

ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM LEGURE ALUMINIJUMA 2024

Friction stir welding of aluminium alloys 2024

Miodrag Milčić¹, Dragan Milčić¹, Boban Anđelković¹, Igor Radosavljević², Aleksandar Živković³, Slobodan Jovanović¹

¹Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

²Vojnotehnički institute VTI, Ratka Resanovića 1, Beograd, Srbija

³Aleksandar Živković, GOŠA-FOM, Smederevska Palanka, Srbija

Ključne riječi: Zavarivanje trenjem sa mešanjem, AA 2024 T351, dinamička izdržljivost zavarenog spoja

Sažetak

Lake zavarene konstrukcije od aluminijumskih legura široko se koriste u automobilske i vazduhoplovnoj industriji. Posebno zanimljive su lake konstrukcije napravljene od legura aluminijuma, koje su teško zavarive konvencionalnim postupcima zavarivanja. Ovakve konstrukcije se spajaju zavarivanjem trenjem sa mešanjem (FSW), što je relativno novi način zavarivanja. Kada su dinamički opterećene zavarene konstrukcije, neophodno je izvršiti ispitivanje zamornog ponašanja materijala (zakonitosti rasta zamorne prsline i ispitivanje dinamičke izdržljivosti i određivanje S-N krive).

Na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu razvija se metodologija za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem na visoko frekventnoj mašini (šejker). Za generisanje oscilacija konzolno postavljenih epruveta, koristi se elektrodinamička visoko frekventna mašina (šejker) Sentek Dynamics. Veza između armature šejkera i uzoraka za ispitivanje je ostvarena pomoću specijalno dizajniranog fiksatora, koji omogućava konzolno stezanje epruveta. U cilju skraćivanja vremena trajanja ispitivanja, razvijeni fiksator omogućava istovremeno ispitivanje do 12 epruveta..

Abstract

Light welded constructions from aluminum alloys are widely used in the automotive and aerospace industry. Particularly interesting are the lightweight construction made of aluminum alloys that are difficult to weld conventional welding procedures. Such structures are welded with Friction stir welding (FSW), which is a relatively new way of welding. When dynamically loaded welded structures it is necessary to carry out testing of fatigue behavior of materials (the legality of fatigue crack growth and testing fatigue strength and determination of S-N curves).

On Faculty of Mechanical Engineering in Nis has been developed a methodology based on the vibration tests based on the estimation that the fatigue behavior of welded joints achieved with FSW. In order to reduce the duration of the test, the test setup was developed for the simultaneous testing of a large number of specimens. For the generation of harmonic oscillations of console set specimen, used high-frequency electrodynamic vibration test system (shaker) Sentek Dynamics. The connection between the armature of shaker and test specimens is accomplished using a specially designed fixator.

1. Uvod

Legure aluminijuma su našle široku primenu i u automobilske i vazduhoplovnoj industriji. Obe industrije pomeraju granice novih inovativnih proizvoda, zahtevom za većom nosivošću i ujedno manjom masom uz robustan dizajn. Legure aluminijuma karakteriše visoka nosivost u odnosu na nivo mase po relativno niskoj ceni. U cilju poboljšanja karakteristika aluminijuma koriste se legure

aluminijuma, koji se dobijaju legiranjem čistog aluminijuma sa sledećim elementima: bakrom, cinkom, magnezijumom, silicijumom, manganom i litijumom. Kod legura aluminijuma sa bakrom (serija 2), bakar je glavni legirajući element u ovoj familiji čije mehaničke vrednosti dostižu one kod mekih čelika. Inače, familija je poznata po popularnom i tradicionalnom nazivu - durali. Upotrebljava se najčešće za radne - nosive delove. Nema dobra antikorozivna svojstva i po pravilu se loše zavaruju klasičnim postupcima zavarivanja. Kako su legure aluminijuma serije 2 teško zavarive klasičnim metodama zavarivanja, to se za njihovo zavarivanje koristi postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem.

