

## ISPITIVANJE ŽILAVOSTI NA UZORCIMA MATERIJALA SA MIKROSTRUKTUROM DIJELOVA ZAVARA

### TOUGHNESS TESTING BY USING SAMPLES OF MATERIAL WITH MICROSTRUCTURE OF WELD PARTS

Vladimir GLIHA, Tomaž VUHERER<sup>1)</sup>

**Ključne riječi:** zavar, zona utjecaja topline-ZUT, mikrostruktura, svojstva, termička povijest zavarivanja, simulacija, termička obrada, veličina zrna, kaljenje, prvi prolaz, naredni prolaz, Charpy žilavost, žilavost loma

**Key words:** weld, heat-affected zone-HAZ, weld material, microstructure, properties, thermal history of welding, simulation, thermal treatment, grain size, quenching, first run, subsequent run, Charpy toughness, fracture toughness

#### Sažetak:

Svojstva zavara u zavarenome stanju zavisna su od toplinskog/toplinskih ciklusa zavarivanja. U zavisnosti od kemijskog sastava i izlaznog stanja materijala mikrostruktura pojedinih dijelova zavara oblikuje se pod utjecajem termičke povijesti zavarivanja. Termičku povijest zavarivanja možemo modelirati i sa njom utjecati na izlazni materijal. Mikrostruktura se drastično mijenja. Žilavost u pojedinih dijelova zavara je često puno lošija nego prije zavarivanja.

#### Abstract:

The properties of welds in the as-welded condition depend upon the thermal cycle/cycles of welding. If chemical composition and the initial state of material are taken into account the microstructure of particular weld parts will be formed under the influence of thermal history of welding. Thermal history of welding can be modelled and applied to the initial material. Microstructure is drastically changed. Toughness is of distinctive weld parts is often much worse than before welding.

<sup>1)</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija



## 1. UVOD

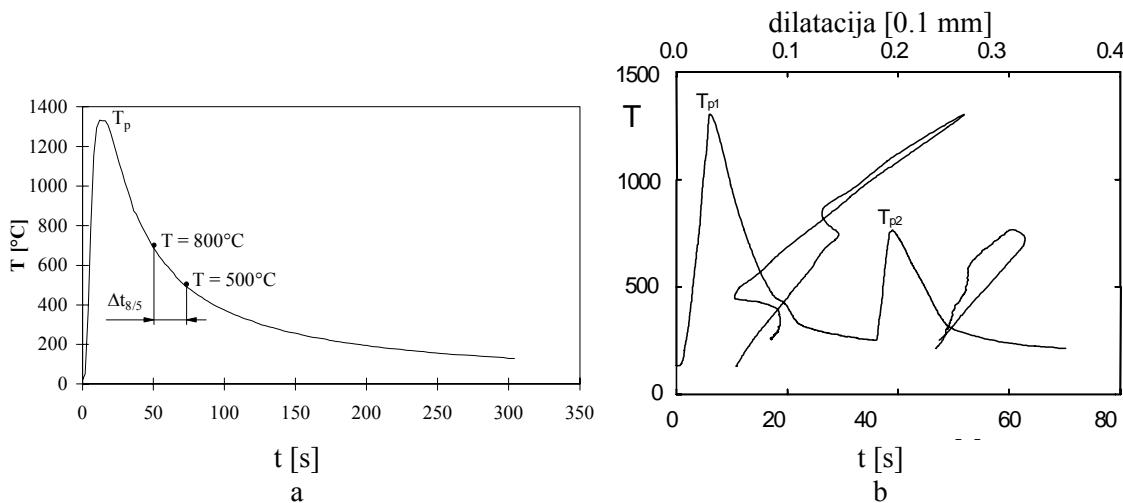
Mikrostrukturu dijelova zavara moguće je pripremiti u laboratorijskim uslovima. Potrebni su dovoljno veliki komadi izlaznog materijala te odgovarajuća laboratorijska oprema.

Za pripremu mikrostrukture pojedinih dijelova ZUT izlazni materijal je osnovni materijal, a za pripremu pojedinih dijelova zavara koji nastaje zavarivanjem jednim prolazom. Iz dovoljno velikih uzoraka sa mikrostrukturom tih dijelova zavara možemo pripremiti probe za ispitivanje mehanički svojstava zavara [1]. Za sigurnost korištenja zavarenih konstrukcija i zavarenih strojeva odlučujuća su konstrukcijska svojstva materijala zavara. To su duktilnost i pogotovo žilavost.

## 2. PRIPREMA MIKROSTRUKTURE

Dva primjera simulacije termičkog utjecaja zavarivanja uz crtlu taljenja su na slici 1.

