

# Kinetika nastajanja ferita v mikrolegiranem jeklu

UDK: 14.018.2:621.77.014.2  
ASM/SLA AY-n, F23, 1—66

M. Kmetič, F. Vodopivec, M. Gabrovšek



*Vpliv stanja avstenita (rekristaliziran, deformiran, nedeformiran) in niobija v različni obliki, to je v trdni raztopini ali v izločkih, na izotermno transformacijo avstenita v ferit. Precipitacija niobijevega karbonitrida pri deformaciji, transformaciji in sekundarnem izločilnem žarjenju.*

## UVOD

Uporabne lastnosti mikrolegiranih jekel so odvisne od dveh dejavnikov; od izločilne utrditve zaradi nastanka niobijevega karbonitrida in zaradi drobne feritno perlitne mikrostrukture, ki je rezultat nizke temperature predelave in specifičnosti, katere v proces predelave, rekristalizacije in rasti zrn vnese prisotnost niobija v avstenitu. Dogajanja v feritu so pomembna za izločilno utrditev, dogajanja v avstenitu pa so pomembna predvsem za pojave v zvezi z rekristalizacijo in rastjo zrn avstenita in iz njih nastalih feritnih zrn. Zato je razumljivo, da so dogajanja med transformacijo avstenita v ferit eden od dejavnikov, ki pogojujejo lastnosti mikrolegiranih jekel.

Pri difuzijski premeni avstenita v ferit prihaja do razpada trdne raztopine in nastanka izločkov niobijevega karbonitrida. Če je niobij pri temperaturi avstenitizacije vezan v izločkih, njegova prisotnost ne vpliva na premenske temperature, vpliva pa na mikrostrukturo. Niobij v trdni raztopini v avstenitu zniža temperaturo nastanka ferita in perlita.

Raziskav smo se lotili z željo, da bi dobili celovito povezavo med stanjem avstenita (deformiran, rekristaliziran in nedeformiran) in niobija v avstenitu po topli predelavi (raztopljen v avstenitu ali vezan v izločkih) ter potekom izotermne premene avstenit — ferit.

## EKSPERIMENTALNO DELO

### 1. Način raziskovanja

Za raziskave je bila potrebna sorazmerno velika količina vzorcev, zato smo se odločili, da uporabimo industrijsko jeklo, legirano z niobijem, vrste Niobal 43, ki ima naslednjo kemično sestavo: 0,18 % C, 0,34 % Si, 1,45 % Mn, 0,016 % P, 0,016 % S, 0,030 % Al, 0,040 % Nb in 0,015 % N<sub>2</sub>.

Jeklo je bilo izdelano v Železarni Jesenice in izvaljano v plošče debeline 15 mm, iz katerih smo v smeri valjanja izrezali vzorce velikosti 100 × 15 × 6 mm.

Postopek dela je bil naslednji:

— enourno raztopno ogrevanje vzorcev pri 1300° C, da se je ves niobijev karbonitrid raztopil v avstenitu;

— ohladitev vzorcev na temp. 1200° C, oz. na 900° C in deformacija. V prvem primeru smo dobili po deformaciji rekristaliziran (RA), v drugem pa nerekrystaliziran (deformiran) avstenit (DA);

— takojšnja ohladitev s temperature deformacije na temperaturo izotermne premene, ko smo hoteli, da je pri temperaturi transformacije niobij v avstenitu v trdni raztopini in 45 min. zadržanje pri 900° C (stabilizirano jeklo, RSA in DSA), da se je niobij izločil iz trdne raztopine kot karbonitrid, ter ohladitev na temperaturo premene;

— ohladitev in 45 min. stabilizacija na temp. 900° C, da se je niobij izločil iz trdne raztopine kot karbonitrid, deformacija (SDA) in ohladitev na temperaturo izotermne transformacije.

Po zadržanju na temperaturi izotermne transformacije v solni kopeli smo vzorce za mikrostrukturne raziskave gasili v vodi, druge, ohlajene na zraku, pa smo uporabili za spremljanje pojava izločanja z meritvami trdote.

Deformacijo smo izvršili z enkratnim udarcem padalnega kladiva, in sicer smo deformirali polovico vzorca, druga polovica pa je ostala nedeformirana. Na enem vzorcu smo tako dobili začetni stanji RSA in NSA<sub>1</sub>, RA in NA<sub>1</sub>, DSA in NSA<sub>2</sub>, DA in NA<sub>2</sub> ter SDA in SNA. To je vzrok, da nedeformirana stanja NSA<sub>1</sub>, NSA<sub>2</sub> in SAN ter NA<sub>1</sub> in NA<sub>2</sub> niso enaka, temveč se med seboj malo razliku-

