

## KOMPENZATORI ZA TLAČNU PRIMJENU – MATERIJALI

### METAL BELLows EXPANSION JOINTS FOR PRESSURE APPLICATIONS – MATERIALS

<sup>1)</sup> Pavić Josip, <sup>2)</sup> Samardžić Ivan, <sup>2)</sup> Marić Dejan, <sup>2)</sup> Tomislav Šolić, <sup>3)</sup> Marko Dunder

<sup>1)</sup> Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o, Dr. Mile Budaka 1, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2)</sup> Mechanical Engineering Faculty - SFSB, Trg I. Brlić Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>3)</sup> Studij politehnike, Sveučilište u Rijeci

*Ključne riječi: kompenzatori, tlačna primjena, klasifikacija dijelova kompenzatora, materijali*

*Key words: metal bellows expansion joints, pressure applications, classification of metal bellows expansion joints parts, materials*

#### Sažetak:

U radu se opisuju klasifikacija dijelova kompenzatora prema njihovom opterećenju pod tlakom prema normi EN 14917:2009. Izbor materijala za pojedine dijelove kompenzatora je od izuzetne važnosti za ispravno funkcioniranje kompenzatora i njegovu trajnost. Opisuju se iskustva Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o pri odabiru materijala, te utjecaj temperature i agresivnosti medija u različitim područjima primjene,

#### Abstract:

This paper describes the classification of the components of the metal bellows expansion joints according to their pressure load according to EN 14917: 2009. The choice of materials for individual components of the metal bellows expansion joints is of utmost importance for the correct functioning of the metal bellows expansion joints and its durability. The experiences of Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o in the selection of materials and the influence of temperature and aggressiveness of the media in different areas of application are described,

## 1 UVOD

Kompenzatori kao dijelovi cjevovoda ili posuda pod tlakom u svom radu izloženi su naprezanjima uslijed djelovanja sile tlaka, širokom rasponu temperatura i izloženi su različitim agresivnim medijima koji mogu uzrokovati različite vrste korozija.

Duro Đaković Kompenzatori d.o.o (u dalnjem tekstu DDK) kao specijalizirani proizvođač kompenzatora, posebnu pažnju posvećuje odabiru materijala za izradu kompenzatora. Izbor materijala usko je povezan sa projektiranjem i konstruiranjem dijelova kompenzatora (posebno harmonika), izborom i razradom postupaka proizvodnje i montaže.

Kriteriji pri odabiru materijala:

Mehanička i fizikalna svojstva materijala, te sastav i mikrostrukturu materijala,

Otpornost na kemijske, fizikalne i biološke utjecaje, otpornost na djelovanje agresivnih medija,

Proizvodna (tehnološka) svojstva s posebnim naglaskom na zavarljivost i oblikovljivost deformiranjem,

Tržišne karakteristike (uvjeti i troškovi nabave, cijena, dostupni oblici, dimenzije, tolerancije),

Standardiziranost kao kriterij da se primarno primjenjuju materijali propisani normama.

## 2 KLASIFIKACIJA DIJELOVA KOMPENZATORA

Dijelovi kompenzatora razvrstavaju se u četiri osnovne grupe kako je prikazano na slici 1. [1]:

Glavni dijelovi pod tlakom (A),

Tlačni dijelovi, osim glavnih dijelova indirektno opterećeni tlakom (B),

Priklučci na glavne dijelove pod tlakom i tlačne dijelove (C),

Ostali dijelovi (D).

**Glavni dijelovi (A)**, dijelovi i sklopovi koji su u kontaktu sa medijem i opterećeni tlakom. Prema svom dizajnu i razini naprezanja kojoj su izloženi oni su osnovni djelovi vezani uz integritet opreme pod tlakom. Njihov otkaz rezultirat će otkazom kompenzatora.

**Tlačni dijelovi (B)**, dijelovi koji su indirektno opterećeni tlakom i nemaju izravan kontakt s medijem, i dijelovi koji su u kontaktu s medijem ali prema svom dizajnu nisu bitni za integritet opreme pod tlakom.

