

ŽILAVOST I DUKTILNOST ZAVARENIH SPOJEVA ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE TOUGHNESS AND DUCTILITY OF HIGH STRENGTH STEELS WELDED JOINTS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 620.178.7

Rad primljen / Paper received: 10.4.2007.

Adresa autora / Author's address:

¹Institut za ispitivanje materijala, Beograd, Srbija

vencislav_grabulov@institutims.co.yu

²Vojnotehnički institut, Beograd, Srbija

³Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu

Ključne reči

- čelik visoke čvrstoće
- zavareni spoj
- udarna žilavost
- ispitivanje padajućim tegom
- prelazna temperatura krtosti
- eksplozivna proba

Izvod

Tri metode ispitivanja različitim brzinama opterećenja epruveta sa zarezom (udarno klatno, padajući teg, izbočavanje eksplozijom) su primenjene za ocenu žilavosti i duktilnosti ručno elektrolyčno zavarivanih spojeva. Osnovne osobine zavarenih spojeva i prelazna temperatura su takođe određene kao deo ispitivanja zavarljivosti.

Prikazani su rezultati primene date tri metode na čelike NIONIKRAL 70 i SUMITEN 80P, iste klase čvrstoće. Pokazalo se da primenjene metode ispitivanja ne isključuju jedna drugu, jer daju komplementarne rezultate za ponašanje pri lomu zavarenih spojeva.

UVOD

Prednost primene nisko legiranih čelika visoke čvrstoće (HSLA) u konstrukcijama, posebno za posude pod pritiskom, je u smanjenoj težini proizvoda i ekonomičnijoj proizvodnji. Parametri dobijeni ispitivanjem zatezanjem, pre svega napon tečenja i svojstva plastičnost, su osnova za projektovanje konstrukcija, da bi se osigurala njena čvrstoća pri dejstvu opterećenja. Iz ispitivanja tvrdoće se dobijaju dragoceni uporedni podaci. Pogodnost oblikovanja je takođe bitna osobina materijala, a za konstrukcije od HSLA čelika, zavarljivost ima poseban značaj. Kako su zahtevi za sigurnu eksploataciju sve strožiji, propisano je ispitivanje parametara duktilnosti i žilavosti, kao i otpornosti prema lomu. Svi navedeni parametri se ispituju za zavareni spoj kao celinu i za svaki od tri konstituenta zavarenog spoja, osnovni metal (PM), metal šava (WM) i zonu uticaja toplote (HAZ), jer su zahtevi eksploatacijske sigurnosti i integriteta zavarenih konstrukcija, proizvedenih od HSLA čelika posebno važni zbog posledica eventualnog otkaza.

Duktilnost i žilavost se smanjuju sa povećanjem čvrstoće pa se prednosti HSLA čelika mogu iskoristiti samo optimalnom kombinacijom osobina. Parametri žilavosti i duktilnosti se koriste samo za poređenje, jer iako značajni za sigurnost konstrukcije, nisu prikladni za proračun kao parametri čvrstoće.

Keywords

- high strength steel
- welded joint
- impact toughness
- drop weight test
- nil-ductility transition temperature
- explosion bulge test

Abstract

Three testing methods of different loading rates had been applied using notched specimens (impact pendulum, drop weight, explosion bulging) for toughness and ductility assessment of metal manual arc welded joints. Basic properties of welded joints and transition temperatures were assessed too, as a part of weldability testing.

Results are presented of the three given methods applied to steels NIONIKRAL 70 and SUMITEN 80P, of the same strength class. It is found that the applied test methods do not exclude each other, producing complementary results for fracture behaviour of welded joints.

INTRODUCTION

Benefits of applying high strength low alloyed (HSLA) steels in structures, especially for pressure vessels, are the reduced dead weight and increased economical production. Parameters obtained by tensile tests, above all yield stress and plastic properties, are the basis for the design of structures in order to achieve strengths under applied load. Valuable comparative data are obtained from hardness tests. The capability of forming is another substantial material property, and for HSLA steels the weldability is of particular significance. Since requirements for safe service are more and more strict, the testing of ductility and toughness parameters is specified, including fracture resistance tests. All cited parameters are tested for the entire welded joint as well as for three joint constituents, parent metal (PM), weld metal (WM) and the heat-affected-zone (HAZ), since the requirement for service safety of welded structures, produced of HSLA steel has an utmost importance because of the consequences of eventual failure.

Ductility and toughness are reduced with increased strength, and benefits of HSLA steels can be used only by optimal combination of properties. Toughness and ductility parameters are used only for comparison, since although important for structural safety, they are not convenient for calculation as strength parameters.

ODREĐIVANJE DUKTILNOSTI I ŽILAVOSTI

Postupci za ocenu žilavosti i duktilnosti zavarenog spoja mogu biti složeni zbog heterogenosti mikrostrukture i mehaničkih osobina WM i HAZ.

Pre svega je potrebno objasniti vezu između žilavosti i duktilnosti. Žilavost je energetski parametar ponašanja opterećenog materijala sa prslinom i predstavlja količinu utrošene energije. Duktilnost je pogodnost materijala za oblikovanje i meri se veličinom izduženja, odnosno, odgovarajućom deformacijom. Od stanja napona i deformacija, koje se pod dejstvom opterećenja u epruveti ili konstrukcijskom elementu uspostavi, bitno zavisi veličina parametara žilavosti i duktilnosti. Dva su granična stanja. U stanju ravnog napona deformacija, odnosno izduženje, je slobodno u tri prostorna pravca. U stanju ravne deformacije deluju naponi u tri pravca, čime je deformacija ometena i do izduženja može doći samo u dva pravca ravni prsline. Između ova dva stanja se uspostavljaju prelazna (mešovita) stanja u kojima je deformacija moguća u manjoj ili većoj meri, što se iskazuje količinom energije koja se troši na razvoj deformacije i loma. Kada je deformacija potpuno ometena nema utroška energije za lom i kada se postigne dovoljno opterećenje, lom se razvije iz postojeće prsline bez daljeg povećanja energije – krti lom, koji sledi posle samo elastičnih deformacija. Kada, pri troosnoj deformaciji, treba povećavati utrošak energije da bi se deformacija razvijala dolazi do ponašanja materijala koje se naziva duktilnim (što označava rastegljivost materijala), ili plastičnim (jer se sa plastičnom deformacijom menja geometrijski oblik), ili žilavim (jer je potreban značajan utrošak energije). Isti nazivi se koriste za lom koji se u tim uslovima razvija iz postojeće prsline, praćen i razvojem plastične deformacije.

