

O PREMENI AVSTENITA PRI OHLAJANJU ZVAROV JEKLA NIOMOL 490 K

ON THE AUSTENITE TRANSFORMATION DURING THE COOLING OF STEEL NIOMOL 490 K WELDS

Franc Vodopivec,¹ Gorazd Kosec,¹ Stanko Grbić, Dimitrij Kmetič¹

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

²SŽ Acroni d. d., Kidričeva 44, 4270 Jesenice, Slovenija

franc.vodopivec@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2004-03-15; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-04-19

Na osnovi razpoložljivih empiričnih podatkov je predložena razlaga nizke prehodne temperature žilavi-krhki lom pri Charpyjevem preizkusu, lom v coni toplotnega vpliva zvara jekla Niomol 490 K. Primerjava z bolj legiranim jeklom pokaže, da je najverjetnejši vzrok za višjo prehodno temperaturo premena avstenita z največjimi zrni v spodnji bainit.

Ključne besede: konstrukcijsko jeklo, zvar, cona toplotnega vpliva, mikrostruktura, zgornji bainit, Charpyjeva žilavost

On the basis of disponible empirical data an explanation for the higher transition temperature of the brittle-to-ductile fracture is proposed for the heat-affected zone of welds of steel Niomol 490 K. The comparison with a more alloyed steel shows that the transition temperature is increased probably because of the transformation of coarse-grained austenite to lower bainite.

Key words: structural steel, welds, heat affected zone, microstructure, lower bainite, Charpy transition temperature

1 UVOD

V uporabi sta dve vrsti varivih konstrukcijskih jekel: jekla z mikrostrukturo iz poligonalnih kristalnih zrn ferita in perlita, ki nastane pri normalizaciji ali pri ohlajanju po vročem valjanju, in jekla z mikrostrukturo, ki nastane pri toplotni obdelavi s kaljenjem in popuščanjem. Mikrolegirana jekla spadajo v prvo vrsto, večjo mejo plastičnosti pa jim daje deloma izločilna utrditev pri temperaturi pod 650 °C, deloma pa manjša rast kristalnih zrn avstenita med segrevanjem za normalizacijo in med parcialnimi vtiki pri vročem valjanju plošč, kar ima za posledico manjša kristalna zrna ferita in perlita kot v jeklih, ki niso mikrolegirana¹. Vsa konstrukcijska jekla so tem bolj variva, čim manj trdih in krhkih konstituent mikrostrukture nastane pri premeni avstenita v toplotno vplivanem področju zvara (TVP). V tej coni ima jeklo zelo heterogeno mikrostrukturo in lastnosti zato, ker je na eni strani trdno jeklo v stiku s talino s temperaturo nad 1600 °C, že na razdalji tudi pod 10 mm pa je temperatura pod premensko avstenit – ferit. Zato pri ohlajanju zvara nastane v TVP paleta konstituent mikrostrukture, za oceno varivosti pa je pomembna le najbolj krhka faza, v večini primerov martenzit, ki nastane s premeno zrn avstenita, ki so najbolj zrasla v pasu ob varku, kjer je bila najvišja temperatura. Mikrostruktura iz nizkoogljirnega martenzita ni zelo krhka, taka je le, če je nastala s premeno zelo velikih avstenitnih zrn. Trdota in krhkost martenzita sta odvisni od kemijske sestave jekla in sta tem večji, čim več je v jeklu elementov, ki povečujejo kaljivost,