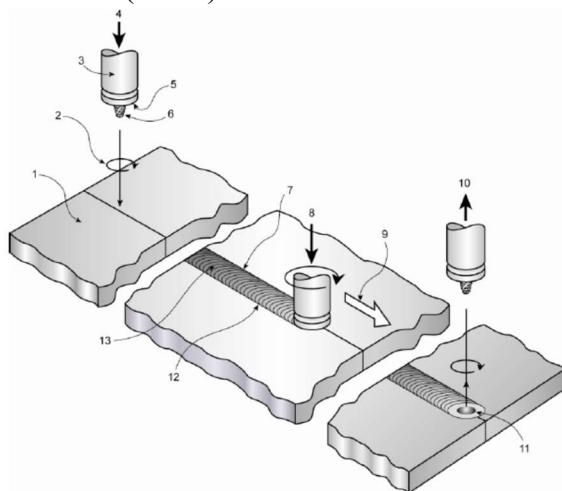
Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (ZTM, eng. Friction Stir Welding - FSW) je nastao kao rezultat istraživanja vršenih u cilju iznalaženja novih rešenja pri zavarivanju aluminijumskih legura, kako bi se izbegli problemi koji se javljaju pri konvencionalnim procesima zavarivanja (lokalno zagrevanje materijala do i preko tačke topljenja, pri čemu se u značajnoj meri smanjuju mehanička svojstva materijala).

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (eng. Friction Stir Welding – FSW) su izmislili i eksperimentalno proverili Vejn Tomas (Weyne Thomas) i tim njegovih kolega sa Instituta za zavarivanje u Londonu, Velika Britanija (The Welding Institute UK – TWI) tokom decembra 1991. godine. Participant u istraživanjima i prvi korisnik postupka FSW bila je kompanija Hitači (Hitachi Ltd.) koja je od kraja 1991. godine do sredine 1992. godine razvila mašinu kojom je bilo moguće FSW postupkom zavariti 25 metara dugu aluminijumsku šasiju kod lakih, ekoloških šinskih vozila korišćenih za potrebne podzemnih železnica Japana, tzv. „Hitachi A-Train“.

Ovaj metod se već rutinski koristi, posebno u raznim slučajevima kod kojih ni jedan drugi metod ne daje zadovoljavajuće rezultate, ali, osnovne prednosti FSW-a se najviše ogledaju u spajanju materijala kao što su aluminijum i njegove legure, nerđajući austenitni čelici koji se teško zavaruju konvencionalnim metodama, titan, nemetalni materijali itd.

2. Zavarivanje trenjem sa mešanjem

FSW postupak zavarivanja predstavlja tipičan primer korišćenja indirektnog načina generisanja toplote trenjem [1, 2, 3]. Postupak FSW (slika 1) se realizuje na sledeći način: limovi (radni komadi, delovi koji se spajaju, osnovni metal) su sučeono pritisnuti i fiksirani za podložnu ploču. Za zavarivanje se koristi specijalni alat cilindričnog oblika, koji se sastoji od tela većeg prečnika i klina manjeg prečnika na kome je najčešće narezan levi navoj. Prelaz između tela i klina je ravna ili konusna prstenasta površina, tzv. rame (nosač) alata.



Slika Pogreška! U dokumentu nema teksta navedenog stila.1 Nomenklatura postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem, 1-osnovni metal, 2-smer rotacije alata, 3-alat za zavarivanje, 4-spuštanje alata, 5-rame alata, 6-klin (trn), 7-strana napredovanja zavara, 8-aksijalna sila, 9-smer zavarivanja, 10-podizanje alata, 11-izlazni otvor, 12-povratna strana zavara, 13-lice šava

Na početku zavarivanja alat se nalazi iznad podložne ploče i radnih komada tako da je njegova osa najčešće normalna na liniju dodira limova. U tom položaju alat rotira i počinje translatorno kretanje naniže, klin prodire istovremeno kroz oba lima u tački na liniji spajanja, usled trenja generiše se toplota, materijal limova se zagreva i, zahvaljujući zavojnici alata, on se neprekidno meša. Kada rame dodirne površinu limova, tada je čeona površina klina vrlo blizu podložne ploče, kretanje alata naniže se prekida dok alat nastavlja rotaciju. Neko vreme alat ostaje u tom položaju, a onda započinje horizontalno kretanje duž linije dodira limova. U daljem toku procesa, klin zagreva nove slojeve materijala oba lima i meša ih, a iza njega se stvara brazda deformisanog materijala koji očvršćava i tako formira monolitan spoj. Rame alata oblikuje ravnu površinu šava sa gornje strane limova, a sa donje strane to isto čini postolje-podložna ploča. Proces se završava prekidom translatornog kretanja i izvlačenjem alata iz osnovnog materijala. Važna kinematska karakteristika FSW jeste što alat uvek ima neprekidno rotaciono glavno kretanje, a najčešće on istovremeno vrši oba translatorna pomoćna kretanja, mada je moguće da translatorna kretanja vrši podložna ploča sa radnim komadima.