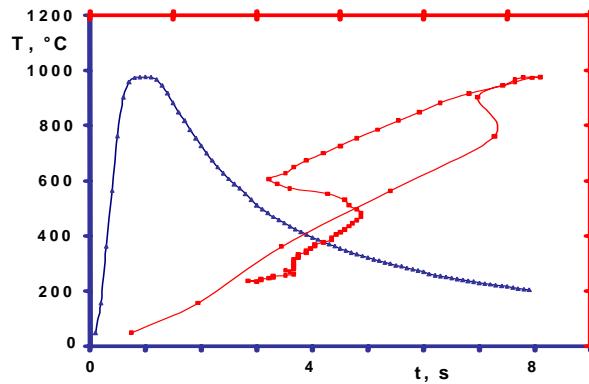
Odgovarajući utjecaj uz crtlu taljenja kad se zavarivanje izvodi samo jednim prolazom ili je utjecajan samo jedan prolaz prikazan je na slici 1a [2]. Taj toplinski ciklus dostigne temperaturu  $1350^{\circ}\text{C}$ . Odgovarajući termički utjecaj uz crtlu taljenja kad se zavarivanje izvodi sa više prolaza, a dva od njih su utjecajna, prikazan je na slici 1b [3,4]. Toplinski ciklusi preostalih prolaza u tom primjeru ili ne postoje i ne pređu  $\text{Ac}_1$  temperaturu čelika. Vidimo i zabilježene dilatometrijske krive, koje služe za detekciju početka i kraja transformacije kod zagrijavanja i hlađenja uzorka.



Slika 1. Simulacija mikrostrukture ZUT: a) Grubo zrnati ZUT kod zavarivanja jednim prolazom i  $\Delta t_{8/5} \leq 30$  s; b) Usitnjeni ZUT sasvim uz crtlu taljenja kod zavarivanja sa dva prolaza i  $\Delta t_{8/5} \leq 10$  s

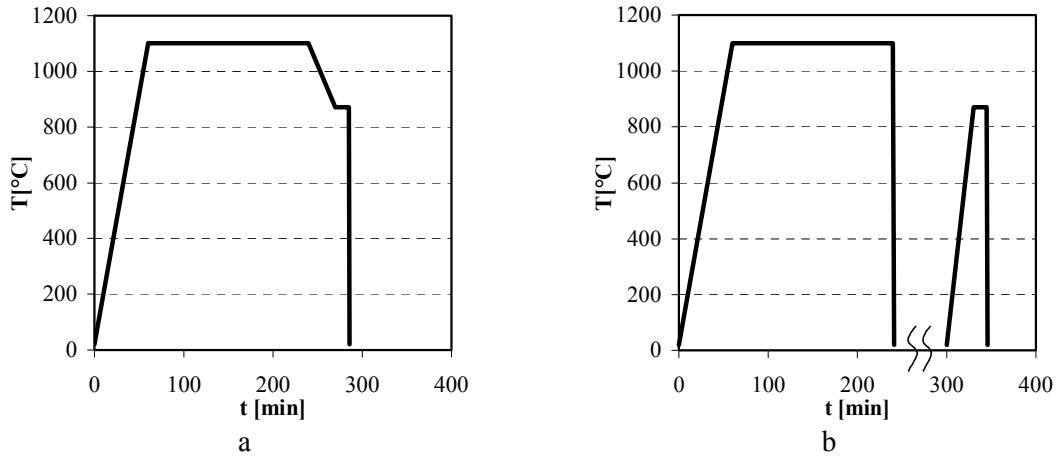
U termičkim uslovima prikazanim na slici 1a nastaje grubo zrnata mikrostruktura ZUT. Zbog prvog toplinskog ciklusa prikazanog na slici 1b, kad je dostignuta temperatura preko  $1350^{\circ}\text{C}$ , nastaje mikrostruktura grubo zrnatog ZUT, a ta mikrostruktura usitni se za vrijeme djelovanja drugog toplinskog ciklusa kad se materijal zagrije na temperaturu  $780^{\circ}\text{C}$ , to je između  $\text{Ac}_1$  i  $\text{Ac}_3$ . U takvom slučaju austenitizacija materijala koji je nastao prvim toplinskim ciklusom nije se mogla u cijelosti izvršiti.

Primjer simulacije termičkog utjecaja sljedećeg prolaza na materijal prvog prolaza na mjestu nešto podalje od crte taljenja drugog prolaza, gdje je temperatura dostigla  $980^{\circ}\text{C}$ , prikazan je na slici 2 [5,6]. Vidimo i zabilježenu dilatometrijsku krivulju, koja služi za detekciju početka i kraja transformacije kod zagrijavanja i hlađenja. U slučaju, koji je prikazan na toj slici, nastaje na osnovu izlazne dendritske mikrostrukture jedno prolaznog zavara mikrostruktura zavara od dva prolaza u kojem je temperatura toplinskog ciklusa prešla  $\text{Ac}_3$  temperaturu. Zbog ne tako visoke temperature drugog toplinskog ciklusa austenit tog uzorka nije mogao postati sasvim homogen.



