# Efectul vitezei de solicitare asupra rezistenței la rupere a îmbinărilor sudate oțel HSLA

# Loading rate effect on fracture strength of HSLA steel welded joints

**V. Grabulov [1], E. Romhanji [2], S. Sedmak [2], Z. Odanovic [1]**
[1] Institutul pentru Încercarea Materialelor, Belgrad, Serbia
[2] Facultatea de Tehnologie şi Metalurgie, Belgrad, Serbia

**Cuvinte cheie**

Viteză de încărcare, oțel slab aliat de mare rezistență, rezistență la rupere, integritate structurală, mecanica ruperii

## Introducere

Aplicabilitatea oțelurilor slab aliate cu rezistenta mare (HSLA) în structuri precum vasele sub presiune este dependenta de plasticitatea acestora. Sudarea este utilizată cel mai frecvent ca modalitate de îmbinare în structurile produse din oțel HSLA. Determinarea parametrilor îmbinărilor sudate, care determină rezistenta la rupere, este necesară pentru evaluarea integrității structurale.

Una dintre cerințele cele mai importante pentru siguranța în funcționare şi integritatea structurală a structurilor sudate din oțeluri HSLA este să se atingă un nivel corespunzător de rezistență în toate cele trei părți ale îmbinării sudate: metalul de bază (MB), metalul depus (MD) şi zona afectată termic (ZIT). Evaluarea rezistentei sudurii este foarte complexă, datorită microstructurii eterogene şi proprietăților mecanice ale MD şi ZIT. Încercarea la încovoiere prin şoc, deşi reprezintă o metodă învechită, este încă atractivă datorită simplității. Din această cauză aceasta este încă acceptată pentru evaluarea rezistentei la şoc. Aparatura pentru încercarea la încovoiere prin şoc şi-a extins capacitatea [1], permițând nu numai separarea zonelor energetice necesare inițierii şi propagării fisurii, dar şi evaluarea nivelului de solicitare în timpul procesului de rupere. Specificațiile pentru structurile sudate solicitate sever includ în mod normal valorile energiei de rupere prin şoc pentru MB şi MD, precum şi temperaturile de tranziție când materialul va lucra la temperaturi scăzute [2]. Oricum, există încă o problemă privind evaluarea rezistenta ZIT, întrucât este dificil să se poziționeze precis vârful crestăturii în regiunea ZIT cu cea mai scăzută rezistență [3].

Pentru a stabili condiții de încercare mai severe a fost introdus testul lărgirii la explozie [4]. Viteze de încărcare ridicate şi crestături fragile, suduri pe probe plane, contribuie la ruperea rapidă şi la condiții de testare severe. Aceste încercări aplicate probelor de îmbinări sudate [5] permit determinarea regiunii celei mai critice din sudură, în care poate apare ruperea. În acest mod, pornind de la un test global se poate defini proprietatea locală critică.

Alte îmbunătățiri în determinarea rezistenței la fisurare s-au obținut prin introducerea încercărilor de mecanica ruperii care utilizează epruvete prefisurate. Aplicarea acestor încercări pe îmbinări sudate permite determinarea rezistenței la rupere a MB şi MD, dar rămâne în continuare nesiguranța în poziționarea vârfului

**Keywords**

Loading rate, high strength low alloyed, fracture strength, structural integrity, fracture mechanics

## Introduction

The application of high strength low alloyed (HSLA) steels in structures, especially for pressure vessels, is dependent on their formability. Welding is most frequently applied as joining procedure in structures produced of HSLA steel. The determination of welded joints parameters describing fracture strength is necessary for the structural integrity assessment.

One of the most important requirements for service safety and structural integrity of welded structures, produced of HSLA steel, is to achieve the corresponding level of toughness in all three weldment constituents: base metal (BM), weld metal (WM) and heat-affected-zone (HAZ). The evaluation of weldments toughness is very complex, due to heterogeneity of micro-structure and mechanical properties of WM and HAZ. Charpy test, although an old method, is still attractive due to its simplicity, and for that it is generally accepted for the evaluation of the impact toughness. The instrumentation of Charpy test significantly extended its capacity [1], enabling not only the separation of energy portions required for crack initiation and crack propagation, but also the evaluation of loading level during the fracture process. Specifications for heavy loaded welded structures normally include impact energy values for BM and WM, as well as transition temperature when service at low temperature is expected [2]. However, there is still the problem how to evaluate toughness of HAZ, since it is difficult to position notch root precisely in HAZ region of the lowest toughness [3].

In order to establish more severe testing conditions, explosion bulge test was introduced [4]. High loading rate and notched brittle bead, welded d'n the plate specimen, contribute to fast fracture and severe testing conditions. Applied to welded joint specimens [5], this test enables to determine the most critical region in weldment, in which fracture would occur. In this way by a global test critical local property could be defined.

Further improvement in crack resistance testing is offered by introduction of fracture mechanics tests, that involved pre-cracked specimens. The application to welded joints allows for convenient determination of crack resistance of BM and WM, but it is followed again by uncertainty in defining of critical

crestăturii în ZIT [6, 7], întrucât fisura de oboseală urmăreşte mai degrabă traseul vârfului crestăturii direcţia critică din regiunea ZIT.

Această lucrare prezintă aplicarea celor trei metode descrise anterior la diferite viteze de solicitare (medie în cazul încercării

Charpy, ridicată în testul bombării la explozie şi cvasi-statică în testele de mecanica ruperii) pentru evaluarea comportării îmbinărilor sudate din oţeluri HSLA utilizate în domeniul vaselor sub presiune, realizate prin sudare manuală cu arc electric.