M. Kmetič, dipl. ing. metalurgije, raziskovalec na Metalurškem inštitutu

Dr. F. Vodopivec, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

Dr. M. Gabrovšek, dipl. ing. metalurgije, direktor TKR v Železarni Jesenice

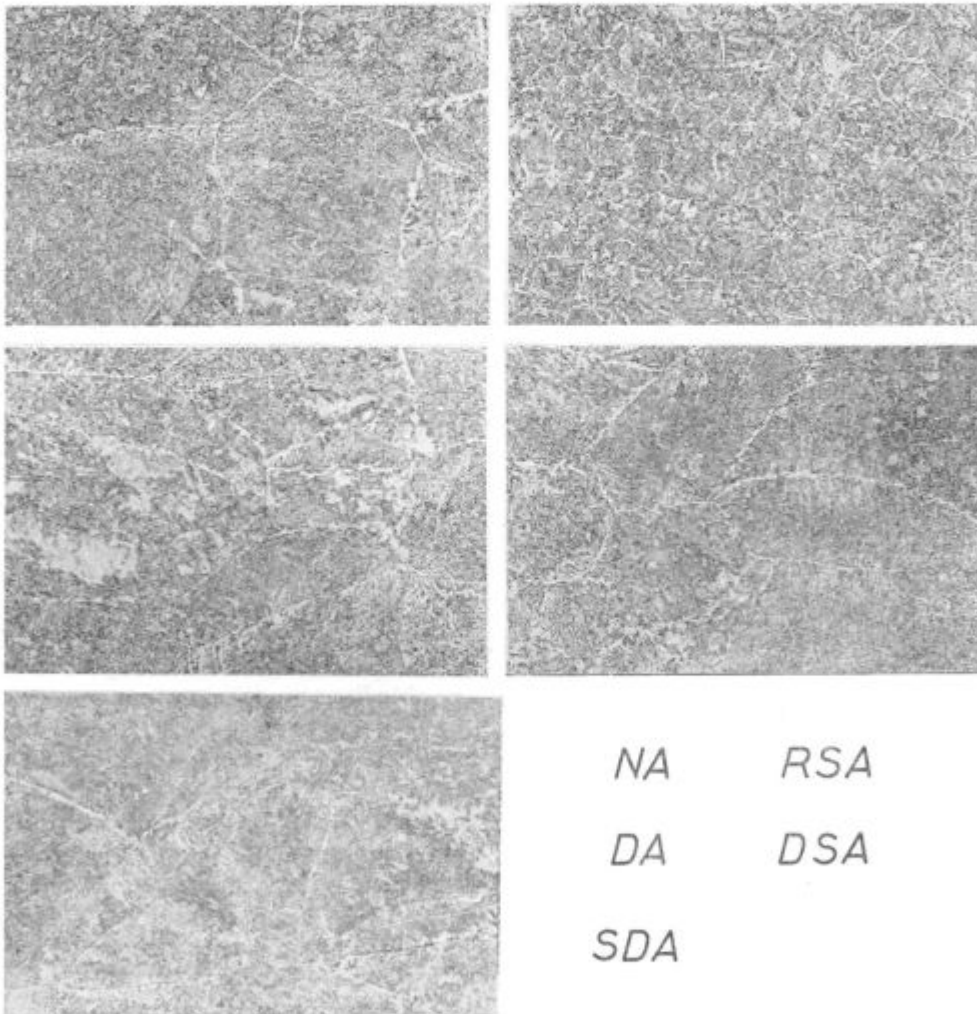
jejo. Čeprav smo deformacijo izvršili zelo hitro, je pri manipulaciji prišlo do podhladitve vzorcev, ki se ji nismo mogli izogniti, in s tem do delnega nekontroliranega izločanja.

Stopnja deformacije je znašala 30 %. Hitrost kladiva je bila v trenutku udara ob vzorec 7 m/s. Deformacija se je izvršila hitro, zato ni bilo časa, da bi potekali procesi dinamične poprave deformacijskega stanja. Po deformaciji se je izvršila statična poprava in rekristalizacija avstenita, v primeru deformacije pri 900° C pa le statična poprava.

Delež mikrostrukturnih komponent po izotermni transformaciji smo določili z meritvami v optičnem mikroskopu po metodi linearne intercepcije. Trdoto smo merili po Vickersu pri obtežbi 10 kp.

Na sliki 1 je prikazana mikrostruktura jekel pred pričetkom premene. Pri raztopnem žarjenju pri 1300° C niobij nima inhibicijskega učinka na rast avstenitnih zrn.

V optičnem mikroskopu ni opaziti nobene razlike med mikrostrukturo takoj po deformaciji pri 1200, oz. 900° C in po izotermnem zadržanju pri 900° C, med katerim je iz avstenita precipitiral niobijev karbonitrid. Pač pa pokažejo meritve trdote in preiskave v elektronskem mikroskopu, da so nastali pri stabilizaciji jekla tako v nedeformiranem kot v deformiranem in rekristaliziranem ter deformiranem in nerekrystaliziranem jeklu karbonitridni izločki z velikostjo med 200 in 250 Å. Primerjava na slikah pa pove, da so izločki bolj gosti in manjši v jeklu, ki je bilo deformirano

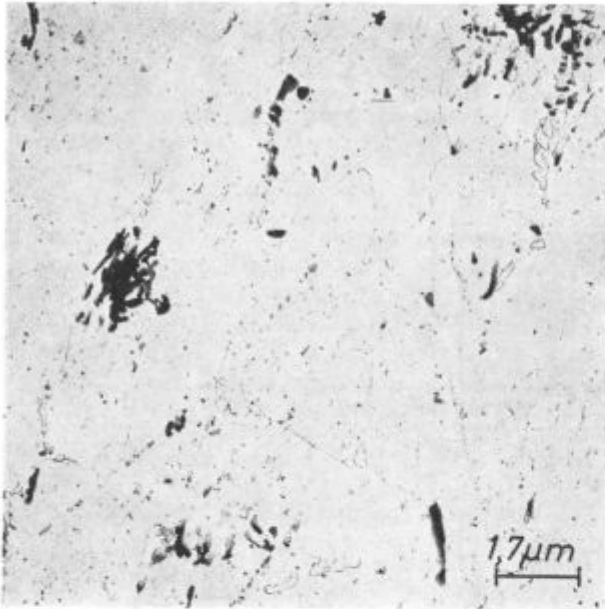


Slika 1  
Velikost in oblika avstenitnih zrn izhodnih stanj (pov. 50 ×). NA — nedeformiran avstenit, RSA — rekristaliziran stabiliziran avstenit, DA — deformiran avstenit, DSA — deformiran stabiliziran avstenit, SDA — stabiliziran deformiran avstenit.

Fig. 1  
Size and shape of austenite grains in the initial states. Magn. 50 ×. NA — undeformed austenite, RSA — recrystallized stabilized austenite, DA — deformed austenite, DSA — deformed stabilized austenite, SDA — stabilized deformed austenite.

pri 900°C, kot v jeklu, ki je bilo deformirano pri 1200°C (slika 2 in 3).

V diagramih na sliki 4 je prikazana razlika trdote  $\Delta HV$  pred izločevalnim žarjenjem in po njem v odvisnosti od časa zadržanja pri 900°C.

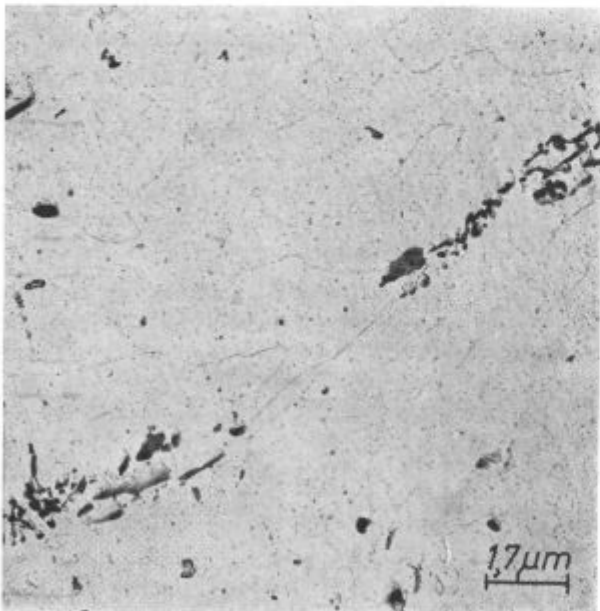


Slika 2

Cementit in izločki niobijevega karbonitrída v stabiliziranem jeklu deformiranem pri 1200°C

Fig. 2

Cementite and niobium carbonitride precipitates in stabilized steel deformed at 1200°C.