Slika 2. Dendritski zavar pod utjecajem zavarivanja narednog prolaza

Na slici 3a prikazana je termička obrada uzorka osnovnog materijala, kojom smo dobili mikrostrukturu koja liči na mikrostrukturu grubo zrnatoga dijela ZUT [7]. Na slici 3b prikazana je termička obrada istog materijala za pripremu mikrostrukture koja liči na mikrostrukturu usitnjjenog dijela ZUT, koji je prije termičkog utjecaja narednoga prolaza bio grubo zrnat. U oba slučaja koristili smo laboratorijsku peć, a za postizanje dovoljno brzog hlađenja, to znači za kaljenje u martenzit, vodnu kupku.



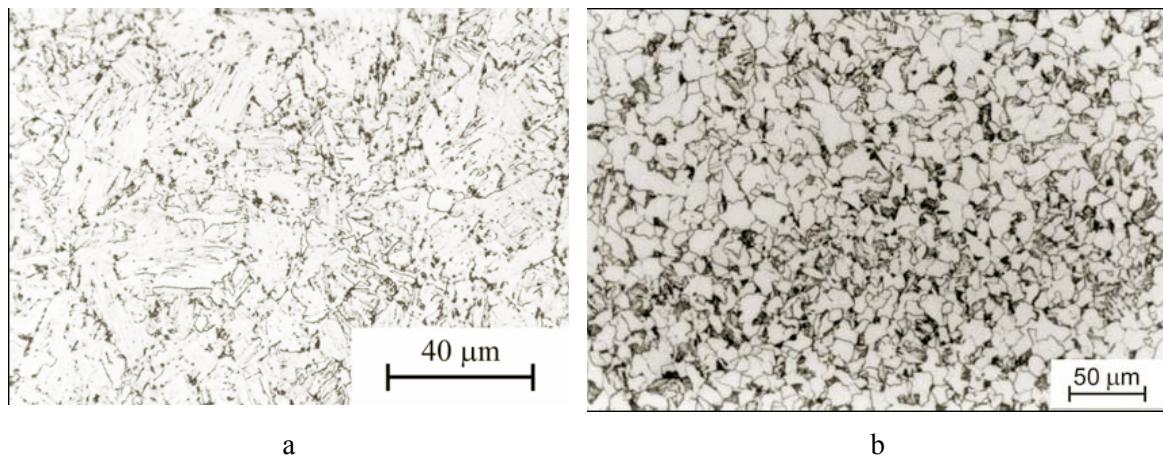
Slika 3. Termička obrada za pripremu dviju različitih dijelova ZUT uz samu crtu taljenja:  
a) Simulacija grubo zrnate martenzitne mikrostrukture; b) Simulacija usitnjene martenzitne mikrostrukture

Za pripremu grubo zrnate martenzitne mikrostrukture ZUT cilindrične uzorke zagrijali smo u peći na 1100°C te držali na toj temperaturi čitava 3 sata. Takva obrada poznata je kao termička obrada na grubo zrno. Za vrijeme žarenja austenitna zrna su rasla i dostigla prosječnu veličinu 200 µm. Onda smo uzorke u peći ohladili na temperaturu za kaljenje i zatim kalili u vodi. Tako smo dobili sasvim martenzitnu grubo zrnatu mikrostrukturu sa zrnom veličine oko 200 µm.

Za pripremu usitnjene martenzitne mikrostrukture ZUT zagrijali smo cilindrične uzorke čelika u peći na 1100°C te držali na toj temperaturi 3 sata. Za vrijeme toga žarenja austenitna zrna su rasla dostigla prosječnu veličinu 200 µm. Onda smo uzorak u vodi ohladili na sobnu temperaturu. Zbog više akumulirane topline na toj temperaturi nego na temperaturi kaljenja rezultat hlađenja u vodi nije bila grubo zrnata martenzitna mikrostruktura već nešto finija mikrostruktura bainita i martenzita. Poslije toga smo uzorke sa tom mikrostrukturom zagrijali na temperaturu za kaljenje. Austenitizacijom dobili smo usitnjeni austenit. Zbog prilično niske temperature i kraćeg vremena držanja na temperaturi kaljenja zrno nije raslo. Taj austenit je kaljenjem transformiran u martenzit veličine zrna ishodnog materijala. Tako smo dobili dosta fino zrnatu sasvim martenzitnu mikrostrukturu sa zrnom veličine 20 do 30 µm.

