

**NEKI ASPEKTI KVALITETA SFERNIH PODNICA IZRAĐENIH  
POSTUPKOM INKREMENTALNE DEFORMACIJE**

**SOME ASPECTS OF SPHERICAL VESSEL HEAD QUALITY MADE  
BY INCREMENTAL DEFORMATION TREATMENT**

**Dr. Dušan Vukojević  
Dr. Nedeljko Vukojević  
Mr. Fuad Hadžikadunić  
Mašinski fakultet u Zenici  
Fakultetska br.1  
72 000 Zenica**

**Mr. Zlatan Ištvančić  
Metalcomm, d.o.o.  
Bage br.5  
70 101 Jajce**

**REZIME**

*Izrada podnica postupkom inkrementalne deformacije predstavlja postupak plastične obrade na hladno. Primjenom ovog postupka dolazi do pojava grešaka kao što su izvijanje, valovitost površine, neravnomjernosti debljina podnice, cijepanja, zaostalih naprezanja i dr. koja direktno utiču na kvalitet proizvoda. Jedan od značajnijih poremećaja su svakako zaostala naprezanja čije prisustvo utiče na sigurnost posuda pod pritiskom čiji je dio i podnica. Veliko prisustvo zaostalih naprezanja utiče na pojavu korozije ili deformisanja posuda u kojima se skladište fluidi na povišenim temperaturama. Pravilnim izborom tehnologije izrade može se djelimično utjecati na smanjenje veličine zaostalih naprezanja na podnicama izrađenim postupkom inkrementalne deformacije.*

**Ključne riječi:** inkrementalna deformacija, kvalitet sfernog danca, zaostala naprezanja

**ABSTRACT**

*Production of spherical vessel heads by incremental deformation is cold plastic deformation treatment. Using of this method produced same failures like buckling, corrugation, deviation of wall thickness, spalling, residual stresses etc., which directly influence in final quality of vessel head. One of the most important disarrangement present residual stress, that caused pressure vessel unsafety. Presence of high residual stresses caused surface corrosion or deviations of pressure vessel filled by high temperature fluids. Correct choosed technology could produce decrease of residual stress magnitude in vessel heads made by incremental deformation treatment.*

**Key words:** incremental deformation, quality of vessel heads, residual stress

**1. UVOD**

Pored uobičajenih (tradicionalnih) postupaka proizvodnje metalnih proizvoda plastičnom deformacijom, u koje spadaju postupci slobodnog i ukovnog kovanja i dubokog izvlačenja, zahtjevi tržišta za manjim serijama proizvoda različitih dimenzija i geometrijskih oblika, doveli su do razvoja novih postupaka obrade koji smanjuju učešće cijene alata u cijeni gotovog proizvoda. Ovako razvijeni postupci proizvodnje su fleksibilni i omogućavaju da se jednim alatom izrade proizvodi različitog oblika. Jedan od tih fleksibilnih postupaka je i postupak plastične obrade inkrementalnom deformacijom na hladno.

Primjena ovog postupka kod izrade podnica (danaca) posuda pod pritiskom ima za posljedicu i određene prateće greške, koje se manifestuju kao: izvijanje, valovitost površine, neravnomjerna debljina lima podnice, cijepanje, zaostala naprezanja i sl. Većina nabrojanih grešaka se može otkloniti naknadnim postupcima termičke obrade ili ponavljanjem procesa inkrementalne deformacije, što sve utiče na povećanje troškova proizvodnje.

U cilju smanjenja troškova, pri izradi podnica koriste se isti alati za više različitih dimenzija podnica, a to utiče i na završni kvalitet konačnog proizvoda. U radu se prezentuju rezultati mjerenja zaostalih naprezanja, kao jednog od pratećih nedostataka ovakvog načina proizvodnje, a čije prisustvo utiče na pojavu korozije ili čak deformisanja posude u kojoj se smještaju fluidi povišene temperature. Kvantitativni pokazatelj prisustva i veličine zaostalih naprezanja može direkto ukazati i na kvalitet podnice nastale ovim postupkom proizvodnje i dati određene preporuke u cilju smanjenja prisustva istih.