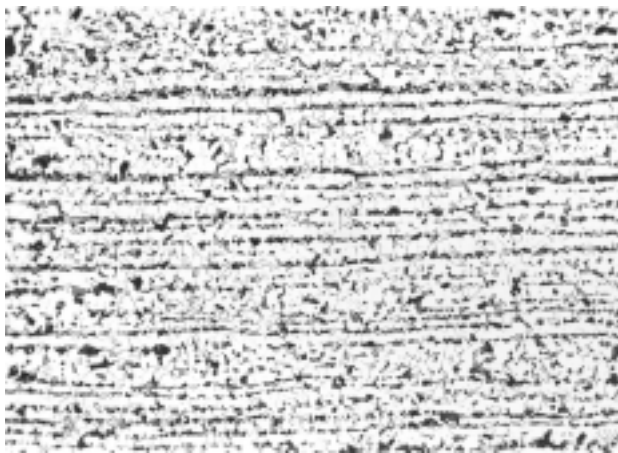
predvsem ogljika, pa tudi mangana, niklja, kroma, molibdena itd. Ob stiku s talino je temperatura trdnega jekla tik pod tališčem, sicer le kratek čas, vendar pa dovolj dolgo, da velikost avstenitnih zrn zraste za nekaj razredov, npr. od razreda 7 na razred 2 do 3 po ASTM, že na razdalji manj kot 1 mm pa se velikost kristalnih zrn močno zmanjša. Zaradi velikih kristalnih zrn se kaljivost močno poveča in pri premeni nastane martenzit, ki ga tudi pri mnogo hitrejšem ohlajanju z nekaj 100 °C nižje temperature normalizacije ne bi dosegli, ali pa bi ga pri nizkem ogljiku dosegli v neškodljivi obliki, kot npr. v dual ali dupleks jeklih z mikrostrukturo iz ferita in martenzita¹. Avstenitna zrna v pasu ob varkih praktično enako zrastejo, ne glede na kemijsko sestavo jekla. Pri temperaturi v tem pasu, ki preseže 1250 °C, se v avstenitu raztopijo vsi izločki, ki pri nižji temperaturi zadržujejo migracijo avstenitnih mej, npr. izločki aluminijevega nitrida in niobijevega karbonitrida². Do višje temperature so obstojni izločki titanovega nitrida, vendar je težko doseči, da bi v konstrukcijskih jeklih nastali v pravih količinah, velikosti in porazdelitvi prav zato, ker nastajajo že pri zelo visokih temperaturah nad 1250 °C.

Ogljikov ekvivalent, ki ga izračunamo iz kemijske sestave jekla, je približno merilo nagnjenosti jekla za tvorbo trde in krhke mikrostrukture in za izbiro primerne temperature predgrevanja jekla. Čim višja je ta temperatura, tem manjša je hitrost ohlajanja jekla v TVP in tem manjša je možnost premene pasa velikih zrn avstenita v martenzit.

2 ZNAČILNOSTI JEKLA NIOMOL 490 K

Kratek uvod je bil potreben zato, da lažje razumemo, zakaj se jeklo Niomol 490 K razlikuje od drugih varivih konstrukcijskih jekel. V **tabeli 1** so navedene kemijske sestave treh varivih konstrukcijskih jekel, na **slikah 1 in 2** pa mikrostruktura jekla iz poligonalnih zrn ferita in perlita vrste Č-0562 oz. St. 52-3 in jekla Niomol 490 K, ki ima mikrostrukturo iz kaljenih in popušenih ferita in perlita (**slika 2**). Včasih namesto majhnih zrn perlita najdemo tudi podobno velika zrna bainita ali martenzita. Ti dve komponenti mikrostrukture ne vplivata na duktilnost, ker so zelo majhna zrna obdana s feritom¹. Kristalna zrna so zelo majhna in zato je teoretični delež velikosti zrn v meji plastičnosti 50,4 %, npr. pri jeklu z mikrostrukturo iz poligonalnih ferita in perlita Č.0562 je ta delež 36,3 %, pri jeklu z mikrostrukturo iz popuščenega martenzita (Nionikral 70) pa 45,8 %³. V **tabeli 1** je naveden za vsa jekla ogljikov ekvivalent, ki je bil izračunan na način, ki ga priporoča IIW (International Institute of Welding). Jeklo Niomol vsebuje najmanj ogljika, je malo legirano in ima majhen C-ekvivalent, zato načeloma zanj predgrevanje ni potrebno. Pri znižanju temperature pod sobno se trdnostne lastnosti vseh treh jekel povečajo, vendar ne enako, pri vseh treh pa se do temperature ničelne duktilnosti (NDT) kontrakcija in enakomerni raztezek zmanjšata le malo⁴.

