



Mr Milenko Perović¹, Dr Petar Todorović², Miodrag Jevtović³

EKSPERIMENTALNA ANALIZA DINAMIČKOG PONAŠANJA ALATA KOD POSTUPKA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MIJEŠANJEM

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF INSTRUMENTS IN THE PROCESS OF FRICTION STIR WELDING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.92 ; 621.9.01

Rad primljen / Paper received:

April 2014.

* Rad je izlagan na 28. savetovanju Zavarivanje 2014 – Borsko jezero

Adresa autora / Author's address:

¹ Privredna komora Crne Gore, Novaka Miloševa 29/II 81000 Podgorica, Crna Gora

² Fakultet inženjerskih nauka, Sestre Janjić br. 6, 34000 Kragujevac, Srbija

³ ICI doo Aleksandra Dupčeka br. 5-9, 11070 Beograd, Srbija

Ključne riječi: zavarivanje trenjem sa miješanjem, pritisna sila, vibraciono ubrzanje

Key words: friction stir welding, pressure force, vibration acceleration, frequency domain

Rezime

Proces spajanja metalnih materijala trenjem sa miješanjem praćen je brojnim i složenim termičkim, mehaničkim i tribološkim pojavama. Struktura zavarenog spoja u najvećoj mjeri zavisi od geometrije alata kao tehnološkog parametra, odnosno od njegovog dinamičkog odziva koji je rezultat otpora deformaciji osnovnog materijala za vrijeme istovremenog obrtno-translatornog kretanja alata kroz zavarivani radni predmet.

U radu je predstavljen fragment obimnih eksperimentalnih mjerenja i ispitivanja relevantnih za ocjenu o dinamičkom ponašanju alata tokom različitih faza i ciklusa zavarivanja visokočvrste legure aluminijuma složenog faznog sastava EN AW 7049A u stanju T652. Primijenjeni model kontinualnog praćenja dinamičke komponente pritisne sile i troosne komponente vibracionog ubrzanja u frekventnom domenu, osnova su za formiranje tehnološkog procesora pogodnog za predikciju uticajnih faktora na proces zavarivanja.

Abstract

The process of friction stir welding of metal materials is followed by numerous and complex thermal, mechanical and tribological phenomena. The structure of a welding joint most highly depends on the geometry of the instrument as a technological parameter, i.e. its dynamic response, which is the result of deformation resistance of basic material during simultaneous rotary-translatory motion of the instrument through the object being welded.

This paper presents a fragment of comprehensive experimental measurements and tests relevant for assessing the dynamic behaviour of instruments during different phases and cycles of welding of the high-strength aluminium alloy of complex phase composition EN AW 7049A in T652 state. The applied model of continuous monitoring of pressure force and the three-axis component of vibration acceleration in the frequency domain are a basis for forming a technological process suitable for prediction of impact factors on the welding process.

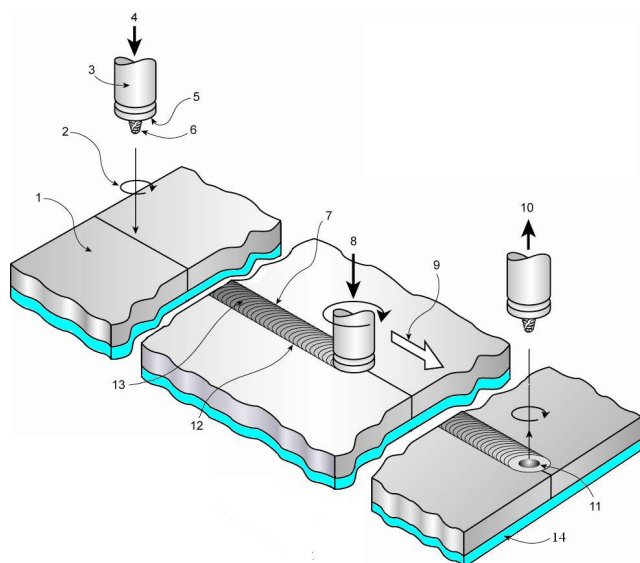
UVOD

Sve do pojave zavarivanja trenjem sa miješanjem (ZTM) prije dvije decenije, zavarivanje aluminijuma i njegovih legura predstavljalo je ozbiljan tehnološki problem. Konvencionalni postupci spajanja topljenjem nijesu uvijek obezbjedjivali uslove za formiranje spoja visoke efikasnosti, naročito limova od termički obradivih aluminijumskih legura.

