



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.

OSVRT NA ZAVARIVANJE KOMPOZITNIH CIJEVI KOD IZRADE RECOVERY BOILER

Monika Činkl¹, Tihomir Marsenić¹, Marijan Bošnjak¹, Božo Despotović²

¹ANDRITZ TEP d.o.o, Slavonski Brod, Croatia

²Društvo za tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

* Corresponding Author. E-mail: monika.cinkl@ddtep.hr

Sažetak

U radu je opisano zavarivanje membranskih panela izrađenih od kompozitnih cijevi poznatog naziva; Sanicro 38 i traka UNS No. NO8825 u tvornici ANDRITZ TEP d.o.o. Zavarivanje je izvedeno EPP postupkom. Tijekom pokusnog zavarivanja otkrivena su određena odstupanja koja je potrebno izbjeći tijekom izrade proizvoda. Također, u radu su navedeni zahtjevi za te zavarene spojeve.

Ključne riječi: membranskih paneli od kompozitnih cijevi, EPP zavarivanje kompozitnih cijevi, greške na membranskim zavarima

Abstract:

The paper describes the welding of membrane panels made from composite tubes of the well-known name; Sanicro 38 and fins UNS No. NO8825 in the ANDRITZ TEP d.o.o. factory. The welding was performed using the SAW process. During the trial welding, certain deviations has been discovered and they must be avoided during the manufacturing of the panels from composite tubes. The paper states the requirements for these welded joints.

Key words: membrane panels made of composite tubes, SAW of composite tubes, defects in membrane welds

1. Uvod

ĐĐ TEP, sada pod novim imenom Andritz TEP d.o.o. u svrhu proširenja proizvodnog programa dobio je zadatak od novog vlasnika usvajanje tehnologija izrade "Recovery Boiler".

Recovery Boiler je najbitniji i najskuplji dio “Kraft paper process” postrojenja. Kraft postupak izrade papira je otkriven 1879. godine i omogućio je dobivanje kvalitetnijeg papira u odnosu na tadašnje poznate postupke. Kao nuspojava procesa proizvodnje papira, bio je otpad u obliku “black liquor” (crne tekućine) koja je smjesa krutih čestica i vode. Ona se sastoji od lignin, hemiceluloze i kemikalija korištenih u procesu pulpiranja (proizvodnji kaše). Tih godina ova crna tekućina ispuštana je u jezera i rijeke onečišćujući ih [1].

Gospodin G.H. Tomlinson je izumio Recovery Boiler u ranim 30 godinama, dvadesetog stoljeća koji je od tada kao dio opreme ugrađivan u Kraft postupak izrade papira, slika 1[1]. Recovery boiler koristi crnu tekućinu kao pogonsko gorivo i na taj način sprječava ispuštanje iste u rijeke i jezera. Prije upotrebe crna tekućina se obrađuje isparavanjem, tako da se dobije sadržaj krutih čestica od 65 do 80% u vodi kako bi kvalitetno izgarala. Nije dopušteno da udio krutih čestica bude veći jer onda postoji mogućnost nekontinuiranog dotoka kroz mlaznice gorionika i mogućnost začepljenja mlaznica [1].

