

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA PRIMJENE METODE POPUŠTANJA  
ZAOSTALIH NAPREZANJA NA KRUTIM KONSTRUKCIJAMA  
METODOM VIBRIRANJA**

**Dejan Marić<sup>1</sup>, Tomaž Vuherer<sup>2</sup>, Josip Pavić<sup>1</sup>, Josip Majić<sup>1</sup>, Ivan Samardžić<sup>3</sup>**

<sup>1)</sup>*Duro Đaković Kompenzatori d.o.o.*

<sup>2)</sup>*Fakulteta za strojništvo Univerza v Maribor, Slovenija*

<sup>3)</sup>*Mechanical engineering faculty, University of Osijek, 35000 Slavonski Brod*

**Ključne riječi:** naprezanja, zavarivanje, vibriranje, deformacije

**Key words:** Stress, welding, vibration, deformations

**Sažetak :**

U radu je analizirana primjena metode vibriranja za smanjenje zaostalih naprezanja kod zavarivanja. Da bi se utvrdila stvarna djelovanja smanjenja zaostalih naprezanja u konstrukciji metodom vibriranja izведен je eksperiment. Eksperiment je izvršen na kritičnom dijelu konstrukcije transportnog vozila serije 2700. U eksperimentu se prvo izvršilo mjerjenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja te nakon procesa vibriranja. Predstavljena je metoda smanjenja naprezanja vibriranjem.

**Abstract:**

The study analyzes application of the method for vibration reduction of residual stresses in welds. In order to determine the real action to reduce residual stresses in the structure by vibration experiment was performed. The experiment was performed on the critical part of the construction of the transport vehicle series the 2700. In the experiment, the first committed measuring residual stress after welding and then after the process of vibration. The method of reducing stresses with vibration are described .

**1. UVOD**

Tretman vibracijama prilikom zavarivanja ili nakon zavarivanja smanjuje mogućnost nastajanja krhkog loma, tako da se u objekt pomoću niskih vibracija unosi visoka amplituda energije. Najefikasnije vibracije su rezonantne, jer su rezonantne frekvencije vibracija bolje distribuirane ako se usporedi s pod-rezonantnim frekvencijama. Frekvencija vibriranja pojačava se dok se ne otkrije rezonantna frekvencija objekta. Teoretski ne smije se objekt zadržavati na toj frekvenciji jer bi došlo do kidanja, pa se stoga frekvencija tretmana smanjuje na nižu frekvenciju od rezonantne. Time se postiže maksimalan unos energije, a koji neće oštetiti predmet obrade. Proces je brz, čist i vrlo energetski učinkovit. Zamišljen je kao alat za upotrebu od strane osoblja i prilagodljiv je za većinu proizvodnih okruženja. Također je prenosiv na licu mjesta ili za primjenu na terenu. Niske frekvencije vibracija nose visoke amplitude energije i vrlo su učinkovite u značajnom smanjenju vršnih zaostalih naprezanja u metalnim dijelovima i zavarima. Ako je struktura predmet obrade vrlo velika, te ako je dug ili ima neki otvoreni prostor biti će možda potrebno primjenjivati postupak u nekoliko točaka. Ovaj postupak je dobar pri obradi predmeta koji su težine do deset tona. Za sve one predmet obrade koji su teži od deset tona moguće je korištenje metode u dva uzastopna petnaest minutna razdoblja, bez pojave bilo kakvih šteta na predmetu. Pri korištenju metode potrebno je slijediti dva pravila: a) Postavljanje predmet na najbolji mogući način, izoliranje od poda ili krute strukture ostavljajući ga slobodnim za vibriranje. b) Vibrator treba biti izravno spojen na predmet obrade, kako bi se prenijela cijela energija vibriranja na proizvod.

Metoda se može koristiti za širok spektar obojenih metala, uključujući i ugljične i nehrđajuće čelike, lijevano željezo, aluminij, titan i sl., te za veliku raznolikost oblika. Metodu je moguće

primjeniti tijekom zavarivanja što je korisno jer se na taj način mogu spriječiti djelovanja zaostalih naprezanja koja mogu uzrokovati savijanje predmeta obrade. Posebno je kompatibilna s REL,MAG i TIG metodama zavarivanja.