### 3. PROMJENA MIKROSTRUKTURE

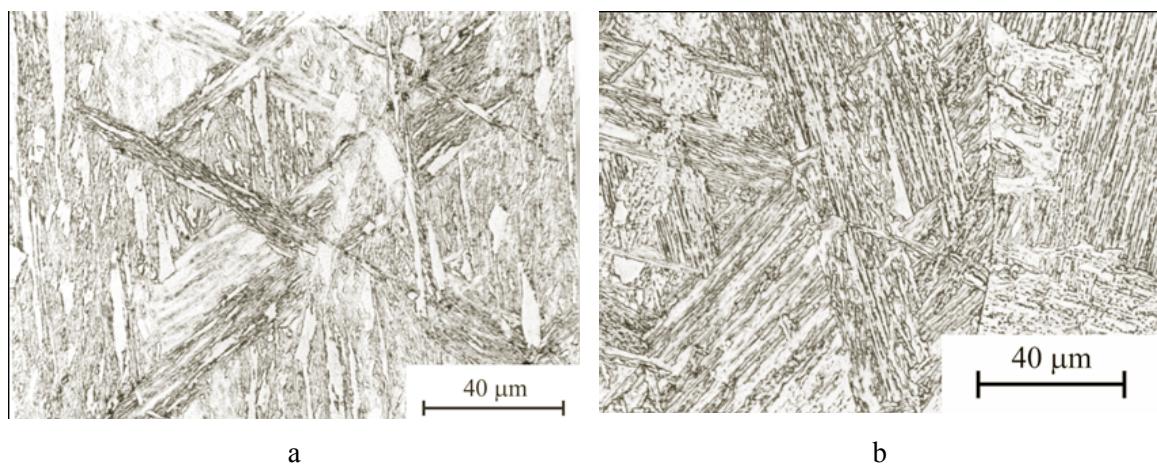
Na slici 4a je mikrostruktura osnovnog materijala Nionicral 70, koji smo koristili za simulacije prikazane na slici 1b. Radi se o mikrostrukturi popuštenega martenzita sa nešto bainita.



Slika 4. Dva čelika: a) Mikrostruktura poboljšanog mikrolegiranog čelika visoke čvrstoće Nionicral 70); b) Mikrostruktura čelika 17CrNiMo7 za cementaciju

Na slici 5a prikazana je mikrostruktura grubo zrnatog ZUT koji nastaje uz crtu taljenja pod utjecajem zavarivanja tog čelika jednim prolazom prilikom brzog hlađenja.

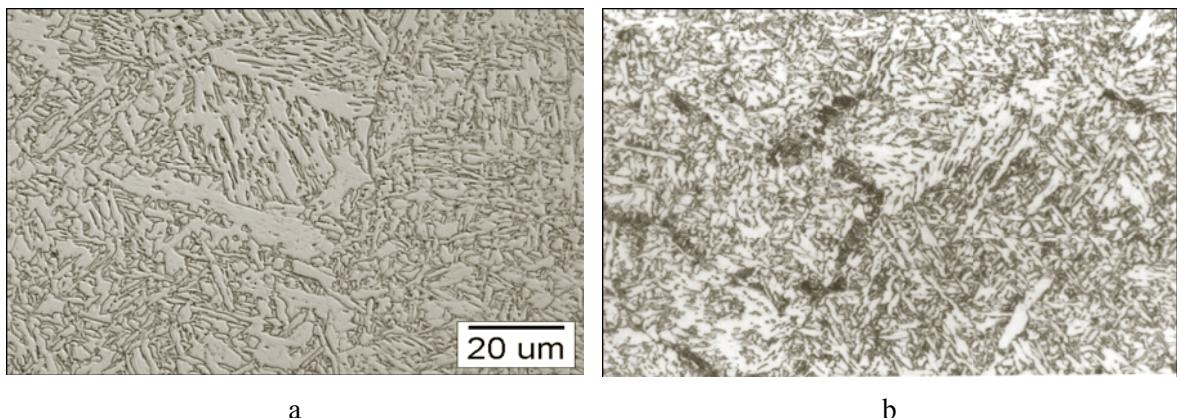
Na slici 5b prikazana je martenzitno-bainitni mikrostruktura grubo zrnatog ZUT koji nastaje uz crtu taljenja od zavarivanja jednim prolazom prilikom nešto sporijeg hlađenja.



Slika 5. Rezultati simulacije zavarivanja čelika Nionicral 70: a) Grubo zrnati ZUT od  $\Delta t_{8/5} \approx 5$  s;  
b) Grubo zrnati ZUT od  $\Delta t_{8/5} \approx 25$  s

Na slici 6a prikazana je mikrostruktura izlaznog zavara kod zavarivanja čelika Niomol 490 EPP postupkom dodatnim materijalom Filtub Φ4 i praškom FB TT, koji smo koristili za simulaciju kao što je ona prikazana na slici 2. Radi se o poligonalnom i acikularnom feritu.

