

POVEZANOST POJAVA POVRŠINSKIH RAZPOK NA NERJAVNI DEBELI PLOČEVINI Z VREDNOSTMI FERITNIH ŠTEVIL IN INDEKSOV RAZPOKLJIVOSTI

CORRELATION OF THE OCCURENCE OF SURFACE CRACKS ON STAINLESS-STEEL HEAVY PLATES WITH FERRITE NUMBERS AND CRACK INDEXES

Cveto Pohar, Milan Klinar, Alenka Kosmač

SŽ Acroni, d. o. o., Kidričeva 44, 4270 Jesenice, Slovenija
cpohar@acroni.si

Prejem rokopisa – received: 2003-12-10; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-05-31

V literaturi najdemo več formul za izračun ekvivalentov Cr in Ni ter feritnih števil (FNA) in indeksov razpokljivosti. Vse so dobljene statistično. V Acroniju uporabljamo za izračun FNA formulo, ki jo navaja Avesta Polarit, in za izračun indeksa razpokljivosti modificirano Schaefflerjevo formulo, kot jo navaja Schrewe. Čeprav je FNA navadno namenjena le za izračun delta-ferita v jeklu, smo pokazali, da je to število bolj povezano s pojavom kratkih prečnih razpok na robovih nerjavne debele pločevine kot indeks razpokljivosti. Veliko manj je vrednost FNA povezana s pojavom vzdolžnih razpok. V zadnjem razdelku smo poskusili izpeljati formuli za oba ekvivalenta na spekulativen način. Za to smo morali privzeti dve hipotezi o vplivu atomov, ki zamenjujejo atome Fe , na fizikalne lastnosti jekla. Dobljeni formuli sta precej podobni Avestinim.

Ključne besede: nerjavno jeklo, debela pločevina, ekvivalent Cr in Ni , diagram, feritno število, prečna razpoka

Several formulae to compute the Cr and Ni equivalent, the ferrite number (FNA) and the crack index are found in the literature. All are founded statistically. The FNA formula, used by Avesta Polarit, and the modified Schaeffler formula to compute the crack index are applied in Acroni. Although the FNA formula is usually used only for the calculation of delta ferrite in a heat, we proved that the FNA formula is more correlated with an occurrence of short transversal cracks at the edges of the stainless-steel heavy plates than the crack index and that the correlation of the FNA formula with short longitudinal cracks is almost negligible. In the last section we tried to derive Cr and Ni equivalent formulae only by speculation. For this reason we had to adopt two hypothesis about the influence of substitutional and interstitial atoms on the physical properties of steel. The derived formulae are rather similar to the formulae proposed by Avesta.

Key words: stainless steel, heavy plate, Cr and Ni equivalent, diagram, ferrite number, transversal crack

1 UVOD

Leta 1949 je A. Schaeffler, ko je študiral pojavljanje razpok na zvarih nerjavnih jekel, uspešno uporabil dvodimenzionalni diagram. Na abscisno os je upodobil tako imenovani ekvivalent Cr in na ordinatno os ekvivalent Ni . Ekvivalenta sta linearni kombinaciji vsebnosti kemičnih elementov, ki so ferito- oziroma avstenitotvorni. Uporabil je izraza ¹:

$$\begin{aligned} Cr_{eq} &= Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb \\ Ni_{eq} &= Ni + 30 C + 0,5 Mn \end{aligned} \quad (1)$$

Tu simbol elementa pomeni njegov masni delež v odstotkih tega elementa v zvaru. Z vrisovanjem obeh ekvivalentov, ki jih je izračunal iz posameznih meritev kemične sestave zvarov, in podatkov o odstotkih delta-ferita v istem zvaru, je ugotovil, da točke s podobnimi odstotki delta-ferita ležijo v območjih, ki so v bistvu dolgi in ozki trapezoidi in so bolj ali manj vzporedni simetrali prvega kvadranta koordinatnega sistema (primerjaj **sliko 1**). Obenem je v diagramu obmejil območja, v katerih je struktura zvara avstenitna, avstenitna+feritna ali avstenitna+martenzitna. Omenjena trakasta območja avstenitne strukture z manjšimi deleži

delta-ferita ležijo med avstenitno in avstenitno+feritno strukturo. Seveda podatke za oba ekvivalenta, kot smo jih omenili pri zvaru, lahko vnesemo v podoben diagram za vse izdelke iz nerjavnih jekel. Ni pa nujno, da so rezultati podobni.

Med uporabo Schaefflerjevega diagrama je Delong opazil, da se točke zvarov z večjimi vsebnosti N ne upodobijo v območje s tako vsebnostjo delta-ferita, kot ga je nameril v zvaru. Zato je dopolnil drugo formulo v izrazih (1) z vsebnostjo N v zvaru ¹ in dobil

$$\begin{aligned} Cr_{eq} &= Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb \\ Ni_{eq} &= Ni + 30 C + 30 N + 0,5 Mn \end{aligned} \quad (2)$$

Izračunane vrednosti je upodobil v podoben diagram, kot je Schaefflerjev. Če v obeh diagramih uporabimo iste podatke o zvarih, dobimo pri tistih z majhnimi vsebnostmi N majhne razlike, pri zvarih z večjimi vsebnostmi N pa je razlika pomembna. V Delongovem diagramu so področja s podobnim deležem delta-ferita praktično pravokotniki.

