

**ZNAČAJ NUMERIČKE ANALIZE ZA KVALITET IZVOĐENJA  
TEHNOLOGIJE VIBRORELAKSACIJE ZAOSTALIH NAPREZANJA  
KOD VELIKOGABARITNIH KONSTRUKCIJA**

**NUMERICAL ANALYSIS IMPORTANCE FOR CONDUCTING  
QUALITY OF VIBRATORY STRESS RELIEF TECHNOLOGY FOR  
LARGE CONSTRUCTIONS**

**Fuad Hadžikadunić, Dušan Vukojević, Nedeljko Vukojević  
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet u Zenici  
Fakultetska 1, Zenica  
Bosna i Hercegovina**

**REZIME**

*Tehnologija otpuštanja zaostalih naprežanja nakon ili u toku zavarivanja elemenata ili podsklopova složenih velikobaritnih konstrukcija zauzima sve značajnije mjesto u modernoj industrijskoj praksi. Ovaj mehanički tretman, pored određenog broja drugih, pojavljuje se kao alternativa termičkoj metodi otpuštanja napona, koja se u određenim slučajevima pokazuje kao neostvariva sa geometrijskih aspekata ili skuplja i tehnološki zahtjevnija metoda tamo gdje ju je moguće primijeniti. Sama primjena tehnologije vibrorelaksacije podrazumijeva ne samo primjenu specifične opreme nego i dobrog poznavanja monitoringa cjelokupnog procesa jer se isti zasniva na praćenju odgovarajućih veličina u smislu dokazivanja efikasnosti primijenjene tehnologije. U tom kontekstu numerička analiza tretirane složene konstrukcije pojavljuje se kao značajan alat u obezbjeđenju kvalitetnog i djelotvornog procesa koji dovodi do umanjjenja i preraspodjele napona po konstrukciji, a u svrhu obezbjeđenja integriteta cjelokupne konstrukcije.*

**Ključne riječi:** numerička analiza, zaostali naponi, kvalitet vibrorelaksacije.

**ABSTRACT**

*Technology for residual stresses relieving after or during the welding of elements or sub-structures of complex large constructions take significant place in modern industrial practice. This mechanical treatment, in addition to a number of others, appears as an alternative method to thermal stress relief, which in certain cases shows as impracticable with the geometric aspects, or expensive and technologically more complex method where it is possible to apply. An application of VSR technology implies not only the application of specific equipment, but also a good knowledge of monitoring the entire process because it is based on the monitoring of appropriate size in terms of proving the efficiency of applied technology. In this context, numerical analysis of treated complex structure appears as a significant tool in providing quality and effective process that leads to the reduction and reorientation of stresses over construction, in order to ensure the integrity of the entire structure.*

**Key words:** numerical analysis, residual stresses, VSR quality.

## 1. UVOD

Postupak zavarivanja je odavno vodeći tehnološki postupak u proizvodnji savremenih metalnih proizvoda i konstrukcija. Zavarivanje kao tehnološki proces se ostvaruje lokalnim rastapanjem metala, za što se koriste pokretni koncentrisani izvori toplote, kao što su: električni luk, elektronski mlaz, svjetlosni snop, gasni plamen i plazma. Unesena toplota dovodi do lokalnog zagrijavanja dijelova strukture na vrlo visoke temperature, dok okolina ovog mjesta ostaje hladna. Tačke materijala na različitoj udaljenosti od linije kretanja izvora toplote prolaze kroz različite temperaturne cikluse. Na taj način se stvaraju velike temperaturne razlike koje pri hlađenju komada, zbog ometanog širenja i skupljanja, kreiraju unutrašnje napone koji u tehnologiji zavarivanja, a time i u praktičnoj primjeni zavarenih struktura predstavljaju ozbiljan problem.

Naponi nastali na ovakav način su u suštini toplotni naponi, ali mogu nastati i na drugi način, npr. zbog promjene strukture u zavarenom čeličnom dijelu. Unutrašnji naponi nastali kao posljedica zavarivanja mogu imati vrlo visoke vrijednosti, čak i do vrijednosti napona tečenja, tako da je redovna pojava da se još u toku samog zavarivanja dijelovi deformišu. Razmatranje kinetike napona pokazuje da na povišenim temperaturama, u određenim uslovima, intenzitet zaostalih napona može da pređe i granicu kidanja materijala i izazove pucanje.