Kvalitetu zavarenih spojeva izvedenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem determiniran je s više parametara kao i karakteristikama materijala koji učestvuju u procesu zavarivanja. Najveći uticaj na kvalitet zavarivanja trenjem sa mešanjem imaju sledeći parametri [3]:

- Brzina obrtanja alata,
- Brzina zavarivanja – translatorna brzina,
- Sila u pravcu ose alata – aksijalna sila,
- Nagibni ugao alata,
- Odnos brzine rotacije i brzine zavarivanja,
- Geometrija alata.

Promenu osobina osnovnog materijala u procesu zavarivanja trenjem sa mešanjem izazivaju sledeći faktori: maksimalno dostignuta temperature (posledica toplote indukovane trenjem tokom zavarivanja), brzina hlađenja, dejstvo pritiskne sile i tečenje materijala usled mehaničkog mešanja. Upravo ove pojave, praćene promenom osobina osnovnog materijala, uzrokuju postojanje nekoliko zona u zavarenom spoju različitih po svojoj strukturi i osobinama:

Osnovni materijal (OM) - ova zona nije izložena dejstvu mehaničkog opterećenja i temperature, jer je na dovoljno velikoj udaljenosti od zavara. Samim tako nema promena u mikrostrukturi i mehaničkim osobinama i one odgovaraju svom polaznom stanju;

Zona uticaja toplote (ZUT-HAZ) - je deo osnovnog metala blizu zavara, koji je izložen dejstvu povišene temperature, ali ne i dejstvu mehaničkog opterećenja. Tokom procesa zavarivanja u ovoj zoni se odvija određeni temperaturni ciklus zagrevanja i hlađenja, usled čega dolazi do promena u mikrostrukturi i mehaničkim osobinama. Veličina ove zone zavisi od odnosa vremena i temperature zavarivanja, kao i od rastojanja od ose zavara.

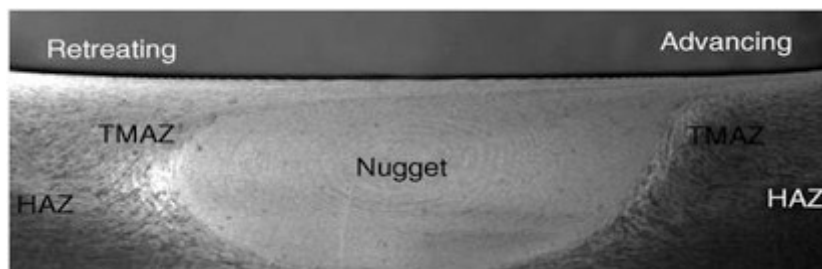
Zona termo-mehaničkog uticaja (ZTMU-TMAZ) - je deo osnovnog materijala koji se nalazi neposredno ispod alata. Istovremeno je izložen dejstvu mehaničkog opterećenja i povišenoj temperaturi, što ima za posledicu pojavu značajnih promena u mikrostrukturi, a samim tim i u mehaničkim karakteristikama materijala.

Kod aluminijumskih legura, unutar ZTMU moguće je uočiti tri oblasti:

Najizraženija je rekristalizovana oblast, tzv. Grumen (Nugget), koja je usled dejstva mehaničkog opterećenja znatno deformisana.

Levo i desno od grumena nalazi se oblast koja je deformisana u manjoj meri u odnosu na grumen. U ovoj oblasti može ali i ne mora doći do rekristalizacije zrna, u zavisnosti od vrste legure.

Treća oblast (tzv. rukavac) se nalazi iznad grumena. Nastaje tokom prolaza ivice valjka sa povratne strane preko prethodno formiranog grumena.



