

Ocena nizkotemperaturne uporabnosti drobnozrnatih mikrolegiranih jekel kot izhodišče pri konstruiranju objektov

Evaluation of the Low Temperature Application of HSLA Steels by the Criteria for Structures Designing

S. Ažman, SRR Železarna Jesenice, Jesenice

J. Vojvodič-Gvardjančič, IMK Ljubljana

B. Ule, IMT Ljubljana

Napredek metalurške tehnologije v izdelavi in proizvodnji konstrukcijskih mikrolegiranih drobnozrnatih jekel v zadnjih treh desetletjih je dal strojogradnji in gradbeništvu boljše gradbene materiale od prej uporabljenih C-Mn konstrukcijskih jekel. Istočasno pa sodobne metode lomne mehanike jasno kažejo, da stari kriteriji za konstruiranje, ki so bazirali na trdnostnih lastnostih materiala ne zadoščajo več, temveč mora konstruktor za varno projektiranje dodatno uporabiti kriterije lomne mehanike.

Ključne besede: drobnozrnata mikrolegirana jekla, konstruiranje, lomna mehanika, nizke temperature

The development of the metallurgical technology in steelmaking and production of HSLA Steels made in the last three decades has given new better materials than there were standard C-Mn engineering and structural steels. At the same time the methods of the modern fracture mechanics clearly show that the former criteria by structures designing basing on the strength and toughness of material are not sufficient anymore. In designing an engineer has to apply additional fracture mechanics criteria to design a safe structure.

Key words: HSLA steels, structures design, fracture mechanics, low temperatures

1 Uvod

Z razvojem mikrolegiranih drobnozrnatih jekel v zadnjih treh desetletjih sta strojogradnja in gradbeništvu dobila gradiva z boljšimi lastnostmi kot so jih imela C-Mn konstrukcijska jekla.

Mikrolegirana drobnozrnata jekla vsebujejo majhne vsebnosti niobija, vanadija, titana, molibdena in nekaterih drugih elementov, posamič ali v kombinacijah, ki tvorijo karbide in karbonitride. Na ta način se v teh jeklih formirajo drobnozrnate mikrostrukture, ki v kombinaciji z izločevalnim utrjevanjem matriksa povzročijo povečano napetost tečenja.

Istočasno se tem jeklom zelo zniža temperatura prehoda v krhko stanje. Zaradi istočasnega znižanja ogljika pa obdržimo dobro varivost. Vsebnost ogljika se namreč pri novejših vrstah mikrolegiranih jekel giblje v mejah med 0,03 in 0,12%.

Povišana meja tečenja, znižana temperatura prehoda v krhko stanje in dobra varivost so lastnosti, zaradi katerih so mikrolegirana fino-zrnata jekla prvovrstni konstrukcijski material.

2 Prikaz problema in predlagana rešitev

Z uvajanjem termomehanske predelave jekel se je zmanjševanje kristalnih zrn še stopnjevalo, tako da je bilo mogoče, zaradi izboljšane žilavosti in varivosti pri

sicer enakih trdnostnih lastnostih jekel, vsebnost ogljika še znižati.

Termomehanska predelava npr. z niobijem legiranih jekel, pri katerih zadnje stopnjo plastične deformacije opravimo v temperaturnem območju metastabilnega austenita (oziroma celo v austenitno-feritnem območju), povzroči zavrtje rekristalizacije med valjanjem tako, da rekristalizacija ne poteče v celoti do začetka premene. V deformiranih zrnih austenita se zato razvije mnogo feritnih kali na samih mejah zrn, kot tudi v deformacijskih pasovih znotraj zrn. Posledica tega je izredno fina sekundarna feritna mikrostruktura.

Pri kontroliranem valjanju, pri katerem je ohlajanje po valjanju pospešeno, imajo jekla običajno še finejšo mikrostrukturo, namreč substrukture acikularnega ferita, z velikostjo subzrn pod $1 \mu\text{m}$.

Pri maksimalni hitrosti ohlajanja po valjanju pa je mikrostruktura nekaterih tovrstnih jekel ekvivalentna mikrostrukтури kaljenih jekel s podobno sestavo.

Čeprav raziskave vpliva sestave, končne temperature valjanja ter hitrosti ohlajanja po valjanju v svetu še vedno intenzivno potekajo^{1,2}, v tem članku te problematike ne obravnavamo. Pozornost smo osredotočili na lastnosti in obnašanje tovrstnih jekel pri nizkih temperaturah ter na izbiro relevantnih kriterijev za določevanje uporabnosti drobnozrnatih mikrolegiranih jekel kot izhodišče pri konstruiranju objektov.