## 2. PLAN I PROVEDBA MJERENJA

Mjerenje zaostalih naprezanja na kritičnim dijelovima konstrukcije transportnog vozila serije 2700 izvedeno je nakon zavarivanja magnetskom metodom.

Nakon čeka je na predmetu izvršeno smanjivanje zaostalih naprezanja metodom vibriranja.

Te su izvedena mjerenja učinka djelovanja vibro metode na ovaj tip konstrukcije magnetskom metodom.



Slika 1.1 Prikaz kritičnoga dijela na kojem je došlo do pojave pukotine

### Opis konstrukcijskog dijela

Teretna vozila se kreće od 40, 50, 60, 80, 100, 120 tona. Kapacitet vozila je do 90 tona tekućeg željeza ili željezne rude.

### Materijal

Osnovni materijal – za osnovni materijal smo upotrijebili niskougljični čelik ST 52-3 N. To je čelik visoke čvrstoće, koji se lako može zavarivati s drugim čelicima. Sa svojim niskim ekvivalentom ugljika ima dobra svojstva za hladno oblikovanje. Svoju primjenu pronalazi pri izradi strojnih dijelova, dizalica, zgrada, mostova itd. Dimenzije isporučenoga čelika dane su u tablici 1.1.

Tablica 2.1 Dimenzije osnovnoga materijala

Debljina [mm]	40
Širina [mm]	2500
Duljina [mm]	12000
Masa [kg]	9420

Kemijski sastav čelika ST 52-3 N po atestu proizvođača Željezarne Jesenice je dan u tablici 1.2.

Tablica 2.2 Kemijski sastav osnovnoga materijala iz atesta

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Nb [%]	V [%]	Mo [%]
0,072	0,279	1,532	0,013	0,0027	0,035	0,050	0,002	0,005
Ni [%]	Cr [%]	Cu [%]	Ti [%]					
0,024	0,183	0,019	0,027					

**Tablica 2.3 Rezultati vlačnoga testa**

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Istezanje [%]	Udarna žilavost (V-zareza) pri -20°C [J]
459	551	25,40	152, 146, 28

Čelik S355J2+N je isporučen po Euro Normama (EN) - EN standard 10025-2 (Europski standard za vruće valjane proizvode iz nelegiranih konstrukcijskih čelika kojima se definiraju tehnički uvjeti isporuke), te prema EN standardu 10029 (Europski standard za vruće valjane čelične ploče debljine od 3 mm i više koji definira granično odstupanje dimenzija i tolerancija oblika (debljina od 3 do 250 mm, širina od 600 do 3000 mm)).

Dodatni materijal – korištena je žica VAC 60 primjerena za zavarivanje u zaštitnom plinu MAG postupkom. Pogodna je za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 530 N/mm<sup>2</sup>. Također, koristi se za zavarivanje kotlovskeh limova, cijevi, čelika za brodogradnju, mikrolegiranih čelika i čeličnih limova. CTOD - atestirana (VAC 60 žica) žica u obliku štapova za zavarivanje TIG postupkom se najviše koristi za zavarivanje korijena zavara.

**Tablica 2.4 Kemijski sastav dodatnoga materijala VAC 60**

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,08	0,90	1,50	<0,025	<0,025

**Tablica 2.5 Mehanička svojstva dodatnoga materijala VAC 60**

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Istezanje $A_5$ [%]	Žilavost $A_v$ pri -40 20°C [J]
>410	510 – 590	>22	>47

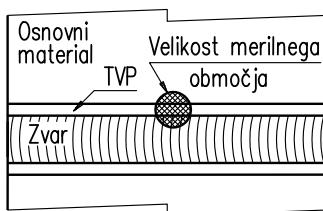
### **3. MJERENJE RAZLIKE ZAOSTALIH GLAVNIH NAPREZANJA MAGNETNOM METODOM**

Kada je predmet obrade izведен prema zadanim nacrtima i tehnologiji, pristupa se mjerenu zaostalih naprezanja magnetskom metodom.