Veliki je broj faktora koji utiču na pojavu ravnog stanja napona i ravne deformacije. Velike dimenzije, pre svega velika debljina komponente ili epruvete dopuštaju pretežno ravnog stanja, pa se može očekivati krti lom iz postojeće prsline ili njoj slične greške, kada se uspostavi kritična veličina opterećenja, odnosno napona. Drugi faktor je koncentracija napona. U teoriji elastičnosti je matematički izvedena zavisnost napona od geometrijskog oblika i pri nagloj promeni oblika dolazi do velikog lokalnog porasta napona, koncentracije napona, čime se uspostavlja troosno stanje napona i ravna deformacija. Na vrhu prsline pri samo elastičnoj deformaciji je faktor koncentracije beskonačno veliki, što može dovesti do trenutnog ili vrlo brzog loma već pri malom opterećenju. Ovakva situacija je nepoželjna u eksploataciji konstrukcija, jer postojeća prsline često dovodi do havarija, koje su u nekim slučajevima i katastrofalne. Treći značajan faktor je brzina saopštavanja opterećenja; pri velikoj brzini nema dovoljno vremena za razvoj plastične deformacije, pa je lom neizbežno krt.

Od opisanih faktora, koji utiču na ponašanje opterećenog materijala, debljina je neprikladna za ispitivanje, jer zahteva veliko opterećenje i odgovarajuće veliki uređaj dovoljnog kapaciteta u pogledu energije.

Zbog toga su parametri žilavosti i duktilnosti i odgovarajući uređaji definisani na bazi brzine dejstva opterećenja i geometrijskog oblika sa koncentracijom napona na epruvetama dosta malih dimenzija.

DUCTILITY AND TOUGHNESS DETERMINATION

Procedures for assessing the toughness and ductility of welded joint can be complex due to the heterogeneity of microstructure and mechanical properties of WM and HAZ.

First, it is necessary to explain the relation between toughness and ductility. Toughness is an energy parameter of loaded cracked material behaviour and presents the amount of consumed energy. Ductility is the capacity of the material for deformation and is measured by elongation and corresponding strain. The stress-strain state under applied load substantially affects values of toughness and ductility parameters. There are two limiting states. In case of plane stress state, the strain, i.e. elongation is free in all three spatial directions. In plane strain state, stresses are acting in three directions, the strain is constrained and elongation is possible only in two directions of the crack plane. Between these two states, transition (mixed mode) states can be established where smaller or larger deformation is possible, indicated by the amount of energy consumed for the development of strain and fracture. When deformation is completely constrained no energy is consumed for fracture and when sufficient load is applied, fracture develops from an existing crack with no energy increase – brittle fracture, preceded only by elastic deformation. When, at three-directional deformation, energy consumption for strain development needs to be increased, corresponding material behaviour is known as ductile (indicating material stretching) or plastic (since the geometry is changed by plastic deformation), or tough (since significant amount of energy is consumed). The same terms are used for the fracture that develops in these conditions from the existing crack, also followed by development plastic deformation.

There is a large number of factors affecting the occurrence of plane stress and plane strain states. Large sizes, primarily large thickness of component or specimen, allow dominant plane strain, and brittle fracture can be expected from crack or a crack-like defect, when the critical value of load and stress is reached. The second factor is stress concentration. In the Theory of Elasticity, stress dependence on geometry shape is mathematically derived and local increase in stress takes place with abrupt change of shape, stress concentration, allowing to establish a state of three-directional stress and plane strain. In the case of elastic deformation acting solely at the crack tip, the stress concentration factor becomes infinite and can lead to instantaneous or very fast fracture, even at low loads. This situation is unfavourable for structures in operation, since the existing crack often leads to failures, sometimes catastrophic. The third important factor is the load rate, at high load rate there is not sufficient time for plastic deformation to develop and fracture is inevitably brittle.

Of the described factors that affect behaviour of loaded material, thickness is inconvenient for testing, since it requires high testing load and corresponding huge equipment with sufficient energy capacities.

Hence, toughness and ductility parameters and corresponding equipment are defined based on submitted load rate and geometry shape, producing stress concentration on specimens of rather small size.

Prelazna temperatura krstosti

Za konstrukcijske čelike je vrlo značajan i četvrti faktor, temperatura eksploatacije i ispitivanja, jer je utvrđeno da postoji prelazna temperatura ispod koje se čelik, inače duktilan, ponaša krto, /1/.

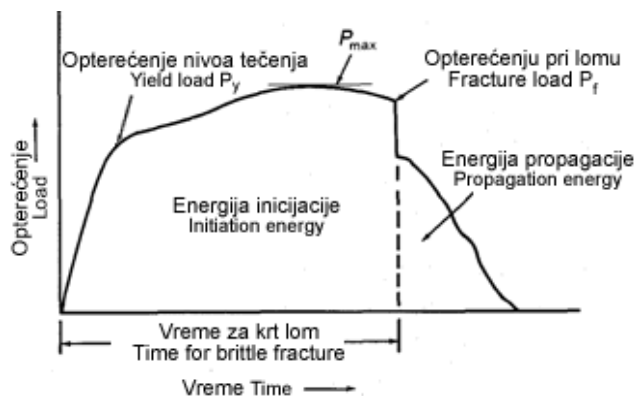
Ispitivanja duktilnosti i žilavosti na različitim temperaturama, u osnovi, daju samo podatak o nivou prelazne temperature prema energiji utrošenoj u ispitivanju.

Udarno ispitivanje po Šarpiju

Ispitivanje po Šarpiju je prihvaćeno i standardizovano (ISO 148) za ocenu udarne žilavosti, jer je prikladno i jednostavno. Obimna literatura posvećena ovom ispitivanju je dostupna i sa nekoliko međunarodnih tematskih konferencija koje su obeležile više od jednog veka primene ispitivanja po Šarpiju. Istoj temi je posvećen i dvobroj 1–2/2002 časopisa Integritet i vek konstrukcija (IVK), /2/. S obzirom na to, ovde će biti prikazana samo najvažnija dostignuća u razvoju i primeni Šarpijevog ispitivanja. Danas se ovo standardno ispitivanje izvodi sa malim epruvetama $10 \times 10 \times 55$ mm sa V zarezom dubine 2 mm, rasponom oslonaca 40 mm na klatnu, a rezultati se daju u specifikaciji materijala.

U konvencionalnom Šarpi ispitivanju se meri ukupna energija apsorbovana pri lomu epruvete. Dodatni podaci se dobijaju sa instrumentiranog Šarpi uređaja na dijagramu promene opterećenja tokom vremena ispitivanja, /3, 4/.

Shematizovana kriva opterećenje–vreme, za instrumentiranog Šarpi uređaja za duktilni čelik, prikazana je na sl. 1. Iz ovakvog zapisa se može odrediti energija potrebna za inicijaciju loma (prslina) i za razvoj loma. On daje i podatak o opterećenju nivoa tečenja, o maksimalnom opterećenju i o opterećenju pri lomu. Iz oblika dobijenog zapisa promene opterećenja sa vremenom, može se već na prvi pogled oceniti da li je lom krt ili duktilan.



Slika 1. Dijagram opterećenje–vreme instrumentiranog Šarpi ispitivanja za duktilan lom
Figure 1. Diagram load vs. time for an instrumented Charpy test at ductile fracture.

Instrumentacija je povećala mogućnosti ispitivanja po Šarpiju ne samo razdvajanjem delova energije potrebnih za inicijaciju i za rast prslina, /3/, već i zato što daje ocenu nivoa opterećenja tokom loma. Specifikacija materijala za teško opterećene zavarene konstrukcije obuhvata energiju udara za BM i WM, kao i prelaznu temperaturu za materijal koji radi na niskim temperaturama, /5/. Još uvek postoji problem kako oceniti žilavost HAZ, jer je teško postaviti koren zarezta precizno u području HAZ koje ima najmanju žilavost, /6/.

