

## DOPRINOS RAZVOJU METODE RELAKSACIJE ZAOSTALIH ZAVARIVAČKIH NAPONA NA METALNIM KONSTRUKCIJAMA

### CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF WELDING RESIDUAL STRESS RELAXATION METHOD IN METALLIC STRUCTURES

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 621.791.05:539.319

Rad primljen / Paper received: 27.11.2005.

Adresa autora / Author's address:

<sup>1)</sup> Fakultet strojarstva i računarstva, Mostar, BiH (Faculty of Mech. Engng. and Computer Science – University of Mostar, Bosnia and Herzegovina)

<sup>2)</sup> Tehnološki centar, Split, Hrvatska (Technology Center – Split, Croatia)

<sup>3)</sup> Ministarstvo industrije HNK FBiH, Sarajevo, BiH (Ministry of Industry HNK FBH – Sarajevo, Bosnia and Herzegovina)

<sup>4)</sup> Mašinski fakultet, Mostar, BiH (Faculty of Mech. Engng. – Mostar, Bosnia and Herzegovina)

#### Ključne reči

- zavarena konstrukcija
- zaostali naponi
- relaksacija
- vibriranje

#### Izvod

Rad prikazuje rezultate istraživanja razvoja metoda vibrorelaksacije zaostalih napona u zavarenim spojevima složenih prostornih metalnih konstrukcija. Simulacijom učinka vibriranja birani su radni parametri i položaji vibratora za svaku konkretnu konstrukciju. Rezultati teorijskih postavki su potvrđeni eksperimentalnim istraživanja na konstrukcijama složenog prostornog oblika velikih masa. Učinci relaksacije ukazuju na prihvatljivost metode za slučaj obrade i najloženijih konstrukcija.

#### UVOD

Globalizacija svetskog tržišta, uz razvoj informacionih sistema, uslovili su jaku konkurenčiju u proizvodnji metalnih konstrukcija i procesne opreme. U novim uslovima opstanak i razvoj mogu osigurati samo one firme koje kroz konstrukcijsku koncepciju i tehnološku realizaciju ponude tržištu kvalitetan i jeftin proizvod. Ovaj cilj se može ostvariti samo optimizacijom kako konstrukcijskog tako i tehnološkog rešenja konstrukcije. U projektnom smislu optimalna konstrukcija mora da zadovolji kriterijum minimalnih masa, tako da svaki element konstrukcije, za tačno definisanje uslova rada, bude u području minimalno dopuštenog koeficijenta sigurnosti, odnosno maksimalno dopuštenih naponsko-deformacijskih stanja. Tehnologija izrade i montaže utiče na pojavu dodatnih naponskih stanja koji mogu ugroziti projektovanu stabilnost konstrukcije, ako su ta stanja nepoznata projektantu.

Tehnika zavarivanja je dominantna u tehnologiji izrade metalnih konstrukcija raznih primena, pa se uticaj zaostalih napona unetih zavarivanjem mora konstrukcijski i tehnološki definisati pri optimizaciji konstrukcija.

#### Keywords

- welded structure
- residual stresses
- relaxation
- vibration

#### Abstract

The paper presents results of research for developing the method for vibrational relaxation of residual stresses in welded joints of complex spatial metallic structures. Working parameters and locations of vibrators are selected for considered a structure by simulating vibrational effects. Results of theoretical analyses are confirmed experimentally on complex spatial structures of large mass. Effects of vibrational relaxation indicate the applicability of proposed method for treating most complex structures.

#### INTRODUCTION

Globalization of world market followed by development of informatics systems has set open a strong competition in the production of metallic structures and processing equipment. In new conditions only those companies offering quality and cheap products through design conception and technological realisation can assure survival and development. This goal may be achieved only by optimising design and technological solutions of structure. In the design sense an optimal structure must satisfy minimal mass criterion so that minimal safety margin is reached for each structural element for exactly defined operating conditions, within the maximal allowable stress-strain state. The manufacturing and assembling technology affects the occurrence of additional stress states that can endanger the designed structural stability, if the designer is not familiar with these states.

The technique of welding has a dominant role in the manufacture of metallic structures for various applications, and the effect of residual stresses involved by welding has to be defined by optimisation in structural and technology design.

S obzirom na poznati nivo i predznak zaostalih napona za kvalifikovanu tehnologiju zavarivanja, konstruktor ih može ukomponovati uz radna naponska stanja ako su ispravno detektovani i imaju nisku vrednost, ili ih isključiti iz proračuna ako su uklonjeni iz konstrukcije pogodnim tehnološkim rešenjem. Klasični postupak otpuštanja zaostalih zavarivačkih napona termičkom obradom na složenim konstrukcijama velikih dimenzija rapidno povećava cenu konstrukcije, što joj umanjuje konkurentnost na tržištu.

Metoda vibrarelaksacije zaostalih napona još nije prisutna u industrijskoj praksi zemalja Balkana, jer postoji opravданa bojazan od uticaja vibracija na zamor konstrukcije usled nekontrolisanog tehnološkog procesa.

