

# Nekaj značilnosti in problemov v proizvodnji nerjavnih jekel

UDK: 621.775-977:669.15-194  
ASM/SLA: Q 23q, F 2, SS, M 26

Janez Kovač

*Pri izdelavi in predelavi nerjavnih jekel pogosto nastajajo težave, za katere obstaja več vzrokov. Ena glavnih nevšečnosti, ki povzročata slabo plastičnost in s tem slabo predelovalnost teh jekel, je pojav delta ferita. V članku je kratek opis nastanka in vplivov delta ferita na plastičnost pri nerjavnih jeklih. Zbranih je nekaj rezultatov dosedanjih raziskav na tem področju. Na koncu so navedene ugotovitve raziskave nerjavnega jekla C. 4570 (prokron 2 special) v Zelezarni Ravne v zvezi s preoblikovalno sposobnostjo, odvisno od vsebnosti delta ferita.*

## UVOD

Nerjavna jekla so obstojna proti koroziji zaradi povečane vsebnosti kroma, ki tvori na površini oksidno plast, nepropustno proti nadaljnji koroziji. Z dodatkom niklja in molibdena še bolj povečamo pasivnost jekla proti korozijskim medijem. Kljub temu še obstaja možnost interkristalne korozije.

Nevarnost pojava interkristalne korozije je največja pri naslednjih pogojih:

— če je vsebnost ogljika tako velika, da se pri toplotni obdelavi kromovi karbidi ne raztopijo popolnoma;

— če jeklo pri toplotni obdelavi ogrevamo v območje kritičnih temperatur (500—900 °C), kjer nastopa po mejah kristalov izločanje karbidov.

Važen pogoj za zahtevno korozijsko obstojnost je čim manjša vsebnost ogljika, ker v nasprotnem primeru izločeni karbidi zmanjšujejo vsebnost kroma v osnovni masi in s tem korozijsko obstojnost jekla. Z začetkom proizvodnje ferokroma z nizkim ogljikom so že leta 1930 uspeli proizvesti krom-nikljevo jeklo z 0,03 % C, medtem ko v zadnjih desetletjih krom-nikljevo jeklo z vsebnostjo 0,03 % C ni več redkost. Zaradi težav pri izdelavi in predelavi krom-nikljevih jekel z ustrezno nizko vsebnostjo ogljika se je uveljavila proizvodnja stabiliziranih vrst nerjavnih jekel, pri katerih je del ogljika vezan s titanom, tantalom, niobijem ali z drugim elementom v stabilnejše in manj škodljive karbide.

Obstaja več vrst nerjavnih jekel. Delimo jih glede na odpornost proti koroziji in ognjeodpornost ter glede na različne mehanske lastnosti. Nadalje jih razdelimo po strukturi na feritna, martenzitna

in avstenitna jekla. Nerjavna jekla avstenitnega tipa imajo največje področje uporabe. Kljub temu tudi ostale vrste uporabljamo v tehniki dokaj pogosto.

## Izdelava in predelava jekla

V proizvodnji nerjavnih jekel je največji problem izdelati talino ter ingote, ki so sposobni za nadaljnjo predelavo. Ocenitev plastičnosti lite strukture je precej nezanesljiva zaradi mnogih vplivnih dejavnikov, kot so: temperatura in čas litja, oblika in dimenzija ingota, način zalaganja in ogrevanja ingotov itd. Glavni problem plastične predelave teh jekel so površinske napake, ki zmanjšujejo plastičnost zaradi dvofazne strukture. Večina napak nastaja na površini valjancev, posebno na robovih. Na sliki 1 so prikazane raztrganine



Slika 1  
Raztrganine na površini gredice  
Fig. 1  
Pulls on the surface of a billet

Janez Kovač je diplomirani inženir metalurgije in raziskovalec za plastično predelavo jekel v Zelezarni Ravne.

na površini gredice. Nastale razpoke so večinoma prečne in njihov začetek praviloma sledi kristalnim mejam. Pri plastični predelavi, na mejah med alfa in gama fazo, nastopajo napetosti, in zato je dvofazna struktura glavni vzrok slabe plastičnosti nerjavnih jekel. Znano je, da ima na tvorbo alfa faze v nerjavnih jeklih odločilen vpliv kemijska sestava jekla in režim ogrevanja ingotov. Temperatura litja, oblika in dimenzija ingotov prav tako močno vplivajo na količino alfa faze, oziroma na vsebnost delta ferita. V jeklih, pri katerih je razmerje med kromom in nikljem veliko, in v jeklih, legiranih z Mo, Al, Ti ali Nb, vedno nastopi določena količina delta ferita.