Slika 2 Tipičan makrografski snimak različitih mikrostrukturnih zona

3. Eksperimentalni deo

Legura aluminijuma 2024-T351 debljine 8,0 mm korišćena je u ovom radu kao osnovni materijal. Ploče su obrađene brušenjem sa obe strane na debljinu 6.0 mm čime je uklonjen aluminijumski oksid. Hemijski sastav i mehaničke osobine osnovnog materijala EN AW 2024-T351 date su u Tabeli 1 i 2.

Tablica 1 Kemijski sastav osnovnog materijala 2024 T351

Hemijski sastav	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
%	4,70	1,56	0,65	0,17	0,046	0,11	0,032	ostatak

Tablica 2 Mehaničke karakteristike osnovnog materijala EN AW 2024-T351

Granica tečenja	Zatezna čvrstoća	Elongacija	Tvrdoća, Vickers
$R_{eh}, \frac{N}{mm^2}$	$R_m, \frac{N}{mm^2}$	$A_5, \%$	HV
370	481	17.9	137

Ploče za zavarivanje su bile dimenzija 500 mm dužine, 65 mm širine i 6 mm debljine. Stranice ploča su bile mašinsko obrađene brušenjem. Prilikom zavarivanja (slika 3a) ploče za zavarivanje su imale čvrsti kontakt sa podložnom pločom od austenitnog čelika i sučeno spojene duž pravca kretanja koristeći konvencionalnu glodačku mašinu. Dužina zavarivanja je bila oko 450 mm. Na slici 3b prikazan je korišćeni alat koji je napravljen od alatnog čelika, sa navojem na konusnom trnu dužine 5,5 mm i konkavno profilisanom glavom na cilindričnom ramenu prečnika 25 mm.



a)

b)

Slika 3 a) Proces zavarivanja trenjem sa mešanjem; b) alat za zavarivanje

Alat za zavarivanje, koji je korišćen u eksperimentu, je izrađen od čelika broj 1.2714, prema DIN 17350 – 56NiCrMoV7, prema EN standardu 55CrMo8 (komercijalna oznaka čelika UTOPEX2). Hemijski sastav materijala alata je dat u Tabeli 3.

Tablica 3 Hemijski sastav materijala alata: (DIN 17350 56NiCrMoV7)

Hemijski sastav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
%	0,55	0,3	0,7	0,035	0,035	1,1	1,7	0,5	0,12

Parametri zavarivanja korišćeni u eksperimentu su dati u Tabeli 4. Zavareni uzorci su izrađeni sa brzinom obrtanja alata 750 o/min, a brzina zavarivanja je bila (73, 116, and 150) mm/min.

Tablica 4 Parametri zavarivanja

Uzorak	Brzina obrtanja alata (n) o/min	Brzina zavarivanja (v) mm/min	Odnos n/v o/mm	Odnos v/n mm/o	Odnos n^2/v
A - I	750	73	10,27	0,0974	7705,5
B - II		116	6,47	0,155	4849,14
C - III		150	5	0,2	3750

Izgled zavarenih uzoraka je dat na slici 4.



Slika 4 Izgled uzoraka od legure aluminijuma 2024 T351 zavarenih postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem

Svi zavareni uzorci su radiografski ispitani i nisu ustanovljene greške u zavarenom spoju.

Za svaki od zavarenih uzoraka biće izvršeno eksperimentalno ispitivanje mehaničkih karakteristika (ispitivanje zatezanjem, određivanje tvrdoće u različitim zonama zava, utvrđivanje udarne žilavosti primenom metode Charpy), ispitivanje zamornih karakteristike i zakonitosti rasta zamorne prsline jednosmerno promenljivim opterećenjem zavarenog spoja savremenog vazduhoplovnog materijala, ispitivanje dinamičke izdržljivosti i određivanje S-N krive.

4. Ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem

Kod dinamički opterećenih zavarenih konstrukcija, za kontrolu zavarenih spojeva pored određivanja mehaničkih svojstava bitno je odrediti i njihova dinamička svojstva, odnosno ponašanje pri promenljivim opterećenjima jer u praksi su češći lomovi nastali usled promenljivih opterećenja u odnosu na statičke lomove. Lom koji nastaje izazvan promenljivim tj. dinamičkim opterećenjem posledica je pojave koja se naziva zamor materijala.

