



Neke specifičnosti ispitivanja čeličnih bešavnih boca za ukapljene plinove

Some specifics of testing of seamless steel pressure vessels for liquefied gases

P. Todorić^{1,*}, B. Grizelj, S. Aleksandrović³, V. Marušić²

¹Zvijezda d.d., Zagreb, Hrvatska

²Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, Hrvatska

³Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija

*Autor za korespondenciju. e-mail: petar.todoric@zvezda.hr

Sažetak

Čelične bešavne boce za ukapljene plinove, nakon oblikovanja iz cijevi, toplinski se obrađuju kaljenjem i potom popuštanjem. Obavljena su ispitivanja mehaničkih svojstava na uzorcima izrađenim iz tijela i iz grla boce. Pri vlačnom pokusu snimljene su krivulje plastičnog tečenja materijala. Izračunat je intenzitet deformacijskog očvršćenja, a iz omjera ukupne istezljivosti i istezljivosti pri maksimalnom opterećenju procjenjena je sklonost krhkom lomu. Na temelju tih rezultata konstatirano je da su kod grla boce karakteristike čvrstoće gotovo nepromjenjene u odnosu na tijelo boce, uz povećanje minimalne deformacije pri razaranju s 12,8% na 15,1%. Zaključeno je da rezultati snimanja krivulja naprezanja plastičnog tečenja mogu poslužiti kao prethodni pokazatelj anomalija koje bi mogle doprinijeti nezadovoljavajućim rezultatima na testu rasprskavanja.

Abstract

Seamless steel pressure vessels for liquefied gases, are thermal treated by quenching and tempering after the formation of tubes. Tests of the mechanical properties have been conducted on specimens made from bodies and from the vessel neck. In tensile tests, curves of plastic flow of material were recorded. Intensity of hardening deformation is calculated. From the ratio of total elongation and elongation at maximum load is estimated affinity to the brittle fracture. Based on these results it was concluded that the vessel neck characteristics of strength are almost unchanged compared to the body of the vessel, increasing the minimum deformation of the devastation from 12.8% to 15.1%. It was concluded that results of the stress curve flow recording can serve as a preliminary indicator of anomalies that could contribute to unsatisfactory results of the burst test.

Ključne riječi: bešavne boce, kidanje, deformacijska čvrstoća

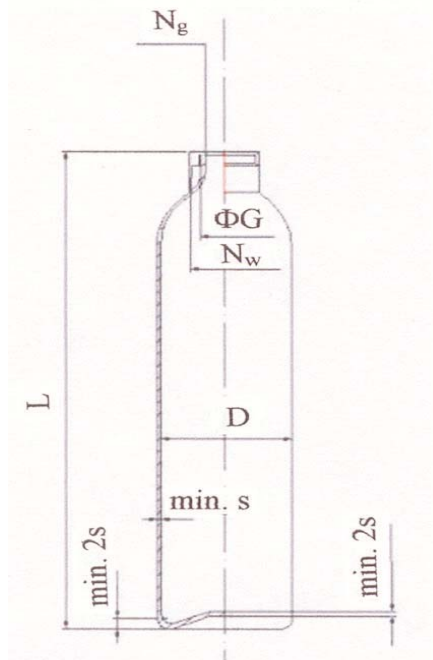


1. Uvod

Tijekom oblikovanja boce iz čelične bešavne cijevi, dno i grlo se plastično deformiraju na povišenoj temperaturi. Zbog specifičnosti primjene, prije svega radnog tlaka 200 bara (boce za kisik, dušik, argon, mješavine argona i ugljičnog dioksida, vodik), čelične bešavne boce trebaju zadovoljiti propisane zahtjeve u pogledu mehaničkih svojstava [1]. Budući da se boce odmah nakon oblikovanja toplinski obrađuju kaljenjem i potom popuštanjem, ispitivanjem mehaničkih svojstava na uzorcima izrađenim iz boce potrebno je provjeriti da li su ispunjeni normom propisani zahtjevi. Cilj ispitivanja uzoraka vlačnim pokusom je snimiti krivulje plastičnog tečenja materijala, čvrstoću i istezljivost, a međusobnom usporedbom izračunatih vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja potrebno je ocijeniti intenzitet deformacijskog očvršćenja, a iz omjera ukupne istezljivosti i istezljivosti pri maksimalnom opterećenju procijeniti sklonost krhkom lomu.