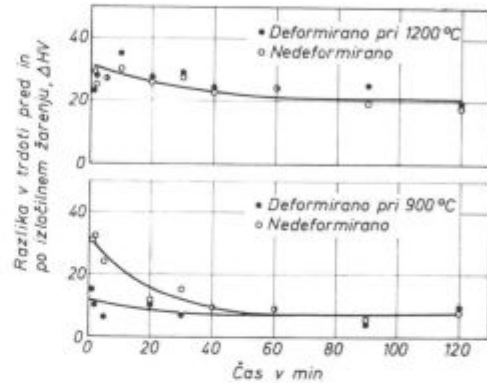
Slika 3

Cementit in izločki niobijevega karbonitrída v stabiliziranem jeklu deformiranem pri 900°C

Fig. 3

Cementite and niobium carbonitride precipitates in stabilized steel deformed at 900°C.

Pridobitek trdote pri enournem izločevalnem žarjenju pri 600°C zasledimo le, če je niobij v jeklu na začetku ogrevanja v trdni raztopini. Manjši pridobitek trdote pri izločevalnem ogrevanju pomeni, da so v avstenitu ali feritu prisotni že prej nastali karbonitridni izločki, ki pri ponovnem ogrevanju ne spreminjajo trdote. Iz diagrama se vidi, da se proces izločanja po eni uri ustavi. Deformacija pri 900°C je pospešila tvorbo niobijevega karbonitrída, zato je pridobitek trdote pri sekundarnem izločevalnem ogrevanju pri kratkih časih žarjenja pri 900°C manjši v deformiranem kot v nedeformiranem jeklu.



Slika 4

Pridobitek trdote po sekundarnem izločevalnem žarjenju v odvisnosti od časa zadržanja pri 900°C

Fig. 4

Gain in hardness after the secondary precipitation annealing depending on the holding time at 900°C.

Torej lahko rečemo, da smo z izbranimi pogoji dosegli, da je imel avstenit na začetku izotermnega žarjenja za transformacijo niobij v različni obliki, to je v trdni raztopini in v izločkih, in je bil avstenit enkrat rekristaliziran, drugič nerekrystaliziran in končno tudi nedeformiran. Ustvarili smo pogoje, ko je mogoče opredeliti učinek niobija na potek premene različnih vrst avstenita.

## 2. Kinetika izotermne transformacije

Kinetiko tvorbe ferita smo določili pri temperaturah 750, 700, 650, 600 in 550°C. Pod to temperaturo ferit ne nastaja več, ampak prihaja do bainitne premene. Preizkušance smo držali na temp. izotermne transformacije različno dolgo, od 1 do 90 min.

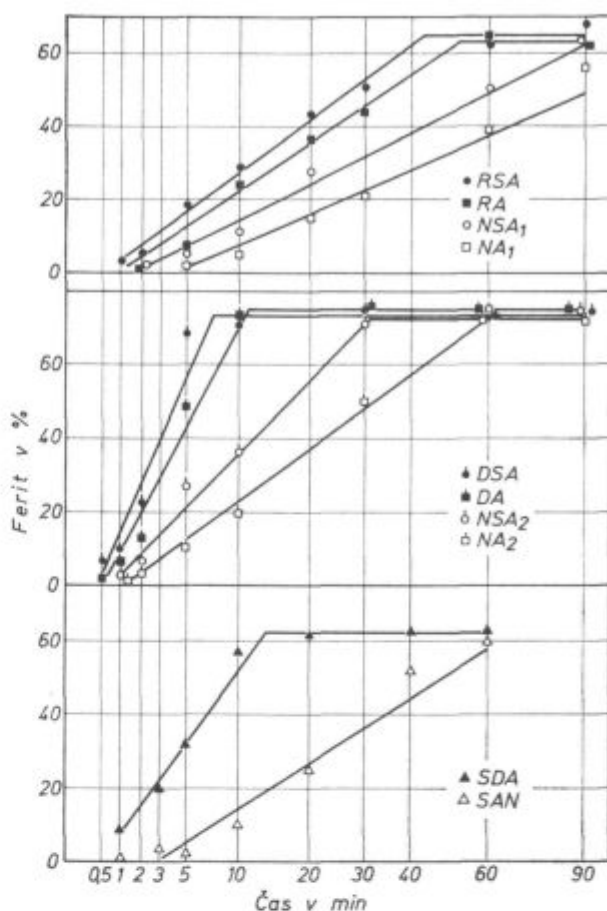
Transformacija avstenita je difuzijski proces, katerega kinetika je odvisna od dveh dejavnikov; od hitrosti nastajanja kali in od hitrosti difuzije ogljika iz transformiranega področja v področje preostalega avstenita. S spremembo temperature se močno spreminja prenasičenost avstenita z ogljikom in s tem tudi hitrost nastanka kali. Hitrost nastanka ferita z zniževanjem temperature nekaj časa raste, doseže maksimum, kjer je

optimum obeh procesov, nato pa pada, ker zmanjševanje hitrosti difuzije ogljika v avstenitu prevlada nad povečanjem hitrosti nastajanja novih feritnih kali. Proces transformacije od inkubacijske dobe do nastanka in rasti kali in rasti feritnih zrn točno opisuje Avramijeva eksponentna funkcija. Proces je tak, da nastane večina kali v začetku reakcije, zato hitrost nadaljevanja transformacije regulira difuzija ogljika. Ta del premene je mogoče opisati s parabolično odvisnostjo in smo ga zajeli v naših raziskavah. Kinetiko rasti ferita v odvisnosti od trajanja izotermnega žarjenja smo v diagramih prikazali tako, da je na ordinati delež ferita v % od celotne mikrostrukture, na abscisi pa čas, nanesen v min.<sup>1,2</sup>. Iz naklona premic je mogoče numerično vrednotiti hitrost premene v področju, kjer rast ferita regulira difuzija ogljika.

