

Krhkost toplo valjanih trakov višje legiranih dinamo jekel

Brittleness of Hot Rolled Strips of Higher Alloyed Electrical Steels

A. Čop¹, E. Bricelj, F. Marinšek, ACRONI Jesenice

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-01-22

Namen raziskave je bil ugotoviti vzroke pogostega lomljenja toplo valjanih trakov (TVT) višje legiranih dinamo jekel med obrezovanjem in luženjem. Raziskave so bile narejene na dinamo jeklih z 1.7-2.1% Si in 0.5-1% Al. Pri teh trakovih je večinoma prihajalo do težav tudi pri razogljčenju. V mikrostrukturi vzorcev trakov smo opazili številne izločke v obliki iglic. V članku je opredeljen vpliv vsebnosti Al na izločanje prehodnih karbidov, vpliv karbidov na sposobnost razogljčenja jekel in pokanje pri obrezovanju in previjanju TVT.

Ključne besede: dinamo jeklo, krhkost, izločki, ohlajanje, razogljčenje

The aim of this work was to find out the reasons for frequent breakdowns of hot rolled strips (HRS) of higher Si and Al alloyed electrical steels. Research was done on electrical steels that contain from 1.7 to 2.1% Si and from 0.5 to 1% Al. Mostly there were problems with decarburisation of these cold rolled strips. During investigations we noticed numerous precipitations in microstructure. In present paper there are defined the effect of Al-content in steel on precipitation of transition carbides, effect of carbides on decarburisation ability and cracking during cutting off edges and re-banding of HRS.

Key words: electrical steel, brittleness, precipitations, cooling, decarburisation

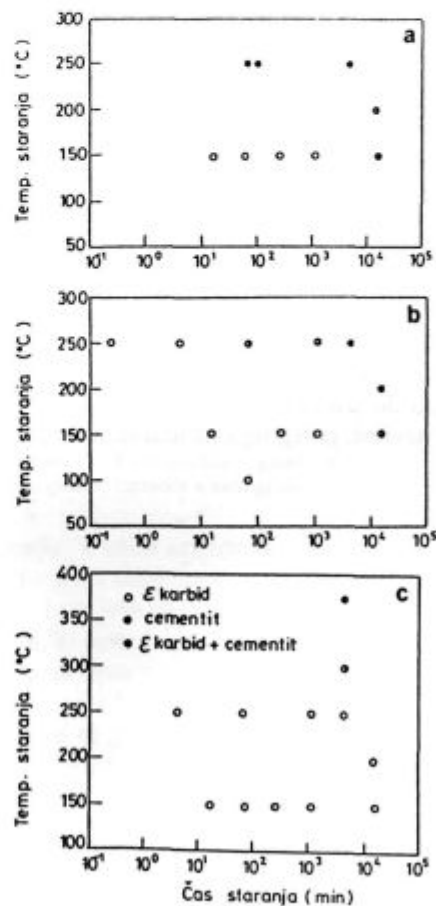
1 Uvod

Izločki v dinamo jeklih, ki so reda velikosti debeline Blochovih sten (100 nm) poslabšajo⁶ elektromagnetne lastnosti, s tem da ovirajo gibanje Blochovih sten. V končnem izdelku takih izločkov ne sme biti, zato je potrebno vsebnost karbido- in nitridotvornih elementov v jeklu čim bolj znižati. Po drugih podatkih^{2,5,7} imajo zelo močan vpliv tudi izločki velikosti približno 10 x debeline Blochovih sten, to je okrog 1,5 μm . Vpliv na elektromagnetne lastnosti ima tudi porazdelitev izločkov. V raziskavi² je bilo ugotovljeno, da prehodni (ϵ -) karbidi, ki so izločeni v zrnih, bolj povečajo vatne izgube kot cementit, ki se pri temperaturi nad 350°C izloča po mejah zrn. Izločanje ϵ -karbidov je odvisno od prenasajenja trdne raztopine ferita z ogljikom.

