

UZORCI MATERIJALA SA MIKROSTRUKTUROM DIJELOVA ZAVARA

SAMPLES OF MATERIAL WITH MICROSTRUCTURE OF WELD PARTS

Vladimir GLIHA, Tomaž VUHERER¹⁾

Ključne riječi: zavar, zona utjecaja topline-ZUT, var, mikrostruktura, svojstva, termička povijest zavarivanja, simulacija

Key words: weld, heat-affected zone-HAZ, weld material, microstructure, properties, thermal history of welding, simulation

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. Prikazani su toplinski ciklusi zavarivanja, uzorci materijala za pripremu mikrostrukture pojedinih dijelova zavara te probe koje možemo iz njih izraditi da bi služile za različita ispitivanja.

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. The thermal cycles of welding are shown as well as samples of materials used for the microstructure of particular weld parts preparation and specimens machined in order to perform various testing.

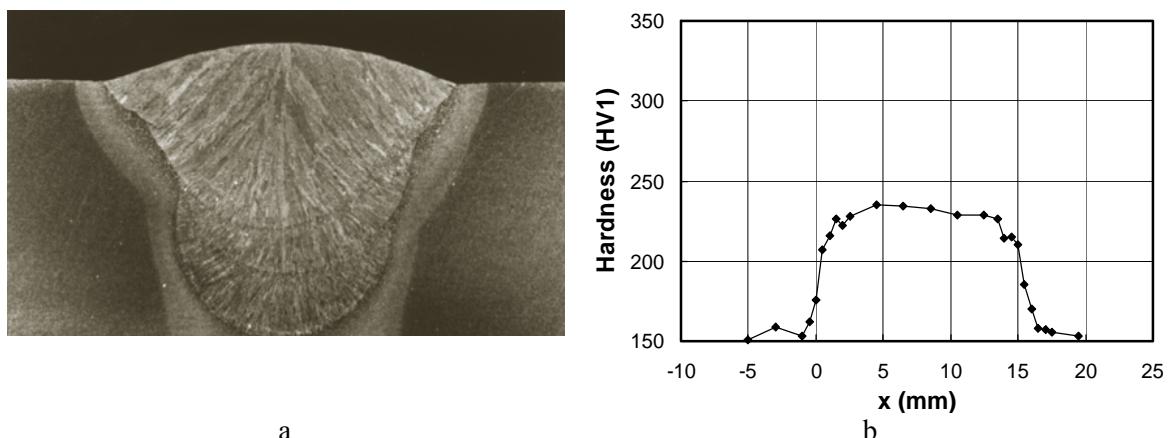
¹⁾Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija

1. UVOD

Svojstva svih polikristalnih metala zavise od mikrostrukture. Isto važi i za sve dijelove zavara. Mikrostruktura pojedinih dijelova zavara nije ista kao u ugrađenom osnovnom materijalu. Zbog toga su neka svojstva zavara često puno slabija. Pojedini dijelovi zavara mogu biti međusobno također veoma različiti tako po mikrostrukturi kako po svojstvima. Integritet zavarenih konstrukcija i strojeva kod njihovog normalnog korištenja u mnogočemu zavisi baš od tih razlika a u najvećoj mjeri od onih dijelova koji su zapravo najslabije karike tih zavara.

Za spajanje metalnih materijala zavarivanjem potrebna je toplina i/ili mehanička energija. Kod velikih zavarenih konstrukcija spajanje je po pravilu posljednja operacija kod koje se materijal na pojedinim mjestima jako zagrije a zatim ohladi. Kad god zavarena konstrukcija poslije izrade zavarivanjem nije termički obradena, njezini zavari su u zavarenome stanju.

Kako je mikrostruktura svakog polikristalnog metala funkcija kemijskog sastava, izlaznog stanja i cjelokupne termičke povijesti to isto važi i za sve dijelove zavara. Najjači trag na mikrostrukturi zavara ostavlja najnovija termička povijest, to je zavarivanje. Kao što vidimo na slici 1 zavarivanje može sasvim prekriti sve prethodne utjecaje termičke obrade za vrijeme izrade osnovnog materijala (normalizacija, poboljšanje, meko žarenje i slično) ili ga prekrije u najmanju ruku djelomično [1].