Znano je, da je mikrostruktura drobnozrnatih mikrolegiranih jekel pretežno feritna z drobnimi zrnji poligonalnega oziroma acikularnega ferita. Vsekakor je karakteristično velikost feritnih zrn mogoče definirati. Odvisnost spodnje napetosti tečenja σ_{ys} tovrstnih jekel od velikosti zrn d (incept grain size), daje Hall-Petchova enačba^{3,4} v obliki:

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

kjer je σ_i napetost potrebna za premagovanje mrežnega trenja, odvisna v glavnem od temperature, hitrosti deformacije in stopnje izločevalnega utrjevanja, k_y pa je konstanta, povezana z oviranjem, ki jo za tečenje predstavljajo meje kristalnih zrn. Petch⁴ je ugotovil tudi, da je oblika enačbe (1) neodvisna od tega ali gre za duktilni lom ali pa za krhko cepljenje kovine. V slednjem primeru je v enačbi (1) potrebno namesto napetosti tečenja σ_{ys} pisati cepilno trdnost σ_F (cleavage fracture stress), torej napetost, potrebno za napredovanje nukleiranih mikro-rzopok. Novejše raziskave Okumure⁵ sicer kažejo, da cepilna trdnost res narašča z zmanjšanjem velikosti feritnih zrn (pri jeklih z velikostjo zrn $d = 3.5 \mu\text{m}$ so na primer namerili cepilno trdnost preko 2300 MPa), vendar pa odvisnost ni povsem linearna. Če merimo velikost zrn d v μm ter σ_{ys} v MPa, potem ima k_y v enačbi (1) vrednost približno 18.

Enostaven račun pokaže, da zmanjšanje velikosti kristalnih zrn od $20 \mu\text{m}$ (velikost zrn 8 po ASTM) na le $4 \mu\text{m}$ (velikost zrn 13 po ASTM) zviša napetost tečenja jekla za 155 MPa.

V širokem temperaturnem intervalu velja praktično linearna odvisnost med trenjsko napetostjo σ_i in obratno vrednostjo absolutne temperature T :

$$\sigma_i = c + \frac{e}{T} \quad (2)$$

e in c sta konstanti.

Raziskave kažejo, da za temperaturo prehoda v krhko stanje T_p velja:

$$\frac{1}{T_p} = A + B d^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Odvisnost (3) velja v širokem temperaturnem intervalu in prihaja do odstopanj od eksperimentalno izmerjenih vrednosti le pri zelo nizkih prehodnih temperaturah T_p , pri katerih tudi odvisnost (2) ni več povsem linearna.

V literaturi naletimo tudi na drugačne formule za izračunavanje prehodne temperature. J.H. Woodhead⁶ v svojem pregledu navaja za izračunavanje prehodne temperature izraz oblike:

$$T_p = T_0 - C d^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

T_0 in C v enačbi (4) sta konstanti, ki ju moramo eksperimentalno določiti. Vrednost člena T_0 je odvisna od istih parametrov, kot vrednost člena σ_i v enačbi (1). T_0 se torej povečuje zaradi vplivov, ki jeklo utrjujejo, z izjemo velikosti zrn d . Močno se na primer poveča zaradi prisotnosti velikih karbidov na mejah feritnih zrn, učinek teh karbidov pa je mogoče linearno povezati s kvadratnim korenem iz njihove debeline⁷.

V nasprotju s T_0 je parameter C skoraj neodvisen od naštetih vplivov.

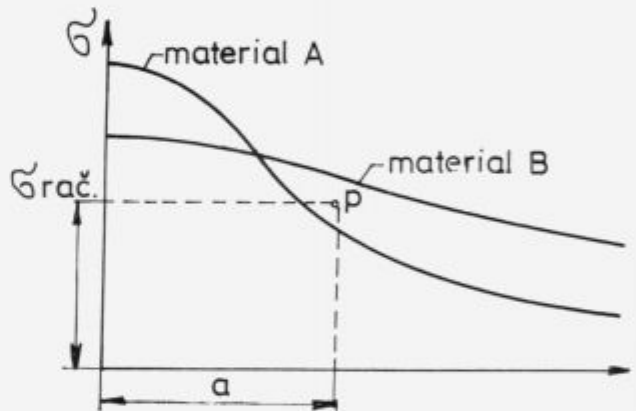
Ako merimo velikost feritnih zrn d v μm in prehodno temperaturo T_p pri Charpyjevem merjenju žilavosti (ISO-V ali pa DVM) v $^{\circ}\text{C}$, potem ima parameter C v enačbi

(4) vrednost približno 12. Enostaven račun pokaže, da zmanjšanje d -ja od $20 \mu\text{m}$ (velikost zrn 8 po ASTM) na le $4 \mu\text{m}$ (velikost zrn 13 po ASTM) zniža prehodno temperaturo za 104°C .