2. Neke specifičnosti postupka izrade i kontrole boca

U radu će biti analizirane specifičnosti boca \varnothing 229 mm. Oblik dna boce ovisi o zahtjevu i želji kupca. Na slici 1 prikazan je proizvođački crtež čelične bešavne boce [2], [3] i zahtjevi za materijal (cijevi) te glavni i tehnički podaci o boci.



a)

- deklarirani materijal boce 34CrMo4 :
C= 0,30÷0,37; Si=0,15÷0,35;
Mn=0,5÷0,8; P i S max. 0,02;
Cr=0,9÷1,2 i $M_O=0,15\div0,3$ [3]

- propisana minimalna svojstva gotove boce $R_e=840$ MPa; $R_m=990$ MPa;
 $A_5=14$ %; $K=25$ J/cm²

(ISO V),

- glavni tehnički podaci boce: volumen 50 l; radni tlak 200 bar; ispitni tlak 300 bar; minimalna debljina stijenke 5,4 mm; duljina 1510 mm (+15/-10); masa prazne boce 56,5 kg (+5,85/-4,52).

b)

Slika 1. Karakteristike čelične bešavne boce

a) dimenzije boce Ø 229 mm; b) materijal cijevi i tehnički podaci o boci

Na slici 2 prikazana je pojednostavljena shema tehnološkog procesa izrade čeličnih bešavnih boca [4].



Bešavna cijev Zatvaranje dna Oblikovanje dna Pregled Oblikovanje grla Toplinska obrada Rezanje navoja



Pregled Pjeskarenje Pregled Tlačna proba Označavanje Zaštita i bojenje

Slika 2. Shema tehnološkog procesa izrade čeličnih bešavnih boca [4]



Tehnološki proces izrade boca iz cijevi na CNC strojevima sastoji se od faza u kojima je, nakon kontrole ulazne cijevi, potrebno obaviti: zatvaranje i oblikovanje dna i njegov kontrolni pregled, oblikovanje grla, toplinsku obradu boce, urezivanje navoja u grlo boce i kontrolu, čišćenje pjeskarenjem i ponovnu kontrolu; ispitivanje pod tlakom te označivanje boce i zaštitu bojom. Nakon toga boca je spremna za isporuku.

2.1. Zatvaranje dna i oblikovanje grla boce

Zagrijavanje se vrši tako da se jedan kraj cijevi stavi u plinsku komornu peć. Potrebna duljina zagrijavanja cijevi uzima se iskustveno i iznosi cca 150 mm pri zatvaranju dna cijevi, a cca 190 mm pri oblikovanju grla boce. Cijev se drži na temperaturi između 1223 °C i 1273 °C u trajanju 3 minute. Zagrijana se cijev iz peći transportira do Spinning stroja, a oblikovanje se vrši prema unaprijed zadanom programu. Nakon završetka postupka boca se skida iz stezne glave, a potom se obavlja vizualna kontrola.

2.2. Toplinska obrada boce – kaljenje i popuštanje

Oblikovana boca se uvodi u protočnu peć za kaljenje. Nakon držanja na temperaturi $\mathcal{G}_a \approx 870^\circ\text{C}/5'$, boca se kali u emulziji, a potom odmah premješta u protočnu elektrokomornu peć za popuštanje. Postupak od ulaska boce do izlaska iz peći za popuštanje traje ≈ 55 minuta.

