

## ŽILAVOST LOMA ZAVARENIH KOMERCIJALNIH DUPLEKS ČELIKA

### FRACTURE TOUGHNESS OF WELDED COMMERCIAL DUPLEX STAINLESS STEEL

Henrik Sieurin – Royal Institute of Technology, Sweden. Now at Det Norske Veritas, Norway

Elin M. Westin – Outokumpu Stainless, Sweden

Mats Liljas – Outokumpu Stainless, Sweden

Rolf Sandström – Royal Institute of Technology, Sweden

**Ključne reči:** Dupleks nerđajući čelici, zavarivanje, žilavost loma,  $K_{Jc}$ .

**Keywords:** Duplex stainless steel, Welding, Fracture toughness,  $K_{Jc}$ .

#### Izvod

Dupleks nerđajući čelici se uspešno koriste za izradu posuda pod pritiskom zbog visoke mehaničke čvrstoće kombinovane sa superiornom korozionom otpornošću. Postojale su razne debate o nivou žilavosti zavarenih spojeva na dupleks nerđajućim čelicima. Iz tog razloga su utvrđeni podaci o udarnoj i žilavosti loma na osnovnom materijalu debljine 30 mm i zavarenim spojevima dva komercijalna dupleks nerđajuća čelika; LDX 2101 (1.4162, UNS S32101) i 2304 (1.4362, UNS 32304). Zavareni spojevi su izvedeni postupkom zavarivanja punjenom žicom (FCAW) i date su rezultujuće mikrostrukturne i mehaničke osobine. One pokazuju da oba čelika imaju visoke vrednosti žilavosti loma i kao osnovni materijal i kao zavareni spoj, nasuprot onome, što je pre bilo zapaženo kod najčešće korišćene klase 2205 (1.4462, UNS S31803). Podaci za žilavost loma su određeni preko kontrolne krive koja daje referencu za temperaturu koja karakteriše prslinu usled cepanja. Referentne temperature su bile ispod  $-100^{\circ}\text{C}$  za osnovne materijale i oko  $-100^{\circ}\text{C}$  za zavarene spojeve. Uspostavljene su relacije koje su korišćene za korelaciju prelazne temperature udarne i žilavosti loma. Rezultati verifikuju to da ovi čelici imaju zadovoljavajuće osobine žilavosti loma i da se one mogu predvideti iz podataka za udarnu žilavost.

#### UVOD

Mnoštvo radova je dokazalo povoljne rezultate kompozicija materijala dve ili više faza, pri čemu je feritno austenitni ili dupleks nerđajući čelik jedan odličan primer. Dupleks čelici sadrže približno jednake udele ferita i austenita kombinujući dobre osobine obe faze.

Visoka otpornost na opštu koroziju i velika žilavost na niskim temperaturama su postignuti zahvaljujući austenitu, dok ferit doprinosi povećanjem čvrstoće i otpornosti na pojavu prslina usled naponske korozije. Visoka čvrstoća u poređenju sa austenitnim klasama čelika, znači da se mogu koristiti manje debljine zida, što doprinosi smanjenju troškova materijala, vremena zavarivanja, transportne težine, ekološkog udara; kao i uštedi energije i potrošnog materijala. Međutim, da bi se u potpunosti koristile pogodnosti čvrstoće, moraju se poštovati odgovarajuća pravila projektovanja. U principu, evropski kod je zasnovan na oba minimuma, naponu tečenja i zateznoj čvrstoći. Na žalost, faktor sigurnosti za zateznu čvrstoću je nepotrebno velik, što je ponekad ograničenje za dupleks nerđajuće čelike.

Kod posuda pod pritiskom postoje dodatni zahtevi za žilavost loma, da bi se izbegao krti lom. Kako dupleks čelici pokazuju manju duktilnost nego austenitni, oni se ne mogu tretirati na isti način. Zbog nepostojanja adekvatnog standarda, dupleks čelici se tretiraju kao feritni čelici što pokazuje jasna kriva prelazne temperature iz duktilnog u krti stanje u nekim temperaturnim opsezima. Zavarivanje može da poveća prelaznu temperature što rezultuje u lokalnom smanjenju duktilnosti na niskim temperaturama. Žilavost dupleks zavarenih spojeva se može smanjiti pri visokom sadržaju ferita [1]. Jednaki udeli austenita i ferita ostaju, korišćenjem odgovarajućih parametara zavarivanja i pogodnog dodatnog materijala, često više legiranog niklom [2]. Feritna frakcija loše utiče na žilavost dupleks nerđajućeg čelika, ali su iskustva iz studija udarne žilavosti ograničena. Radi postizanja visoke čvrstoće pri projektovanju posuda pod pritiskom od dupleks čelika, od najvećeg je značaja da se potvrdi vrlo velika žilavost radi izbegavanja rizika od loma.

Udarnu žilavost dupleks čelika klase 2205 (1.4462, UNS S31803/S32205) su pratili Dhooge i Deleu [3-6], Wiesner [7], i Sieurin i Sandström [8]. Test otvaranja prslina (CTOD) je potvrdio veliku žilavost loma i za osnovni materijal i za

metal šava dobijen različitim postupcima zavarivanja. Sieurin i Sandström [8] su napravili korelaciju između žilavosti loma i udarne žilavosti preko referentne temperature koje je razvio Wallin [9]. Wallinova kontrolna kriva je baza za američki standard za ispitivanje i analizu ASTM E1921-97 [10]. On određuje žilavost loma u prelaznoj oblasti krto-žilavo, kada referentna temperatura,  $T_0$ , karakteriše početak prslina cepanjem u elastičnom i /ili elastičnom plus nestabilnom plastičnom području. Ericsson i dr. [11] su pokazali da prelazna temperatura raste sa porastom debljine eperuvete. Podaci iz radova Sieurin i Sandström [8] su bili korišćeni radi uključenja dupleks čelika visoke čvrstoće pri reviziji standarda za posude pod pritiskom EN 13445. Ovo je diskutovano u drugom radu tokom ove konferencije [12].

Raznolikost dupleks čelika je velika, tako da je to razlog značaja ocenjivanja ponašanja pri lomu i kod drugih klasa ovih čelika sem klase 2205. Kako su oscilacije u ceni nikla velike, one imaju veliki uticaj na kasnije troškove materijala, tako da je od interesa da se zamene austenitne klase niskolegiranim dupleks nerđajućim čelicima kod kojih je moguće postići visoku čvrstoću. Dupleks nerđajući čelik 2304 (1.4362, UNS 32304) ima potencijal da zameni 316; dok se često 304 može zameniti sa kasnije razvijenim čelikom LDX 2101 (1.4162, UNS S32101). U ovom čeliku nikl, koji ima dokazan pozitivan efekat na žilavost na niskim temperaturama može biti delimično zamenjen manganom i azotom. Ovo povećava značaj određivanja osobina žilavosti loma. Cilj ovog rada je da potvrdi da nerđajući čelici LDX 2101 i 2304 pokazuju dovoljnu žilavost loma i kod osnovnog materijala i kod metala šava, a takođe i to da se udarna žilavost može koristiti za ocenu žilavosti loma.