Jeklo Niomol ima zaradi manjše velikosti zrn nižjo prehodno temperaturo Charpyjeve žilavosti kot jekla St. 52-3 in podobno prehodno temperaturo kot jeklo Nionical 70⁴ in približno enako Charpyjeva žilavost kot drugi dve jekli v območju popolnoma krhkega loma^{5,6}.



Slika 1: Mikrostruktura jekla Č.0562 (St.52-3). Povečava 100-kratna
Figure 1: Microstructure of the steel Č.0562 (St.52-3)



Slika 2: Mikrostruktura jekla Niomol 490 K. Povečava 100-kratna
Figure 2: Microstructure of the steel Niomol 490K

Zato velja zanj enaka analitična odvisnost med Charpyjevo žilavostjo in žilavostjo loma kot za primerjalni jekli, pa tudi za druga konstrukcijska jekla⁴. S stališča stabilnosti konstrukcij je uporaba jekla Niomol 490 K enako varna kot uporaba drugih konstrukcijskih jekel, tudi jekel Č.0562 in Nionical 70⁷.

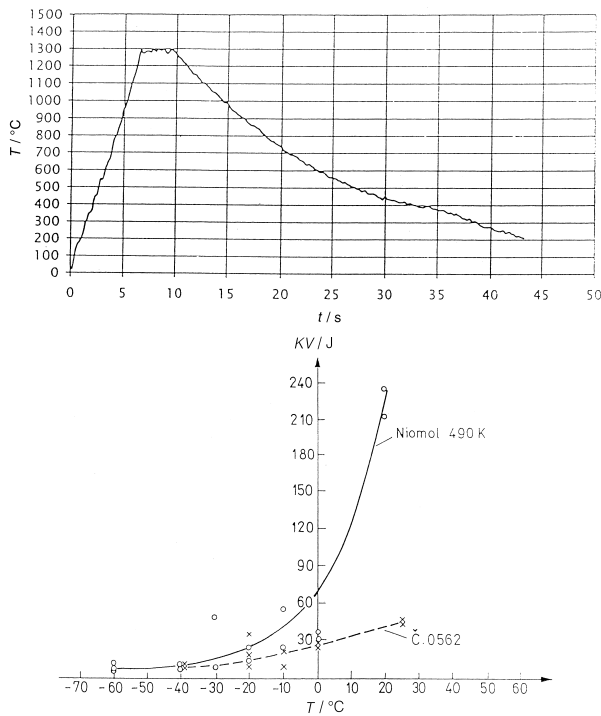
3 MIKROSTRUKTURA IN ŽILAVOST V TOPLOTNI CONI ZVARA

Obravnavali bomo le mikrostrukturo in žilavost pasa toplotne cone tik ob deponiranem varku, kjer so kristalna zrna avstenita najbolj zrasla, zato v tem delu TVP kaljivost jekla največja, mikrostruktura pa najbolj krhka.

V sklepih vira 8 je zapisano tudi: "Do sedaj analizirani rezultati dokazujejo, da jeklo Niomol 490 K ni sposobno za uporabo v visoko obremenjenih konstrukcijah, predvsem kadar obstaja nevarnost pojava krhkega loma zaradi nizkih temperatur obratovanja, četudi so časi ohlajenja po varjenju $\Delta t_{8/5}$ pod 10 s". V poročilu ni rezultatov meritev vpliva temperature na žilavost, tudi ni podatkov, na osnovi katerih bi lahko sklepali o naravi mikrostrukture v TVP pasu, kjer nastane krhki lom. V viru 9 je bil raziskan vpliv hitrosti ohlajanja $\Delta t_{8/5}$ in temperature na Charpyjevo žilavost jekla po segrevanja in ohlajanju, s katerim se simulira toplotne razmere pri varjenju. Na **slikah od 1 do 4** so prikazani rezultati teh preizkusov. Pri simulaciji depozicije enega varka (**slika 3 do 6**) je žilavost jekla Niomol 490 K boljša v vsem razponu temperature in je še posebno velika po hitrejšem ohlajanju v temperaturnem območju premene avstenita.