## Proprietăţi de bază ale oţelurilor şi ale îmbinărilor sudate investigate

În cadrul acestor investigaţii au fost utilizate două tipuri de oţeluri de mare rezistenţă: oţelul iugoslav din clasa HY100, cu grosimea de d = 35 mm şi notat în continuare "A" şi oţelul japonez SUMITEN 80P, cu grosimea de d = 46 mm, notat în continuare cu "B". Compoziţia chimică şi proprietăţile de rezistenţă ale acestora sunt date în Tabelul 1.

crack tip position in HAZ [6, 7], since in prescribed preparing method fatigue crack would follow the path of notch root rather than the direction of critical HAZ region.

The application of the three above described methods of different loading rates (medium in Charpy impact test, high in explosion bulge test and quasi-static in fracture mechanics tests) for the evaluation of brittle behaviour of welded joints, performed by manual arc welding of HSLA steels for pressure vessels application, is presented in the paper.

## Basic properties of tested steels and welded joints

Two kinds of high strength steels were used in these tests: Yugoslav steel of HY100 class, d = 35 mm thick, designed as "A", and Japanese SUMITEN 80P, d = 46 mm thick, designed as "B" in the next text. Their typical chemical composition and tensile properties are given in Table 1.

Tabelul 1. Compoziţia chimică şi proprietăţile de rezistenţă ale oţelurilor testate/
*Table 1. Chemical composition and tensile properties of tested steels*

| Oţel/*Steel* | Compoziţia chimică / *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 |

| | Proprietăţi mecanice/ *Mechanical properties* | | | |
|---|---|---|---|---|
| Oţel/*Steel* | YS [MPa] | UTS [MPa] | A [%] | Z [%] |
| A | 780 | 825 | 18 | 68 |
| B | 775 | 820 | 26 | 70 |

YS - Limita de curgere/ Y*ield strength,* UTS - Rezistenţa de rupere la tracţiune/ *Ultimate tensile strength,* A - Alungirea/ *Elongation,* Z - Gâtuirea la rupere/ *Reduction of cross section area*

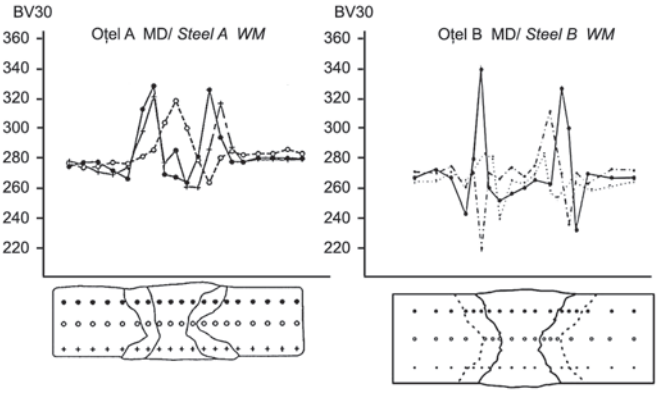



Figura 1: Rezultate ale măsurătorilor durităţii pe îmbinările sudate/
*Figure 1. Results of hardness measurements across welded joints*

Sudarea oţelului "A" a fost realizată utilizând electrodul învelit bazic Tenacito 80, "Oerlikon", Elveţia. Compoziţia chimică a Tenacito 80 este (%): C: 0,06; Si : 0,50; Mn: 1,80; Cr: 0,35; Ni : 2,20; Mo: 0,40

Limita de curgere a metalului depus cu Tenacito 80 este peste 750 MPa, rezistenţa sa de rupere la tracţiune de 810 până la 910 MPa, iar alungirea > 16 %.

Electrodul învelit bazic cu conţinut scăzut de hidrogen LB 118, produs de "Cobe Steel", din Japonia, a fost ales pentru sudarea oţelului "B". Compoziţia chimică a electrozilor LB 118 este (%): 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.

Welding of steel "A" has been performed using covered 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 all weld metal Tenacito 80 is above 750 MPa, its ultimate tensile strength 810 to 910 MPa, and elongation > 16 %.

The basic coated low hydrogen electrode LB 118, produced by "Cobe Steel", Japan, was selected for welding of steel "B". 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 all weld metal LB 118 is min 720 MPa, ultimate tensile strength min 820 MPa, elongation > 22%. Welded specimens were manufactured by approved welders according to the qualified procedures. Direction of welded joint was transverse to steel rolling direction. Mechanical properties of tested welded specimens are given in Table 2. Results of hardness measurements across welded joints are given in Figure 1 [8].

## Resistance to brittle fracture

Brittle fracture strength of both steels and their welded joints is evaluated by instrumented impact, explosion and fracture mechanics tests, performed with the specimens of BM, WM and HAZ.

Limita de curgere a tuturor metalelor depuse cu LB 118 este de minim 720 MPa, rezistența de rupere la tracțiune de minim 820 MPa, iar alungirea > 22%.

Eşantioanele sudate au fost realizate de sudori certificați, conform unor proceduri calificate. Direcția îmbinării sudate a fost transversală direcției de laminare a oțelului. Proprietățile mecanice ale probelor sudate testate sunt date în Tabelul 2

Rezultatele măsurătorilor de duritate ale îmbinărilor sudate sunt date în Figura 1 [8].