Na slici 6b prikazana je mikrostruktura koja nastaje u tom prolazu poslije narednog prolaza malo dalje od crte taljenja drugog prolaza, gdje je temperatura toplinskog ciklusa dostigla 780°C. Tu su na granicama zrna vidljivi austenitno-martenzitni sastojci, koji su dokaz slabije žilavosti tog djela dvoprolaznoga ZUT.



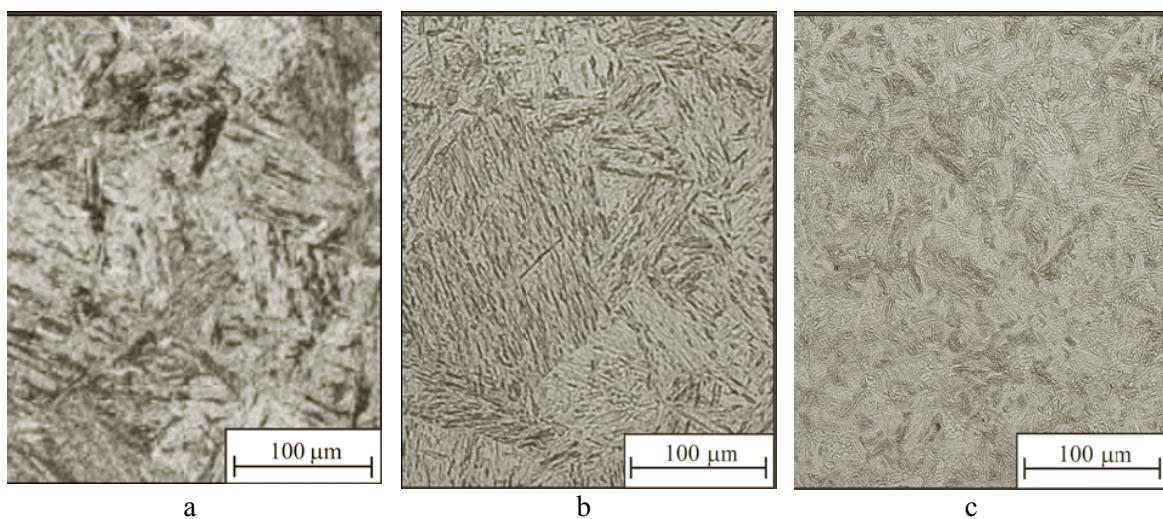
a

b

Slika 6. Rezultati simulacije zavarivanja čelika Niomol 490: a) Mikrostruktura izlaznog materijala zavara; b) Isti materijal sa promijenjenom mikrostrukturom uslijed utjecaja sljedećeg prolaza

Na slici 4b je mikrostruktura čelika 17CrNiMo7, kojeg smo koristili za simulacije prikazane na slikama 8a i 10. Radi se manje ili više o feritno-perlitnoj mikrostrukturi.

Na slici 7a je prikazana martenzitna mikrostruktura grubo zrnatog ZUT koji nastaje uz crtlu taljenja pod utjecajem zavarivanja jednim prolazom (slika 1a). Na slici 7b prikazana je martenzitna mikrostruktura koja nastaje termičkom obradom prikazanom na slici 3a, a na slici 7c mikrostruktura koja nastaje termičkom obradom prikazanom na slici 3b.



Slika 7. ZUT na čeliku 17CrNiMo7: a) Mikrostruktura pripremljena simulacijom termičkih uslova b) Mikrostruktura pripremljena termičkom obradom u peći jedno stepeno i kaljenjem; c) Mikrostruktura pripremljena termičkom obradom u peći u dva stepena i kaljenjem

