

Nastajanje izločkov med deformacijo

Precipitation during deformation

Erika Bricelj, *ACRONI Jesenice*

Velibor Marinković, *IJS, Ljubljana*

Franc Vodopivec, *IMT, Ljubljana*

Izločki imajo zaradi zadrževalnega učinka na rast zrn pa tudi zaradi izločevalnega utrjevanja velik vpliv na mehanske lastnosti jekla. Na primeru jekel legiranih z Al in Nb je prikazan vpliv deformacije na nukleacijo izločkov AlN in Nb(C,N). Izdelana je tudi primerjava med deformiranim in nedeformiranim stanjem in vpliv časa žarjenja na rast izločkov.

Ključne besede: mikrolegirana jekla, izločanje, nukleacija

Precipitates have a great influence on mechanical properties of HSLA steel, because of their retarding effect on grain growth and precipitation hardening. On the case of steels with addition of Al and Nb, the effect of deformation on nucleation of precipitates AlN and Nb(C,N) is shown. The comparison between the deformed and undeformed state and the influence of duration of tempering on the growth of precipitates is also shown.

Key words: HSLA steels, precipitation, nucleation

1 Uvod

Lastnosti mikrolegiranih jekel so v veliki meri odvisne od števila, velikosti in porazdelitve karbidnih in nitridnih izločkov aluminija, niobija, vanadija in titana. Medtem ko je vpliv teh izločkov na lastnosti jekel dobro poznan, pa je le malo podatkov o njihovem nastajanju v termičnih ciklikih značilnih za vročo predelavo jekla.

Raziskave, ki smo jih naredili na treh vzorcih mikrolegiranih jekel naj bi odgovorile na vprašanja kako deformacija in nerekrystalizirano stanje austenita vpliva na nastanek in rast izločkov AlN in Nb(C,N) ter kakšna je porazdelitev velikosti teh izločkov po normalizaciji.

2 Eksperimentalni del

Izdelali smo tri vrste jekla z osnovno sestavo: 0,15% C, 0,20% Si, 0,60% Mn, 0,015% P, 0,005% S v treh variantah:

- 1.) 0,032% Al
- 2.) 0,054% Nb
- 3.) 0,086% Al in 0,050% Nb.

Termomehanska obdelava je potekala v dilatometru. Najprej smo vse vzorce homogenizirali na 1250°C 20 minut, nato pa smo od vsake sarže po en vzorec:

- normalizirali na 920°C 1 uro
- deformirali s 35% deformacijo na 870°C in držali na temperaturi deformacije enkrat 5 minut in enkrat 4 ure

- žarili na 870 °C enkrat 5 minut in enkrat 4 ure.

Mikrostrukturo vseh vzorcev smo pregledali z optičnim mikroskopom, na elektronskem mikroskopu pa smo izmerili velikost izločkov. Rezultate preiskav smo nato statistično obdelali.

3 Rezultati preiskav

3.1 Rezultati preiskav z optičnim mikroskopom

Mikrostruktura je pri vseh vzorcih feritno-perlitna. Velikosti zrn po ASTM so podane v tabeli 1.

Po vseh toplotnih obdelavah so velikosti zrn največje pri vzorcih z aluminijem. Pri vzorcih z niobijem in z niobijem in aluminijem so zrna po enaki toplotni obdelavi približno enaka. Z deformacijo se zrna zmanjšajo za približno 50%. Normalizirani in deformirani in 5 minut žarjeni vzorci imajo približno enako velikost zrn. Vzorec z aluminijem ima po 5 minutnem žarjenju na 870°C močno povečana zrna, iz česar lahko sklepamo, da je prišlo na temperaturi homogenizacije do močnega raztapljanja AlN, ki naj bi zavirali rast zrn.

3.2 Rezultati meritev na elektronskem mikroskopu

Izločke smo merili na TV monitorju pri 400.000-kratni povečavi. Na vsakem vzorcu smo izmerili najmanj 1000 izločkov. Rezultati meritev so podani v tabeli 2.

V tabeli so podani rezultati za število izmerjenih izločkov, njihovo povprečno vrednost in standardno deviacijo ter normalizirane vrednosti.