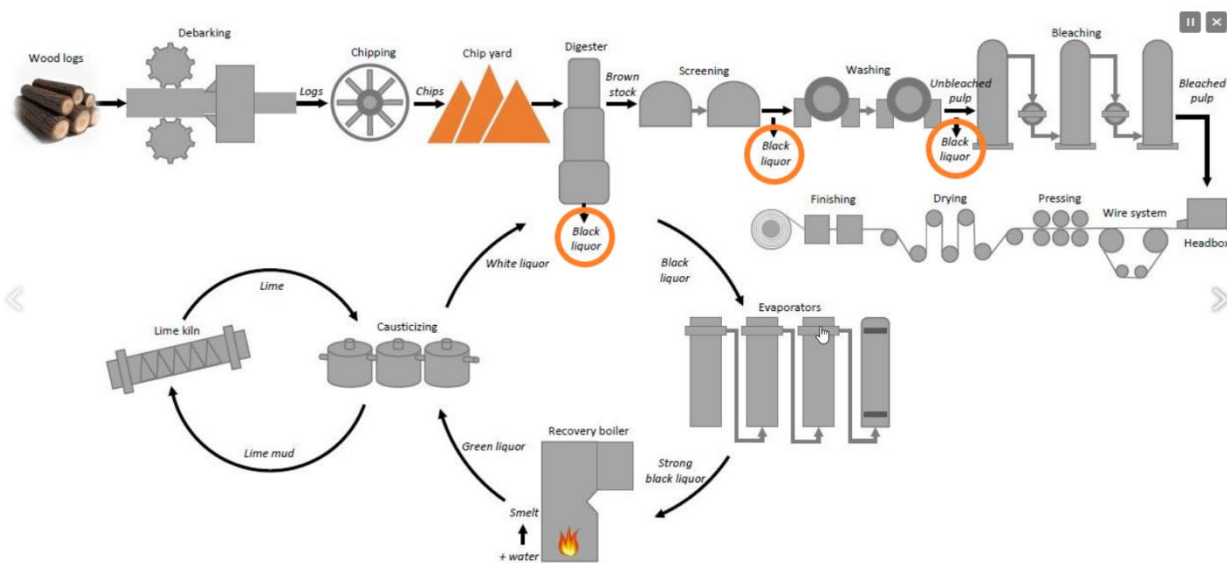


Image Credit: MDPI. Typical Kraft process flow diagram Item 2 of 2

Slika 1. Kraft postupak izrade papira (Kraft paper process) [1]

Kada je crna tekućina kvalitetno pripremljena, izgaranjem će se proizvesti toplina kao prva prednost primjene Recovery Boiler. Proizvedena toplina koristi se za pretvaranje vode u zasićenu paru koja se primjenjuje kao toplina za zagrijavanje, npr. kod postupka isparavanje vode iz crne tekućine ili kod kuhanja sječke, obrade kaše - pulpiranja.

Usavršavanjem Recovery Boiler omogućena je proizvodnja pregrijane pare za pokretanje turbine i generiranje električne energije kao drugog benefita ovog tipa kotla. Električna energija se primjenjuje za pokretanje pumpi koje su učestale u proizvodnji papira.



Anorganski kemijski spojevi koji sadrže primarno spojeve natrija, sumpora i kalcija se u procesu izgaranja crne tekućine transformiraju. Proizvod izgaranja “smelt” se taloži na dnu ložišta, ispušta kroz otvore i tretira ponovo pri čemu nastaje bijela tekućina koja se vraća u postupak pulpiranja (pripreme kaše). Na taj način anorganski kemijski spojevi su zarobljeni u petlji unutar postupka, kontinuirano kruže što je treća prednost primjene Recovery Boiler.

Poboljšanjem karakteristika Recovery Boiler-a, odnosno načina upuhavanja zraka u ložište, smanjena je emisija ispuštanja štetnih tvari (sumpora, NO_x – dušičnih oksida) u okoliš, što je četvrta prednost Recovery Boiler-a.

Na kraju; proizvodnja topline, generiranje električne energije, ponovno korištenje anorganskih kemijskih spojeva povećaju stupanj korisnosti Kraft postupka proizvodnje papira, odnosno povećavaju dobit ovakvih postrojenja [1].

U svijetu osim Andritza samo mali broj tvrtki projektira i izrađuju ovakav tip kotlovskih postrojenja. Najzahtjevniji dio izrade odnosi se na izradu ložišta Recovery Boiler, odnosno na zavarivanje i savijanje membranskih zidova izrađenih od kompozitnih cijevi.

2. Ložište Recovery Boiler-a

2.1. Štetne pojave u Ložištu

Najopterećeniji dio kotlovskog postrojenja s aspekta naprezanja i korozijskih procesa su u pravilu zidovi ložišta kotla. Membranski zidovi u pravilu trebaju biti [2];

- vodom hlađeni,
- dimno nepropusni
- jednostavni za održavanje
- vrlo sigurni
- niskih troškova izrade i održavanja
- jednostavni za izradu

Sve do danas membranski zidovi nisu dovoljno sigurni tijekom eksploatacije, niti jeftini niti jednostavni za izradu. Glavni razlog za to su teški uvjeti u eksploataciji proizašli iz štetnih procesa koji se odvijaju u ložištu Recovery boiler-a [2].