U tehnologiji zavarivanja razlikuju se dvije vrste zaostalih napona: *prinudni*, koji nastaju pri spajanju dijelova sa slobodnim krajevima, kod kojih se dejstvo ostvaruje samo na posmatranim dijelovima i *reakcioni*, koji se javljaju kod dijelova čiji su krajevi uklješteni pa im je deformisanje spriječeno, te prenose unutrašnje napone po cijeloj zavarenoj strukturi. Obe vrste zaostalih napona dovode još u toku procesa zavarivanja do deformisanja zavarenih dijelova, a u težim slučajevima mogu dovesti i do loma. Ovako nastali zaostali naponi su višesni, te u kombinaciji sa drugim naponima (naponi od spoljnih sila ili sopstvene težine) ili pri niskim temperaturama mogu stvoriti uslove za nastajanje krtog loma. Ova opasnost je veća što su dijelovi koji se spajaju veće debljine i materijal veće čvrstoće, kao i zbog pogrešno izabrane tehnologije zavarivanja.

Zaostali naponi u zavarenoj konstrukciji su nepoželjni, te ih je potrebno eliminisati ili bar umanjiti njihov negativni uticaj na sigurnost konstrukcije. Zaostali naponi na konstrukcijama bilo kojeg tipa i oblika, kao posljedica primijenjenih tehnologija (livenje, zavarivanje, strojna obrada, itd), jeste problem kojem se treba ukazati veoma bitan značaj.

Tehnologija otpuštanja, odnosno preraspoređivanja zaostalih napona sa umanjnjem vršnih vrijednosti, kod velikogabaritnih konstrukcija je alternativna metoda koja je u zadnjih 20 godina veoma primijenjena u svjetskoj praksi. Ista je proizašla iz problema dimenzione ograničenosti primjene termičkih metoda, kao i znatno veće cijene samog procesa primjene peći. Također, problem primjene peći ogleda se i kod primjene konstrukcija sa različitim debljinama stijenki po konstrukciji, kao i različitih materijala.

Tehnologija vibrorelaksacije zaostalih napona na velikogabaritnim konstrukcijama se zasniva na izazivanju mehaničkih vibracija konstrukcije koje utječu na zaostala naprezanja i prinudno uzrokuju njihovo rasterećenje. Učinak primijenjene tehnologije je mjerljiv i očituje se nivoom preraspoređenih napona. Suština same tehnologije jeste u kontroli parametara koji se variraju, a isti zavise prvostepeno od krutosti konstrukcije i položaja tretiranih mjesta.

Primjena metodologije vibracionog rasterećenja napona ima niz prednosti:

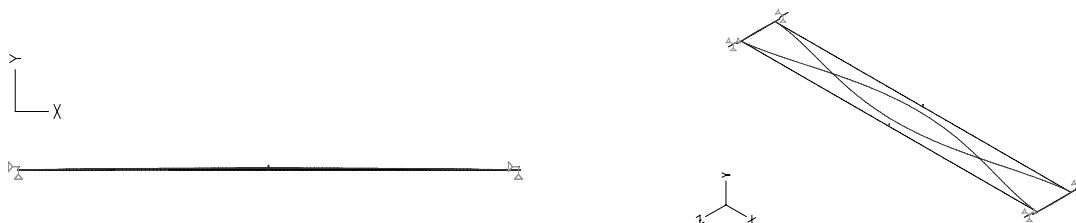
- produžava životni vijek konstrukcije,

- povećava dijapazon opterećenja i obezbjeđuje dimenzionu stabilnost konstrukcije,
- jeftinija je, vremenski kraća i sveobuhvatnija u odnosu na termički metod,
- koristi se kao "pred" i "post-procesni" metod npr. vraćanja konstrukcije u geometriju nakon grube obrade, ili nakon transporta itd.,
- metod ne zahtijeva prethodnu pripremu površina konstrukcije, kao npr. pjeskarenje za termičku metodu,
- primjena kontrolirane metode ne dovodi do gubljenja mehaničkih osobina konstrukcije (čvrstoća, tvrdoća, kvalitet površine, itd.),
- nema popratnih efekata kao kod termičke metode (distorzija, gubljenje osobina, iniciranje pukotina, itd.),
- primjena za razne materijale: nisko i visoko čvrstoćne čelike, legure, livene čelike, bi-metalne strukture, visoko kvalitetne materijale, aluminijum, otkivci, ...), itd.