Proces ZTM u čijoj se osnovi nalazi kombinovano djelovanje toplote i mehaničkog rada, utiče da zavareni spoj nastane u čvrstoj fazi-bez prisustva rastopa osnovnog materijala radnih komada. To omogućava mali

unos toplote samo u uskoj zoni ispod alata, minimalnu distorziju gotove zavarene konstrukcije i odsustvo faktora za nastanak i razvoj prslina u strukturnim sadržajima zavarenog spoja.

Proces ZTM sastoji se od dvije faze. Prva faza je kretanje alata u vertikalnom pravcu u smjeru naniže u odnosu na ravan zavarivanja, a druga faza je horizontalno kretanje alata u ravni predmeta obrade u smjeru zavarivanja. Prva faza se završava prodorom alata u zavarivane komade, a druga počinje istovremenim obrtnim i translatorskim kretanjem alata po površini obratka u ravni njihovog spajanja, slika 1.



Slika 1. Ilustrovana shema zavarivanja ZTM[1]

1. Osnovni materijal
2. Smjer rotacije alata
3. Alat za zavarivanje
4. Kretanje alata na dolje
5. Čelo valjka alata
6. Trn
7. Isturena strana metala šava
8. Vertikalna sila
9. Smjer zavarivanja
10. Kretanje alata na gore
11. Izlazna rupa
12. Povučena strana metala šava
13. Lice šava
14. Podložna ploča

2. CIKLUSNI STADIJUMI PROCESA

Početna faza procesa, u kinetičkom smislu, obuhvata tri stadijuma. U prvom stadijumu, trn alata dotakne gornje površine limova, ali zbog male aktivne površine, generisanje toplote i mehanička deformacija su zanemarljive sve dok čelo alata ne ostvari kontakt sa zavarivanim materijalom. Drugi stadijum karakteriše dalje prodiranje tijela valjka alata do zadate dubine (najčešće od 0,2 mm do 0,5 mm), što rezultira osjetnim porastom trenja a time i količine oslobodjene toplote i plastične deformacije neposredno ispod i oko čela alata. U trećem stadijumu, odnosno u ciklusu koji označava prestanak faze prodiranja alata i početak faze zavarivanja, alat rotira u mjestu, čime se radni predmet dodatno zagrijava do temperature koja je za oko 20% niža od njegove tačke topljenja. Druga faza sadrži dva stadijuma. Ciklus zavarivanja se odvija neprekidno zahvaljujući prethodno stvorenim pretpostavkama dovoljne količine generisane toplote i zadovoljavajućeg inteziteta sile pritiska od čela alata koja po liniji spoja konsoliduje plastično deformisani materijal obje ploče. Ovaj stadijum najviše odgovara mikro kovanju jer se izmiješani materijal nalazi u ograničenom prostoru između podložne ploče sa donje i čela alata sa gornje

strane, kao i dvije oblasti-homegene iza i heterogene ispred alata. Drugi stadijum ove faze je izvlačenje alata izvan mjesta spajanja, nakon prethodnog kratkog zadržavanja u kojem je prestalo translatorno kretanje alata a počelo njegovo vertikalno pomjeranje naviše u ravni normalnoj na pravac zavarivanja.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalna istraživanja usmjerena su na praćenje karaktera dinamičke komponente pritiska alata i nivoa vibracija na podložnoj ploči tokom procesa ZTM legure aluminijuma četvornog faznog sastava Al-Zn-Mg-Cu u stanju vjestačkog starenja. Uzorak je homogenizovani otkovak dimenzija 560 mm x 660 mm x 13 mm legure EN AW 7049 A u stanju T 652 tvrdoće 175 HB, iz kojeg su mašinskom obradom dobijene ploče za zavarivanje dimenzija 185 mm x 65 mm x 6 mm.

Određivanje učešća hemijskih elemenata u uzorcima za zavarivanje izvedeno je na epruveti u stanju T652 korišćenjem OE kvantometra ARL 3580 sa elektronskim uzorcima "Peshiney". Rezultati su dati u tabeli 1.