Američani so z bolj natančnimi meritvami ugotovili, da je treba tudi Delongov diagram popraviti z ustrežnejšimi izrazi za oba ekvivalenta. Prikazali so nov diagram

WRC-1988 in pozneje še WRC-1992. V slednjem ¹ imata izraza za izračun ekvivalentov obliko

$$\begin{aligned} Cr_{eq} &= Cr + Mo + 0,7 Nb \\ Ni_{eq} &= Ni + 35 C + 20 N + 0,25 Cu \end{aligned} \quad (3)$$

Verjetno je bilo razvitih še več podobnih diagramov. Navajamo tistega, ki ga priporoča izdelovalec nerjavnih jekel Avesta Polarit ², in sicer zato, ker ga v Acroniju že nekaj let uporabljamo za izračun delta-ferita v zvaru z enako kemično sestavo, kot jo ima pločevina, ki jo prodajamo. Izračunane vrednosti namesto izmerjenih navajamo kupcem v atestih. Avesta predpisuje naslednja ekvivalenta:

$$\begin{aligned} Cr_{eq} &= Cr + 1,5 Si + Mo + 2 Ti + 0,5 Nb \\ Ni_{eq} &= Ni + 30 C + 30 N + 0,5 Mn + 0,5 Cu + 0,5 Co \end{aligned} \quad (4)$$

Tudi v Avestinem diagramu so področja s podobnim deležem delta-ferita pravokotniki (slika 1), kot so v Delongovem. Zato so lahko navedli še linearne izraze za direkten izračun deleža delta-ferita v zvaru oziroma tako imenovani *FNA*:

$$\begin{aligned} FNA &= 3,34 Cr_{eq} - 2,46 Ni_{eq} - 28,6 \text{ ko je } FNA \leq 6,0 \\ &= 4,44 Cr_{eq} - 3,39 Ni_{eq} - 38,4 \text{ ko je } 6,0 < FNA \leq 11,9 \\ &= 4,06 Cr_{eq} - 3,23 Ni_{eq} - 32,2 \text{ ko je } FNA > 11,9 \end{aligned} \quad (5)$$

Uporaba formul (5) je ugodnejša, kot je določanje vrednosti *FNA* z uporabo diagrama, posebno takrat, ko uporabljamo računalnik.

Vsi omenjeni diagrami so dobljeni z meritvami delta-ferita v zvaru in kemične sestave istega zvara, torej v bistvu statistično. Opazovanja so tudi pokazala, da zvari pokajo predvsem pri tistih vrednostih delta-ferita, ki so nad neko mejo. Taka meja je pri *FNA* približno 6,0 za jekla brez dodatkov *Ti* in nekoliko višja pri jeklih z dodatki *Ti*.

Podobne diagrame, ki jih navadno imenujemo modificirani Schaefflerjevi diagrami, uporabljajo tudi za določanje možnosti pokanja nerjavnih jekel med ulivanjem na napravi za kontinuirno ulivanje. Tako H. Schrewe ³ navaja ekvivalenta:

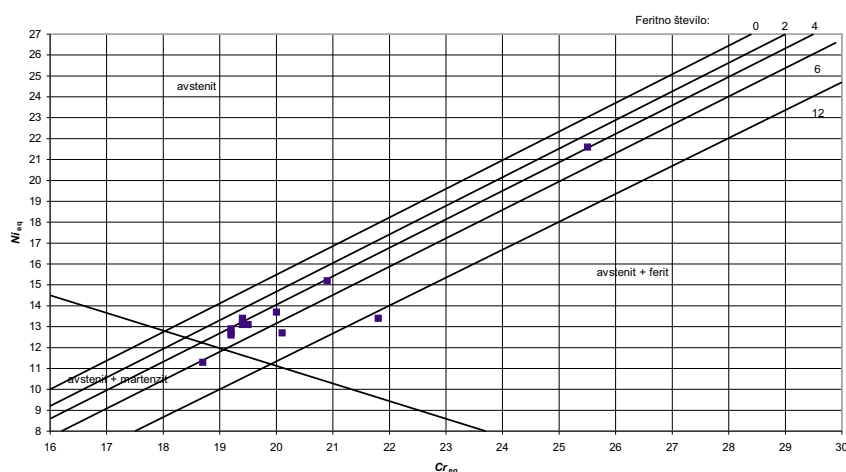
$$\begin{aligned} Cr_{eq} &= Cr + 1,37 Mo + 1,5 Si + 2 Nb + 3 Ti \\ Ni_{eq} &= Ni + 0,31 Mn + 22 C + 14,2 N + Cu \end{aligned} \quad (6)$$