Rezultati prezentovani u ovom radu su posljedica primjenjenih istraživanja i iskustava u proizvodnji podnica postupkom inkrementalne deformacije, koja se primjenjuje u proizvodnom procesu pogona preduzeća Metalinvest u Jajcu, B&H.

## **2. IZRADA PODNICA INKREMENTALNOM DEFORMACIJOM**

Podnice za procesne posude pod pritiskom najčešće se izrađuju od toplovaljanih čeličnih limova. Materijal limova je ugljenični čelik garantovanog hemijskog sastava sa veličinom zatezne čvrstoće u rasponu od 200 do 800 MPa. Ovi materijali imaju dobra plastična svojstva, pri čemu brzina izrade zavisi od debljine lima i veličine zatezne čvrstoće za isti oblik i mjere. Pored ovih materijala sve su češći zahtjevi za primjenom aluminija i aluminijskih legura kao i čelika otpornih na koroziju.

Iskustva stečena prilikom proizvodnje podnica su različita za navedene materijale i debljinu lima. Izrada kalote, sferičnog dijela podnice, je najbrža sa najmanjim brojem operacija i najmanjom silom utiskivanja pri obradi mekših materijala. Oblik i izgled površine se brže postiže za veće debljine lima nego za tanje limove.

Proizvodna iskustva su uglavnom vezana za izradu podnica od istog materijala, oblika i mjera s različitom silom utiskivanja, radijusom gornjeg alata-utiskivača, redosljeda i broja operacija. Navedeni parametri značajno utiču na kvalitetu i brzinu izrade podnica. Pokazalo se da su iskustvo i uvježbanost radnika od iznimnog značaja, jer kvalitet i ekonomičnost izrade uveliko zavise od najpovoljnije odabranih parametara izrade.

Iskustva u proizvodnji podnica odnosno kalota su sljedeća:

- sila utiskivanja gornjeg alata (konveksni dio alata) utiče na brzinu izrade i izgled površine,
- radijus alata donjeg konkavnog nepokretnog alata je određen oblikom danca, dok se radijus gornjeg pokretnog alata može mijenjati, pri čemu se manji radijus bira za veće debljine i zateznu čvrstoću materijala;
- redosljed i broj operacija značajno utiče na brzinu izrade i kvalitetu podnice.

### 3. MJERENJE ZAOSTALIH NAPREZANJA

Izrada podnica određenih geometrijskih karakteristika postupkom inkrementalne deformacije, odnosno postupkom postupnog utiskivanja izvodi se iz polaznih priprema, tzv. rundela, dobijenih od zavarenih limova.



*Slika 1. Polazni i konačni izgled podnice*



*Slika 2. Postupak inkrementalnog presovanja*

Pri takvom postupku izrade podnica uočavaju se pritisne zone po radijusu koje u smislu šireg definisanja problema zahtijevaju utvrđivanje naponsko-deformacionog stanja, odnosno definiranja nivoa zaostalih napreznja, kao posljedice tehnologije izrade kombinacijom zavarivanja i plastične deformacije. Pretpostavlja se da je nivo zaostalih napreznja značajan, posebno u dijelu zavarenog spoja, koji je prisutan u postupku dobijanja rundele.

Značaj određivanja zaostalih napreznja je veoma značajan zbog toga što njihova vrijednost i karakter mogu biti uzrokom da u eksploataciji ukupna vrijednost zaostalih i radnih napreznja budu veći od granice tečenja, što dovodi do havarije.

Istraživanja se provode po određenom planu eksperimenta, koji obuhvata parametre tehnologije izrade, geometrijskih i mehaničkih karakteristika uzoraka. Eksperiment se provodi na čeličnim uzorcima sljedećih karakteristika:

- materijal: čelik St.52-3 (S 355 J2G3),
- debljina: 12 [mm],
- prečnik: 2550 [mm],
- izvedba: zavarena,
- broj uzoraka: 3 ( 1 rundela- R4 i 2 kalote- K2 i K4).