Vrsta legure	Sadržaj elementa, mas %											
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Ti	V	B	Fe	Si	Al
EN AW 7049A	7.20	2.15	1.45	0.27	0.13	0.13	0.01	0.004	0.003	0.23	0.10	ostalo

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala EN AW 7049A T652[2]



Da bi se eliminisao potencijalni uticaj toplote na rezultate eksperimenta, ploče su pripremane rezanjem vodenim mlazom a zatim skidanjem strugotine dovedene na pomenute mjere uz intenzivno hlađenje površine obrade. Mehanička ispitivanja osnovnog

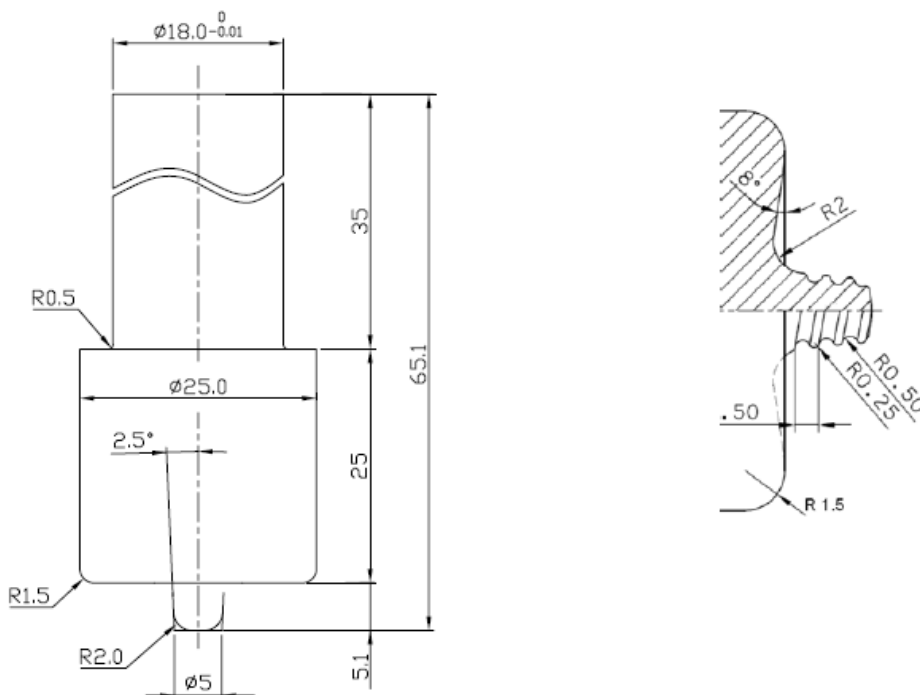
materijala pokazala su rezultate date u tabeli 2. Na slici 3. prikazan je izgled mikrostrukture osnovnog materijala uvećan x 530.[2]

Vrsta legure	Mehaničke karakteristike		
	$R_{0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
EN AW 7049A	562	628	7.5

Tabela 2. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala EN AW 7049A T652[2]

Za radni sto improvizovane mašine za FSW-numerički upravljane glodalice, pričvršćena je podložna ploča dimenzija 300mm x 200mm x 25mm, od čelika za poboljšanje 42 Cr Mo 4, termički obrađenog na 850 MPa i površinski okaljenog na 44 ± 2 HRC. U steznu glavu glavnog vretena umetnut je alat za zavarivanje čiji je crtež dat na slici 2, a hemijski sastav prikazan je u tabeli

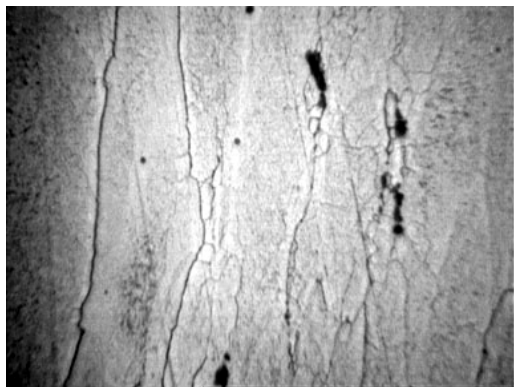
3. Alat je termički tretiran do površinske tvrdoće od 54HRC. Na slici 4. je prikazana mikrostruktura alata za zavarivanje pri povećanju x1000, dobijena na svjetlosnom mikroskopu NEOPHOT 21. Mikrostrukture se sastoji od fino dispergovanih karbida u osnovi otpuštenog martenzita.[4]