Pri vseh treh serijah poizkusov je tvorba ferita pri 750°C zelo počasna. Kljub majhnemu deležu ferita v mikrostrukturi je že mogoče razločiti, da je ferita več v jeklu, v katerem je bil niobij pred premeno vezan v izločkih. Pri 700°C so razlike v hitrosti transformacije zelo jasne, premena pa ni končana po 90 min. žarjenja. Kinetiko rasti ferita pri temperaturi izotermne transformacije 650°C je za vse serije poizkusov prikazana v diagramu na sl. 5. Po deformaciji pri 1200°C je rast ferita najhitrejša v rekristaliziranem in stabiliziranem jeklu (RSA), sledi rekristalizirano (RA), nedeformirano in stabilizirano (NSA<sub>1</sub>) in končno nedeformirano in nestabilizirano jeklo (NA<sub>1</sub>). Kot pri višjih temperaturah, tudi pri tej ferit najhitreje nastaja v stabiliziranem jeklu. Ker deformacija in rekristalizacija pri 1200°C ne povzročita zaznavne tvorbe niobijevega karbonitrida, izvira razlika med deformiranim in nedeformiranim jeklom iz različne velikosti avstenitnih zrn.

Razlike iste vrste so ohranjene tudi pri temperaturah izotermne transformacije 600 in 550°C. Maksimum zadrževalnega vpliva niobija v trdni raztopini na hitrost tvorbe ferita je pri 600°C.

V jeklu, deformiranem pri 900°C, avstenit ni rekristaliziral. Do kontrolirane vezave niobija v karbonitrid je prišlo le v stabiliziranih vzorcih. Jeklo smo enkrat deformirali in takoj ohladili na temperaturo izotermne transformacije, oz. smo ga stabilizirali, drugič pa smo ga stabilizirali pred deformacijo. Transformacija poteka najhitreje v deformiranem in stabiliziranem jeklu (DSA), sledi deformirano in nestabilizirano jeklo (DA), nedeformirano in stabilizirano jeklo (NSA<sub>2</sub>) in nedeformirano in nestabilizirano (NA<sub>2</sub>). Do temperature transformacije 650°C je vpliv deformacijskega stanja močnejši kot vpliv stabilizacije. Z zniževanjem temperature transformacije prihaja vedno bolj do izraza vpliv stabilizacije, to je različen učinek niobija, ki je v avstenitu raztopljen ali pa vezan v izločkih. Velik vpliv na kinetiko premene ima to, kdaj smo izvršili deformacijo. Transfor-



Slika 5  
Kinetika transformacije avstenit-ferit pri 650°C  
Fig. 5

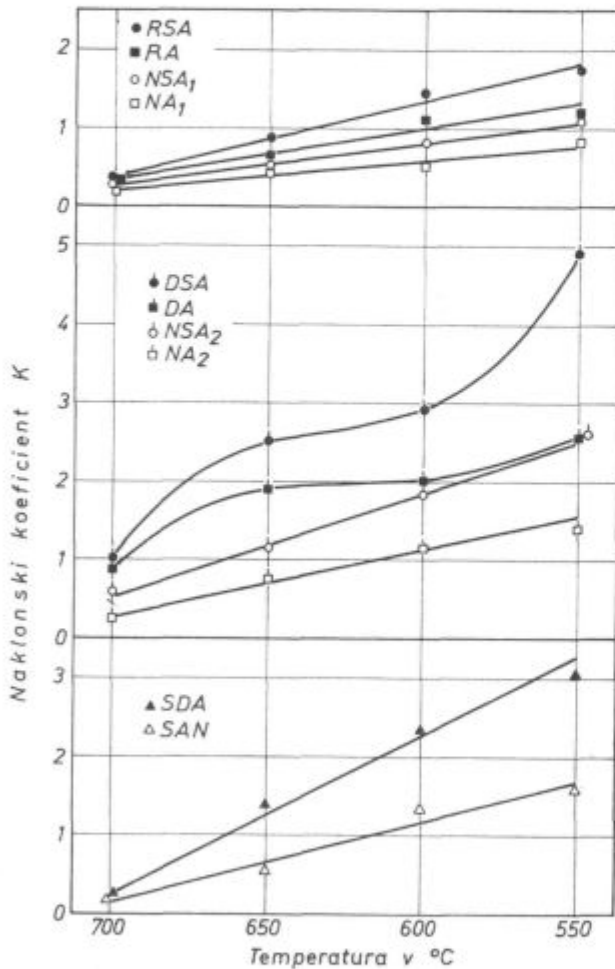
Austenite — ferrite transformation kinetics at 650°C.

macija poteka hitreje v jeklu, deformiranem pred stabilizacijskim žarjenjem, kot v jeklu, deformiranem po stabilizacijskem žarjenju, čeprav je bila mikrostruktura na začetku premene v obeh primerih enaka. Razliko v kinetiki premene si zato lahko razložimo z večjo gostoto karbonitridnih izločkov v jeklu, deformiranem pred stabilizacijo.

Na sl. 6 je v diagramih prikazana relativna hitrost nastanka ferita v odvisnosti od temperature transformacije. Koeficient K je naklonski kot premic, ki podajajo odvisnost količine ferita od trajanja izotermne transformacije. Odvisnosti so pri vseh stanjih linearne, le pri vzorcih, deformiranih pri 900°C, je potek krivulj specifičen. Deformacija pri 900°C pospeši precipitacijo in gostoto karbonitridnih izločkov. Hitrost nastanka ferita v začetku hitro raste, ko pada temperatura transformacije, v intervalu med 650 in 600°C pa se hitrost zmanjša. Z nadaljnjim zniževanjem temperature prihaja vedno bolj do izraza vpliv vezave niobija in v stabiliziranem jeklu narašča hitrost nastajanja ferita. Hitrost transformacije v deformiranem jeklu pa je v tem področju enaka kot v nedeformiranem stabiliziranem jeklu.