## Instrumented Charpy test

The conventional Charpy test measures the total energy absorbed in fracturing the specimen. Additional information can be obtained if the impact tester is instrumented to provide a load-time history of the specimen during the test [9]. Figure 2 shows an idealized load-time curve for an instrumented Charpy test. With this kind of record it is possible to determine the energy required for initiating fracture (crack) and the energy required

Tabelul 2. Rezultatele încercării îmbinărilor sudate: proprietăți ale rezistenței, unghiul de îndoire ghidată și duritatea/
*Table 2. Results of welded joints testing: tensile properties, guided bend angle and hardness*

| Oțel/ *Steel* | Îmbinare sudată / *Welded joint* | | Proprietăți de rezistență ale metalului de sudare/ *Weld metal tensile properties* | | | Probă de încovoiere/ *Bend test* [°] | | Duritatea/*Hardness* [HV 30] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | YS [MPa] | Poziția fisurii / *Fracture position* | YS [MPa] | UTS [MPa] | Z [%] | suprafață/ *face* | rădăcină/ *root* | ZIT/ *HAZ* | Sudură/ *Weld metal* |
| A | 800 | MD/*WM* | 750 | 810 | 16 | 180 | 180 | 260-330 | 258-290 |
| B | 761 | ZIT/*HAZ* | 796 | 848 | 22 | 180 | 180 | 220-334 | 255-275 |

YS - Limita de curgere/ Y*ield strength,* UTS - Rezistența de rupere la tracțiune / *Ultimate tensile strength,*
Z - Gâtuirea la rupere/ *Reduction of cross section area*

## Rezistența la rupere fragilă

Rezistența la ruperea fragilă a ambelor oțeluri şi a îmbinărilor sudate a fost evaluată prin încercări de încovoiere prin şoc, prin încercări la explozie şi mecanica ruperii efectuate pe eşantioane prelevate din MB, MD şi ZIT.

## Încercarea la încovoiere prin şoc instrumentată

Încercarea la încovoiere prin şoc convențională măsoară energia totală absorbită la ruperea epruvetei. Informații suplimentare pot fi obținute dacă operatorul care efectuează încercarea poate determina istoria solicitării în timp a epruvetei pe parcursul încercării [9]. Figura 2 prezintă o curbă idealizată **solicitare – timp** pentru o încercare Charpy instrumentată. Cu acest fel de înregistrare este posibilă determinarea energiei

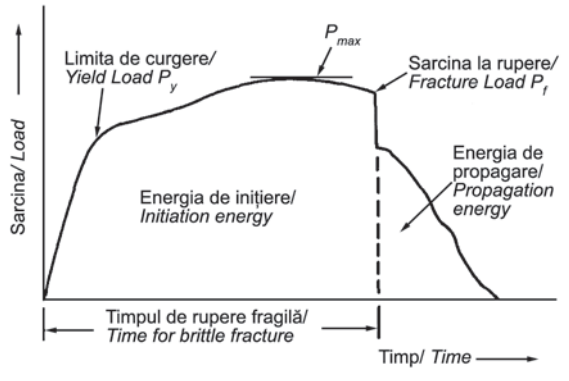



Figura 2. Graficul sarcină - timp pentru o încercare Charpy instrumentată/
*Figure 2. Load - time history for an instrumented Charpy test*

necesare inițierii fisurii şi a celei necesare propagării fisurii. Poate de asemenea transmite informații despre solicitarea inițierea curgerii,solicitarea maximă şi solicitarea la rupere.

Epruvetele Charpy V au fost încercate la temperaturi diferite folosind un echipament instrumentat. Epruvetele pentru oțelurile ''A" au fost tăiate în direcția de laminare (L) şi în cea transversală (C), cu crestăturile normale pe aceste direcții. Pentru

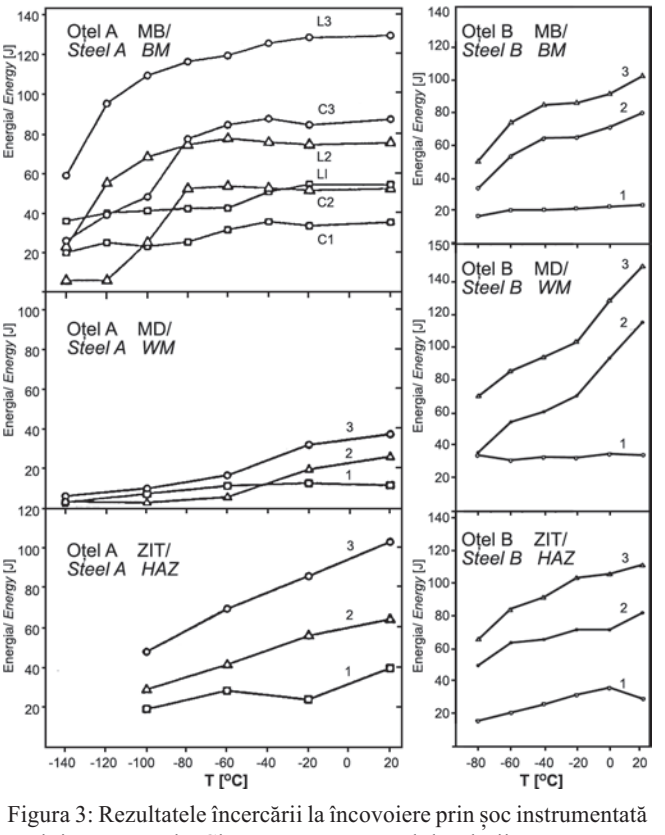



Figura 3: Rezultatele încercării la încovoiere prin șoc instrumentată obținute cu probe Charpy V: MD - metalul sudurii; ZIT - zona influențată termic; 1 - energia inițierii fisurii, 2 - energia propagării fisurii, 3 - energia totală; L - crestătura în direcție transversală; C - crestătura în direcția laminării
*Figure 3. Instrumented impact test results obtained with Charpy V specimen: WM- weld metal, HAZ - heat affected zone, 1 - crack initiation energy, 2 - crack propagation energy, 3 - total energy, L - notch in cross-rolling direction, C - notch in rolling direction*

for propagating fracture. It also yields information on the load for general yielding, the maximum load, and the fracture load.

Charpy V specimens were tested at different temperatures in the instrumented impact test. Parent plate specimens, for steels

oțelul ''B" au fost testate doar probele în direcția de laminare. Crestăturile în epruvetele sudate au fost poziționate în MD şi ZIT. Rezultatele tipice sunt prezentate în figura 3 [8].

