



Zlatan Ištvančić¹, Mustafa Hadžalić², Raza Sunulahpašić³

CJELOVITOST VIŠEDIJELNIH TOROSFERIČNIH PODNICA URAĐENIH POSTUPKOM INKREMENTALNE DEFORMACIJE

STRUCTURAL INTEGRITY OF MULTIPART TORISPHERICAL CYLINDRICAL HEAD SHELLS MADE BY THE INCREMENTAL SHEET FORMING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2024.

Ključne reči: tlačna oprema, cilindrične podnice, mehanička svojstva, mehanika loma.

Rezime

U radu su prikazani rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava i procjena cjelovitosti cilindričnih podnica, koja su dobivena postupkom zavarivanja i oblikovana postupkom postupne lokalne deformacije u hladnom stanju odnosno postupkom inkrementalne deformacije - Incremental sheet forming (ISF). Cilindrične podnice tlačnih posuda izrađuju se iz jednog dijela, ali standardi dopuštaju i izradu u zavarenoj izvedbi kada su dimenzije podnica veće od standardnih dimenzija limova za izradu. Geometrijski oblik i tolerancije mjera su definirane nizom preporuka. Potrebna mehanička svojstva i kriteriji prihvatljivosti za ugradnju u tlačnu opremu su propisana PED 68/2014/EC i preporukom BAS EN 13445. Mehanička svojstva zavarenog spoja i deformiranog materijala u torosferičnoj zoni podnice, kao što su žilavost, tvrdoća i pukotinska žilavost, odnosno njihove vrijednosti su ulazni parametri za utvrđivanje cjelovitosti konstrukcije podnice. Kriterijima mehanike loma, otkrivene greške mogu se kategorizirati i ocijeniti s obzirom na prihvatljivost podnice za ugradnju u tlačnu opremu ili nastavak rada. Cilj ispitivanja je utvrđivanje uticaja vrste materijala, debljine i dijametra podnica na mehanička svojstva (R_{eH} , R_m , A_5 i K_{Ic}) i na cjelovitost cilindričnih podnica.

Adresa autora / Author's address:

¹ Metacomm, Jajce, B&H,

² Institut Kemal Kapetanović, Univerzitet u Zenici, B&H,

³ Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka, Univerzitet u Zenici, B&H

Keywords: pressure equipment, cylindrical head shells, mechanical properties, fracture mechanics.

Abstract

The paper presents the results of testing the mechanical properties and evaluating the integrity of cylindrical head shells, which were obtained by the welding process and shaped by the cold process of gradual local deformation, i.e. the process of incremental deformation. Cylindrical head shells of pressure vessels are made from one part, but the standards also allow production in a welded version when the dimensions of the floors are larger than the standard dimensions of the sheets for production. Geometric shape and measurement tolerances are defined by a series of recommendations. The required mechanical properties and acceptance criteria for installation in pressure equipment are prescribed by PED 68/2014/EC and the BAS EN 13445 recommendation. The mechanical properties of the welded joint and the deformed material in the torospheric zone of the head shells, such as toughness, hardness and crack toughness, or their values are input parameters for determining the integrity of the floor structure. Using fracture mechanics criteria, detected faults can be categorized and evaluated with regard to the acceptability of the head shells for installation in pressure equipment or continued operation. The aim of the test is to determine the influence of the type of material, thickness and diameter of the head shells on the mechanical properties (R_{eH} , R_m , A_5 and K_{Ic}) and on the integrity of the cylindrical head shells.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Posude pod pritiskom se u najvećem broju slučajeva izrađuju kao višedijelne, posebno ako se radi o spremnicima velikih dimenzija koji su namijenjeni za skladištenje tečnih i plinovitih materija. Zbog svoje veličine, takve strukture se izrađuju ukupnjavanjem parcijalnih segmentata postupkom zavarivanja [1].