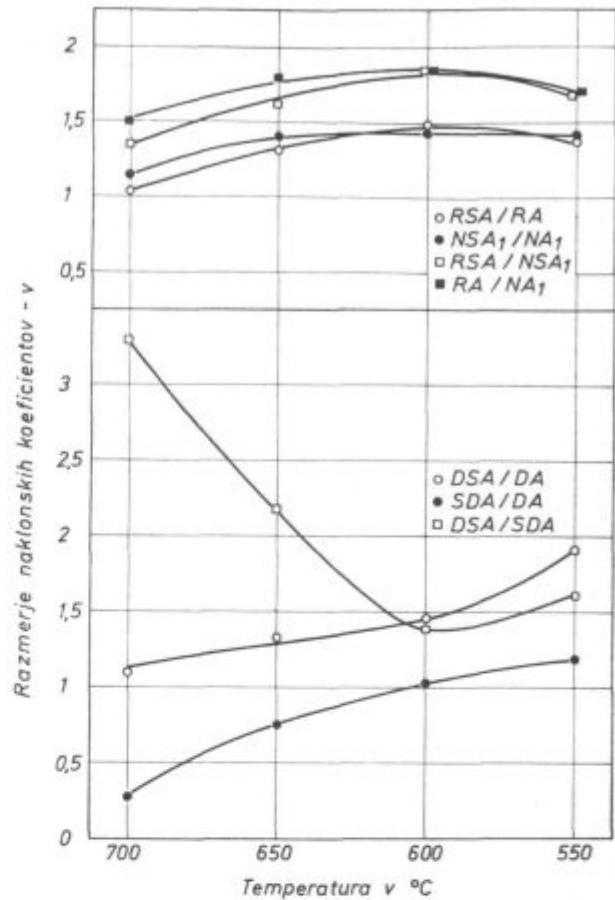
Vpliv začetnega stanja avstenita in niobija na kinetiko transformacije najbolj okarakterizirajo razmerja relativnih hitrosti (sl. 7). Krivulja, ki prikazuje vpliv stabilizacije v rekristaliziranem avstenitu (RSA/RA), kaže, da vpliv stabilizacije raste, ko pada temperatura, in doseže maksimum pri 600°C, nato pa se zmanjšuje. V nedeformiranem avstenitu (NSA<sub>1</sub>/NA<sub>1</sub>) vpliv stabilizacije raste, ko pada temperatura do 600°C, nato pa ima konstantno vrednost. Krivulji, ki podajata vpliv velikosti zrn na kinetiko premene v stabiliziranem in nestabiliziranem jeklu (RSA/NSA<sub>1</sub>, RA/NA<sub>1</sub>), imata maksimum pri 600°C.

V jeklu, ki je bilo deformirano pri 900°C, je zanimiv vpliv stabilizacije pred deformacijo oz. po njej. Razmerje med hitrostjo nastajanja ferita v deformiranem stabiliziranem jeklu in v deformiranem jeklu enakomerno raste do 600°C, pri nižji



Slika 6  
Relativna hitrost nastanka ferita v odvisnosti od temperature transformacije. K je naklonski koeficient premic, ki podajajo delež ferita v odvisnosti od trajanja izotermne transformacije

Fig. 6  
Relative rate of ferrite formation depending on the transformation temperature. K is the slope coefficient of lines representing the ferrite portion depending on the duration of the isothermal transformation.



Slika 7  
Vpliv začetnega stanja avstenita in niobija na kinetiko transformacije. Koeficient v je podan z razmerjem naklonskih koeficientov K različnih začetnih stanj

Fig. 7  
Influence of the initial state of austenite and niobium on the transformation kinetics. Coefficient v is given by the ratio of K slope coefficients of various initial states.

temperaturi pa ferit nastaja hitreje v stabiliziranem jeklu zaradi večjega vpliva izločkov. Če je jeklo deformirano po izločilnem ogrevanju, je hitrost nastajanja ferita manjša kot v le deformiranem jeklu do temperature premene 600°C, kjer je razmerje 1. Nato pa je rast ferita hitrejša v stabiliziranem jeklu. Ti odnosi so najbolj izraziti v krivulji, ki kaže razmerje med deformiranim stabiliziranim (DSA) in stabiliziranim deformiranim (SDA) jeklom.

### 3. Morfologija tvorbe ferita in perlita

Ferit začne nastajati v značilnih točkah mikrostrukture, po kristalnih tromejah in mejah, deformacijskih trakovih (lamelah), ob nekovinskih vključkih in končno tudi v notranjosti kristalinih zrn.

Pri višjih temperaturah transformacije raste ferit najprej vzdolž kristalnih mej in nato v notranjost zrn. V feritnih pasovih, ki se razraščajo okoli mej, se pogosto razloči stebrasta rast posa-

meznih feritnih zrn, ki je značilna za difuzijsko rast. V notranjosti zrn raste ferit koncentrično okoli nekovinskih vključkov. Pri nižjih temperaturah transformacije se pojavlja ferit v notranjosti kristalnih zrn tudi v igličasti obliki, ki je značilna za predbajnitno premeno (sl. 8 in 9).

Med rekristaliziranim, deformiranim in nedeformiranim jeklom ni razlike v morfologiji ferita, ne glede na stabilizirano in nestabilizirano stanje.

