



ZAVARIVANJE RAZNORODNIH MATERIJALA U IZRADI KOMPENZATORA

WELDING OF DISSIMILAR MATERIALS IN EXPANSION JOINTS MANUFACTURING

Josip PAVIĆ⁽¹⁾, Marko DUNĐER⁽²⁾, Štefanija KLARIĆ⁽³⁾, Josip MAJIĆ⁽¹⁾

Ključne riječi: zavarljivost, raznorodni materijali, kompenzatori

Key words: weldability, dissimilar materials, expansion joints

Sažetak: U radu je obrađen postupak zavarivanja raznorodnih materijala u izradi kompenzatora. Opisan je postupak spajanja materijala Incoloy 825, MONEL 400 i A 516 Gr. 70. Rad sadrži opis karakteristika svakog pojedinog materijala, zavarljivost, svojstva i primjenu. Također u rad su ubačeni iskustveni podaci iz proizvodnje kompenzatora.

Abstract: The paper presents welding process of dissimilar materials in expansion joints manufacturing. It contains welding capability of Incoloy 825, MONEL 400 and A 516 Gr.70 materials. Paper includes briefly description of mentioned materials properties, short view on their weldability and practical application. Beside that, the practical data from expansion joints production are given in this paper.

¹⁾ ĐD Kompenzatori d.o.o., Dr. M. Budaka 1, 35000 Slavonski Brod

²⁾ University of Rijeka, Politehnika Department of Philosophy Faculty, Rijeka, Croatia

³⁾ Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, J. J. Strossmayer University of Osijeku, Croatia



1. UVOD

Spajanje raznorodnih materijala je s metalurgijskog stajališta teže od spajanja istorodnih materijala. Npr. kako ostvariti spoj čelik – aluminij ili staklo – aluminij. Spojevi raznorodnih čelika se javljaju u tri slučaja: [1]

- a) Zavarivanje različitih vrsta čelika, kada se ZT razlikuje od bar jednog materijala, ako ne i od oba.
- b) Navarivanje nelegiranog ili niskolegiranog čelika zaštitnim slojem nehrđajućeg čelika ili navarivanje tvrdih slojeva specijalnim legurama se ne razmatra.
- c) Zavarivanje istorodnih OM uz primjenu DM drugog sastava.

Kod zavarivanja raznorodnih materijala se mora uvijek obratiti pozornost na sljedeće faktore[1]:

- 1) Odabir DM se vrši prema svojstvima OM. Za nelegirane, niskolegirane i srednje legirane čelike biramo bolje zavarljivi (niže legirani). Za spoj visokolegiranog s nekim drugim manje legiranim ili nelegiranim čelikom treba koristiti visokolegirani DM jer će miješanjem doći do krhke martenzitne ZT.
- 2) Predgrijavanje i temperatura između prolaza moraju odgovarati zahtjevima ZUT M1, ZUT M2 i ZT. Možda će biti potrebno zahtijevati različite temperature za M1 i M2 materijale odnosno za strane spoja.
- 3) Režim zavarivanja i toplinski input se moraju kompromisno izabrati.
- 4) Toplinska obrada se mora kompromisno izabrati.

Uvjeti eksploatacije, izbor sastava DM, parametri zavarivanja i miješanje OM i DM su važne veličine za kvalitetu zavarenog spoja austenitnih čelika s drugim čelicima. Jedan od problema koji može nastati je migracija ugljika. Zavareni spojevi različitih oblika mogu biti skloni migraciji ugljika, ako je spoj izložen visokim temperaturama pri naknadnoj toplinskoj obradi ili u eksploataciji. Ugljik migrira kada postoji razlika u sadržaju elemenata tvoraca karbida: Cr, Mo, Nb i drugih. Tako npr. kada je zavareni spoj izložen dovoljno vremena visokim temperaturama, ugljik će migrirati iz materijala s nižim sadržajem Cr u materijal s višim sadržajem Cr. Ako je razlika u sadržaju Cr, Mo, Nb i drugih karbidotvoraca dovoljno visoka, C će čak prelaziti iz materijala s nižim sadržajem C u materijal s višim sadržajem C. [1]

Budući da se najčešće spaja nelegirani ili niskolegirani čelik sa oko 0,15 % C s visokolegiranim CrNi čelikom, koji sadrži oko 0,08 % C to će i razlika koncentracije C pored razlike u koncentraciji legiranih elemenata pospješiti migraciju ugljika u CrNi čelik.