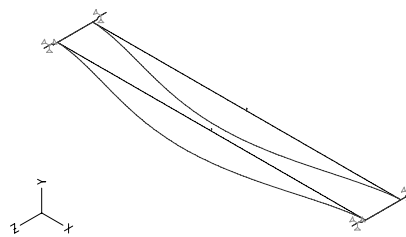
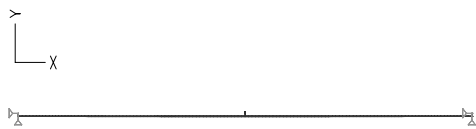
## 2. NUMERIČKA SIMULACIJA ODREĐENIH PROBLEMA

Za efikasno izvođenje metodologije mehaničke relaksacije zaostalih napona kompleksnih prostornih struktura zavarene izvedbe značajan aspekt, pored ostalih, jeste poznavanje dinamičkih karakteristika tretirane strukture. Za pravilan odabir parametara vibrorelaksacije (položaja pobude, frekvencije, amplitude, vremenskog trajanja, itd.) te njihove optimizacije u smislu dobijanja najvećeg efekta umanjenja nivoa zaostalih napona na konstrukciji veoma značajan dio jeste numerička simulacija oblika oscilovanja strukture. Na taj način je moguće adekvatnom diskretizacijom, pre-procesorskom i post-procesorskom obradom problema definirati one oblike i ravni pobude koje će za ciljne zavare (jedan ili više njih istovremeno) biti najoptimalniji. Ovakav pristup je posebno značajan kod slučajeva kada se radi o različitim tipovima konstrukcija koje mogu karakterizirati veće dužine, manji poprečni presjeci (i obrnuto), različite debljine segmenata konstrukcije, itd.

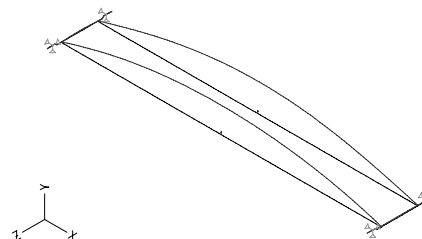
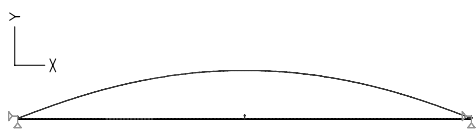
U daljem dijelu rada će se prikazati tri karakteristična slučaja prostornih zavarenih konstrukcija u kojima ranije prikazani pristup ima itekakvog značaja, a to su dvogredna mosna dizalica (slike 1÷3), postolje vagona (slike 4÷7) i postolje makaza (slike 8÷10). Dimenzione karakteristike konstrukcija, te karakteristike debljina podstrukture i poprečni presjeci imaju presudan značaj na oblike oscilovanja struktura. Također, na slikama su prikazani samo određeni oblici oscilovanja koji su povoljni za tretiranje grupe zavara središnjih zona konstrukcija. To znači da je za tretiranje svih grupa zavara po konstrukciji potrebno mijenjati i granične uslove, pored ostalih parametara bitnih za monitoring procesa vibrorelaksacije.



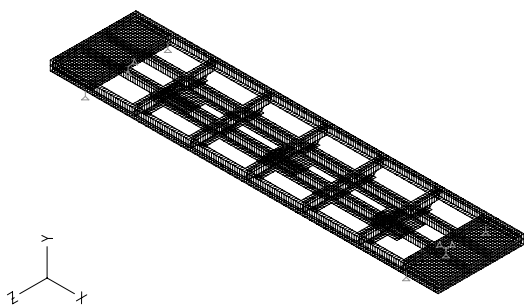
Slika 1. Prvi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{01} = 38,13$  Hz, x-z (horizontalna ravan)