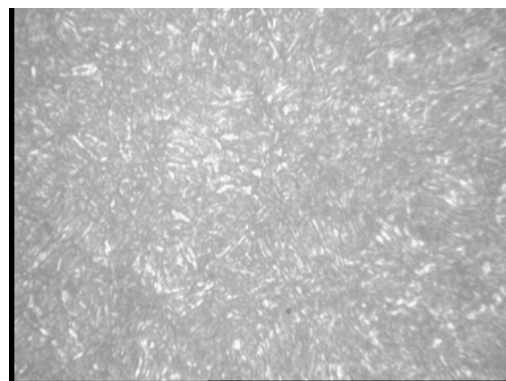
Slika 2. Ctež alata za zavarivanje

Vrsta čelika	Sadržaj elementa, mas %						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Fe
ENx155CrVMo 121	1,55	0,32	0,34	11,81	0,82	0,95	Ostalo

Tabela 3. Hemijski sastav alata za zavarivanje [4]



Slika 3. Mikrostruktura osnovnog materijala



Slika 4. Mikrostruktura alata

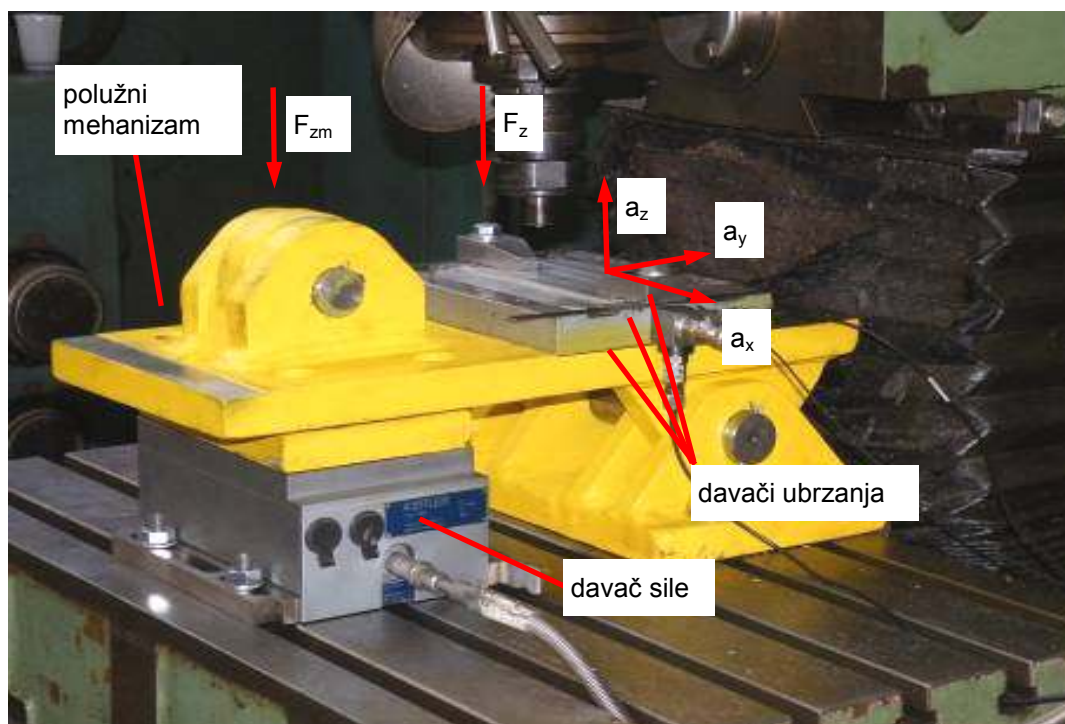
Za uticajne ulazne parametre procesa određeni su brzina zavarivanja, broj obrtaja alata, ugao i visina trna. Vrijednosti ostalih parametara procesa održavane su na konstantnom nivou. U tu svrhu urađen je set od pet alata sa istim dizajnom trna alata. Sačinjen je plan matrica eksperimenta za slučaj četvorofaktornog plana eksperimenta sa ponavljanjem u centralnoj tački plana. Postavljena mjerna instrumentacija za izvođenje eksperimentalnih istraživanja tokom ZTM procesa prikazana je na slici 5. Eksperimentalna istraživanja su obuhvatila mjerenje:

1. Sile F_z koja je mjerena pomoću trokomponentnog davača sile *Kistler 9265A* sa dodatkom za glodanje 9443.S obzirom da su očekivane sile prevazilazile mjerni opseg davača sile u cilju redukcije sile korišćen je zglobni

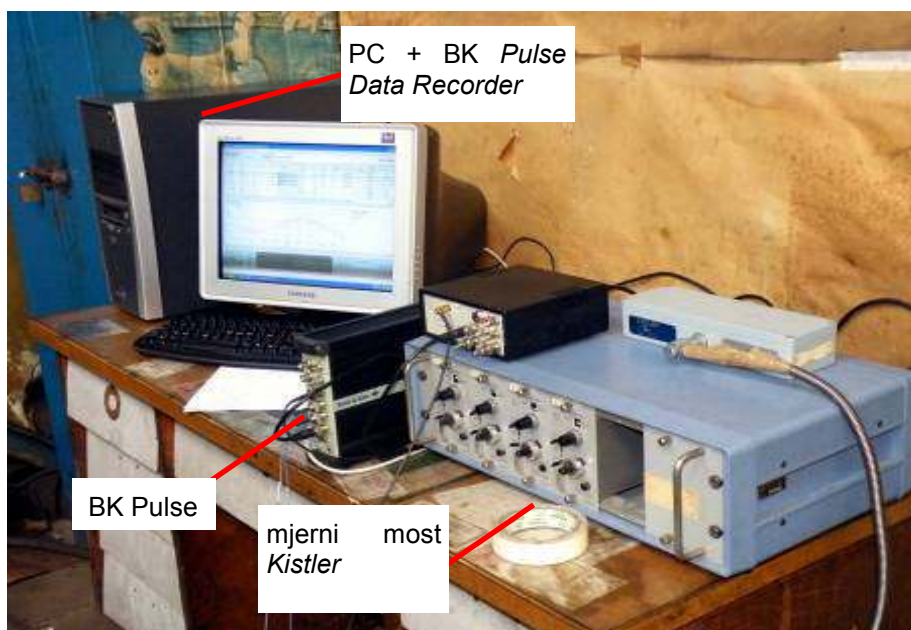
polužni mehanizam koji je redukovao aksijalnu silu u odnosu 4:1 Pojačanje signala sa davača sile vršeno je pomoću mjernog mosta *Kistler*, slika 6.

2. Nivoa vibracija na priboru za prihvatanje ispitivanih epruveta za zavarivanje. Vibracije su mjerene u tri pravca a_x , a_y i a_z pomoću tri piezoelektrična davača ubrzanja *BK 4391*.

Snimanje signala sile F_z i signala sa davača ubrzanja a_x , a_y i a_z urađeno je pomoću *BK Pulse* platforme i *BK Pulse Data recorder* softvera, slika 6. Snimanje ovih parametara trajalo je tokom čitavog trajanja svakog pojedinačnog eksperimenta primjenom 24-to bitne AD konverzije. Učestanost diskretizacije je bila 2048 Hz uz primjenu odgovarajućeg filtera propusnika niskih učestanosti (*low-pass filtra*) od 800 Hz.



Slika 5. Prikaz eksperimentalnog mjesta sa davačima za silu i vibracije



Slika 6. Izgled mjernog mosta i monitora za identifikaciju parametarskih vrijednosti sile i oscilovanja alata

4.REZULTATI EKSPERIMENTALNIH MJERENJA

U tabeli prikazani su “kumulativni” rezultati eksperimentalnih istraživanja. Varirane su vrijednosti broja obrtaja n , brzina zavarivanja v , ugla trna data β i visina trna alata h .

Kolona 1 – broj eksperimenta,

Kolona 2 – zadati broj obrtaja,

Kolona 3 – najdominantnija učestanost dobijena frekventnom analizom dinamičke komponente sile F_z , i

Kolona 4 – broj obrtaja izračunat na osnovu učestanosti iz kolone 3. Kolone 5, 6 i 7 – RMS vrijednosti nivoa ubrzanja (vibracija) a_x , a_y i a_z