U zoni osiromašenoj ugljikom čvrstoća će biti manja, a u zoni obogaćenoj ugljikom će doći do stvaranja karbida, povećanja čvrstoće i smanjenja istezljivosti.

Još jedan od problema koji može nastati su termička naprezanja. Ona nastaju zbog razlike u koeficijentima linearnog istezanja na mjestu spoja feritnog i austenitnog materijala, a mogu dovesti do pojave pukotina ako dolazi do višekratnih temperaturnih promjena. Pri tim temperaturnim promjenama dolazi i do pukotina, obično u zoni nelegiranog ili niskolegiranog materijala. Da bi smo smanjili temperaturna naprezanja treba koristiti za spajanje visokolegiranog i nelegiranog ili niskolegiranog čelika elektrode na bazi nikla (monel), koje daju depozit s koeficijentom linearnog istezanja bliskim feritnom čeliku. [1]

Krhkost navarenog sloja austenitnog čelika se izbjegava tako da depozit austenitnog čelika treba posjedovati veliku istezljivost s 30 – 50 %, obično više od 40 %. Struktura mu je austenitno-feritna s 3 – 12 % delta ferita. U strukturi se zahtjeva nešto delta ferita da bi se povećala otpornost pojavi vrućih pukotina. U nekim uvjetima može doći do povećanja krhkosti i pojave pukotina u navarenom sloju, koje se mogu širiti i u osnovni materijal. Pojava nepoželjne krhkosti može biti uzrokovana: [2]

- Izborom neodgovarajućeg dodatnog materijala
- Tehnologijom navarivanja (jednoslojno, višeslojno, trakom, žicom, itd.)
- Režimima navarivanja (toplinski input, pregrijavanje...)
- Kasnijim plastičnim deformiranjem
- Naknadnom toplinskom obradom
- Uvjetima eksploatacije (temperatura, vrijeme, naprezanja, medij)

Utjecaj pojedinih faktora je povezan pa treba pri izboru dodatnog materijala odlučivati ovisno o iznosu miješanja osnovnog i dodatnog materijala, toplinskoj obradi i o uvjetima eksploatacije. Ako se vrši naknadna toplinska obrada tada u strukturi ne bi trebalo biti više od 5 % ferita.

2. ZAVARIVANJE INCOLOY 825 + MONEL 400 + A 516

Vrlo bitno za kvalitetan zavar je priprema za zavarivanje, odnosno bespriječna čistoća. Svi dijelovi ugljičnih čelika moraju biti obrušeni do metalnog sjaja ako nisu strojno obrađeni i odstranjene sve nečistoće od ulja, boja i masti. Ovo se postiže brisanje acetonom ili nitro razrjeđivačem. Brisanje se dozvoljava samo krpama iz ne sintetičnog materijala. [2]

Kada se govori o zavarivanju raznorodnih materijala potrebno je znati svojstva svakog pojedinog materijala.

Incoloy 825:

Incoloy 825 je legura nikla, željeza i kroma s dodatkom molibdena, bakra i titana i odlikuje se izuzetnom otpornošću na većinu agresivnih medija. Posebno se ističe jako dobra otpornost na sve vrste korozije. Velik udio u leguri ima nikal te upravo iz toga proizlazi velika otpornost na koroziju i posjeduje stabilnu austenitnu strukturu. Količina molibdena i bakra uvjetuje razinu otpornosti legure na zamor i razne kiseline. Krom daje otpornost legure na oksidaciju. Legura je stabilizirana titanom kako bi se dobila otpornost na točkastu i interkristalnu koroziju nakon naknadne obrade, a pogotovo nakon zavarivanja koje uključuje zagrijavanje legure na temperaturu blisku točki gdje dolazi do strukturnih promjena u materijalu (oko 650 °C – 700 °C). [3]

Legura Incoloy 825 ima sve predispozicije da se koristi za izradu posuda pod tlakom kao i bilo kojeg proizvoda koji mora izdržati pritisak i utjecaj negativnih medija, ali do temperature oko 560 °C. Na temperaturama višim od ove dolazi do promjena koje uzrokuju krhkost ove legure. Kemijski sastav legure je prikazan u tablici 1.