Slika 1. Svojstva zavara: a) Nije teško primjetiti da su mikrostrukture osnovnog materijala, zavara i ZUT različite; b) Da su svojstva zavara drugačija od osnovnog materijala dokazuju vrednosti izmerene tvrdoće

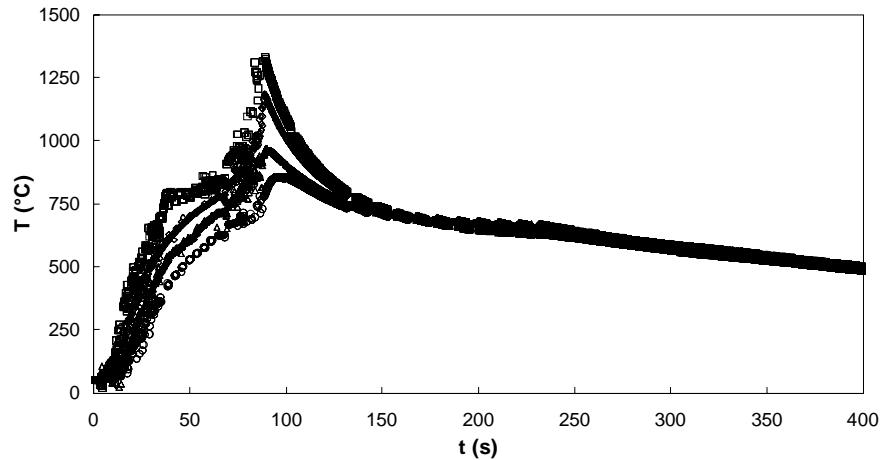
Termička povijest zavarivanja posljedica je lokalnog unošenja energije, koja je neophodna za stvaranje zavarenog spoja. Najčešće se radi o toplini a ponekad o mehaničkom radu od kojeg se najveći dijel također pretvorи u toplinu. Zbog toga možemo u grubom svaki zavareni spoj podijeliti na dva područja. To je sam zavar, koji nastaje taljenjem ili gnječenjem materijala te zona utjecaja topline (ZUT) u kojoj je osnovni materijal bio tako jako zagrijan, da se je mogla mikrostruktura promijeniti. Pojedini dijelovi zavara i ZUT mogu imati veoma različitu termičku povijest. To je obično posljedica zavarivanja sa više prolaza a i sa različitim parametrima.

Za korištenje zavarenih konstrukcija normalne kakvoće bez opasnosti odlučujuća je žilavost loma svih dijelova zavara sa grješkama zbog zavarivanja. Najopasnije su plosnate grješke kao bočno naljepljivanje ili naljepljivanje među slojevima, neprevareni korijen, ugrizi te pukotine, koje su okomite na zatezna naprezanja. Pošto su pukotine najutjecajnije, ima smisla da sve grješke tretiramo kao pukotine. Na taj način utjecaj nijedne grješke ne možemo podejteniti.

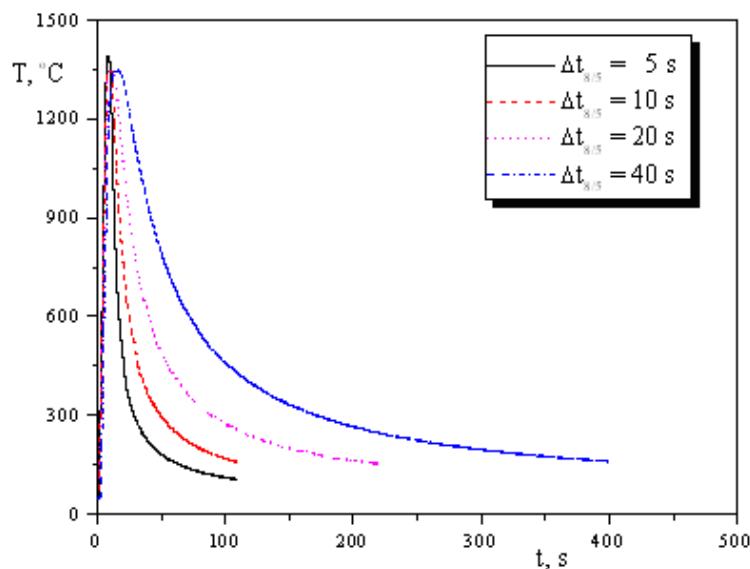
Za veličinu i smjer nastalih pukotina u zavarima odlučujući je pravac zaostalih naprezanja. Ta naprezanja su posljedica lokalno ograničene plastične deformacije materijala od zavarivanja zbog grijanja i hlađenja te faznih promjena. Pukotine se javljaju za vrijeme zavarivanja, kao pukotine na toplo, i odmah ili više časova ili danima poslije zavarivanja kao lamelarno cijepanje i pukotine na hladno te pukotine uslijed naknadne toplinske obrade.