**Priklučci (C)**, dijelovi koji su izravno zavareni na dijelove A ili B.

**Ostali dijelovi (D)**, dijelovi koji nisu dijelovi A, B ili C.

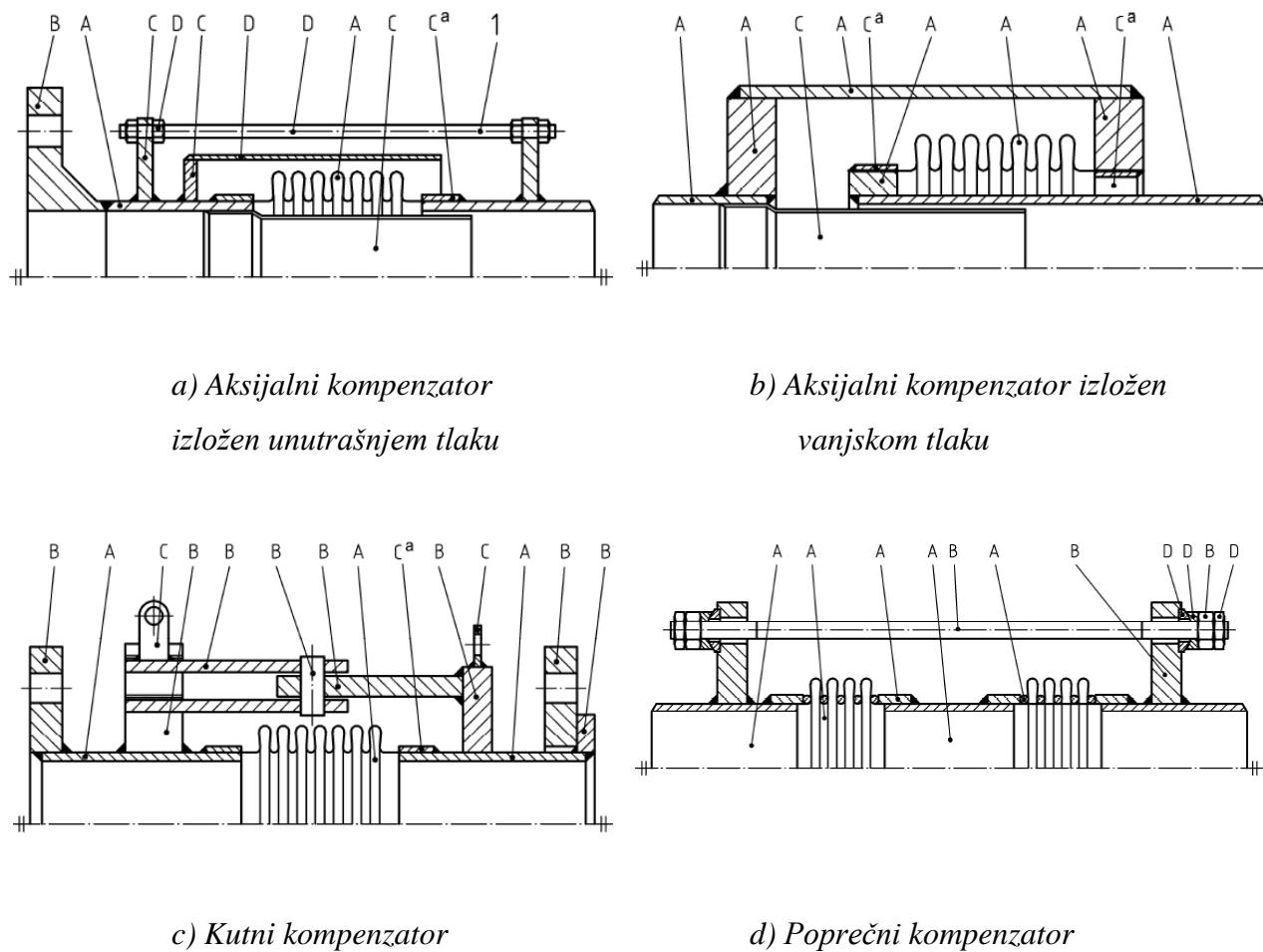


Figure 1. Klasifikacija dijelova kompenzatora [1]

### 3 IZBOR MATERIJALA ZA DIJELOVE POD TLAKOM

Materijali koji se koriste za glavne dijelove (A) i tlačne dijelove (B) ne smiju imati površinskih i unutarnjih nedostataka, koji mogu narušavati njihovu prikladnost u primjeni. Materijali se odabiru da budu kompatibilni s predviđenim tehnologijama izrade.