Cilj ovog rada je da prikaže primenu ove metode na složenim konstrukcijama i njen uticaj na otpuštanje zaostalih napona i sniženje cene konstrukcije.

## OPIS PROBLEMA

U periodu 1985–1991, "Vazduhoplovna industrija Soko" – Mostar, razvijala je saradnju u proizvodnji sa vodećim svetskim proizvođačima putničkih aviona (Boing, Aerospatiale, Mekdonal Douglas, Iljušin). Pored izrade delova aviona saradnja se realizovala i u području izrade alata za montažu avionskih konstrukcija. Karakteristike ovih konstrukcija, zavisno od uslova montaže, su veoma uske tolerancije repernih tačaka (0,01 mm), na alatima vrlo velikih dimenzija (3–14 m). Konstrukcije alata su dimenzionisane na bazi zadatih deformacija, pa su njihove krutosti izrazito visoke. Tehnologija izrade je bazirana na tehnicu zavarivanja, što je za posledicu imalo unošenje značajnih zaostalih napona. Otpuštanje zaostalih napona termičkom obradom nije prihvaćeno zbog velikih troškova.

Po zahtevu uprave Industrije "Soko", Institut za mašinstvo Mašinskog fakulteta u Mostaru razvio je metodu otpuštanja zaostalih napona unošenjem mehaničke energije u konstrukciju, /1/. Rezultati istraživanja pokazali su efikasnost ove metode na uzorcima malih dimenzija sa uklanjanjem zaostalih napona na nivou 20–80%. Dalji razvoj metode je omogućio njenu efikasnu primenu i na konstrukcije velikih dimenzija, /2,3/. Provera primenjene metode nastavljena je posle 2001. na konstrukcijama glavnih kranskih nosača i nosećih konstrukcija drumskih mostova. Rezultati relaksacije zaostalih napona pokazali su uspešnost metode i na ovim tipovima konstrukcija.

Razvoju metode i njenoj primeni posebna pažnja je posvećena u brojnim navodima literature na ruskom jeziku /4–11/. U tim radovima autori su došli do najpovoljnijih parametara vibrarelaksacije u pogledu frekvencija i amplituda mehaničkog impulsa, kao i u pogledu vremena obrade. Radna frekvencija je reda 0,9–1,1 sopstvene frekvencije elementa konstrukcije, amplituda pomeranja konstrukcije je 0,1–0,9 mm a vreme obrade je nekoliko desetina minuta. Parametri sličnih veličina su primenjeni i u razvoju prikazane metode.

## POSTUPAK RELAKSACIJE

Izvođenje postupka relaksacije zaostalih napona na nekoj složenoj konstrukciji zahteva realizaciju njegove dve faze:

- faze simulacije tehnologije, i
- faze izvođenja postupka.

Having in mind that the level and sign of residual stresses for qualified welding technology are known, the designer can combine them with working stresses if properly detected and if they have low value, or to exclude them from the calculation if they are eliminated from the structure by convenient solution technology. Classical method of welding residual stress relaxation by heat treatment on large complex structures rapidly increases the price of the structure and reduces its competitiveness on the market.

The vibrational relaxation method for residual stresses is yet not practiced in industries of Balkan countries since vibrational effects on structural fatigue poses reasonable fear, due to uncontrolled process technology.

The aim of this paper is to present applications of this method to complex structures and the effect on residual stress relaxation and cost reduction of structures.

## THE DESCRIPTION OF THE PROBLEM

In the period 1985–1991 "Aircraft Industry Soko" – Mostar developed cooperation with world leading passenger plane manufacturers (Boeing, Aerospatiale, McDonnell Douglas, Ilyushin). In addition to airplane components, the cooperation included manufacture of tools for airplane structural assembly. Properties of these structures, depending on assembly conditions, are very narrow tolerances of referral points (0.01 mm) on tools of large size (3–14 m). Tool design and size are based on specified strains, so their stiffness is extremely high. Manufacturing technology is based on welding techniques, involving significant residual stresses as a consequence. Residual stress relaxation by heat treatment is not accepted due to high expenses.

Following the requests of "Soko" Industry management, the Institute for Machinery at the Mechanical Engineering Faculty–Mostar developed residual stress relaxation method by applying mechanical energy into the structure, /1/. Research results confirm efficiency of this method on small size samples, relieving residual stresses down to 20–80%. Further development of this method enabled its efficient application also on structures of large size /2,3/. The verification of the applied method has continued after the year 2001 on crane and of road bridge supporting structures. The results of residual stress relaxation have confirmed the efficiency of the method also for these types of structures.

Special attention to the development of the method and its application is paid in Russian references /4–11/. In these papers, the authors reported optimal parameters of vibrational relaxation regarding frequency and amplitude of the mechanical pulsing, and treatment period. The operating frequency is of the order 0.9–1.1 of the structural element eigen-frequency, the amplitude of structural displacement is 0.1–0.9 mm, and the treatment time has lasted several tens of minutes. Parameters of similar magnitudes are applied in the development of the presented method.

## RELAXATION PROCEDURE

The residual stress relaxation procedure on a complex structure requires realisation of its two phases:

- phase of technology simulation, and
- phase of procedure performance.