Kod posuda pod pritiskom vrlo često je, kao problem, prisutna pojava grešaka u zavarenim spojevima, što predstavlja potencijalno slabo mjesto.

Postupak oblikovanja inkrementalnom deformacijom je postupak oblikovanja metala progresivnom lokalnom deformacijom - Incremental sheet forming (ISF). Kod ISF postupka alat se pomjera po konturi radnog komada, pri čemu stvara male deformacije u materijalu, čime ga postepeno oblikuju u željeni oblik. Postupak izrade danaca inkrementalnom deformacijom zajedno sa rolovanjem po obimu, s ciljem izvlačenja cilindričnog dijela danca, dodatno usložnjava stanje napona zbog prisutnog velikog lokalnog pritiska.

Analiza mehaničkih svojstva zavarenog spoja i deformiranog materijala u torosferičnoj zoni podnice, kao što su žilavost, tvrdoća i pukotinska žilavost, omogućava dobivanje podataka neophodnih za pouzdanu procjenu svojstava podnica, definisanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja koje ima za cilj korekciju i unapređenje tehnologije izrade.

Provjera ponašanja ovakvih danaca prije kompletiranja same posude, odnosno prije puštanja u eksploataciju je neophodna, s jedne strane zbog velikog broja utjecajnih faktora, a s druge strane zbog visoke cijene ispitivanja same realne konstrukcije. Alternativu predstavlja ispitivanje uzoraka uzetih iz same konstrukcije prije ugradnje, odnosno simuliranje ponašanja danca u toku eksploatacije pomoću ispitivanja epruveta.

Mehanička ispitivanja prezentovana u ovom radu imaju za cilj dobijanje potpunije slike stanja materijala sfernih danca posuda pod pritiskom, izrađenih zavarivanjem iz više segmenata. Podnice su izrađene od dva različita materijala S235JR i P460NL1, u dvije debljine (6 mm i 14 mm) za određeni promjer (1500 mm).

2. Metodologija rada

Tehnologija izrade mora da bude projektovana na osnovu svih relevantnih uticaja kako bi se obezbijedilo da podnice budu bezbjedne tokom

radnog vijeka. Dozvoljena naprezanja za opremu pod pritiskom moraju biti ograničena mogućim greškama u radnim uslovima, kako bi se potpuno eliminisala neizvjesnost koja nastaje od proizvodnje, modela proračuna, stvarnih radnih uslova i karakteristika i ponašanja materijala.

Podnice za eksperimentalna istraživanja se izrađuju postupnim utiskivanjem iz polaznih priprema, tzv. rundela, dobijenih od zavarenih limova. Pri takvom postupku izrade podnica uočavaju se pritisne zone po radijusu kao posljedice tehnologije izrade kombinacijom zavarivanja i plastične deformacije. Eksperiment koji se provodi ima za cilj utvrđivanja uticaja parametra: vrsta materijala, debljina i promjer na slijedeće veličine: mehanička svojstva, R_{eH} i R_m , tvrdoću, HV, i faktora intenziteta napona, K_{IC} . Podnice izrađene za eksperimentalna istraživanja imaju veliki broj segmenata koji su radijalno zavareni. Zavareni spojevi su veće krutosti i debljine u odnosu na osnovni materijal te time sprječavaju tečenje materijala i uzrokuju pojavu valovitosti na rubovima. Inkrementalna deformacija rundele se izvodi na hidrauličnoj presi sa izmjenjivim alatom i silom pritiska. Završno oblikovanje torusa rađeno je na presi tipa P2MF 200x4 – Sertom, Milano, slika 1. [2].



