



Društvo za tehniku
zavarivanja Slavonski Brod

12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2023

„STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH
KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2023.“

Slavonski Brod, 26. i 27. 04. 2023. i Požega 28. 04. 2023.

KOMPENZATORI ZA TLAČNU PRIMJENU – PRIKLJUČNI ZAVARI HARMONIKA

**Metal bellows expansion joints for pressure application – Bellows attachment
welds**

J. Pavić¹, I. Samardžić², D. Marić^{2,*}, M. Dunder²

¹Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o., Slavonski Brod, Croatia

²Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, University of Slavonski Brod, Croatia

* Corresponding Author. E-mail: dmaric@unisb.hr

Sažetak

U radu se opisuju iskustva Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. vezana uz TIG zavarivanje priključnih zavara harmonika. Specifičnosti vezane za kombinaciju osnovnih materijala, debljine koje se zavaruju, parametre zavarivanja, odabir dodatnog materijala, te zahtijevana NDT ispitivanja opisane su primjeru izrade kompenzatora AR45/500/50/I/0. Opisan je postupak spajanja kombinacije materijala - prirubnice A105/A350LF2 i harmonike 316Ti/MONEL 400.

Ključne riječi: priključni zavar, kompenzatori, raznorodni materijali

Abstract

The paper describes the experiences of Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. related to TIG welding of bellows attachment welds. The specifics related to the combination of base materials, thicknesses to be weld, welding parameters, selection of filler material, and required NDT tests are described in the example of the AR45/500/50/I/0 metal bellows expansion joints. The procedure for joining a combination of materials - flanges A105/A350LF2 and bellows 316Ti/MONEL 400 is described.

Keywords: attachment weld, metal bellows expansion joints, dissimilar materials

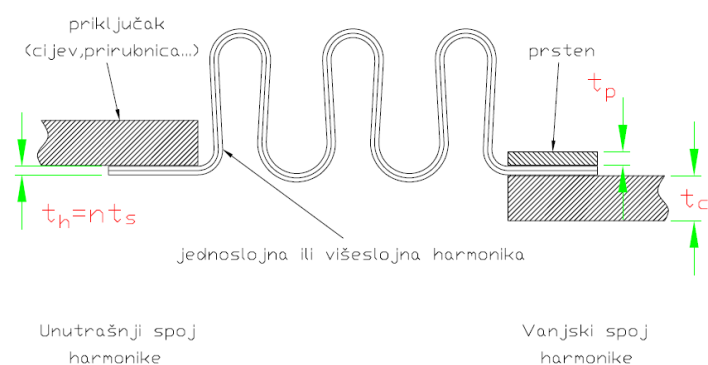
1. Uvod

Kompenzatori, ekspanzijski spojevi s metalnom harmonikom, kao dio cjevovoda ili kao dio tlačne posude koriste se za kompenzaciju pomaka u sustavima cjevovoda, koji su izazvani najčešće promjenama temperature (okoliša i/ili protočnog radnog medija), tlaka, vibracijama ili vanjskim fizičkim kretanjima. Pomak kompenzatora izražava se kvantitativno kao aksijalni, kutni ili poprečni i njega preuzima metalna harmonika [1-3].

Harmonika se izrađuje iz materijala koji su prikladni za formiranje valova hladnim deformiranjem (valjanjem između gornjeg i donjeg alata u nekoliko faza) i koji su pogodni za zavarivanje sa i bez dodatnog materijala. S obzirom da harmonike imaju znatno manju debljinu stijenke od ostalih dijelova kompenzatora za njihovu izradu koriste se materijali koji imaju znatno veću otpornost na koroziju od ostalih dijelova kompenzatora [4].

Priključci za ugradnju u sustave cjevovoda, na kompenzatorima, mogu biti cijevni nastavci za zavarivanje ili prirubnički spojevi s rastavljivom vezom vijcima.

Na slici 1 prikazan je tipični spoj harmonike i priključka, unutrašnji ili vanjski preklopni kutni spoj.



t_s (mm)...debljina jednog sloja harmonike (0,20 - 3,00 mm),

n ...broj slojeva harmonike (maksimalno 6),

t_h (mm)...ukupna debljina harmonike (min. 2x0,20 mm ; max. 4x1,50 mm ili 6x1,00 mm),

t_p (mm)...debljina prstena (prema zahtjevu proračuna ukoliko je potreban),

t_c (mm)...debljina priključka ($\geq 3,00$ mm).