Nil ductility transition temperature

A fourth factor is also important for structural steels, namely operating and testing temperature, since it is found that a transition temperature exists below which steel, otherwise ductile, exhibits brittle behaviour, /1/.

Ductility and toughness tests at different temperatures in fact produce only data about the transition temperature level according to the consumed test energy.

Impact test according to Charpy

Testing according to Charpy is accepted and standardised (ISO 148) for impact toughness assessment, as convenient and simple. Extended literature devoted to this testing is available also from several international topical conferences indicating more than one century of Charpy testing. The same topic has been covered in issue 1–2/2002 of the Structural Integrity and Life (IVK) journal, /2/. In that respect, only most important achievements in the development and use of Charpy test are presented here. Today this standard testing is performed on small specimens $10 \times 10 \times 55$ mm, with a 2 mm V-notch, a support span of 40 mm on pendulum, and results are given in material specifications.

The conventional Charpy test measures total energy absorbed while fracturing the specimen. Additional information can be obtained if the impact tester is instrumented to provide a load-time history during the test, /3, 4/.

Schematic curve load vs. time from an instrumented Charpy test for a ductile steel is presented in Fig. 1. This record allows to determine the energy required for initiating fracture (crack) and for propagating fracture. It also gives data on the yielding load, maximal load, and fracture load. The shape of obtained record of load change with time allows to evaluate, at the first glance, whether fracture is brittle or ductile.

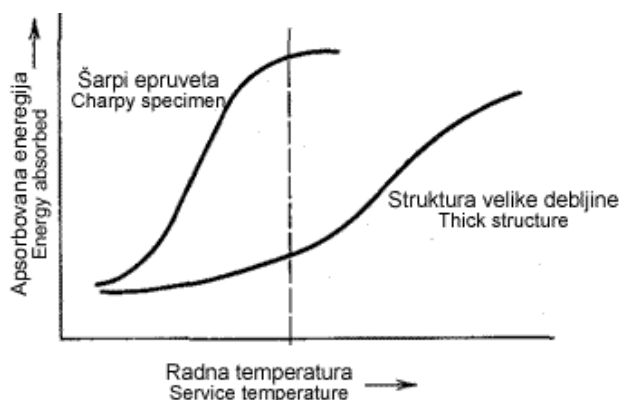
The instrumentation has increased the capacity of Charpy tests not only by separating energy parts necessary for crack initiation and propagation, /4/, but may also serve as an assessment of the load level during fracture. Material specification of heavy duty welded structures include impact energies for BM and WM, as well as transition temperature for material operating at low temperatures, /5/. The problem how to assess HAZ toughness is still actual, since it is difficult to locate notch root accurately in HAZ region of the lowest toughness, /6/.

Eksplozivno ispitivanje izbočavanjem

Možda je najveći nedostatak udarnog ispitivanja po Šarpiju što mala epruveta nije uvek realan model za konstrukciju u pravoj veličini. Ne samo da dovodi do znatnog rasipanja rezultata, već epruveta debljine 10 mm nije u stanju da obezbedi intenzitet ometene deformacije, kakav se može uspostaviti u konstrukciji mnogo veće debljine. Ova situacija je prikazana na sl. 2. Na određenoj radnoj temperaturi standardna Šarpi epruveta pokazuje visok nivo energije, dok u stvari isti materijal u konstrukciji sa presekom velike debljine može imati znatno manju žilavost pri istoj temperaturi. Logičan pristup tom problemu je razvoj ispitivanja u kome se mogu koristiti epruvete povećane debljine, kao što je eksplozivno ispitivanje izbočavanjem. Osnovna potreba da se ispituju velike epruvete proistekla je iz nemogućnosti da se male laboratorijske epruvete slome pri naponu manjem od napona tečenja, a u brodskim konstrukcijama krti lom se javljao na radnoj temperaturi pri nivou elastičnog napona, kao što je bio slučaj sa brodovima *Liberti*, /1/. Takvo ispitivanje i praktičnu primenu rezultata su uveli u SAD saradnici Mornaričke nacionalne laboratorije (NRL) na čelu sa Pelinijem, /7, 8/.

Eksplozivno ispitivanje izbočavanjem, razvijeno u NRL radi proučavanja krtog loma konstrukcijskih čelika ugrađenih u trup broda prikazano je na sl. 3. Nosač kalupa (ukrućenje) sa osnovom omogućava izbočavanje ispravno postavljene ispitne ploče (epruvete). Punjenje livenog eksploziva određene mase i snage se postavlja na određenom rastojanju pomoću odstoynika iznad ispitne ploče. Velika brzina opterećenja eksplozijom doprinosi krtom lomu ispitne ploče, a značajna je i uloga koncentracije napona i ometene deformacije, što je ostvareno krtim navarom i na njemu izvedenom zarezu.

Primenjeno na zavareni spoj, /8/, ovo ispitivanje omogućava da se odredi kritično područje u spoju, u kojem će doći do loma. Na taj način se globalnim ispitivanjem mogu odrediti lokalno kritična svojstva, što je korišćeno i u ovom istraživanju.



Slika 2. Uticaj debljine na prelaznu temperaturu
Figure 2. Effect of thickness on transition temperature.

Ispitivanje padajućim tegom

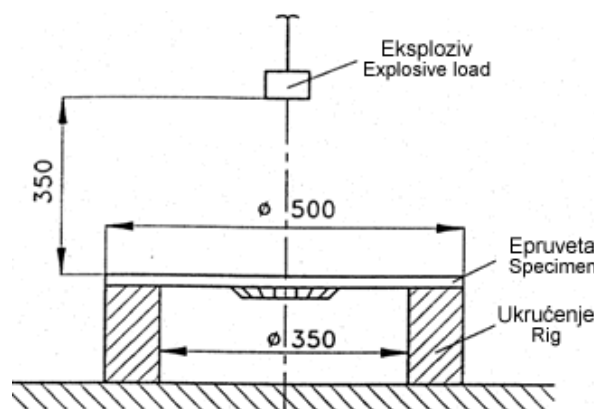
Iskustvo stečeno u NRL eksplozivnim ispitivanjem izbočavanjem je poslužilo za razvoj ispitivanja padajućim tegom (DWT), sa ciljem da se slični rezultati dobiju bez

Explosion bulge test

Probably the chief deficiency in the Charpy impact test is that a small specimen is not always a realistic model of a full scale structure. Not only does the small specimen lead to considerable scatter of results, but a specimen of 10 mm thickness cannot provide the same constraint of strain as would be found in a structure of much larger thickness. This situation is depicted in Fig. 2. At a particular operating temperature the standard Charpy specimen shows a high shelf energy, while actually the same material in a thick-sectioned structure can have a significantly lower toughness at the same temperature. The logical approach to this problem is development of tests capable of handling specimens of extended thickness, as the explosion bulge test. The basic need to test large specimens resulted from the inability to produce fracture in small laboratory specimens at stresses below yield stress, whereas brittle fractures in ship structures occur at operating temperatures at elastic stress levels, as experienced with *Liberty* ships, /1/. The development of such tests and practical application of their results had been introduced in USA by co-workers of the Naval Research Laboratory (NRL), headed by Pellini, /7, 8/.