1. TERMIČKI UTJECAJ ZAVARIVANJA

Kod zavarivanja ugljičnih konstrukcijskih čelika ZUT nastaje barem djelomičnom austenitizacijom osnovnog materijala za vrijeme zagrijavanja te kod hlađenja zavara u određenom temperaturnom pojasu transformacijom austenita. Zavar nastaje najprije taljenjem dodatnog i/ili osnovnog materijala a zatim kristalizacijom metala taline. Kad je kristaliziran čelik u austenitnom stanju dođe u zavaru kod hlađenja također do transformacije austenita. Zajedno sa kemijskim sastavom osnovnog materijala te rastopa termička povijest zavarivanja je odlučujuća za svojstva svih dijelova zavara u zavarenome stanju. Pogledajmo na slikama 2 i 3 neke od zabilježenih utjecaja zavarivanja:



Slika 2. Toplinski ciklusi kod zavarivanja tračnica iskrenjem na različitim mjestima u ZUT [2]



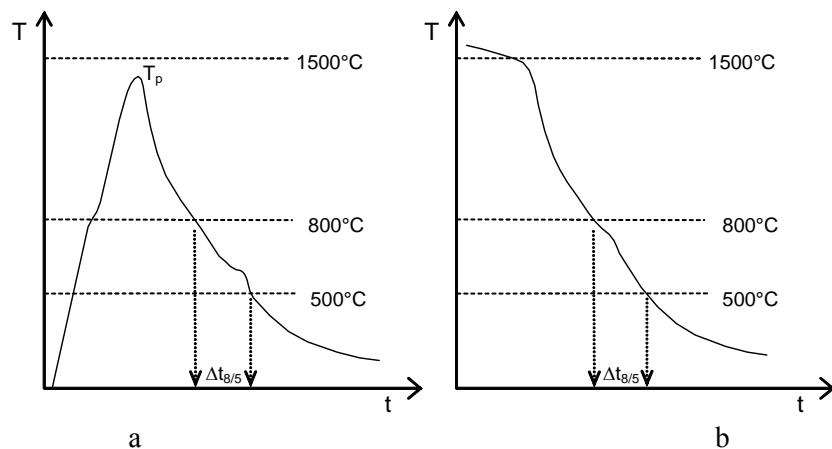
Slika 3. Toplinski ciklusi sasvim uz liniju taljenja u zavisnosti od predgrijavanja (REO zavarivanje)

Kod zavarivanjem iskerenjem na slici 2 u grubo zrnatom dijelu ZUT, gdje temperatura dostiže 1400°C i više (brzina čitanja vrijednosti temperature nije omogućila zabilježiti najviše temperature), možemo na 750°C primijetiti oko 50 s dug zastoj temperature. Pošto se iskrenjem zagrije veoma veliki presjek obe tračnice za austenitizaciju tog djela bainitnog čelika potroši se između Ac_1 i Ac_3 temperature mnogo topline. Na mjestu gdje o tom trenutku nije postignuta tako visoka temperatura (svi preostali dijelovi ZUT) taj zastoj je manje izražen. U jače zagrijanome dijelu materijala zavara temperatura je u to vrijeme u porastu. Zato potrošnja topline za promjenu faze (austenitizacija) u manje zagrijanim dijelovima materijala nije tako jako izražena i zastoj

temperature je slabije uočljiv. Kod hlađenja vidimo zastoj u temperaturnom pojasu 800 -750°C. Tada se zbog transformacije austenita u na primjer neki oblik ferita oslobađa energija što uspori hlađenje. Vidimo također, da je brzina hlađenja u svim dijelovima ZUT takoreći jednaka.

Kod REO zavarivanja na slici 3 zabilježena maksimalna temperatura toplinskog ciklusa dostiže temperaturu 1300°C i više. Vrijeme hlađenja između 800 i 500°C je 5 do 40 s. Na zabilježenim grafima fazne promjene prilikom zagrijavanja i hlađenja nisu uočljive.