Dejavniki, ki vplivajo na nastanek alfa faze, so naslednji:

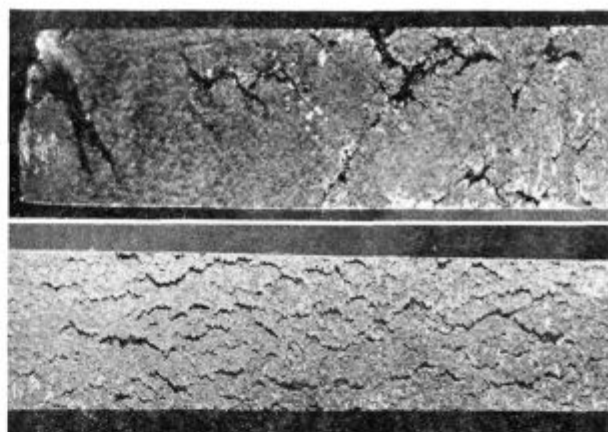
a) Tekočnost taline je odločilnega pomena za vlivanje in ima neposredni vpliv na kakovost površine ingotov. Tekočnost taline, ki je pri visokolegiranih nerjavnih jeklih ne moremo vedno zagotoviti v ustrezni meri posredno s kakovostjo površine ingotov, močno vpliva na potek plastične predelave.

b) Struktura ingotov po strjevanju

Vzdolžni presek ingotov nerjavnih jekel kaže po strjenju dve karakteristični coni. Prva je enakoosna in je sestavljena iz drobnih kristalov, druga pa je transkristalna. Vsekakor pa obstaja ozka povezana odvisnosti plastičnosti od tipa strukture, čeprav ni točno določeno, katera struktura je boljše za plastično predelavo.

Iz dosedanjih raziskav razporeditve alfa faze po prečnem in vzdolžnem preseku ingota lahko zaključimo naslednje:

— neposredno pod površino ingota je vsebnost alfa faze minimalna celo pri talinah, ki so glede kemijske sestave nagnjene k izločanju večjih količin alfa faze;



Slika 3  
Razpoke na površini valjanca  
Fig. 3

Cracks on the surface of the rolled piece

— vsebnost alfa faze se povečuje od površine v notranjost ingota in

— po vzdolžnem preseku ingota ne nastopajo bistvene razlike v vsebnosti alfa faze.

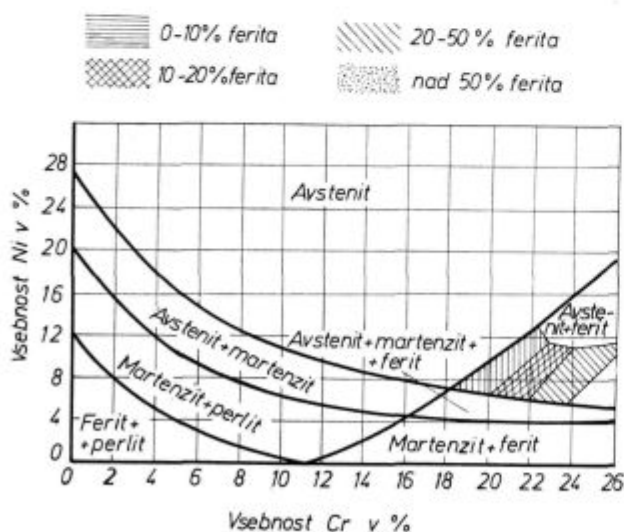
Z raziskavami je ugotovljeno, da neenakomerna porazporeditev alfa faze nastopa zaradi različne porazdelitve temperature v prečnem preseku ingotov, ko se jeklo ohlaja v kokili. Na površini ima alfa faza globularno obliko, medtem ko je v sredini ingota izločena po mejah kristalov hkrati s kromovimi karbidi.

c) Kemijska sestava jekla

Kemijska sestava ima bistven vpliv na strukturo jekla. Nerjavna jekla prištevamo k najbolj razširjenemu štirikomponentnemu sistemu. Krom ima prostorsko centrirano kubično mrežo in stabilizira alfa fazo, medtem ko ima nikelj ploskovno centrirano kubično mrežo in stabilizira gama fazo. Za razliko od ogljika nikelj ne zmanjša vsebnosti kroma v trdni raztopini. Elementi, ki pospešujejo tvorbo alfa faze, so naslednji: Cr, Si, Mo, Al, Ti, Nb, Ta in P, medtem ko C, Ni, Mn in N<sub>2</sub> pospešujejo tvorbo gama faze. Določitev vpliva posameznih elementov na strukturno sestavo teh jekel je zelo težavna.