Metodom se mjeri magnetska permeabilnost u određenim točkama koje su prije samoga procesa mjerjenja utvrđene (Slika 3.4). Pri mjerenu promatraju se maksimalne vrijednosti i minimalne vrijednosti magnetske permeabilnosti.

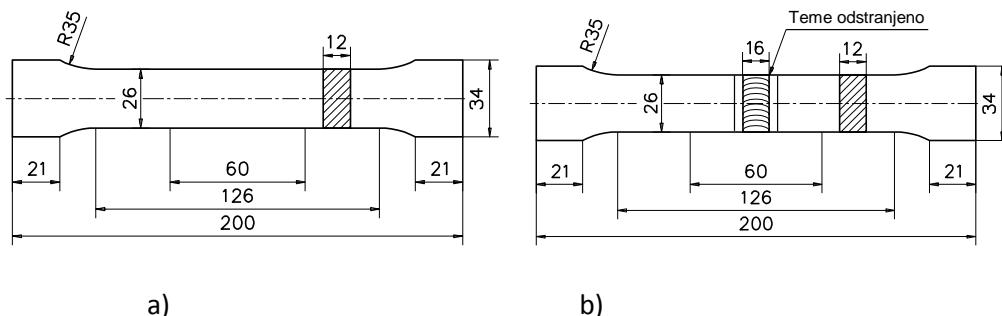
Za precizno mjerjenje zaostalih naprezanja magnetskom metodom, potrebno je izvršiti kalibraciju prije mjerjenja kako bi se dobila ovisnost magnetskih varijabli (permeabilnosti) i zaostalih naprezanja. Pri kalibraciji dobivamo kalibracijsku krivulju, koja povezuje spomenute veličine. Svaki materijal ima drugu kalibracijsku krivulju, stoga se za svaki materijal zasebno prije mjerena mora izvršiti kalibracija.

Problem koji se pojavljuje kod zavarenih spojeva je u tome što je kalibracijska krivulja drugačija za osnovni materijal, područje oko zavara (TVP) i sam zavora. Kalibracija se stoga vrši za svako područje (i materijal) zasebno. Međutim kako je područje oko zavara (TVP) jako usko na tom se području ne vrši kalibracije nego samo na osnovnom materijalu i zavaru.



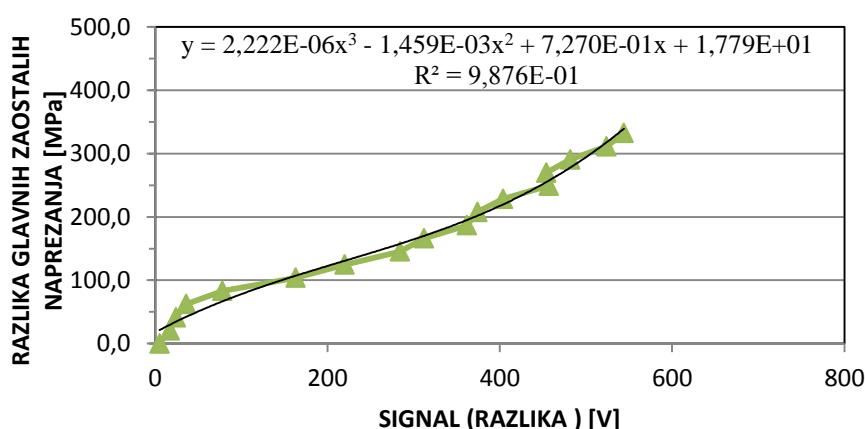
*Slika 3.1 Prikaz osnovnoga materijala, zone zavara te zone oko zavara TVP koj pri kalibraciji uzrokuje probleme*

Na zavarenom uzorku iz kojega vršimo vlačni pokus došlo je do magnetiziranja, to mijenja relativnu magnetsku permeabilnost materijala i na taj način utječe na mjerjenje zaostalih naprezanja. Oba uzorka potrebno je prethodno žariti dva sata na temperaturi od  $620^{\circ}\text{C}$  kako bi se smanjila zaostala naprezanja na minimum. Onda smo izvršili demagnetizaciju u izmjeničnom magnetskom polju da bi se eliminirao utjecaj magnetizacije pri zavarivanju. Izgled uzorka za vlačni pokus, koji su korišteni za kalibraciju je prikazan na slici 3.2.