### Faza simulacije

U fazi simulacije postupka biraju se najpovoljniji parametri tehnologije otpuštanja zaostalih napona koji će istovremeno najmanje uticati na zamor materijala.

Postupak se odvija u nekoliko faza, kako sledi:

- Projektovanje konstrukcije za stanje i uslove u fazi relaksacije (položaji oslonaca, dodatnih nosećih konstrukcija u radioničkim, predmontažnim i završnim radovima).
- Analiza konstrukcije primenom metode konačnih elemenata i odgovarajućeg računarskog programa, radi definisanja sopstvenih frekvencija elemenata konstrukcije. Ova analiza daje kritične rezonantne frekvencije oscilovanja konstrukcije za prva tri, tj. pet glavnih oblika oscilovanja.
- Definisanje baze karakteristika vibratora:
  1. Spektar radnih frekvencija u funkciji vrste pogona (pritisak i protok vazduha za pneumovibratore, struje za elektrovibratore).
  2. Nivo impulsne sile vibratora u funkciji radnih parametara i mase rotirajućih elemenata.
- Određivanje položaja vibratora na konstrukciji, te radnih parametara vibratora (frekvencija, sila), uz definisana ograničenja naponskih i deformacijskih stanja konstrukcije. U principu, usvajaju se oni elementi tehnologije koji daju najveće efekte u zavaru i pokrivaju najveću dužinu zavarenih spojeva. Za svaki položaj vibratora definiše se sila impulsa, radna frekvencija bliska sopstvenoj, uz uslov ograničenja amplitude oscilovanja ( $\leq 1 \text{ mm}$ ).
- Definisanje kontrolnih tačaka na konstrukciji za praćenje parametara relaksacije (frekvencija, amplituda oscilovanja, naponsko stanje) i proračun njihovih vrednosti.
- Na bazi parametara tehnologije bira se oprema za vibrorelaksaciju (tip vibratora, merna oprema za kontrolu radnih parametara vibratora, merna oprema za kontrolu naponskih stanja kao efekt vibracija). Planom relaksacije definiše se kompletna tehnologija relaksacije za svaku fazu izrade konstrukcije.

### Faza izvođenja postupka relaksacije zaostalih napona

Izvođenje postupka relaksacije zaostalih napona moguće je realizovati putem dve tehnologije:

- Kroz proces izrade konstrukcije, kada se eksperimentalno definišu vrednosti zaostalih napona na vitalnim delovima konstrukcije, pri čemu se u radioničkim uslovima relaksira svaki segment konstrukcije posebno. Isti postupak se ponavlja i u uslovima montaže konstrukcije. Ovim postupkom relaksacija se izvodi u okviru tehnološkog postupka izrade konstrukcije.
- Druga metoda se primjenjuje u slučaju kada se ne poznaju vrednosti zaostalih napona, a relaksacija se izvodi po okončanoj izradi ili montaži konstrukcije.

Za realizaciju postupka vibrorelaksacije neophodno je primeniti opremu kojom će se proces izvoditi shodno parametrima simulacije. Za realizaciju pobudne sile praktični su pneumatski vibratori sa rotirajućim prstenom, jer pokrivaju široki spektar impulsnih sila (0,105–20,0 kN) i radnih frekvencija (20–400 Hz).

Kontrolom radnog pritiska i protoka vazduha, kao i promenljivom masom prstena osiguravaju se potrebni radni parametri pobude.

### Simulation phase

In the simulation phase, optimal parameters of residual stress relaxation technology are selected, also enabling minimal effects on the dynamic fatigue of the material.

The procedure is performed in several phases, as follows:

- Structural design for the state and condition in the relaxation phase (location of supports, additional supporting structures during workshop, pre-assemble and final operations).
- Structural analysis by applying finite element method and corresponding computer software, in order to define eigen-frequencies of structural elements. This analysis shows critical resonant frequencies of structural vibrations for three, i.e. or five principal forms of oscillation.
- Definition databases of vibrator properties:
  1. Operating frequency spectrum depending on drive type (pressure and air flow for pneumo-vibrators, the electric currents for electromechanical vibrators).
  2. Level of vibrator pulsing force depending on operating parameters and mass of rotating elements.
- Determining vibrator location on the structure and vibrator operating parameters (frequency, force) with defined limitations in structural stress and strain states. Principally, elements of the technology which produce more effects on welds and cover maximal length of welded joints are accepted. The pulse force, operating frequency close to eigen-frequency, are defined for limited oscillation amplitude ( $\leq 1 \text{ mm}$ ), for each vibrator location.
- Defining referral points on structures for monitoring relaxation parameters (frequency, oscillation amplitude, stress state) and the calculation of their values.
- Based on technology parameters the equipment for vibrational relaxation is selected (vibrator type, measuring equipment for inspection of vibrator operation parameters, measuring equipment for stress state control as effect of vibration. The relaxation programme defines the complete technology for each structure manufacturing phase.