Dodatek niklja Cr-Ni zlitinam razširi gama območje. Pri določeni vsebnosti niklja se premena gama faze v alfa popolnoma prepreči in tako dobimo jeklo z avstenitno strukturo. Pri vmesnih vsebnostih, ko njegova vsebnost ne zadošča za nastanek popolne avstenitne strukture, dobimo avstenitno — feritno, avstenitno — martenzito ali martenzito jeklo z večjo ali manjšo vsebnostjo avstenita. Na sliki 2 je prikazan strukturni diagram Cr-Ni jekla z 0,1—0,13 % C, 0,3—0,48 % Mn in 0,23 do 0,37 % Si.

Kot je že navedeno, je za odstranitev možnosti pojava interkristalne korozije potrebno Cr-Ni avstenitnim jeklom dodajati v določenem odnosu do ogljika titan ali niobij. Dodatek titana ustreza 4,0 do 5,5-kratni vsebnosti ogljika, medtem ko je dodatek niobija enak 8 do 10-kratni vsebnosti ogljika.



Slika 2  
Strukturni diagram Cr-Ni jekel\*  
Fig. 1  
Structure diagram of Cr-Ni steel\*

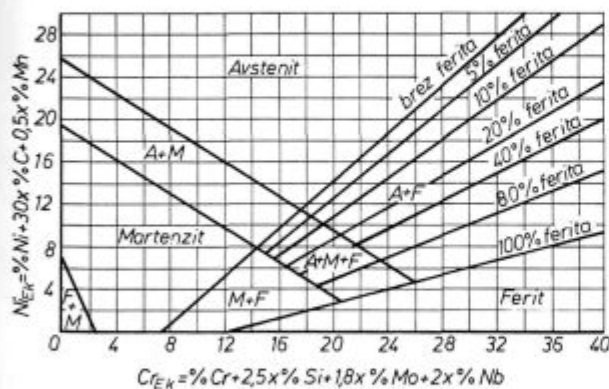
### Vpliv dvofazne strukture

Medtem ko so majhne vsebnosti delta ferita manj škodljive za plastično predelavo, so vsebnosti delta ferita nad 10 % zelo neprijetne, in torej neposredno vplivajo na plastičnost teh vrst jekel. Razpoke, ki nastajajo pri vroči preedlavi, povzročijo feritni delci zaradi različne plastičnosti alfa in gama faze. Negativni vpliv delta ferita na plastičnost nerjavnih jekel lahko pripisujemo preoblikovalnim lastnostim in rekristalizacijskim hitrostim avstenita in ferita, ki sta osnovni strukturi teh jekel. Na sliki 3 sta prikazana dva tipična primera razpok na površini gredic pri plastični predelavi.

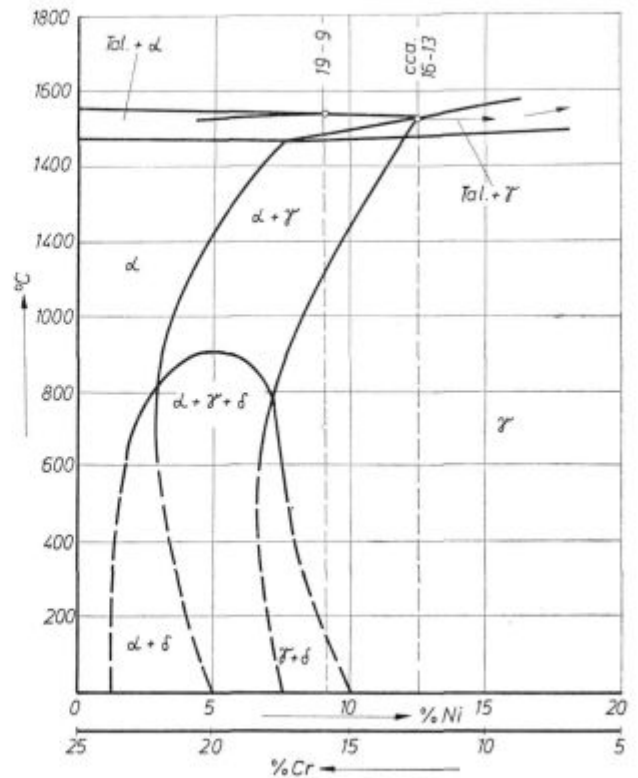
### Nastanek delta ferita

V jeklih z visoko vsebnostjo kroma in v avstenitnih Cr-Ni jeklih skoraj vedno nastopa delta ferit. Nerjavna jekla avstenitno — feritnega in avstenitno — martenzitega tipa vsebujejo neko določeno količino delta ferita. Delta ferit se pojavlja in ostane v strukturi nerjavnih jekel odvisno od sestave, temperature in stanja predelave. Pri avstenitno — feritnih jeklih je prisoten v celem temperaturnem intervalu od strdišča do sobne temperature in je njegov nastanek pogojen predvsem s kemično sestavo jekla. Temperaturni interval pojavljanja je najizrazitejši v območju visokih temperatur toplotne in vroče predelave 900—1250 °C.