## Încercarea la şoc cu viteze ridicate

Probabil principala deficiență a încercării la şoc de tip Charpy este că probele mici nu sunt reprezentative pentru structuri la scară naturală. Nu numai că proba mică duce la o eroare considerabilă, dar un eşantion cu o grosime de 10 mm nu poate să prezinte aceeaşi constrângere ca o structură cu o grosime mult mai mare. Situația care poate apare este prezentată în figura 4. La o anumită temperatură de lucru, proba Charpy standard prezintă o energie proprie ridicată, în timp ce, de fapt, acelaşi material într-o structură cu secțiune groasă poate avea o

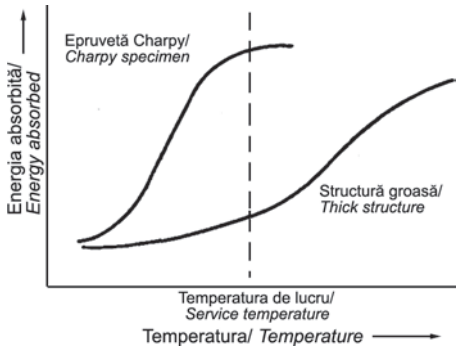



Figura 4. Efectul grosimii secțiunii asupra curbelor de tranziție - temperatură/
*Figure 4. Effect of section thickness on transition - temperature curves*

rezistenta semnificativ mai mică la aceeaşi temperatură. Cea mai logică abordare a acestei probleme o reprezintă dezvoltarea de teste capabile să opereze cu probe de grosimi mari (ex. încercarea de deformare prin explozie, încercarea Drop Weight test).

## Încercarea de deformare prin explozie

Nevoia de bază pentru probe mari a rezultat din incapacitatea de a produce ruperi în probele mici de laborator la tensiuni sub efortul de curgere total, cu toate că rupturile fragile în structurile navale apar la temperaturile de funcționare la nivelurile tensiunii elastice, după cum s-a observat în cazul navelor Liberty. Dezvoltarea acestor teste şi a metodei lor raționale de analiză a constituit subiectul cercetării lui Pellini [10] şi a colaboratorilor săi de la Laboratorul de Cercetare Navala.

Încercarea de deformare prin explozie, dezvoltat de Laboratorul de Cercetare Navală (NRL) al Satelor Unite pentru a studia problema ruperii fragile în oțeluri structurale şi utilizat în corpul navelor este prezentat în Figura 5. Suportul matriței (mecanismul) cu bază permite bombarea plăcii de încercare (proba) poziționate corespunzător. Încărcătura explozivă de masă şi putere specificată se aplică la o distanță determinată, obținută printr-o cutie de carton plasată peste placa de încercat. Realizarea testului este prezentată în dreapta. Rata ridicată de solicitare explozivă contribuie la ruptura fragilă a plăcii de testare.

Probele utilizate în încercarea la deformare prin explozie [11, 12] au fost de 500x500xd mm. O sudură fragilă a fost realizată în direcția de laminare a materialului de bază (MB) adică direcția metalului sudurii de încercat şi crestătura de inițiere a fisurii a fost normală la direcția sudurii. Dezvoltarea tipică a fisurii în

"A" were cut in the rolling (L) and in transverse direction (C) with notches normal to these directions. For steel "B" only the rolling direction specimens were tested. The notches in weldment specimens were positioned in WM and in HAZ. Typical results are presented in Figure 3 [8].

## High rate impact test

Probably the chief deficiency of the Charpy impact test is that the small specimen is not always a realistic model of the full scale structure. Not only does the small specimen lead to considerable scatter, but a specimen with thickness of 10 mm cannot provide the same constraint as would be found in a structure of much greater thickness. The situation that can result is shown in Figure 4. At a particular service temperature the standard Charpy specimen shows a high self energy, while actually the same material in a thick-section structure can have significantly lower toughness at the same temperature. The most logical approach to this problem is the development of tests that are capable of handling specimens of extended thickness (e.g. explosion bulge test, drop weight test).

## Explosion bulge test

The basic need for large specimens resulted from the inability to produce fracture in small laboratory specimens at stresses below gross yield stress, whereas brittle fractures in ship structures occur at service temperatures at elastic stress levels, as experienced with Liberty ships. The development of such tests and their rational method of analysis have been chiefly the work of Pellini [10] and his co-workers at the Naval Research Laboratory.

The explosion bulge test, developed in the U.S. Naval Research Laboratory (NRL), to study the problem of brittle fracture in structural steels used in welded ship hulls, is presented in Figure 5. Die support (rig) with the base allows bulging of properly positioned test plate (specimen). Cast explosive charge

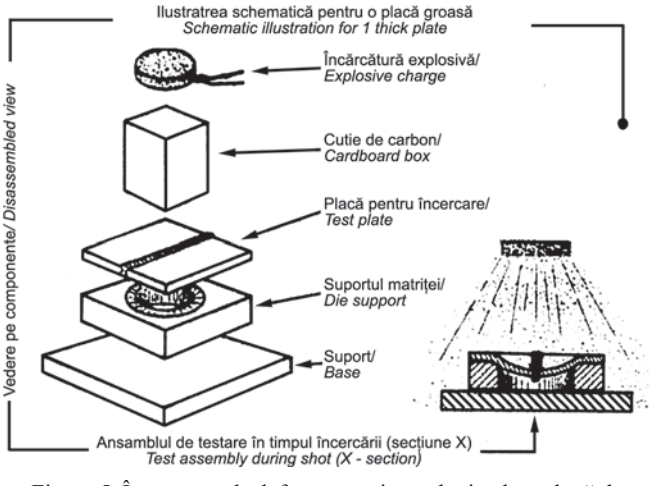



Figura 5. Încercarea de deformare prin explozie, dezvoltată de Laboratorul de Cercetare Navală (NRL) al Statelor Unite/
*Figure 5. Explosion bulge test, developed in the U.S. Naval Research Laboratory (NRL) [11, 13]*

of specified mass and power should be applied at a properly determined distance, obtained by a cardboard box over the test plate. Test assembly during shot is presented on the right. High rate of explosion loading contributes to brittle fracture of test plate.

probe de îmbinări sudate în timpul încercării la explozie este prezentată în figura 6. Rezultatele testelor sunt date în figura 7, exprimate prin dezvoltarea bombării B şi subţierea DR funcţie de numărul exploziilor.