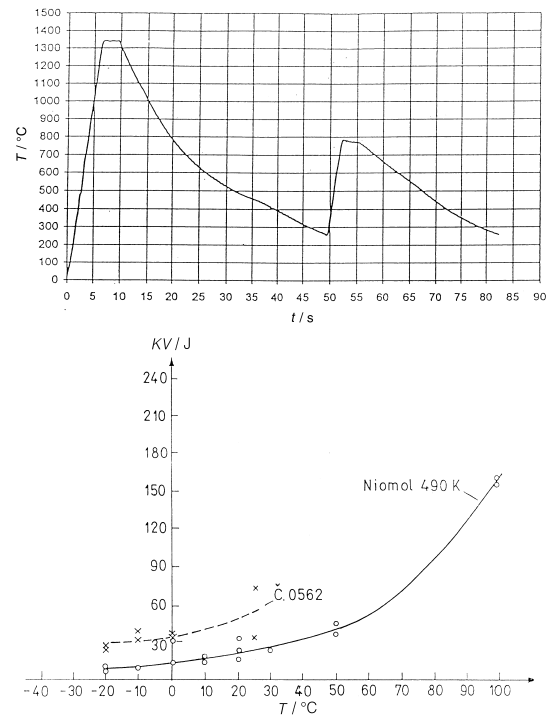
Tabela 1: Informativna sestava masnih deležev treh varivih konstrukcijskih jekel v odstotkih

Vrsta jekla (debelina plošče)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Al	N	C _{ekv}
Č.0562 (25 mm)	0,17	0,32	1,28	0,020	0,009	0,21	0,23	0,05	0,35	0,003		0,045	0,009	0,474
NIOMOL 490 K (25 mm)	0,08	0,34	0,36	0,011	0,004	0,54	0,17	0,27	0,36	0,058		0,052	0,007	0,337
NIONICRAL 70 (20 mm)	0,11	0,28	0,27	0,009	0,007	1,07	2,80	0,26	0,20		0,06	0,043	0,007	0,633



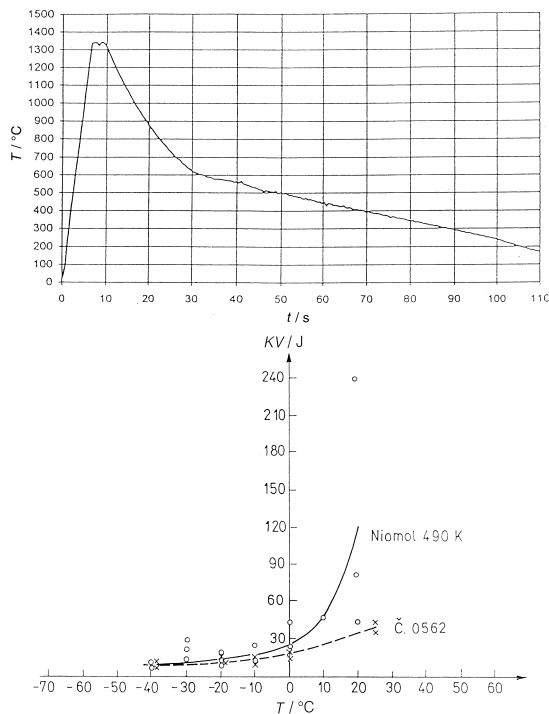
Slika 3: Simulacija segrevanja in počasnega ohlajanja jekel in odvisnost Charpyjeve zrezne žilavosti od temperature za pas največjih zrn avstenita

Figure 3: Simulation of heating and slow cooling of steels and the dependence of the Charpy notch toughness temperature for the area of the most coarsened austenite grains