Izračunamo jih iz kemične sestave jekla, ki ga ulivamo, in vrednosti upodobimo v podobnem diagramu, kot so prej navedeni. V njem pa ne opazujemo področij z danim deležem delta-ferita, temveč opazujemo le, ali vrisane točke ležijo pod premico, ki jo določa enačba $Ni_{eq}/Cr_{eq}=1/1,5$, ali nad njo. Vrste jekla oziroma šarže, pri katerih upodobljene točke ležijo pod to premico, pokajo pri ulivanju le v izjemnih primerih, druge bolj pogosto. Čim večja je vrednost Ni_{eq}/Cr_{eq} , večja je verjetnost, da jeklo med ulivanjem poka in obratno. Literatura za oceno pokanja jekla med kontinuirnim ulivanjem še bolj priporoča dvodimenzionalni diagram z vrednostjo Cr_{eq}/Ni_{eq} in vsebnostjo *P* na koordinatnih oseh. Mi smo ga praktično uporabili v članku ⁵.

Podobnih formul za izračun možnosti za pokanje toplo valjanih izdelkov ne poznamo, čeprav verjetno obstajajo.

2 UPORABA FNA ZA DOLOČANJE RAZPOK-LJIVOSTI NERJAVNE DEBELE PLOČEVINE

Omenili smo že, da je bil prvotno naš edini namen, da *FNA* uporabljamo pri izpisu atestov, to je kot oceno deleža delta-ferita v jeklu in za oceno možnosti pokanja zvarov. Ker pa naj bi med metalografskimi preiskavami razpok na debeli pločevini večkrat opazili ob razpokah povečane vsebnosti delta-ferita, smo sklepali, da so



Slika 1: Avestin (modificiran Schaefflerjev)-diagram. Vrisane točke pomenijo povprečne vrednosti ekvivalentov posameznih vrst jekla, ki smo jih v Acroniju izdelali v letu 2003. Skrajna desna točka pripada vrsti jekla Acroni 19 Si, točka pod spodnjo poševno črto vrsti jekla Acroni 11 Si, točki med spodnjima črtama vrstama jekla, ki sta stabilizirani s *Ti*, druge preostalim vrstam nerjavnih jekel.

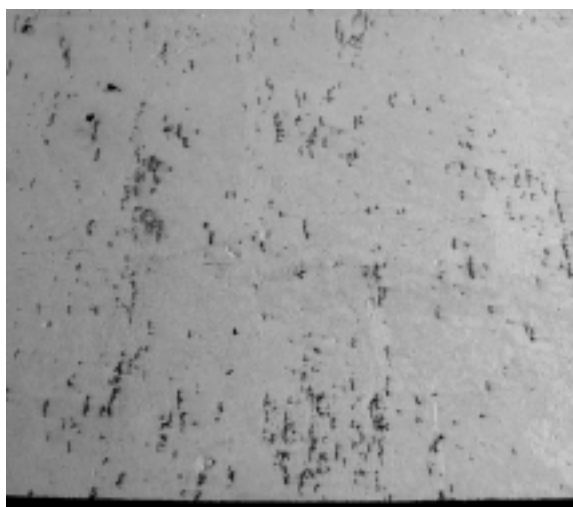
Figure 1: A diagram of Avesta (modified Schaeffler's diagram). The drawn points represent the equivalents' averages of different steel grades, manufactured in Acroni in the year 2003. The extreme right point represents the grade Acroni 19 Si, the point below the lowest inclined straight line represents the grade Acroni 11 Si, the points between the two lowest straight lines represent the grades stabilised by *Ti*, the other points represent the other grades of stainless steels.



Slika 2: Prečne robne razpoke na plošči 3317, šarže 238182, vrste jekla X5CrNi18-10 – smer valjanja →

Figure 2: Transversal edge cracks on the plate 3317, the heat 238182, the grade X5CrNi18-10, the rolling direction →

povečane vrednosti *FNA* povezane s pojavom razpok tudi na debeli pločevini, in ne samo zvarih. Ker ni nujno, da na debeli pločevini nastajajo razpoke pri isti meji *FNA* kot na zvarih, smo ob pojavih razpokic pozorno preverjali vrednosti *FNA*. Tako smo v letu 2000 ugotovili, da sta pri dveh šaržah, pri katerih je bilo precej plošč razpokanih, vrednosti *FNA* nad 10, to je precej nad 8. Zadnjo vrednost smo molče privzeli za mejo še dopustnih vrednosti za *FNA*. Spomladi leta 2001 so se na debeli pločevini iz jekla X5CrNi 18-10 precej pogosto pojavljale kratke prečne robne razpoke (**slika 2**). Feritna števila ustreznih šarž so bila malo nad 8, vendar smo tedaj našli še druge korelacije s pojavljanjem razpok. Večina plošč z razpokami je bila namreč zvaljana iz slabov, ki so bili založeni na isti strani potisne peči. Zato smo poglaviti vzrok za nastanek razpok videli v nepravilnem ogrevanju, in ne v prevelikih vrednostih *FNA*. Poleg tega smo pričakovali, da naj bi povečane vsebnosti delta-ferita v jeklu povzročale nastanek vzdolžnih razpok (**slika 3**), in ne prečnih. Sklepali smo namreč, da naj bi se med valjanjem zrna delta-ferita usmerjala v smeri valjanja in ob njih naj bi razpoke nastajale.