#### 3.1 Harmonika (A)

Za harmonike se mogu upotrebljavati samo materijali koji su prikladni za formiranje valova hladnim deformiranjem – valjanjem između gornjeg i donjeg alata u nekoliko faza ( ili hidrauličkim deformiranjem, DDK ne primjenjuje ovaj tip oblikovanja) i koji su pogodni za zavarivanje bez dodatnog materijala.

Harmonike općenito imaju debljinu stijenke znatno manju od ostalih dijelova, te se zbog toga za njihovu izradu koriste materijali koji imaju znatno veću otpornost na koroziju od ostalih dijelova kompenzatora.

Materijal odabran za harmoniku mora imati odgovarajuću otpornost na koroziju, posebno otpornost na slijedeće korozije:

- točkasta – jamičasta korozija (pitting corrosion)
- interkristalna korozija (intergranular corrosion)
- korozija u procjepu (crevice corrosion)
- napetosna korozija (stress corrosion cracking)

Harmonike se izrađuju iz materijala debljine 0,12 – 3,0 mm, na promjerima 15 – 5500 mm. Mogu biti jednoslojne i višeslojne (tehnološka mogućnost DDK max. 4 x 1,5 mm). Sučevani spojevi na harmonikama isključivo se zavaruju TIG postupkom bez dodatnog materijala na automatima za zavarivanje. U tablici 1. dani su materijali koji se koriste za izradu harmonika u DDK.

*Table 1. Tablica 1 - Materijali za harmonike i ostale dijelove pod tlakom i njihove temperaturne granice primjene u DDK (Vidi također Tablicu 2)*

Razvrstavanje materijala prema ISO/TR 15608 / AISI / Trgovačkom nazivu					Temperatura primjene DDK (°C)	
Tip	W.Nr.	Naziv	Skupina	Drugi naziv	Minimum	Maximum
Nehrđajući austenitni čelici	1.4301	X5CrNi18-10	8.1	304	- 30	550
	1.4306	X2CrNi19-11	8.1	304L	- 30	550
	1.4401	X5CrNiMo17-12-2	8.1	316	- 30	550
	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	8.1	316L	- 30	550
	1.4435	X2CrNiMo18-14-3	8.1	316L	- 30	550
	1.4539	X1CrNiMoCuN25-20-5	8.2	904L	- 30	550
	1.4541	X6CrNiTi18-10	8.1	321	- 30	550
	1.4550	X6CrNiNb18-10	8.1	347	- 30	550
	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	8.1	316Ti	- 30	550
Vatrootporni austenitni čelici	1.4828	X15CrNiSi20-12	8.2	309	- 30	900
	1.4876	X10NiCrAlTi32-21 X10NiCrAlTi32-21 (H)	8.2	Incoloy 800 Incoloy 800H	- 30	600 (900)
Nikl legure	2.4610	NiMo16Cr16Ti	44	Hastelloy C-4	- 30	400
	2.4816	NiCr15Fe	43	Inconel 600	-10	450 (900)
	2.4819	NiMo16Cr15W	44	Hastelloy C-276	- 30	400
	2.4856	NiCr22Mo9Nb	43	Inconel 625	- 30	450 (900)
	2.4360	NiCu30Fe	42	Monel 400	- 30	425
	2.4858	NiCr21Mo	45	Incoloy 825	- 10	540

### **3.2 Dijelovi pod tlakom (A) i (B)**

Za ostale dijelove pod tlakom (cjevni nastavci, prirubnice, poluge, uške...) pored materijala danih u tablici 1. koriste se i materijali iz tablice 2. ovisno o primjeni.