Nagnjenje jekla k tvorbi delta ferita je precej odvisno od kemične sestave. Vpliv posameznih elementov na strukturo sestavo je mogoče približno izraziti z njihovim ekvivalentnim vplivom v odnosu na vpliv Cr in Ni. Ti ekvivalentni vplivi izražajo minimalno potrebno vsebnost določenega elementa na popolno preprečitev pojava alfa faze, oziroma gama faze. Z ozirom na zapletenost vpliva različnih dejavnikov na pojav in vsebnost delta ferita obstaja več načinov določevanja. Večina je osnovana na empiričnih podatkih in se rezultati posameznih načinov med seboj razlikujejo. Eden od najbolj uporabljenih načinov je znani Schaefflerjev diagram, ki je prikazan na sliki 4.



Slika 4  
Schaefflerjev strukturalni diagram  
Fig. 4  
Schaeffler's structure diagram



Slika 5  
Ravnotežni diagram stanja sistema Fe-Cr-Ni  
Fig. 5  
Phase diagram of the Fe-Cr-Ni system

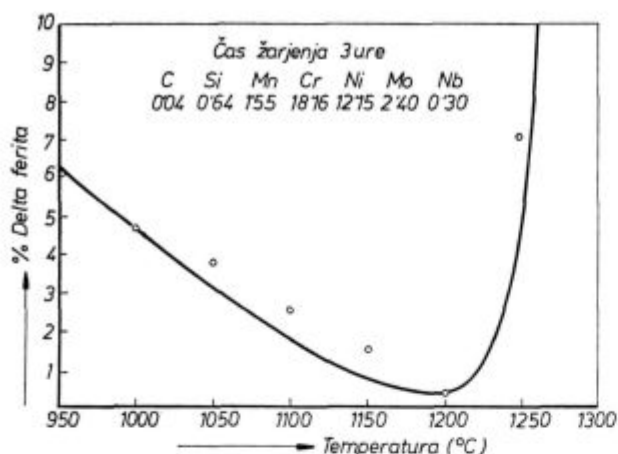
Pri konstrukciji diagrama so upoštevani najbolj pogosti legirni elementi ter elementi stabilizatorji, ki vežejo C in N v stabilno obliko karbonytridov, ki so tudi pri visokih temperaturah netopni v osnovni avstenitni masi.

Vpliv temperature na nastajanje delta ferita je predvsem pomemben v čistih avstenitnih jeklih, nekaj manj pri avstenitno — feritnih in avstenitno — feritno — martenzitnih jeklih. Nastajanje delta ferita v območju visokih temperatur lahko zasledujemo na sliki 5, ki predstavlja poenostavljen diagram stanja ternarnega sistema Fe-Cr-Ni. Resnično stanje v jeklu je mnogo bolj zapleteno zaradi vpliva ostalih elementov.

Diagram nam kljub temu omogoča razumevanje mehanizma nastanka delta ferita in pogojev, v katerih delta ferit nastopa v strukturi nerjavnega jekla.

### Vpliv delta ferita na plastično predelavo

Plastičnost nerjavnih jekel je odvisna od temperature, časa ogrevanja, vsebnosti delta ferita, litega stanja ter topnosti ogljika, oziroma karbidov v odvisnosti od temperature. Ogljik že v majhnih količinah vpliva na obstojnost posameznih faz in pri višjih temperaturah širi gama fazo in prehaja v trdno raztopino. Povečanje temperature nad območje obstoja homogenega avstenita omogoča pojav delta ferita.