Slika 1. Izrada podnica postupkom inkrementalne deformacije

Figure 1. Production of head shells by the process of incremental deformation



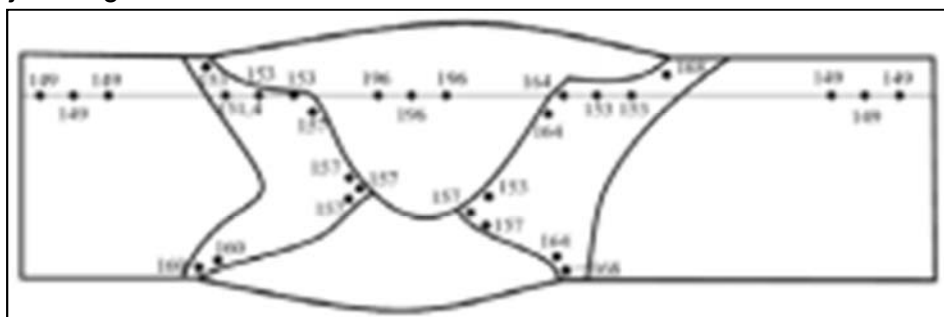
Uzorci su izvađeni iz polaznih zavarenih limova prije bilo kakve primjenjene tehnologije (serija I), zatim iz gotovih podnica izrađenih plastičnom deformacijom (serija II). Uzorci za provedena ispitivanja su standardne epruvete koje su u nekim slučajevima modifikovane (prilagođene) radi dobijanja što tačnijih rezultata. Fokus ispitivanja je zona uticaja topline kao potencijalno najkritičnije mjesto sa aspekta sigurnosti kao i mogućnosti kontrole kvaliteta.

2.1 Mjerenje tvrdoće uzoraka

Mjerenja tvrdoće na uzorcima su izvršena s ciljem utvrđivanja signifikantnih razlika i

eventualnog njihovog uticaja na ostale rezultate mehaničkih ispitivanja. Mjerenja su izvršena na uređaju za ispitivanje tvrdoće i mikrotvrdoće - ZWICK.

Provedena su ispitivanja tvrdoće po presjeku sučeono zavarenog spoja metodom ispitivanja Wickers, opterećenje je 10 kg (HV1), temperatura ispitivanja 22°C prema standardu BAS EN ISO 6507-1:2018, [3]. Ispitivanje tvrdoće je provedeno na poprečnom presjeku uzorka. Rezultati ispitivanja tvrdoće i šematski prikaz lokacije otisaka uzorka lima debljine 15 mm, izrađenog iz materijala S235JR dat je na slici 2. [2].



Slika 2. Shematski prikaz lokacije mernih mesta i tvrdoće na sučeono zavarenom spoju lima

Figure 2. Schematic representation of the location of measurement points and hardness on a butt-welded sheet metal joint

Rezultati ispitivanja svih uzoraka su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje vrijednosti mjerenja tvrdoće (HV) epruveta iz serije I i II za oba materijala

Table 1. Mean hardness measurement values (HV) of test samples from series I and II for both materials

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)		
Debljina, mm		6	15	6	15	
Promjer, mm		φ 1500				
Serija I	Oznaka	M1-1B	M1-2A	M2-1D	M2-2C	
	Tvrdoća	MZ	204,3	196	243	230
		ZUT	164,9	156,9	231,8	241,6
		OM	155	149	202,5	198,6
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2	
	Tvrdoća	MZ	232	230	272,7	283
		ZUT	193,3	211,8	276,7	290,5
		OM	179	202,4	210,5	245

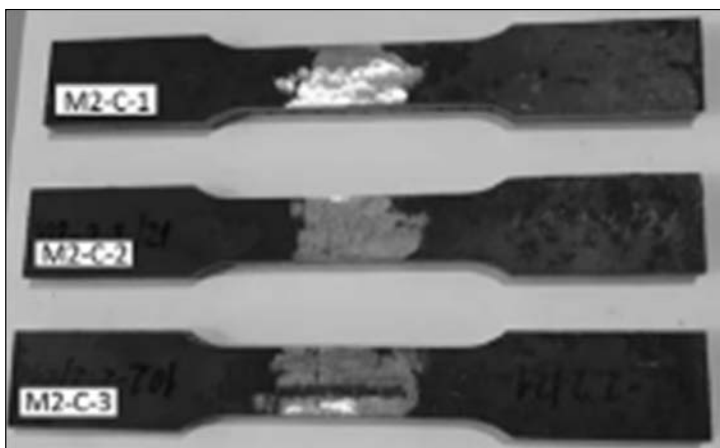
Tvrdoća serije II je povećana u odnosu sa seriju I.