The explosion bulge test, developed in NRL to study the problem of brittle fracture in structural steels used in welded ship hulls, is presented in Fig. 3. Die support (rig) with the base allows bulging of properly positioned test plate (specimen). Cast explosive charge of specified mass and power should be applied at a properly determined distance, obtained by cardboard box over the test plate. High rate of explosion loading contributes to brittle fracture of test plate, and the role of stress concentration and constraint is also important, being achieved by brittle weld surfacing bead and an additionally introduced notch in it.

Applied to welded joint specimens, /8/, this test enables to determine the most critical region in weldment, where fracture would occur. In this way, the critical local property could be defined in a global test, as this was also used in this investigation.



Slika 3. Shema eksplozivnog ispitivanja izbočavanjem
Figure 3. Scheme of explosion bulge test.

Drop weight test

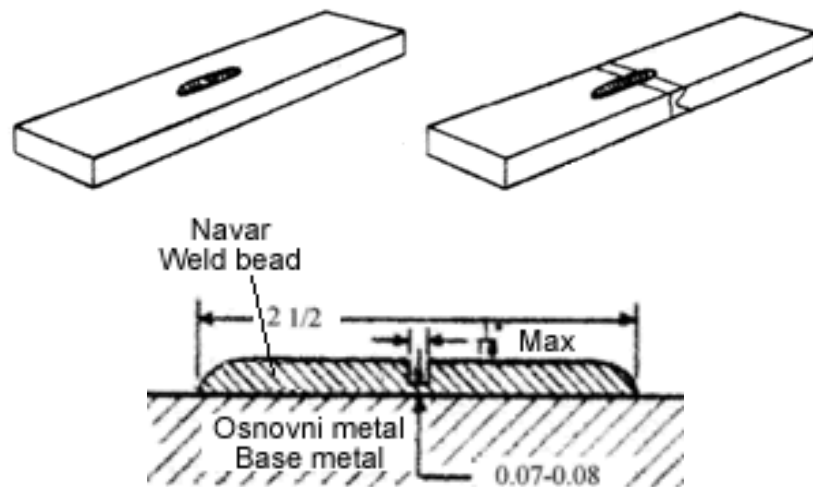
Experience gathered in NRL with the explosion bulge test has led to the development of drop-weight test (DWT), intended to obtain similar results avoiding the explosion.

eksplozije. Energija ispitivanja padajućim tegom se dobija od potencijalne energije mase (tega) koja slobodno pada. Zbog znatne težine tega i visine uređaja ostvaruje se mnogo veća energija u poređenju sa Šarpijevim klatnom. Prvobitno je DWT razvijeno /9/ samo za određivanje prelazne temperature krtosti (NDT) ploča pune debljine. Za određivanje prelazne temperature potrebne su po dve epruvete za svaku temperaturu. Jednostavnost epruvete za ispitivanje padajućim tegom (sl. 4) i uređaja za zadavanje opterećenja, kao i tumačenje rezultata doprineli su primeni ovog ispitivanja.

Napon koji deluje u epruveti tokom udarnog opterećenja je ograničen nivoom tečenja pomoću graničnog bloka postavljenog na nakovnju ispod epruvete. To je praktičan uređaj za ocenu sposobnosti čelika da li može da podnese napon tečenja u prisustvu male prsline, što se koristi za ocenu značaja prsline.

Epruveta se iz osnovne ploče iseca kiseoničkim rezanjem i naknadno obrađuje mašinski. Tanju epruvetu iz vrlo debele ploče treba navariti sa strane valjanja. Kako je epruveta široka greda, opterećena savijanjem u tri tačke, ovo ograničenje sprečava da napon zategnutog lica ploče pređe napon tečenja. Kratak navar od krtog metala šava, preuzet od eksplozivnog ispitivanja izbočavanjem, debljine 15 do 25 mm, obično veličine 80×350 mm, se nanosi na površinu ploče (sl. 4).

Ispitivanje padajućim tegom je osmišljeno za ispitivanje relativno debelih preseka konstrukcije, i nije preporučeno za uzorke osnovnog metala debljine ispod 12,5 mm.



Slika 4. Epruveta za ispitivanje padajućim tegom
Figure 4. Drop weight test specimen.

REZULTATI ISPITIVANJA

Prikazani su rezultati ispitivanja zavarenih spojeva dva niskolegirana čelika visoke čvrstoće (HSLA) namenjena za opremu pod pritiskom i projektovana za rad na niskim temperaturama.

Osnovne osobine ispitivanih čelika i zavarenih spojeva

Ispitani su čelici NIONIKRAL 70, debljine 35 mm (A), i čelik SUMITEN 80P, debljine 46 mm (B). Njihov hemijski sastav je dat u tab. 1, zatezne karakteristike u tab. 2.

The energy for drop weight test is obtained from potential energy of free falling mass (weight). Due to significant weight of the tup and height of device, much more energy can be obtained compared to the Charpy pendulum. Initially, DWT is developed, /9/, specifically for determining the Nil Ductility Transition (NDT) temperature on full thickness plates. At least two specimens are required to determine NDT at each temperature. The simplicity of the drop-weight test specimen (Fig. 4) and the loading apparatus, and the interpretation of results have contributed to its use.

The stress applied to the specimen during impact loading is limited to the yield point by a stopping block attached to the anvil under the specimen. This is a practical device for evaluating the ability of the steel to withstand yield point load in the presence of a small flaw, and is used for the assessment of crack significance.

Specimens may be oxygen-cut from a parent plate and additionally machined. The thinner specimen prepared from a very thick plate should be welded on to the rolling surface. Since the specimen is a wide beam loaded in three-point bending, this restriction limits the stress on the tension face of the plate to a value that does not exceed yield stress. A short surface weld bead of brittle weld metal, taken from the explosion bulge test, 15 to 25 mm thick, typically of size 80×350 mm, is deposited on the plate surface (Fig. 4).

The drop-weight test is devised for testing relatively heavy structural sections, and is not recommended for samples of parent metal of thickness below 12.5 mm.

TEST RESULTS

Test results are presented of welded joints of two low alloy high strength steels (HSLA), aimed for manufacturing pressure equipment and designed for low temperature applications.

Basic properties of tested steels and welded joints

The two tested steels are NIONIKRAL 70, 35 mm thick (A), and SUMITEN 80P, 46 mm thick (B). Chemical composition is given in Table 1, tensile properties in Table 2.

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanih čelika
Table 1. Chemical composition of tested steels.

Čelik (Steel)	Hemijski sastav, tež. % (Chemical composition, wt. %)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	B
A	0.1	0.27	0.35	0.014	0.012	1.11	2.65	0.26	0.1	0.05		
B	0.1	0.3	0.9	0.01	0.008	0.48	1.01	0.47	0.03		0.24	0.0016

Tabela 2. Zatezne karakteristike ispitivanih čelika
Table 2. Tensile characteristics of tested steels.