### Performance phase of residual stress relaxation procedure

The execution of residual stress relaxation is possible by following two technologies:

- During structure manufacturing phase, when the values of residual stresses on structure vital elements are defined experimentally, and each segment of structure is relaxed separately in workshop condition. The same procedure is repeated in structure assembly condition. By this procedure the relaxation is performed in the frame of technological procedure of structure manufacturing.
- The second method is applied in the case of unknown residual stress values, and relaxation is performed after complete manufacture or assembly of structure.

In order to complete the vibrational relaxation procedure it is necessary to apply the equipment that will execute the process according to simulation parameters. The excitation force is introduced by pneumo-vibrators with rotating ring, covering large spectrum of pulse forces (0.105–20.0 kN) and operating frequencies (20–400 Hz).

Necessary excitation operating parameters are assured by operating pressure and air flow control, in addition to variable ring mass.

U zavisnosti od tipa konstrukcije i orijentacije radnih i zaostalih napona, za kontrolu vrednosti naponsko-deformacionih stanja koriste se mehaničke merne trake i tenzometri (osetljivosti 0,001–0,01 mm) kao i razni tipovi elektrootpornih mernih traka, vezanih u sistem mernog mosta adekvatnog kapaciteta i frekventnog opsega uz mogućnost automatskog skeniranja i obrade mernih veličina. Praćenje efekta vibracija na konstrukciji izvodi se adekvatnom opremom kojom se kontroliše vrednost amplitude i frekvencije na svakom mernom mestu, a na području efektivnog učinka vibratora.

Vreme relaksacije se definiše zavisno od željenog cilja, dostizanja zadatog nivoa zaostalih napona. U principu, ceo proces relaksacije mora biti pod strogom kontrolom vrednosti otpuštanja naponsko-deformacijskih stanja i eventualnog zamora konstrukcije. Naime, dosadašnja naša iskustva su ukazala da predugačak tretman vibracija, zbog karaktera procesa ima mali učinak na relaksaciju zaostalih napona, a bitno utiče na dinamički zamor konstrukcije.

Efekti primenjene metode prikazani su kroz dva primera, prvi je rešetkasta konstrukcija alata za montažu krila aviona „Iljušin“, a drugi je konstrukcija drumskog mosta, punog preseka. Cena obrade u radioničkim uslovima je oko 0,04 €, a u postupku montaže 0,06 € po kilogramu mase konstrukcije.

## PRIMERI VIBRORELAKSACIJA

### *Primer 1 (konstrukcija alata za montažu krila aviona)*

Otpuštanje zaostalih napona je izvedeno do nulte vrednosti izrazito dugačkim vremenom vibracija (320 minuta). Izbor ovakve tehnologije je uslovio zahtev za visokim stepenom deformacijske stabilnosti konstrukcije u veku eksploatacije i vrlo nizak nivo naponskih stanja u uslovima radnih opterećenja.

Analiza konstrukcije alata urađena je za 12 različitih režima vibracija. Izbor radnih frekvencija, položaja vibratora i lokacija mernih mesta dati su na sl. 1. Vreme vibracija u svakom parametru rada je oko 30 minuta. Merenje deformacija izvršeno je mernim trakama za svako merno mesto posle svakog ciklusa vibracija. Na primerima rezultata relaksacije za merna mesta MM1 i MM6 matematički su definisani procesi deformacijsko-naponske stabilizacije. (sl. 2 i 3).

### *Primer 2 (čelična konstrukcija drumskog mosta)*

Kao predmet relaksacije su obrađeni montažni sučevi zavareni spojevi na glavnim nosačima konstrukcije drumskog mosta. U koncepciji istraživanja prihvaćena je metoda eksperimentalnog definisanja zaostalih napona u toku procesa zavarivanja i to u pravcu upravno na zavar.

Merenja su izvedena na šest pozicija na vertikalnom delu „I“ nosača kao i na po jednoj lokaciji na obe lamele. Za definisanu konstrukciju uz primenu programa „Maple“ proračunate su vrednosti sopstvenih frekvencija koje su imale vrednosti 10,46 Hz, 42,69 Hz, 96,154 Hz, 195,13 Hz, 316,63 Hz, 461,42 Hz.

U procesu relaksacije primenjen je pneumatski vibrator vlastite konstrukcije sa mogućnošću rada na frekvenciji 20–400 Hz i impulsne sile 150–600 daN.

Depending on structure type and the direction of operating and residual stresses, mechanical strain gauges and tensometers are used (sensitivity 0.001–0.01 mm) for controlling stress-strain state values and also different electrical resistant strain gauges in the bridge circuit system of adequate capacity and frequency range with the possibility of automotive scanning and data processing. The vibrational effect on the structure is monitored by adequate equipment for controlling amplitude and frequency values at each measuring point in the region of vibrator efficiency.

Relaxation time depends on the desired goal, as to achieve a specified residual stress level. Principally, the complete relaxation process must be strictly controlled by values of relaxed stress-strain state and eventual fatigue of structure. Namely, our experience has shown that too long vibrational treatment, due to the character of the process, exhibits low effect on residual stress relaxation, but significantly affects the dynamic fatigue of the structure.