*Slika 3.2 Izgled uzorka za vlačni pokus: a) osnovni materijala b) s zavarom u sredini*

Pripremljeni vlačni uzorci se stavljuju u stroj za vlačni pokus i postupno opterećujemo silom koja odgovara naprezanju  $0,8R_{p0,2}$  osnovnog materijala. Pri svakoj promjeni sile mjeri se i relativna magnetska permeabilnost. Iz geometrije uzorka i vlačnih sila dobivaju se naprezanja u svakoj fazi opterećenja. Iz dobivenih podataka možemo izvući dijagram relativne magnetske permeabilnosti kao funkciju naprezanja  $\sigma$ . Kroz dobivene točke nacrtava se krivulja, kao na slici 3.3 na kojoj je iz izmjerene relativne magnetske permeabilnosti izračunata zaostala naprezanja za jednoosno stanje naprezanja.

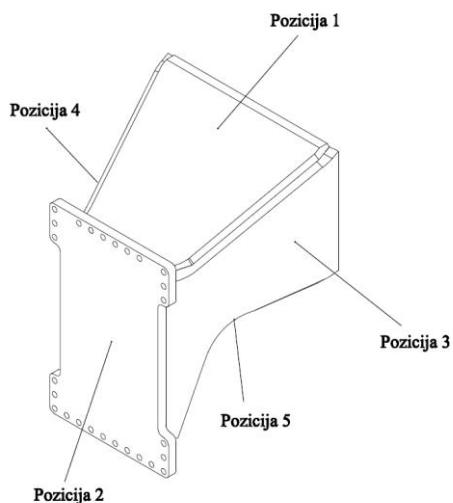


*Slika 3.3 Kalibracijski dijagram*



Slika 3.4 Označavanje predmeta prije provođenja mjerenja

Kada se izvrši mjerenje po svim točkama koje su prethodno utvrđene podaci se unose u tablicu gdje se izvršava analiza dobivenih rezultata.



Slika 3.5 Izgled sklopa podijeljen po pozicijama

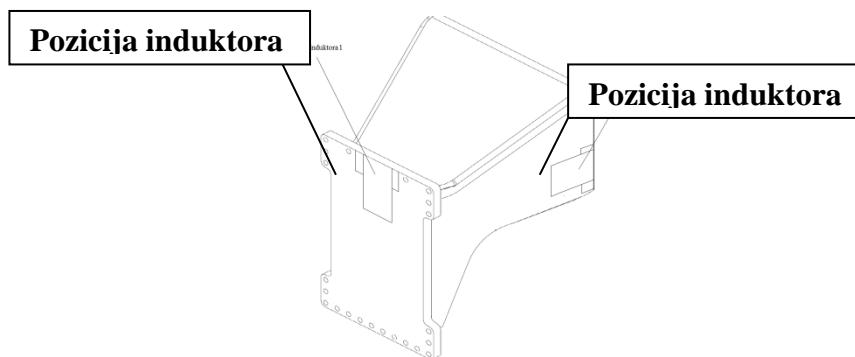
Iz rezultata je vidljivo da su zaostala naprezanja najveća u području gdje je konstrukcija najkruća te je prilikom unošenja topline sprječeno istezanje ili stezanje konstrukcije. Također je vidljivo da je na tom području proces zavarivanja konstrukcije započinjao i to tako što se zavarivalo prvo u jednu potom u drugu stranu, što znači da se na istome mjestu toplina prilikom procesa zavarivanja unosila dva puta što je također djelovalo da su zaostala naprezanja u tom području dosegla najveće vrijednosti.