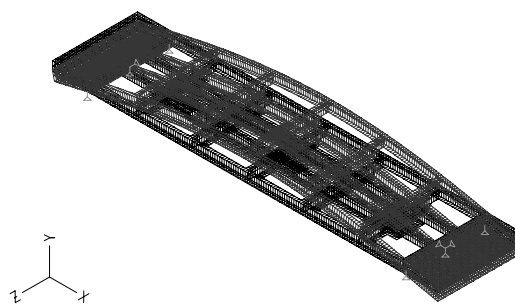
Slika 2. Drugi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{o2} = 39,21$  Hz, x-z (horizontalna ravan)



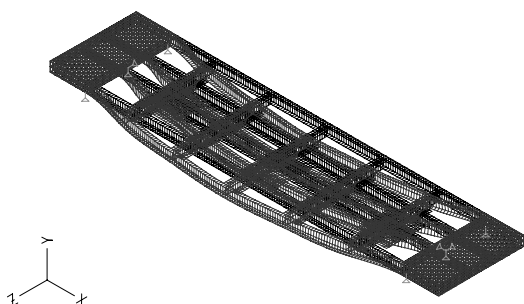
Slika 3. Treći sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{o3} = 63,87$  Hz, x-y (vertikalna ravan)



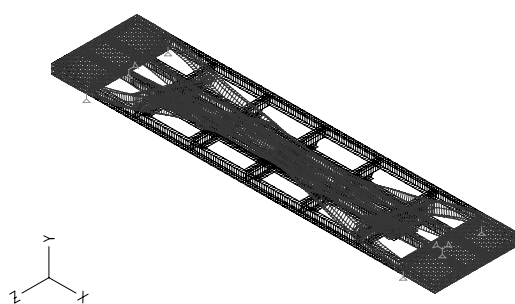
Slika 4. 3D diskretizacija postolja vagona



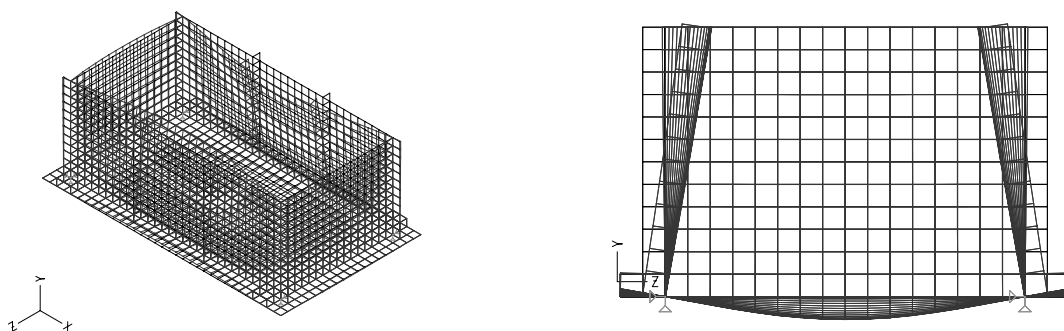
Slika 5. Prvi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{o1} = 91,67$  Hz, x-y (vertikalna ravan)



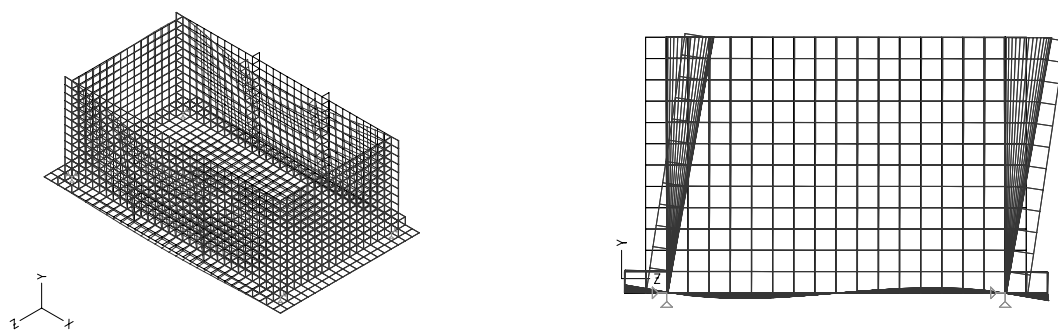
Slika 6. Drugi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{o2} = 133,51$  Hz, x-z (horizontalna ravan)