## EKSPERIMENT

U tabeli 1 je pokazan sastav materijala dve klase dupleks čelika debljine 30 mm, a koji su korišćeni u ovom radu.

Termička obrada LDX 2101 i 2304 izvedena je na 1100°C i 1050°C, praćena gašenjem u vodi.

**Tabela 1:** Sastav materijala, tež. %.

Material	Cr	Ni	Mo	Mn	N	C	Si	P	S	Cu
LDX 2101	21.5	1.60	0.29	4.92	0.23	0.032	0.66	0.025	0.001	0.28
2304	22.7	4.69	0.31	1.44	0.10	0.020	0.50	0.026	0.001	0.25

Zavareni elementi su ostvareni duplim V žlebom, postupkom ručnog elektrolučnog zavarivanja (SMAW) za koren i punjenom žicom (FCAW) za ostale prolaze popune u podužnom pravcu. Sastav dodatnog materijala je prikazan u tabeli 2, a parametri zavarivanja u tabeli 3. Dodatni materijal ima nikla u cilju stabilizacije austenitne faze kao i za povećanje žilavosti.

**Tabela 2:** Dodatni materijali i njihov hemijski sastav, tež. %

Filler	Method	Ø, mm	Cr	Ni	Mo	Mn	N	C	Si	P	S	Cu
LDX 2101	SMAW	3.25	24.9	8.97	0.13	0.83	0.13	0.020	0.61	0.019	0.011	0.078
LDX 2101	FCAW	1.2	24.1	7.35	0.21	0.69	0.13	0.045	0.72	0.032	0.012	0.220
2304	SMAW	3.25	24.6	9.13	0.13	0.78	0.141	0.025	0.77	0.020	0.025	0.10
2304	FCAW	1.2	24.8	8.95	0.12	0.80	0.123	0.021	0.60	0.018	0.012	0.07

**Tabela 3:** Parametri zavarivanja LDX 2101 i 2304 čelika

Parametri	LDX 2101		2304	
	SMAW	FCAW*	SMAW	FCAW*
Jačina struje, A	117	231-260	224-233	225-240
Napon luka, V	28	31	31	31
Brzina zavarivanja, mm/s	3,7	4,5-6,0	4,8-6,0	4,2-6,2
Količina unite toplote kJ/mm	0,9	1,3-1,6	1,2-1,6	1,2-1,7

\*Zaštitni gas  $Ar+CO_2+0,03NO$  sa brzinom protoka 20-25 l/min

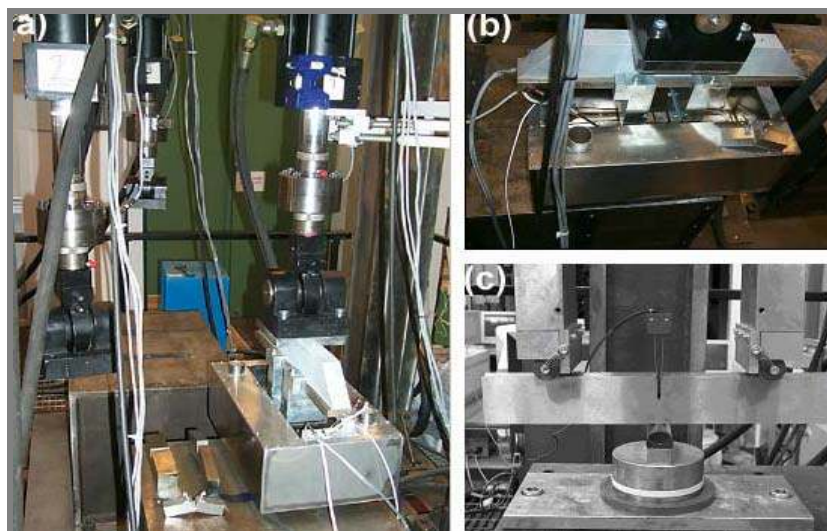
Poprečni preseki zavarenih spojeva su ispolirani do ogledalastog sjaja sa  $SiO_2$  u poslednjem koraku. Fazne frakcije su nagrižene modifikovanim Beraha II rastvorom (60 ml  $H_2O$  + 30 ml  $HCl$  + 1 g  $K_2S_2O_5$ ) i sadržaj ferita je određen analizom slike. Tvrdoca je određena prema Vickers- mikrotvrdoći sa opterećenjem od 0.5 kg. Ispitivanje zatezanjem

popreko na šav, je sprovedeno na epruvetama tipa DF13 u saglasnosti sa evropskim standardom EN 10002-1 [13] i ASTM A370 [14].

Ispitivanje savijanjem je sprovedeno na obrušanim spojevima do ugla od 180° korišćenjem trna prečnika 3t prema ASTM E 290-97a [15]. Ispitivanje udarne žilavosti na različitim temperaturama je sprovedeno na epruvetama sa V-zarezom punim presekom prema Šarpiju u osnovnom materijalu i metalu šava prema EN 10045-1 [16].

Žilavost loma je ispitana na opremi sa fiksiranim opterećenjem u tri tačke i kutijom za hlađenje, specijalno konstruisanu za ispitivanje žilavosti loma, slika 1a. Kutija je ispunjena alkoholom i sadrži komore za tečni azot, slika 1b. Alkohol se meša i može se hladiti do približno -110°C. Više informacija koje se odnose na ispitnu opremu i sistem kontrole može se naći u tezi Sieurin-a [17].

Epruveta za savijanje u tri tačke sa i dodatnim meračem može se videti na sl.1c. Geometrija ispitne epruvete je 30×60×400 mm. Zarezi su mašinski obrađeni sa poprečno-podužnom orijentacijom sa dva zarezu u poprečnoj ravni u podužnom pravcu, utičući da prsline rastu duž izdužene mikrostrukture u pravcu valjanja. Sve epruvete su sa jednostranim ivicama-zarezima pune debljine šipki. Epruvete su prethodno podvrgnute zamoru na sobnoj temperaturi, prema ASTM E 813-89 [18], stvarajući prsline dužine, približno 1.5 mm. Stranice žleba su mašinski obrađene pre predzamaranja sa ciljem forsiranja ispravnog rasta prsline tokom završnog testa. Dubina svake stranice žleba bila je 10% debljine. Rastojanje između spoljnih tačaka opterećenja epruveta za savijanje u tri tačke je 270 mm. Epruvete su podvrgnute rastućoj monotonnoj sili sa brzinom porasta širenja od 0.1 mm/s, dok se sila i brzina otvaranja prsline (CMOD) u tački na kojoj se javi širenje krte prsline, beleže na zapisu rasta opterećenja a može se javiti plato maksimalne sile koji je povećan ili diskontinualan (takozvani "zastoj").