Slika 6  
Vpliv temperature na vsebnost delta ferita<sup>2</sup>

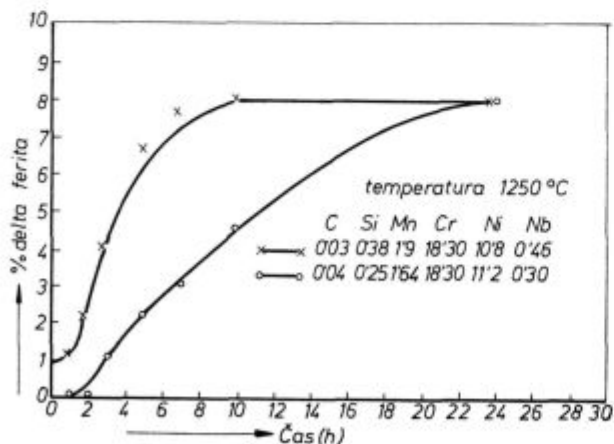
Fig. 6

Temperature influence on the amount of delta ferrite<sup>2</sup>

V temperaturnem območju 400—900 °C se vsebnost delta ferita litega stanja skoraj ne omenja, nastopa samo minimalno izločanje karbidov. Do temperature 1200 °C se vsebnost delta ferita postopoma zmanjšuje, medtem ko se v temperaturnem območju 1250—1300 °C postopoma povečuje. Povečanje vsebnosti delta ferita se pričinja na kristalnih mejah in se širi v notranjost ingota. V ingotu poteka najhitreje premena alfa faze v gama v površinskem sloju, ker je v njem avstenit manj stabilen in teži k izravnavi vsebnosti alfa faze površinskega sloja in jedra ingota.

Tudi rezultati preiskav,<sup>2</sup> izvršenih na jeklu Č 4582 (prokron 11 Nb), ki so prikazani na sliki 6, potrjujejo prej navedene ugotovitve o spremembi delta ferita s temperaturo. Iz diagrama je razvidno, da z naraščanjem temperature vsebnost delta ferita pada, od temperature 1200 °C pa začne spet občutno naraščati.

Podoben efekt kot temperatura ima tudi čas zadržanja na temperaturi. Pri daljših časih se začne vsebnost delta ferita večati in doseže po ne-



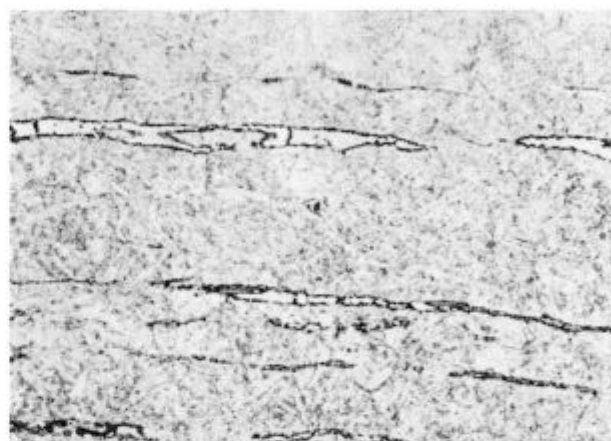
Slika 7  
Vpliv časa na vsebnost delta ferita<sup>2</sup>

Fig. 7

Time influence on the amount of delta ferrite<sup>2</sup>

kem določenem času maksimalno vsebnost, ki se nato pri še daljših časih bistveno ne spreminja. Oba efekta, tako temperatura kot čas, sta podvržena vplivu sestave jekla (slika 7).

V železarni Ravne smo raziskovali vpliv vsebnosti delta ferita na predelovalno sposobnost jekla Č 4570 (Prokron 2 sp.). Zasedovali smo 23 šarž tega jekla v redni proizvodnji. Kemijska sestava

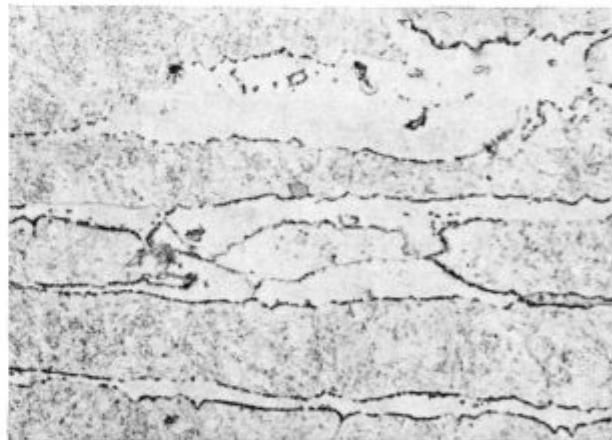


Slika 8

Primer mikrostrukture jekla Č 4570 (Prokron 2 sp.) v valjanem stanju (pov. 200 ×)

Fig. 8

An example of the microstructure of the C. 4570 steel (prokron 2 sp.), as rolled. Magnification 200 x



Slika 9

Primer mikrostrukture jekla Č 4570 (Prokron 2 sp.) v valjanem stanju (pov. 200 ×)

Fig. 9

An example of the microstructure of the C. 4570 steel (prokron 2 sp.), as rolled. Magnification 200 x