Velik vpliv na to, v kakšni obliki se bo ogljik izločil, ima aluminij. Za nizkoogljikno jeklo⁴ z različnimi dodatki Al je na **sliki 1** prikazano izločanje cementita in ϵ -karbida za jekla z različnimi vsebnostmi Al in praktično enako vsebnostjo C (0.022 do 0.023%).

Iz **slike 1** je razvidno, da se z večanjem vsebnosti Al ϵ -karbidi pojavljajo pri vedno daljših časih in vedno višjih temperaturah. Al in Si zvišujeta temperaturo izločanja ϵ -karbida, medtem ko ima Mn nasproten učinek⁴.

Z višjo vsebnostjo C, Si in Al v dinamo jeklih se zvišuje temperatura prehoda iz žilavega v krhki lom. Faktorji⁹, ki vplivajo na pojav krhkega loma, so temperaturna odvisnost napetosti (pri kateri se začne plastična



Slika 1: Čas in temperatura, potrebna za prehod ϵ -karbida v cementit za vzorec brez Al (a), vzorec z 0.43% Al (b) in vzorec z 2% Al (c)⁴
Figure 1: Time-temperature relations for the transition from ϵ -carbide to cementite for specimen with no Al (a), specimen with 0.43% Al (b) and specimen with 2% Al (c)⁴

¹ Aleš ČOP, dipl.inž.met.
 ACRONI Jesenice - Raziskave in razvoj
 4270 Jesenice, C. Železarjev 8

deformacija), razvoj ostre meje plastičnosti, nastanek razpok na dvojčkih ali na karbidnih delcih in velikost zrn.

2 Eksperimentalni del

Za preiskave smo izbrali vzorce TVT z 1.7-2.1% Si in 0.5-1.0% Al. Vzorce smo vzeli iz roba in sredine traku. Debelina traku je bila 2,4 mm. Vzorce smo toplotno obdelali na naslednje načine:

a) Raztopno žarjenje: potekalo je v suhi mešanici 20% H₂/80% N₂ pri temperaturah 300, 400, 600, 800 in 1000°C ter časih 1 in 20 ur. Nato smo pod optičnim mikroskopom ocenili količino in velikost izločkov.

b) Staranje: izvedli smo ga brez zaščitne atmosfere, in sicer 24 ur pri 225°C. Staranim vzorcem smo izmerili elektromagnetne lastnosti, določili smo tudi delež in razporeditev izločkov.

c) Žilavostni preizkus s sestavljenimi vzorci: iz vzorcev TVT smo izsekali ploščice velikosti 50x10x2,4 mm, jih po širini zvarili, naredili DVM zarezo in pri sobni temperaturi izvedli žilavostni preizkus. Nato smo pregledali mikrostrukturo prelomnih površin. Tudi ti vzorci so bili v različnih stanjih: surovo, raztopno žarjeno v različnih pogojih in starano pri različnih časih.

3 Rezultati

3.1 Metalografske preiskave

3.1.1 Preiskave TVT

Pri velikem številu preiskanih vzorcev TVT smo opazili izločke v obliki iglic (**slika 2**). Ti TVT so bili praviloma ohlajeni na temperature navijanja nad 500°C. S povišano temperaturo navijanja sta se večala tudi število in velikost izločkov. Pri trakovih, ki so bili naviti nad 600°C je prišlo do izločanja iglic v še večji meri. Iglice so bile zelo številne, poleg tega pa tudi razmeroma



Slika 2: Izločeni karbidi v TVT (x 200)
Figure 2: Precipitated carbides in hot rolled strip (x 200)

velike in v posameznem zrnju usmerjene v eno ali dve smeri, ki sta med seboj pravokotni. Iglice mestoma oklepajo tudi kot 60°. Po podatkih^{3,4} so to ravnine {100}_α. Da bi ugotovili tip izločkov, smo iglice analizirali na EDAX-u. Analiza je pokazala le prisotnost železa. Iz tega smo sklepali, da izločki niso Al-nitridi, temveč železovi karbidi ali nitridi.