*Table 2. Materijali za ostale dijelove pod tlakom koji se koriste u DDK*

Skupina	Podskupina	Tip (Razvrstavanje materijala prema ISO/TR 15608)
1	1.1	Čelici sa minimalnom granicom razvlačenja $ReH \leq 275 \text{ N/mm}^2$
	1.2	Čelici sa minimalnom granicom razvlačenja $275 \text{ N/mm}^2 < ReH \leq 360 \text{ N/mm}^2$
8	8.1	Austenitni nehrđajući čelici s udjelom Cr $\leq 19 \%$
	8.2	Austenitni nehrđajući čelici s udjelom Cr $> 19 \%$
43		Nikl-krom legure (Ni-Cr-Fe-Mo) i udjelom Ni $\geq 40 \%$
45		Nikl-željezo-krom legure (Ni-Fe-Cr) i udjelom Ni $\geq 31 \%$

### 3.3 Dokumentacija

Za izradu kompenzatora primarno se primjenjuju materijali propisani normama što proizlazi iz nužnosti ispunjenja određenih propisa, zakona, normi i preporuka u pogledu obavezne primjene unaprijed određenih vrsta materijala ili zadovoljenja specifičnih svojstava. Materijali koji se koriste za kompenzatore moraju biti isporučeni s dokumentacijom kako je definirano u EN 764-5.

*Table 3. Zahtjevana dokumentacija materijala*

Dokumentacija prema klasifikaciji dijelova kompenzatora i kategoriji kompenzatora prema		
Glavni dijelovi pod tlakom (A) za kategorije II, III i IV (kategorije su opisane u EN 14917:2009, Annex A)	Sustav kvalitete QM (prema EN 764-5 / točka 4)	Inspeksijski certifikat EN 10204 type 3.1
	Izravna inspekcija (prema EN 764-5 / točka 5)	Inspeksijski certifikat EN 10204 type 3.2
Glavni dijelovi pod tlakom (A) za kategoriju I Tlačni dijelovi (B) za kategorije I do IV Priključci (C) Svi dodatni materijali za zavarivanje	Izvješće o ispitivanju EN 10204 type 2.2	
Ostali dijelovi (D)	Izjava o sukladnosti s narudžbom EN 10204 type 2.1	

## 4 OPĆE KARAKTERISTIKE MATERIJALA ZA IZRADU KOMPENZATORA

### 4.1 Ugljični čelici (nelegirani i niskolegirani)

Pri izradi kompenzatora DDK koristi ugljični čelike zajamčenog kemijskog sastava i zajamčenih mehaničkih osobina (najčešće čelike za kotlovske limove) od kojih se traže slijedeća svojstva:

dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama radi djelovanja tlaka,  
zadovoljavajuća žilavost,  
dobra zavarljivost.

Ugljični čelici u proizvodnji kompenzatora koriste se za sve dijelove kompenzatora osim za harmonike.



Figure 2. Kompenzatori izrađeni u kombinaciji - Cr-Ni čelika(harmonika) i ugljičnog čelika (cjevni nastavci, prirubnice, poluge, nosači poluga,uške...)

#### 4.2 Nehrdajući austenitni čelici

Nehrdajući austenitni čelici su standardni materijal za izradu kompenzatora i prema kemijskom sastavu mogu se razvrstati u slijedeće skupine:

- Cr-Ni
  - nestabilizirani
  - stabilizirani Ti ili Nb,
  
- Cr-Ni-Mo
  - nestabilizirani
  - stabilizirani Ti.

#### 4.3 Nehrdajući austenitni čelici Cr-Ni

Ova grupa čelika je najčešće korišteni nehrdajući austenitni Cr-Ni čelik. Ovi čelici su opće namjene s dobrom otpornosti na atmosfersku koroziju (s izuzetkom morskog i obalnog područja) i na mnoge organske i anorganske kemikalije. Pored dobre otpornosti na koroziju karakterizira ih izvrsna oblikovljivost i zavarljivost, te dobra žilavost.