šarž je bila v predpisanih mejah, in sicer 0,17 do 0,22 % C, 0,006—0,030 % S, 0,30—0,55 % Si, 16,30 do 17,40 % Cr, 1,98—2,65 % Ni, 0,54—0,69 % Mn in 0,03—0,20 % Mo. Ugotovljeno je bilo, da na vsebnost delta ferita v jeklu razen temperature in časa ogrevanja precej vpliva sestava jekla, četudi je znotraj predpisanih mej. Pri nižjih vsebnostih delta ferita (manj kot 10 %) pri plastični predelavi

$$X_{12} = f(X_4)$$

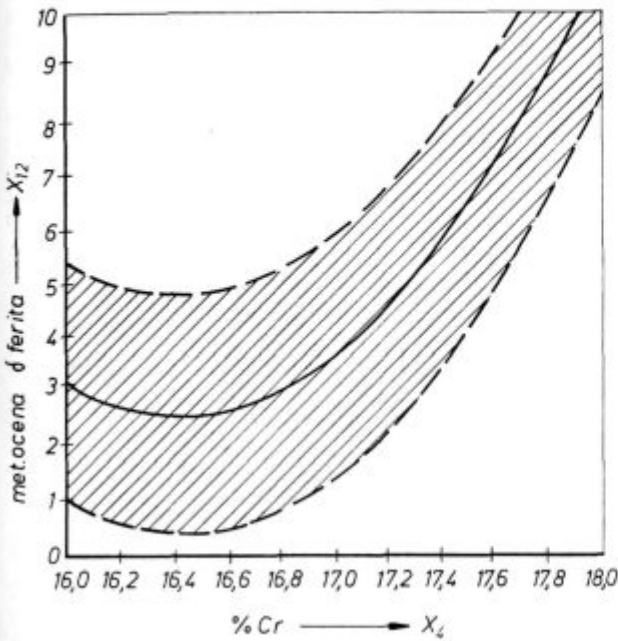
$$X_{12} = 284,515 - 3,131X_4^2 + 0,127X_4^3 \pm 2,2$$

$N = 23 \quad R^2 = 0,27 \quad S_y = 1,13$   
 $P = 90,0\% \quad R = 0,52$

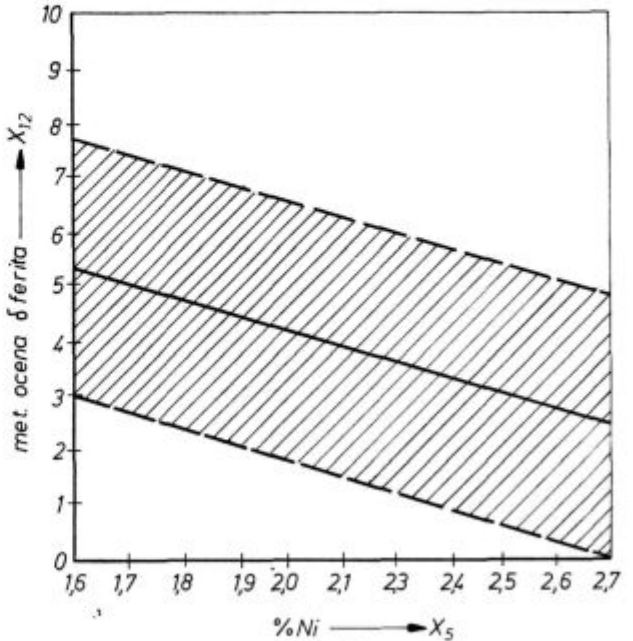
$$X_{12} = f(X_5)$$

$$X_{12} = 10,195 - 3,008X_5 \pm 2,3$$

$N = 23 \quad R^2 = 0,19 \quad S_y = 1,17$   
 $P = 95,0\% \quad R = 0,43$



Slika 10  
 Vpliv kroma na tvorbo delta ferita v jeklu Č 4570  
 (Prokron 2 sp.)



Slika 11  
 Vpliv niklja na tvorbo delta ferita v jeklu Č 4570  
 (Prokron 2 sp.)

Influence of chromium on the formation of delta ferrite in Č.4570 steel (prokron 2 sp.)