Za mikrostrukturu nastalog ZUT važni su najviša temperatura toplinskog ciklusa (T_p) te brzina hlađenja, koju mjerimo vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}$. Izgled takvog toplinskog ciklusa skiciran je na slici 4a [3]. Za mikrostrukturu nastalog zavara važna je samo brzina hlađenja.



Slika 4 Toplinski ciklus zavarivanja: a) ZUT uz crtu taljenja; b) Zavar

Vremenska zavisnost temperature za vrijeme nastajanja mikrostrukture zavara skicirana je na slici 4b [3]. Osim u samoj fazi kristalizacije metalnog rastopa brzina hlađenja mjerena vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}$ ista je u čitavom zavaru, znači tako u zavaru kako i u ZUT.

Kad započinje hlađenje najviša temperatura u pojedinim tačkama zavara različita je. U ZUT je niža od temperature taljenja čelika ali treba da pređe temperaturu, koja je potrebna za barem djelomičnu austenitizaciju osnovnog materijala. Kod zavarivanja ugljičnih konstrukcijskih čelika to je A_1 temperatura čelika oko 700°C. Važno je, da je kemijski sastav ZUT jednak sastavu osnovnog materijala.

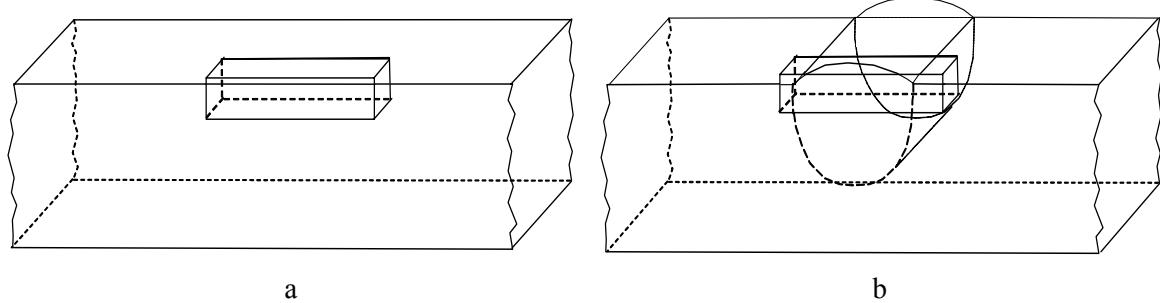
Najviša dostignuta temperatura u zavaru je viša od temperature taljenja dodatnog i osnovnog materijala. Pošto se istope istovremeno određena dijela oba materijala, kemijski sastav zavara je negdje između sastava osnovnog in dodatnog materijala.

Planiranjem i kontrolom termičke povijesti zavarivanja moguće je utjecati na svojstva zavara u zavarenome stanju. Na taj način moguće je indirektno utjecati na nosivost zavarenih konstrukcija i snagu strojeva, čiji su dijeli spojeni zavarivanjem, i time na vijek eksploatacije proizvoda. Za upotrebu zavarenih konstrukcija bez svake opasnosti nisu važna samo primjerna svojstva osnovnog materijala, već i svojstva zavara. Odlučujuća svojstva svih dijelova zavarenih konstrukcija i strojeva su žilavost te duktilnost materijala. To su tako imenovana konstrukcijska svojstva materijala. Duktilnost se meri izduženjem ili kontrakcijom uzorka na zatezanje poslije prijeloma, a najjednostavniji i najpraktičniji oblik žilavosti materijala je Charpy žilavost.

2. UZORCI, SIMULACIJA I PROBE

Pošto su parametri toplinskog ciklusa zavarivanja brzina zagrijevanja, najviša dostignuta temperatura i brzina hlađenja, takav je utjecaj moguće simulirati u laboratorijskim uslovima. Na taj način možemo pripremiti dovoljno velike uzorke materijala sa mikrostrukturom pojedinih dijelova zavara.