2.3. Test rasprskavanja

Test rasprskavanja provodi se nakon toplinske obrade, obavezno na svakih 200 izrađenih boca ispituje se jedna. Postupak se obavlja (u prisustvu inspektora) na način da se boca napuni vodom i tlači na tlak koji mora biti 50% veći od radnog. Boce za visokoukapljene plinove (kisik, dušik, argon, mješavine argona i ugljičnog dioksida, vodika) moraju izdržati ispitni tlak od 300 bar s obzirom na to da je za te boce predviđeni radni tlak 200 bar. Boca se tlači sve do rasprskavanja. Tijelo boce se mora rasprsnuti u formi „riblje kosti“ pri čemu ne smije doći do otkidanja dijela materijala u formi „gelera“. Karakteristični izgled boce nakon testa rasprskavanja prikazan je na slici 3.

Ukoliko se dogodi da ispitna boca ne zadovolji, iz iste serije se u prisustvu inspektora slučajnim izborom odabiru još dvije boce na kojima se provodi isti test rasprskavanja. Ukoliko i samo jedna od ove dvije boce ne zadovolji, obavezno je provesti ponovnu toplinsku obradu

na cijeloj seriji, prethodno odžariti, a potom zakaliti i popustiti.



Slika 3. Karakteristični izgled boce nakon testa rasprskavanja



a)



b)

Slika 4. Boce iz kojih su izrađeni ispitni uzorci
a) sirova; b) nakon toplinske obrade

3. Eksperimentalni dio

Sa stajališta oblikovljivosti, ali i utjecaja postupka izrade neminovan je utjecaj postupka izrade na svojstva materijala. Kod boca ta se ovisnost može odraziti na pojavu razlike svojstava između tijela odnosno grla boce. Naime, grlo i dno boce se oblikuju deformiranjem na toplo iz cijevi standardnog promjera dok tijelo boce ostaje nedeformirano.

Planom eksperimenata predviđeno je da budu izrađeni ispitni uzorci za kidanje, i to:

- 1) - iz „sirove“ boce prije toplinske obrade;
- 2) - iz tijela gotove boce, nakon toplinske obrade;
- 3) - iz grla gotove boce nakon toplinske obrade.

Za potrebe ispitivanja odabrane su jedna sirova boca-prije toplinske obrade i jedna gotova boca, slika 4.

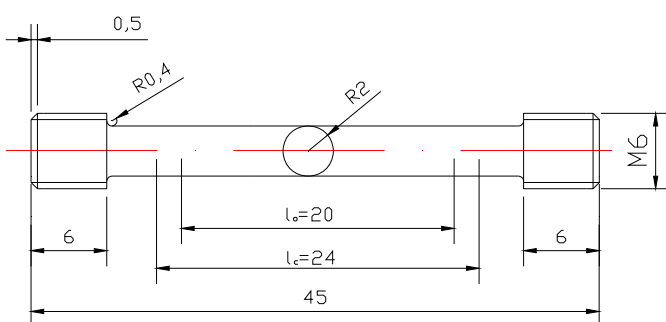
3.1. Ispitni uzorci za vlačni pokus

Na uzorcima izrezanim iz tijela boce, sirove i toplinski obrađene, obavljena je dimenzionalna kontrola debljine stijenke. Mjerenje je obavljeno umjerenim pomičnim mjerilom na 15 mjesta razmaknutih po ≈ 15 mm, tablica 1.

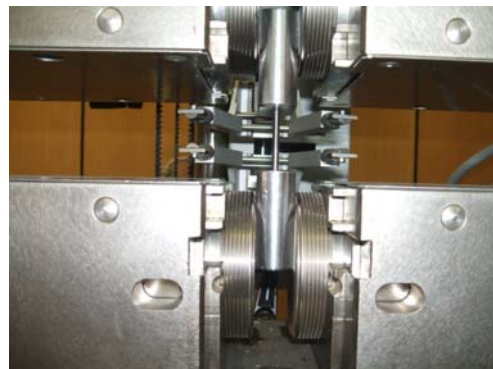
Tablica 1. Rezultati dimenzionalne kontrole debljine uzoraka stijenki boca

