



## KORIŠTENJE METODE VIBRACIJA U KOREKTIVNIM AKTIVNOSTIMA REKONSTRUKCIJE VAKUUM PEĆI

T. Šarić<sup>1,\*</sup>, M. Pavić<sup>2</sup>, K. Šimunović<sup>1</sup>, S. Havrlišan<sup>1</sup>, G. Šimunović<sup>1</sup>, I. Svalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, Hrvatska

<sup>2</sup>Matest NDT d.o.o., Matije Gupca 37, Slavonski Brod, Hrvatska

\* Autor za korespondenciju e-mail: tsaric@unisb.hr

### Sažetak

U radu se daje kratki opis metode vibracija u relaksaciji zaostalih napreznja induciranih tehnološkom obradom. Dati će se opis hardverskog i softverskog (Metalax) dijela opreme koja se koristi kao podrška metodi vibracija. Na konkretnom primjeru razvoja i izrade vakuum peći, pokazat će se problemi koju mogu nastati tijekom realizacije projekta. Početkom eksploatacije te nakon utvrđenih nedostataka provedena je dinamička analiza konstrukcije. Predložena je konstrukcijsko - tehnološka sanacija, a kao metoda za relaksaciju unutrašnjih napreznja uzrokovanih unosom topline i tehnološkom obradom odabrana je metoda vibracija. Analizom sanacije predloženo je osam različitih položaja vibracijske pobude s naglaskom na dva položaja prirubnice na ulazu i izlazu konstrukcije. Nadzorom procesa popuštanja zaostalih napreznja za svaki definirani položaj utvrđene su promijene dinamičkih karakteristika analizirane konstrukcije te su iste prikazane u radu.

**Ključne riječi:** Metoda vibracija, zaostala napreznja, rekonstrukcija, zavarivanje

### 1. Uvod

Projektiranje, oblikovanje i izrada industrijske opreme zahtjevan je proces. Tijekom ovih procesa mogu se involvirati propusti koji tijekom eksploatacije izazivaju oštećenja koja se kasnije mogu razviti u kvarove. Procese i nadzor stanja industrijskih procesa može se pratiti raznim vrstama senzora te akvizicijom podataka i programskom podrškom. Koristeći različite metode za nadzor stanja te uz implementirane metode za predikciju, moguće je predvidjeti (procijeniti) preostali radni vijek radnim komponentama. Ovaj postupak predstavlja osnovu za primjenu i prepoznavanje ranih oštećenja. Otkrivanje i praćenje oštećenja čini osnovu za racionalno i učinkovito upravljanje procesom održavanja. Kod održavanja strojarskih konstrukcija poznata je činjenica da uvjeti eksploatacije induciraju zamor materijala koji može dovesti do pojave pukotina, a propagacija istih do lomova



odnosno oštećenja ili kvarova na pojedinim komponentama. Komponente na kojima se otkriju oštećenja moraju se obnavljati. Strojarske konstrukcije se najčešće obnavljaju (saniraju) koristeći postupke zavarivanja. Tijekom postupka zavarivanja ili navarivanja kao posljedica unosa topline javlja se naprezanje u konstrukciji koje može dovesti do deformacija ili značajnih oštećenja komponenti. Zaostala naprezanja mogu se otkloniti na razne načine [1]: toplinskom obradom i mehaničkim obradama (vibracijama, pred-naprezanjima, eksplozijama, sačmarenjem, pothlađivanjem i ultrazvučnim udarnim djelovanjima). Postupak umanjivanja zaostalih naprezanja metodom vibracija (eng. *Vibratory Stress Relief* - VSR) proučava se od sredine 20. stoljeća. U to vrijeme vršena su istraživanja s ciljem korištenja vibracija u proizvodnji. Između ostalih, na ovom području radio je i Keslo T. D. [2] koji je 1968. godine analizirao mogućnosti upotrebe vibracija u svrhu popuštanja zaostalih naprezanja. Primjena metode vibracija (VSR) nije bila često korištena u Evropi.