3.1.2 Preiskave raztopno žarjenih vzorcev

Da bi ugotovili, ali so izločki železovi karbidi ali nitridi, smo vzorce raztopno žarili. Pojem 'raztopno žarjenje' v našem primeru pomeni raztapljanje karbidov v feritu pri povišanih temperaturah. Po pregledu vzorcev pod optičnim mikroskopom smo ugotovili, da z višjo temperaturo in daljšim časom žarjenja izločki postajajo vse večji in redkejši. Po 20 urah žarjenja pri 600°C so praktično vsi izločki raztopljeni v feritu. Enako velja za vzorec, žarjen 1 uro pri 800°C. Raztapljanje izločkov pri teh, razmeroma nizkih temperaturah potrjuje, da so to železovi karbidi. Poleg tega je možnost, da bi bili izločki železovi nitridi majhna, ker ima Fe manjšo afineteto do dušika kot Al.

3.1.3 Preiskave razogljčenih vzorcev

Značilnost precejšnjega števila kolobarjev je bila, da so se slabo razogljčili. Predvidevali smo, da je eden od vzrokov za to prisotnost prehodnih karbidov, ki se med razogljčevalnim žarjenjem sicer raztopijo v feritu, za difuzijo ogljika navzven pa pri dani temperaturi ni dovolj časa. Ta predvidevanja potrjujejo tudi metalografske preiskave razogljčenih vzorcev. Zrna so poligonalna, brez kakršnihkoli izločkov, vendar je analiza pokazala, da ti trakovi vsebujejo razmeroma visok odstotek ogljika (0.0040 do 0.0080%). Taka vsebnost ogljika pri dolgotrajnem obratovanju elektromotorjev, kjer prihaja do segrevanja, povzroči izločanje karbidov, ki so zelo podobni tistim v TVT, le da so redkejši. Te karbide smo analizirali tudi na EDAX-u. Rezultat je enak kot pri vzorcih, vzeti iz TVT.

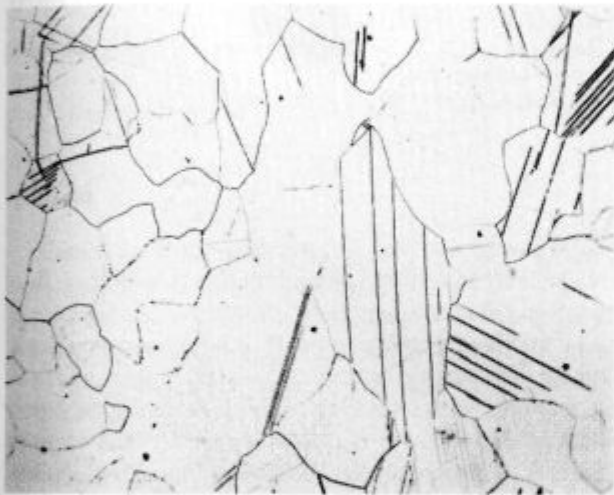
3.2 Žilavostni preizkusi

Z različnimi načini žarjenja in ohlajanja smo skušali vplivati na izločanje in raztapljanje prehodnih karbidov. Vzorcem z nizko žilavostjo se je po raztopnem žarjenju žilavost izboljšala, čeprav je še vedno razmeroma nizka. Staranje vzorcev z dobro žilavostjo pa je privedlo do poslabšanja žilavosti. Preiskave mikrostrukture so pokazale, da je prišlo do izločanja karbidov. Prelomi preko kristalnih zrn potekajo v posameznih zrnih v različnih smereh. Smer preloma je enaka smeri, v katero so usmerjene karbidne iglice v posameznem zrnju (**slika 3**).