Tijekom eksploatacije Recovery boiler-a otkrivene su štetne pojave;

- pucanje dna ložišta vjerojatno kao posljedica napetostne korozije (SCC), zatim uvjeta u ložištu, u kojem postoje agresivne kemikalije koje na povišenoj temperaturi uzrokuju nastajanje i propagaciju pukotina.
- Opće korozije na mjestima ugljičnog čelika.
- “Smelt” korozija na dnu ložišta. Ova korozija zahvaća veće područje u obliku mrlja, a uzrokovana je djelovanjem natrija i njegovih spojeva na površinu cijevi. Spriječava se nakupinama smelta koje su zamrznute (obrasle) na površini cijevi.
- Toplinski zamor se pojavljuje zbog pokretanja i gašenja kotla, temperaturnih šiljaka i naprezanja tijekom rada kotla.



Zbog svega gore navedenog ložište se izrađuje od kompozitnih cijevi. Dno ložišta se izrađuje od kompozitnih cijevi s vanjskim plaštem izrađenim od Ni legure, poznatih pod imenom Sanicro 38, a traka koja se primjenjuje je kvalitete ASME SB-424 UNS NO8825. Ova kombinacija se pokazala dovoljno dobrom za uvjete eksploatacije, Sanicro 38 ima tri puta veću otpornost prema toplinskom zamoru u odnosu na visokolegirani čelik tip 304L. U Tablici 1 mogu se vidjeti svojstva materijala, za izradu ložišta kotla uključujući i njihovu otpornost na koroziju.

Tablica 1. Svojstva tipičnih materijala za izradu ložišta [2]

	Carbon steel	304L	Sanicro 38 (Alloy 825)	Sanicro 65 (Alloy 625)
Main elements	Fe	20Cr-10Ni	20Cr-40Ni	20Cr-60Ni
Thermal expansion, 10^{-6} /°C	13.5	17.5	14.9	13.9
Thermal cond., W/m°C	41	19	16	14
SCC resistance	Excellent	Low	High	Excellent
Corrosion resistance	Low	Moderate	Excellent	High

3. Osnovni materijal cijevi

Osnovni materijal je kompozitna cijev, oznake Sanicro 38/4L7, proizvođača Sandvik [3]. Cijev se sastoji od vanjske komponente Sanicro 38 korozijski postojane, i unutarnje komponente Sandvik 4L7. Kemijski sastav komponente Sanicro 38, oznake UNS NO8825, Mod. Legura 825, W.Nr. 2.4858 je naveden u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav vanjske komponente Sanicro 38 [3]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti
≤0.030	≤0.5	0.8	20	38.5	2.6	1.7	0.8

Unutrašnja komponenta je Sandvik 4L7, oznake ASME SA-210 Gr.A1, EN P265GH, W.Nr. 1.0405. Kemijski sastav unutarnje komponente je prikazan u Tablici 3.:

Tablica 3. Kemijski sastav unutarnje komponente Sandvik 4L7 [3]

C	Si	Mn	P	S
≤0.18	≤0.3	0.7	≤0.030	≤0.030

Dimenzije cijevi:

Promjer cijevi: OD 63,5 x6,53 mm +/-0,5%

Debljina vanjske komponente Sanicro 38: 1,82 mm - 0,4/ +0,6 mm

Debljina unutarnje komponente Sandvik 4L7: min. 4,71 mm / + 12,5%

Materijal trake je niklena legura oznake ASTM 424; UNS NO8825, W.Nr. 2.4858 NiCr21Mo, Dimenzije trake; debljine 5 mm, širine 16 mm.

4. Dodatni materijal za elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)

Zbog dužine membranskih zavara, cca 5000 m određeno je da se spojevi trake i cijevi zavaruju EPP. Prema smjernicama proizvođača cijevi, preporučeni dodatni materijali za zavarivanje su [3];

- Prašak 15W; EN ISO 14174 SA AF 2 56 54 DC
- Žica za zavarivanje; EN ISO14343 A: S 27.31.4.LCu

Dodatnim materijalom je potrebno pažljivo rukovati u skladu sa smjernicama proizvođača.