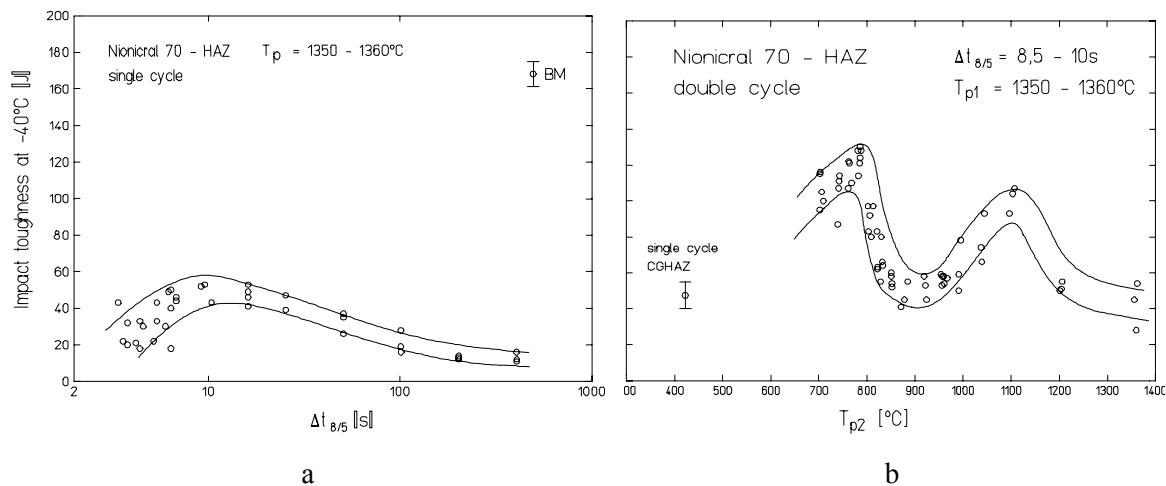
Prvom i drugom termičkom obradom čelika ciljali smo na dvije različite mikrostrukture ZUT koji nastaje uz crtlu taljenja pod utjecajem zavarivanja sa jednim i sa dva utjecajna prolaza. Prvo je grubo zrnata martenzitna mikrostruktura a drugo je usitnjena doprije grubo zrnata martenzitna mikrostruktura.

Jedina razlika između obe grubo zrnate mikrostrukture ZUT dobivene simulacijom termičkih uslova zavarivanja (slika 7a) i grubo zrnate mikrostrukture dobivene termičkom obradom u peći korištenjem vode kao sredstva za kaljenje (slika 7b) je u grubosti martenzitnih iglica. Veličina zrna i tvrdoća su skoro identične.

#### 4. UTJECAJ NA ŽILAVOST

Na slici 8 prikazana su dva primjera registrirane žilavosti na simuliranim mikrostrukturama kod zavarivanja čelika Nionicral 70:

- Charpy žilavost grubo zrnatog ZUT u zavisnosti od brzine hlađenja je na slici 8a. Vidimo, da porastom vremena  $\Delta t_{8/5}$  žilavost najprije raste, a poslije pada. Kod najbržeg hlađenja nastaje martenzitna mikrostruktura. Najviša žilavost povezana je sa prisutnošću određenog udjela bainita u martenzitu. Kod sporijeg hlađenja je bainita više a žilavost počne opadati.
- Charpy žilavost ZUT uz crtlu taljenja, gdje je utjecan ishodni grubo zrnati ZUT od toplinskog ciklusa sljedećeg prolaza, je na slici 8b. To je ZUT, koji ima poslije utjecaja prvog prolaza najvišu žilavost. To se vidi na slici 8a kod  $\Delta t_{8/5}=10 - 15$  s. Prvi maksimum žilavosti na slici 8b podudara se sa djelomičnom austenitizacijom ishodne grubo zrnate martenzitno/bainitne mikrostrukture. Kad je temperatura drugog toplinskog ciklusa tolika, da je austenitizacija potpuna, žilavost je najniža. Taj austenit prije početnog hlađenja nije dovoljno homogenizovan. Kad je temperatura drugog toplinskog ciklusa tolika veća, da je austenit homogen, žilavost ponovo dosta poraste.