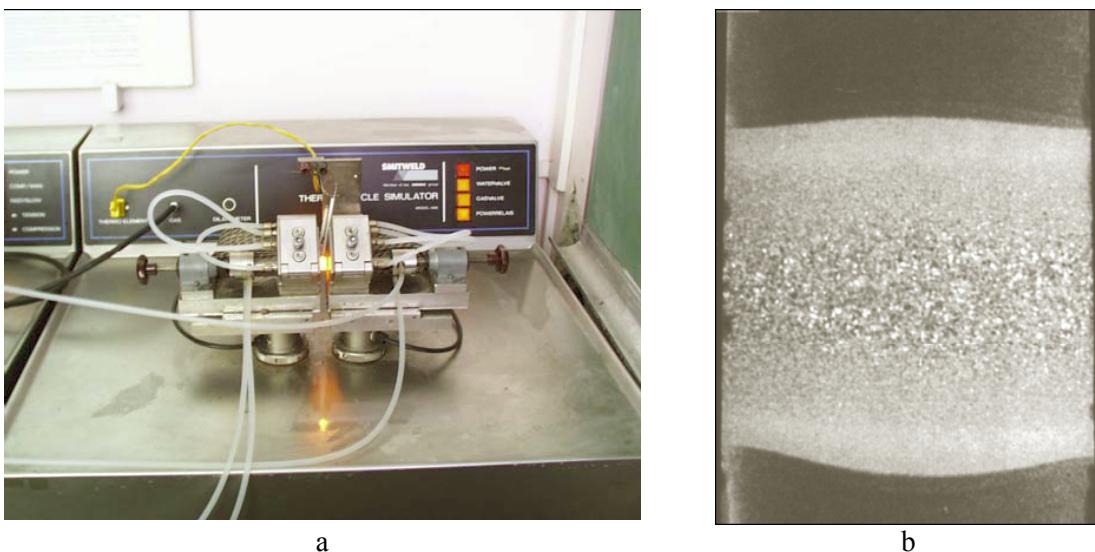
Slika 5a [3] prikazuje način oduzimanja uzorka osnovnog materijala, koji služe za izradu mikrostrukture ZUT simulacijom termičkih uslova zavarivanja u osnovnom materijalu. Na takvim uzorcima možemo pripremiti tako mikrostrukturu ZUT od jednog samog prolaza kako i mikrostrukturu ZUT od više prolaza. Slika 5b [3] prikazuje način oduzimanja uzorka materijala iz zavara, koji služe za izradu mikrostrukture zavara sa termičkim utjecajem narednog ili čak više narednih prolaza.



Slika 5. Oduzimanje uzorka materijala, koji su primjerni za simulaciju: a) Uzorak koristimo za simulaciju ZUT sa termičkim utjecajem jednog ili više prolaza; b) Uzorak koristimo za simulaciju zavara sa termičkim utjecajem svih narednih prolaza

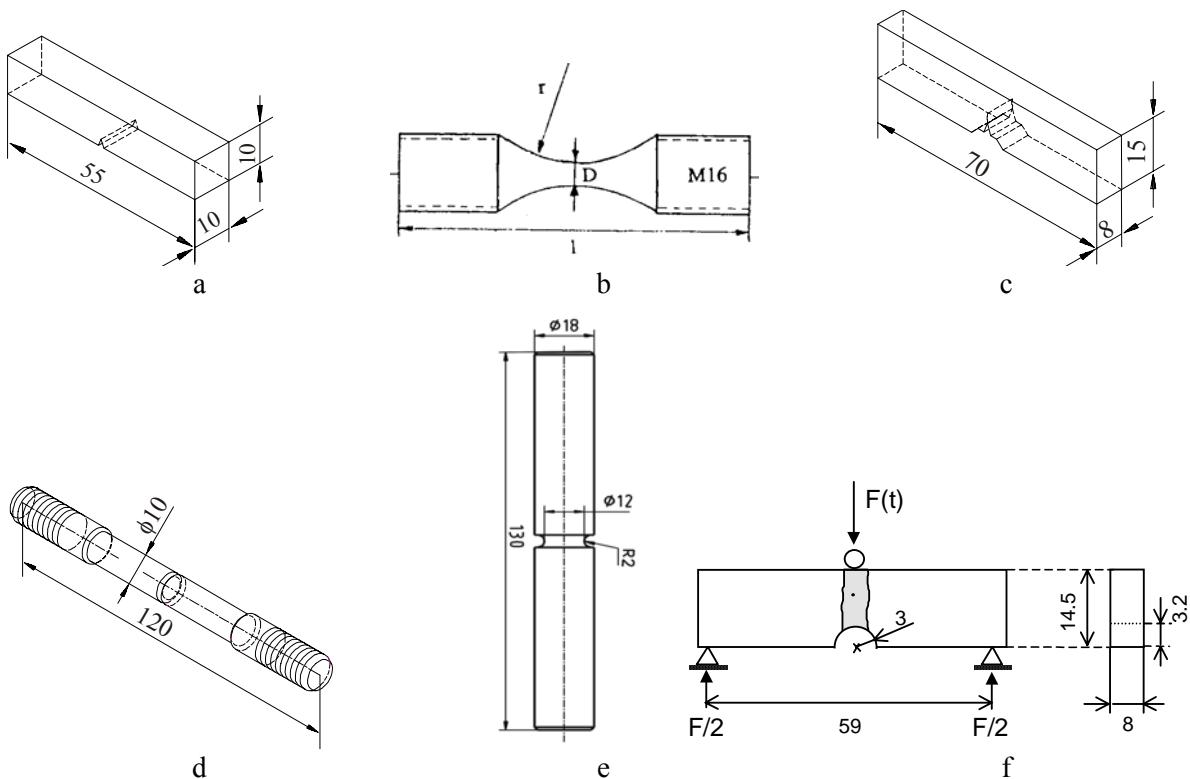
Na slici 6 prikazana je fotografija jednog od dostupnih simulatora toplinskog ciklusa zavarivanja.