**Slika 1:** Laboratorijska oprema i tip epruvete za savijanje u tri tačke korišćeni za ispitivanje loma (a) Deo ispitne opreme (b) Kutija za hlađenje vidljiva iznad (c) Epruveta za savijanje u tri tačke sa meračem za merenje CMOD.

Ispitivanje žilavosti loma je zasnovano na ASTM E1921-97 [10]. Ova metoda je originalno razvijena za feritne čelike, ali kako ferit kontroliše ponašanje pri lomu u dupleks čelicima, ispitna metoda se pokazala primenljivom i za ove čelike [8,19]. Metoda kontrolne krive uključuje postavke elasto-plastične teorije i određivanje referentne temperature, koja karakteriše početak prsline usled cepanja [20]. J-integral opisuje brzinu otpuštanja energije za ne-linearno elastične materijale (uključujući dupleks nerđajuće čelike) i udeo energije koji se zahteva za iniciranje i rast prsline. Za određivanje J-integrala, epruveta se opterećuje dok se CMOD meri kontinualno. Površina krive sila -CMOD daje udeo energije koji se zahteva za lom i kritični J-integral,  $J_C$  [10] je određen na "zastoj" ili kada je porastao maksimum platoa sile. "Zastoj" u ovom slučaju je označen odstupanjem u zapisu sila-CMOD kao mali privremeni pad sile. Vrednost  $J_C$  je korišćena za izračunavanje faktora intenziteta elasto-plastičnog napona  $K_{J_C}$ , koji karakteriše lom posle više ili manje izraženog duktilnog rasta prsline. Vrednosti  $K_{J_C}$  ustanovljeni iz ispitne serije korišćeni su za određivanje prelazne temperature,  $T_0$ , koja odgovara srednjoj žilavosti loma od 100 MPa $\sqrt{m}$  za epruvetu debljine 25 mm. Vrednost  $T_0$  se dobija prema jednačini 1:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i \exp\{0.019[T_i - T_0]\}}{11 + 77 \exp\{0.019[T_i - T_0]\}} - \sum_{i=1}^n \frac{(K_{J_C} - 20)^4 \times \exp\{0.019[T_i - T_0]\}}{11 + 77 \exp\{0.019[T_i - T_0]\}^5} = 0 \quad 1)$$

Gde je  $\delta$  korekcionni parametar, koji je 1 za nekorigovane podatke i 0 za korigovane podatke [10]. Svi podaci u ovoj studiji su nekorigovani. Referentna temperatura koja je korišćena za utvrđivanje krive prelazne temperature je kontrolna kriva, jednačina 2:

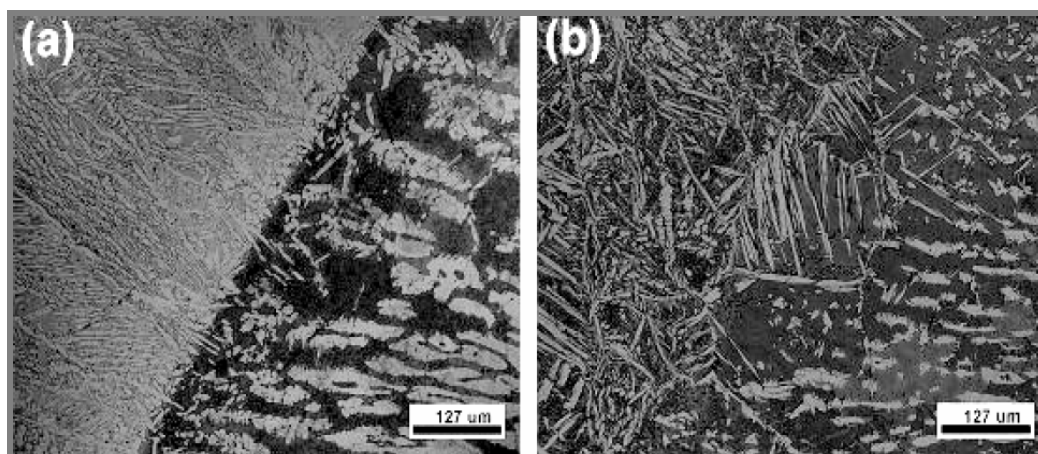
$$K_{JC} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \quad 2)$$

Osnovni materijal i metal šava su ispitivani u opsegu temperature od  $-30^\circ\text{C}$  do  $-112^\circ\text{C}$ . Sveobuhvatna brzina pomeranja vrha prsline (CTOD) je izračunata prema ASTM E 1820-99a [21]. Ovo je prethodno opisano u radovima Sieurin-a i Sandström-a [8].

## REZULTATI

### Mikrostruktura i mehaničke osobine

Slika 2 ilustruje mikrostrukturu u metalu šava, u zoni uticaja toplote (HAZ) i osnovnom materijalu. Reagens za nagrizanje boji ferit u tamno, za razliku od svetlog austenita. Austenit u osnovnom materijalu je u podužnom pravcu i mikrostruktura u LDX 2101 je nešto grublja nego u 2304. Austenit u osnovnom materijalu je raspoređen kao letvice u feritnoj; dok je u metalu šava uglavnom prisutan po granicama zrna i kao Widmanstätten-ove ravni urastajući u zrna. Mikrostruktura metala šava je bila grublja kod 2304 nego kod LDX 2101. 2304 je mnogo osetljiviji na rast zrna uzrokujući duža zrna u ZUT i kao posledicu u metalu šava. Intergranularni austenit je nastao usled ponovnog zagrevanja narednim slojevima zavara. Udeo taloga hrom nitrida je vrlo mali. Izvesna zanemarljiva poroznost i uključci troske nađeni su u metalu šava.



**Slika 2:** Mikrostruktura prelaza iz metala šava (levo) u osnovni materijal (desno) u podužnoj ravni za (a) LDX 2101 i (b) 2304

Mehaničke osobine u poprečnom pravcu, osnovnog materijala date su u tabeli 4. Čvrstoća materijala raste, a plastičnost opada sa sniženjem temperature, što je bilo uporedivo sa 2205 [8]. LDX 2101 ima nešto veću čvrstoću nego 2304, što je u osnovi vezano za veći sadržaj azota.

Mehaničke osobine u poprečnom pravcu zavarenih materijala, sadržaj ferita u metalu šava; rezultati mikrotvrdoće po Vickersu i ispitivanja savijanjem mogu se naći u tabeli 5.