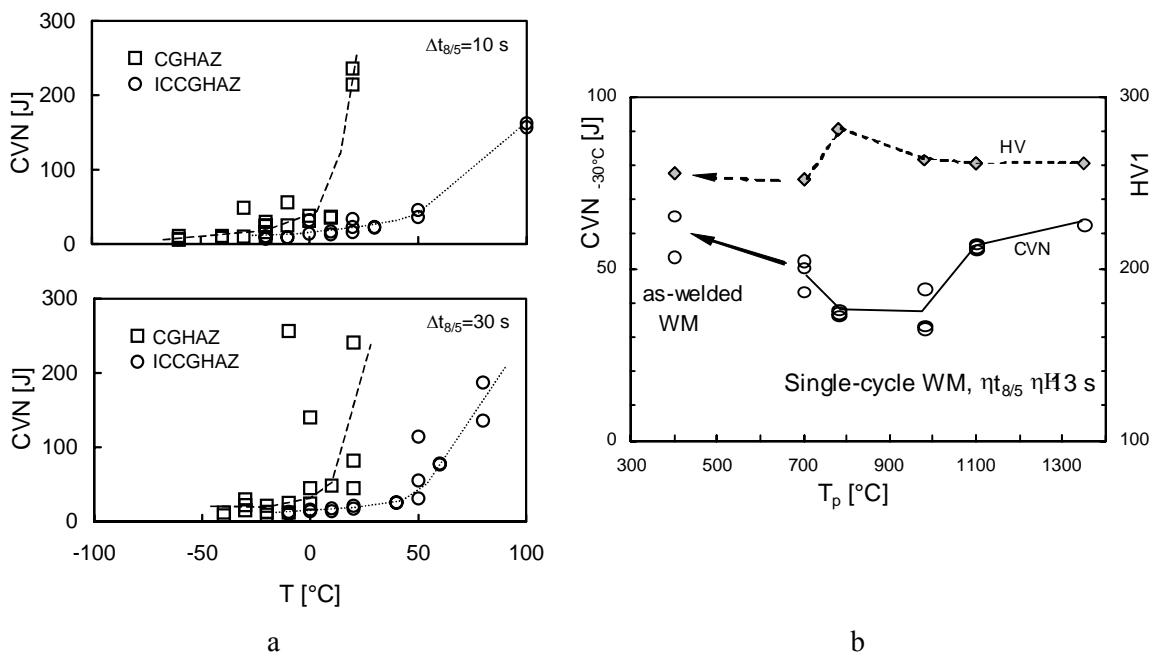


Slika 8. Žilavost ZUT uz crtlu taljenja na čeliku Nionicral 70: a) ZUT od jednog prolaza; b) ZUT od dva prolaza

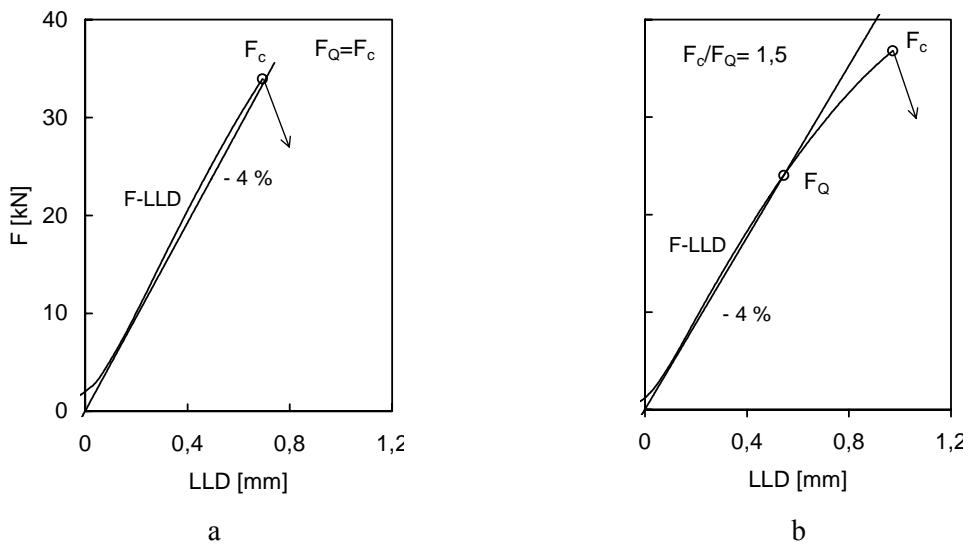
Na slici 9 prikazani su registrirane žilavosti na simuliranim mikrostrukturama zavara na čeliku Niomol 490 i to u ZUT i u zavaru [2,5,6]:

- Smanjenje Charpy žilavosti u slučaju dvije različite brzine hlađenja zbog utjecaju narednog prolaza koji zagrije grubo zrnati ZUT na 788°C prikazano je na slici 16a. Toplinski ciklus kod simulacije zavarivanja jednim prolazom je na slici 1a. Gornji diagram na slici 9a dokazuje smanjenje žilavosti u zavaru u zavisnosti od temperature ispitivanja za vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 10$  s, a donji za vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 30$  s.
- Charpy žilavost i tvrdoća zavara uz liniju taljenja sljedećeg prolaza, gdje je utjecana ishodna dendritska mikrostruktura zavara su na slici 9b. Smanjenje žilavosti do nekih 800°C povezano je sa austenitizacijom i razlaganjem nepotpuno homogenog austenita. Tada poraste i tvrdoća. Povećanje žilavosti kod 1100°C je posljedica razlaganja potpuno homogenog austenita. Tvrdoća se zbog toga smanji.

Na slici 10 prikazana su dva diagrama kod mjerena žilavosti loma ZUT, koji se nalazi sasvim uz crtlu taljenja a nastaje kod zavarivanja čelika Niomol 490 [2]. Razlika između ta dva ZUT je u prisustvu i odsustvu toplinskog utjecaju drugog prolaza. Diagram na slici 10a odgovara ZUT, koji je utjecan dva puta, a diagram na slici 10b ZUT, koji je utjecan samo jedanput. Toplinski ciklus koji odgovara takvoj simulaciji za vrijeme hlađenja  $\Delta t_{8/5} = 30$  s prikazan je na slici 1a.