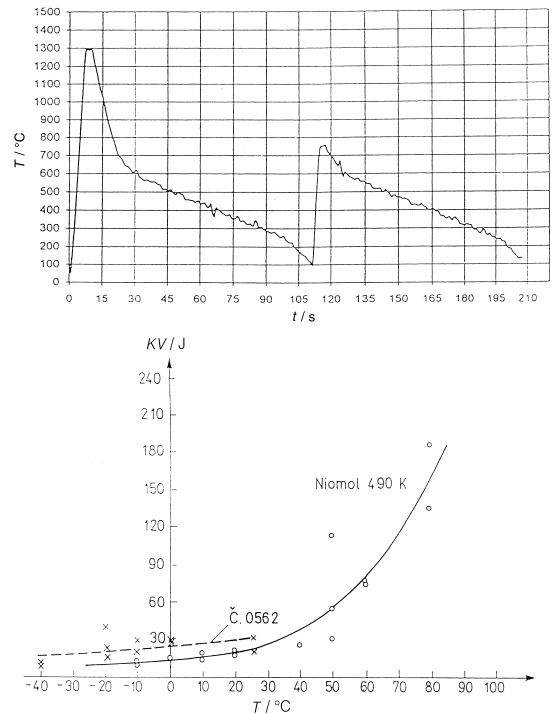
Slika 5: Simulacija segrevanja in popuščenja s počasnim ohlajanjem in odvisnost Charpyjeve zrezne žilavosti od temperature za pas največjih zrn avstenita

Figure 5: Simulation of heating and tempering with slow cooling and the dependence of the Charpy notch toughness temperature for the area of the most coarsened austenite grains



Slika 4: Simulacija segrevanja in hitrejšega ohlajanja jekel in odvisnost Charpyjeve zrezne žilavosti od temperature za pas največjih zrn avstenita

Figure 4: Simulation of heating and slower cooling of steels and the dependence of the Charpy notch toughness temperature for the area of the most coarsened austenite grains



Slika 6: Simulacija segrevanja in popuščenja s hitrejšim ohlajanjem in odvisnost Charpyjeve zrezne žilavosti od temperature za pas največjih zrn avstenita

Figure 6: Simulation of heating and tempering with faster cooling and the dependence of the Charpy notch toughness temperature for the area of the most coarsened austenite grains

V tem primeru je žilavost pri 0 °C okoli 70 J, po počasnejšem ohlajanju pa okoli 25 J. Pri simulaciji depozicije dveh varkov, ohlajanje in popuščanje pri temperaturi okoli 760 °C, ostaja žilavost jekla Č.0562 približno enaka, pri jeklu Niomol 490 K pa se majhna žilavost pomakne k višji temperaturi in pri 0 °C je samo okoli 15 J.

Po slikah 3 do 6 sklepamo, da je jeklo Č.0562 malo občutljivo za zmanjšanje žilavosti zaradi različne hitrosti ohlajanja zvarov zato, ker je bila pri vseh 4 režimih simulacije žilavost pri 0 °C med 25 J in 35 J. Jeklo Niomol 490 K je sicer absolutno manj občutljivo na optimalen potek premene avstenita v TVP, žilavost je 760 J pri 0 °C po simulaciji na **sliki 3**, močno pa je občutljivo na manjšo hitrost ohlajanja in ponovno segrevanje na 760 °C toploten režim. Razliko med žilavostjo jekla Niomol 490 K po režimu na **slikah 3 in 4** je mogoče razložiti z občutljivostjo grobozrnatega avstenita v tem jeklu na hitrost ohlajanja oz., pravilnejše, na temperaturo premene avstenita. Očitno je, da ima hitrejše ohlajanje pozitiven vpliv, čeprav bi v tem primeru nastalo več martenzita, ki je načeloma krhka konstituenta mikrostrukture.

Mikrostrukturne analize še ne omogočajo, da bi dovolj zanesljivo sklepali o mikromorfologiji premen-skih produktov avstenita pri jeklu Niomol 490 K, še posebej pa ni jasno, kaj se v mikrostrukturi dogodi pri ponovnem segrevanju jekla pri temperaturi 760 °C in ponovnem ohlajanju.