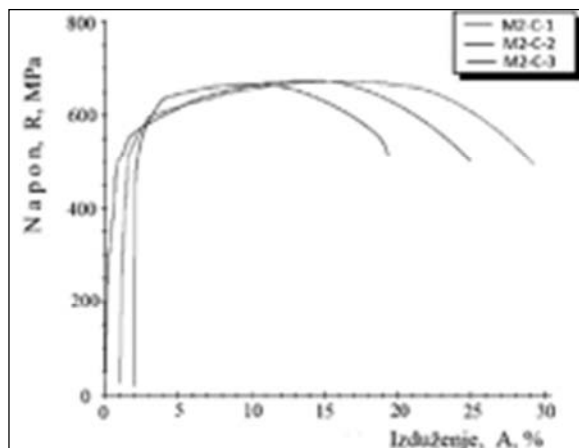
2.2. Određivanje zateznih svojstava uzoraka

Zatezna ispitivanja epruveta izvađenih iz podnice posude pod pritiskom, rađena su na sobnoj temperaturi pri +18°C. Ispitivanje je izvedeno na univerzalnoj hidrauličkoj mašini za statička ispitivanja AMSLER, ser.br. 599/625. Sam

postupak ispitivanja je definisan standardom BAS EN ISO 6892-1:2017 B [4], na epruvetama za zatezna ispitivanja čija je geometrija data standardom BAS EN ISO 4136:2014 [5]. Epruvete su modifikovane sa urezanim poprečnim žlijebom u zoni ZUT, prikazane su na slici 3.



Slika 3. Epruvete za određivanje zateznih svojstava
Figure 3. Test samples for testing tensile properties



Slika 4. Dijagram napon-izduženje epruveta iz serije I (M1)

Figure 4. Stress - elongation diagram of test samples from series I (M1)

Dijagram ispitivanja epruveta dat na slici 4. Rezultati zateznih ispitivanja epruveta za dvije serije su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Srednje vrijednosti mjerenja tvrdoće (HV) epruveta iz serije I i II za oba materijala

Table 2. Mean hardness measurement values (HV) of test samples from series I and II for both materials

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)	
Debljina, mm		6	15	6	15
Promjer, mm		φ 1500			
Serija I	Oznaka	M1-1B	M1-2A	M2-1D	M2-2C
	R _{eH} , MPa	344	340	407	531
	R _m , MPa	465	475	593	670
	A ₅ (%)	27,33	34,0	20,83	31,6
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2
	R _{eH} , MPa	534	612	614	763
	R _m , MPa	597	637	682	480
	A ₅ (%)	9,75	10,75	9,5	11,75

Analizirajući rezultate ispitivanja zatezanjem datih u tabeli 2., može se konstatovati da su rezultati u granicama standardom propisanih

vrijednosti za analizirane materijale. Karakter krive odgovara duktilnom materijalu.



Vrijednosti mehaničkih svojstava na uzorcima iz serije II (uzorci iz podnica nakon plastične deformacije) su iznad vrijednosti u osnovnom materijalu, tabela 4. Plastična deformacija je dovela do ojačavanja materijala i povećanja vrijednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Istovremeno je uočeno smanjenje duktilnih svojstava, odnosno smanjenje izduženja materijala. Lom se, kontrolisano, dogodio u ZUT. Ovo ukazuje da se radi o „overmatching“-u odnosno da su bolja mehanička svojstva čvrstoće u ZUT nego u osnovnom materijalu.