Slika 1. Tipični spoj harmonike a priključcima

2. Priključni zavar harmonike

Priključni zavar jednoslojnih i višeslojnih harmonika na priključke (cijevne nastavke, prirubnice), u firmi Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. (u daljnjem tekstu DDK) najčešće se izvodi ručnim TIG postupkom zavarivanja (slika 2), uz upotrebu odgovarajućeg dodatnog materijala.



Slika 2. Vanjski spoj harmonike na cijev (lijevo) i unutrašnji spoj harmonike na prirubnicu (desno)

Najčešće korišteni materijali za harmoniku, u DDK, su CrNi, CrNiMo čelici i nikl legure i prikazani su u tablici 1. Ovi materijali su pogodni za formiranje valova hladnim deformiranjem, te imaju odgovarajuću otpornost na koroziju, posebno na točkastu, interkristalnu, koroziju u procjepu i napetosnu koroziju [4].

Tablica 1. Materijal harmonike - najčešće upotrebljavani u DDK

Oznake prema ISO/TR 15608 / ISO TR 20172				
Tip	W.Nr.	Naziv		Skupina
Nehrđajući austenitni čelici	1.4301	X5CrNi18-10	304	8.1
	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	8.1
	1.4541	X6CrNiTi18-10	321	8.1
	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	8.1
Vatrootporni austenitni čelici	1.4876	X10NiCrAlTi32-21	Incoloy 800	8.2
		X10NiCrAlTi32-21 (H)	Incoloy 800H	
Nikl legure	2.4816	NiCr15Fe	Inconel 600	43
	2.4856	NiCr22Mo9Nb	Inconel 625	43
	2.4360	NiCu30Fe	Monel 400	42
	2.4858	NiCr21Mo	Incoloy 825	45

Izrada harmonike, formiranje valova harmonike prema zadanim dimenzijama, obliku, visini, širini, broju valova, mjeri preko valova je osnova za kompenzaciju pomaka kompenzatora.

Prema krajnjem kupcu kompenzatori se isporučuju s cijevnim nastavcima za zavarivanje u cjevovod ili s prirubnicama za spajanje vijcima. Materijal cijevnih priključaka prikazan u tablici 2 najčešće je

ugljični nelegirani i niskolegirani čelik za tlačnu primjenu ili austenitni CrNi, CrNiMo čelik. Svojstva koja se traže od ovih materijala su dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama radi djelovanja tlaka, zadovoljavajuća žilavost, dobra zavarljivost, te otpornost na pojedine vrste korozija u slučaju austenitnih CrNi, CrNiMo čelika [4].

Tablica 2. Materijal priključaka (cijevi, priрубnice) - najčešće korišteni u DDK

Oznake prema ISO/TR 15608 / ISO TR 20172				
Tip	W.Nr.	Naziv		Skupina
Čelici za tlačne namjene (posude)	1.5415	16Mo3	$R_{eH} \leq 275$ MPa	1.1
	1.0425	P265GH		1.1
	1.0487	P275NH		1.1
	1.0488	P275NL1		1.1
	1.0565	P355NH	$275 \leq R_{eH} \leq 360$ MPa	1.2
	1.0566	P355NL1		1.2
	1.1106	P355NL2		1.2
Nehrđajući austenitni čelici	1.4301	X5CrNi18-10	304	8.1
	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	8.1
	1.4541	X6CrNiTi18-10	321	8.1
	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	8.1

Standardno u DDK se zavaruju sve kombinacije materijala iz tablice 1 sa materijalima iz tablice 2. Izbor dodatnog materijala, parametara i režima zavarivanja ovisi o vrsti materijala koji se zavaruju, uvjetima eksploatacije (temperatura...) i mediju (prisutnost klorida, prisutnost krutih čestica..) kojima je kompenzator izložen. Za određivanje strukture depozita koristi se Schaefflerov strukturni dijagram na osnovi poznatog kemijskog sastava izraženog putem Cr-ekvivalenta i Ni-ekvivalenta. Problemi koji se mogu pojaviti kod zavarivanja austenitnih CrNi, CrNiMo čelika s ugljičnim nelegiranim i niskolegiranim čelicima su difuzija ugljika, toplinska naprezanja i pojava toplih pukotina [5-8].