Tablica 2.1: Kemijski sastav Incoloy 825 legure [3]

Osnovni materijal	Ni	Fe	Mn	Mo	Cr	S	C	Si	Ti	Cu	Al
Incoloy 825	38,0-46,0	min. 22,0	max. 1,0	2,5-3,5	19,5-23,5	max. 0,03	max. 0,05	max. 0,5	0,6-1,2	1,5-3,0	max. 0,2

Primjena Incoloy 825 legure [3]:

- spremnici i cijevi za sumpornu kiselinu
- u kemijskoj industriji
- propeleri, brodska kormila
- spremnici
- harmonike na kompenzatorima.

Ova legura se može naknadno obrađivati i toplim i hladnim postupkom. Temperatura obrade na toplo se treba kretati između 870 °C i 1180 °C, a završna temperatura obrade ne bi smjela biti veća od 950 °C. Za maksimalnu otpornost prema koroziji legura se žari s ciljem otpuštanja zaostalih napetosti. Obično u katalozima za ovu leguru stoji oznaka C što znači da se lako može strojno obrađivati. Zavarljivost je dobra klasičnim TIG ili MIG postupkom ali treba paziti na čistoću zavarenog spoja da bi se izbjegao unos nečistoća u zavareni spoj.

A 516 Gr.70:

Ovi čelici sadrže dodatak molibdena koji uzrokuje povećanje otpornosti na koroziju, što je jako bitno zbog postizanja otpornosti prema točkastoj koroziji i pojavi sitnih pukotina prilikom izlaganja kloridima. Struktura koju posjeduju ovi čelici ima izuzetnu čvrstoću i tvrdoću, čak i na jako niskim temperaturama. U strukturi ima malen postotak titana čija uloga je da stabilizira strukturu na temperaturama iznad 800 °C. Ovo ograničava migraciju ugljika i zadržava ga na granicama zrna te tako štiti metal od korozije. Prednost ovakve legure je da ima sposobnost da izlaganja i držanja na povišenoj temperaturi bez da dođe do precipitacije. [3]

Naknadna obrada se može vršiti na toplo i na hladno. Kod tople obrade treba paziti da se ona ne izvodi na temperaturama nižim od 900 °C, idealna temperatura se kreće između 1150 °C – 1250 °C.

Primjena A 516 Gr.70 [3]:

- cijevne nastavke u proizvodnji kompenzatora
- u kemijskoj i petrokemijskoj industriji
- za laboratorijsku opremu
- izmjenjivače topline
- vijke i matice
- opruge, odstojnike i sl.

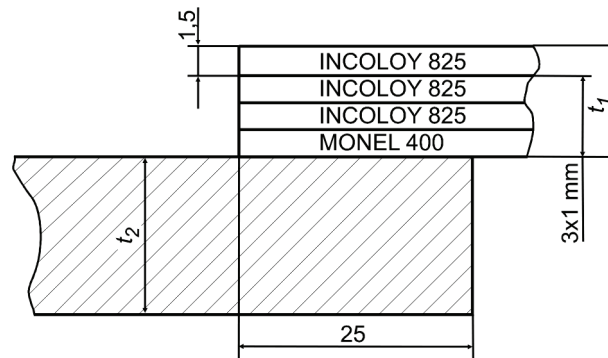
Ovaj čelik je pogodan za obradu, ali se treba obratiti pažnju da prilikom obrade ne dođe do očvršćenja upravo zbog same obrade te da tako se izgube neka povoljna svojstva.