5. EPP zavarivanje kompozitnih cijevi

5.1. Priprema stroja prije zavarivanja

Zavarivanje membranskih panela izvodi se na stroju prikladnim za takvu vrstu zavrivanja. Kako se radi o zavarivanju niklenih legura, prije početka zavarivanja potrebno je pripremiti stroj, što podrazumjeva sljedeće;

- Dijelovi u kontaktu s kompozitnim cijevima trebaju biti bez oštećenja i bilo kakvih neravnina ili nakupina na površinama u dodiru, slika 2.
- Dodirni dijelovi trebaju biti odmašćeni i očišćeni od prašine
- Postavljanje profiliranih rolni; gornjih, donjih i bočnih za vođenje cijevi panela
- Podešavanje vodećih rolni za centriranje trake za specificiranu širinu trake
- Podešavanje glava za zavarivanje
- Uklanjanje svih zračnosti na dijelovima koji centriraju membranski panel



Slika 2. Oštećenje bočnih rolni

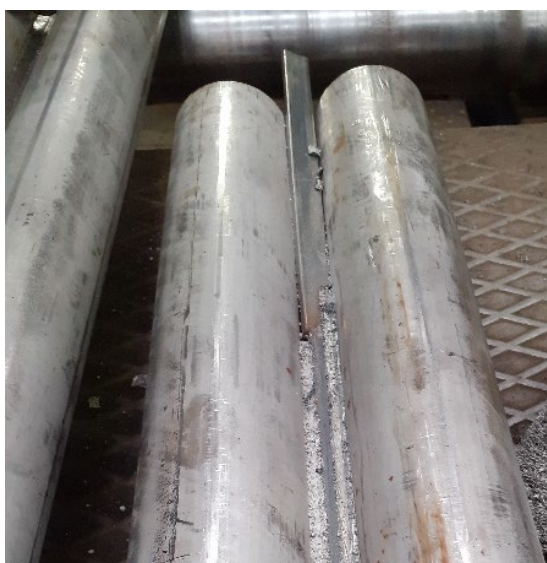
5.2. Parametri zavarivanja

Bitne varijable zavarivanja su:

- struja
- napon
- brzina
- unos topline koji treba biti u granicama kao za visokolegirani čelik austenitne mikrostrukture; max.1,5kJ/mm
- promjer žice zavarivanja
- položaj trake u odnosu na simetralu cijevi treba biti u skladu s EN 12952-5
- kut gorionika i međusobni razmak
- slobodan kraj žice

Prilikom zavarivanja radnih proba, bili su prisutni predstavnici ESAB-a Švedske, Mađarske i Hrvatske. Zavarivanjem uzoraka zabilježene su određene poteškoće:

- odstupanje položaja trake od simetrale cijevi (uvrnuta traka); traka se uvrne u drugoj polovici zavarivanja panela zbog neadekvatnog stezanja, centriranja trake. Problem je bio riješen pripajanjem trake što se ne preporučuje tijekom zavarivanja proizvoda, slika 3.



Slika 3. Uvrnuta traka

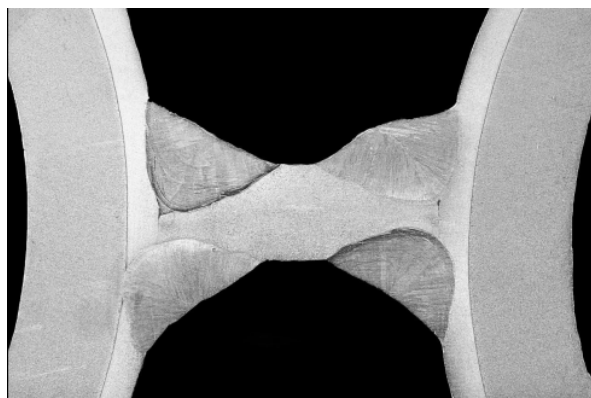
-oštećenje cijevi prilikom zavarivanja; cijev deformirana zbog nepravilnog podešavanja stroja od strane operatera ili površinska oštećenje cijevi zbog neadekvatne kvalitete rolni

-pojava pukotina cijelom dužinom zavara; prema navodima iz literature uzroci toplih pukotina su slijedeći: nečistoće, krutost spoja – reakcijska naprezanja, parametri zavarivanja koji utječu na odnos širine zavara prema dubini penetracije-preporuka ispuščen zavar, brzina zavarivanja koja utječe na smjer kristalizacije [4], slika 4.