Za vrijeme simulacije temperaturu na uzorku pratimo privarenom termoparom na mjestu gdje je temperatura najviša. Zagrijavanje je elektro otporno a snaga grijanja kompjuterski regulirana. Većina topline iz uzorka odvodi se na vodom hlađene čeljusti. Najviša je temperatura na sredini između čeljusti. Zbog svega toga je pripremljena zapremina uzorka sa ciljanom mikrostrukturom dosta mala. Ponekad svega nekoliko desetina mm³.



Slika 6. Priprema mikrostrukture ZUT simulacijom termičkih uvjeta zavarivanja: a) Izgled simulatora Smitweld prilikom izvođenja simulacije; b) Ograničen dio uzorka sa pripremljenom mikrostrukturom grubozrnatoga ZUT

Zbog relativno malih dimenzija uzorka materijala sa simuliranom mikrostrukturom pojedinih dijelova zavara probe za ispitivanje njihovih mehaničkih svojstava trebaju biti usklađene s tom zapreminom kako po veličini tako i po obliku. Na slici 7 prikazano je šest različitih vrsta proba [4,5,6], koje smo do sada koristili kod naših istraživanja. Sve su dosta male, a njihov oblik u većini nije standardiziran.



Slika 7. Probe izrađene iz uzoraka sa simuliranim mikrostrukturom ZUT koju smo pripremili na različitim simulatorima toplinskog ciklusa: a) Charpy proba; b) Proba na zatezanje u obliku pješčanog sata; c) Proba na ugib u tri tačke za određivanje žilavosti loma; d) Cilindrična proba na zatezanje za određivanje žilavosti loma; e) Rotacijski ugibna proba za određivanje dinamičke čvrstoće; f) Proba na ugib u jednoj ravni za određivanje dinamičke čvrstoće

Pripremi mikrostrukture zavara za daljnja istraživanja može se prići i na druge načine. U tom primjeru ne radi se o simulaciji stvarnih termičkih uslova zavarivanja. Ciljanu mikrostrukturu koja treba da bude ista kao kod stvarnog zavarivanja ili barem skoro ista na neki način projektiramo. Upotrebimo određeni način grijanja uzorka do temperature gdje se dovoljno brzo izvode određeni metalurški procesi ili da se materijal čak rastopi. Tu se najčešće koristi primjerne metalurške peći a mogući su i drugi pristupi. Vremenska zavisnost temperature planiramo tako da se za vrijeme termičke obrade izgradi tražena primarna mikrostruktura u potreboj veličini i obliku zrna, sa već stvorenim sekundarnim sastojcima ili da su ispunjeni uslovi za njihovo stvaranje kod hlađenja. Uzorce je treba na kraju na pravi način ohladiti do sobne temperature, da se sekundarni sastojci pravovrjemeno izluče ili da ostanu sasvim ili djelomično u krutom rastopu.