Inkrementalna deformacija rundele se izvodi na hidrauličnoj presi sa izmjenjivim alatom i silom pritiska. Presa je tipa P2MF 200x4 – Sertom, Milano.

Utvrđivanje veličine zaostalih napreznja se izvodi mjernim trakama – rozetama, metodom "zabušivanja rupe" prema standardu ASTM E837:1999. Polazni materijal za dobijanje rundele tehnologijom sječenja i zavarivanja jeste vruće valjani lim dimenzija 12000 x 1500 x 6000 [mm] kvaliteta S 355 J2G3, gdje je izvršena atestacija navedenog materijala i utvrđene mehaničko-tehnološke karakteristike, tabela 1.

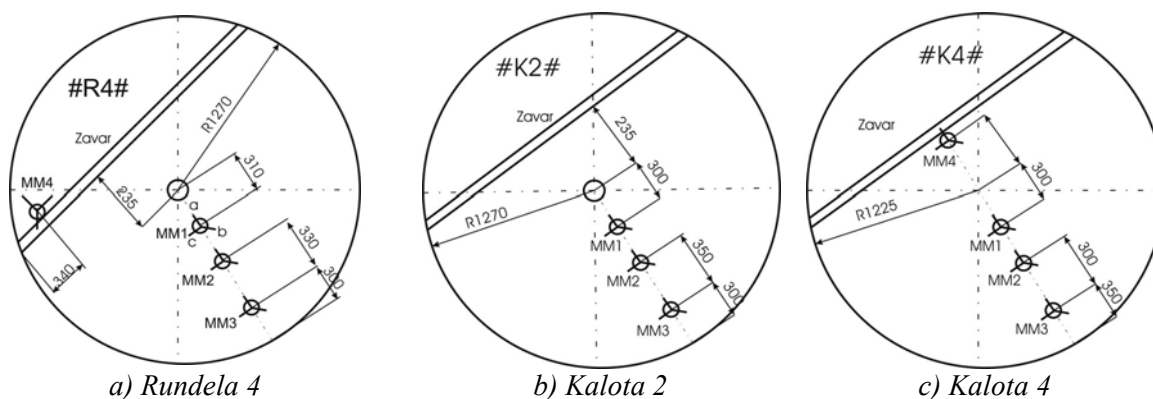
Tabela 1. Mehaničke karakteristike polaznog materijala

$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{eH} / R_m$	Izduženje [%]	Energija udara J 20[°C]
439	537	0,81	27	100

Akvizicija podataka tenzometrijskih mjerenja vršena je na uređaju UPM 40A. U eksperimentu je korištena mjerna traka (rozeta) 1.5/120 RY 61, sa radijusom otvora  $r_a=3.3$  [mm] i  $r_i=1.8$  [mm].

Mjerenja su izvršena na uzorcima, kako slijedi:

- polazni komad (rundela-R4) sa četiri mjerna mjesta, koja su raspoređena tako, da tri mjerna mjesta leže na radijalnoj izvodnici, a jedno mjerno mjesto je postavljeno u zonu zavara, slika 3a.



Slika 3. Položaj mjernih mjesta na uzorcima

- mjerenja zaostalih naprezanja na kaloti „K2“ imaju za cilj da se dobiju vrijednosti zaostalih naprezanja nastalih postupkom plastične deformacije sa donjim alatom minimalnog promjera  $\phi 500$  i gornjim alatom maksimalnog promjera  $\phi 1700$ . Postupak izrade je izveden sa minimalnom silom pritiska od 1.045 MN i sa redoslijedom operacija iz centra. Broj operacija utiskivanja je 725. Dobijena kalota je promjera 2520 mm i dubine 260 mm, slika 3b.
- mjerenja zaostalih naprezanja na kaloti „K4“ imaju za cilj da se dobiju vrijednosti zaostalih naprezanja nastalih postupkom plastične deformacije sa donjim alatom maksimalnog promjera  $\phi 1700$  i gornjim alatom maksimalnog promjera  $\phi 1700$ . Postupak izrade je izveden sa minimalnom silom pritiska od 1.045 MN i sa redoslijedom operacija iz centra. Broj operacija utiskivanja je 264. Dobijena kalota je promjera 2526 mm i dubine 203 mm, slika 3c.