Boca	Redni broj mjerenja														
	Debljina stijenke s, mm														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
sirova	6,9	6,8	6,6	6,6	6,8	6,9	6,8	6,8	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8	6,6	6,7
gotova	6,7	6,6	6,9	6,7	6,7	6,8	6,8	6,7	6,6	6,7	6,9	6,6	6,7	6,8	6,7

Karakteristično je uočiti da se izmjerene vrijednosti, kako na uzorcima iz sirove boce tako i na uzorcima iz gotove boce, kreću između 6,6 i 6,9 mm. Na slici 5.a date su dimenzije ispitnih uzoraka, prema zahtjevima norme DIN 50125 [5], u skladu s nazivnom debljinom stijenke cijevi (boce).



a)



b)

Slika 5. Ispitni uzorci i adapteri stegnuti u čeljusti kidalice

a) dimenzije ispitnih uzoraka za kidanje statičkim vlačnim pokusom; b) uzorak u adapterima

3.2. Rezultati ispitivanja kidanjem

Pokus kidanjem uz snimanje svih željenih karakteristika obavljen je na kidalici koja je opremljena dodatnom elektronikom. S obzirom na dimenzije ispitnih uzoraka za potrebe njihovog prihvata i stezanja u čeljusti kidalice izrađeni su odgovarajući adapteri.

Na slici 5.b prikazan je uzorak nakon prihvata u čeljusti kidalice i sa spojenim ticalima ekstenziometra. Ticala su pomoću odgovarajućih kompenzacionih vodova spojena s računalom, a aktiviranjem odgovarajućeg programa na ekranu se ispisuju rezultati ispitivanja: sile, relativna promjena duljine, te se crta krivulja naprezanja plastičnog tečenja. Snimljene su vrijednosti sile na granici tečenja i maksimalne sile te su iz njih izračunate konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ i vlačna čvrstoća R_m kao i modul elastičnosti E , a na temelju produljenja izračunata je istezljivost A . Rezultati su prikazani u tablici 2.

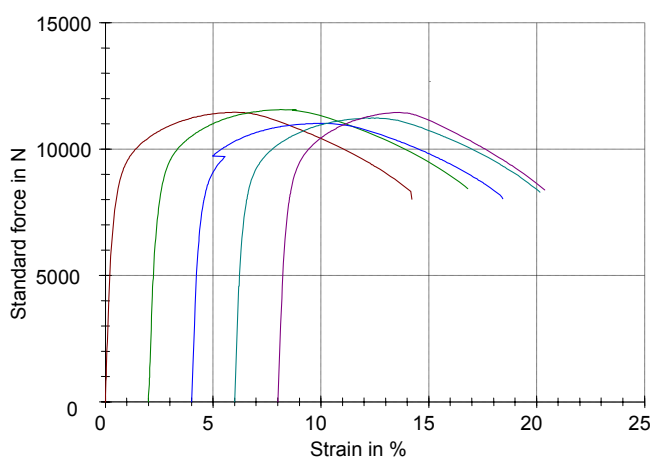
Tablica 2. Rezultati kidanja uzoraka izrađenih iz boca

Vrsta boce	Uzorak broj	L_0	S_0	E	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A
		mm	mm ²	GPa	MPa	MPa	%	%
Tijelo sirove boce	1	20,00	12,57	200,4	640,99	911,24	5,55	13,91
	2	20,00	12,57	151,7	685,51	919,52	5,50	14,37
	3	20,00	12,57	176,3	626,09	875,69	5,21	14,08
	4	20,00	12,57	177,6	630,32	892,59	5,89	13,78
	5	20,00	12,57	174,2	650,55	910,21	4,91	12,00
Tijelo poboljšane boce	1	20,00	12,57	200,7	956,80	1049,39	5,67	16,73
	2	20,00	12,57	195,6	940,97	1028,35	5,03	15,03
	3	20,00	12,57	204,3	972,71	1065,05	5,65	16,48
	4	20,00	12,57	200,1	949,00	1037,21	4,83	12,77
	5	20,00	12,57	203,0	962,82	1048,89	4,78	14,44
Grlo	1	20,00	12,57	200,9	943,51	1029,34	4,83	15,14