The effects of the applied method are presented in two examples, one is a grid structure of the tool for the “Iljušin” wing assembly, and the second is the road bridge structure with full cross-section. The workshop cost is about 0.04 €, and 0.06 € per kilo of structural mass in the assembly procedure.

## EXAMPLES OF VIBRATIONAL RELAXATION

### *Example 1 (structure of the airplane wing assembly tool)*

Residual stress relaxing is performed to zero value by applying extremely long vibration time (320 minutes). The selection of such a technology is governed by the requirement for high degree of structural deformation stability during service life, and very low level of stress state in load operating conditions.

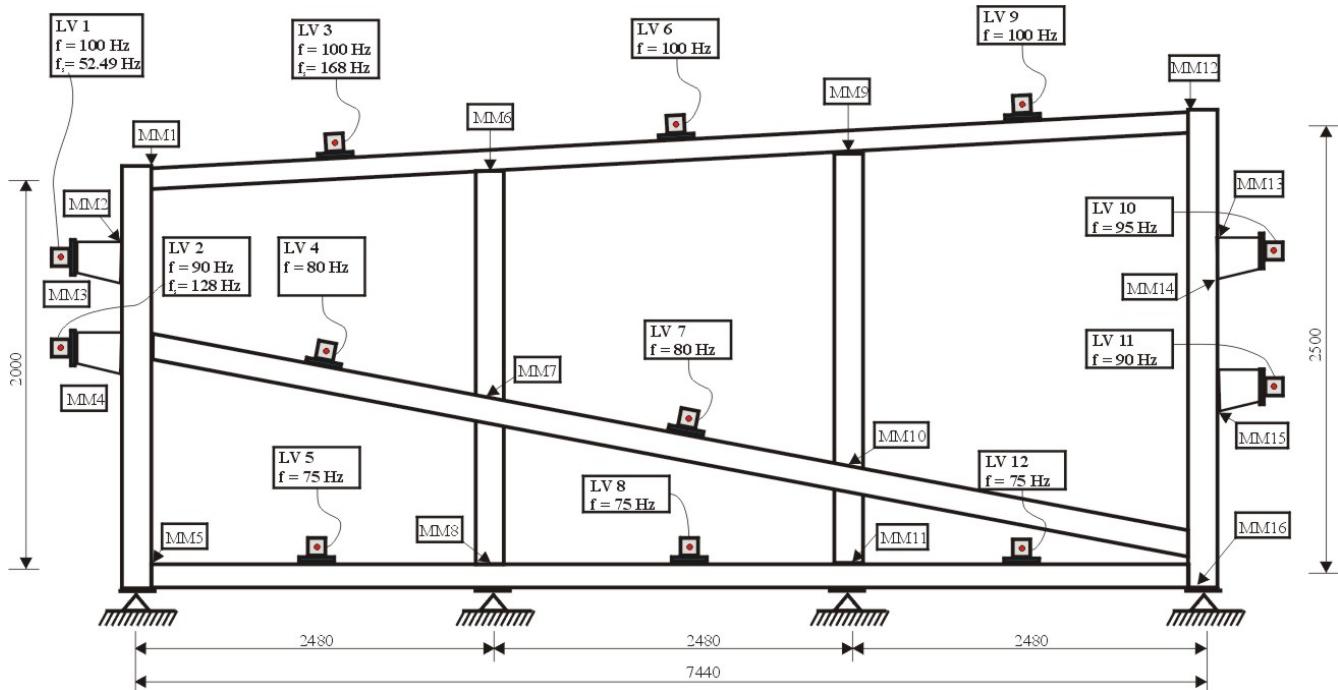
Structural analysis of the tool is performed for 12 different vibration regimes. The choice of operating frequencies, vibrator locations, and measuring locations are given in Fig. 1. Vibration time for every work parameter is about 30 minutes. Strains are measured by strain gauges at every measuring point after each vibration cycle. Examples of relaxation results at measuring points MM1 and MM6 are used for mathematical definitions of the stress-strain stabilization processes (Figs. 2 and 3).

### *Example 2 (road bridge steel structure)*

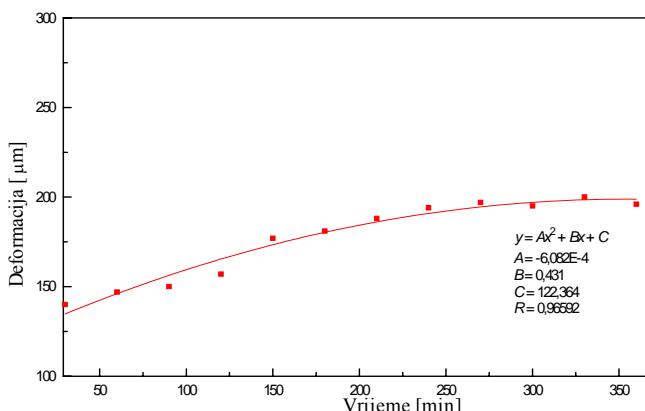
Butt welded assembly joints on main girders of the road bridge structure are elaborated in this relaxation example. The method of experimental definition of residual stresses during the welding procedure, perpendicularly to the weld, is accepted in this research approach.