Ispitivanje zamaranjem u cilju određivanja dinamičke izdržljivosti može se vršiti zatezanjem, pritiskivanjem, savijanjem ili uvijanjem, ili kombinovanjem ovih napreznja.

Za određivanje dinamičke izdržljivosti prema postupku predloženom od Velera, potrebno je 6 do 10 potpuno jednakih epruveta. Epruvete se jedna za drugom izlažu različitim promenljivim opterećenjima do pojave vidljive prskotine ili do potpunog loma. Srednji napon, a u nekim sličajevima donji napon, za sve epruvete je konstantan, a amplituda napona smanjuje se stepenasto od jedne epruvete do druge. Za svaku epruvetu registruje se broj ciklusa N pri kojem je nastala prslina na epruveti. Smanjenje amplitude napona vrši se sve do vrednosti pri kojoj se epruveta ne lomi ni pošto je izdržala veoma veliki- granični broj ciklusa N_D . Pod graničnim brojem ciklusa N_D podrazumeva se najmanji broj ciklusa posle kojeg ne nastaje lom ni pri neograničenom broju ciklusa.

Način opterećivanja zavisi od vrste naprezanja i mora da bude jednak za sve epruvete u toku jednog ispitivanja. Frekvencija treba da bude tako odabrana da se izbegne preterano zagrevanje epruvete u toku ispitivanja. Ako se zagrevanje ne može izbeći, epruvetu treba u toku ispitivanja hladiti pogodnim antikorozivnim sredstvima. Pri posebnim ispitivanjima epruvete ili konstrukcionog dela, način opterećivanja i frekvencija treba da što bliže odgovaraju radnim uslovima.

4.1. Mašina za ispitivanje

U zavisnosti od vrste naprezanja koje mogu da ostvare, mašine za ispitivanje promenljivim opterećenjem mogu se podeliti na:

1. mašine za ispitivanje promenljivim zateznim-pritisnim opterećenjem (pulzatori);
2. mašine za ispitivanje promenljivim savojnim opterećenjem;
3. mašine za ispitivanje promenljivim uvojnim opterećenjem;
4. mašine za ispitivanje promenljivim kombinovanim (npr. savijanje - uvijanje) opterećenjem.

Za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih trenjem sa mešanjem razvijen je test setup koji će omogućiti ispitivanje epruveta savojnim promenljivim opterećenjem. Za generisanje oscilacija konzolno postavljenih epruveta, koristi se elektrodinamička visoko frekventna mašina (šejker) Sentek Dynamics L1024M na Mašinskom fakultetu u Nišu (slika 5).



Slika 5 Visoko frekventna mašina (šejker) Sentek Dynamics L1024M

Ova mašina za vibraciona ispitivanja, pre svega je namenjena za testiranje automobilskih delova i sistema, testiranje elektronskih sklopova, računarske opreme, testiranje komponenti satelita, aviona i vojne opreme, testiranje proizvoda i pakovanja mase do 200 kg.

Tehničke karakteristike ove mašine su: vertikalnog pomaka platforme u području do 51 mm. Frekvencija f_p oscilacija platforme može se podešavati u granicama od 5 do 3000 Hz.

Promena vertikalnog pomaka platforme D_{PTP} i brzine v_P zavisi od veličine frekvencije f osvilovanja i vrednosti g , a može se izračunati prema izrazima (1) i (2):

$$D_{PTP} = 0.4968 \frac{g}{f^2} \text{ m} \quad (1)$$

$$v_P = 1.561 \cdot 10^3 \frac{g}{f} \text{ m/s} \quad (2)$$

4.2. Epruveta

Oblik i dimenzije epruveta za normalna ispitivanja propisuju se odgovarajućim standardima u zavisnosti od svrhe i načina ispitivanja zamaranjem.

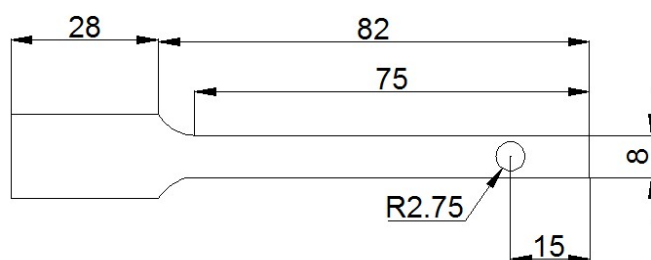
Za posebna ispitivanja i zavarene spojeve koriste se specijalni oblici epruveta koji trebaju da budu slični obliku odgovarajućeg konstrukcionog dela, ili se ispituju sami konstrukcioni delovi.