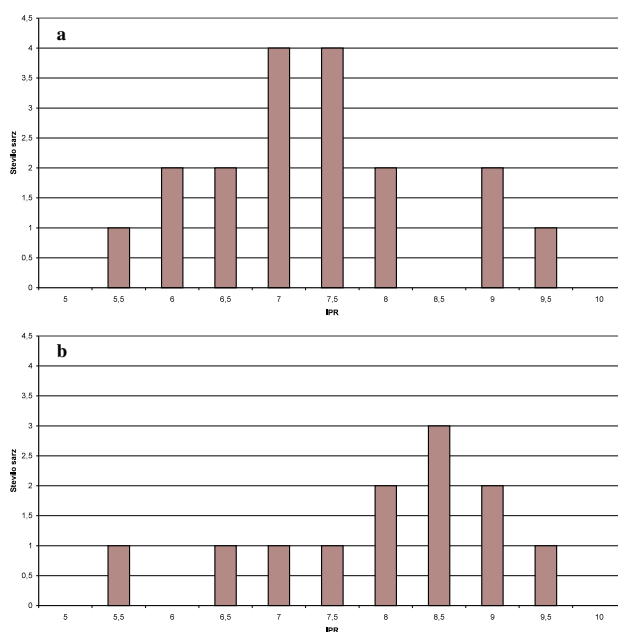


Slika 3: Vzdolžne razpoke na plošči 9051, šarže 237817, vrste jekla X2CrNiMo 17-12-3 – smer valjanja ↑

Figure 3: Longitudinal cracks on the plate 9051, the heat 237817, the grade X2CrNiMo 17-12-3, the rolling direction ↑

V začetku leta 2002 smo zaradi zanimanja kupcev izdelali nekaj šarž debele pločevine vrste jekla X2CrNi 18-9, ki je potem počasi pričela nadomeščati vrsto jekla X5CrNi 18-10. Na njej smo opazili sorazmerno veliko že omenjenih kratkih prečnih robnih razpok. *FNA* ustreznih šarž so bila pod 8, tako da iz dotedanjih izkušenj nismo mogli sklepati, da je neustrezna kemična sestava vzrok za pojav razpok. Drugih vzrokov za nastanek teh napak pa nismo našli. Šele ko smo izdelali več šarž omenjenega jekla, smo lahko napravili grobo statistično primerjavo med *FNA* šarž, pri katerih so se razpoke pojavljale, in tistih, pri katerih se niso. Porazdelitvi *FNA* obeh skupin šarž sta pokazali, da ima skupina z razpokano pločevino sorazmerno velike vrednosti *FNA*. Ker pa so bile te vrednosti v primerjavi z vrednostmi *FNA* pri šaržah iz vrst jekla X5CrNi 18-10, X2CrNi 19-11 in X2CrNiMo 17-12-2 s kratkimi prečnimi robnimi razpokami na pločevini sorazmerno majhne, smo morali preučiti tudi možnost, da v izrazih (4) vsi koeficienti niso ustrezni. Če primerjamo ta izraz s formulo (3) in tudi (6), zbode v oči sorazmerno velik koeficient pri *N* v izrazu (4). Odločili smo se, da ga znižamo, in sicer na vrednost 20. Nov koeficient smo zaradi značilnih napak, ki so z njim povezane, pozneje imenovali *IPR* (indeks prečne razpokljivosti). Zaradi zanimivosti porazdelitve *IPR* za omenjeni dve skupini pločevine s prečnimi robnimi razpokami in brez njih prikazujemo na **sliki 4** (vzeta iz ⁴). Iz razlike obeh modusov *IPR*, ki nista izrazita, smo tedaj sklepali tako, kot navajamo v naslednjem odstavku.

IPR se pri jeklih z manjšimi vsebnosti *N* malo razlikuje od *FNA*, pri večjih vsebnostih *N* pa precej. Zato so se tudi pri pločevini iz jekla X2CrNi 18-9 prečne



Slika 4: Porazdelitev *IPR*. Zgoraj skupina šarž brez razpok na pločevini, spodaj skupina šarž z razpokami

Figure 4: The *IPR*'s distribution. No cracks appeared on the plates in the upper group of heats but there were many in the lower group.