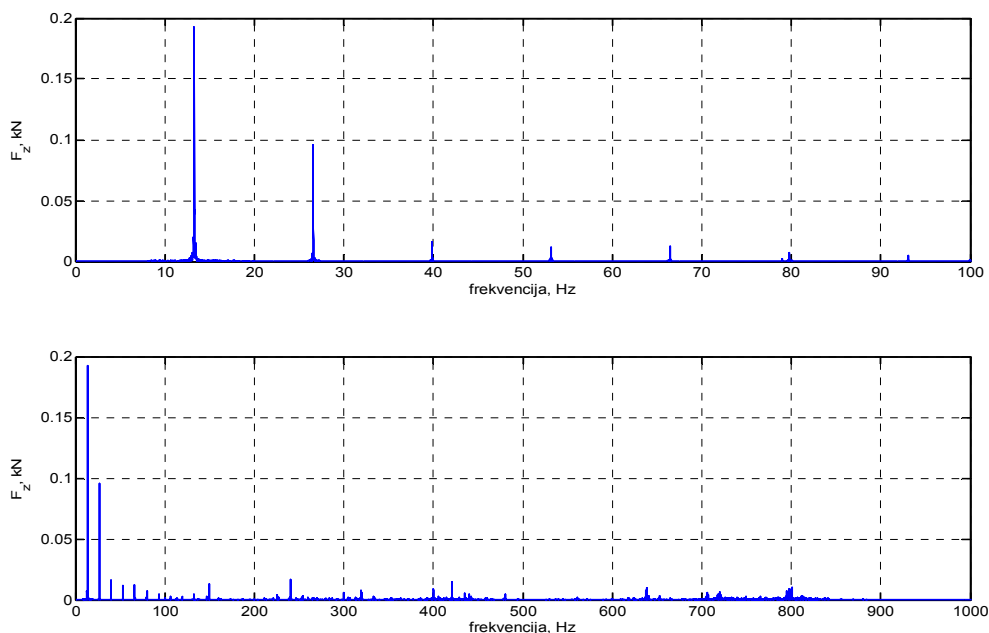
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Br. eks.	n, min^{-1}	f_1, Hz	n_{iz}, min^{-1}	$a_x, \text{mm/s}^2$	$a_y, \text{mm/s}^2$	$a_z, \text{mm/s}^2$
1.	850	13,29	847,42	1,887	1,845	1,238
2.	850	13,24	848,28	1,727	2,474	1,653
3.	750	11,69	751,25	3,313	1,507	1,242
4.	750	11,71	750,75	2,396	1,451	1,364
5.	850	13,26	849,36	1,230	1,993	1,366
6.	850	13,28	849,61	1,297	2,151	1,513
7.	750	11,73	749,00	1,079	1,445	1,243
8.	750	11,25	749,12	2,931	2,026	1,633
9.	850	13,29	749,63	2,657	2,097	1,718
10.	850	13,29	850,40	1,919	2,526	1,872
11.	750	11,73	749,55	1,896	1,434	1,374
12.	750	11,31	748,61	1,242	2,329	1,697
13.	850	13,31	849,66	1,396	2,046	1,426
14.	850	13,30	848,13	2,472	2,168	1,509
15.	750	11,72	750,39	1,145	1,461	1,386
16.	750	11,26	750,56	1,581	2,118	1,513
17.	798	12,48	798,66	1,416	1,452	1,262
18.	798	12,49	799,30	1,645	1,505	1,222
19.	798	12,49	799,62	1,439	1,421	1,202
20.	798	12,47	798,29	1,625	1,506	1,118



4.1 Eksperimentalna ispitivanja dinamičke komponente sile F_z

Rezultati su za svaki eksperiment prikazani preko frekventnih dijagrama od 0-100 Hz i od 0-1000Hz. Na

grafikonu na slici 7. prikazani su podaci za eksperimentalnu tačku 1 ($n=850^0/\text{min}$, $v=90\text{mm}/\text{min}$, $h = 5,1\text{mm}$, $\beta=5^0$)