**Tabela 4:** Rezultati ispitivanja zatezanjem osnovnih materijala na različitim temperaturama

Temperature, °C	LDX 2101				2304			
	Rp <sub>0.2</sub> , MPa	Rp <sub>1.0</sub> , MPa	Rm, MPa	A <sub>50</sub> , %	Rp <sub>0.2</sub> , MPa	Rp <sub>1.0</sub> , MPa	Rm, MPa	A <sub>50</sub> , %
20	488	549	694	39	463	524	670	36
0	529	590	724	39	496	554	689	35
-40	585	653	762	26	554	591	721	30
-70	642	710	796	19	616	640	726	24
-100	692	775	832	11	632	661	745	22

U tabeli 4,  $R_{p0.2}$  je napon tečenja određen pri 0.2% deformacije,  $R_{p1.0}$  je napon tečenja određen pri 1% deformacije i  $R_m$  je zatezna čvrstoća, sve dato u MPa.  $A_{50}$  je definisano kao izduženje u % pri lomu sa izraženim izduženjem vezanim za modul elastičnosti pri tom naponu, mereno i izračunato na 50 mm merne dužine.

**Tabela 5:** Ispitivanje zatezanjem, merenje ferita; ispitivanje tvrdoće i savijanjem sprovedenim na sobnoj temperaturi na zavarenom LDX 2101 i 2304

Duplex grade	$R_{p0.2}$ , MPa	$R_{p1.0}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_{50}$ , %	Ferrite, %		Hardness, HV0.5			Bendability test
					BM	WM	BM	HAZ	WM	
LDX 2101	515	569	697	37	55 ± 4	45 ± 6	260 ± 13	274 ± 5	267 ± 8	OK
2304	511	560	683	34	52 ± 2	44 ± 9	239 ± 3	249 ± 8	244 ± 3	OK

Sve zavarene epruvete za zatezanje pukle su na osnovnom materijalu. Čvrstoća metala šava je bila veća u poređenju sa osnovnim, uz blago smanjenje izduženja. Sadržaj ferita posle žarenja i gašenja (kao u uslovima isporuke) su 55 ± 4% u LDX 2101 i 52 ± 2% u 2304. Feritna frakcija je nešto manja u metalu šava zbog ekstenzivnog ponovnog nastajanja austenita i donekle stvaranja sekundarnog. Merenja tvrdoće su pokazala da nema velikih razlika kroz poprečni presek zavarenog spoja. LDX 2101 je međutim, tvrdi nego 2304 i sa nešto većom čvrstoćom. Ovo može biti u vezi sa finijim zrnom i većim sadržajem azota u metalu šava LDX 2101. Svi uzorci podvrgnuti ispitivanju savijanjem su bili bez defekata.

### Žilavost

Rezultati udarne žilavosti za metal šava i osnovni materijal dati su u tabeli 6. .

**Tabela 6:** Srednje vrednosti udarne žilavosti u osnovnom materijalu (BM) i metalu šava (WM) na različitim temperaturama

Temperature, °C	2304		LDX 2101	
	BM, J	WM, J	BM, J	WM, J
20	270	59	133	51
0	243	55	95	52
-20	246	52	79	49
-40	238	47	41	46
-60	152	43	39	37
-80	77	35	21	30
-100	69	21	15	26

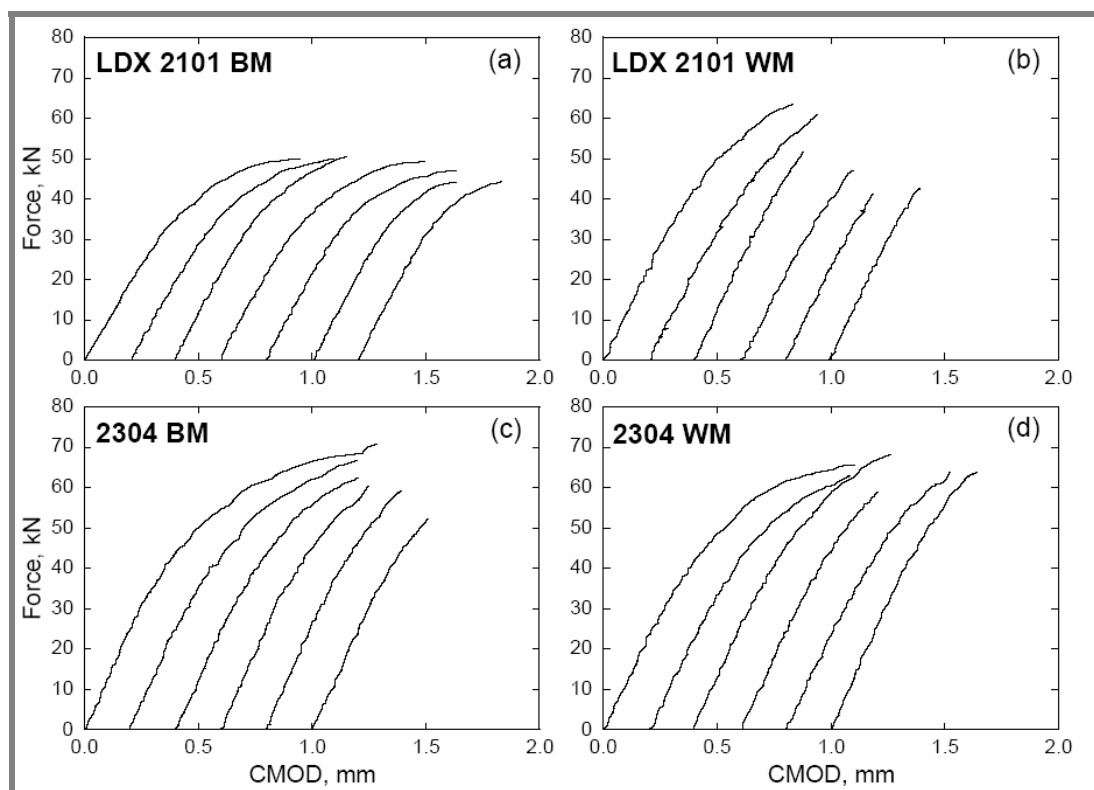
Osnovni materijal 2304 ima veću udarnu žilavost nego LDX 2101 kao rezultat većeg sadržaja nikla i finije mikrostrukture, dok metal šava ima uporedive vrednosti zavisno od sličnosti završnog sastava. Velika razlika između osnovnog materijala i metala šava kod 2304 može delom biti u korelaciji sa grubljim zrnom u metalu šava. Odgovarajuće temperature gde je vrednost od 40J je  $T_{40J}$  i 27J je  $T_{27J}$  date su u tabeli 7. Temperature su određene podešavanjem polinomnih krivih sa najmanje kvadratom rastojanja do tačaka sa podacima. Kao što će se kasnije diskutovati, vrednost  $T_{27J}$  je korišćena za određivanje referentne temperature lomne žilavosti. Najveća razlika vrednosti  $T_{27J}$  je uočena kod LDX 2101 osnovnog materijala i metala šava.