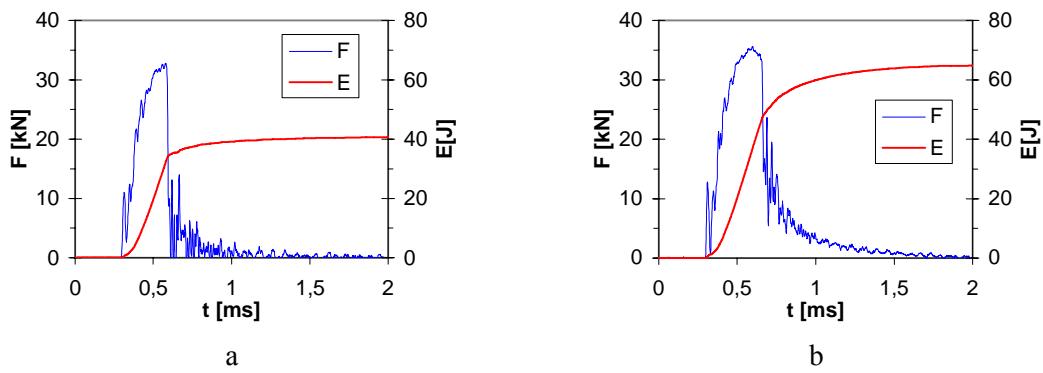
Slika 9. Zavisnost žilavosti: a) ZUT od jednog prolazom i dva prolaza za dvije brzine hlađenja; b) Zavar od dva prolaza u zavisnosti od maksimalne temperature drugog toplinskog ciklusa



Slika 10. Odraz smanjenja žilavosti na zavisnosti opterećenja od pomaka: a) Dvo prolazni ZUT uz crtlu taljenja; b) Izlazni grubo zrnati jedno prolazni ZUT

Na slici 11 prikazana su dva diagrama kod mjerjenja Charpy žilavosti ZUT uz crtlu taljenja [7].

To testiranje obavljeno je sa instrumentiranim klatnom. Radi se o martenzitni mikrostrukturni sa različito velikim zrnima. Razlika u ponašanju materijala kod udarnog opterećenja prouzrokovanoj različitom veličinom martenzitnog zrna je očita. Toplinski ciklus zavarivanja sledećeg prolaza promeni mikrostrukturi i smanji žilavost.



Slika 11. Dva pokusa na ZUT čelika 17CrNiMo7: a) Grubo zrnata martenzitna mikrostruktura; b) Usitnjena martenzitna mikrostruktura

## 5. ZAKLJUČCI

Očito se pod utjecajem različite termičke povijesti oblikuje u zavarima različita mikrostruktura. Zbog toga treba da su različita i svojstva.

Termička povijest zavarivanja je slika uslova kod zavarivanja. Koristiti se može i drugačija termička obrada koja vodi do oblikovanje slične mikrostrukture koju možemo naći u zavarima. Kad pogledamo mikrostrukturu na metalografskim uzorcima kod odgovarajućeg uvećanja vidimo, da su razlike velike. Zbog toga nije čudno da su velika također i odstupanja u svojstvima materijala zavara. Nije treba biti veoma pametan da se zaključi, kako su svojstva zavara u cijelini poslije zavarivanja lošija nego svojstva ugrađenog osnovnog materijala.

Kod ispitivanja žilavosti na uzorcima materijala pojedinih dijelova ZUT i zavara vidimo, da su razlike u svojstvima lako uočljive.

## 6. LITERATURA

- [1] Gliha, V., Vuherer T., "Uzorci materijala sa mikrostrukturom dijelova zavara", Zbornik 5. međunarodno znanstveno-stručnog savetovanja SBZ 2009
- [2] Gliha, V., Vuherer, T., Ule, B., Vojvodič-Tuma, J., "Fracture resistance of simulated heat affected zone areas in HSLA structural steel", Science and technology of welding and joining, vol. 9, no. 5, p. 399-406, 2004
- [3] Gliha, V., Vuherer, T., Ule, B., Vojvodič-Tuma, J., "Fracture resistance of simulated heat affected zone areas in HSLA structural steel", Science and technology of welding and joining, vol. 9, no. 5, p. 399-406, 2004
- [4] Gliha, V., "The microstructure and properties of materials at the fusion line", Metalurgija (Sisak), vol. 44, no. 1, p. 13-18, 2005
- [5] Rojko, D., "Izoblikovanje mikrostruktur večvarkovnega zvara s stališča termičnega vpliva varjenja", Doktorska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor 2003
- [6] Rojko, D., Gliha, V., "The influence of simulated thermal cycle on the formation of microstructures of multi-pass weld metal", Metalurgija (Sisak), vol. 44, no. 1, p. 19-24, 2005
- [7] Vuherer, T., "Analiza vpliva mikro napak na trdnost pri utrujanju grobozrnatega TVP na zvarih", Doktorska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor 2008