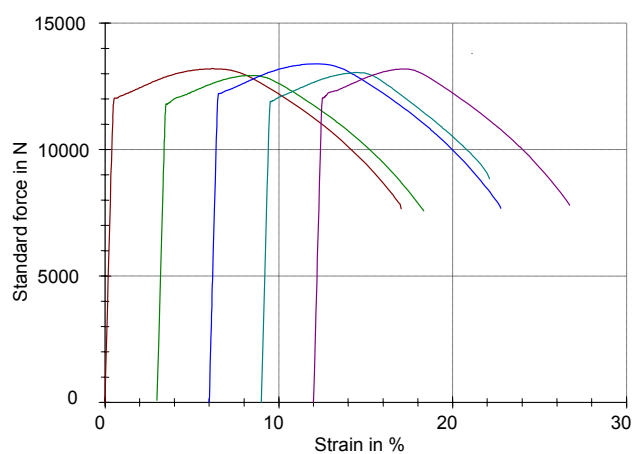


poboljšane boce	2	20,00	12,57	195,5	942,67	1034,90	6,01	16,74
	3	20,00	12,57	204,6	961,07	1052,77	5,38	15,43

Dijagramom na slici 6.a prikazane su originalne krivulje kidanje 5 ispitanih uzoraka izrađenih iz sirove boce, a na slici 6.b dijagrami kidanja 5 uzoraka izrađenih iz tijela boce u poboljšanom stanju.



a)

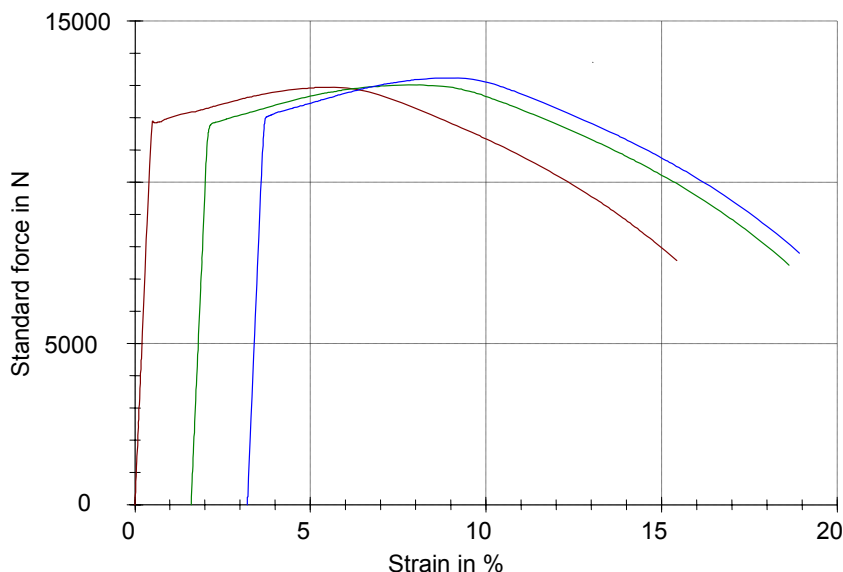


b)

Slika 6. Originalni dijagrami kidanje ispitnih uzoraka

a) tijela sirove boce; b) tijela boce nakon poboljšavanja

Rezultati kidanja uzoraka izrađenih iz poboljšanog grla boce prikazani su dijagramima na slici 7.



Slika 7. Originalni dijagrami kidanje ispitnih uzoraka izrađenih iz grla poboljšane boce

4. Analiza rezultata

Ispitivanjem je utvrđeno da u dostavnom stanju (sirova boca) ispitivani čelik (34CrMo4) ima granicu tečenja oko 650 MPa (srednja vrijednost) i vlačnu čvrstoću oko 900 MPa. Modul elastičnosti je oko $1,75 \cdot 10^5$ MPa. Relativno produljenje pri kidanju je između 12% i 14,4%. Produljenje pri maksimalnoj sili je između 4,9% i 5,5%. Plastičnost je relativno malo izražena, uz prisutnu sklonost lokalnom deformiranju. Pri deformaciji manjoj od polovine ukupno ostvarenog produljenja pri kidanju počinje proces lokalnog deformiranja koji, prema tome, traje duže nego što je prva faza deformiranja do ostvarivanja maksimuma sile kidanja, dijagrami prikazani na slici 6.a.