Ovi čelici imaju umjerenu otpornost na točkasta – jamičasta korozija i korozija u procjepu, te mogu biti osjetljivi na ove vrste korozija i u medijima sa niskim sadržajem klorida. Povećanjem sadržaja kroma, molibdena i dušika povećava se i otpornost na ove vrste korozija.

Ovi čelici osjetljivi su na napetosnu koroziju. Kritični radni uvjeti koje treba izbjegavati su kombinacija naprezanja pri temperaturi iznad 50 °C u mediju koji sadrži kloride.

Sadržaj ugljika kod ovih čelika je općenito nizak tako da pojava interkristalne korozije nije problem. Operacije koje povećavaju rizik za interkristalnu koroziju su zavarivanje većih debljina (obratiti pažnju na unos topline i međuprolaznu temperaturu), toplinska obrada unutar kritičnog intervala temperature (550 – 850 °C) i sporo hlađenje nakon toplinske obrade. Čelici stabilizirani Ti ili Nb uz nizak sadržaj ugljika imaju bolju otpornost na interkristalnu koroziju.

Hladnim deformiranjem dolazi do povećanja čvrstoće i tvrdoće materijala i materijal može postati blago magnetičan. Povećanje tvrdoće je obično zbog djelomične transformacije austenita u tvrdi martenzit.

Ovi čelici su dobro zavarljivi standardni postupcima zavarivanja. DDK primjenjuje TIG (sa i bez dodatnog materijala), MIG/MAG (pune i praškom punjene žice), REL, EPP postupak zavarivanja.



Figure 3. Kompenzatori izrađeni iz Cr-Ni čelika

#### 4.4 Nehrdajući austenitni čelici Cr-Ni-Mo

Nehrdajući austenitni čelici koji sadrže molibden imaju poboljšanu otpornost na koroziju u odnosu na Cr-Ni čelike. Legiranje sa molibdenom poboljšava otpornost na točkasta – jamičasta korozija i korozija u procjepu u okruženjima koja sadrže kloride i druge halogenide. Karakterizira ih izvrsna oblikovljivost i zavarljivost, te dobra žilavost.

Ovi čelici imaju dobru otpornost na mnoge organske i anorganske kemikalije

Povećanjem sadržaja kroma, molibdena i dušika povećava se i otpornost na točkastu – jamičastu koroziju i koroziju u procjepu, tako da ovi čelici imaju bolju otpornost na ove lokalne korozije u odnosu na Cr-Ni čelike.

Ovi čelici osjetljivi su na napetosnu koroziju kao i Cr-Ni čelici u mediju koji sadrži kloride, uz prisustvo povišene temperature i naprezanja.

Moderni nehrđajući austenitni čelici proizvedeni su sa niskim sadržajem ugljika, tako da je rizik od izlučivanja kromovih karbida i stvaranja predispozicije za interkristalnu koroziju sведен na minimum. Čelici stabilizirani Ti (1.4571) uz nizak sadržaj ugljika imaju bolju otpornost na interkristalnu koroziju.

Ovi čelici su nemagnetični s obzirom na njihovu potpunu austenitnu strukturu, ali kao rezultat fazne transformacije kod hladnog deformiranja može doći do pojave magnetičnosti.

Ovi čelici su dobro zavarljivi standardni postupcima zavarivanja. DDK primjenjuje TIG (sa i bez dodatnog materijala), MIG/MAG (pune i praškom punjene žice), REL, EPP postupak zavarivanja.



*Figure 4. Kompenzatori izrađeni u kombinaciji- Cr-Ni-Mo čelika(harmonika) i ugljičnog čelika (cjevni nastavci, prirubnice,uške...)*

#### **4.5 Vatrootporni austenitni čelici**

Karakteristična svojstva vatrootpornih austenitnih čelika:

- dobro otpornost na oksidaciju,
- dobro otpornost na koroziju na visokoj temperaturi,
- dobra mehanička čvrstoća pri povišenim temperaturama.

Vatrootporni austenitni čelici upotrebljavaju se pri temperaturama iznad 550 °C, gdje je granica razvlačenja i otpornost na puzanje u pravilu faktor dimenzioniranja i gdje dolazi do korozije izazvane intezivnom oksidacijom. Vatrootpornost i mehanička otpornost ponekad nisu jednako povoljne, te tada uvjeti rada određuju primarna svojstva pri izboru materijala.

