

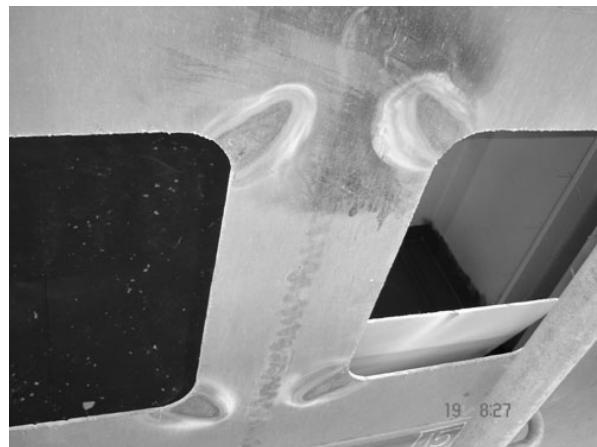


Slika 11. Ravnanje velikih deformacija

Kod većih ispuštenja, nakon toplinskih pruga, treba povući toplinske pruge još jednom. Kod drugog povlačenja toplinskih pruga, plamenik treba voditi pomaknut u stranu za pola širine plamenika i to u smjeru sredine ispuštenja. Taj slučaj prikazan je na Slici 11. [2]

4.6. Ravnanje otvora

Otklanjanje deformacija površina na kojima su izrezani otvor (prozori, vrata i sl.) provodi se na taj način da se najprije otklone kutne deformacije na ukrepama povlačenjem isprekidanih toplinskih pruga s plamenikom s jednim plamenom. Obično se koriste plamenici s tri plamena, tzv. grablje. Sljedeća faza za ravnanje zaostalih deformacija na uglovima izrezanih otvora jest postavljanje toplinskih klinova u uglove otvora prema Slici 12.



Slika 12. Ravnanje otvora

Ukoliko nakon nanošenja toplinskih pruga i toplinskih klinova zaostanu stanovite deformacije, njih se otklanja nanošenjem dodatnih toplinskih pruga.

5. DOZVOLJENE VRIJEDNOSTI DEFORMACIJA

Prema standardima IACS – a, dozvoljene su određene veličine deformacije prikazane u Tablici 2. :

Stavka		Standard	Ograničenje	Primjedba
Paluba nadgrađa	Otkriveni dio	4 mm	6 mm	Dozvoljene deformacije limova između ukrepa mjereno na duljini 300 < s < 1000
	Pokriveni dio	7 mm	9 mm	
Stijene kućica	Vanjska stijena	4 mm	6 mm	Dozvoljene deformacije limova sa ukrepama
	Unutrašnja stijena	6 mm	8 mm	
	Pokriveni dio	7 mm	9 mm	

Stavka		Standard	Ograničenje	Primjedba
Palube nadgrađa Stijene nadgrađa	-	$\pm 5 / 1000$ mm	$\pm 6 / 1000$ mm	Dozvoljene deformacije limova sa ukrepama

Tablica 2. Dozvoljene veličine deformacija

Sve deformacije koje su veće od vrijednosti u tablicama, potrebno je ravnati. U praksi deformacije izmjerene na nadgrađu prije ravnjanja kreću se do maksimalno 18 mm, mjereno od ukrepe do ukrepe na razmaku od 800 mm. Mjereno vertikalno, na bočnoj stijeni, na razmaku od cca 2,5 m, maksimalne vrijednosti deformacija su također do 18 mm.

6. ZAKLJUČAK

Kako je već prije spomenuto, ravnjanje je isključivo ručni rad koji zahtijeva utrošak dodatnih sati pri izradi proizvoda. Kako bi zorno predočili udio ravnjanja u gradnji nadgrađa broda, u Tablici 3. je prikazan utrošak sati za montažu, zavarivanje, brušenje i ravnjanje za nekoliko različitih novogradnji.

	Novogradnja 693	Novogradnja 686	Novogradnja 688
Montiranje	1603	1198	1107
Zavarivanje	2199	1364	1279
Ravnjanje	895	895	739
Brušenje	786	793	536
Plinski rezaci	98	98	67

Postotak ravnjanja u ukupnim satima za izradu nadgrađa	16 %	20 %	20 %
--	-------------	-------------	-------------

Tablica 3. Utrošak sati po pojedinim zanimanjima pri gradnji nadgrađa broda

Radi usporedbe udjela ravnjanja kod većih debljina osnovnog materijala, prikazani su predviđeni sati za izradu velike trodimenzionalne sekcije dvodna, tablica 4.

	Grupa 321	Grupa 331	Grupa 341
Utrošak sati za izradu VT sekcije dvodna	7103	12084	11416
Utrošak sati za ravnjanje	201	342	326

Postotak ravnjanja u ukupnim satima za izradu VT sekcije	2,8 %	2,8 %	2,7 %
--	--------------	--------------	--------------

Tablica 4. Udio ravnjanja pri izradi VT sekcije dvodna

Iz ovih primjera jasno se zaključuje utjecaj debljine osnovnog materijala na veličinu deformacija, te važnost ravnjanja u procesu gradnje brodskog trupa. Spomenimo da se brojnim istraživanjima u svjetskoj brodogradnji došlo do vrlo različitih podataka. Ovisno o brodogradilištu i tipu broda koje ono gradi, količina materijala trupa koji podliježe ravnjanju kreće se od 5 – 40 %, dok utrošak sati može iznositi od 5 – 10 % za predmontažu i 10 – 25 % za montažu brodskog trupa.

Pravilnim projektiranjem proizvoda, izborom tehnologije zavarivanja, redoslijeda zavarivanja te u konačnici i postupka zavarivanja možemo znatno utjecati na veličine deformacija nakon zavarivanja, odnosno svesti ih u dozvoljene okvire, čime se ušteda u vremenu i cijeni rada uvećava.

7. LITERATURA

1. IACS No 47; Shipbuilding and Repair Quality Standard; 1996 (Rev. 2004) (ISO postupak QS-D-101.12.1)
2. Nastajanje deformacija, postupci njihovog sprječavanja i otklanjanja, te smanjenja unutrašnjih naprezanja "3. MAJ" Brodogradilište d.d.
3. Ante Pavelić: "Rezanje, zavarivanje i ravnanje plamenom"; Školska knjiga Zagreb; 1991.
4. Allowable distorsions in shipbuilding plates; Bulletin Technique Du Bureau Veritas; No4; 1988.