Tablica 2.2: Kemijski sastav legure i vrijednosti mehaničkih svojstava [3]

Kemijski element	Sadržaj %	A516 Grade 60	A516 Grade 65	A516 Grade 70
C	0,31	60-80	65-85	70-90
Mn	0,85-1,20	415-550	450-585	485-620
P	0,035	32	35	38
S	0,04	220	240	260
Si	0,15-0,30	21	19	17
		25	23	21
		205	205	205

U tvornici "ĐĐ Kompenzatori" ovakva kombinacija materijala se zavaruje na način propisan od strane tehnologa i potvrđen atestom postupka TR 10/10 A. Skica zavarenog spoja je prikazana na slici 2.1.

Joint desing / Oblik spoja



Slika 2.1: Zavareni spoj TR 10/10 A [4]

Tablica 2.3: Parametri zavarivanja (prilagođeni su zavarivanju ove kombinacije materijala)[4]

Welding parameters Parametri zavarivanja									
Pass No. Prolaz br.	Process Postupak	Size of filter Promjer DM (mm)	Current Jakost struje (A)	Voltage Napon (V)	Type/polarity Vrsta/polaritet	Gas flow rate Protok plina (l/min)	Travel speed Brzina zavarivanja (cm/min)	Wire speed Brzina žice (m/min)	Heat input Unos topline (KJ/cm)
1	GTAW		140-150	15-16	DC (-)	11-13	15-18		7,00-9,60
2-5	GTAW	2,0	130-140	15-16	DC (-)	11-13	15-18		6,50-8,96

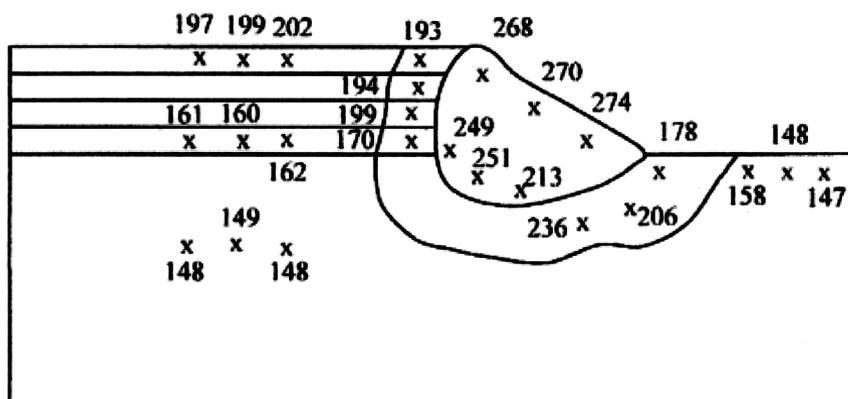
Izgled zavarenog spoja je prikazan na slici 2.2.



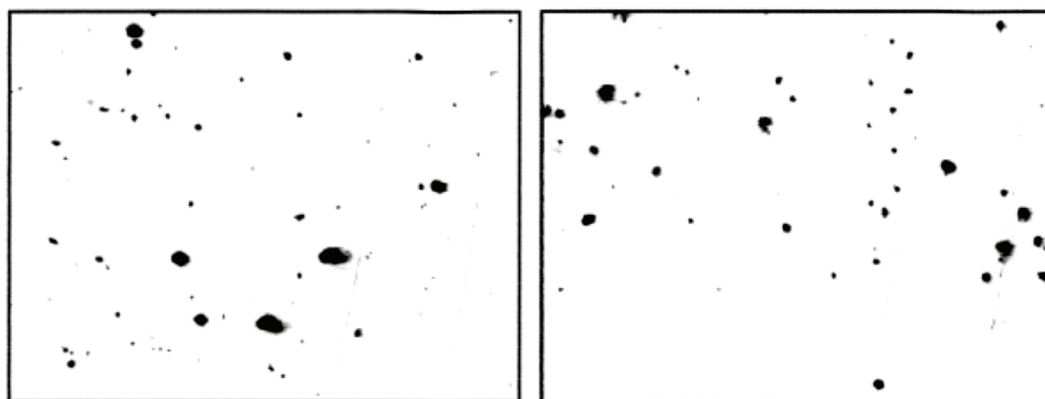
Slika 2.2: Izgled stvarnog zavarenog spoja [4]