Čelik (Steel)	Napon tečenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Suženje površine poprečnog preseka
	Yield strength	Ultimate tensile strength	Elongation	Reduction of cross section area
	YS (MPa)	UTS (MPa)	A (%)	Z (%)
A	780	825	18	68
B	775	820	26	70

Podaci o zavarenom spoju

Čelik A je zavaren ručno elektrolučno (E postupak) obloženom bazičnom elektrodom tipa Tenacito 80, Erlikon, Švajcarska.

Hemijski sastav elektrode Tenacito 80 je (%):

C: 0,06; Si: 0,50; Mn: 1,80; Cr: 0,35; Ni: 2,20; Mo: 0,40.

Napon tečenja čistog metala šava Tenacito 80 je iznad 750 MPa, njegova zatezna čvrstoća iznosi 810 do 910 MPa, a izduženje pri lomu iznad 16%.

Čelik B je zavaren ručno elektrolučno (E postupak) obloženom bazičnom nisko vodoničnom elektrodom tipa LB 118, Cobe Steel, Japan.

Hemijski sastav elektrode LB 118 elektrode je (%):

C: 0,1; Si: 0,3–0,7; Mn: 5–7; P: 0,035; S: 0,013; Cr: 19–22; Ni: 9,5–10,5; Ti: 0,2–0,5.

Napon tečenja čistog metala šava LB 118 je min. 720 MPa, njegova zatezna čvrstoća je iznad 820 MPa, a izduženje pri lomu iznad 22%.

Epruvete su zavarili ispitani zavarivači prema kvalifikovanoj specifikaciji postupka zavarivanja (WPS). Pravac zavarivanja je bio poprečno na pravac valjanja čelika. Mehaničke osobine zavarenih epruveta su date u tab. 3.

Welded joint data

Steel A is welded by metal manual arc welding (MAW procedure) using coated basic electrode Tenacito 80, Oerlikon, Switzerland.

Chemical composition of Tenacito 80 is (%):

C: 0.06; Si: 0.50; Mn: 1.80; Cr: 0.35; Ni: 2.20; Mo: 0.40.

Yield strength of pure weld metal Tenacito 80 is above 750 MPa, its ultimate tensile strength is 810 to 910 MPa, and elongation at fracture above 16%.

Steel B is welded by metal manual arc welding (MAW) using coated basic low hydrogen electrode LB 118, Cobe Steel, Japan.

The chemical composition of LB 118 electrodes is (%):

C: 0.1; Si: 0.3–0.7; Mn: 5–7; P: 0.035; S: 0.013; Cr: 19–22; Ni: 9.5–10.5; Ti: 0.2–0.5.

Yield strength of pure weld metal LB 118 is min. 720 MPa, its ultimate tensile strength is min. 820 MPa, and elongation at fracture is above 22%.

Certified welders welded the specimens using qualified Welding Procedure Specification (WPS). The direction of the welded joint is transverse to steel rolling direction. Mechanical properties of the specimens are given in Table 3.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva: zatezne karakteristike, ugao savijanja oko trna i tvrdoća
Table 3. Results of welded joint tests: tensile properties, guided bend angle, and hardness.

Čelik (Steel)	Zavareni spoj (Welded joint)		Metal šava (Weld metal)			Savijanje oko trna		Tvrdoća	
	Napon tečenja	Mesto loma	Napon tečenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Bend test		Hardness	
	Yield stress	Fracture location	Yield stress	Tensile strength	Elongation	Lice (Face)	Koren (Root)	HAZ	WM
	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(%)	(°)	(°)	HV30	HV30
A	800	WM	750	810	16	180	180	260–330	258–290
B	761	HAZ	796	848	22	180	180	220–334	255–275

Tvrdoća

Rezultati merenja tvrdoće poprečno po zavarenom spoju su prikazani na sl. 5, /10/. Vidljiv je za oba spoja porast tvrdoće (i čvrstoće) u području HAZ oko linije stapanja.

Udarana žilavost

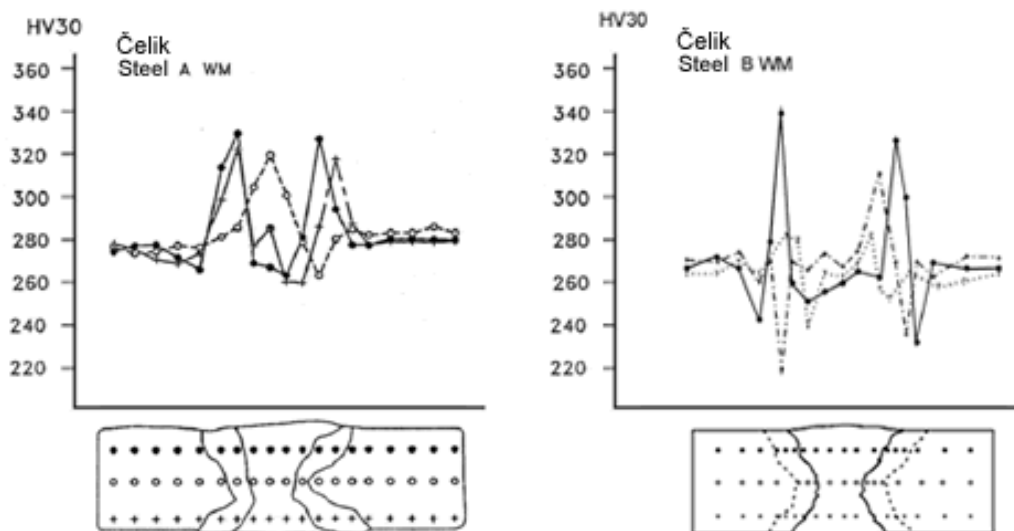
Epruvete iz osnovnog metala (PM) čelika A su ispitane u pravcu valjanja (L) i u poprečnom pravcu (C), sa zarezom u tim pravcima, a za čelik B su ispitane samo epruvete u pravcu valjanja. Ispitane su i epruvete sa zarezom u WM i u HAZ. Veličine udarne žilavosti su date na sl. 6.