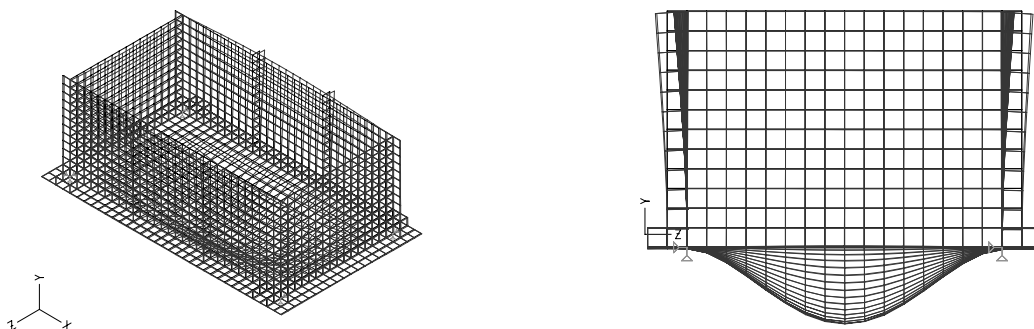
Slika 7. Treći sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{o3} = 185,80$  Hz, y-z (bočna ravan)



Slika 8. Prvi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{01} = 370$  Hz, (sve ravnine)



Slika 9. Drugi sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{02} = 410$  Hz, (sve ravnine)



Slika 10. Treći sopstveni oblik oscilovanja,  $f_{03} = 580$  Hz, (sve ravnine)

Tabela 1. Zbirni prikaz vrijednosti sopstvenih frekvenci tretiranih modela

Tretirani model	Sopstvena frekvencija	Vrijednost [Hz]	Maks. pomijeranje [cm]	Ravan pomijeranja
Dvogredna mosna dizalica	$f_{01}$	38,13	0,128	x-z (horizont. ravan)
	$f_{02}$	39,21	0,129	x-z (horizont. ravan)
	$f_{03}$	63,87	0,116	x-y (vertikalna ravan)
Postolje vagona	$f_{01}$	91,67	0,206	x-y (vertikalna ravan)
	$f_{02}$	133,51	0,215	x-z (horizont. ravan)
	$f_{03}$	185,80	0,397	y-z (bočna ravan)
Postolje makaza	$f_{01}$	370	0,102	(sve ravnine)
	$f_{02}$	410	0,096	(sve ravnine)
	$f_{03}$	580	0,166	(sve ravnine)

Na osnovu gore prikazanih vrijednosti, tabela 1, vidljivo je da svaka konstrukcija ima svoje specifičnosti i u navedenim karakterističnim slučajevima se podešavanju parametara vibrorelaksacije pristupa na odgovarajući način, svojstveno tretiranoj konstrukciji sa aspekta frekvencija i ravni oscilovanja.

### **3. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA**

S obzirom na specifičnosti primjene same tehnologije zavarivanja kod kreiranja složenih struktura, od kojih je najbitnija velika vrijednost unesene energije te izazivanje strukturalnih promjena u materijalu i pojavu zaostalih napona obavezno se kod odgovornih konstrukcija primjenjuje neki oblik otpuštanja napona. Primjena metodologije vibrorelaksacije ima mnoštvo prednosti u odnosu na termički tretman te kao takva zauzima sve značajnije mjesto u industrijskoj praksi. Najbitnija stavka za uspješnost primijenjene metodologije u smislu mjerljivog učinka otpuštanja napona na konstrukciji nakon zavarivanja jeste poznavanje dinamičkih karakteristika strukture i podešavanje i monitoring parametara pri samom izvođenju postupka. U tom kontekstu numerička analiza kao pomoćni alat metodologije vibrorelasacionog postupka ima veoma bitan značaj u smislu podešavanja parametara koji će dati najveći efekat otpuštanja napona na tretiranim mjestima konstrukcije.

### **4. LITERATURA**

- [1] T. Maneski: Kompjutersko modeliranje i proračun struktura, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.,
- [2] Z. Petković: Metalne konstrukcije u mašingradnji, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.,
- [3] D. Ostrić: Dinamika mosnih dizalica, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.,
- [4] B. Ćorić: Dinamika konstrukcija, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1998.