Slika 4. Topla pukotina

-penetracija zavora u unutarnju komponentu cijevi (P265GH) nije dopuštena jer dolazi do mješanja “bijelog” i “crnog” materijala što može dovesti do pukotina ili smanjenje korozijske postojanosti, slika 5.



Slika 5. Neprihvatljiva penetracija zavora u unutarnju komponentu P265GH

-razlika kateta je bila veća od 3 mm zbog položaja gorionika i sprječavanja propaljivanja kroz vanjsku komponentu cijevi

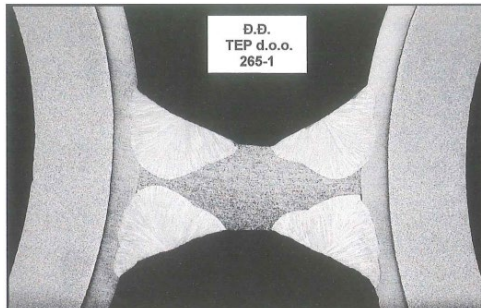
-teško uklanjanje troske sa zavora zbog male brzine zavarivanja i međusobne blizine gorionika

U cilju izbjegavanja gore navedenih odstupanja potrebno je bitne varijable uskladiti.

6. Rezultati ispitivanja

U cilju kvalifikacije postupka zavarivanja, provedena su sljedeća ispitivanja u skladu s normom EN ISO 15613 (EN ISO 15614-1) i EN 12952-5:

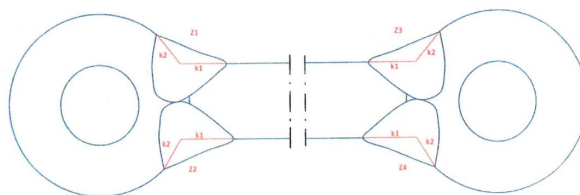
- a) makro presjek membranskog zavora između cijevi Sanicro 38/4L7 i trake NO8825 (5x). Sa slike makro presjeka vidi se da su ispunjeni zahtjevi po pitanju: geometrije zavora, uključujući dimenzije zavora - debljine zavora i penetracije, slika 6.



Slika 6. Makro presjek membranskih zavara

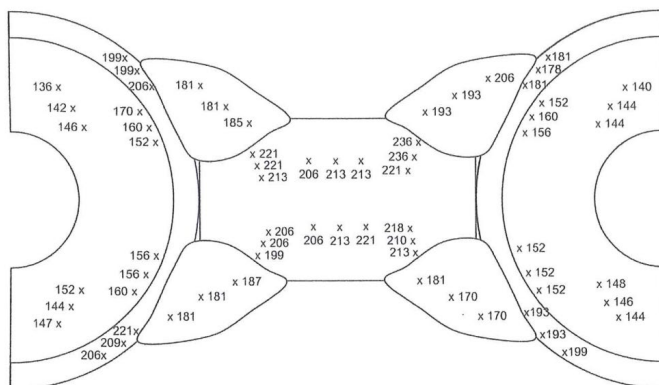
- b) ispunjeni su zahtjevi norme EN 12952-5 koji definiraju da je suma veličine kutnih zavara $a1+a2 \geq 5$ (debljina trake), također ispunjen je zahtjev norme ASME Sec. IX izdanje 2021 po pitanju razlike katete koja treba biti manja ili jednaka 3 mm, što se može vidjeti u tablici 4 sa pripadajućom slikom.
- c)