S prvimi dokumentiranimi mehanskimi preizkusi materialov, se je ukvarjal že Leonardo da Vinci. Pri preizkusu natezne trdnosti jeklenih žic različnih dolžin je prišel do rezultata, da je natezna trdnost odvisna tudi od dolžine. To spoznanje je v nasprotju s teorijo elastičnosti, ni pa napačno. Okrog leta 1920 je podoben preizkus opravil Griffith na steklenih palicah različnih dolžin in prišel do enakega zaključka. Od tod se je razvila ideja, da na nosilnost elementa vplivajo tudi napake v materialu ter da je možnost prisotnosti napak pri daljši palici večja.

Pri sodobnih konstrukcijah je zaradi novih tehnoloških postopkov, uporabe boljših materialov ter zlasti razvoja defektoskopskih metod kontrole kvalitete možnost napak sicer manjša, zato pa v pogojih ekonomičnega dimenzioniranja lahko usodna.

Shematski diagram na sliki 1 predstavlja porušitveno napetost dveh različnih materialov v odvisnosti od dolžine razpoke, ki je lahko prisotna.



Slika 1. Porušitvena napetost dveh različnih materialov v odvisnosti od dolžine razpoke.

Figure 1. Ultimate stress for two various materials depending on the crack length.

Krivulja A velja za material visoke trdnosti in slabe lomne žilavosti, krivulja B pa velja za material nizke trdnosti in dobre lomne žilavosti. Z vidika teorije elastičnosti je material A z višjo trdnostjo boljši od materiala B. To v resnici velja, če v materialu ni razpoke. Pri razpoki velikosti a^* in računski napetosti $\sigma_{rač}$ je material B odporen proti porušitvi, ker leži točka P pod krivuljo B, medtem ko bi se konstrukcija iz materiala A z razpoko a^* porušila.

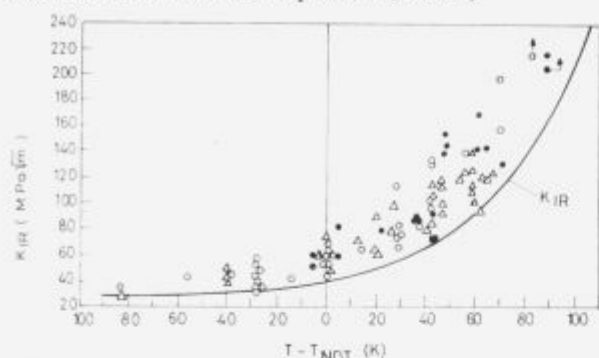
Iz diagrama na sliki 1 sledi, da so trši oziroma trdnjši materiali načeloma zarezno občutljivejši od mehkih materialov, ki so se sposobni ob zarezni plastično deformirati. O trdnosti materiala zato lahko govorimo le tedaj, če v njem ni večjih napak, na primer razpok. V nasprotnem primeru je s stališča trdnosti konstrukcije bolj primerno računati z lomno žilavostjo K_{IC} . Ta je povezana z velikostjo napake in z delujočo napetostjo z relacijo:

$$K_{IC} = \text{konst.} \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

K_{IC} je dejanska slika krivulj v diagramu na sliki 1.

Medtem ko trdnost jekla ni odvisna veliko od temperature eksploatacije (meja plastičnosti pa se z zniževanjem

temperature celo zvišuje), pa je žilavost oz. lomna žilavost jekla močno odvisna od temperature (slika 2).



Slika 2. Odvisnost referenčnega faktorja intenzitete napetosti K_{IR} od referenčne temperature ničelne duktilnosti ($T - T_{NDT}$).
Figure 2. Relation between the reference stress intensity factor K_{IR} and the reference nil-ductility temperature ($T - T_{NDT}$).

Znižanje K_{IC} zaradi znižanja temperature pomeni skladno z enačbo (5), da se pri neki velikosti napake a močno poslabša nosilna napetost σ , torej tista veličina, ki jo imamo za osnovo trdnosti konstrukcijskega elementa.