Prije grijanja, za vrijeme grijanja ili u završnom djelu pripreme mikrostrukture mogu se koristiti i razna mehanička sredstva za izvođenje plastične deformacije materijala u hladnom ili u topлом (termo mehanička obrada). U topлом se može u materijal unesti energija preko plastične deformacije za vrijeme grijanja iznad Ac_3 temperature čelika ili između Ac_3 i Ac_1 . Na kraju je potrebno upotrijebiti primjerno sredstvo za hlađenje, a samo hlađenje može se izvršiti sa prekidom/prekidima za izotermno razlaganje austenita ili bez prekida i to različitim brzinama. Prednost takve pripreme mikrostrukture je bitno veća zapremina uzorka sa mikrostrukturom pojedinih dijelova zavara koja se može koristiti za daljnja istraživanja. Ta zapremina može biti čak u veličini čitavog uzorka. Tako se mogu iz tih uzorka napraviti probe normalne veličine te izvoditi određena standardizirana testiranja.

Kad na taj način pripremamo mikrostrukturu ZUT koriste se komadi osnovnog materijala. Da bi mogli na taj način pripremiti mikrostrukturu zavara treba u peći zagrijati prave udjele osnovnog i dodatnog materijala i rastaliti njih. Najjednostavnije je primijeniti materijal vara, kojeg istražujemo, jer su u njemu potrebni udjeli oba materijala već prisutni. Zbog visoke temperature taljenja čelika za takvu zadaću treba raspolagati posebnom peći i primjernim modelom za prihvaćanje rastopa.

Talina u tom modelu kristalizira pa treba omogućiti odgovarajući način odvođenja topline, da se izgrade zrna kao kod kristalizacije kupke u zavarivanju. Sve što se dešava prilikom zaključnog hlađenja slično je kao kod pripreme mikrostrukture ZUT.

3. ZAKLJUČCI

Dakle, mikrostrukturu pojedinih dijelova zavara moguće je pripremiti u laboratorijskim uslovima. Za nešto takvo potrebno je raspolagati sa dovoljno velikim komadima materijala, koji služe kao izlazni materijal za oblikovanje mikrostrukture te odgovarajućom laboratorijskom opremom i nekim drugim sredstvima.

U primjeru pripreme mikrostrukture pojedinih dijelova ZUT kao izlazni materijal uvijek služi osnovni materijal. Kemijski sastav ZUT je naime isti kao kemijski sastav osnovnog materijala. Mikrostruktura osnovnog materijala se upotreboom laboratorijske opreme jedno stepeno ili u više stepena transformira u mikrostrukturu ciljanog dijela ZUT.

U primjeru pripreme pojedinih dijelova zavara izlazni materijal za oblikovanje mikrostrukture je zavar koji nastaje zavarivanjem sa jednim prolazom. Tada se istovremeno istope određeni dijelovi osnovnog/osnovnih materijala i dodatnog/dodatnih materijala te na taj način dobijemo materijal sa kemijskim sastavom određenog dijela zavara. Mikrostruktura tog materijala se upotreboom laboratorijske opreme jedno stepeno ili u više stepena transformira u mikrostrukturu ciljanog dijela zavara.

Iz uzoraka sa pripremljenom mikrostrukturom određenih dijelova zavara može se pripremiti probe za ispitivanje mehanički svojstava zavara. Traži se zapravo najslabije karike, jer su te odlučujuće za stvarnu čvrstoću zavara. Od stvarne čvrstoće svih opterećenih zavara zavisi kako će se zavari ponašati u eksplataciji. Tako od čvrstoće najopterećenijih zavara zavisi i nosivost zavarenih konstrukcija.

4. LITERATURA

- [1] Vuherer, T., "Analiza zaostalih notranjih napetosti s posebnim poudarkom na ponovnem vnosu toploite in njih meritve v sočelnih zvarnih spojih", Magistrska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor 1999
- [2] Gliha, V., Vuherer T., "HIPERTRACK, High performance rail tracks", final report about the ULJ material-characterisation activities in the Competitive and sustainable growth programme, 1998-2002, (HIPERTRACK, GRD1-2000-25612), University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2004, 32 pages
- [3] Gliha, V., "Fizikalni metalurške osnove varjenja", Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo, Maribor 2007
- [4] Gliha, V., "Analiza nosilnosti homogenih večvarkovnih zvarnih spojev pri utrujanju z ozirom na vplive parametrov varjenja in gradnje vara", Doktorska naloga, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehnika fakulteta: Ljubljana 1998
- [5] Vuherer, T., "Analiza vpliva mikro napak na trdnost pri utrujanju grobozrnatega TVP na zvarih", Doktorska naloga, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor 2008
- [6] 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