Za uzorke tijela boce u poboljšanom stanju granica tečenja je znatno većeg intenziteta u odnosu na sirovo stanje i dostiže vrijednost oko 950 MPa. Porast u odnosu na stanje prije poboljšavanja pokazuje i vlačna čvrstoća, koja doseže vrijednost 1050 MPa. U skladu s ovom promjenom je i efekt očvršćenja koji je manje izražen i ima gotovo linearni karakter. Plastičnost nije opala, čak je postotna deformacija pri razaranju nešto veća (od 12,8% do 16,7%). Deformacija pri maksimalnoj sili ostala je na istom nivou (od 4,8% do 5,7%), uz sličnu sklonost lokalnom deformiranju koje prevladava u području plastičnog deformiranja, dijagrami na slici 6.b.

Za uzorke grla poboljšane boce može se konstatirati da su karakteristike čvrstoće gotovo nepromjenjene u odnosu na uzorke poboljšanog tijela boce. Iznos minimalne deformacije pri razaranju povećao se od 12,8% na 15,1%. I dalje dominira lokalno deformiranje, a prema dijagramu prikazanom na slici 7 očvršćenje i u ovom slučaju ima skoro linearni karakter.



Iz dostupnih literaturnih podataka [6] općeniti izraz za aproksimaciju krivulje naprežanja plastičnog tečenja (prema Reihle-u) konačni izraz glasi:

$$k_f = \frac{k_m}{\varphi_m^{\varphi_m}} \varphi_m^{\varphi_m}, \text{ MPa}$$

(4.1)

Pri tome se prirodna deformacija pri maksimalnoj sili izračunava po formuli:

$$\varphi_m = \ln \frac{l_m}{l_0}, \text{ odnosno } \varphi_m = \ln \left(\frac{A_g}{100} + 1 \right)$$

(4.2)

Deformacijska čvrstoća (ekvivalentno naprežanje) pri maksimalnoj sili računa se prema izrazu:

$$k_m = R_m \cdot e^{\varphi_m}, \text{ MPa}$$

(4.3)

Na primjeru rezultata snimljenih kidanjem uzorka izrađenog iz tijela sirove boce (prva krivulja u dijagramu prikazanom na slici 6.a, odnosno rezultata u prvom redu tablice 2), prikazan je princip izračunavanja k_f i φ_m :

- Postotno produljenje pri maksimalnoj sili: $A_g=5,55\%$ i $R_m=911,24$ MPa.
- Uvrštavanjem tih vrijednosti u formulu (4.2) dobije se vrijednost prirodne deformacije pri maksimalnoj sili $\varphi_m=0,054$.
- Uvrštavanjem u formulu 4.1 dobije se konačni izraz za deformacijsku čvrstoću (ekvivalentno naprežanje) pri maksimalnoj sili: $k_f=1126 \cdot \varphi^{0,054}$, MPa, gdje je φ logaritamska deformacija.

Istim principom izračunate su vrijednosti prirodne deformacije i deformacijske čvrstoće za sve ostale ispitne uzorke, tijelo sirove boce, poboljšano tijelo boce i poboljšano grlo boce, a rezultati su prikazani u tablici 3.