robne razpoke pojavile le pri večjih vrednostih IPR , in sicer podobnih kot pri pločevini iz jekla X5CrNi 18-10 ali X2CrNiMo 17-12-2. Pojav robnih prečnih razpok pri pločevini iz jekla X2CrNi 18-9 smo torej lahko pričeli odpravljati z zmanjšanjem IPR oziroma FNA . To pa smo lahko najceneje storili z vpihovanjem večjih količin N v jeklo. Prečne robne razpoke bi morale izginiti. Dve šarži jekla X2CrNi 18-9, ki smo ju izdelali s povečano vsebnostjo N , sta dali vzpodbudne rezultate. Na ploščah ni bilo omenjenih razpok. Ker je od ulitja do izdelave debele pločevine, ko smo si učinke ukrepa lahko ogledali, minilo kar precej časa, smo medtem izdelali nekaj šarž po starem predpisu. Razpoke so se spet pojavile. Zaradi tega in drugih napak, ki so se v večji količini pojavile v tem obdobju, smo hitro ukrepali in predpisali povečano vsebnost N v tem jeklu. Predpisane vrednosti FNA smo malo pozneje v vseh jeklih, ki niso stabilizirana s Ti , omejili pod 6, pri vrsti jekla X2CrNi 18-9 pa še malo pod to mejo. Omejitvev za izdelavo nismo hoteli predpisati pri vrednosti IPR , ker so izdelovalci jekla na napravi za vakuumsko oksidacijo in dezoksidacijo taline (VOD) navajeni na izračun in uporabo FNA . Za kontrolo pa tehnologi in raziskovalci vzporedno uporabljamo obe vrednosti. Od uvedbe teh predpisov dalje je pojav prečnih robnih razpok na debeli pločevini izredno redek, praktično zanemarljiv.

Tedaj smo ugotovili tudi, da so bile prevelike vrednosti IPR in FNA eden od vzrokov za nastanek prečnih robnih razpok spomladi leta 2001 in da so bile razpoke na debeli pločevini omenjenih dveh šarž iz leta 2000 prav tako robne prečne. Oboje potrjuje, da je pojav kratkih prečnih robnih razpok povezan s prevelikimi vrednostmi FNA oziroma IPR . Povezanosti z vzdolžnimi razpokicami, ki naj bi nastajale med valjanjem na zrnih delta-ferita, pa nismo potrdili. Zato je zelo verjetno, da delta-ferit, če ga je v jeklu le nekaj odstotkov, ni pomemben vzrok za nastanek niti prečnih niti vzdolžnih razpok na debeli pločevini. Prečne razpoke nastanejo namreč med valjanjem zaradi tega, ker sile valjanja presežejo natezno trdnost valjanca. FNA in IPR sta torej povezana poleg vsebnosti delta-ferita v zvaru tudi z natezno trdnostjo jekla in prek nje z nastankom prečnih robnih razpok na pločevini.

Podobno kot FNA so seveda tudi druge vrednosti delta-ferita, ki jih preberemo v diagramih od (1) do (6), povezane z nastankom prečnih robnih razpok med vročim valjanjem. Nismo pa ugotavljali, katera najmočneje. Najbolj ugodna bi bila morda uporaba izboljšane formule za izračun IPR . Verjetno pa bi bila potrebna precejšnja izboljšava tudi te.

3 POSKUS IZPELJAVE IZRAZOV ZA IZRAČUN EKVIVALENTOV NA SPEKULATIVEN NAČIN

Znano je ^{6,7}, da čisto železo kristalizira v oblikah alfa, gama in delta. Najmanjši gradnik kristala železa je kocka, ki ima v ogljikih atome železa. Osnovna kocka

kristala alfa ima dodatno še en atom železa v presečišču telesnih diagonal kocke, osnovna kocka kristala gama pa šest atomov železa v presečiščih diagonal ploskvic kocke. V kakšni obliki se železo pojavlja, je odvisno od njegove temperature. Pod temperaturo 906 °C se pojavlja v obliki alfa in ga imenujemo ferit, pri temperaturah od 906 °C do 1401 °C v obliki gama in ga imenujemo avstenit. Nad temperaturo 1401 °C do temperature taljenja se spet pojavlja v alfa obliki in ga imenujemo delta-ferit.

Če pa so v železu tudi atomi drugih kemičnih elementov, le-ti pomembno vplivajo na obliko najmanjših kockic železa. Vanje se ugnezdijo na dva načina: v kockah zamenjajo atome železa, kar imenujemo substitucijsko obliko ugnezdenja, ali pa se vrinejo med dva sosednja atoma železa, to je intersticijsko. Substitucija se pogosto pojavlja takrat, ko v železo dodajamo atome drugih kovin, intersticija navadno ob dodajanju elementov, ki so v normalnih razmerah plini, kot sta npr. C in N . Atomi različnih elementov različno zavirajo prehode osnovnih kockic iz ene oblike v drugo. Glede na to kemične elemente razvrstimo v ferito- in avstenitotvorne. Vrinjen atom C npr. močno zavira prehod kockice iz oblike gama v alfa, tako da ta obstaja v obliki gama pri nižjih temperaturah, kot bi obstajala, če v njej ne bi bilo atoma C . Zato element C imenujemo avstenitotvoren.