Difuzija ugljika u austenitni čelik istodobno uzrokuje stvaranje osiromašene zone (čija čvrstoća je manja) i zone obogaćene ugljikom (stvaranje karbida, veće čvrstoće i niže istežljivosti). Stvaranje karbida npr. $Cr_{23}C_6$ u austenitnom čeliku negativno će utjecati na korozijsku postojanost. Dodatni materijali legirani sa Nb ili Ti koji imaju veći afinitet prema C su jedno od rješenja [5,7].

Zbog razlike u koeficijentima linearnog istežanja ($\alpha_{aus}=1,5\alpha_{ferit}$) na mjestu spoja može doći do pojave pukotina što se može riješiti upotrebom dodatnih materijala na bazi nikla [5,7]. U praksi DDK različito istežanje materijala prilikom zavarivanja uzrokuje problem odvajanja harmonike od cijevnog priključka što se rješava gustim pripajanjem (razmak svakih 3-10 mm) kako je prikazano na slici 3 uz interno pravilo što je manja ukupna debljina harmonike potrebno je gušće pripajanje.



lika 3. Pripajanje tankostijene harmonike na cijevni nastavak

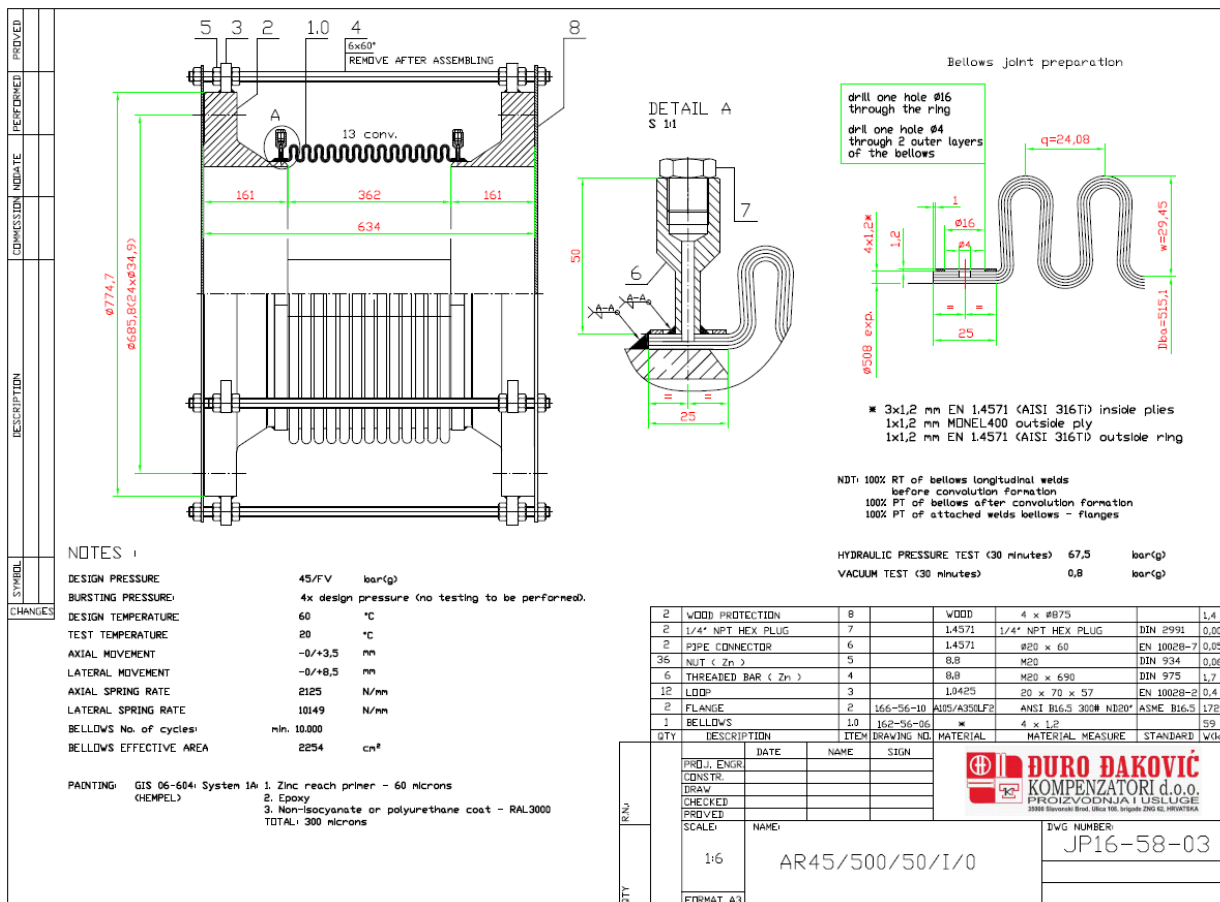
Preporuka za izbjegavanje toplih pukotina je upotreba dodatnih materijala koji će u strukturi depozita dati 3 - 10% delta ferita. Ukoliko je radna temperatura u eksploataciji iznad 500 °C treba težiti udjelu do 5% delta ferita, jer se iz delta ferita izlučuje sigma faza [5,7].