2.3. Određivanje žilavosti loma K_{Ic}

Pogodnost primjene parametara J i δ je u mogućnosti njihove analize i poslije razvoja značajnih plastičnih deformacija, sa jedne strane, i u pogodnosti njihovog eksperimentalnog određivanja, propisanog standardima ASTM E399 [6] i ASTM E1820 [7]. Kako zahtjevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije u skladu sa jednačinom:

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_T} \right)^2 \quad (1)$$



Slika 5. Epruvete za ispitivanje lomne žilavosti

Figure 5. Test samples for fracture toughness testing

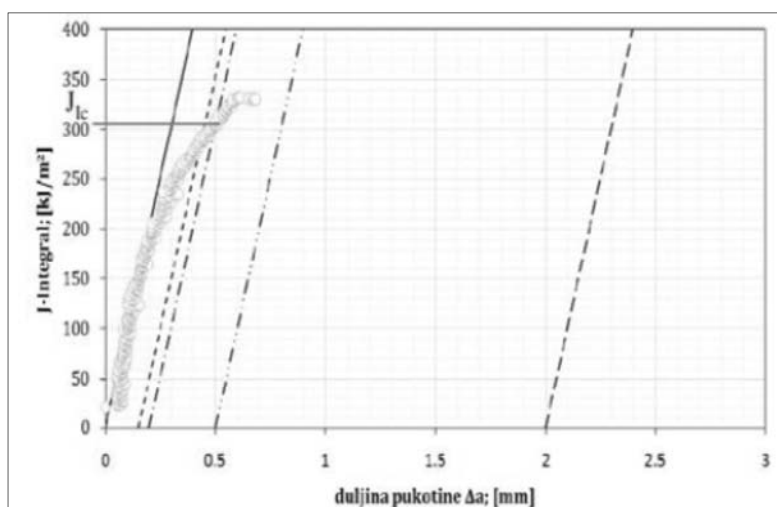
Ispitivanje je izvedeno na servo-hidrauličkom stroju INSTRON 1255 sa dinamično - statičnom mogućnošću opterećivanja do 250 kN. Epruvete su zamorene dinamičkom silom koja je s obzirom na mehanička svojstva i debljinu epruveta izračunata u skladu s standardom ASTM 1820-20, s omjerom

nisu zadovoljeni, umjesto primjene linearno-elastične mehanike loma, pristupilo se korišćenju elastoplastične mehanike loma. Cilj korišćenja elasto - plastične mehanike loma je da se vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odredi posredno preko kritičnog J integrala, J_{Ic} , odnosno da se prati razvoj prsline u uslovima izražene plastičnosti.

Poznavajući vrijednosti kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (2)$$

Iz svake ploče je izrađena kompaktna zatezna epruveta (ang. »Compact Tension-CT«), kako je prikazano na slici 5, istih nominalnih dimenzija širine W , visine H ali različite debljine B , s obzirom na debljinu ploče (tako da se mogla izraditi u skladu sa standardom za epruvetu sa paralelnim bočnim stranicama.



Slika 6. Određivanje parametra mehanike loma za CT epruvetu.

Figure 6. Determination of the fracture mechanics parameter for the CT sample

sila $R = F_{max}/F_{min} = 0,1$ nakon 2 mm prirasta na površini.

Za mjerenje otvaranja pukotine koristi se mjerač INSTRON-CMOD clip gauge. Ispitivanje je računarski upravljano programom INSTRON Wiewmaker i računarske jedinice INSTRON 8500+. U skladu s standardom ASTM standardima



ASTM E399 i ASTM E-1820 obrađeni su dobiveni rezultati i izrađene CTOD-R krivulje otpornosti materijala prema širenju pukotine. U skladu s standardom ASTM E-1820 korištena je metoda normalizacije za praćenje rasta pukotine. Na slici 6

prikazana je tipična krivulja za određivanje lomne žilavosti prema lomnom ponašanju za epruvetu serije I.