Tablica 3. Vrijednosti prirodne deformacije i deformacijske čvrstoće svih ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci	Redni br.uzorka	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Relativno produljenje pri maks. sili A_g , %	Prirodna deformacija pri maks. sili φ_m	Deformacijska čvrstoća k_m , MPa	Izraz za deformacijsku čvrstoću k_f , MPa
Tijelo sirove boce	1	911,24	5,55	0,054	961,80	$k_f=1126\varphi^{0,054}$
	2	919,52	5,50	0,05354	970,10	$k_f=1134,6\varphi^{0,05354}$
	3	875,69	5,21	0,05079	921,31	$k_f=1071,86\varphi^{0,0508}$
	4	892,59	5,89	0,05723	945,16	$k_f=1113,29\varphi^{0,05723}$
	5	910,21	4,91	0,0479	954,90	$k_f=110457\varphi^{0,0479}$
Poboljšano tijelo boce	1	1049,39	5,67	0,0551	1108,89	$k_f=1145,9\varphi^{0,0551}$
	2	1028,35	5,03	0,04907	1080,07	$k_f=1192,3\varphi^{0,04907}$
	3	1065,05	5,65	0,05496	1125,23	$k_f=1319,76\varphi^{0,0549}$
	4	1037,21	4,83	0,0472	1087,30	$k_f=1255,83\varphi^{0,0472}$
	5	1048,89	4,78	0,0467	1099,03	$k_f=1268,09\varphi^{0,0467}$
Poboljšano grlo boce	1	1029,34	4,83	0,04717	1079,06	$k_f=1246,3\varphi^{0,0472}$
	2	1034,90	6,01	0,0584	1097,09	$k_f=1299,1\varphi^{0,0584}$
	3	1052,77	5,38	0,0524	1109,40	$k_f=1294,81\varphi^{0,0524}$

5. Zaključak

U radu je ukazano na specifičnosti pojedinih operacija s težištem na onima koje mogu direktno utjecati na rezultate kontrole svojstava boce prije isporuke.

Iz rezultata dimenzionalne kontrole uočava se da je debljina stjenke na svim uzorcima veća od minimalno zahtijevane vrijednosti 5,4 mm dobivene proračunom.

Ispitivanja kidanjem statičkim vlačnim pokusom na uzorcima izrađenim iz boce prije toplinske obrade (sirovi uzorci) uočava se da je sklonost plastičnom deformiranju relativno malo izražena, uz izraženu sklonost lokalnom deformiranju. Kod uzoraka poboljšanog tijela boce granica tečenja je za 46,1% viša nego kod boca prije toplinske obrade i dostiže vrijednost oko 950 MPa. Vlačna čvrstoća doseže vrijednost oko 1050 MPa, što je porast



za oko 17% u odnosu na stanje prije poboljšavanja. U skladu s ovom promjenom je i efekt deformacijskog očvršćenja koji je manje izražen i ima gotovo linearni karakter.

Kod grla boce karakteristike čvrstoće su gotovo nepromjenjene u odnosu na uzorke poboljšanog tijela boce. Zapaža se da je iznos minimalne deformacije pri razaranju porastao od 12,8% na 15,1%. Očvršćenje i u ovom slučaju ima skoro linearni oblik. Zaključno se može konstatirati da kod uzoraka izrađenih iz gotove boce nakon toplinske obrade poboljšavanjem nije prisutna sklonost krhkom lomu. Pri tome rezultati snimanja krivulja naprezanja plastičnog tečenja mogu poslužiti kao prethodni pokazatelj anomalija koje bi mogle doprinijeti nezadovoljavajućim rezultatima na testu rasprskavanja.

6. Literatura

- [1] Pravilnici o pregledima i ispitivanjima opreme pod tlakom NN 138/ 08, prema: HRN EN ISO 11623, HRN EN 1968 i HRN EN 1802.
- [2] http://www.csc-sb.hr/proizvodni_program.pdf, 03.08.2010
- [3] BS EN 10083-3:2006 Steels for quenching and tempering. Technical delivery conditions for alloy steels
- [4] Certificates ISO 9001 and ISO 11439. Design, finishing and testing ...www.csc-sb.hr/quality_control.html, 02.05.2011
- [5] DIN 50125:2009: Testing of metallic materials - Tensile test pieces Description: Deutsches Institut Fur Normung E.V.
- [6] Grizelj, B.: Obrada metala deformiranjem, Sveučilište J. J. Strossmayera, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 2002.