3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada, na primjeru izrade kompenzatora AR45/500/50/I/0 (slika 4), opisana je tehnologija zavarivanja i ispitivanja priključnog zavara raznorodnih materijala - prirubnice A105/A350LF2 i harmonike 316Ti/MONEL 400.

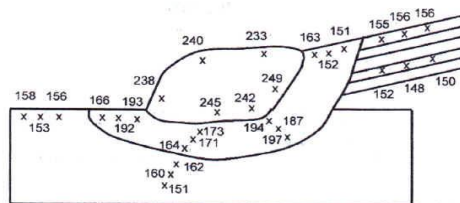
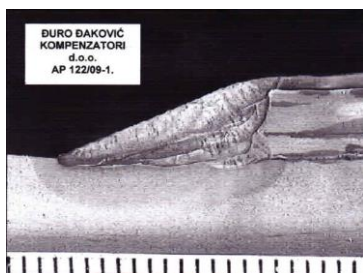
Harmonika kompenzatora izrađuje se iz četiri sloja debljine 1,2 mm. Unutrašnja tri sloja harmonike su iz nehrđajućeg austenitnog čelika 316Ti (na osnovu medija koji prolazi kroz kompenzator), dok je vanjski sloj iz nikl legure MONEL 400 (na osnovu okoliša u kojem kompenzator radi - u ovom slučaju morska atmosfera). U skladu sa zahtjevima proračuna harmonike potrebna je ugraditi prsten za ojačanje na manžeti harmonike. Harmonika se zavaruje na prirubnicu iz ugljični čelika koja će se zaštititi bojanjem, prema uputama premazima u ukupnoj debljini od 300 mikrona.

Dodatni zahtjev kupca je bušenje vanjska dva sloja harmonike i ugradnja cijevnog priključka koji će se koristiti kao mjesto indikacije propuštanja (mjerenjem tlaka). U toku eksploatacije, vremenom će medij unutar kompenzatora oštetiti unutrašnja dva sloja i kada dođe do indikacije propuštanja, kupac dobiva informaciju da je potrebna njegova zamjena. Brtvljenjem cijevnog priključka osiguran je rad kompenzatora za period do nabave novog kompenzatora.



Slika 4. Aksijalni kompenzator AR45/500/50/I/0 [9]

Zavarivanje priključnog zavara odrađeno je u skladu sa specifikacijom postupka zavarivanja WPS TR W1/01.7505. Atest o izvršenoj kvalifikaciji postupka zavarivanja AP 122/09 korišten je za izradu specifikacije postupka zavarivanja. Na slici 5 prikazana je makrostruktura i rezultati ispitivanja tvrdoće HV 10 zavara iz atest postupka zavarivanja AP 122/09 [10,11]



Slika 5. Makrostruktura (lijevo) s rezultatima ispitivanja tvrdoće HV 10 (desno) zavara iz atest postupka zavarivanja AP 122/09 [11]