Measurements are performed on six locations of the vertical part of “I” girder and on one location of each lamella. Eigen values of frequencies are calculated for the specified structure by applying “Maple” software, and following data is obtained: 10.46 Hz, 42.69 Hz, 96.154 Hz, 195.13 Hz, 316.63 Hz, 461.42 Hz.

The pneumo-vibrator designed by the authors, applied in the relaxation process, enabled the operation at frequencies 20–400 Hz with pulse forces 150–600 daN.



Slika 1. Raspored mernih traka (MM) i vibratora (LV) sa naznačenim vrednostima frekvencija na pojedinim mernim područjima  
Figure 1. Disposition of strain gauges (MM) and vibrators (LV) with given frequency values at individual measuring points.



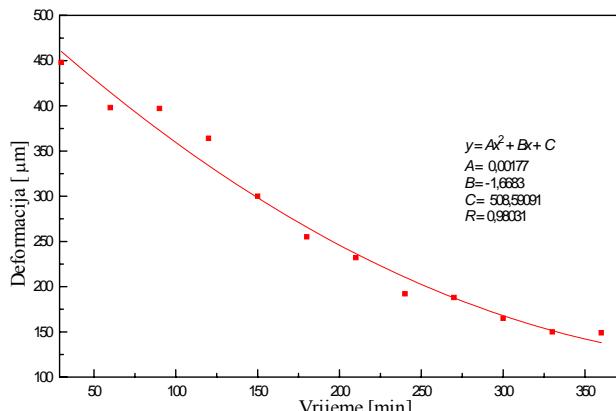
Slika 2. Promena deformacije sa vremenom u području mernog mesta MM 1  
Figure 2. The change of strain value with time in the region of measuring point MM1.

Najpovoljnija tehnologija vibracijske obrade montažnih zavarenih spojeva u fazi simulacije bila je sa položajem vibratora na 1/2 raspona mosta, a na polovini nosača ispune između dva glavna nosača (sl. 4), uz radnu frekvenciju 150 Hz i pobudnu silu 150 daN.

Za ovaj slučaj na području sva četiri montažna zavarena spoja očekivana pomeranja su reda  $\pm 1$  mm, čime su zadovoljeni kriterijumi niskog nivoa naponskih stanja dinamičkog opterećenja konstrukcije.

Na sl. 5 prikazani su položaji mernih mesta u procesu definisanja stanja zaostalih napona, kako u fazi zavarivanja tako i u fazi relaksacije.

U procesu zavarivanja praćene su vrednosti napona ( $\sigma_x$ ) posle svakog zavara. Vibracijska obrada zavara izvedena je posle okončanja zavarivanja po parametrima iz procesa simulacije.



Slika 3. Promena deformacije sa vremenom u području mernog mesta MM 6  
Figure 3. The change of strain value with time in the region of measuring point MM6.

The most convenient vibration treatment technology in assembling welded joints in the simulation phase included vibrator location at 1/2 of bridge span and on the half of the connecting girder between two main girders (Fig. 4), with operating frequency 150 Hz and excitation force 150 daN.

In this case the expected displacements are of the order  $\pm 1$  mm in the region of all four assembly welded joints, which satisfies the criteria of low stress state in dynamic loading of the structure.

Measuring point locations in the process of defining residual stress states are presented in Fig. 5, both for the welding and relaxation phases.

During the welding process, stress values ( $\sigma_x$ ) are monitored after each welding run. Vibrational treatment is performed after accomplished welding according to parameters from the simulation process.

Vreme relaksacije u trajanju od 15 minuta bilo je dovoljno za smanjenje zaostalih napona na zadovoljavajući nivo. Rezultati eksperimenta prikazani su na sl. 6.

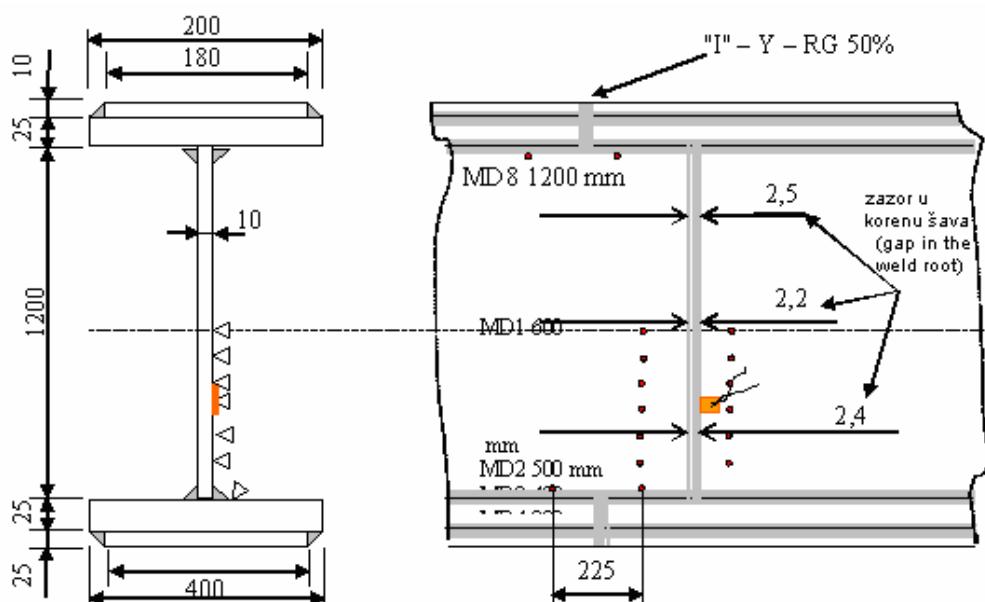
Dinamika praćenja učinka procesa relaksacije zaostalih napona ( $\sigma_x$ ) izvedena je na mernom mestu MT na nivou MD4 u području zone uticaja topote (ZUT) (sl. 5).