Kockice, ki vsebujejo različne feritotvorne atome, naj bi si bile zelo podobne, zato naj bi imele podobne metalografske in fizikalne lastnosti, ne glede na to, kateri feritotvorni atom bi zamenjal atom železa. Ker so koncentracije feritotvornih elementov razen Cr majhne, bo zelo verjetno atom feritotvornega elementa v kockici zamenjal le en atom železa. Zato lahko predpostavimo, da bodo jekla z istim številom kockic, ne glede na to, kateri elementi naj bi nadomeščali železo, imela približno enake fizikalne lastnosti. Podobno naj bi bilo pri avstenitotvornih elementih, le da tam atomi ne samo zamenjujejo atome železa, ampak se tudi mednje vrivajo. Če domneva drži, lahko koeficiente v Cr_{eq} in tudi Ni_{eq} izračunamo. V primeru feritotvornih elementov je število omenjenih kock enako vsoti števila kock, v katerih je atom katerega koli feritotvornega elementa zamenjal atom železa. Tako lahko zapišemo:

$$N(\text{skupno}) = N(Cr) + N(X_1) + \dots + N(X_i) \quad (7)$$

N tu pomeni število kockic z atomi elementa, ki je zapisan v oklepaju, na mestu atoma železa.

Število kockic $N(X)$, ki imajo element X namesto atoma železa, je sorazmerno kvocientu odstotka mase elementa X v jeklu z njegovo atomsko maso. Zato iz (7) dobimo:

$$N(\text{skupno}) = k Cr/m_a(Cr) + k X_1/m_a(X_1) + \dots + k X_i/m_a(X_i) \quad (8)$$

Ker v izrazu za Cr_{eq} koeficientu pri Cr vedno pripišemo vrednost 1, moramo člene v (8) deliti s $k/m_a(Cr)$. Tako dobimo:

$$N(\text{skupno})/(k/m_a(Cr)) = Cr + X_1 m_a(Cr)/m_a(X_1) + \dots + X_i m_a(Cr)/m_a(X_i) \quad (9)$$

Izraz na desni je očitno Cr_{eq} , izrazi $m_a(Cr)/m_a(X_j)$ pa koeficienti v izrazu za Cr_{eq} . Dobimo jih torej tako, da atomsko maso Cr delimo z atomsko maso ustreznega elementa. Če upoštevamo, da so vplivni le elementi, ki nastopajo v izrazu (4), dobimo 'teoretični' ekvivalent:

$$Cr_{eq} = Cr + 1,9 Si + 0,5 Mo + 1,1 Ti + 0,6 Nb \quad (10)$$

Izraz se razlikuje od navedenih formul za izračun Cr_{eq} v ustreznih izrazih od (1) do (7). Izračunani koeficient pri Si je malo prevelik, koeficienta pri Mo in Ti pa premajhna. Razlike niso pretirano velike.

S podobnim razmišljanjem je možno izračunati tudi Ni_{eq} . Vendar je ob tem odprto vprašanje, ali lahko primerjamo med seboj koeficiente pri substitucijskih in intersticijskih elementih. Atomi iz teh dveh skupin se namreč ne morejo zamenjavati med seboj, kot se lahko atomi elementov iz iste skupine. Kljub temu navedimo še Ni_{eq} , ki ga dobimo s podobnim razmišljanjem kot izraz (10), pozneje pa bomo rezultat izpostavili kritiki:

$$Ni_{eq} = Ni + 4,9 C + 4,2 N + 1,1 Mn + 0,9 Cu + 1,0 Co \quad (11)$$

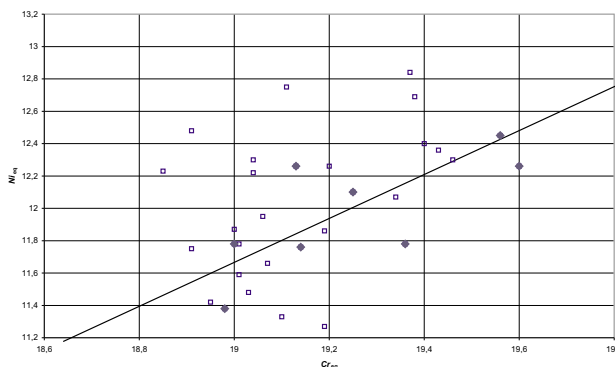
Izraz se močno razlikuje od izraza (4) predvsem v koeficientih pri C in N , ki sta v (11) približno petkrat premajhna, ostali koeficienti pa so približno dvakrat preveliki. Koeficient pri C je večji, kot je koeficient pri N . Podobno je v formuli WRC-1992 in tudi našem *IPR*. Dobljeni rezultat je torej zelo slab pri intersticijskih elementih, kar smo tudi pričakovali, in sprejemljiv pri substitucijskih. Slednje je nekako razumljivo, saj je tudi element Ni , ki ga zamenjujejo, substitucijski. Gre torej za možno zamenjavo, medtem ko C in N lahko zamenjata le eden drugega, nikakor pa ne Ni ali drugih substitucijskih elementov. Ker ne vemo, kako vplivajo na fizikalne lastnosti jekla atomi iz obeh skupin, je edino korektno, da formulo (11) zapišemo v obliki:

$$Ni_{eq} = K(4,9 C + 4,2 N) + (Ni + 1,1 Mn + 0,9 Cu + 1,0 Co) \quad (12)$$

Koeficient K je v njej neznan. Določimo ga lahko z meritvami in risanjem diagramov, kakršne je delal Schaeffler, pri različnih vrednostih K . Izbrali bi tistega, ki bi dal najboljši rezultat. Ker verjamemo rezultatom, ki smo jih navedli v uvodu, lahko vzamemo, da dobimo koeficiente, ki so vsaj malo podobni koeficientom v (4), za K vrednost 4,0. Če koeficienta pri C in N zaokrožimo na dve mesti, dobimo:

$$Ni_{eq} = Ni + 20 C + 17 N + 1,1 Mn + 0,9 Cu + 1,0 Co \quad (12a)$$

Da bi preverili uporabnost 'teoretičnih' izrazov (10) in (12a), smo približno iz istih podatkov, kot smo jih upodobili v **sliki 4**, najprej izračunali razliko vrednosti Cr_{eq} , ki jih dobimo s formulama (4) in (10). Razlike ležijo v mejah od 0,0 do 0,2, modus je pri 0,1. Razlike so torej majhne. Potem smo iz istih podatkov izračunali

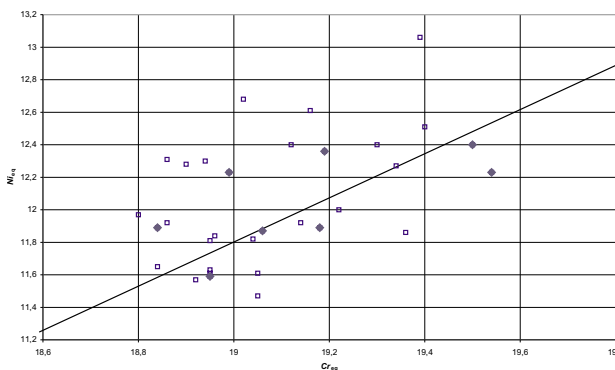


Slika 5: Avestin-diagram. Vrisani so ekvivalenti približno istih šarž, kot so na sliki 4. Šarže, pri katerih so bile na pločevini prečne robne razpoke, so narisane z zavrtimi kvadrati, druge z nepolnimi kvadrati.

Figure 5: Avesta diagram. Equivalents of nearly the same heats as in figure 4 are represented. The heats with transversal edge cracks on the plates are drawn as small, rotated squares, the others as small empty squares.

razlike Ni_{eq} , ki jih dobimo s formulama (4) in (12a). Večina teh razlik leži med $-0,1$ in $0,2$, modus je grobo vzeto pri $0,05$. Štiri vrednosti so manjše od $-0,1$ in ena večja od $0,2$. Te razlike so pričakovano nekoliko večje kot prejšnje zaradi razlik v koeficientih pri C in N . Končno smo vrednosti obeh ekvivalentov upodobili v dveh ustreznih diagramih, prve v Avestinem (**slika 5**), v drugem pa vrednosti, ki jih dobimo s formulama (10) in (12a) (**slika 6**). Šarže s pločevino, na kateri so bile prečne razpoke, smo v obeh diagramih narisali kot zavrtene kvadratke, šarže s pločevino brez napak pa kot nepolne kvadratke. Velikih razlik med diagramoma ni. Če pa namesto (12a) uporabimo izraz (11), je razlika velika, vendar tudi v tem primeru upodobitve šarž z razpokano pločevino večinoma ležijo pod neko premico.

Če napravimo še eno predpostavko, lahko formulo (12a) tudi izpeljemo. Predpostavimo, da pri prehodu iz oblike gama v obliko alfa atom substitucijskega elementa preide v sečišče telesne diagonale osnovne kocke, torej vsaki kocki pripada največ eden. Atom intersticijskega elementa pa po prehodu ostane na robu kocke



Slika 6: Diagram, v katerem smo upodobili izračunana ekvivalenta. Uporabljeni podatki so isti kot na **sliki 5**, prav tako znaki.

Figure 6: The diagram in which calculated equivalents are represented. The heats' data and the signs are the same as in **Figure 5**.

med dvema atomoma železa, ki sta v ogljiščih kocke. Intersticijski atom torej hkrati leži v štirih sosednjih kockah in v vseh zavira fazno spremembo. Vpliv enega intersticijskega atoma je torej v primerjavi s substitucijskim štirikraten. S tem je razložen štirikraten vpliv intersticijskih elementov C in N , kot smo ga privzeli v formuli (12a).

Oglejmo si še, katere predpostavke zagotovijo linearnost (to je hkratna aditivnost in homogenost) izrazov za oba ekvivalenta v formulah od (1) do (7). Aditivnost pomeni, da vsak feritotvorni element povzroča nastanek določene količine delta-ferita in da je skupna količina nastalega delta-ferita vsota teh delnih količin. Podobno vplivajo avstenitotvorni elementi, ki pa nastanek zavirajo. Oboje je možno, če elementi drug drugega pri tem ne ovirajo ali vzpodbujajo. Če bi se dogajalo to, bi v izrazih nastopali tudi produkti deležev vsaj dveh elementov, kot npr. $Cr \cdot Mo$ ali $Ni \cdot Cu \cdot Co$. Homogenost v formulah pomeni le to, da bo dvakrat večja količina elementa podvojila delež delta-ferita v primerjavi z deležem, ki ga povzroča prvotna količina tega elementa.