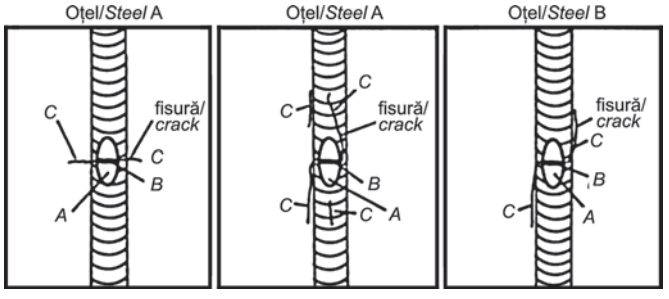



Figura 6. Schema propagării fisurii în încercarea de deformare prin explozie: A - protuberanţă fragilă; B - începutul fisurii; C - fisura/
*Figure 6. Scheme of crack propagation in explosion bulge test: A - brittle bead; B - notch-crack starter; C - crack*

## Încercarea „Drop-weight test”

Experienţa acumulată cu încercarea de deformare prin explozie la NRL a dus la dezvoltarea încercării de tip „Drop-weight ters”, cu intenţia de a aduna rezultate similare fără utilizarea exploziei. Energia pentru încercarea „Drop-weight test” (DWT) este obţinută din energia potenţială a masei care cade (greutatea). Datorită greutăţii semnificative a berbecului şi a înălţimii dispozitivului, se poate obţine mult mai multă energie decât cu pendulul Charpy. Iniţial, DWT a fost dezvoltat [13] conform cu determinarea temperaturii de ductilitate nulă (Nil Ductility Transition - NDT) pe plăci cu grosime mare. Simplitatea formei probei utilizate pentru încercarea DWT (figura 8), a aparaturii pentru aplicarea sarcinii şi a interpretării rezultatelor au contribuit la standardizarea şi utilizarea acestei încercări.

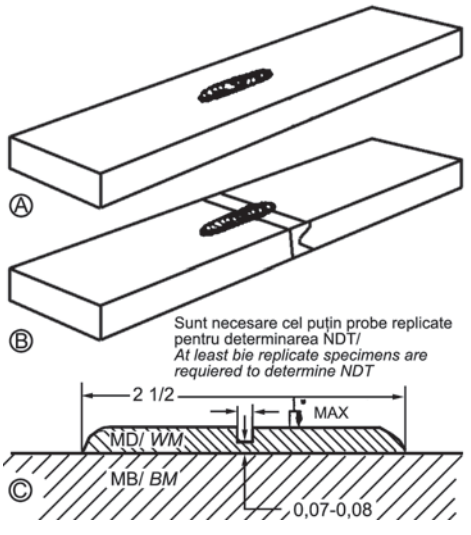



Figura 8. Proba pentru încercarea DWT/
*Figure 8. Drop weight test specimen*

Tensiunea aplicată epruvetei în timpul solicitării la şoc nu poate depăşi limitata de curgere datorită unui bloc de oprire ataşat nicovalei de sub probă. Aceasta reprezintă practic dispozitivul pentru evaluarea capacităţii oţelului de a se opune solicitării peste limita de curgere în condiţiile unei curgeri reduse.

Epruvetele pot fi tăiate oxi-gaz dintr-o placă de bază şi prelucrate ulterior. Când se pregătesc epruvete mai subţiri dintr-o

Explosion bulge test specimens [11, 12] were 500x500xd mm. Brittle bead was welded in the rolling direction of base metal (BM) i.e. direction of tested weld metal, and the notch as crack starter was normal to the bead direction. Typical development of crack in welded joint specimens during explosion tests is presented in Figure 6. Test results are given in Figure 7, expressed by bulge development B and thinning DR with explosions number.

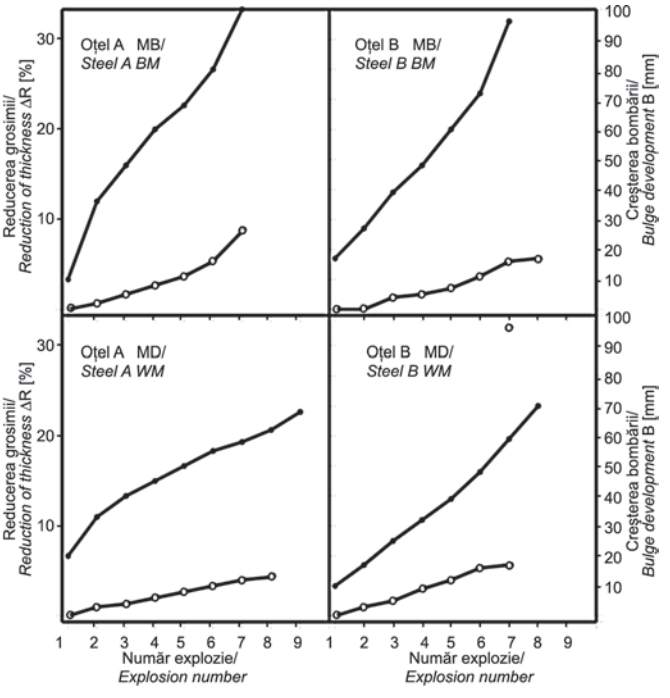



Figura 7. Rezultate tipice ale încercării de deformare prin explozie exprimate prin reducerea grosimii DR şi dezvoltarea protuberanţei B în funcţie de numărul de explozii/
*Figure 7. Typical results of explosion bulge test, expressed by reduction of thickness DR and bulge development B vs. number of explosions*

## Drop weight test

Experience gathered with the explosion bulge test in NRL has led to the development of drop-weight test, intended to obtain similar results avoiding the explosion. The energy for drop weight test (DWT) is obtained from potential energy of falling mass (weight). Due to significant weight of the tup and height of device, much more energy can be obtained compared to Charpy pendulum. Initially, DWT was developed [13] specifically for the determination of the Nil Ductility Transition (NDT) temperature on full thickness plates. The simplicity of the drop-weight test specimen (Figure 8), the apparatus for applying load and the interpretation of results, contributed to the wide use of this test and its standardization.