Relaxation time of 15 minutes was sufficient for reducing residual stresses to the satisfactory level. Experimental results are presented in Fig. 6.

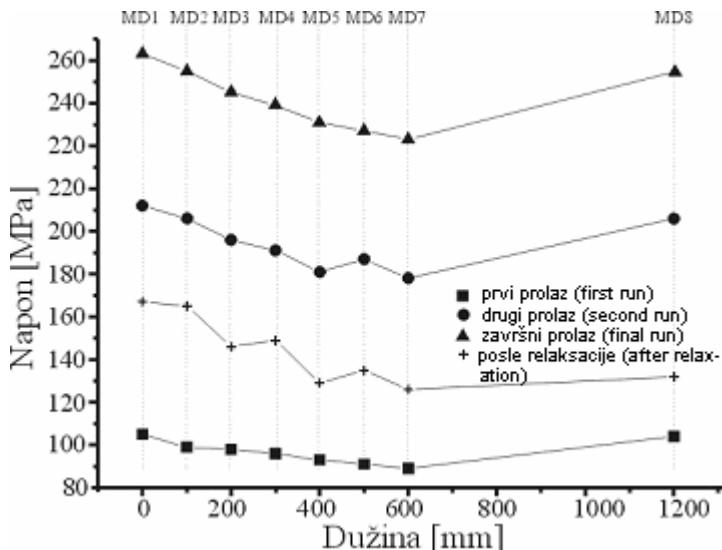
Dynamics of monitoring residual stress ( $\sigma_x$ ) relaxation process is done by measuring point MT at level MD4 in the region of the heat-affected-zone (HAZ) (Fig. 5).



Slika 4. Položaj vibratora na I gredi mosta  
Figure 4. The location of vibrator on girder I of the bridge.



Slika 5. Položaji mernih mesta u procesu definisanja stanja zaostalih napona, u fazi zavarivanja i u fazi relaksacije  
Figure 5. Measuring point locations in the process of defining residual stress states in welding and relaxation phases.



Slika 6. Raspodela napona po dužini grede posle tri prolaza zavarivanja i posle relaksacije 15 minuta  
Figure 6. Stress distribution along the girder after welding three runs and after 15 minutes of relaxation.

Preko elektrootporne merne trake, nalepljene posle zavarivanja, u procesu vibracija tokom 15 minuta praćeno je ponašanje naponskog stanja ( $\sigma_x$ ).

Rezultati merenja, dobijeni za amplitudu oscilovanja od 0,38 mm pri radnoj frekvenciji od 150 Hz, prikazani su u tab. 1.

The stress state ( $\sigma_x$ ) behaviour is monitored by electrical resistance strain gauge cemented after the welding, in the 15 minute vibrating process.

Measurement results obtained for oscillation amplitude of 0.38 mm at operating frequency of 150 Hz are presented in Table 1.

Tabela 1. Promena napona tokom relaksacije na mernom mestu  
Table 1. The change of stress during relaxation at measured point.

Vreme [min] Time [min]	Vrednost napona [MPa] Stress value [MPa]
0.00	0.00
3.00	-9
6.00	-15
9.00	-18
12.00	-20
15.00	-22

## ZAKLJUČCI

Na osnovu teoretskih i izvedenih eksperimentalnih istraživanja može se zaključiti sledeće:

- Primjenljivost metode vibrarelaksacije na konstrukcijama velikih dimenzija, u cilju stabilizovanja dimenzija i otpuštanja zaostalih napona, je zadovoljavajuća, ako se u tehnologiji primeni proces optimizacije i to u fazama simulacije i izvođenja.
- Primjena metoda omogućava praćenje procesa relaksacije do željenog cilja bez opasnosti od posledica zamora materijala, što daje mogućnost sertifikacije postupka za konkretnu konstrukciju.
- Sam postupak je nije skup i vremenski je kratak i sa stanovišta ekonomičnosti u prednosti je nad termičkim postupkom, pogotovo u slučaju obrade montažnih zavarenih spojeva.

U narednim istraživanjima preporučuje se razvoj postupka za primenu u toku izvođenja zavarivanja.