**Tabela 7:** Temperature za udarnu žilavost od 27J i 40J na osnovnom materijalu (BM) i metalu šava (WM)

Material	Position	$T_{27J}$ , °C	$T_{40J}$ , °C
LDX 2101	BM	-70	-51
LDX 2101	WM	-93	-54
2304	BM	-106	-102
2304	WM	-92	-62

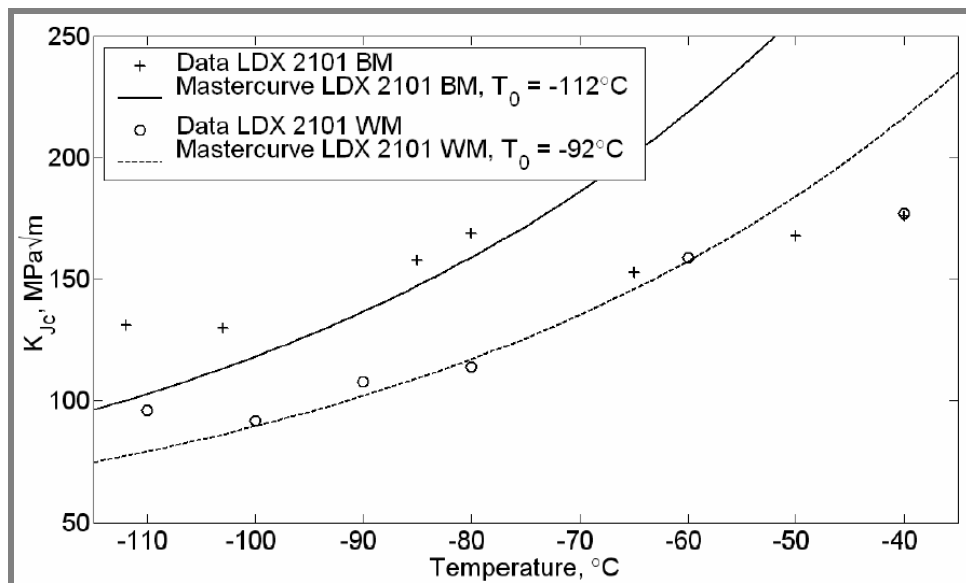
Zapis sila-CMOD za osnovni materijal i metal šava pri ispitivanju žilavosti loma dati su na slici 3.

Posle povećanja do maksimalnog platoa sila u osnovnom materijalu, sila opadaju uz povećanje CMOD. Međutim, "zastoji" su bili kritični čak i za određivanje kod osnovnog materijala. Ovo odgovara maksimalnoj sili i bilo je teško zapaziti ga zbog ograničene veličine. Lomovi u čistom metalu šava su bili krivi posle nešto plastične deformacije i samo sporadično su epruvete pokazale "zastoj". Plastični deo krivih sila-CMOD su najizraženije na najvišim temperaturama ispitivanja.

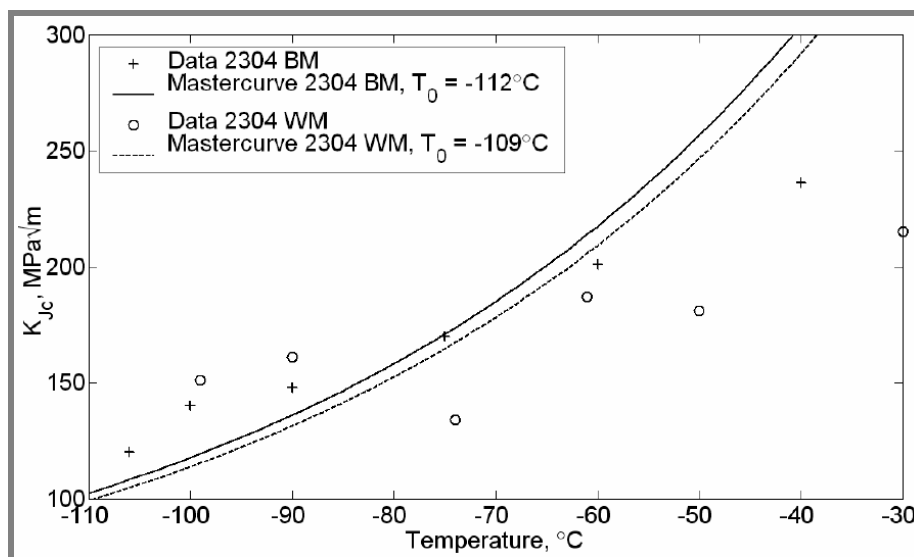


**Slika 3:** Zapisi sila - (CMOD) tokom ispitivanja žilavosti loma. Krive su na platou maksimalne sile ili "zastoju" (a) LDX 2101 osnovni materijal [19]. Ispitne temperature s desna u levo su bile  $-40, -50, -65, -80, -85, -103$  i  $-112^{\circ}\text{C}$ . (b) LDX 2101 metal šava [19]. Ispitne temperature s desna u levo su bile  $-40, -50, -65, -80, -85, -103$  i  $-112^{\circ}\text{C}$ . (c) 2304 osnovni materijal Ispitne temperature s desna u levo su bile  $-40, -60, -75, -90, -100$  i  $-106^{\circ}\text{C}$ . (d) 2304 metal šava. Ispitne temperature s desna u levo su bile  $-30, -50, -61, -74, -90$  i  $-99^{\circ}\text{C}$ . Krive su isprekidane na kritičnoj tački radi ocene. Svaka kriva je pomerana za 0,2 mm radi bolje vidljivosti

Rezultati žilavosti loma LDX 2101 i 2304 osnovnih materijala i metala šava prikazani su na slikama 4 i 5.



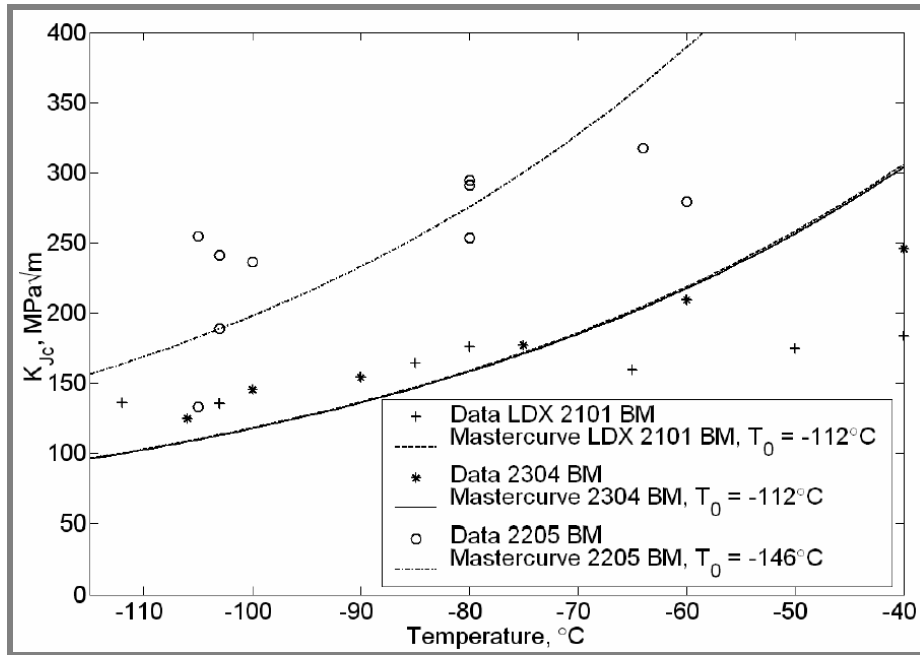
**Slika 4:** Podaci za žilavost loma ( $K_{IC}$ ) i odgovarajuće kontrolne krive za LDX 2101 osnovni materijal i metal šava [19]