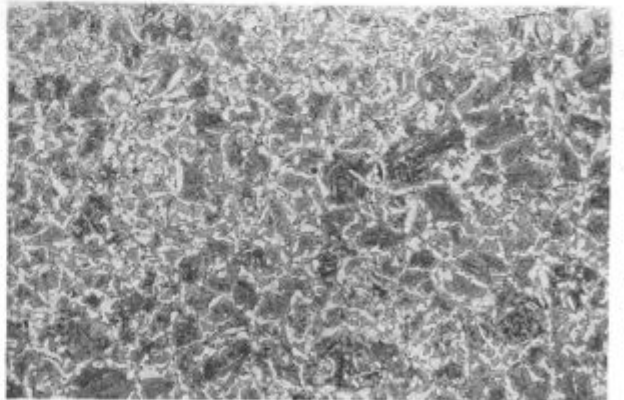
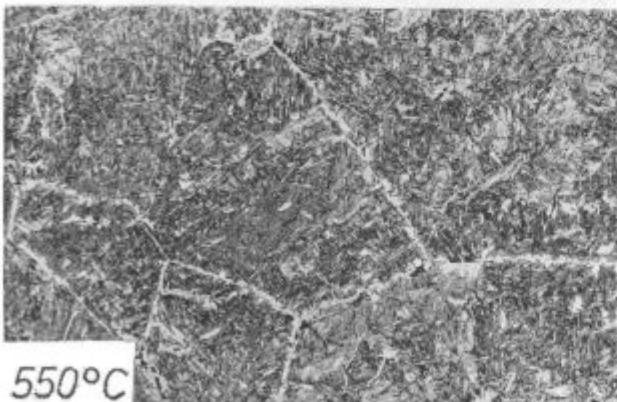
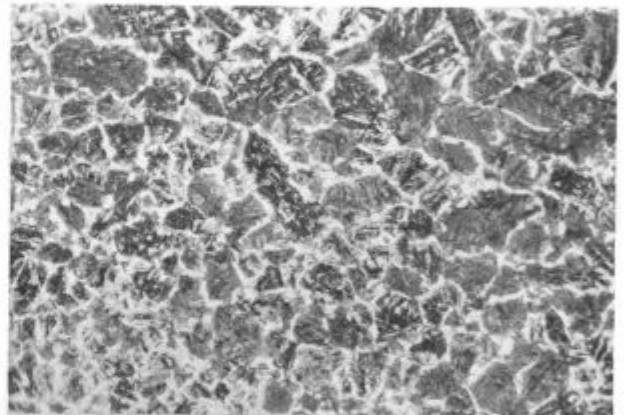
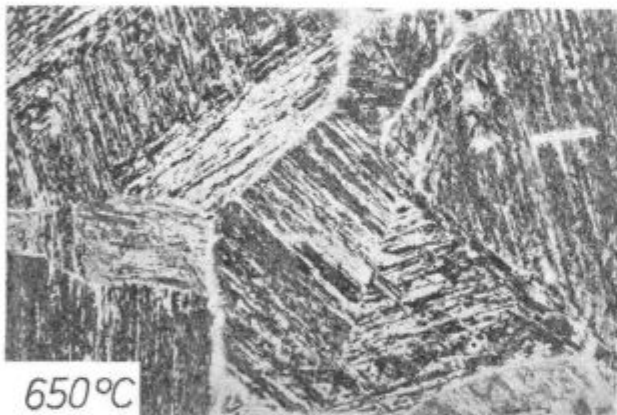
Tvorbe perlita ni mogoče tako točno spremljati kot tvorbo ferita, ker je njegovo nastajanje močno odvisno od nekontroliranega vpliva lokalnih parametrov, na primer nehomogenosti jekla. Velja pa, da se pojavlja perlit prej v stabiliziranem jeklu kot v nestabiliziranem, torej tam, kjer hitreje nastaja ferit. To je razumljivo, saj pride v takem jeklu hitreje do potrebne koncentracije ogljika v avstenitu, ki sproži premeno avstenita v perlit.

#### 4. Tvorba niobijevega karbonitrida med izotermno transformacijo

O izločilnih pojavih smo sklepali le na osnovi meritev makrotrdote in po spremembi trdote zaradi izločilnega žarjenja jekla pri 600°C. Pri tej

temperaturi niobijev karbonitrid praktično ni topen v feritu in povzroči maksimalno izločilno utrditev jekla. Seveda pa poveča trdoto le niobij, ki je ostal po izotermni transformaciji v trdni raztopini v feritu.

Trdota pada, ko se nadaljuje izotermna transformacija, dokler raste količina ferita in se manjša delež bajnita in martenzita v mikrostrukturi. Nestabilizirano jeklo ima največjo trdoto in tudi največji pridobitek trdote po sekundarnem izločilnem ogrevanju. Absolutni pridobitek trdote je večji v jeklu, deformiranem pri 1200°C, kot v jeklu, deformiranem pri 900°C. Trdota se malo poveča pri sekundarnem izločilnem žarjenju jekla, ki je bilo deformirano pri 1200°C in stabilizirano pri 900°C, torej je v jeklu ostal po transformaciji relativno majhen del niobija v trdni raztopini. V jeklu, deformiranem pri 900°C, je pri stabilizaciji precipitiral skoraj ves niobij in jeklo se je po sekundarnem izločilnem žarjenju omehčalo zaradi popuščnih efektov v bajnitu in martenzitu (sl. 10). Pomembno je dejstvo, da se sekundarni pridobitek trdote hitreje zmanjša v deformiranem jeklu, torej je vezava niobija v izločke hitrejša v deformiranem kot v nedeformiranem jeklu.