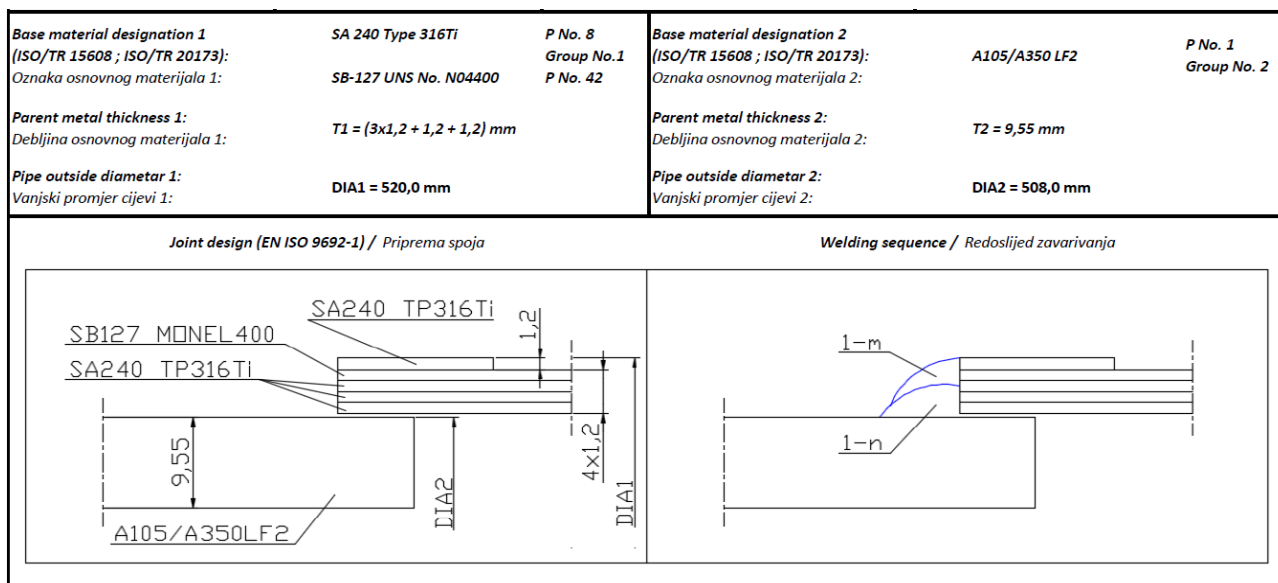
Društvo za tehniku
zavarivanja Slavonski Brod

12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2023

„STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2023.“

Slavonski Brod, 26. i 27. 04. 2023. i Požega 28. 04. 2023.

Izvadak iz WPS na slici 6 prikazuje detalj pripreme spoja i redosljed zavarivanja, dok su parametri zavarivanja i izabrani dodatni materijal za zavarivanje prikazani na slici 7. Unos topline prilikom zavarivanja ograničen je na $\leq 1,5$ KJ/mm, uz maksimalnu međuprolaznu temperaturu od 100 °C. Za dodatni materijal izabrana je žica za TIG zavarivanje na bazi nikla, standardne oznake EN ISO 18274: S Ni6625 (NiCr22Mo9Nb) ; AWS A5.14: ER NiCrMo-3.



Slika 6. Detalj pripreme spoja i redosljed zavarivanja prema WPS TRW1/01.7505 [10]

Bead No./run Prolaz br.	Process Postupak	Size of filler metal Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type of current / Polarity Vrsta struje / Polaritet	Wire feed Brzina žice (m/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Heat input Unos topline (KJ/mm)
1 - n	GTAW	2,0	90 - 120	10,0 - 15,0	DC-	-	3,0 - 8,0	$\leq 1,500$
		2,4	110 - 140	10,0 - 15,0	DC-	-	5,0 - 14,0	$\leq 1,500$
1 - m	GTAW	2,0	90 - 120	10,0 - 15,0	DC-	-	3,0 - 8,0	$\leq 1,500$
		2,4	110 - 140	10,0 - 15,0	DC-	-	5,0 - 14,0	$\leq 1,500$
Standard designation of filler metal: EN ISO 18274: S Ni 6625 (NiCr22Mo9Nb) Standardni naziv DM: AWS A5.14: ER NiCrMo-3					Standard designation of flux: - Standardni naziv praška: -			
Trade name / Manufacturer: Thermanit 625 / Böhler Trgovački naziv / Proizvođač:					Trade name / Manufacturer: - Trgovački naziv / Proizvođač: -			

Slika 7. Parametri zavarivanja i dodatni materijal za zavarivanje prema WPS TRW1/01.7505 [10]