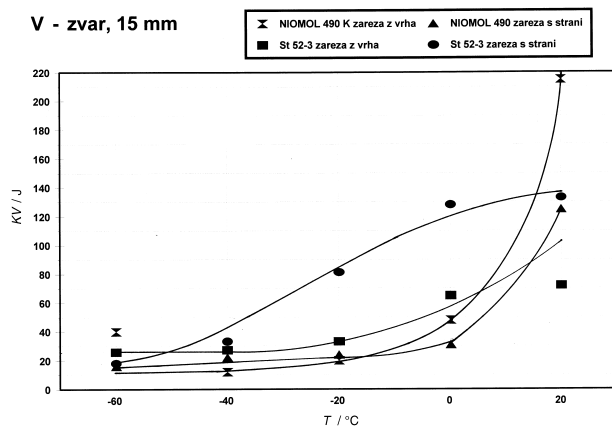
Vsebnost ogljika v jeklu Č.0562 praktično še enkrat večja kot v jeklu Niomol 490 K. Če predpostavimo, da po premeni ostane v raztopini v feritu 0,02 %C, kar približno ustreza največji topnosti pri eutektoidni temperaturi v binarnem faznem diagramu Fe-C, nastane pri drugem segrevanju na 760 °C 2,5-krat več avstenita v jeklu Č.0562, kot v jeklu Niomol 490 K. Logičen je zato sklep, da je mikromorfološko premena avstenita različna v obeh primerih, mogoče je celo drugačen mehanizem

premene. Temu ustreza je tudi razlika v žilavosti obeh jekel pred segrevanjem na 760 °C in po njem. Zato je primerjava obeh jekel na osnovi **slik 5 in 6** nerealna brez natančnega poznavanja, kako je ponovno segrevanje vplivalo na mikrostrukturo obeh jekel.

V uvodu vira 10 beremo ugotovitev: "Jeklo Niomol 490 K je zaradi lokalnega toplotnega posega pri varjenju v TVP nagnjeno h krhkosti, kar potrjujejo tudi udarne žilavosti in raziskave lomne žilavosti na majhnih in na velikih preizkušancih. Navedena krhkost se pojavlja že pri nizkih dovedenih toplotah, torej tudi pri neproduktivnem načinu varjenja". V zelo dobrem in sistematičnem poročilu so predstavljeni nato rezultati raziskav zvarnih spojev plošč z debelino 15 mm in 25 mm iz jekel Č.0562 in Niomol 490 K.

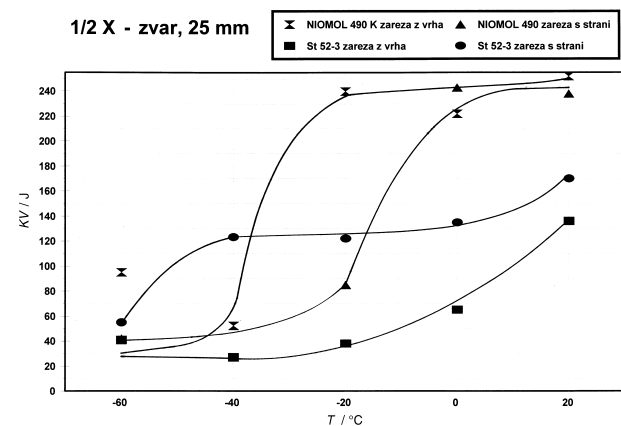
Zarezna žilavost je zelo odvisna od mikrostrukture v dnu zarez. To je težko pripraviti tako, da bo njena konica v pasu največjih zrn avstenita, in prav to nam razloži velike razlike med nazivno enakimi paralelkami v ref. 10. Zato je vpliv temperature na minimalno žilavost, ki je bila izmerjena v vsaki seriji paralelk, na **slikah 7 in 8** bolj realno merilo krhkosti kot povprečje vseh meritev. Absolutno so vrednosti žilavosti sicer manj zanesljive, ker temeljijo na eni meritvi pri vsaki temperaturi, vendar pa jasno pokažejo, da je v enakih pogojih varjenja žilavost zelo podobna pri ploščah iz jekla Č.0562 obeh debelin, da pa je precej boljše pri zvaru iz debelejšje pločevine jekla Niomol 490 K, kot pri zvaru tanjše plošče iz istega jekla. To je skladno s pričakovanjem na osnovi **slike 4**, ki dokazuje, da je žilavost najbolj krhkega dela TVP jekla Niomol 490 K manjša pri manjši hitrosti ohlajanja.