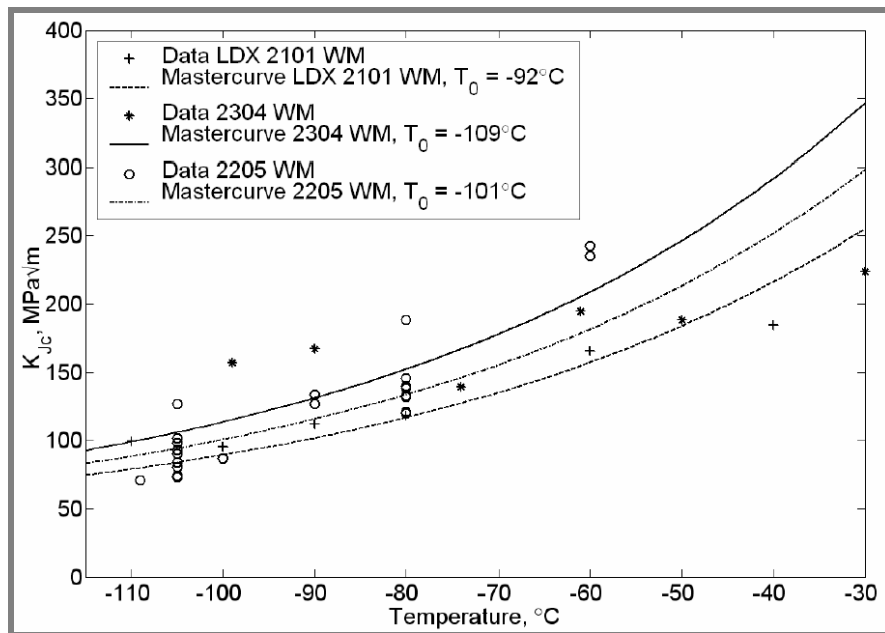
**Slika 5:** Podaci za žilavost loma ( $K_{IC}$ ) i odgovarajuće kontrolne krive za 2304 osnovni materijal i metal šava

Referentne temperature za LDX 2101 su bile  $-112^{\circ}\text{C}$  i  $-92^{\circ}\text{C}$  za osnovni materijal i metal šava. Odstupanje od referentne krive je bilo nešto veće za osnovni materijal, posebno kod epruveta ispitanih na najvišim temperaturama. Međutim, žilavost je bila veća na svim ispitnim temperaturama i rasipanje je bilo manje nego u prethodnim studijama [8]. Podaci za metal šava su u saglasnosti sa kontrolnom krivom tako da je žilavost bila zadovoljavajuća. Osnovni materijal i metal šava 2304 pokazao je uporedivu žilavost loma pri referentnim temperaturama od  $-112^{\circ}\text{C}$  i  $-109^{\circ}\text{C}$ . Podaci za žilavost loma obično daju veliko rasipanje ali prema kontrolnoj krivoj rezultati za osnovni materijal su dobri, dok za metal šava pokazuju veće rasipanje. Kriva je dizajnirana tako da daje konzervativne vrednosti na niskoj temperaturi i tako da se preciznost za veće žilavosti moraju uzeti sa manjom sigurnošću.

Upoređenje žilavosti loma LDX 2101 [19] i 2304 sa 2205 [8] dato je na slikama 6 i 7. Referentna temperatura za osnovni materijal je bila ista za LDX 2101 i 2304 osnovni materijal,  $31^{\circ}\text{C}$  veća nego za 2205. Referentna temperatura za metal šava je bila veća za sve materijale sa najvećom razlikom kod šavova od 2205.



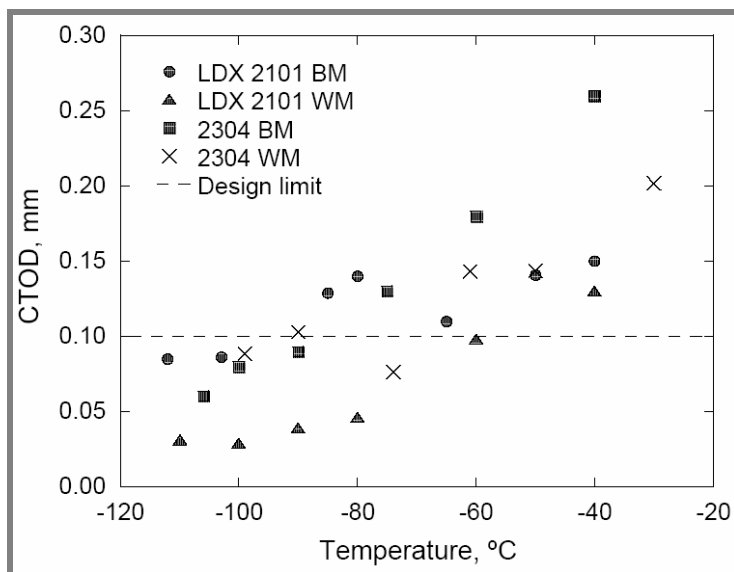
Slika 6: Podaci i kontrolna kriva za žilavost loma kod LDX 2101 [19] i 2304 u odnosu na osnovni materijal 2205 [8]



Slika 7: Podaci i kontrolna kriva za žilavost loma kod LDX 2101 [19] i 2304 u odnosu na metal šava 2205 [8]

Na slici 8 prikazano je izračunavanje CTOD za LDX 2101 i 2304 osnovni materijal i metal šava. Wiesner [7] je preporučio minimalnu vrednost za CTOD od 0,1 mm kao minimalnu proračunsku granicu.