Obe zahtevi sta vključeni v našo prvo predpostavko. Ta dodatno zahteva, da ferit tvorijo posamezne elementarne kockice, ne glede na to, kateri substitucijski element je nadomestil atom železa, ali kateri intersticijski element se je vrnil med atoma železa. To implicitno pomeni, da različni atomi enako zavirajo prehode kock iz ene oblike v drugo. Zahteva je precej huda. Delno smo jo omilili z drugo predpostavko, da intersticijski elementi hkrati zavirajo prehod v štirih kockah, v katerih ležijo, medtem ko substitucijski elementi le v eni. Dejansko verjetno različni feritotvorni elementi različno zavirajo prehode, podobno avstenitotvorni. Zato bi pri vsakem morali pridati neki faktor, ki to upošteva. Tako ne moremo trditi, da sta naši formuli (10) in (12a) točni. Zanimivo pa je, da se od statistično dobljenih veliko ne razlikujeta. Koeficienti zaviranja, ki smo jih omenili, torej niso veliki. Enostavno jih dobimo tako, da koeficient v formuli (4) delimo z ustreznim koeficientom v naših formulah. Za Mn tako dobimo 0,45. To je tudi najmanjši koeficient zaviranja, medtem ko je največji pri Mo , in sicer 2,0. Oboje pove, da so vsi koeficienti v obeh formulah od dvakrat premajhni do dvakrat preveliki, seveda ob predpostavki, da so koeficienti v formulah (4) pravilni. Rezultat pomeni, da smo se z našimi predpostavkami kar dobro približali pravemu dogajanju ob faznih spremembah jekla.

Če v praksi uporabljamo izraza (10) in (12a) tudi za izračun verjetnosti pokanja toplo valjane pločevine namesto FNA , smo lahko dovolj uspešni (primerjaj **sliki 5 in 6**). Le ustrezne meje moramo določiti.

4 SKLEPI

1. Vrednosti FNA , ki jih izračunamo z izrazi (5), so dokaj močno korelirane s pojavom kratkih prečnih robnih razpok na nerjavni debeli pločevini. Razpoke se pogosto pojavljajo, ko so vrednosti FNA velike. Zato morajo pri izdelavi jekla na napravi za vakuumsko oksidacijo in dezoksidacijo taline (VOD) paziti, da so FNA šarž pod predpisano mejo. Meje se pri različnih vrstah jekla nekoliko razlikujejo. Če bi želeli predpisane meje približno poenotiti, bi morali namesto FNA uporabiti IPR , to je formulo s popravljenim koeficientom pri elementu N .
2. Vrednosti FNA , ki jih izračunamo z izrazi (5), so le malo povezane s pojavom kratkih vzdolžnih razpok na nerjavni debeli pločevini. Povezanost je premajhna, da bi lahko z omejevanjem FNA praktično odpravili pojav teh razpok.
3. Namesto vrednosti FNA bi lahko uporabljali tudi Schaefflerjev, DeLongov, WRC-1988, WRC-1992, Avestin ali kak podoben diagram. Seveda pa so meje za preprečevanje pokanja nerjavne debele pločevine pri uporabi različnih diagramov različne, prav tako zanesljivost preprečevanja pokanja.
4. Predolgo ogrevanje slabov v potisni peči močno pospešuje nastanek kratkih prečnih robnih razpok in predvsem vzdolžnih razpok na nerjavni debeli pločevini. To se navadno zgodi ob daljših zastojih in včasih na začetku valjanja debele pločevine.
5. Formuli (10) in (12a), ki smo ju dobili le s spekulativnim razmišljanjem, se veliko ne razlikujeta od tistih, ki so jih dobili z meritvami in statističnimi obdelavami. Zato je slika dogajanj v osnovnih kockicah kristalov železa, ki smo jo pri izpeljavi formul predpostavili, lahko vsaj iztočnica za resnejše ugotovitve, kot je pričujoča.

5 LITERATURA

- ¹ ASM International: Stainless Steels, 1996, 340
- ² Avesta Sheffield: Stainless Steel from Avesta Sheffield, Steel grades, properties and global standards, Sheffield 1997, 7
- ³ H. Schrewe: Continuous Casting of Steel, Stahl und Eisen, Duesseldorf 1989, 164
- ⁴ C. Pohar, M. Klinar: Zmanjšanje števila površinskih napak na nerjavni DPL, predvsem kratkih vzdolžnih razpok, Jesenice 2002
- ⁵ A. Kosmač, C. Pohar: Specifičnosti izdelave ognjevzdržnega jekla Acroni 19 Si, Materiali in tehnologije 36 (2002) 5, 265
- ⁶ D. Seferian: The Metallurgy of Welding, Chapman and Hall, London 1962, 27
- ⁷ Metalurški priročnik, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1972, 63