Na zavarenom spoju su izvršena sljedeća ispitivanja:

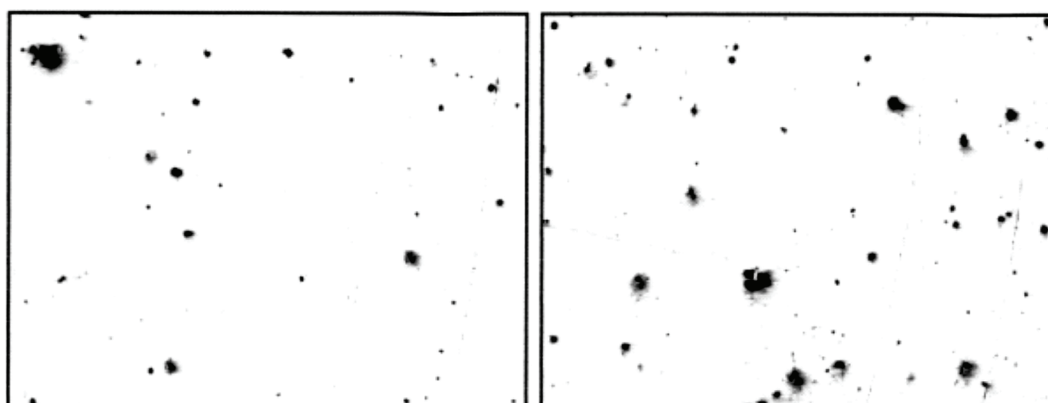
1. Ispitivanje tvrdoće (slika 2.3)
2. Ispitivanje mikrostrukture A 516 Gr. 60 (slika 2.4)
3. Ispitivanje strukture MONEL 400 i Incoloy 825 (slika 2.5)
4. Ispitivanje mikrostrukture depozita zava (slika 2.6).



Slika 2.3: Područja ispitivanja tvrdoće [4]