Avstenina zrna so enako velika v najbolj vročem delu toplotne cone pri obeh jeklih in vseh ploščah, ker je bil avstenit pregret na zelo podobno ali isto zelo visoko temperaturo. To potrjujejo podatki v viru 10, kjer so podatki velikosti zrn po ASTM na različnih mestih toplotne cone zvara. Zaradi kemijske sestave je kaljivost



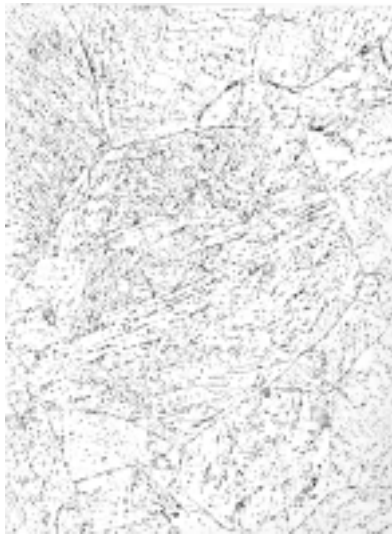
Slika 7: Odvisnost Charpyjeve žilavosti od temperature za cono toplotnega vpliva zvara za 15-milimetrske plošče obeh jekel

Figure 7: Dependence of the Charpy notch toughness temperature for the heat-affected zone of welds of 15-mm plates of both steels



Slika 8: Odvisnost Charpyjeve žilavosti od temperature za cono toplotnega vpliva zvara za 25-milimetrske plošče iz obeh jekel

Figure 8: Dependence of the Charpy notch toughness temperature for the heat-affected zone of welds of 25-mm plates of both steels



Slika 9: Mikrostruktura v velikem kristalnem zrnju avstenita v toplotno vplivani zoni zvara 15 mm plošče iz jekla Niomol 490 K. Povečava 500-kratna

Figure 9: Microstructure in a coarsened austenite grain in the heat-affected zone of a 15-mm plate of steel Niomol 490 K

jekla St 52.3 večja, zato se v njem pri ohlajanju premena avstenita izvrši pri nižji temperaturi, kjer nastane trši martenzit. Temu ustrežno je tudi manjša žilavost pri tem jeklu, kot je prikazano na **slikah 7 in 8**. Kaljivost je tolikšna, da ni razlike v žilavosti zaradi različne debeline plošč iz tega jekla, oz. zaradi različne hitrosti ohlajanja zvarov.

Dosedanje mikrostrukturne raziskave še ne omogočajo, da bi popolnoma zanesljivo opredelili, katera konstituenta mikrostrukture je vzrok za manjšo žilavost jekla v TVP grobozrnatega pasu zvarov jekla Niomol 490 K, ki se ohladijo počasneje s temperature varjenja. Razlika očitno ni v velikosti zrn avstenita, tudi ni v martenzitu, ker bi v tem primeru pričakovali manjšo žilavost po hitrejšem ohlajanju. Pri obeh jeklih in obeh ploščah v pasu največjih zrn ni proevtektoidnega ferita in perlita. Pri hitrosti, ki je manjša od kritične, ki je potrebna za premeno avstenita v martenzit, nastaja najprej spodnji in nato zgornji bainit. Ti dve konstituenti mikrostrukture se mikromorfološko in po mehanizmu nastanka zelo razlikujeta, čeprav sta obe dvofazni in iz ferita in cementitnih zrn. Zgornji bainit je zmes lamel ferita in nizov izločkov cementita, oboje je zelo majhno glede na velikost avstenitnega zrna, iz katerega je nastalo, in ima v istem zrnju avstenita različno kristalografsko orientacijo. Od take mikrostrukture lahko pričakujemo podobno žilavost kot od popuščene martenzita, torej precej veliko žilavost. V spodnjem bainitu so snopi letav ferita in nizi cementitnih dolgi, pogosto praktično presekajo celo avstenitna zrna (**slika 9**), v katerem so nastali, in ležijo približno v (111) ploskvah avstenita¹¹.