Tabela 1: Velikosti zrn po ASTM

Table 1: Grain sizes according to ASTM

vzorec	920°C	870°C / 5m	870°C / 4h	870°C / de / 5m	870°C / de / 4h
Al	7-9	0-2	2-4	6-8	5-8
Nb	7-10	5-3	4-6	7-10	10-7
Al+Nb	10-8	2-3	3-5	7-9	7-9

Tabela 2: Rezultati meritev izločkov na elektronskem mikroskopu

Table 2: Results of precipitates measurements

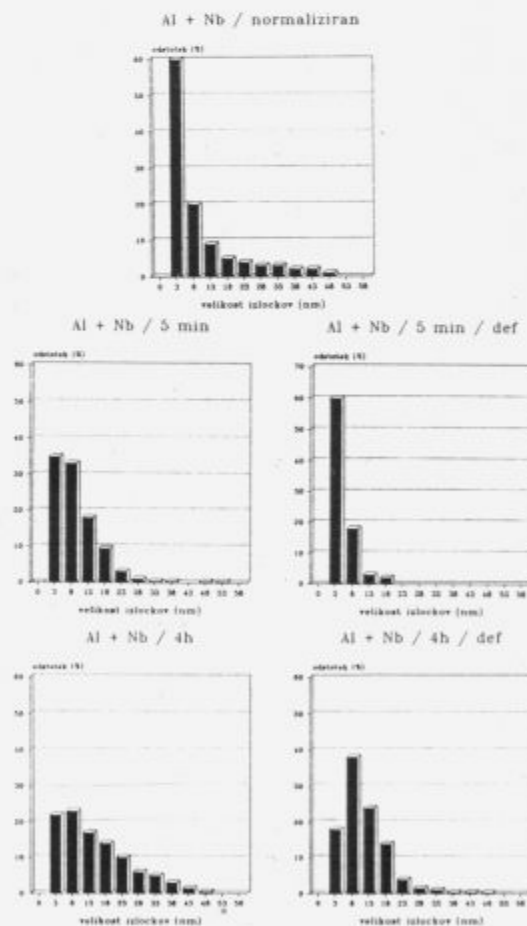
	Nedeformirani				Deformirani			
	N	x(nm)	σ	σ/x	N	x(nm)	σ	σ/x
Al/norm.	1137	12,8	8,6	0,67				
Al/5 min	1120	14,8	10,6	0,72	1137	13,3	10,5	0,79
Al/4 h	1228	18,0	11,6	0,65	1472	13,0	10,6	0,82
Nb/norm.	1421	9,1	10,4	1,14				
Nb/5 min	1304	23,2	17,3	0,75	1026	7,6	7,7	1,02
Nb/4 h	1206	25,1	21,2	0,84	1387	16,2	9,2	0,57
Al+Nb/norm.	1327	8,8	8,3	0,95				
Al+Nb/5 min	1235	9,2	6,0	0,65	1092	3,9	2,9	0,75
Al+Nb/4 h	1193	13,6	9,8	0,72	1113	10,2	6,1	0,60

Povprečna velikost izločkov v deformiranih vzorcih po 5 minutah žarjenja je celo 2-3 krat manjša kot v ustreznih nedeformiranih vzorcih. To je najbolj očitno pri vzorcih, ki vsebujejo niobij. Pri vzorcu, ki vsebuje samo aluminij, zmanjšanje ni tako izrazito. Z daljšim časom žarjenja se pri vseh vzorcih izločki povečajo. V nedeformiranem stanju se povečajo le za nekaj nanometrov, v deformiranem pa 2 do 3 krat.

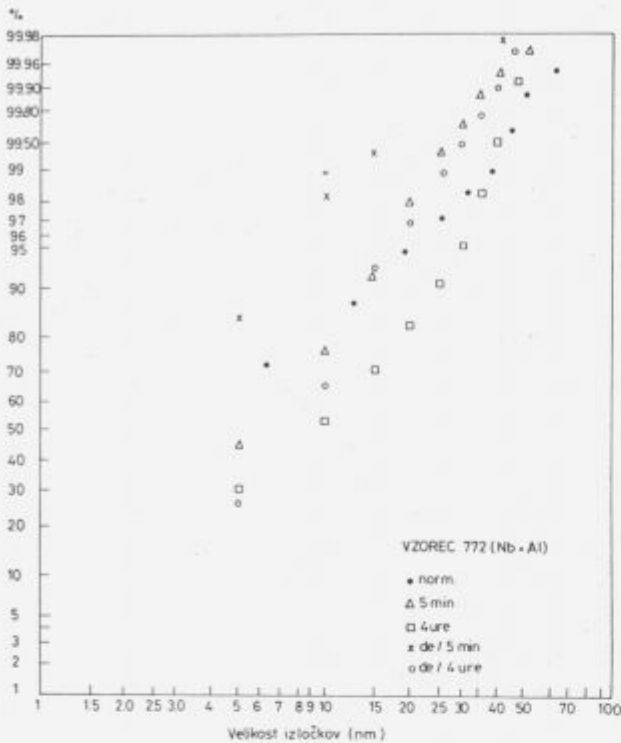
V deformiranih in 5 min žarjenih in v normaliziranih vzorcih so izločki približno enake velikosti. Porazdelitev izločkov prikazujejo histogrami (slika 1) in kumulativne krivulje (sliki 2 in 3).

Nastopata dve vrsti porazdelitvenih krivulj - za normalizirane in 5 min žarjene vzorce velja, da so najpogostejši najmanjši izločki. Nedeformirani in deformirani in 4 ure žarjeni vzorci pa imajo vrh pri večjih velikostih izločkov.