Kaj pa lahko proizvajalec jekel stori, da izboljša varnost konstrukcije? Največ lahko jeklarska industrija stori s tem, da skuša izdelati materiale, ki imajo poleg zadostne trdnosti tudi dobre žilavostne lastnosti pri nizkih temperaturah in visoko sposobnost deformacije v hladnem, kar je tesno povezano z uspešno zaustavitvijo razpok, ki se običajno inicirajo na zavarjenih mestih.

Moderna jeklarska tehnologija je z uporabo vakuumske komore in ponovne metalurgije omogočila izdelavo jekel, ki so mnogo čistejša, z modificiranimi vključki, z izjemno nizkim žveplom in fosforjem, nizko količino plinov in enakomernimi lastnostmi v vseh treh smereh.

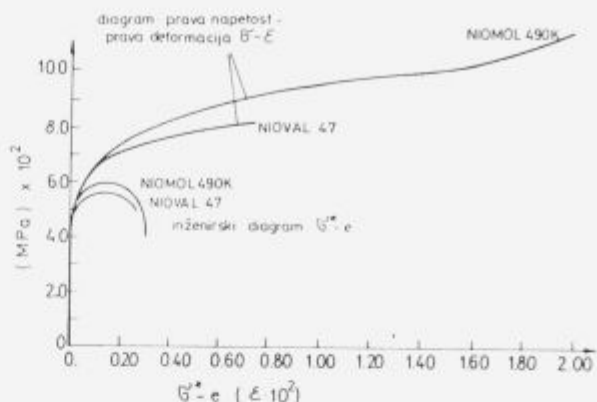
Na sliki 3 kot primer prikazujemo razlike med sposobnostjo plastične deformacije starejšega mikrolegiranega jekla NIOVAL 47 in novega mikrolegiranega jekla NIOMOL 490 K pri trgalnem preizkusu. Prikazana sta običajni inženirski in realni trgalni diagram (realna obremenitev na spreminjajoči se presek pri plastični deformaciji).

Kljub še rahlo večji trdnosti in napetosti tečenja ter le neznatno večjemu raztežku A_5 kaže jeklo NIOMOL 490 K praktično trikrat večjo plastično deformacijo pred porušitvijo kot jeklo NIOVAL 47.

To je pri pojavu nepredvidenih lokalnih prekoračitev dopustne napetosti ali pri zaustavitvi rasti razpoke v konstrukciji odločilnega pomena.

3 Zaključki

Dosedanje raziskovalno delo nas opozarja, da projektiranje na osnovi klasičnih kriterijev ni zadostno, zlasti pa ne v naslednjih primerih:



Slika 3. Inženirski diagram $\sigma^* - \epsilon$ in diagram prava napetost — prava deformacija $\sigma - \epsilon$ za jekla NV 47 in NM 490 K.

Figure 3. Stress-strain $\sigma^* - \epsilon$, and true stress/true strain $\sigma - \epsilon$ diagram for NV 47 and NM 490 K steels.

- pri uporabi zvarjenih konstrukcij z neznanimi lastnimi napetostmi
- pri nizkih temperaturah ali velikih hitrostih obremenitve, kar zmanjšuje žilavost materiala
- pri utrujanju konstrukcij ali pa pri napetostni koroziji, kar povzroča nastanek mikrorazpok
- pri elementih velikih presekov, kjer je prevladujoče ravninsko deformacijsko stanje z nizko porabo energije pri napredovanju razpok

Za varno projektiranje dodatno uporabimo kriterije lomne mehanike.

4 Literatura

- 1 Okamoto S., Toyama M., Inoue T.: Transaction ISIS, Vol. 27, (1987), 474-477.
- 2 MekKawy M.F., El-Fawahry K.A., Mishreky M.L., Eissa M.M., Scandinavian Journal of Metallurgy, 19, (1990), 246-256.
- 3 Hall E.O.; Proc. Paps. Soc. Series B, 64, (1951), 747.
- 4 Petch N.J.; J.Iron Steel In st., 174, (1953), 25.
- 5 Okumura N.; Metal Science, Vol.17, (1983), 581-589.
- 6 Woodhead J.H.; Review of principles of microalloyed bar and forging steels, University of Sheffield, (1984).
- 7 Morrison W.B.; Controlled Processing of High Strengh Low Alloy Steels, (1976), B.S.C. Conference, University of Feeds, Paper No.1.
- 8 Vojvodič-Gvardjančič J.; Magistrska naloga, Ljubljana FAGG (25.5.1990).
- 9 Vojvodič-Gvardjančič J., Šliber F.; Primerjava sodobnih metod preizkušanja jekla za oceno varivosti zvarjenih konstrukcij IV. del; Raziskovalna naloga IMK P-16140.