Slika 8: Merenje CTOD za LDX 2101 i 2304 osnovni materijal i metal šava. Isprekidana linija predstavlja zahtev minimalne CTOD [7]

## DISKUSIJA

### Žilavost loma

Ispitivanje udarne ili žilavosti loma se može koristiti za ocenu ponašanja materijala pri lomu. Ispitivanje žilavosti loma je mnogo skuplje. Jednačina 3 pokazuje statističku korelaciju između žilavosti loma i udarne žilavosti koju je odredio Wallin [22] posle ispitivanja 141 čelika sa naponom tečenja u rasponu od 300 do 1000 MPa. Referentna temperatura žilavosti loma  $T_0$  može se proceniti ako je poznat podatak za prelaznu temperature pri udaru,  $T_{27J}$ , ustanovljenu pri Šarpi-V ispitivanju.

$$T_0 = T_{27J} - 18 \quad 3)$$

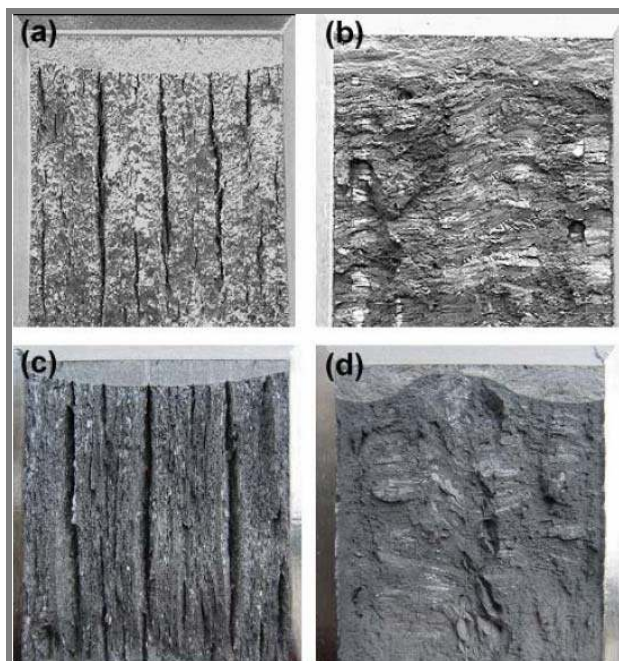
$T_0$  je temperatura gde je  $K_{JC}$  100 MPa $\sqrt{m}$ , a  $T_{27J}$  je prelazna temperature kod energije udara od 27J. Ispitivanje udarne žilavosti u ovom radu dalo je vrednost za  $T_{27J}$  od -70°C do -106°C; tako da je rezultat izračunate  $T_0$  između -88°C i -124°C. Rezultati za  $T_0$  pri ispitivanju žilavosti loma su bili između -92°C i -112°C što pokazuje dobru usaglašenost sa jednačinom 3.

Vrednosti  $T_0$  za LDX 2101 i 2304 metal šava su u saglasnosti sa prethodnim rezultatima dobijenim za metal šava 2205 [8], dok osnovni materijali LDX 2101 i 2304 pokazuju manju žilavost loma u poređenju sa 2205 [8]. Relativno mala žilavost loma za EPP zavareni metal šava od 2205 je verovatno u vezi sa ponekad nižim kvalitetom od normalnog. Udarne žilavost za 2205 je bila značajno viša za osnovne materijale nego kod zavarenih spojeva, dok je razlika znatno manja za LDX 2101 i 2304. Međutim, Dhooge i Deleu [3] su utvrdili visoku žilavost loma i kod osnovnog materijala 2205 i kod metala šava, izvedenog EPP postupkom.

### Površina loma

Površine loma osnovnog materijala i metala šava se mogu naći na slici 9. Osnovni metali pokazuju jamice koje rastu upravno na površinu loma u pravcu valjanja. Jamice su bile locirane u kratkom poprečnom pravcu i prisutne samo u osnovnom materijalu. Broj raste sa smanjenjem žilavosti kao što je prethodno saopštio Nilsson [23]. I jamice i glavne prsline uglavnom propagiraju u feritnoj fazi ili po granicama feritno-austenitne faze, slika 10. Jamice smanjuju intenzitet napona na vrhu prsline i lomna žilavost raste usled relaksacije troosnih naprezanja [24]. Žilavost loma za osnovni materijal je bila ocenjivana pri maksimalnoj sili ili kada se javi "zastoj". "Zastoj" može biti uzrokovan jamicama, što donekle objašnjava lošu usaglašenost sa podacima kontrolne krive za osnovni materijal. Ispitivanje lomne žilavosti kod nešto žilavijeg osnovnog 2205 pokazao je nešto dublje i šire jamice. [8]. Veliki broj i još više raspodela jamica u LDX 2101 i 2304 osnovnim materijalima objašnjavaju manje rasipanje rezultata  $K_{JC}$  u poređenju sa 2205.

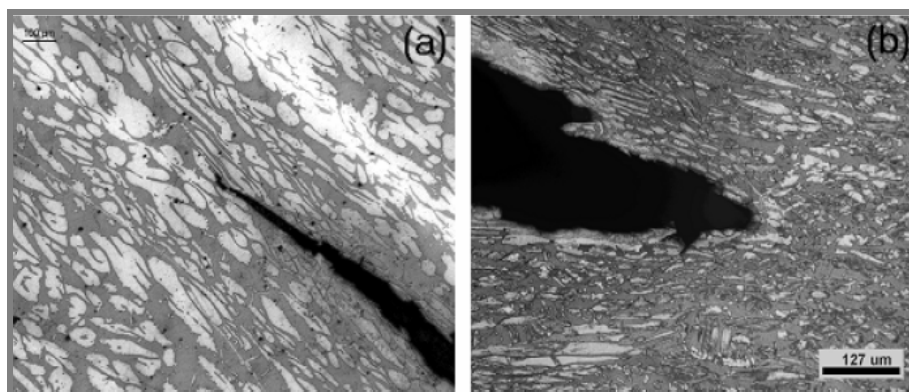
Površina loma metala šava je mešavina loma usled cepanja i duktilnog raslojavanja. Neke od zavarenih epruveta nisu zadovoljile kriterijum pravosti fronta prsline prema standardu [10]. Prsline u metalu šava propagiraju duž stubastih zrna kao što se vidi na slici 11.



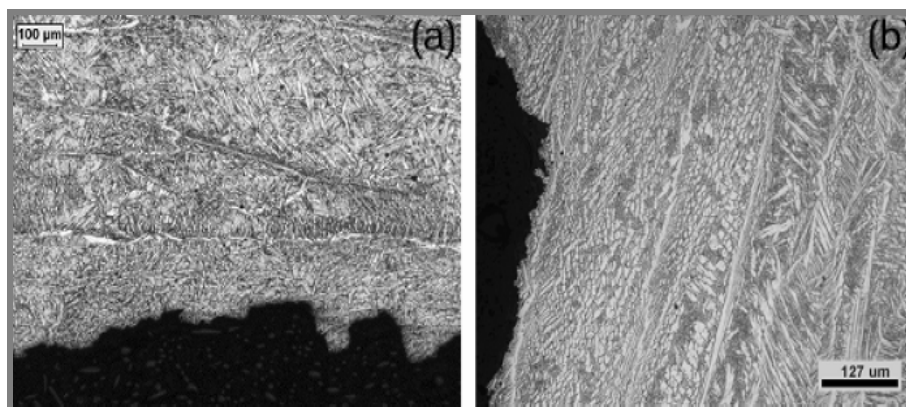
**Slika 9:** Površine preloma (a) osnovnog materijala LDX 2101 ispitanog na  $-50^{\circ}\text{C}$ , (b) osnovnog materijala LDX 2101 ispitanog na  $-60^{\circ}\text{C}$  [19], (c) osnovnog materijala 2304 ispitanog na  $-90^{\circ}\text{C}$  i (d) metala šava 2304 ispitanog na  $-74^{\circ}\text{C}$