Metoda vibracija može se koristiti za vrijeme procesa zavarivanja ili nakon provedenog zavarivanja. Korisna je u postupku korektivnih aktivnosti (održavanja) i tijekom drugih tehnoloških postupaka. Omogućava postupak popuštanja naprezanja na mjestu na kojem se objekt nalazi te nije potrebno objekt (što je problem kod objekata velikih dimenzija) transportirati u industrijske pogone kako bi se vršila toplinska obrada. Na ovaj način skraćuje se vrijeme zastoja i povećava učinkovitost aktivnosti održavanja te se povećava raspoloživost proizvodnog sustava. Popuštanja zaostalih naprezanja na čeličnim konstrukcijama provode se najčešće korištenjem električne energije kako bi se postigao potreban unos topline. Ovi procesi imaju značajnu potrošnju električne energije što u konačnici povećava troškovnu neučinkovitost. Osim električne energije za induciranje topline u opremi za toplinsku obradu koristi se i zemni plin. U ovisnosti o atributima komponenti ili objekata na kojima je potrebno provoditi toplinsku obradu, obično je potrebna veća količinama plina za provođenje procesa. U današnje vrijeme za industrijsku upotrebu cijene plina značajno rastu te također mogu predstavljati značajan trošak. Potrošnja energije u svijetu svaki danom sve je veća, a izvori energije postaju sve skuplji i teže dostupni zbog raznih geopolitičkih razloga. Očuvanje okoliša postaje značajan prioritet i neophodno je smanjenje potrošnje ugljikovodika kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš. Analizirajući primjenu metode popuštanja zaostalih naprezanja metodom vibracija, možemo istaknuti relativno male zahtjeve za potrošnjom energije te doprinosom u očuvanju okoline. Danas dostupnim metodama mjerenja zaostalih naprezanja može se provjeriti učinkovitost VSR metode na konkretnim primjerima iz prakse. Provođenje ove metode stvara empirijska iskustva na moguće primjene i ograničenja primjene za pojedine vrste konstrukcija. Za očekivati je da će se VSR metoda za popuštanja naprezanja sve više koristiti jer raste potvrda i povjerenje u njezinu učinkovitost. Tijekom donošenja odluke o primjeni potrebno je znati što se očekuje kao krajnji rezultat te je potrebno definirati što se želi postići: dimenzijska stabilnost, smanjenje opasnosti od pojave pukotina ili utjecaj na strukturu odnosno svojstva materijala.



## 2. Metoda popuštanja zaostalih napreznja vibracijama (VSR)

Metoda vibracija (VSR) počela se koristiti prije 1950. godine [3], kada su mornarice SAD-a i Njemačke koristile harmonične vibracije (koje se nazivaju i rezonantne vibracije) za testiranje metalnih brodskih trupova i krila aviona. Kasnije su pokušali smanjiti upotrebu toplinske obrade za popuštanje napreznja te povećati korištenje VSR metode. Međutim u primjeni i korištenjem VSR metode u cilju popuštanja napreznja rezonantnim vibracijama rezultati su bili nepredvidivi i nedosljedni. Uobičajeno, prepuštanje objekata rezonantnoj frekvenciji uzrokovalo bi u konačnici oštećenja nakon određenog vremena. Na osnovi dobivenih podataka i "izdržljivosti" objekta zaključivalo se o kvaliteti pojedinoga oblikovanja (dizajna). Istraživači su zaključili da objekti na kojima nije došlo do oštećenja tijekom provođenja VSR metode, nisu inducirana oštećenja niti tijekom eksploatacije. Prepoznato je da tretman materijala na rezonantnoj frekvenciji otklanja zaostala napreznja u materijalu konstrukcije. Znanstvenici su krenuli istraživati i dolazili su do raznih rezultata od koji su neki potvrđivali hipotezu korisnosti ove metode, dok drugi nisu [4]. S vremenom se došlo do zaključka da podvrgavanje konstrukcija rezonantnoj frekvenciji dovodi do poboljšanja njezinih karakteristika. Energija koja se unosi vibracijama smanjuje napreznja zaostala nakon procesa zavarivanja i to tako da pod djelovanjem unesene energije atomi se vraćaju u "prirodno" stanje kristalne rešetke. Proces popuštanja i eliminiranja zaostalih napreznja u okolnostima bez vanjskih utjecaja, dogodio bi se u razdoblju od više godina. Vanjskim utjecajem podižemo dinamiku procesa te ga aproksimativno možemo izražavati u satima odnosno minutama. Zaključeno je da postoji više koristi VSR procesa:

- Smanjuje se utjecaj unošenja topline u objekt te ima manji utjecaj na geometriju objekta,
- Smanjuju se geometrijske distorzije za vrijeme strojne obrade i
- Smanjuje se broj pukotina za vrijeme eksploatacije.

Proces je uspostavljen kao alternativa toplinskoj obradi odljevaka i priprema koji su namijenjeni strojnoj obradi. Važno je napomenuti da VSR metoda nije alternativa za sve postupke toplinske obrade. Unos topline procesom zavarivanja uzrokuje lokalna istežanja. Tijekom hlađenja kupke zavara dolazi (u uskom području) do napreznja koja mogu uzrokovati poteškoće tijekom naknadne strojne obrade ili eksploatacije objekta. U ekstremnim slučajevima (u funkciji vrste materijala) može doći do strukturnih poremećaja i pojave pukotina. Neki od primjera korištenja VSR metode tijekom tehnoloških procesa [5] prikazani su na Slici 1 i Slici 2.



Slika 1. Korištenje VSR metode kod sanacije čeličnih konstrukcija



Slika 2. Korištenje VSR metode kod saniranja zupčanika

Proces toplinske obrade mijenja strukturu i svojstva materijala te je učinkovitiji od VSR metode u sprečavanju pojave krtog loma. Količina energije koja je potrebna da bi se objekt zagrijao na temperaturu popuštanja u odnosu na energiju koja se utroši na postupak popuštanja naprezanja VSR postupkom znatno je veća i to u omjeru 500:1 [1].

Definirana su tri osnovna pristupa VSR metodi:

- Rezonantni (R - VSR),
- Modalni sub - rezonantni (SB - VSR) i
- Sub - harmonijski (SH - VSR).

**REZONANTNA VSR** metoda doživjela je razvoj u posljednjih 50 godina. Procedura zahtijeva postupno dovođenje objekta do rezonantne frekvencije. Postupak se sastoji od postupnog podizanja razine frekvencije pobude do trenutka kada se dostigne razina prve rezonantne frekvencije. Zatim se potraži sljedeća veća frekvencija koja će također dovesti do rezonancije. Kako bi se postiglo maksimalno popuštanje zaostalih naprezanja, objekt se održava na rezonantnoj frekvenciji odnosno na maksimalnoj amplitudi izvijanja objekta. Ova metoda se uobičajeno primjenjuje u procesu strojne obrade.

**MODALNA SUB - REZONANTNA VSR** je metoda koja se koristi kada se povećanjem frekvencije ne može doći do područja rezonancije. U praksi je ovo slučaj krutih konstrukcija te se ne može ostvariti područje rezonantne frekvencije.

**MODALNA SUB - HARMONIJSKA VSR** metoda koristi se ako se nijedan od prethodno opisanih uvjeta ne može ostvariti.

VSR postupak može se koristiti: prije grube strojne obrade, prije završne strojne obrade, prije toplinske obrade, prije rezanja na CNC rezačici, u svrhu kontrole kvalitete prije puštanja opreme u rad, kao preventivno održavanje dok je oprema u upotrebi, za vrijeme procesa zavarivanja, nakon

reparativnoga zavarivanja te uvijek kada se očekuje pojava deformacija ili pojava pukotina. Ova metoda može se koristiti na raznim materijalima (Tablica 1.)