Hardness

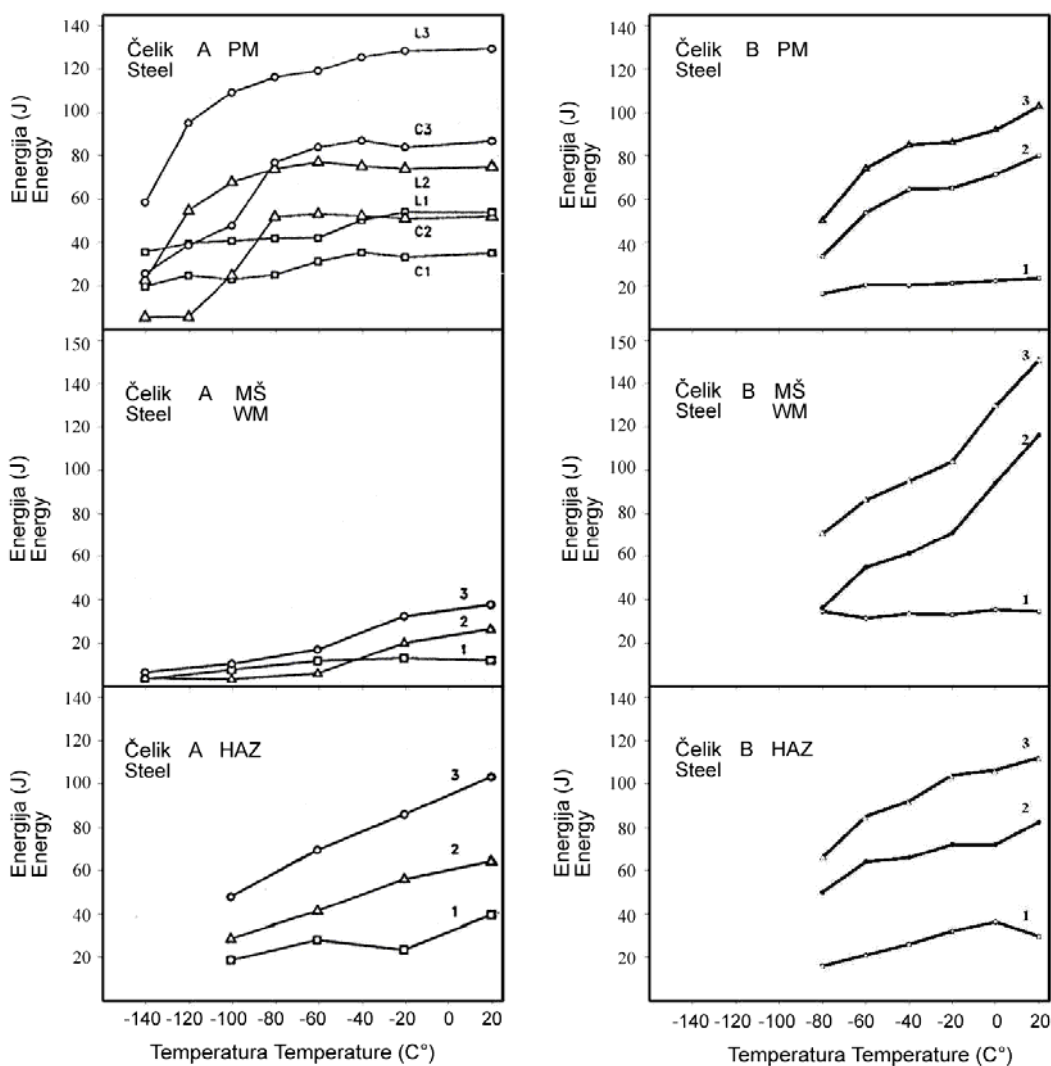
Results of hardness measurements across welded joints are presented in Fig. 5, /10/. An increase in hardness (and strength) of both joints is visible in HAZ regions at fusion line.

Impact toughness

Parent metal specimens of steel A are tested in the rolling (L) and in transverse directions (C) with notches in these directions, and only specimens in rolling direction of steel B. Specimens with notches in WM and HAZ were also tested. Impact toughness values are given in Fig. 6.



Slika 5. Rezultati merenja tvrdoće poprečnog preseka zavarenog spoja
 Figure 5. Results of hardness measurements across welded joints.



Slika 6. Rezultati ispitivanja epruveta Šarpi V instrumentiranim klatnom
 Figure 6. Instrumented impact test results obtained with Charpy V specimen.

WM (metal šava) (weld metal); HAZ (zona uticaja toplote) (heat affected zone)

L (zarez u poprečnom pravcu) (notch in cross-rolling direction); C (zarez u pravcu valjanja) (notch in rolling direction)

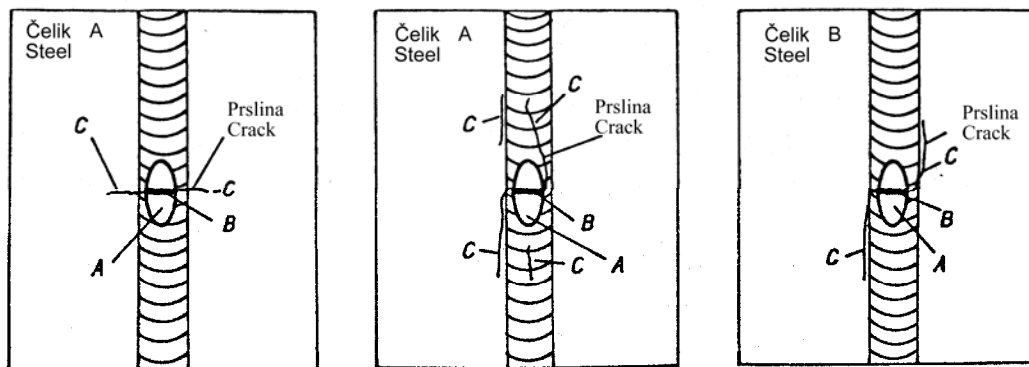
1–(energija nastanka prsline) (crack initiation energy); 2–(energija širenja prsline) (crack propagation energy); 3–(ukupna energija) (total energy)

Parametri eksplozivnog ispitivanja izbočavanjem

Epruvete dimenzija $\varnothing 500 \times$ debljina mm su ispitane eksplozivnim izbočavanjem prema shemi na sl. 3. Krti navar je zavaren u pravcu valjanja osnovnog metala, tj. u pravcu metala šava, a zarez za nastanak prsline je bio upravan na navar. Tipičan razvoj prsline u zavarenom spoju pri eksplozivnom ispitivanju je prikazan na sl. 7. Rezultati ispitivanja su prikazani na sl. 8, izraženi razvojem izbočavanja B i stanjenjem ploče ΔR sa brojem eksplozija.