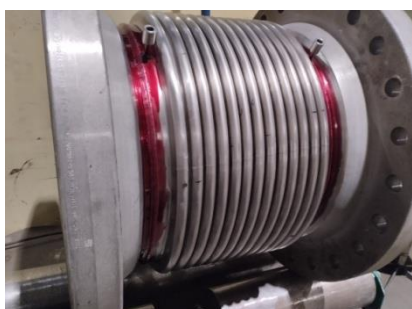
U skladu sa zahtjevima projekta na kompenzatoru je odrađen vakuum test (0,8 bara), hidraulična tlačna proba (67,5 bara, 1,5 x radni tlak) i ispitivanje priključnih zavara penetrantima. Detalji ispitivanja prikazani su na slikama, slika 8 vakuum test, slika 9 hidraulična tlačna proba i slika 10 ispitivanje penetrantima.



Slika 8. Vakuum test (lijevo) s prikazom manometra (desno)



Slika 9. Hidraulična tlačna proba (lijevo) s prikazom manometra (desno)



Slika 10. Ispitivanje penetrantima, premaz crvenim indikatorom (lijevo), bez indikacija (desno)

4. Zaključak

Kod zavarivanja priključnih zavara harmonike često se susrećemo s različitim materijalima i različitim kombinacijama materijala koje je potrebno zavariti. Standardno se zavaruju kombinacije CrNi/CrNiMo čelika, nikl legura i ugljičnih čelika. Na izbor dodatnog materijala za zavarivanje utječu, pored materijala koji se zavaruju (npr. primjena Schaefflerovog strukturnog dijagrama) i uvjeti eksploatacije, temperatura i medij kojem je kompenzator izložen za vrijeme eksploatacije. Prilikom



zavarivanja potrebno je obratiti pažnju na pravilan izbor parametara zavarivanja, jačinu struje zavarivanja, napon zavarivanja, brzinu zavarivanja, širinu njihanja, unos topline i međuprolaznu temperaturu. Kvalifikacije postupaka zavarivanja i zavarivača provode se s kombinacijama materijala koji se susreću u praksi. Kvalifikacije daju uvid u mehanička svojstva, udio delta ferita, makrostrukturu i mikrostrukturu zavarenih spojeva. Uobičajena NDT ispitivanja u proizvodnji kompenzatora su pored vizualne kontrole radiografsko ispitivanje zavara, ispitivanje zavara penetrantima, hidraulična tlačna proba i vakuum test. Odabir rješenja pri razradi tehnologije zavarivanja mora zadovoljavati sve unaprijed propisane zahtjeve normi i interne zahtjeve.

5. Literatura

- [1] Pavić, Josip; Marković, Radojka; Samardžić, Ivan; Marić, Dejan. (2017). Kompenzatori za tlačnu primjenu - Klasifikacija. 9. *International scientific-professional conference SBW 2017 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2017“*. Slavonski Brod: University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 2017. str. 240-247
- [2] HRN EN 14917: 2009 Metal bellows expansion joints for pressure applications
- [3] Pressure Equipment Directive PED 2014/68/EU
- [4] Pavić, Josip; Samardžić, Ivan; Marić, Dejan; Šolić, Tomislav; Dunđer, Marko. (2019). Kompenzatori za tlačnu primjenu - Materijali. 10. *International scientific-professional conference SBW 2019 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2019“*. Slavonski Brod: University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 2019. str. 187-199
- [5] Lukačević, Zvonimir. (1998). Zavarivanje. Slavonski Brod: Strojarški fakultet u Slavskom Brodu
- [6] Filetin, Tomislav; Kovačiček, Franjo; Indof, Janez. (2006). Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [7] Gojić, Mirko. (2003). Tehnike spajanja i razdvajanja materijala. Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet
- [8] Pavić, Josip; Samardžić, Ivan; Marić, Dejan; Horvat, Marko; Eržišnik, Jadranka. (2021). Kompenzatori za tlačnu primjenu - Primjena tehnologije zavarivanja. 11. *International scientific-professional conference SBW 2021 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2021“*. Slavonski Brod: University of Slavonski Brod, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 2021. str. 141-150
- [9] Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o., Slavonski Brod: Nacrt br. JP16-58-03: AR45/500/50/I/0 (interna dokumentacija), 2021.
- [10] Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o., Slavonski Brod: WPS TRW1/01.7505 (interna dokumentacija), 2022.
- [11] Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o., Slavonski Brod: Atest postupka zavarivanja: AP-122/09 (interna dokumentacija), 2009.