**Tablica 1.** Materijali na kojima se može upotrebljavati VSR metoda

Materijal	Klasa materijala	Uključujući materijal
Čelik s niskim udjelom ugljika	A	1018, 102, A36
Čelik s srednjim udjelom ugljika	A(B)	1045, 1060 ( nakon otvrdnjavanja)
Legure s niskim udjelom ugljika	A(B)	4620, 8620 ( nakon otvrdnjavanja)
Legure s srednjim udjelom ugljika	A(B)	4140, 4340, H13, P20 ( nakon otvrdnjavanja)
Lijevani čelici	A	Sivi, Nodularni,
Aluminij	A	2000s, 5000s, 6000s, 356
Alatni čelici	B	D2, A2, M1, M2, M3, M4, S7
Visoko otporni čelici	B	HY-80, HY-100
Austenitni materijali	B	304, 316, 410, 416, 420, 17-4
Egzotični materijali	B	Titanium, Zlato, 7000 Aluminium

### 2.1. Oprema za provođenje VSR metode

Za provođenje VSR metode u ovome radu korištena je oprema Meta Lax tvrtke Bonal Technologies Inc. Ova oprema ima različite verzije, a izbor opreme ovisi o vrsti objekta na kojemu se provodi VSR metoda. Sastavni dijelovi opreme su: upravljačka jedinica, vibrator, senzor akceleracije, računalo s pripadajućom programskom podrškom, gumene izolacijske podloge. U nastavku će biti izdvojeni i posebno opisani neki od sastavnih dijelova opreme. Vibrator je uređaj koji se spaja na upravljačku jedinicu. Vibrator svojim djelovanjem (vrtnjom) prenosi energiju na objekt koji se tretira, a na Slici 3. prikazane su različite vrste vibratora. Količina energije ovisi o snazi vibratora. Pri izboru vibratora treba se fokusirati na veličinu - dimenzije i krutost objekta. Vibrator može biti u pogonu maksimalno 8 sati, a nakon toga treba provesti period hlađenja. Vrijeme hlađenja je u ovisnosti o temperaturi okoline.



**Slika 3.** Tipovi vibratora: 1F, 1FD, V8, 2A i 3A [6]



U Tablici 2. prikazano je optimalno vrijeme rada i pauze za pojedini tip vibratora. Za podešavanje vibratora priloženi su specijalni ključevi kojima se podešava ekscentričnost na vratilu. Podešavanje stupnja ekscentričnosti je u funkciji količine energije koja se prenosi na objekt.

**Tablica 2.** Tablica preporučenog trajanja rada vibratora u odnosu na opterećenje [6]

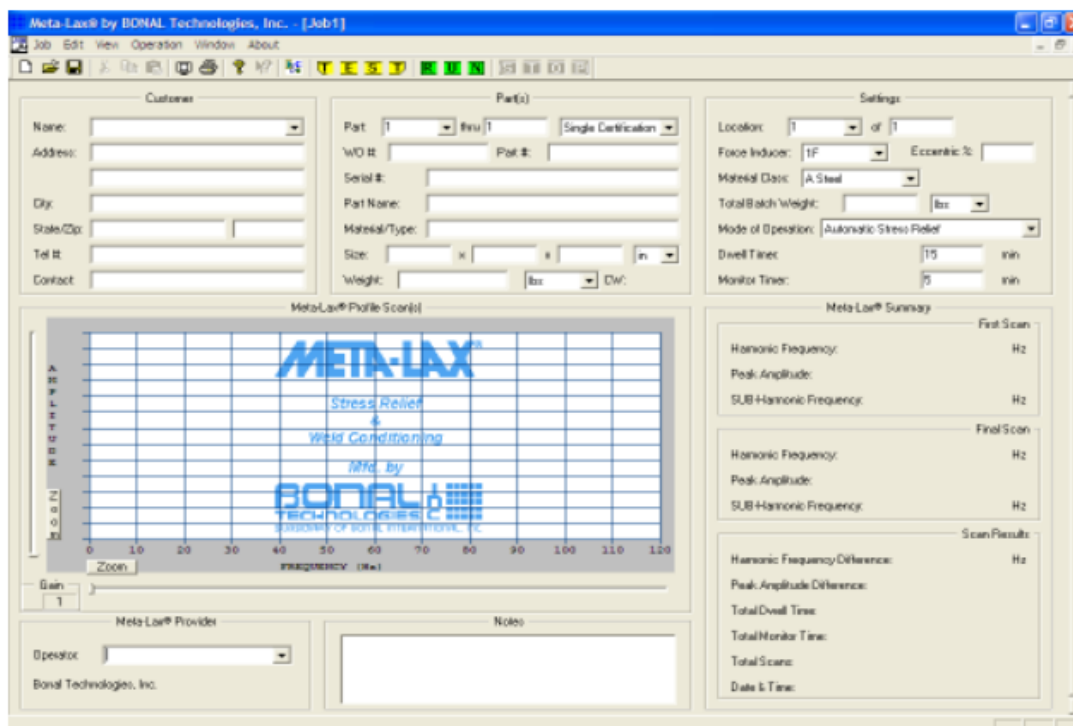
Podešena ekscentričnost		Postotak obavljenog tretmana	Vrijeme rada/ vrijeme zastoja
V8 i 2A	3A		
20 - 60%	-	80%	8 sati / 2 sata
60 - 80%	20 - 40%	70%	7 sati / 3 sata
80 - 100%	40 - 80%	65%	6.5 sati / 3,5 sati
-	80 - 100%	60%	6 sati / 4 sata
-	1F i 1FD	50%	1sat / 1 sat