Tablica 4. Dimenzije membranskih zavara s pripadajućom skicom



ZAVAR WELD	DIMENZIJA (mm) DIMENSION (mm)	265	
		265-1	265-5
Z1	k1	6,82	5,88
	k2	3,84	3,78
	k1-k2	2,98	2,10
	a1	4,28	4,32
	Penetracija zavara u platinirani sloj Weld penetration into the plated layer	0,73	0,64
Z2	k1	6,72	5,89
	k2	3,74	4,58
	k1-k2	2,98	1,31
	a2	4,52	4,42
	Penetracija zavara u platinirani sloj Weld penetration into the plated layer	0,75	0,71
Z3	a1+a2	8,80	8,74
	k1	6,88	5,94
	k2	3,94	4,46
	k1-k2	2,94	1,48
	a3	4,23	4,01
Penetracija zavara u platinirani sloj Weld penetration into the plated layer	0,85	0,66	
Z4	k1	6,95	5,98
	k2	4,16	3,65
	k1-k2	2,79	2,33
	a4	4,43	4,33
	Penetracija zavara u platinirani sloj Weld penetration into the plated layer	0,81	0,78
	a3+a4	8,66	8,34

- d) na makro presjeku nisu uočene greške vezivanja, greške pukotina, niti greške uključaka
- e) tvrdoća HV10 je u skladu sa zahtjevima za osnovne materijale i zavareni spoj, slika 7.



Slika 7. Ispitivanje tvrdoće HV10 na membranskim zavarima

- f) mikrostruktura zavara je dendritna, bez mikropukotina, pukotina, slika 9



Slika 9. Mikrostruktura membranskog zavara

- g) na temelju mikrostrukture utvrđeno je da nema promjena u strukturi unutarnje komponente P265GH, odnosno u toj komponenti nije zabilježen utjecaj od zavarivanja, odnosno nije zabilježena zona utjecaja topline
- h) izmjereni sadržaje delta ferita u zavarenom spoju iznosi od 0,1 do 0,3 u vanjskoj komponenti cijevi Sanicro 38 kreće se od 2,3 do 4,1 i u traci od 0,1 do 0,2. Na temelju ovih vrijednosti vidi se da je zavar korozijski postojan kao i osnovni materijal.

7. Zaključak

Na temelju membranskog strojnog EPP zavarivanja kompozitnih cijevi u tvornici ANDRITZ TEP d.o.o. i prihvatljivih rezultata ispitivanja, može se zaključiti da su tijekom zavarivanja prepoznate bitne varijable za zavarivanje kompozitnih membranskih panela, odnosno može se reći da je usvojena tehnologija zavarivanja ovih materijala navedenim postupkom zavarivanja. Prije početka izrade membranskih panela od kompozitnih cijevi zbog visokih kriterija prihvatljivosti i u cilju osiguranja kvalitete ovakvih komponenti potrebno je provesti sljedeće:



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.

- osigurati poseban prostor za izradu kompozitnih panela,
- pripremiti stroj za zavarivanje
- primjeniti visoke zahtjeve za čistoću komponenti i mjesta izrade,
- povećati opseg nadzora nad zavarivanjem ovakvih komponenti, uključujući sve tri smjene
- propisivati i pridržavati se parametara zavarivanja u vrlo uskom području
- pripremiti pisane postupke za izradu ovih komponenti
- kvalificirati zavarivače i operatere zavarivanja u skladu s normama
- provesti edukaciju osoblja; rukovodećeg osoblja, zavarivača, operatera zavarivanja, bravara, transportnih radnika, kontrola...koji će izrađivati ove komponente.

Istraživanjem i pokusnim zavarivanjem kompozitnih cijevi različitim postupcima zavarivanja stečena su znanja i iskustva koja će biti temelj prilikom izrade Recovery Boiler-a i referenca za budućnost izrade istih u ANDRITZ TEP d.o.o.

8. Literatura

- [1] Morningstar, Jennifer. (2021, Ožujak). What Does a Recovery Boiler Recover? – Quite a bit, actually!. <https://www.warrenforensics.com/2021/05/19/what-does-a-recovery-boiler-recover-quite-a-bit-actually/> (Blog)
- [2] Esa K. Vakkilainen. KRAFT RECOVERY BOILERS – HIGH SOLIDS FIRING. No publisher, No ISBN, 2/2006, Helsinki (Chapter 11.2)
- [3] www.smt.sandvik.com. Sandvik materials technology, tube division, composite tubes. SE-81.
- [4] Lukačević, Zvonimir.(1998). Zavarivanje. Slavonski Brod: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. (ISBN 953-6048-12-4). (Poglavlje 7.15.1.b.)