Kritične vrijednosti lomne žilavosti za svaku epruvetu su prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti lomne žilavosti epruveta iz serije I i II

Table 3. Values of fracture toughness of test samples from series I and II

Materijal		S235JR (M1)		P460NL1 (M2)	
Debljina, mm		6	15	6	15
Promjer, mm		φ 1500			
Serija I	Oznaka	M1-2.1	M1-2.2	M2-1.1	M2-2.2
	Δa , mm	0,412	0,408	0,491	0,485
	K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	172,4	169,5	229,9	218,9
Serija II	Oznaka	M1-1	M1-2	M2-1	M2-2
	Δa , mm	0,401	0,325	0,454	0,460
	K_{Ic} , MPa·m ^{1/2}	166,9	118,1	206,1	196,1

Procjenu sposobnosti za rad podnice, kod postojanja pukotine u materijalu moguće je uraditi na osnovu dijagrama procjene otkaza, FAD (engl. Failure Assessment Diagram) i sile za rast prsline, CFD (engl. Crack Driving Force). Kod procjene cjelovitosti pomoću FAD pristupa potrebno je za ispitivani materijal podnice odrediti vrijednosti kritičnog koeficijenta intenziteta naprezanja K_{Ic} . Da bi se dobio potpuniji uvid u postojanje veze između dobijenih rezultata ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja i kritičnog koeficijenta intenziteta naprezanja provedena je obrada podataka za dobijene

vrijednosti napona tečenja ReH , debljine i prečnika podnica primjenom softverskog paketa MATLAB 7.0 [8].

Na osnovu eksperimentalno određenih vrijednosti tvrdoće u zoni uticaja topline-ZUT-u na uzorcima iz podnica poslije zavarivanja, tabela 4 [2], izračunati su koeficijenti regresione jednačine, primijenjena je *stepwise* procedura sa ciljem utvrđivanja signifikantnosti uticajnih faktora i njihovih interakcija i dobiven je matematički model (izraz) sa 3 člana:

$$K_{Ic} = 76,6658 + 0,130034 \cdot T + 6,56163 \cdot t - 0,0864 \cdot D - 0,04823 \cdot T \cdot t + 0,0002356 \cdot T \cdot D + 0,00225 \cdot t \cdot D \quad (3)$$

Tabela 4. Poređenje eksperimentalnih i modelskih vrijednosti žilavosti loma [2]

Table 4. Comparison of experimental and model values of fracture toughness [2]

Tvrdoća	t	D	K_{Ic} exp	K_{Ic} mod	odstup.
HV	mm	mm	MPa·mm ^{1/2}	MPa·mm ^{1/2}	%
211.8	15	1500	45.4	45.274	-0.278
276.7	6	1500	60.1	60.354	0.42
306.8	15	3000	52.2	51.914	-0.55
223.1	10	2250	41.1	38.156	-7.16
156.4	6	1500	34.1	37.009	8.53
171.0	15	3000	33.7	36.517	8.36
250.2	15	1500	32.9	36.057	9.59
249.3	6	3000	30.6	32.763	7.07
202.3	10	2250	42.9	43.457	1.30



Na osnovu predstavljenih karakteristika modela, to jest njihovih odstupanja od eksperimentalnih rezultata koji su se koristili za njihovo izvođenje vidi se da je apsolutno odstupanje modela za sve tačke ispod 10%. Na osnovu ovoga može se zaključiti da

izvedeni model zadovoljavajuće predstavlja rezultate istraživanja uticaja tvrdoće HV , debljine t i prečnika D rundele na faktor intenziteta napona, K_{Ic} . U tabeli 5. date su statističke karakteristike datog modela (3).