The stress applied to the specimen during the impact loading is limited to the yield point by a stopping block attached to the anvil below the specimen. This is the practical device for evaluating the ability of steel to withstand yield point loading in the presence of a small flow.

The specimens may be oxygen-cut from a parent plate and additonally machined. When thinner specimens are prepared from a very thick plate, the original rolled surface is to be employed on the welded (tension) face of the specimen. 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

placă foarte groasă, suprafața inițială rezultată din laminare trebuie utilizată pentru executarea sudurii (fața întinsă). Întrucât epruveta reprezintă o grindă lată încărcată print-o îndoire în trei puncte, solicitarea pe partea de întindere a plăcii este limitată la o valoare care nu depăşeşte limita de curgere. O parte mică a metalului fragil al sudurii, luată din testul lărgirii la explozie, gros de 15-25 mm, cu o dimensiune uzuală de 80x35mm, este depusă pe suprafața plăcii (figura 8).

Încercarea a fost realizată pentru verificarea secțiunilor structurale relativ grele şi nu este recomandată pentru probe de metal de bază cu grosimi sub 12,5 mm. O descriere completă a metodei standard pentru realizarea încercării NRL este prezentată în [13].

Temperaturile de tranziția la ductilitate zero, determinate pentru 50% din energia de impact Charpy şi din testul DWT sunt prezentate în tabelul 3. Temperatura de tranziție, determinată prin ambele metode indică cele mai ridicate valori pentru metalul sudurii.

Tabelul 3. Temperaturi de tranziție cu ductilitate zero/
*Table 3.Nil-ductility-transition temperatures* [°C]

| | | 50% energie de impact Charpy V/ *50% Charpy V impact energy* | Testul Drop-weight/ *Drop-weight test* |
|---|---|---|---|
| Oțel/ *Steel* A | L | -138 | |
| | C | -100 | -103 |
| | MD/*WM* | -52 | -85 |
| | ZIT/*HAZ* | -94 | |
| Oțel/ *Steel* B | L | >-80 | |
| | C | >-80 | -103 |
| | MD/*WM* | -79 | -100 |
| | ZIT/*HAZ* | >-80 | |

Tabelul 4. Integrala J critică $J_{Ic}$ și deplasarea la deschiderea fisurii $d_c$ pentru metalul de bază (MB) oțel A, metalul depus (MD) și zona influențată termic (ZIT)/
*Table 4. Critical J integral $J_{Ic}$ and critical crack-opening-displacement $d_c$ for base metal (BM) steel A, its weld metal (WM) and heat affected zone (HAZ)*

| | MB/*BM* | | | MD/*WM* | | | ZIT/*HAZ* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Integrala J critică/ *Critical J integral* $J_{Ic}$, [kN/m] | 195 | 209 | 257 | 94 | | 105 | 176 | | 320 |
| Deplasarea critică a deschiderii fisurii/ *Critical crack-opening displacement* $\delta_c$, [μm] | 63 | 85 | 103 | 66 | 80 | 90 | 167 | 183 | 208 |

## Încercări de mecanica ruperii

Parametrii mecanicii ruperii au fost testați pe epruvete SEN (B) cu secțiuni transversale de 14x28 mm pentru oțelul A, cu MD şi ZIT utilizând o singură probă $J_{Ic}$ conform standardului ASTM E 813. Deplasarea critică la deschiderea fisurii $d_c$ pentru

value that does not exceed yield stress. A short bead of brittle weld metal, taken from explosion bulge test, 15 to 25 mm thick, typically sized 80x350 mm, is deposited on the plate surface (Figure 8).

The drop-weight test was devised for testing relatively heavy structural sections, and is not recommended for base metal samples of thickness below 12.5 mm. A complete description of the standard method for conducting the NRL Drop-Weight Test is presented in [13].

Nill-ductility-transition temperatures, determined for 50% of upper self Charpy impact energy and of DWT test, are listed in Table 3. Transition temperature, determined by both methods, indicates the highest value for weld metal.

## Fracture mechanics test

Fracture mechanics parameters were tested on SEN (B) specimens 14x28 mm cross-section for steel "A", its WM and HAZ, using single specimen $J_{Ic}$ procedure according to standard ASTM E 813. Critical crack-opening displacement $d_c$ for maximal load could also be determined in this test. The results of fracture mechanics tests are listed in Table 4.

## Discussion

The obtained results can be considered from two standpoints. One of them is related to brittle fracture properties of welded joints constituents, the second is the comparison of three test methods.

Steel "A" impact toughness has satisfactory properties in both directions, and its behaviour at low temperatures is also satisfactory. Anyhow, this is not the case with its weld metal, because NDT temperature for impact energy of 27 J is only -25°C, higher than the value for 50% of upper self of Charpy energy. Heat-affected-zone in this test was found to be superior compared to weld metal.

For steel "B" of similar strength, impact energy values are satisfactory, as well as transition temperature. Higher impact values of WM compared to BM correspond to the alloy composition of consumable. The results for HAZ are comparable to BM results.