Explosion bulge test parameters

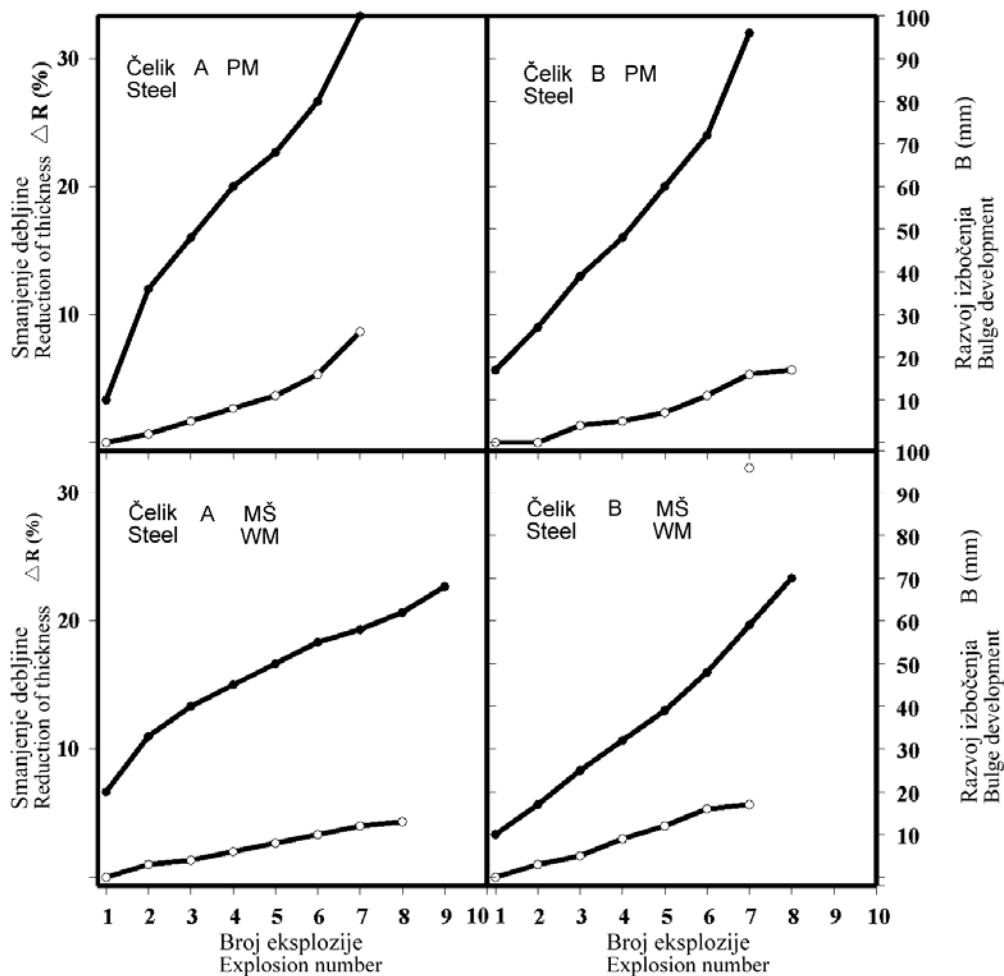
Specimens sized $\varnothing 500 \times$ thickness mm are tested by explosion bulging according to scheme in Fig. 3. Brittle bead is welded in rolling direction of parent metal (PM), i.e. direction of tested weld metal, and the notch as crack starter is normal to the bead. Typical development of cracks in welded joint during explosion tests are given in Fig. 7. Test results are shown in Fig. 8, by bulge development B and plate thinning ΔR vs. number of explosions.



Slika 7. Shema razvoja prsline u eksplozivnom ispitivanju izbočavanjem

Figure 7. Scheme of crack propagation in explosion bulge test.

A–(krti navar) (brittle bead); B–(zarez za nastanak prsline) (notch-crack starter); C–(prslina) (crack)



Slika 8. Rezultati eksplozivnog ispitivanja izbočavanjem, izraženi smanjenjem debljine ΔR i razvojem izbočenja B sa brojem eksplozija

Figure 8. Results of explosion bulge test, expressed by reduction of thickness ΔR and bulge development B vs. number of explosions.

Prelazna temperatura krtosti

Prelazna temperatura krtosti u ovom istraživanju je određena na osnovu rezultata ispitivanja padajućim tegom i udarnog ispitivanja po Šarpiju.

Mogućnosti ispitivanja padajućim tegom su mnogo veće, jer se na osnovu njegovih rezultata može oceniti i značaj prslina i zavisnost kritičnog napona i veličine prsline, /8/.

Prelazne temperature krtosti, određene na osnovu 50% gornjeg platoa energije udara Šarpi V i na osnovu ispitivanja padajućim tegom, su date u tab. 4. Najveća vrednost prelazne temperature je sa obe metode dobijena u metalu šava.

Tabela 4. Prelazna temperatura krtosti konstituenata zavarenog spoja (°C)
Table 4. Nil-ductility-transition temperature of welded joint constituents (°C).

	Čelik A (Steel A)				Čelik B (Steel B)			
	L	C	WM	HAZ	L	C	WM	HAZ
50% Šarpi V udarne energije (50% Charpy V impact energy)	-138	-100	-52	-94	-56	-62	-105	-48
Ispitivanje padajućim tegom (Drop weight test)		-103	-85			-84	-130	

L-(pravac valjanja) (rolling direction); C-(poprečni pravac) (cross rolling direction); WM-(metal šava) (weld metal); HAZ-(zona uticaja toplote) (heat affected- zone)

DISKUSIJA

Vrednosti tvrdoće na sl. 5 su na očekivanom nivou za zavarene spojeve oba čelika A i B. Rasipanje rezultata, uočeno za WM čelika A je pripisano višeproloznom zavaru.

Rezultati dobijeni merenjem veličine energije pri ispitivanju instrumentiranim Šarpi klatnom pokazuju samo žilavost materijala, ali ne i njegovu duktilnost. Dodatni podatak je NDT temperatura, koja nivoom žilavosti označava temperaturna područja krtog i duktilnog ponašanja materijala.

Udarne žilavost čelika A (sl. 6), izražena preko energije, je visoka i dovoljna u oba pravca, kao i na niskim temperaturama.

To nije slučaj sa metalom šava, gde su vrednosti energije male na svim temperaturama. To važi i za NDT temperaturu, za energiju udara od 27 J prema zahtevu, jer je ona viša od vrednosti koja odgovara 50% gornjeg nivoa energije Šarpi, već na -25°C .

Zona uticaja toplote je u ovom ispitivanju bolja u pogledu žilavosti od metala šava. Međutim, izmerene vrednosti energije se znatno razlikuju, što ukazuje na problem položaja vrha zareza. Jasno je da vrednost udarne energije HAZ mora da bude ispitivana u skladu sa vrednostima tvrdoće i uvažavajući raspodelu mikrostrukture.

Za čelik B, slične čvrstoće, vrednosti energije udara su zadovoljavajuće, i zahtevi za NDT temperaturu su ispunjeni za sva tri konstituenta. Nešto veće vrednosti udarne energije WM u poređenju sa PM su pripisane sastavu legure elektrode. Rezultati za HAZ su uporedivi sa rezultatima za PM. Objašnjenje za rasipanje rezultata između tri epruvete nije traženo, jer su svi rezultati iznad specificiranih vrednosti.

Visok kvalitet oba čelika i zavarenih spojeva u pogledu duktilnosti je dokazan u eksplozivnom ispitivanju izbočavanjem. Prsline, koje su krenule iz zareza na krtom navaru oko linije stapanja razvijale su se uglavnom u pravcu valjanja i zaustavljale u osnovnom metalu u većini epruveta.

Nema velike razlike kada se poredi epruvete osnovnog metala i zavarenog spoja, tj. posle šest udara eksplozije razvoji stanjenja i izbočavanja su bili uporedivi za sva eksplozivna punjenja (sl. 8).

Nil-ductility transition temperature

The nil-ductility transition temperature is determined in this investigation from the results of drop weight test and from the Charpy impact test.

The drop weight test capacity is more important, since based on its results it is possible to evaluate crack significance and dependence of critical stress on crack size, /8/.

Nil-ductility transition temperatures, determined for 50% of upper shelf Charpy V impact energy and from drop weight test are listed in Table 4. The highest transition temperature in both methods is found to be in the weld metal.