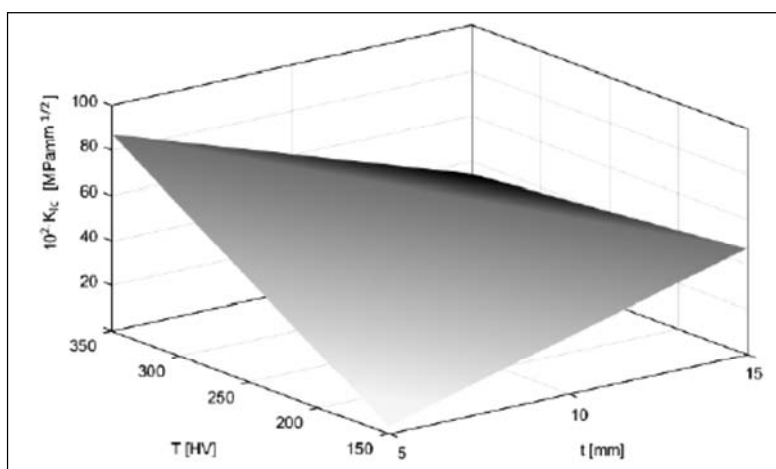
Tabela 5. Statističke karakteristike faktora intenziteta napona, K_{Ic}

Table 5. Statistical characteristics of the fracture toughness intensity factor, K_{Ic}

R^2	S_{ey}	$SS_{reg.}$	$SS_{rez.}$	F_M	$F_{1Tab.}$	Signif.
0,852	10,81	6 734,37	116,863	19,81	19,33	DA

Adekvatnost modela (2.3) izvršena je prema kriteriju Fishera, gdje je za stepene slobode $df_{reg} = 6$, $df_{rez.} = 2$ i prag značajnosti $\alpha = 0,05$ tablična, odnosno kritična vrijednost $F_{(6,2,0.05)} = 19,33$ [9]. Kako je računaska vrijednost $F_{1M}=19,81 > F_{1Tab.}=19,33$, matematski model za faktor intenziteta napona, K_{Ic} je adekvatan. Dakle, postavljeni matematski model kojim se uspostavlja veza između glavnih konstrukcionih elemenata podnice D , t i tvrdoće HV , zadovoljava kako u pogledu adekvatnosti modela, tako i u pogledu njene tačnosti.

Naknadnom analizom je tražena funkcionalna zavisnost rezultata faktora intenziteta napona, K_{Ic} sa osnovnim konstrukcionim parametrima (HV , D i t). Budući da se površine regresije (opisane izrazom 3) ne mogu predstaviti u trodimenzionalnom prostoru, regresione varijable su zamjenjene njihovim prosječnim vrijednostima. Prikazi 3D modela za različite vrijednosti promjenljivih varijabli u posmatranom intervalu dati su na slici 6., za srednja stanja treće komponente.



Slika 6. Prikaz funkcionalne zavisnosti faktora intenziteta napona od vrijednosti tvrdoće i t

Figure 6. Presentation of the functional dependence of the stress intensity factor of the hardness value and t

3. Zaključak

U radu su analizirani različiti uticajni parametri (materijali, debljine i promjer podnica) na mehanička svojstva, R_{eH} i R_m , i žilavost loma K_{Ic} . Za ove uticajne parametre se iskustveno pretpostavlja da su ključni tehnološki parametri za izradu sfernih podnica posuda pod pritiskom zavarivanjem iz više segmenata. Uticaj zavarenog spoja posmatran je bez geometrijske nepravilnosti odnosno sa pretpostavkom da nema neprihvatljivih nedostataka.

3. Conclusion

In the paper, various influential parameters (materials, thicknesses and diameter of head shells) on mechanical properties, R_{eH} and R_m , and fracture toughness K_{Ic} were analyzed. For these influential parameters, it is empirically assumed that they are the key technological parameters for the production of spherical pressure vessel head shells by welding from several segments. The effect of the welded joint was observed without geometric irregularity, with the assumption that there are no unacceptable defects.