Postupak obrade epruveta ne sme da izmeni strukturu ni osobine materijala.

Naročitu pažnju treba obratiti kvalitetu hrapavosti površina epruvete. One moraju biti brušene, eventualno i polirane i pogodnim sredstvom zaštićene od korozije. Broj epruveta za jedno ispitivanje može biti vrlo različit, u zavisnosti od podataka koji se traže.

Učvršćivanje epruvete u čeljusti mašine za ispitivanje zamaranjem treba da bude izvedeno pažljivo, tako da epruveta u toku ispitivanja ne bi bila izložena dopunskim opterećenjima ili vibracijama.

Oblik i dimenzije epruveta koje su korišćene za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem je data na slici 6.



Slika 6 Epruveta

Zavareni uzorci su nakon zavarivanja prethodno brušeni, a onda su iz zavarenih ploča izrezane na CNC mašini epruvete (slika 7).

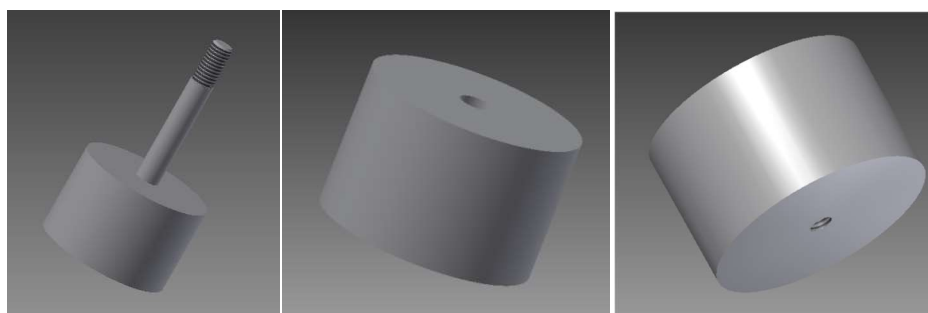
Na udaljenosti 15 mm od kraja epruvete izrađen je otvor prečnika 5,5 mm koji služi za učvršćivanje tegova za opterećenje epruveta.

Različitim masama tegova se ostvaruju željena naponska stanja u zavaru epruvete. Kako se istovremeno ispituje do epruveta, bitan preduslov realizacije eksperimenta ja da svi tegovi, za taj slučaj opterećenja budu istih dimenzija odnosno istih masa. Svi tegovi, zbog jednobraznosti su brušeni. Mase 5 različitih izrađenih tegova su 1-118 g, 2-107 g, 3-188 g, 4-244 g i 5-314g. Tegovi za opterećenje epruveta su date na slici 8.



Slika 7 Izrađene epruvete iz FSW zavarenih uzoraka

Kombinacijom tegova dobijaju se željena opterećenja epruveta (Tabela 5). Urađen je softver u Excel-u na bazi analitičkog proračuna za određivanje naponskog stanja u zavarenom spoju epruvete.