U Tablici 3. dana je okvirna informacija koji vibrator izabrati u odnosu na dimenzije objekta.

**Tablica 3.** Maksimalne dimenzije objekta u odnosu na model vibratora [6]

Tip Vibrator ( <i>Force Inducer</i> )	Efektivne dimenzije tretiranog objekta ( dužina/visina/širina)
1F i 1FD	2 × 4 × 4 m
V8 i 2A	2 × 5 × 5 m
3A	2 × 7 × 7 m

Kako bi se cijeli postupak provodio uz računalno upravljanje i nadzor, odnosno olakšao proces provođenja tretmana popuštanja zaostalih naprezanja, tvrtka Bonal Technologies Inc. oblikovala je programsko rješenje (Slika 4). Ovo programsko rješenje prati cjeloviti proces. Automatski upravljala i prati stanje tretirane konstrukcije u realnom vremenu na osnovu ulaznih i izlaznih parametara procesa.



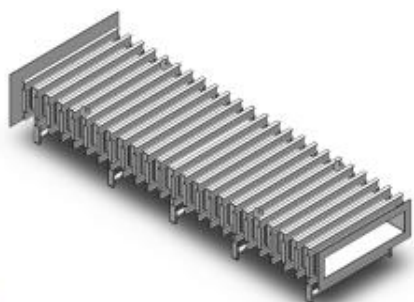
Slika 4. Programsko sučelje za automatsko upravljanje procesom [6]

Programsko rješenje Meta-Lax omogućuje operaterima da izaberu više načina tretiranja konstrukcije, a izbor će ovisiti o tehničkim zahtjevima koje je potrebno ispuniti i specifičnim karakteristikama pojedinih konstrukcija, a oni su [6, 7]:

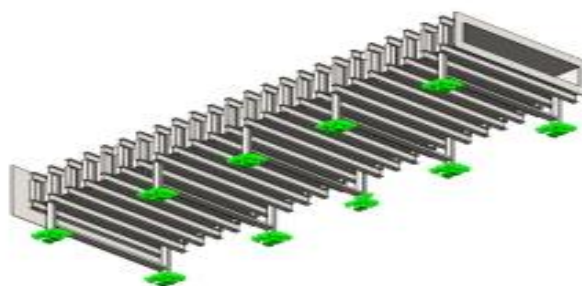
- Automatsko upravljanje postupkom popuštanja zaostalih naprezanja,
- Ručno upravljanje postupkom zaostalih naprezanja,
- Automatsko popuštanje naprezanje za vrijeme postupka zavarivanja i  
Ručno upravljanje postupkom popuštanja naprezanja za vrijeme postupka zavarivanja.