Rezultati mjerenja zaostali naprezanja su dati u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja na uzorcima

	Mjerno mjesto	Položaj trake na uzorku	Glavna naprezanja		Efektivna naprezanja
			$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_{ef}$ [MPa]
Rundela R2	MM1	Slika 3a	13,1	-83	90,3
	MM2	Slika 3a	56,8	-2,2	57,9
	MM3	Slika 3a	14,3	-36,4	45,3
	MM4	Slika 3a	183,9	-50,9	213,9
Kalota K2	MM1	Slika 3b	-10,9	-197,2	192
	MM2	Slika 3b	-120,8	-317,5	277,6
	MM3	Slika 3b	-61,5	-189,3	167,3
Kalota K4	MM1	Slika 3c	-62,2	-166,4	145,6
	MM2	Slika 3c	220,7	140,9	193,5
	MM3	Slika 3c	159,7	118,4	143,5
	MM4	Slika 3c	105,9	-247,5	314,2

#### 4. ZAKLJUČCI

Analizom rezultata mjerenja zaostalih naprezanja na uzorcima koji su prikazani u tabeli 2 može se zaključiti da vrijednosti:

- izmjerenih zaostalih naprezanja na rundeli, polazni komad, u pravcu radijalne izvodnice imaju relativno niske vrijednosti i ujednačenu orijentaciju glavnih naprezanja. Zaostala naprezanja u zoni zavara (ZUT-a) iznose oko  $0.5R_{eH}$ .
- izmjerenih zaostalih naprezanja na kaloti K2, imaju najveću vrijednost na mjernom mjestu MM2 koje se nalazi na sredini radijalnog zakrivljenja kalote.
- izmjerenih zaostalih naprezanja na kaloti K4 imaju takođe relativno velike vrijednosti, a najveće je vrijednosti su izmjerene u zoni ZUT-a i na mjernom mjestu MM2, odnosno na sredini zakrivljenja radijalne izvodnice.

Dakle naprezanja na polaznom komadu su zadovoljavajuća, s obzirom na to da je polazni komad valjani čelični lim (S355J2G3 ili St 52-3) i da su naprezanja posljedica postupka izrade.

Poredeći vrijednosti zaostalih naprezanja na kaloti u pravcu radijalne izvodnice može se zaključiti da postupak izrade sa maksimalnim odnosom gornjeg i donjeg alata i sa perifernom izvedbom presovanja, daje niže vrijednosti zaostalih naprezanja.

Kod oba slučaja, K2 i K4, najveća izmjerena naprezanja na radijalnoj izvodnici su upravo na mjestu najvećeg radijalnog zakrivljenja.

Vrijednosti zaostalih naprezanja izmjerenih u ZUT-u su u oba slučaja veliki i očekivani s obzirom da nisu provedeni tretmani termičke obrade i nastali su kao posljedica primjenjenog postupka zavarivanja.

## 5. LITERATURA

- [1] Vukojević, D.: Teorija elastičnosti sa eksperimentalnim metodama, Mašinski fakultet u Zenici, 1998.
- [2] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987.
- [3] ASTM E837: Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM Standards, USA, 1999.
- [4] Vukojević D., Vukojević N., Imamović M., Hadžikadunić F.: Analysis of possibilities for lessing residual stresses in high pressure vessels, 7<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2003, Lloret de Mar, Barcelona, pp.845-849, Spain, 2003.
- [5] Ištvančić, Z.: Analiza utjecaja geometrije alata i broja operacija na kvlitetu danca u procesu proizvodnje inkrementalnom deformacijom, Magistarski rad, Mašinski fakultet u Zenici, BiH, 2006.