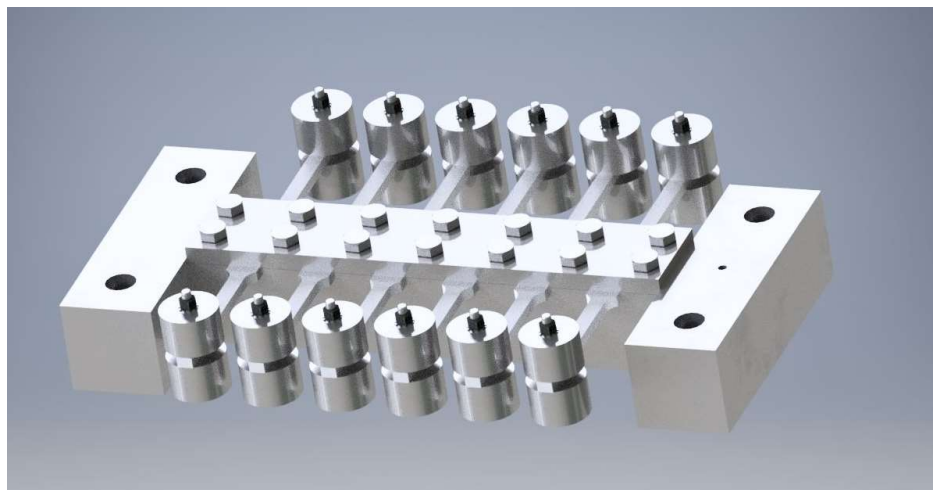


Slika 8 Oblici tegova za opterećenje epruveta

Tablica 5 Kombinacije tegova za ostvarivanje željenog naponskog stanja u zavarenom spoju epruveta

Red. br.	Kombinacije tegova	Masa tegova g
1	1+2	225
2	1+3	306
3	1+2+4	469
4	1+2+5	539
5	1+3+4	550
6	1+3+5	620

Epruvete se stežu u čeličnom nosač epruveta - fiksator (slika 9).

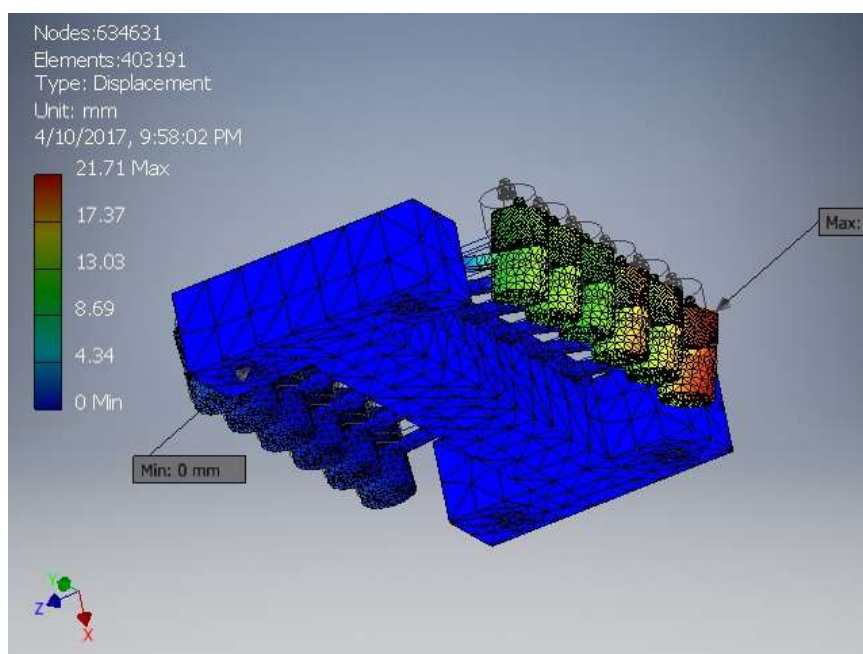


Slika 9 Virtuelni model sklopa fiksatora i epruveta opterećenih tegovima – kombinacija 1

Sa druge strane, fiksator se učvršćuje zavrtnajskom vezom za sto šejkera. Sto šejkera ima u određenom rasporedu već pripremljene rupe sa navojem koje služe za fiksiranje dela koji se testira. Razvijeni fiksator za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ima otvore za fiksiranje koji su prilagođeni rasporedu rupa stola šejkera. Dakle fiksator predstavlja interfejs između vibracione mašine - šejkera i epruveta koje služe za određivanje dinamičke izdržljivosti zavarenog spoja. Fiksator je proširenje armature test mašine u obliku vrlo krute structure kaoja može preneti potrebnu silu na željenu frekvenciju.

Zbog izbora parametara mašine za vibracijsko ispitivanje - elektro-dinamičkog šejkera izvršena je FEA modalna analiza određivanja sopstvenih frekvencija samo opterećenih epruveta i fiksatora sa epruvetama u sklopu.

Modeliranje fiksatora, epruveta i tegova kao i njihovog sklopa je urađeno u CAD softveru Autodesk INVENTOR. U ovom softveru je urađena i modalna analiza ovog sklopa. Sklop je diskretizovan sa 403191 elemenata i 634631 čvorova (slika 10).