High quality of both steels and welded joint is proved in explosion bulge test. The cracks, emanated from brittle bead notch, are arrested in base metal (Figure 7a) in most specimens, and in some cases the fusion line of HAZ was the critical welded joint region as regards brittle fracture (Figure 7b). No significant difference was found comparing base metal and welded joint specimens, e.g. after sixth shot thinning and bulge developments were comparable (Figure 7a,b) for the same explosive charge. No significant difference was found comparing both steels and corresponding welded joints.

In all tested welded joint specimens fracture was limited to base metal, but there is a possibility of limited fracture in weld metal (Figure 4c), due to the lower strength of WM.

Hardness values in Figure 1 correspond to the expected levels for both (steel "A" and "B") welded joints, although some scatter in WM of steel "A" can be attributed to multipass welding.

The results of fracture mechanics tests (Table 4) show that best crack resistance is typical for HAZ, and the lowest for WM. Since the precise position of crack tip in HAZ cannot be defined (7), this behaviour can be considered as an average

sarcina maximă ar putea fi de asemenea determinata în acest test. Rezultatele încercărilor de mecanica ruperii sunt prezentate în tabelul 4.

## Discuție

Rezultatele obținute pot fi considerate din două puncte de vedere. Unul dintre ele este legat de proprietățile ruperii fragile a constituenților îmbinărilor sudate, al doilea de compararea celor trei metode de testare.

Rezistența la încovoiere prin şoca oțelului "A" prezintă valori satisfăcătoare în ambele direcții, iar comportamentul la temperaturi scăzute este de asemenea satisfăcător. Oricum, comportamentul nu este acelaşi cu cel al metalului depus prin sudare, deoarece temperatura NDT pentru energia de impact de 27J este de doar 25°C, mai mare decât valoarea pentru 50% din energia Charpy. Zona influențată termic în acest test a fost superioară comparativ cu metalul sudurii.

Pentru oțelul "B", de rezistență similară, valorile energiei de rupere la încovoiere prin şoc sunt satisfăcătoare, aşa cum este şi temperatura de tranziție. Valori mai mari ale MD comparativ cu MB corespund compoziției aliajului materialului de adaos. Rezultatele pentru ZIT sunt comparabile cu rezultatele pentru MB.

Atât pentru oțeluri, cât şi pentru îmbinarea sudată se constată o calitate ridicată în încercare de deformare prin explozie. Fisurile pornite de la crestătura depunerii fragile, se opresc în metalul de bază (figura 7a) în majoritatea probelor, iar în unele cazuri linia de fuziune a ZIT a fost regiunea critică a îmbinării sudate în ceea ce priveşte ruperea fragilă (figura 7b). Nu au fost găsite diferențe semnificative prin compararea probelor îmbinării sudate. Acestea au fost comparabile pentru aceeaşi încărcare explozivă după şase solicitări consecutive dezvoltări ale protuberanței (figura 7a,b). Nu au fost determinate diferențe semnificative între cele două oțeluri şi îmbinări sudate.

În toate probele de îmbinări sudate ruperea a fost limitată la metalul de bază, dar există posibilitatea unei rupturi limitate în materialul sudurii datorită rezistenței scăzute a MD (figura 4c).

Valorile durității din figura 1 corespund cu nivelurile aşteptate pentru oțeluri ("A" şi "B") şi pentru îmbinările sudate, deşi o anumită împrăştiere a valorilor în MD în oțelul "A" poate fi datorată sudurii cu mai multe treceri.

Rezultatele încercărilor de mecanica ruperii (tabelul 4) arată că cea mai bună rezistență la fisurare este tipică pentru ZIT, şi cea mai scăzută pentru MD. Întrucât poziția precisă a fisurii în ZIT nu poate fi definită, comportamentul său poate fi considerat un rezultat mediu. Comparativ cu rezultatele încercării la încovoiere prin şoc se pot găsi câteva neconcordanțe, întrucât acestea au prezentat cea mai bună rezistență în MB şi nu în ZIT. Vederea generală a fisurii, figura 7 b, c arată că ZIT poate fi regiunea critică, dar această concluzie poate fi cu greu descrisă prin încercările de mecanica ruperii sau prin încercarea la încovoiere prin şoc.

## Concluzii

În această lucrare se prezintă, pe două oțeluri HSLA, metoda de testare a rezistenței la rupere pentru oțeluri folosit la vasele sub presiune şi ale îmbinărilor sudate ale acestora.

Ținând cont de rezultatele obținute se poate concluziona că metodele aplicate pentru încercarea oțelurilor cu rezistență ridicată sunt selective. Pe de altă parte, rezultatele obținute prin utilizarea metodelor mecanicii ruperii şi a testului Charpy sunt comparabile cu rezultatele încercării de deformare prin explozie.

result. Comparing to impact test results, some disagreement can be found, since they have shown best resistance in BM, and not in HAZ. General view of fracture appearance, Figure 7 b, c, indicates that HAZ can be critical region, but this conclusion can scarcely be described by the fracture mechanics test, or impact test.

## Conclusions

In this paper the procedure for fracture resistance testing of steels for pressure vessels and its welded joints is presented and applied to two HSLA steels.

Taking into account the obtained results one can conclude that the applied procedures for testing of high strength steels are selective. On the other hand, results obtained by using fracture mechanics methods and Charpy test are compatible with the results of explosion bulge test. Also, the indication of the weakest region of welded joint, obtained by fracture mechanics laboratory testing or by Charpy test, has been verified by the experimental testing in high strain rate conditions.

It was concluded that applied testing methods do not exclude each other, since they produce complementary results, helping to understand better the brittle fracture behaviour of pressure vessel steels and their welded joints for different strain rates (quasi-static, impact and dynamic).

The introduced procedure can also be used for the selection of material and welded joint qualification.

## References

[1]. Instrumented Impact Testing, ASTMSTP 563, ASTM Philadelphia (1974).