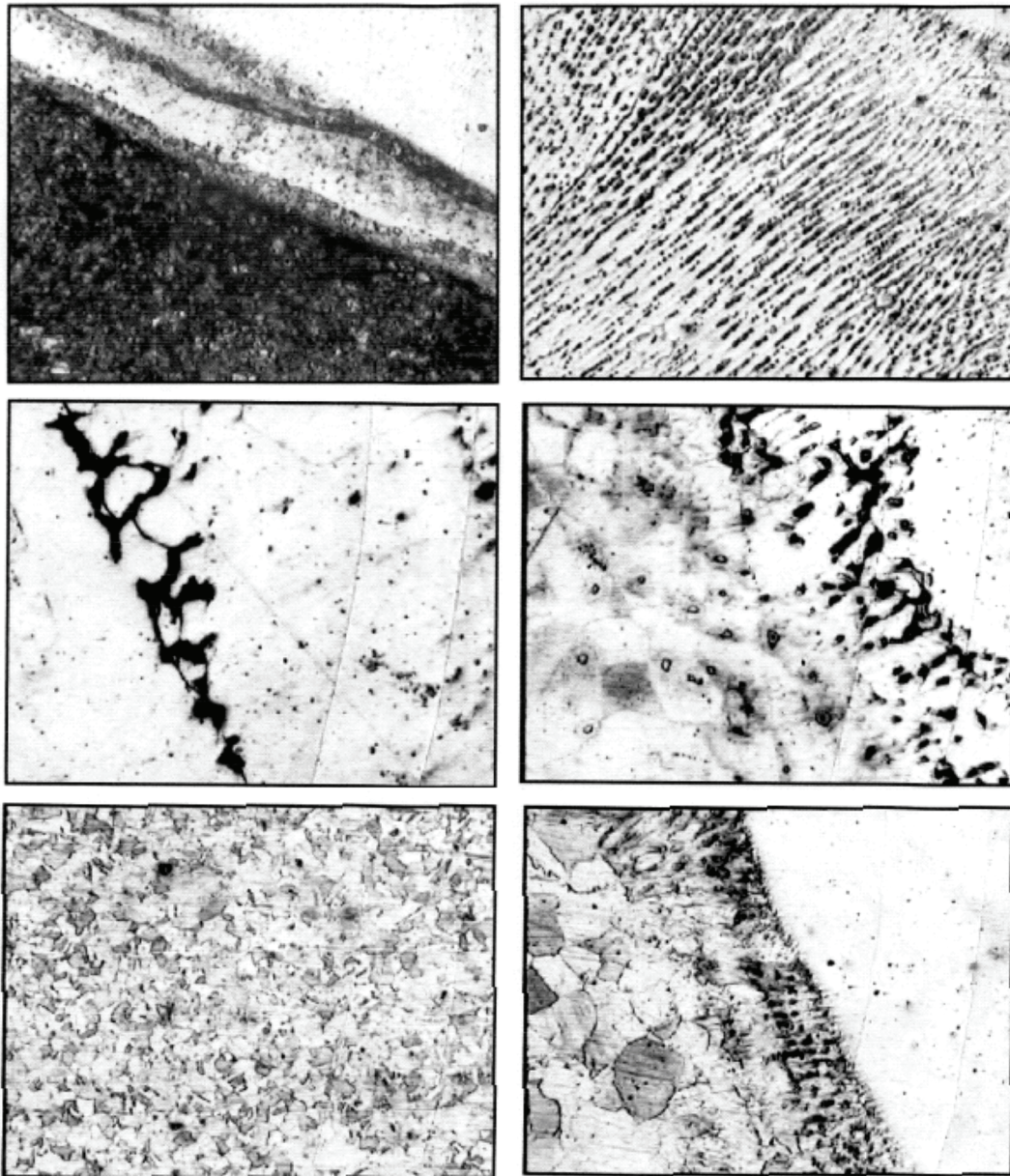


Slika 2.4: Izgled mikrostrukture A 516 [4]



Slika 2.5: MONEL 400 struktura (a) Struktura Incoloy 825 (b) [4]

Kako se radi o spajanju nekoliko različitih vrsta materijala treba se posebnu pažnju obratiti izboru dodatnog materijala. Za ovaj spoj je odabran dodatni materijal INCONEL 82. Ovaj dodatni materijal nakon taljenja ima visoku čvrstoću i tvrdoću zavarenog spoja, dobru otpornost na koroziju, otpornost na oksidaciju i visoku otpornost na pojavu pukotina pri povišenim temperaturama. Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je u tablici 2.4.



Slika 2.6: Izgled strukture depozita zavara [4]

Tablica 2.4: Kemijski sastav dodatnog materijala [5]

Dodatni materijal	Ni+Co	C	Mn	Fe	S	Cu	Si	Cr	Ti	Nb+Ta	P	Ostalo
INCONEL 82	min. 67,0	max. 0,10	2,5-3,5	max. 3,0	max. 0,015	max. 0,50	max. 0,50	18,0-22,0	max. 0,75	2,0-3,0	max. 0,030	max. 0,50