Kada smo izvršili mjerenja magnetskom metodom poslije procesa zavarivanja, utvrdila su se stvarna naprezanja u samome predmetu. Prilikom mjerenja kut  $\alpha$  je uziman proizvoljno na smjer koji smo prethodno odredili i koji je po pojedinoj poziciji ucrtan, stoga vrijednost kuta  $\alpha$  nismo uzimali u obzir prilikom analize rezultata.

Zaostala naprezanja u predmetu svoje maksimalne vrijednosti dostizale su na mjestima gdje je zavar započinjao. Na mjestima gdje je zavar završavao pokazalo se da su se zaostala naprezanja smanjivala. Na mjestima gdje su zaostala naprezanja bila maksimalna bila su u vrijednosti od oko 80%  $R_{p0,2}$  osnovnog materijala. Budući da su vrijednosti zaostalih naprezanja dosta velika izvedeno je popuštanje zaostalih naprezanja metodom vibriranja.

#### 4. VIBRIRANJE

Vibriranje predmeta izvršeno je na dvije pozicije. Pozicije postavljanja induktora su prikazane na slici 4.1.



*Slika 4.1 Pozicija 1 i pozicija 2 postavljanja ekscentra*

Kada smo odredili pozicije na koje ćemo postaviti davač sile (induktor) koji ovisi o geometrijskim karakteristikama konstrukcije. Predmet je potrebno izolirati pomoću gumenih jastučića velike gustoće, jastučići se stavljuju pod svaki kut izratka. Sljedeći korak je postavljanje davača sile na predmet te njegovo stezanje pomoću hvataljki. Kada je pozicioniran davač sile na udaljenost od najmanje 1m od davača sile pozicionira se i sonda preko koje se vrši očitanje frekvencije. Kako bi se uspješno izvršilo vibriranje u programske softver unoše se podaci o samoj konstrukciji (dimenzije, masa, vrsta materijala), te se nakon toga postavlja vrijednost ekscentrika težine. Pošto su izvršene sve pred radnje može se pristupiti samome popuštanju naprezanja metodom vibriranja. Vibriranje se izvodi tako da se utvrde vrijednosti rezonantnih frekvencija predmeta te se nakon toga vrši popuštanje predmeta sa pod-rezonantnim frekvencijama koje je programsko sučelje odredilo. Popuštanje predmet obrade vrši se sve dok se razlika vrijednosti rezonantnih frekvencija između dva intervala ne snize ispod 1Hz. U tablici 4.1 i tablici 4.2 dani su podaci za procese vibriranja predmeta kada se induktor nalazi u poziciji 1 te u poziciji 2.

*Tablica 4.1 Podaci vibriranja 1 kada je pozicija induktora 1*

Ukupan broj skeniranja	Početno skeniranje	Krajnje skeniranje	Rezultati skeniranja	
Rezonantna frekvencija	79,4 Hz	77,5 Hz	Razlika rez. frekvencija	1,9 Hz
Pod-rezonantna frekvencija	72,6 Hz	72,5 Hz	Razlika amplituda	27,7
Amplituda	83,9	111,6	Ekscentrik	30%
Vrijeme	10:00	10:00	Ukupno vrijeme	30:00

*Tablica 4.2 Podaci vibriranja 2 kada je pozicija induktora 2*

Ukupan broj skeniranja	Početno skeniranje	Krajnje skeniranje	Rezultati skeniranja	
Rezonantna frekvencija	70,1 Hz	70,8 Hz	Razlika rez. frekvencija	0,7 Hz
Pod-rezonantna frekvencija	64,8 Hz	64,9 Hz	Razlika amplituda	6,7
Amplituda	100,00	106,7	Ekscentrik	30%

Vrijeme	10:00	10:00	Ukupno vrijeme	20:00
---------	-------	-------	----------------	-------

Proces vibriranja izvodio se sve dok se razlika rezonantnih frekvencija nije spustila ispod vrijednosti 1 Hz. U prvome slučaju je bilo potrebno izvršiti tri ciklusa popuštanja dok je u drugom slučaju kada su i vrijednosti samih rezonantnih frekvencija bile umanjene trebalo vršiti dva ciklusa po 10 minuta da bi se razlika između rezonantnih frekvencija smanjila ispod 1 Hz tada se radilo o vrijednosti 0,7 Hz.