Porazdelitev velikosti izločkov je log-normalna. Najmanjši razpon smernih koeficientov je pri vzorcu z aluminijem (slika 3), kar pomeni, da deformacija ni bistveno pospešila izločanja AlN in da z daljšim časom žarjenja ni prišlo do koagulacije izločkov. Pri jeklu z niobijem (slika 2) pa je deformacija povzročila znatno povečanje najmanjših izločkov Nb(C,N). Ti izločki so s podaljšanim žarjenjem koag-

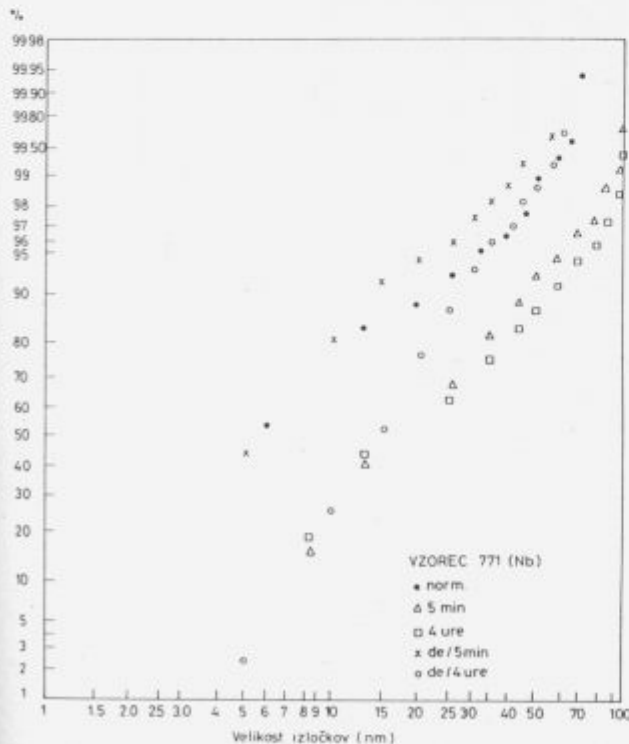


Slika 1: Porazdelitev Nb(C,N)
Figure 1: Distribution of Nb(C,N)



Slika 2: Kumulativni diagram porazdelitve Nb(C,N)

Figure 2: Cumulative distribution of Nb(C,N)



Slika 3: Kumulativni diagram porazdelitve AlN

Figure 3: Cumulative distribution of AlN

ulirali. Za jeklo z niobijem in aluminijem veljajo enake zakonitosti kot za jeklo legirano samo z niobijem.

4 Zaključki

1. Deformacija vnese v material točkaste, linijske in ploskovne napake. Na napakah pride do heterogene in zato pospešene nukleacije izločkov.
2. Z daljšim časom žarjenja ne nastajajo novi izločki, pač pa pride do rasti tistih, ki so nastali med deformacijo. Deformacija povzroči za faktor dva do trikrat večjo hitrost rasti v primerjavi z nedeformiranimi vzorci. To povečanje je posledica povečane gonilne sile za koagulacijo zaradi povečanega deleža najmanjših izločkov.
3. Največji vpliv na zadrževanje rasti zrn v deformiranih in nedeformiranih vzorcih ima niobij. V kombinaciji z aluminijem je zaviralni učinek nekoliko manjši, sam aluminij pa skoraj ni učinkovit. Možni razlog za to je premajhna koncentracija aluminija v vzorcu.
4. Porazdelitve velikosti izločkov v normaliziranih vzorcih so predvsem pri obeh vzorcih z niobijem zelo podobne porazdelitvam v ustreznih deformiranih vzorcih po 5 min žarjenja.
5. Z normalizacijo dosežemo približno enak učinek kot z deformacijo. Poveča se delež majhnih izločkov, kar ima za posledico tudi manjša zrna.
6. Iz kumulativnih diagramov sledi, da so porazdelitve izločkov log-normalne, kar pomeni, da je rast izločkov zvezna.

5 Literatura

- 1 I. Weiss and J.J. Jonas: Interaction between recrystallization and precipitation during the high temperature deformation of HSLA steels; *Metal. Trans.*, 10A, (1979)
- 2 G Herdan: *Small Particle statistic*, Butterworths, London, 1960, str. 111
- 3 F. Vodopivec: On the influence of hot deformation on low-carbon steel by rolling on the precipitation of AlN; *JISI*, 211, 644 (1974)
- 4 T. Gladman: *Precipitation of microalloy carbides and nitrides*, 1970, Institut für Metallkunde der Universität Stuttgart
- 5 O. Kwon, A.J. DeArdo: *Acta Met.* 39, 529-539, (1991)
- 6 F.G. Wilson, T. Gladman, *Int. Metal. Rev.*, 33, 221 (1988)