## CONCLUSIONS

Based on theoretical and performed experimental research it is possible to derive the following conclusions:

- Applicability of the vibrational relaxation method on structures of large sizes for dimensional stabilization and residual stress relaxation is satisfactory if it is applied in the technology optimization process and in both simulation and performance phases.
- The applied method enables monitoring of the relaxation process to the final goal without danger of material fatigue consequences, offering certification of the procedure for the specified structure.
- The procedure itself is not expensive and is timely short and from the economic point of view it is superior compared to heat treatment, especially in the case of treatment of assembling welded joints.

In research that will follow it is recommended to develop this procedure in applications during welding.

## LITERATURA – REFERENCES

1. Behmen, M., Bugarin, M., *Relaksacija zaostalih napona uslijed zavarivanja na alatima u vazduhoplovstvu (The welding residual stresses relaxation in tools for airplanes)*, Soko VI, Mostar, 1990.
2. Torlo, M., *Razvoj metode za relaksaciju zavarivačkih napona metodom vibriranja na kompleksnim konstrukcijama (Development of welding stresses relaxation method by vibrations of complex structures)*, Magistarski rad (Master degree thesis), Mašinski fakultet (Mechanical Engineering Faculty), Zenica, 2002.
3. Sabo, B., *Prilog istraživanju uticaja vibracione obrade na zaostale deformacije i napone zavarenih I nosača (The contribution to the investigation of vibration treatment on residual strains and stresses of welded I girders)*, Doktorska disertacija (Doctoral degree thesis), Fakultet tehničkih nauka, (Faculty of Technical Sciences), Novi Sad, 1988.
4. Kovš, S.V. et al., *Dejstvo ultrazvučnih i niskofrekventnih oscilacija na strukturu zavarenih spojeva molibdena (The effect of ultrasound and low frequency vibrations on the microstructure of welded joints in molybdenum)*, Svaročnoe proizvodstvo, 7/64.
5. Suturin, G.V., *Uticaj vibracija niske frekvencije na veličinu zaostalih napona i deformacija pri zavarivanju (The effect of low frequency vibrations on residual stress and strain magnitude)*, Svaročnoe proizvodstvo, 6/73.
6. Zvegniceva, K.V., *Primjena vibracija za sniženje napona poslije zavarivanja (The application of vibrations for relieving stresses after welding)*, Svaročnoe proizvodstvo, 11/68; 11/69.
7. Asnis, A.E., Ivaščenko, G.A., *Povećanje nosivosti zavarenih konstrukcija (The increase of welded structures bearing capacity)*, Naukova dumka, Kiev, 1978.
8. Nedosaka, A. et al., *Vibraciona obrada za sniženje zaostalih napona u zavarenim konstrukcijama (The treatment by vibrations for residual stress relaxation in welded structures)*, Automatičeska svarka, 8/67.
9. Suturin, G.V., Boldurev, A.M., *Istraživanje mehanizama uticaja niskofrekventnih vibracija na kristalizaciju zavarivačke kuppe (The investigation of the effect of low frequency vibration mechanism on molten pool crystallization)*, Automatičeska svarka, 5/75; 12/77.
10. Špeer, F.Z. et al., *Vibraciona obrada zavarenih krupnogabaritnih konstrukcija u cilju smanjenja deformacija i sklonosti ka obrazovanju grešaka (The treatment by vibrations of welded structures of great size for the reduction of strain and defect susceptibility)*, Svaročnoe proizvodstvo 5/83.
11. Polanov, V.G., *Određivanje režima vibracione obrade zavarenih konstrukcija u cilju sniženja zaostalih napona (The determination of vibration treatment parameters for residual stress relaxation)*, Svaročnoe proizvodstvo 2/84.



Podsećamo Vas da su detaljnije informacije o radu  
Društva za integritet i vek konstrukcija dostupne na Internetu na adresi  
[www.divk.org.yu](http://divk.org.yu)

**Časopis Društva za integritet i vek konstrukcija – INTEGRITET I VEK KONSTRUKCIJA**  
**Journal of the Society for Structural Integrity and Life – STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE**

<http://divk.org.yu/ivk>

**Cenovnik oglasnog prostora u časopisu IVK za jednu godinu**  
**Advertising fees for one subscription year (per volume)**

Kvalitet*Quality	Dimenzijs*Dimensions (mm)	Cene u din.	EUR
<b>Kolor*Colour</b>	• obe strane*two pages 2xA4	30.000	700
	• strana*page A4/1	20.000	450
<b>Dostava materijala: CD (Adobe Photoshop/CorelDRAW)</b> <b>Print material: CD (Adobe Photoshop/CorelDRAW)</b>			
<b>Crno-beli*Black/White</b>	• strana*page A4/1	10.000	250
	• 1/2 str A4*1/2 page A4(18x12)	7.000	150
<b>Dostava materijala: CD (Adobe Photoshop/Corel DRAW)</b> <b>Print material: CD (Adobe Photoshop/Corel DRAW)</b>			

**Pomažući članovi DIVK imaju popust od 40% navedenih cena.**

**DIVK supporting members are entitled to a 40% discount on upper prices.**