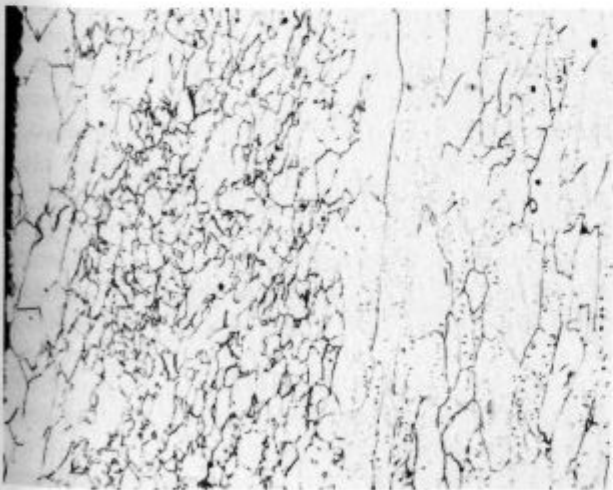
V vzorcih, kjer ni bilo prisotnih karbidov ali pa so se ti raztopili med žarjenjem, je očitno glavni mehanizem loma dvojčenje. Lomi se pogosto začnejo na prerezih dvojčkov in na točkah, kjer se dvojčki stikajo s kristalno



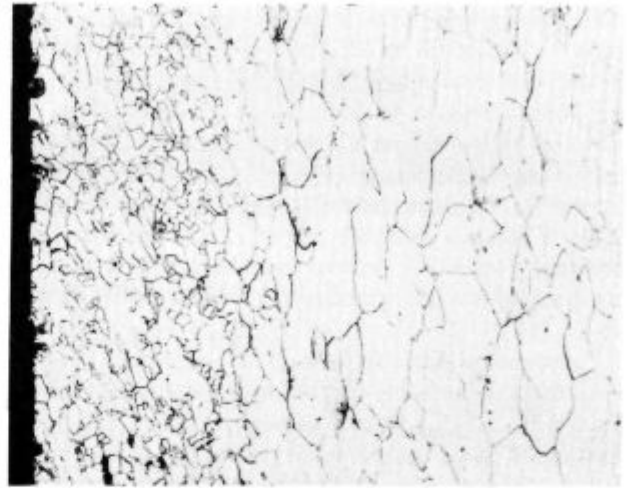
Slika 3: Smeri prelomov se ujemajo z usmerjenostjo karbidov v posameznih zrnih (x 200)
Figure 3: Directions of cracks correspond with orientation of carbide needles within each grain (x 200)



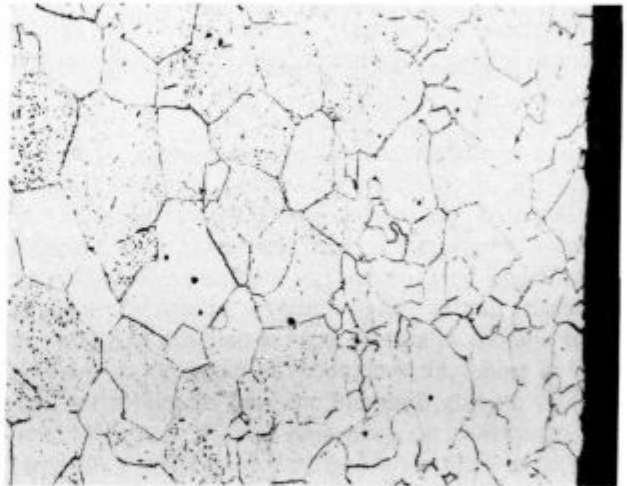
Slika 4: Dvojčki tik pod prelomno površino (x 100)
Figure 4: Twins close to the fracture surface (x 100)



Slika 5: Groba zrna tik pod površino traku in izločeni karbidi v njih (x 100)
Figure 5: Coarse grains close to the strip surface and carbides precipitated within grains (x 100)



Slika 6: Pas drobnih zrn pod površino v traku zagotavlja zadostno žilavost (x 100)
Figure 6: Zone of fine grains close to the strip surface assures adequate fracture toughness (x 100)



Slika 7: Rekrystalizirana zrna po vsem preseku traku in izločeni karbidi v zrnih (x 100)
Figure 7: Recrystallised grains across whole strip section and precipitated carbides within grains (x 100)

mejo. V istem kristalnem zrnju so dvojčki lahko usmerjeni v dveh smereh (slika 4).