(a)



(b)

*Slika 4.1 Proces vibriranja predmeta : a) pozicija induktora 1, b) pozicija induktora 2*

Prilikom drugoga procesa popuštanja zaostalih naprezanja u poziciji 2, postizanje rezonantnih frekvencija je bilo nešto teže, te je tek iz nekoliko pokušaja uspjela se utvrditi rezonantna frekvencija, a sve je to posljedica toga što u tom dijelu konstrukcija nije kruta a iz slike 4.2 može se vidjeti kako stranica na kojoj se nalazi uredaj ostala slobodna prilikom konstruiranja.



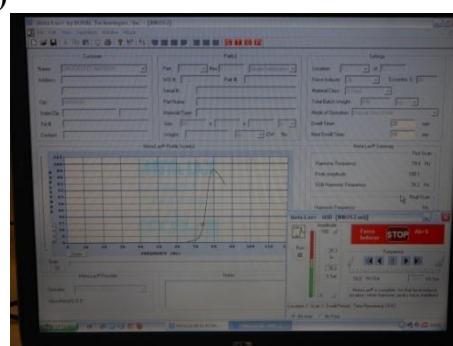
(a)



(b)



(c)



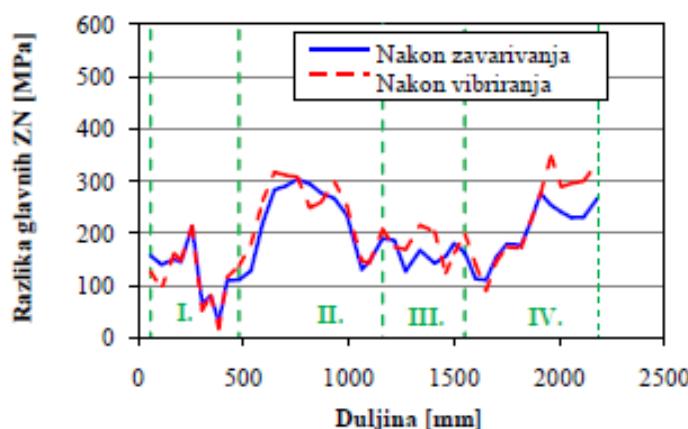
(d)

*Slika 4.2 Faze vibriranja*

( (a) postavljanje induktora , (b)namještanje parametara , (c)vibriranje , (d) dobiveni rezultati)

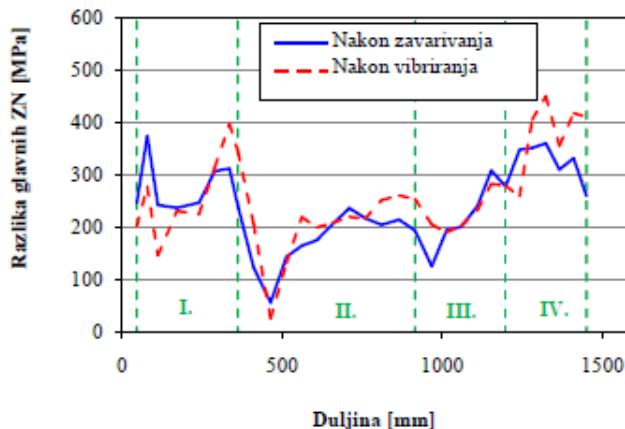
## 5. DOBIVENI REZULTATI

Nakon što je izvršeno popuštanje zaostalih naprezanja metodom vibriranja. Metodom magnetske permeabilnosti izvršeno je ponovno mjerjenje razlike zaostalih glavnih naprezanja da bi se utvrdilo stvarno stanje djelovanja metode vibriranja na ovakav tip konstrukcije. Mjerjenje je izvršeno na svim pozicijama i točkama kako je vršeno i prije procesa vibriranja. Rezultati dobivenih vrijednosti naprezanja dane su za pozicije na kojima je direktno bio pozicioniran induktor.