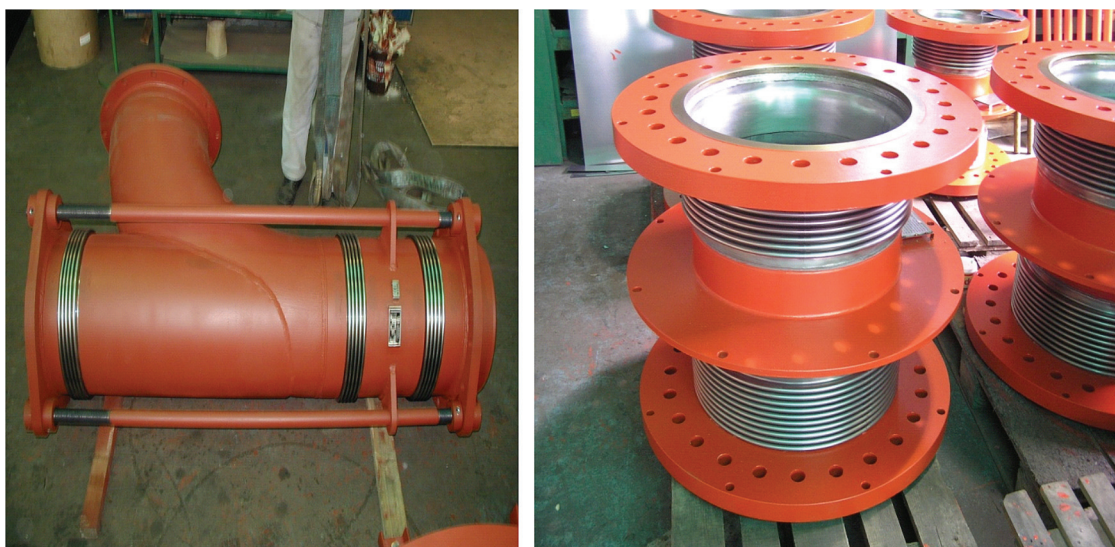
Dodatni materijal Inconel predstavlja leguru austenitne strukture NiCr tzv. superlegura. Obično se ovakva vrsta legure koristi pri izuzetno visokim temperaturama. Kada se zagrije Inconel stvara gust, stabilan, pasivirajući sloj rastaljenog metala koji štiti površinu od vanjskog utjecaja. Njegova velika otpornost prema starenju i precipitaciji dolazi iz legiranja s malim količinama Nb.

Jedno od svojstava je da se dosta teško naknadno obrađuje strojnom obradom. Ima slabu zavarljivost jer često dolazi do pukotina i mikrostrukturne segregacije u zoni utjecaja topline. Upravo zbog ovog problema Inconel kao legura ima razne varijacije koje su korigirane legirnim elementima kako bi se poboljšala njegova daljnja primjena. Najbolja metoda za zavarivanje ovakvog tipa legure je TIG postupak.

Primjeri primjene kombinacije materijala u izradi kompenzatora prikazan je na slikama 2.7 i 2.8.



Slika 2.7: Posebno izrađen mikser iz materijala SA516 Gr.70, INCOLOY 800H, INCONEL 600



Slika 2.8: Kompenzator s primjenom raznorodnih materijala SA 516 GR.70, SB 316L i MONEL 400

Na slici 2.9 je prikazan kompenzator s posebnom namjenom.



Slika 2.9: Kompenzator s primjenom raznorodnih materijala SA516Gr.70 i INCONEL600 u fazi izrade i u potpunosti izrađeni kompenzator

3. ZAKLJUČAK

Zavarivanje raznorodnih materijala predstavlja izazov, jer se pažnja treba obratiti na svaki materijal posebno. Pravilnom analizom svojstava i kemijskog sastava dolazi se do zaključka kako pravilnim izborom dodatnog materijala koji će na određeni način predstavljati balans kombinacije materijala i dobivenih struktura, dobijemo kvalitetan zavareni spoj. Pri izradi kompenzatora u obzir se uzimaju i uvjeti eksploatacije i medija koji će protjecati kroz kompenzator što predstavlja jedan dodatni faktor, na koji se mora obratiti pozornost pri izboru tehnologije zavarivanja i dodatnog materijala. Zavareni spoj nakon kontrole je zadovoljio sve preduvjete da se kao takav, upotrebom istih parametara primjenjuje u proizvodnji.

4. LITERATURA:

- [1] Lukačević, Zvonimir: *Zavarivanje*, Strojarski fakultet u Slav. Brodu, Slavonski Brod 1998. (13-1 str.)
- [2] ĐĐ "Kompenzatori": *RI-701 rev. 0 – priključno zavarivanje*, (Radne instrukcije), Slavonski Brod, 2008.
- [3] MegaMex: *Special metals on demand*, USA 2011.
URL: <http://www.megamex.com/monel-400-nickel-alloy.html> (09.09.2011.)
- [4] ĐĐ "Kompenzatori": *Atest postupka TR 10/10 A*, (Interni dokument), Slavonski Brod, 2006.
- [5] ĐĐ "Kompenzatori": *Atest dodatnog materijala INCONEL 82*, (Interni dokument), Slavonski Brod, 2011.