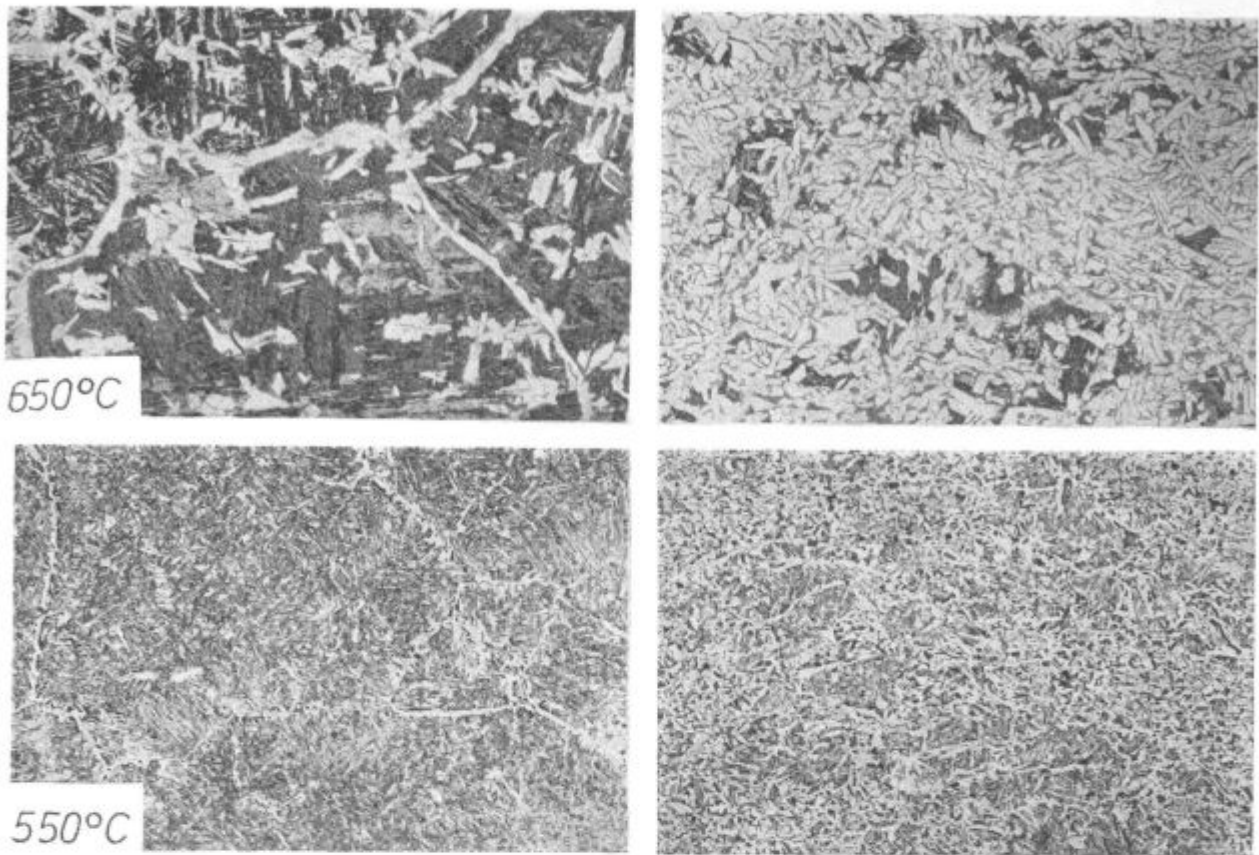


Slika 8

Mikrostruktura jekla po 5 min. pri različnih temperaturah transformacije. Začetno stanje je nedeformiran stabiliziran avstenit (NSA<sub>1</sub>) — levo in stabiliziran rekristaliziran avstenit (RSA) — desno pov. 50 ×.

Fig. 8

Microstructure of steel after 5 min at various transformation temperatures. Initial state is undeformed stabilized austenite (NSA<sub>1</sub>) — left, and stabilized recrystallized austenite (RSA) — right. Magn. 50 ×.

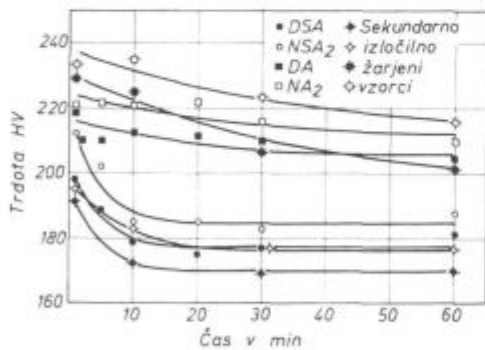


Slika 9

Mikrostruktura jekla po 5 min. pri različnih temperaturah transformacije. Začetno stanje je nedeformiran stabiliziran avstenit (NSA<sub>2</sub>) — levo in deformiran stabiliziran avstenit (DSA) — desno (pov. 50 ×).

Fig. 9

Microstructure of steel after 5 min at various transformation temperatures. Initial state is undeformed stabilized austenite (NSA<sub>2</sub>) — left, and deformed stabilized austenite (DSA) — right. Magn. 50 ×.



Slika 10

Trdota jekla v odvisnosti od časa izotermne transformacije pri 700° C pred in po sekundarnem izločilnem žarenju

Fig. 10

Hardness of steel depending on the time of isothermal transformation at 700° C before and after the secondary precipitation annealing.

Rezultati teh meritev kažejo, da prihaja v temperaturnem intervalu med 750 in 550° C pri izotermni spremeni do diskontinuirne precipitacije na mejni površini avstenit-ferit. Vse kaže, da v tem temperaturnem intervalu ni spontane precipita-

cije, ki bi jo lahko zaznali z meritvami trdote po sekundarnem izločilnem žarjenju. Do spontane precipitacije prihaja v avstenitu v temperaturnem intervalu med 950 in 750° C.

## SKLEPI

S predpripravo vzorcev jekla Niobal 43 smo dosegli, da je bil niobij v avstenitu v začetku izotermne transformacije v trdni raztopini ali vezan v izloček niobijevega karbonitrida, avstenit pa je bil v rekristaliziranem, deformiranem in tudi nedeformiranem stanju.

Proces transformacije avstenita v ferit smo zasledovali v področju, kjer reakcijo regulira difuzija ogljika in je ta del premene mogoče opisati s parabolično odvisnostjo.

Iz kinetike tvorbe ferita pri različnih temperaturah in različnih stanjih avstenita smo ugotovili, da je hitrost tvorbe ferita večja, če je med spremeno niobij vezan v izločkih, kot če je v trdni raztopini. Pri isti obliki prisotnosti niobija je hitrost tvorbe ferita večja v deformiranem kot v re-

kristaliziranim avstenitu. Pri premeni nad temperaturo 600°C prevladuje vpliv deformacijskega stanja, pod to temperaturo pa vpliv načina vezave niobija.

Velik vpliv na kinetiko premene ima to, kdaj smo izvršili deformacijo. Transformacija poteka hitreje v jeklu, deformiranem pred stabilizacijskim žarjenjem, kot v jeklu, deformiranem po stabilizacijskem žarjenju. Deformacija pri 900°C pospešuje spontano precipitacijo karbonitridnih izločkov.

V temperaturnem intervalu med 550 in 750°C ter pri trajanju izotermne transformacije do 90 min. prihaja do razpada trdne raztopine le z diskontinuirno precipitacijo na transformacijski površini avstenit-ferit. Zaznavne spontane precipitacije niobijevega karbonitrida v avstenitu pred transformacijsko fronto nismo zasledili.

#### Literatura

1. I. L. Dillamore, R. F. Dewsnap in M. G. Frost: Metallurgical aspects of steel rolling technology, *Metals Technology*, jul.-aug., 1975, 294—302.
2. A. Le Bon, J. Rofes Vernis in C. Rossard: Recristallisation et precipitation provoquées par la deformation a chaud: cas d'un acier de construction eoustable au niobium, *Memoires Scientifiques Revue Metallurgie* 70, št. 7-8, 1973, 577—588.