DISCUSSION

Hardness values in Fig. 5 are of expected levels for both steels A and B welded joints. Some scatter of results observed in WM of steel A can be attributed to the multipass weld.

Results obtained by measuring energy values in instrumented Charpy pendulum test show only material toughness, but not its ductility. An additional result is the NDT temperature, indicating temperature regions of brittle and ductile material behaviour by toughness level.

Impact toughness of steel A (Fig. 6), expressed in energy terms, is high and satisfactory in both directions, also at low temperatures.

This is not the case with weld metal, where energy values are low for all temperatures. This is also valid for NDT temperature, of impact energy 27 J, according to requirements, since it is higher than the value for 50% of upper shelf of Charpy energy, already at -25°C .

The heat-affected-zone in this test is found to be superior regarding toughness compared to weld metal. However, the measured energy values differ significantly, indicating the problem of notch tip positioning. It is clear that the HAZ impact energy value must be tested in accordance with hardness results and considering distribution of microstructure.

For steel B of similar strength, impact energy values are high, and requirements for NDT temperature are satisfied for all three constituents. Somewhat higher impact energy values of WM compared to PM are attributed to alloy composition of electrode. HAZ results are comparable to PM. The explanation of scattered results among the three specimens is not requested, since all results are above specified values.

High quality of both steels and welded joints regarding the ductility is proved in the explosion bulge test. Cracks that emanated from the brittle bead notch, developed mostly in rolling direction and are arrested in the parent metal (Fig. 7) in most specimens.

No significant difference is found comparing parent metal and welded joint specimens, e.g. after six explosion shots thinning and bulge developments are comparable for all explosive charges (Fig. 8).

Ispitivanje padajućim tegom je samo potvrdilo da daje manje konzervativne rezultate u odnosu na kriterijum usvojen za određivanje prelazne temperature pomoću udarnog ispitivanja po Šarpiju (tab. 4).

Treba napomenuti da, od ovde primenjenih postupaka ispitivanja, jedino ispitivanje padajućim tegom omogućava da se oceni značaj veličine prsline s obzirom na delujući napon, kako je to razvio Pellini sa saradnicima, /8/. U tom pogledu mnogo više mogućnosti daju ispitivanja mehanike loma, jer se izvode na epruvetama sa zamornom prslinom, /11/, a izvedene su zavisnosti veličine prsline i delujućeg napona preko odgovarajućeg parametra mehanike loma, /12/.

ZAKLJUČCI

Uzimajući u obzir dobijene rezultate može se zaključiti da su primenjeni postupci ispitivanja duktilnosti i žilavosti čelika visoke čvrstoće selektivni. Rezultati dobijeni pomoću Šarpi ispitivanja su saglasni sa rezultatima eksplozivnog ispitivanja izbočavanjem, iako su izraženi različitim veličinama. Takođe, indikacija najslabijeg područja zavarenog spoja, dobijena Šarpi ispitivanjem je potvrđena eksperimentalnim ispitivanjem u uslovima velike brzine opterećenja.

Zaključeno je da se primenjeni postupci ne isključuju, jer daju rezultate koji se dopunjuju, i time pomažu da se razume ponašanje prsline u čelicima za posude pod pritiskom i njihovim zavarenim spojevima za različite brzine deformisanja.

Razmatrani postupci se mogu koristiti i za izbor materijala i kvalifikaciju zavarenih spojeva.

LITERATURA – REFERENCES

- Murray Boyd, G., *Fracture design practices for ship structures*, Fracture Vol. V, edited by H. Liebovitz, Academic Press, New York, (1969), pp. 383-470.
- Tematski broj *Sto godina udarnog ispitivanja po Šarpiju* (Topical issue *One century of Charpy impact testing*), Integritet i vek konstrukcija – Structural Integrity and Life (IVK), Vol. 2; No 1-2 (2002).
- Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563, ASTM Philadelphia (1974).
- Popović, O., Sedmak, A., Trišović, N., *Određivanje žilavosti materijala različitim parametrima dobijenim Šarpijevim klatnom* (*Material toughness assessment using different parameters obtained by Charpy pendulum*), IVK, Vol. 2; No 1-2 (2002) pp. 29-38.
- Sedmak, S., Radović, A., Grabulov, V., *Analiza odnosa energije nastanka i rasta prsline u čeliku na različitim temperaturama* (*The analysis of crack initiation/propagation energy ratio in steel at different temperatures*), IVK, Vol. 2; No 1-2 (2002) pp. 5-10.
- Sedmak, S., *Ocena osobina zavarenog spoja ispitivanjem epruveta sa prslinom* (*Welded joint properties evaluation by cracked specimens testing*), u *Mehanika loma zavarenih spojeva* (Fracture Mechanics of Weldments), ured. S. Sedmak, GOŠA-TMF, Belgrade, (1985), pp. 281-306.
- Standard Procedures for Explosion Testing Ferrous and Non-Ferrous Metallic Materials and Weldments, MIL-STD-2149 (SH) (1983).
- Pellini, W.S., *Guidelines for fracture-safe and fatigue-reliable design of steel structures*, The Welding Institute, Abington (1983).
- Puzak, P.P., Pellini, W.S., NRL Rept. 5831, Aug. 21, 1962; ASTM Standards, pp. 582-601, Designation E208-69 (1969).

Drop weight testing has only confirmed that it produces less conservative results in comparison to the criterion accepted for transition temperature by applying impact tests according to Charpy (Table 4).

It is to mention that of these here used test methods only the drop weight test allows to assess the significance of crack size regarding applied stress, as developed by Pellini and co-workers, /8/. In that sense much more possibilities are offered by fracture mechanics tests, since they are performed on fatigue pre-cracked specimens, /11/, and relations between crack size and applied stress are derived using the corresponding fracture mechanics parameter, /12/.

CONCLUSIONS

Taking into account obtained results one can conclude that the applied procedures for testing ductility and toughness of high strength steels are selective. Results obtained by using Charpy test are compatible with results of explosion bulge test, although expressed in different terms. Also, the indication of the weakest region of the welded joint, obtained by Charpy test, is verified by experimental tests in high strain rate conciliation.

It is concluded that the applied test methods do not exclude each other, since they produce complementary results, helping to understand crack behaviour in pressure vessel steels and their welded joints for different strain rates.

The considered procedures can be used also for material selection and welded joint qualification.

- Grabulov, V., *Prilog definisanju uticaja hemijskog sastava i debljine lima na pojavu prskotina u zavarenim spojevima čelika NIONIKRAL-70* (*A contribution to determine the effect of chemical composition and plate thickness on crack occurrence in welded joints of NIONIKRAL-70 steel*), Master thesis, Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade (1986).
- Burzić, Z., Sedmak, S., Manjgo, M., *Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva* (*Experimental determination of fracture mechanics parameters of welded joints*), IVK, Vol. 1, No 2 (2002), pp. 97-106.
- Gubelj, N., Zerbst, U., *SINTAP – Structural integrity assessment procedure*, in “From fracture mechanics to structural integrity assessment”, edited by S. Sedmak and Z. Radaković, DIVK-TMF, Belgrade (2004), pp. 303-320.