Slika 5.1 Pozicija induktora 1 - usporedba rezultata prije i poslije vibriranja

Iz dijagrama sa slike 5.1 uočava se da je popuštanje zaostalih naprezanja u nekim područjima izazvalo kontra efekt. Iz slike 4.1 uočava se da je ovo pozicija koja je ujedno i najkruća te je sa sve četiri strane izvršeno zavarivanje. U područjima koji su najviše bili izloženi utjecaju vibriranja naprezanja su ostala u granicama kao i poslije zavarivanja. Tek nešto veće vrijednosti porasta dogodile su se u području IV. koje je ujedno bilo izloženo utjecaju vibriranja sa dvije strane, dok se na početku područja I. mogu vidjeti nešto manja naprezanja jer je tu ujedno i najmanji utjecaj vibro uređaja.



Slika 5.2 Pozicija induktora 2 - usporedba rezultata prije i poslije vibriranja

Iz dijagrama sa slike 5.2 uočava se da je popuštanje zaostalih naprezanja u nekim područjima izazvalo kontra efekt. Tamo gdje smo imali najveći utjecaj vibro uređaja naprezanja su porasla a ona udaljenija od uređaja su imala za posljedicu smanjenje razlike glavnih zaostalih naprezanja

## **6. ZAKLJUČAK**

Da bismo osigurali da konstrukcija prilikom svoje eksploatacije bude što sigurnija potrebno je određenim metodama za smanjivanje zaostalih naprezanja smanjiti njihov utjecaj na konstrukciju. Jedna od metoda koja se nameće prvenstveno sa stajališta ekonomске isplativosti je metoda vibriranja. Utvrđivanje kvalitete te isplativosti metode izvršeno je eksperimentalnim putem a prema dobivenim rezultatima razlike glavnih zaostalih naprezanja magnetskom metodom u konstrukciji se u nekim područjima mogu uočiti razlike glavnih zaostalih naprezanja koja dosežu vrijednosti od 80%  $R_{p0,2}$  osnovnoga materijala. Pošto su te vrijednosti dobivene kada konstrukcija nije opterećena vrijednosti su dosta velike. Da bi se konstrukcija mogla na adekvatan način koristiti potrebno je tehnologiju zavarivanja korigirati, te konstrukciju podvrgnuti naknadnom popuštanju zaostalih naprezanja nekom od metoda. Naprezanja su i popuštana metodom vibriranja prvo na poziciji 1, potom na poziciji 2 kako se može i vidjeti iz slike 4.1. Nakon vibriranja izvršeno je mjerjenje istom metodom (magnetskom metodom) razlike zaostalih glavnih naprezanja. Rezultati koje je pokazala ova metoda popuštanja zaostalih naprezanja na ovakav tip konstrukcije su dani u točki 5. Prema dobivenim vrijednostima razlika glavnih zaostalih naprezanja i dijagrama uviđa se u nekim područjima porast naprezanja i iznad vrijednosti  $R_{p0,2}$ . Područja koja su bila izložena najvećem utjecaju vibro uređaja za posljedicu su imala porast razlike glavnih zaostalih naprezanja, dok je u područjima gdje je taj utjecaj dosta oslabljen došlo do pada razlike glavnih zaostalih naprezanja. Prema tome pozicije vibro uređaja prema slici 4.1 nisu adekvatne jer u onim zonama gdje su zaostala naprezanja i bila najveća poslije zavarivanja nije uslijedio pad nego porast zaostalih naprezanja. Da bi se osiguralo što bolje popuštanje zaostalih naprezanja ovakvom metodom na jako krute konstrukcije potrebno je izvršiti promjenu u samome pristupu izvođenja metode vibriranja i pozicioniranja samoga induktora na predmet obrade.

## **7. LITERATURA**

- [1] Alfirević, Ivo: *Nauka o čvrstoći I.* Jtp Zagreb, „Tehnička knjiga „, d.d., 1995., str. 318
- [2] Lukačević, Zvonimir: *Zavarivanje.* Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 1998. 264 str.
- [3] Marić, Dejan: *Smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija u zavarenim konstrukcijama.* Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2012. 88 str.