Obično su legirani s elementima Cr, Si i Al koji imaju veći afinitet prema kisiku. Na vatrootpornost najpovoljnije djeluje legiranje kromom.

Budući da se ovi materijali optimaliziraju s obzirom na mehaničku otpornost i koroziju pri visokim temperaturama njihova otpornost na elektrokemijsku koroziju na niskim temperaturama može biti manje zadovoljavajuća.

Ovi čelici su dobro zavarljivi standardni postupcima zavarivanja. DDK primjenjuje TIG (sa i bez dodatnog materijala) i REL postupak zavarivanja.



*Figure 5. Kompenzatori izrađeni u kombinaciji vatrootpornog austenitnog čelika(harmonika, cjevni nastavci) i Cr-Ni čelika (poluge, uške)*

#### **4.6 Nikl legure**

Karakteristična svojstva nikl legura:

- dobra otpornost na oksidaciju (vatrootpornost),
- dobra otpornost na koroziju na visokoj temperaturi,
- dobra čvrstoća i otpornost na puzanje na visokoj temperaturi.

DDK za izradu kompenzatora isključivo koristi nikl legure tipa 400, 600 i 800 (prema USA normama). Kod ovih legura mehanička svojstva postižu se legiranjem elementima koji se rastvaraju

u krutom stanju tvoreći s niklom supstitucijske kristale mješance. Karakterizira ih izvrsna oblikovljivost i zavarljivost, te dobra žilavost. Nikl legure koriste se u kemijskoj i naftnoj industriji, parnim i plinskim turbinama.

Ovi čelici su dobro zavarljivi standardni postupcima zavarivanja. DDK primjenjuje TIG (sa i bez dodatnog materijala), REL, EPP postupak zavarivanja.



*Figure 6. -a Kompenzatori izrađeni u kombinaciji Ni legura (harmonika MONEL 400) i ugljičnog čelika (cjevni nastavci, prirubnice, uške...)*



*Figure 6. .-b Kompenzatori izrađeni u kombinaciji Ni legura(harmonika MONEL 400 + 316Ti) i ugljičnog čelika (cjevni nastavci, prirubnice)*

## 5 ZAKLJUČAK

Izbor materijala prilikom konstruiranja direktno utječe na funkciranje kompenzatora u cijelom životnom vijeku. Fizikalno-kemijska svojstva materijala, mehanička otpornost, otpornost na trošenje, otpornost na djelovanje agresivnih medija, plinova utječu na trajnost, sigurnost i pouzdanost kompenzatora.

Na izbor materijala utječe i njegova prikladnost za obradu određenim tehnološkim postupcima raspoloživim u DDK. Od materijala se obično traži zavarljivost, oblikovljivost deformiranjem (na hladno), obradljivost odvajanjem čestica.

Raspoloživost, nabavlјivost i cijena materijala, s obzirom da se koriste visokolegirani materijali, je jedan od značajniji parametara prilikom odabira materijala za kompenzatore.

Tehničko-tehnološki zahtjevi s jedne strane i s druge strane cijena, rokovi i konkurentnost na tržištu gotovo uvijek traže kompromisno rješenje u pogledu izbora materijala za kompenzatore.

## 6 LITERATURA

- [1] EN 14917, Metal bellows expansion joints for pressure applications
- [2] EN 13445-2, Unfired pressure vessels — Part 2: Materials
- [3] EN 13480-2, Metallic industrial piping — Part 2: Materials
- [4] Pressure Equipment Directive PED 97/23/EC
- [5] Lukačević, Zvonimir: *Zavarivanje*. Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 1998.
- [6] [Mirko Gojić, "Tehnike spajanja i razdvajanja materijala", Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.]
- [7] Tomislav Filetin, Franjo Kovačiček, Janez Indof, "Svojstva i primjena materijala", Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.
- [8] Katalog, Kompenzatori, Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o.
- [9] Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. (online), <http://www.kompenzatori.hr/>