Slika 10 Dio rezultata modalne analize sklopa fiksatora i epruveta

Rezultati prvih 20 modova sopstvenih oscilacija sklopa fiksatora i epruveta dat je u tabeli 6.

Tablica 6 Svojtstvene frekvence sklopa fiksatora i opterećenih epruveta za kombinaciju tegova 1

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
152.54 Hz	152.55 Hz	152.77 Hz	153.05 Hz	153.14 Hz	153.45 Hz	157.52 Hz	157.97 Hz	158.85 Hz	158.92 Hz
F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20
159.04 Hz	159.27 Hz	255.85 Hz	257.04 Hz	257.09 Hz	257.24 Hz	257.27 Hz	257.38 Hz	283.04 Hz	283.20 Hz

Na slici 11 prikazan je sistem za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva - epruvete stegnute u fiksatoru, a ovaj učvršćeni zavrtnajskom vezom sa tablom šejkera. U pripremi parametara za ispitivanje dinamičke izdržljivosti, meri se naponsko stanje u korenu epruvete za različite parameter ispitivanja.



Slika 11 Sistem za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva - epruvete stegnute u fiksatoru a ovaj učvršćeni zavrtnajskom vezom sa tablom šejkera

5. Zaključak

Na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu razvija se metodologija za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva ostvarenih zavarivanjem grenjem sa mešanjem na visoko frekventnoj mašini (šejker). Za generisanje oscilacija konzolno postavljenih epruveta, koristi se elektrodinamička visoko frekventna mašina (šejker) Sentek Dynamics. Veza između armature šejkera i uzoraka za ispitivanje je ostvarena pomoću specijalno dizajniranog fiksatora, koji omogućava konzolno stezanje do 12 epruveta.

U radu je prikazan razvijeni test setup za ispitivanje dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva na visoko frekventnoj mašini (šejker). Za generisanje oscilacija konzolno postavljenih epruveta, koristi se elektrodinamička visoko frekventna mašina (šejker) Sentek Dynamics.

Veza između armature šejkera i uzoraka za ispitivanje je ostvarena pomoću specijalno dizajniranog fiksatora, koji omogućava konzolno stezanje epruveta. U cilju skraćenja vremena trajanja ispitivanja, razvijeni fiksator omogućava istovremeno ispitivanje 12 epruveta.

Fiksator je izrađen od čelika sa odgovarajućim vezama za armature šejkera.

U cilju razvijanja metodologije ispitivanja dinamičke izdržljivosti definisani su i izrađeni setovi tegova za opterećenje epruveta i ostvarivanje željenih nivoa naponskih stanja u zavaru epruveta.

Urađena je modalna analiza sklopa fiksatora i epruveta u cilju definisanja parametara ispitivanja dinamičke izdržljivosti.

Na bazi modalne analize sklopa fiksatora i epruveta najveća frekvencija ispitivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva se definiše se parametric ispitivanja (frekvencija f i akceleracija g).

6. Literatura

- [1] Živković, A. (2011): Influence of friction stir welding tool geometry on properties of welded joint of alloys Al 2024, Ph.D thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering.
- [2] Mijajlović, M. (2012); Investigation and development of analytical model for estimation of amount of heat generated during FSW, Ph.D. thesis, University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering Nis.
- [3] Mijajlović, M., Milčić, D. (2012): Analytical Model for Estimating the Amount of Heat Generated During Friction Stir Welding: Application on Plates Made of Aluminium Alloy 2024 T351, Welding Processes, Radovan Kovačević (Ed.), ISBN: 978-953-51-0854-2, InTech, pp. 247-274.
- [4] Bauer, B. (2006): OPTIMIRANJE PARAMETARA LASERSKOG ZAVARIVANJA ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.
- [5] Yun, G.J., Abdullah, A.B.M., Binienda, W.K., Krause, D.L., Kalluri, S. (2014): Test methodology development for experimental structural assessment of ASC planar spring material for long-term durability, NASA, 2014.
- [6] Abdullah, A.B.M. (2010): DEVELOPMENT OF A CLOSED-LOOP RESONANT FATIGUE TESTING METHODOLOGY AND EXPERIMENTAL LIFE TEST OF ALUMINUM ALLOY, Ph.D. thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, 2010.