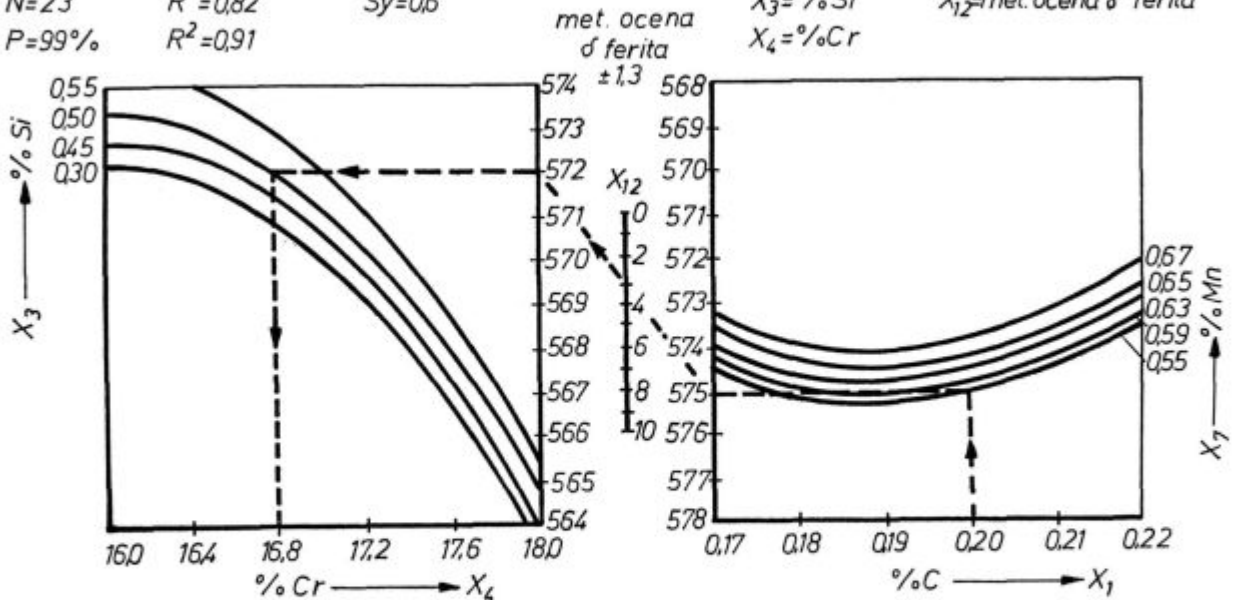
Influence of nickel on the formation of delta ferrite in Č.4570 steel (prokron 2 sp.)

$$X_{12} = f(X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8)$$

$$X_{12} = 474,569 + 761,903 X_1 - 2009,019 X_2^2 + 104,053 X_7 - 94,503 X_7 + 34,219 X_3^2 - 49,93 X_3^2 + 72,089 X_4 + 2,248 X_4^2 \pm 1,3$$

$N = 23 \quad R = 0,82 \quad S_y = 0,6$   
 $P = 99\% \quad R^2 = 0,91$

$X_1 = \%C$   
 $X_3 = \%Si$   
 $X_4 = \%Cr$   
 $X_7 = \%Mn$   
 $X_{12} = \text{met. ocena } \delta \text{ ferita}$



Slika 12  
 Nomogram vpliva Cr, Si, C in Mn na tvorbo delta ferita v jeklu Č 4570 (Prokron 2 sp.)  
 Fig. 12

Nomogram of the influence of Cr, Si, C, and Mn on the formation of delta ferrite in Č.4570 steel (prokron 2 sp.)

ni bilo težav, medtem ko smo pri višji vsebnosti (okoli 15 %) opazili razpoke na površini valjanca (glej sliko 3).

Na osnovi kemijske sestave šarž smo določili pričakovano vsebnost delta ferita s Schaefflerjevimi diagramom. Obenem smo z metalografskim pregledom struktur ocenili vsebnost delta ferita po GOST 11878. Primerjava dobljenih rezultatov ne kaže večjih odstopanj. Na sliki 8 je prikazana vsebnost delta ferita, ki ustreza po tabeli GOST oceni 2; oziroma 2—4 % in na sliki 9 vsebnost delta ferita z oceno 7, ki ustreza vsebnosti 15—18 %.

Z matematično — statistično analizo porazdelitve in regresije smo določili vpliv posameznih elementov na tvorbo delta ferita in s tem na predelovalno sposobnost tega jekla. Rezultati analiz so prikazani na slikah 10, 11 in 12.

Na sliki 10 je prikazan diagram vpliva kroma na vsebnost delta ferita, iz katere je razvidno, da povečana vsebnost kroma močno zvišuje vsebnost delta ferita, to pa poslabša plastičnost jekla.

Vpliv niklja na tvorbo delta ferita prikazuje slika 11.

Z nomogramom na sliki 12 so prikazani vplivni elementi na tvorbo delta ferita v jeklu Č 4570 (Prokron 2 sp.). Tako lahko ugotovimo najugodnejšo kemično sestavo za čimnižje vsebnosti delta ferita in za zagotavljanje zadovoljive plastičnosti pri predelavi.