### CTOD

CTOD izračunavanja su izvedena radi poređenja, dok  $K_{\text{JC}}$  i određivanje kontrolne krive nisu nađeni u literaturi. Iako su zahtevi CTOD mnogo konzervativniji nego pristup preko referentne temperature u ASTM E 1921-97[10], CTOD od 0,1 mm odgovara niskim temperaturama za LDX 2101 i 2304 osnovne materijale i metal šava. Korelacija između CTOD i  $K_{\text{JC}}$  je već bila predložena [25]. Sieurin i dr. [19] su potvrdili sličnu relaciju za LDX 2101.



**Slika 10:** Jamice koje rastu u feritu upravno na površinu loma za (a) LDX 2101 [19] i (b) 2304



**Slika 11:** Poprečni presek upravan na površinu preloma koji pokazuje rast prsline duž stubaste mikrostrukture šava za (a) LDX 2101 [19] i (b) 2304

## ZAKLJUČAK

Ispitivani su žilavost loma i udarna žilavost dupleks nerđajućih čelika LDX 2101 i 2304. Temperaturna zavisnost žilavosti loma je opisana preko kontrolnih krivih, koje uključuju određivanje referentne temperature,  $T_0$ , koja karakteriše početak prsline usled cepanja. Dupleks klase čelika su bile podvrgnute ručnom elektrolučnom zavarivanju početnog, korenog zavara i zavarivanju punjenom žicom ostalih zavara popune. Rezultati su upoređivani sa osnovnim 2205 i metalom šava izvedenim EPP zavarivanjem. I osnovni materijal i metal šava su pokazali dovoljnu žilavost loma kod većine primena na niskim temperaturama. Referentna temperatura osnovnih materijala je bila  $-112^{\circ}\text{C}$  za LDX 2101 i 2304 u poređenju sa  $-143^{\circ}\text{C}$  za 2205. Referentna temperatura metala šava je bila  $-92^{\circ}\text{C}$  za LDX 2101 i  $-109^{\circ}\text{C}$  za 2304 u poređenju sa  $-101^{\circ}\text{C}$  za 2205. Ova studija je dokazala visoku žilavost loma za tri komercijalne dupleks klase čelika LDX 2101, 2304 i 2205, kao i da postoji korelacija između žilavosti loma i udarne žilavosti.

## Zahvalnost

Ovaj rad su finansirali Outokompu Stainless i Sandvik Materials Technology. G-din Bela Leffler iz Outokompu Stainless (Vruća valjaonica limova) je obezbedio materijal LDX 2101 i 2304. Avesta Welding je obezbedio dodatni materijal a g-din Hakan Jansson iz Avesta Welding je vodio zavarivanje. Prof. Carl E. Cross iz BAM je revidovao ovaj rad.

## LITERATURA

- [1] U. Ekström, K. Olsson, Proc. Weld pool chemistry and metallurgy, London (1980), TWI, Cambridge (1980), p.323.
- [2] M. Liljas, Proc. Duplex Stainless steels '94, Glasgow (1994), Paper KV, TWI, Cambridge (1995), 15pp.
- [3] A. Dhooge, E. Deleu, Proc. Duplex Stainless steels '94, Glasgow (1994), Paper 77, TWI, Cambridge (1995), 15pp.
- [4] A. Dhooge and E. Deleu, Welding in the World 39 (1997), p.47.
- [5] E. Deleu, A. Dhooge, Proc. 5th World Conference Duplex Stainless Steels '97, Maastricht (1997), KCI publishing, Zutphen (1997), p.387.
- [6] A. Dhooge and E. Deleu, Stainl. Steel World 7 (1995), p.43.
- [7] C.S. Wiesner, Proc. 5th World Conference Duplex Stainless Steels '97, Maastricht (1997), KCI publishing, Zutphen (1997), p.979.
- [8] H. Sieurin and R. Sandström, Eng. Fract. Mech. 73 (2006), p.377.
- [9] K. Wallin, Int. J. Mater. Prod. Technol. 14 (1990), p.342.
- [10] ASTM E 1921-97, Standard test method for determination of reference temperature,  $T_0$ , for ferritic steels in the transition range, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.01, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [11] C. Ericsson, R. Sandström, H. Sieurin, O. Lagerqvist, U. Eisele, J. Schiedermaier, R.L. Ruiz, Background document 3.5, EcoPress, European research 5th framework, (2003). [www.ecopress.org](http://www.ecopress.org)
- [12] R. Sandström, H. Sieurin, E.M. Westin, P. Langenberg, Proc. Int. Conf. & Expo Duplex 2007, Grado (2007), AIM, Milano (2007).
- [13] EN 10002-1:2001 E, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature, CEN, Brussels (2001).
- [14] ASTM A370-02, Test methods and definitions for mechanical testing of steel products, ASTM Int., West Conshohocken, Pennsylvania (2002).
- [15] E 290 - 97a, Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, ASTM Int., West Conshohocken, Pennsylvania (1997).
- [16] EN 10045-1:1990 E, Charpy impact test on metallic materials - Part 1: Test method (V- and U-notches), CEN, Brussels (1989).
- [17] H. Sieurin, Fracture toughness properties of duplex stainless steels, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm (2006).

- [18] ASTM E 813-89, Standard test method for JIC, a measure of fracture toughness, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03.01, West Conshohocken, Pennsylvania (1989).
- [19] H. Sieurin, R. Sandström and E.M. Westin, Metal. Trans. A 37A (2006), p.2975.
- [20] K. Wallin, Eng. Fract. Mech. 69 (2002), p.451.
- [21] ASTM E 1820-99a, Standard test method for measurement of fracture toughness, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03.01, West Conshohocken, Pennsylvania (1999).
- [22] K. Wallin, Methodology for selecting charpy toughness criteria for thin high strength steels, Jernkontorets forskning, report from working group 4013/89, Stockholm (1990).
- [23] A.S. Nilsson, Anisotropy in duplex stainless steel SS 2377, IM-2551, Stockholm (1992).
- [24] K.S. Chan, Metall. Trans. A. 20A (1989), p.155.
- [25] H.G. Pisarski and K. Wallin, Eng. Fract. Mech. 67 (2000), p.613.



## Cnc stolovi za rezanje plazmom

+387 65 030 140

ikodb.com