3. F. Vodopivec, M. Gabrovšek in M. Kmetič: Raziskava procesov deformacije, rekristalizacije in toplotne obdelave jekel z visoko mejo plastičnosti, *Poročilo MI*, Lj., št. 311/283, 1975.
4. F. Vodopivec in M. Gabrovšek: Über die isotherme Austenit-Ferrit Umwandlung in Niob-Vanadium Baustähle, Härtereitechnische Mitteilungen 31, št. 4, 1976, 184—187.
5. M. Gabrovšek: Mikrolegirana finožrnata jekla za varjene konstrukcije, *Zelezarski zbornik* 6, 1972, 11—24.
6. R. Priestner: Origine de la ferrite a grains fins dans les aciers lamines sous controle, *Revue Metallurgie*, april, 1975, 285—295.
7. M. Tanino, K. Aoki: The precipitation behavior and strengthening effect of NbC during tempering and during continuous cooling, *Transactions ISIJ* 8, 1968, 337—345.
8. A. Constant, M. Grumbach in G. Sanz: Untersuchung der Austenitumwandlung und der Entstehung von Ausscheidungen in ausscheidungshärtbaren Stählen, *Härtereitechnische Mitteilungen* 26, 1971, 364—374.
9. J. Žvokelj: TTT diagrami finožrnatih jekel, *Poročilo MI*, Lj., št. 102, 1972.
10. M. Kmetič, F. Vodopivec in M. Gabrovšek: Raziskava izotermne premene deformiranega in rekristaliziranega avstenita v varivem jeklu legiranem z niobijem in aluminijem, *Poročilo MI*, Lj., št. 492, 1976.
11. J. Irvine in T. N. Baker: Effect of rolling deformation on niobium carbide particle size distribution in low carbon steel, *Metal Science*, marec-april, 1979, 229—237.
12. R. Coladas, J. Masounave, G. Guerin in J. P. Bailon: Austenite grain growth in medium and high carbon steels microalloyed with niobium, *Metal Science*, nov., 1977, 509—516.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Probenvorbereitung des Stahles Niobal 43 ist erzielt worden, dass Niobium im Austenit, am Anfang der isothermischen Umwandlung, in der harten Lösung, oder gebunden, in den Ausscheidungen des Niobiumkarbonitrides gewesen ist, der Austenit aber war im rekristallisierten, deformierten und auch nichtdeformierten Zustand.

Der Prozess der Umwandlung des Austenites in Ferrit ist im Bereich verfolgt worden, wo die Reaktion durch die Kohlenstoffdiffusion reguliert wird, und wo dieser Teil der Umwandlung durch eine parabolische Abhängigkeit beschrieben werden kann.

Aus der Kinetik der Ferritbildung bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Zuständen ist festgestellt worden, dass die Geschwindigkeit der Ferritbildung grösser ist, wenn während der Umwandlung Niobium in Ausscheidungen gebunden ist, als wenn er in harter Lösung ist. Wenn Niobium nur in einer Form anwesend ist, ist die Ferritbildung grösser im verformten, als im rekristallisierten Austenit.

Bei der Umwandlung über 600°C überwiegt der Einfluss des Verformungszustandes, und unter dieser Temperatur, der Einfluss der Bindungsart von Niobium.

Einen grossen Einfluss auf die Umwandlungskinetik hat die Zeit bei welcher die Verformung durchgeführt worden ist. Die Umwandlung verläuft schneller im Stahl, welcher vor der Stabilisationsglühung verformt worden ist, als in dem, wo die Verformung nach der Stabilisationsglühung durchgeführt wurde. Eine Verformung bei 900°C beschleunigt eine spontane Präzipitation der Karbonitridausscheidungen.

Im Temperaturintervall zwischen 550 und 750°C, und bei der Dauer der isothermischen Umwandlung bis 90 Min., kommt zum Zerfall der festen Lösung, nur durch eine diskontinuierliche Präzipitation auf der Umwandlungsfläche Austenit-Ferrit. Eine wahrnehmende und spontane Präzipitation des Niobiumkarbonitrides im Austenit vor der Umwandlungsfront konnte nicht ausfindig gemacht werden.



## SUMMARY

Samples of the Niobal 43 steel were prepared in such a way that niobium in austenite at the beginning of isothermal transformation was either in solid solution or bound in precipitates of niobium carbonitride; austenite was as recrystallized, deformed or even undeformed.

Transformation process of austenite into ferrite was investigated in the region where the reaction is controlled by the carbon diffusion, and this part of transformation can be described by a parabolic relationship.

Kinetics of ferrite formation at various temperatures and various states of austenite revealed that the rate of ferrite formation is higher if niobium is bound into precipitates during the transformation than it is in solid solution. At the same form of niobium the formation rate is higher in the deformed than in the recrystallized austenite.

Transformation above 600° C is more influenced by the state of deformation while below that temperature the influence of the niobium form prevails.

Transformation kinetics are highly influenced by the conditions of deformation. Transformation is faster in steel deformed before the stabilisation annealing than that in steel deformed after it. Deformation at 900° C promotes spontaneous precipitation of carbonitride precipitates.

In the temperature range between 550 and 750° C and at the duration of isothermal transformation below 90 minutes the solid solution decomposes only by a discontinuous precipitation on the austenite/ferrite transformation interface. Perceptible spontaneous precipitation of niobium carbonitride in austenite before the transformation front was not found.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С предварительной подготовкой образцов стали марки Ниобал 43 установили, что в начале изотермической трансформации ниобий находится в аустените в форме твердого раствора, или же в соединении с выделениями карбонитрида ниобия, между тем как сам аустенит находится в рекристаллизованном, деформированном или же также в недеформированном состоянии.

За процессом деформации аустенита в феррит мы наблюдали в области, в которой реакцию регулирует диффузия углерода, и этот предел изменения можно описать с параболической зависимостью.

Из кинетики образования феррита при различных температурах и различных состояниях аустенита авторы установили, что быстрота образования феррита увеличена, если во время изменения ниобий в соединении с выделениями карбонитрида в сравнении, если он находится в твердом растворе. При одной и той

же форме наличия ниобия, быстрота образования феррита значительно выше в деформированном, чем в рекристаллизованном аустените. При изменении при температуре выше 600° преобладает влияние деформационного состояния, а под этой температурой — влияние вида соединения ниобия.

Большое влияние на кинетику изменения имеет период времени когда была выполнена деформация. Трансформация происходит быстрее в стали, которая была деформирована до, а не после стабилизированного отжига. Деформация при температуре 900° спонтанно ускоряет преципитацию выделений карбонитридов.

При температурном интервале между 550° и 750°, во время изотермической трансформации при длительности 90 мин. происходит разложение твердого раствора только при прерывной преципитации на трансформационной поверхности аустенит-феррит. Заметной спонтанной преципитации карбонитридов ниобия в аустените перед линией преобразования не замечали.