#### Zaključek:

Skupina nerjavnih jekel je v tehniki zastopana z veliko vrst jekel, ki se pri izdelavi in predelavi različno obnašajo. Glavni problem predelovalnosti nerjavnih jekel so karakteristične napake (raztrganine na površini), ki so v glavnem posledica dvofazne strukture. Raziskave nekaterih vrst teh jekel so pokazale, da je za uspešno izdelavo in predelavo potrebno izpolniti nekatere pogoje, kot so:

1. kemična sestava mora biti takšna, da ima jeklo v litem stanju manj kot 10% alfa faze (delta ferita);
2. ogrevanje nerjavnih jekel mora biti v predpisanem območju temperature (1160—1230°C) in časa;
3. obstaja možnost ugodne kombinacije kemijske sestave za jeklo Č 4570 (Prokron 2 sp.) znotraj predpisanega območja za doseg čimnižje vsebnosti delta ferita in s tem izboljšanje plastičnosti jekla.

#### Literatura:

1. Rapatz F., Die Edelmähle, Berlin, Springer Verlag 1962, str. 599—607
2. Jezeršek A.: Problematičnost določevanja nastajanja delta ferita v avstenitnih nerjavnih jeklih, Zelezarski zbornik 1970, št. 2
3. Božić B.: Fizička metalurgija, Beograd 1964, str. 425 do 429
4. Schaeffler: Metal Progress 1949, str. 680
5. Zajkov M. A.: Režimi deformaci i usilija pri gorjačej prokatke, Sverdlovsk, Metallurgizdat 1960
6. Vizjak F.: Vpliv alfa faze na plastičnost Cr-Ni avstenitnih jekel, Zelezarski zbornik 1972, št. 4
7. Stocca B.: Vzroki slabe plastičnosti jekel tipa 18/8, Zelezarski zbornik 1972, št. 1

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Gruppe der nichtrostenden Stähle besteht aus einer grossen Zahl verschiedenartiger Stähle, welche sich bei der Erzeugung und Verarbeitung auch ganz verschieden betragen. Das wichtigste Problem bei der Warmverformung der nichtrostenden Stähle sind Oberflächenfehler welche als Folge eines zweiphasigen Gefüges sind.

Die Untersuchungen an einigen Stahlsorten zeigen, dass für eine erfolgreiche Erzeugung und Verarbeitung folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

1. Der Stahl soll eine solche chemische Zusammen-

setzung aufweisen, dass im Gusszustand weniger als 10% des Delta-Ferrites enthalten sind.

— 2. Die Erwärmung der nichtrostenden Stähle soll im vorgeschriebenem Temperaturbereich von 1160 bis 1230°C und vorgeschriebener Zeit erfolgen.

— 3. Im Bereich der vorgeschriebenen Analysengrenzen ist es beim Stahl Č 4570 (Prokron 2 sp.) möglich die chemische Zusammensetzung so zu wählen, dass ein niedriger Delta-Ferritgehalt und damit eine gute Verformbarkeit gewährleistet wird.

### SUMMARY

The group of stainless steel consists of a great number of steels which behave differently in manufacturing and working. The main problem in working stainless steel are the characteristic defects (pulls one the surface) which are mainly the consequence of the two-phase structure. Investigations of some steel types showed that some conditions must be fulfilled for successful manufacturing and working:

— chemical composition must be such that steel, as cast, contains less than 10% alpha phase (delta ferrite).

— heating of stainless steel must be in the prescribed temperature (1160 to 1230°C) and time range.

— the possibility of favourable combination of chemical composition of Č.4570 (Prokron 2 sp.) exists inside the prescribed range to obtain the lowest possible delta ferrite content and thus the improved plasticity of steel.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Группа нержавеющей сталей содержит большое число марок сталей, поведение которых при переработке весьма различно. Главный вопрос, что касается обрабатываемости нержавеющей сталей представляет возникновение типичных дефектов (поверхностные трещины), причина которых двухфазная структура. Исследования некоторых марок этих сталей показали, что для обеспечения успешного изготовления и переработки сталей надо выполнить соответствующие условия, а именно:

— 1. Расплав стали, что касается химического состава должен иметь не более 10-ти % альфа-фазы (дельта-феррит);

— 2. Нагрев нержавеющей сталей должен быть в предписанном диапазоне темп-ры (1160—1230°C) и времени.

Исследования, выполненные на стали марки Č. 4570 (Prokron 2 sp.) показали, что при благоприятной комбинации химического состава внутри предписанных пределов есть возможность для получения расплава с низким содержанием дельта-феррита и, таким образом улучшения пластичности стали.