Lom lahko nastopi tudi zaradi grobih rekrystaliziranih zrn, ki zrastejo pod površino traku. TVT na sliki 5 se je zlomil zaradi grobih zrn in številnih drobnih karbidov, izločenih v zrnih. Pas drobnih zrn pod površino traku (slika 6) je očitno zagotovil zadostno žilavost, potrebno za hladno predelavo. Ta TVT je šel brez težav skozi celoten proces. Na sliki 7 vidimo značilen primer slabo ohlajenega TVT po vročem valjanju. Zrna so popolnoma rekrystalizirala, v njih so izločeni številni drobni karbidi.

4 Sklepi

Na podlagi te raziskave in podatkov iz literature lahko trdimo, da so izločki v obliki iglic prehodni ali ϵ -kar-

bidi. Pojav teh karbidov je najbolj izrazit v jeklu z najvišjo vsebnostjo Si in Al. Večja vsebnost Al prispeva k močnejšem izločanju prehodnih karbidov.

Oblika, velikost in porazdelitev teh karbidov je odvisna od načina ohlajanja traku po vročem valjanju. Čim intenzivnejše je ohlajanje (v določenih mejah), tem manj časa je na voljo za izločanje ogljika iz trdne raztopine ferita. Zadostno ohlajanje prepreči ali omeji nastajanje prehodnih karbidov. Težavo pri takem ohlajanju predstavlja le povečana vzmetnost tako ohlajenih koncev TVT.

Izločeni karbidi v feritu bistveno poslabšajo sposobnost razogljčenja hladno valjanega traku. Med kontinuirnim razogljčevalno-rekristalizacijskim žarjenjem se karbidi sicer popolnoma raztopijo v feritu, za zadostno razogljčenje pa dani pogoji očitno ne zadostujejo.

V starih vzorcih trakov, ki so slabo razogljčili, so prisotni izločki velikosti nad 1 μm . Ti so očitno vzrok za ugotovljeno povečanje vatnih izgub pri vzorcih z višjima Si in Al.

Preiskave so pokazale, da tudi tisti TVT, katerih vzorci so imeli nizko žilavost, zdržijo upogibanje in pre-

vijanje pri obrezovanju in luženju. Pogoj je le, da nimajo izločenih karbidov v večjih količinah in grobih feritnih zrn pod površino TVT. Napredovanje razpoke je bistveno lažje v kristalnih zrnih z izločenimi prehodnimi karbidi.

5 Literatura

- ¹ Atlas of precipitates in steels, Stahleisen, Düsseldorf, 1983
- ² Michal, G. M., Slane, J. A.: The Kinetics of Carbide Precipitation in Si-Al Steels, *Metal. Trans.*, 17A, 1986, 1287-1291
- ³ Leslie, W. C. et al: The Microstructure of Low-Carbon 3.25% Silicon Steel, *Trans. of the ASM*, 53, 1961, 715-734
- ⁴ Leslie, W. C., Rauch G. C.: Precipitations of Carbides in Low-Carbon Fe-Al-C Alloys, *Metal. Trans.*, 9A, 1978, 343-349
- ⁵ Leslie, W. C., Stevens, D. W.: The Magnetic Aging of Low-Carbon Steels and Silicon Irons, *Trans. of the ASM*, 57, 1964, 261-283
- ⁶ Marinšek, F., Vodopivec, F.: Primerjava klasično in konti vlitih jekel za neorientirane elektropločevine, *Železarski zbornik*, 1989, 4, 147
- ⁷ Cullity, B. D.: Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1972, 317-320
- ⁸ Merz, H.: Die kritische Alterungstemperatur bei Elektrolech, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 1970, 2, 159-164
- ⁹ Honeycombe, R. W. K.: Steels-Microstructure and Properties, Edward Arnold, London, 1981, 186-193
- ¹⁰ Marinšek, F.: *Poročilo RO ŽJ*, št.M6/5, 1978