Žilavost v TVP jekla Niomol 490 K je večja pri večji hitrosti ohlajanja, ko bi lahko nastal s premeno avstenita martenzit ali spodnji bainit, in manjša pri manjši hitrosti

ohlajanja, ko bi nastal zgornji bainit. Torej dosednji empirični in malo sistematski rezultati nakazujejo, da je vzrok za manjšo žilavost zvarov jekla Niomol 490 K pri manjši hitrosti ohlajanja premena avstenita z največjimi zrni v spodnji bainit. Zaradi specifične izrazite lamelaste mikrostrukture z dolgimi lamelami ferita in nizi cementita je mogoče, da se prav tej konstituenti mikrostrukture z znižanjem temperature najbolj zmanjšuje cepilna trdnost, kar bi bila razlaga za višjo temperaturo pojava krhkega loma. Pri depoziciji naslednjega varka, ko se temperatura dvigne nad evtektoidno, spodnji bainit ohrani praktično nespremenjen habitus ferita, v in ob nizih cementitnih zrn pa nastanejo tanke letve avstenita, ki pri ponovnem ohlajanju lahko premenijo v enake letve martenzita.

SKLEPI

Žilavost pasa največjih zrn avstenita je pri jeklu Niomol 490 K pri ustrezni hitrosti ohlajanja zvara večja od žilavosti zvarov jekla Č.0562. Pač pa je žilavost v TVP zvarov jekla Niomol 490 K bolj občutljiva za hitrost ohlajanja in nekoliko presenetljivo žilavost je manjša pri manjši hitrosti ohlajanja.

Dosednji eksperimentalni rezultati nakazujejo, da je najverjetnejši vzrok krhkosti premena avstenita z največjimi zrni pri ohlajanju TVP v spodnji bainit. V nasprotju z martenzitom, ki pri depoziciji naslednjih varkov popusti in se zato poveča njegova žilavost, spodnji bainit ohrani malo nespremenjeni začetni habitus, njegova žilavost pa se lahko celo zmanjša.

Raziskovanje se nadaljuje z več cilji: izmeriti Charpy žilavost čistih konstituent mikrostrukture, določiti zanje prehodno temperaturo žilavosti in za vsako mikrokonstituento izmeriti tudi cepilno trdnost.

LITERATURA

- ¹ B. Pretnar: *Želez. zbornik*, 17 (1983), 111
- ² F. Vodopivec: *Kov. zlit. tehn.*, 26 (1992), 319
- ³ F. Vodopivec, J. Vojvodič-Tuma, M. Lovrečič-Saražin; *Kov. zlit. tehn.*, 32 (1999), 463
- ⁴ J. Vojvodič-Tuma: *Journal of Processing Technology*, 121 (2002), 323
- ⁵ F. Vodopivec, J. Vojvodič-Gvardjančič v: M. Tokuda, B. Xu: *Mechanical properties of Advanced Engineering materials*, Mie Univer. Press, Japan, 2003
- ⁶ J. Vojvodič-Tuma: *Nuclear Eng. Des.*, 211 (2002), 105
- ⁷ B. Ule et al.: *Razvoj in uvajanje visokotrdnih drobnozrnatih mikrolegiranih jekel za uporabo v procesni industriji in gradbeništvu*, Report IMT, 1993
- ⁸ I. Rak et al.: *Optimiranje varjenja jekla Niomol 490 K za izdelavo zahtevnih konstrukcij*; Report, Univ. v Mariboru, Fak. za strojništvo, Varilni laboratorij, 1999
- ⁹ J. Vojvodič-Tuma et al.: *Optimiranje varjenja jekla Niomol 490 K za izdelavo zahtevnih konstrukcij*, Report, IMT, 2001
- ¹⁰ S. Grbić: *Preiskus varivost DP jekla Niomol 490 K z dodatkom titana ter primerjava z varivostjo DP iz jekla St. 52-3*, Report, SŽ Acroni Jesenice, 2001
- ¹¹ R. E. Reed-Hill, R. Abbaschian: *Physical Metallurgy Principles*; PWS Publ. Comp., Boston 1996, 617