[2]. Sedmak, S., Radović, A., Grabulov V., "The analysis of crack initiation/propagation energy ratio in steel at different temperatures", Structural Integrity and Life, 2(1-2), 5-10 (2002).

[3]. Popović, O., Sedmak, A., Trišović, N., "Material toughness assessment using different parameters obtained by Charpy pendulum", Structural Integrity and Life, 2(1-2), 29-38 (2002).

[4]. W.S.Pellini, Guidelines for fracture-safe and fatigue-reliable design of steel structures, The Welding Institute, Abington (1983).

[5]. Matthews, J. R. , Porter, J. F. , Church, J. and Macecek, M. , Welding J., 36, 35-41 (1991).

[6]. S.Sedmak, "Welded joint properties evaluation by cracked specimens testing", Fracture Mechanics of Weldments, Goša-TMF, Belgrade, 281-306 (1985).

[7]. Burzić, Z., Sedmak, S., Manjgo M., "Experimental evaluation of weldment fracture mechanics parameters", Structural Integrity and Life, 1(2), 97-105 (2001).

[8]. 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 degree thesis, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade (1986).

[9]. Fahey, N.H., "Impact Testing of Metals", ASTM Spec. Tech. Publ., 466, 76-92 (1970).

[10]. Pellini, W.S., Weld. J., 50, 915-1095, 147s-162s, (1971).

[11]. Standard Procedures for Explosion Testing Ferrous and Non-Ferrous Metallic Materials and Weldments, MIL-STD-2149 (SH), November 1983.

De asemenea, indicația asupra celei mai slabe regiuni a îmbinării sudate, obținute prin încercări mecanica ruperii, în laborator sau prin încercarea la încovoiere prin şoc, a fost verificată experimental în condiții de viteză de deformare ridicate.

S-a concluzionat că metodele de încercare aplicate nu se exclud reciproc, întrucât ele produc rezultate complementare, facilitând înțelegerea comportamentului la rupere fragilă a oțelurilor din vasele sub presiune şi din îmbinările sudate pentru diferite viteze ale deformării (cvasi-static, impact şi dinamic).

Metoda introdusă poate fi utilizată, de asemenea, pentru calificarea selectării materialului şi a îmbinărilor sudate.

[12]. Porte,J.F., Morehouse, D.O. şi Matthews,J.R., "Response of SMA and Narrow Gap HY80 Weldments to Explosive Shock Loading", DREA Technical Memorandum, 88/206, (1988).

[13]. Puzak, P.P., Pellini, W.S., NRL Rept. 5831, Aug. 21, 1962; ASTM Standards, pt. 31, pp. 582-601, Designation E208-69. (1969).

Lucrare prezentată la a 6-a conferință internațională "Integritatea structurală a construcțiilor sudate", Timișoara 5-6 noiembrie 2008/ *Paper presented a the 6th international conference „Structural integrity of welded structures", Timișoara, Romania, November 5-6, 2008.*

## Workshop

**Sistem armonizat de formare, calificare şi certificare a sudorilor cu arc electric pentru calea ferată**

*02 aprilie 2009, SC ICTCM SA, Str. Olteniței nr. 103, București*

- dezvoltarea unui sistem armonizat de formare, calificare şi certificare a sudorilor pentru calea ferată – sudare cu arc electric
- privire generală asupra standardelor pentru sudarea şinelor de cale ferată (EN 14730, pr.EN 15595 etc.)
- prezentarea şi discuții pe marginea ghidului pentru formarea, calificarea şi certificarea sudorilor cu arc electric pentru calea ferată

*Informații suplimentare: ing. Horia Dașcău (dascau@isim.ro)*

## Noi servicii oferite de ISIM TIMIŞOARA

### *Marcare / gravare cu fascicul laser*

ISIM Timişoara execută marcări / gravări pe toate tipurile de materiale metalice şi pe majoritatea materialelor plastice şi ceramice.

Lucrările sunt de precizie ridicată şi cu influență minimă asupra componentei prelucrate.

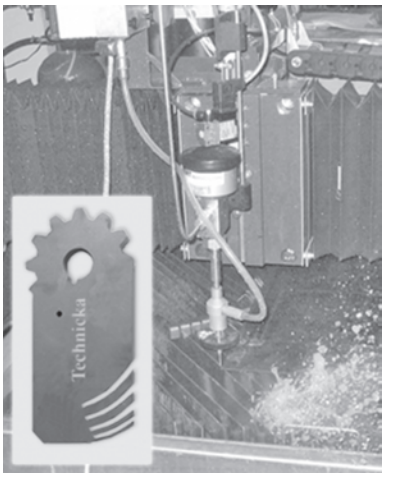
Dimensiunea maximă a unui marcaj / unei gravări: **110x110mm**.

Putem realiza:
- logo-uri,
- grafică,
- coduri de identificare,
- coduri de bare,
- matrice de date.

*Informații suplimentare: ing.fiz. Valentin Bîrdeanu, tel.: 0256 491828, 0256200222 int. 305, fax: 0256 492797, e-mail: valentin@isim.ro*

### *Tăiere cu jet de apă*

ISIM Timişoara efectuează lucrări de tăiere a materialelor metalice şi nemetalice cu durități mari, cum ar fi:
- oțel,
- titan,
- ceramice,
- sinterizate,
- sticlă,
- lemn,
- beton,
- marmură,
- materiale plastice etc., greu prelucrabile prin alte procedee.




Instalația de tăiere cu jet de apă şi abraziv, echipată cu un sistem CNC, permite tăierea pieselor ce au contururi complexe cu:
- grosimi între 1 şi 100mm,
- dimensiuni maxime de 1000x600mm.

*Informații suplimentare: ing. Dan Ionescu, tel.: 0256 491828 int. 141, fax: 0256 492797, e-mail: dionescu@isim.ro*

Efectul vitezei de încărcare