Rezultati ispitivanja zatezanjem su u granicama standardom propisanih vrijednosti za analizirane materijale. Vrijednosti mehaničkih svojstava na uzorcima iz serije II (uzorci iz podnica nakon plastične deformacije) su iznad vrijednosti u osnovnom materijalu. Plastična deformacija je dovela do ojačavanja materijala i povećanja vrijednosti napona tečenja i zatezne čvrstoće. Istovremeno je uočeno smanjenje duktilnih svojstava, odnosno smanjenje izduženja materijala. Lom se, kontrolisano, dogodio u ZUT-u. Ovo ukazuje da su bolja mehanička svojstva čvrstoće u ZUT-u nego u osnovnom materijalu.

Ispitivanjem žilavosti loma, K_{Ic} , može se zaključiti da je lomna žilavost u ZUT-u serije II snižena u odnosu na seriju I. Efekat ojačavanja uslijed plastične deformacije je uzrok sniženju lomne žilavosti.

Podnice izrađene postupkom inkrementalne deformacije zavarenih polaznih komada kao integralnog dijela zatvorenih posuda pod pritiskom su zadovoljile zahtjeve standarda kojima se definišu posude pod pritiskom i kojima se garantuje sigurnost ovih odgovornih konstrukcija.

Statističkom obradom eksperimentalnih rezultata moguće je dobiti funkcionalna zavisnost rezultata faktora intenziteta napona, K_{Ic} , kao bitnog parametra u procjeni integriteta podnica izrađenih postupkom inkrementalne deformacije i zavarivanjem sa osnovnim konstrukcionim parametrima podnica (HV, D i t),

Za daljnju eksploataciju ispitanih podnica mjerodavni su rezultati ispitivanja u ZUT, s obzirom da su izmjerene vrijednosti u ZUT ispod vrijednosti izmjerenih u osnovnom materijalu polaznih uzoraka.

Literatura / References

[1] prEN 13445-3:2002, (2002): "Unfired Pressure Vessels", European Committee for Standardization, Brussels

[2] Ištvančić Z. (2022): "Prilog utvrđivanju integriteta cilindričnih danaca izrađenih postupkom inkrementalne deformacije", doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, Zenica

[3] BAS EN ISO 6507-1:2018 (2018): Metallic materials, Vickers hardness test, Part 1: Test method

[4] BAS EN ISO 6892-1:2017 B (2017): Metallic materials Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature

The results of the tensile test are within the limits of the values prescribed by the standard for the analyzed materials. The values of mechanical properties on samples from series II (samples from head shells after plastic deformation) are above the values in the base material. The plastic deformation led to the strengthening of the material and an increase in the value of yield stress and tensile strength. At the same time, a decrease in ductile properties, as a decrease in the elongation of the material, was observed. The fracture took place in a controlled manner in HAZ. This indicates that the mechanical strength properties are better in HAZ than in the base material.

By examining the fracture toughness, K_{Ic} , it can be concluded that the fracture toughness in HAZ of series II is reduced compared to series I. The effect of strengthening due to plastic deformation is the cause of the reduction in fracture toughness.

Head shells made by the process of incremental deformation of welded starting pieces as an integral part of closed pressure vessels have met the requirements of the standards defining pressure vessels and guaranteeing the safety of these responsible constructions.

By the statistical processing of the experimental results, it is possible to obtain the functional dependence of the results of the stress intensity factor, K_{Ic} , as an important parameter in assessing the integrity of head shells made by the process of incremental deformation and welding with the basic design parameters of head shells (HV, D and t).

For the further exploitation of the tested head shells, the test results in the HAZ are relevant, given that the values measured in the HAZ are below the values measured in the base material of the starting samples.

[5] BAS EN ISO 4136 (2014): Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test

[6] ASTM E 399-95 (1995): Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Philadelphia, USA

[7] ASTM E 1820-99a (1999): Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

[8] Lazić D., V., Ristanović M., R. (2005): "Uvod u Matlab", Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

[9] Ekinović, S. (2008): "Metode statističke analize u Microsoft EXCEL-u", Mašinski fakultet u Zenici, Univerzitet u Zenici, Zenica, 233