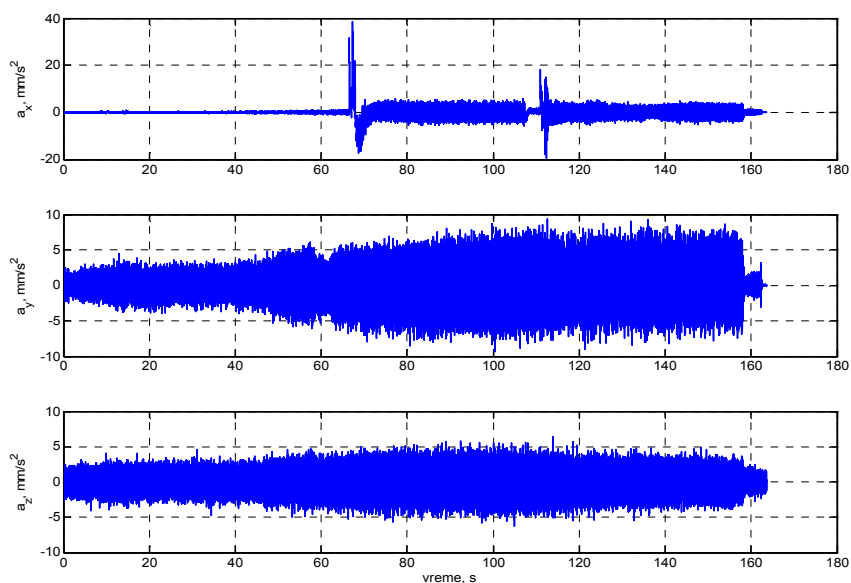


Slika 7. Grafikon dinamičke komponente sile F_z u ET 01

4.2 Eksperimentalna ispitivanja ubrzanja a_x , a_y i a_z

Rezultati eksperimentalnih mjerenja ubrzanja su prikazani preko dijagrama u vremenskom i frekventnom

domenu. Na sledećem dijagramu slika 8. dati su rezultati vibracijskog ubrzanja u istoj eksperimentalnoj tacki.



Slika 8. Dijagram zavisnosti troosnog vibracijskog ubrzanja od vremena u ET 01.



5. ZAKLJUČAK

Izvršena eksperimentalna istraživanja i mjerenja reaktivnih komponenata procesa ZTM relevantnih za ocjenu o dinamičkom ponašanju alata, pokazala su sledeće:

- dinamička komponenta sile zavarivanja ima nestabilan karakter na niskim i visokim frekvencijama čak i u početnoj fazi prodiranja alata, što se tumači povećanim otporom deformaciji još nedovoljno zagrijanog i omekšanog osnovnog materijala,
- stabilna vrijednost dinamičke komponente vertikalne prisutne sile u toku stadijuma zavarivanja posledica je fenomena samoregulisanja toplote i ravnoteže transfera mase oko trna alata,
- vibracijska ubrzanja u pravcu i smjeru zavarivanja kao i u pravcu normalnom na pravac zavarivanja u vertikalnoj ravni, znatno su veća od vrijednosti dobijenih u bočnoj ravni, čime se potvrđuje da je na toj strani otpor deformaciji minimalan,
- vertikalna komponenta vibracijskog ubrzanja ne pokazuje bitniju varijaciju vrijednosti tokom faze zavarivanja, dok komponenta u smjeru zavarivanja ima tendenciju rasta jer alat prodire u pravcu zavarivanja,

- daljom obradom ovih parametara analitičkom i numeričkom analizom moguće je sačiniti dovoljno široku bazu podataka za konfiguraciju tehnološkog procesora za predikciju ulaznih parametara procesa,
- praćenje, kontrola i upravljanje parametrima procesa ZTM otvara prostor za njihovu korekciju tokom procesa na način da se utiče na kvalitet zavarenog spoja.

6. LITERATURA

- [1] An American National Standard, AWS D 17.3/D 17.3M:200 X, American Welding Society „Specification for Fusion Stir Welding of Aluminium Alloys for Aerospace Hardware“, 2011.
- [2] Projekat osvajanja proizvodnje legure PD33, SOUR Kombinat aluminijuma Titograd, OOUR Kovačnica, Titograd, SFRJ, 1983.
- [3] Izvještaj o analizi uzorka legure PD33, AD Kombinat aluminijuma, Sektor kontrole kvaliteta, Podgorica, Crna Gora, 2010.
- [4] Izvještaj o ispitivanju alata, Institut crne metalurgije, Nikšić, Crna Gora, 2010.
- [5] Katalog proizvoda Željezara Nikšić, Služba marketinga i informisanja, Nikšić, Crna Gora, 2008.



Podsećamo Vas da je članarina za 2014.g ostala nepromenjena i iznosi 3500,00 dinara. Molimo Vas da obnovite svoje članstvo i ostanete uz časopis