### 3. Sanacija vakuum peći nakon pojave deformacija

Po završetku izrade vakuum peći te tijekom početka eksploatacije i rada uočene su deformacije oblika (dimenzija) čelične konstrukcije. U skladu s uočenim oštećenjem pristupilo se korektivnim aktivnostima sanacije deformacija te sprječavanju daljnjeg progresa deformacije konstrukcije. Analiziran je statički proračun konstrukcije te su na njemu načinjene izmjene. Na osnovu izmijenjenog i dopunjenog statičkog proračuna, dopunjeno je i izvedbeno rješenje konstrukcije s ojačanjima. Na osnovu dopunjenog projekta oblikovana je tehnologija zavarivanja te su aktivnostima korektivnog zavarivanja ojačani dijelovi konstrukcije koji su loše dimenzionirani. Na ulazu u vakuum peć postavljeni su poklopci koji su strojno obrađeni u uskom tolerancijskom polju (površine brtvljenja). Nakon što je konstrukcija podvrgnuta zavarivanju, kao posljedica su se pojavile deformacije na ulazu peći. Pojava deformacija na ulazu peći nalagala je ponovnu strojnu obradu kako bi se mogli koristiti postojeći poklopci. Ako bi se u konstrukciji zadržala zaostala naprezanja uzrokovana procesom zavarivanja prije nastavka tehnološkog postupaka strojne obrade, ista bi se mogla oslobađati tijekom strojne obrade. Potencijal zaostalih naprezanja mogao bi uzrokovati problem postizanja traženih tolerancija strojne obrade. Kako bi se odstranio mogući potencijal problema, potrebno je osigurati stabilnost konstrukcije popuštanjem zaostalih naprezanja. Predloženo je tehnološko rješenje u vidu VSR postupka koji je sastavni dio kompletnog korektivnog procesa na čeličnoj konstrukciji. Osim toga, na konstrukciji peći bilo je potrebno zamijeniti postojeće prirubnice i uvode (obaviti postupak zavarivanja na tijelu peći). Ukupne dimenzije konstrukcije su:  $3360 \times 1894 \times 9340$  mm i mase od 9155 kg, a za postupak sanacije izrađena je dokumentacija. Materijal sklopa je konstrukcijski čelik oznake S235. Kako bi se predvidjelo ponašanje konstrukcije izvršena je numerička frekvencijska analiza sklopa u svrhu procjene izvodivosti procesa. VSR metoda je specifičan postupak koji ovisi o određenim karakteristikama objekta kao što su: oblik, masa, elastičnost, moćnost postavljanja u pogodan položaj za obradu i drugi. Potrebno je provjeriti poklapa li se očekivani rezultat s raspoloživim frekvencijskim opsegom primijenjene opreme za VSR postupak. Na osnovu provedene izrade 3D modela sklopa izvršena je procjena procesa i frekvencijska analiza procjene vibracija, amplitude i frekvencije vibracija, odnosno izrada preliminarne analize frekvencijskih karakteristika sklopa (Slika 5).



**Slika 5.** Prikaz konstrukcije peći u 3D modelu

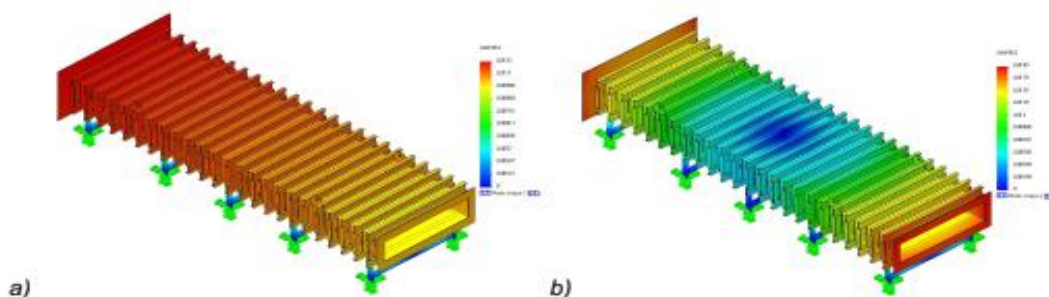


**Slika 6.** Prikaz predviđenih mjesta oslanjanja konstrukcije na gumene podloške



Provođenje postupka relaksacije izvršeno je u osam faznih procesa, kako bi se osigurala relaksacija naprezanja svih segmenata konstrukcije. U šest faznih procesa koji obuhvaćaju konstrukciju i dva procesa koja su posebno provedena na čeonim pločama ulaznog i izlaznog segmenta komore peći. Postupak provođenja procesa rasterećenja zaostalih naprezanja (nakon zavarivanja) kao i izvođenja aktivnosti kontrole odvijao se po sljedećim fazama [5]:

1. Preliminarna dinamička analiza konstrukcije u cilju određivanja parametara VSR tretmana i mogućnosti raspoložive opreme (Slika 5),
2. Određivanje položaja vibratora na osam mjesta, u horizontalnoj ravnini i dva pravca u vertikalnoj ravnini za ploče ulazne i izlazne strane peći,
3. Određivanje položaja gumenih podmetača na konstrukciji (Slika 6),
4. Nadzor konstrukcije u cilju određivanja harmonijske frekvencije (Slika 7),
5. Provođenje VSR procesa u cilju raspodjele naprezanja za svaki položaj tretiranja i
6. Obrada podataka nakon završenog VSR procesa.



**Slika 7.** Prikazi predviđene oscilacije konstrukcije [5]

Na temelju dinamičke analize cjelokupne konstrukcije, između ostalog, vidljivo je da se konstrukcija nalazi u frekvenzijskom opsegu u kojem je moguće provođenje VSR postupka, odnosno u opsegu u kojem je moguće koristiti raspoloživu opremu. Svi zavareni spojevi u zoni djelovanja su obuhvaćeni tretmanom relaksacije. Stoga je ukupna procedura podrazumijevala osam različitih položaja vibracijske pobude (naglasak na dva položaja prirubnih ploča na ulazu i izlazu konstrukcije). Pored izvršene preliminarne dinamičke analize, nakon određivanja položaja vibratora, za svaku poziciju je izvršeno "skeniranje" konstrukcije koja je pokazala osjetljivost konstrukcije u opsegu od 35 do 90 Hz. Primijenjene frekvencije tretiranja u postupku bile su u skeniranom opsegu, a trajanje tretmana je od 30 do 50 minuta za svaku poziciju. Postupak vibracijske pobude u cilju skeniranja konstrukcije te VSR tretiranja je primijenjen na svakoj od osam pozicija konstrukcije kako bi se proveo sveobuhvatan tretman u svim dijelovima konstrukcije. Na Slikama 8 i 9, prikazana je priprema i proces provođenja tretmana relaksacije za određene položaje konstrukcije i položaje vibracijske pobude. Korišteni su principi automatskoga postupka tretmana (ASR) i ručnog (MSR) procesa tretmana u ovisnosti od pokazatelja ponašanja konstrukcije



**Slika 8.** Konstrukcija vakuum peći s opremom za provođenje VSR procesa



**Slika 9.** Konstrukcija vakuum peći - čeonice i oprema za provođenje VSR procesa

Primjenom više pozicijskoga tretiranja konstrukcije osiguran je unos vibracijske pobudne energije u svim dijelovima konstrukcije, a promjenom položaja apsorpcijskih elementa (gumenih podloški ispod konstrukcije) oblikovanje efekata savijanja i torzije. Posebno tretiranje obavljeno je u dvije pozicije čeonih ploča ulaznog i izlaznog dijela konstrukcije peći. U ukupnom smislu, takvo tretiranje dovodi i do zbrojnog efekta tretiranja jer svaka naredna pozicija tretiranja utječe i na učinak svih prethodnih tretiranja u smislu smanjenja zaostalih naprezanja. Na osnovu primjene procedure skeniranja konstrukcije u svakoj poziciji, u Tablici 4. prikazani su ostvareni rezultati po svakoj poziciji (Poz).

**Tablica 4.** Rezultati procesa i izmjerene vrijednosti na pojedinim pozicijama vibriranja [5]

Poz.	Frek. opseg HF	Frek. Opseg SHF	Vršna amplituda	Ekscentričnost	Frek. opseg HZ	Frek. opseg SHZ	Vršna amplituda
	(Hz)	(Hz)	*PA (%)		(Hz)	(Hz)	*PA (%)
P1	87,5	83	100	40	--	--	--
P2	77,9	69,3	62,7	60	78,4	69,3	108,6
P3	56,4	62,9	100	60	56,7	56,2	108,4
P4	81	84,3	100	60	80,3	72,2	101
P5	84,5	83,3	39,6	60	79,7	78,9	100
P6	79,3	78	100	60	--	--	--
P7	79,3	78,4	100	60	80,6	79,4	75,6
P8	77,4	76	100	60	77,9	77	76,3

Nadzorom procesa popuštanja zaostalih naprezanja za svaki od položaja pobude utvrđene su promjene dinamičkih karakteristika tretirane strukture nakon provedenog VSR postupka na osnovu promjene frekvencije i vršne amplitude. Nadzor i tretman za svaku poziciju trajao je od 35 do 45 minuta, a tretman skeniranja frekvencija konstrukcije za zadani položaj trajao je od 5 do 10 minuta.



#### 4. Zaključak

Oblikovana i izrađena konstrukcija vakuum peći uvrštava se u zavarene čelične konstrukcije većih dimenzija. Odabir VSR metode potvrđen je iz više razloga a neki od njih su: dimenzije (gabariti) konstrukcije, realni troškovi postupka te ograničenja (kao npr. toplinska ograničenja zbog različitih debljina stjenki konstrukcije) u primjeni drugih postupaka popuštanja zaostalih napreznja. Po obavljenom cjelovitom procesu popuštanja napreznja vibracijama (VSR) za svaku pojedinačnu poziciju izrađen je izvještaj o odzivu (reakciji) konstrukcije na postupak vibriranja.

U provođenju VSR postupka može se dogoditi poremećaj ili tehnički problem. Problem može biti npr. nestanak električne energije (prekid ciklusa vibriranja), greške u komunikaciji centralne jedinice s računalom ili popuštanje stezaljki vibratora (prekidanje procesa vibriranja kako ne bi došlo do uništenja opreme) i drugi. Popuštanje stezaljki je razlog zašto u Tablici 4. nema evidentiranih završnih rezultata na pozicijama P1 i P6. Kako je do popuštanja stezaljki došlo pred sam kraj procesa, odlučeno je da se postupak na tim pozicijama neće ponavljati. Pretpostavka je da je razina zaostalih napreznja na tim pozicijama zadovoljavajuća.

#### 5. Literatura

- [1] Hadžikadunić, Fuad. (2011). Prilog razvoju metode vibrorelaksacije zaostalih napona na prostornom modelu zavarene čelične konstrukcije - doktorska disertacija. Univerzitet u Zenici.
- [2] Kelso, T. D. (1968). Stress relief by vibration. *The tool and Manufacturing Engineer*, 64(9), str. 48-49.
- [3] Pusch, T. (1976). Vibratory treatment for residual stress relieving, *Maschinenwelt-Electrotechnik*, (8), str. 136-159.
- [4] Klauba, B. B.; Adams, C. M.; Berry, J. Vibratory stress relief : Method used to monitor and document effective treatment, a survey of users and direction for further research. <https://www.researchgate.net/publication/289877138> (19.04.2022.)
- [5] Pavić, Mate. (2022). Primjena metode vibracija u postupcima održavanja i sanacije zaostalih napreznja. Završni specijalistički rad. Strojarski fakultet, Sveučilište u Slavonskom Brodu.
- [6] Meta-Lax Software 2.0 (2001) - Series 2700. Stress Relief and Weld Conditioning Equipment, *Operations Manual*, Bonal Technologies Inc, USA.
- [7] Šarić, Tomislav; Pavić Mate; Samardžić Ivan; Šimunović Goran. (2022) Primjena metode vibracija u postupcima održavanja i sanacije zaostalih napreznja, *MeditMaint 2022 - 27. Međunarodno savjetovanje Održavanje 2022 - 27. International Conference Maintenance 2022*, HDO - Hrvatsko društvo održavatelja, Rovinj.