

Vpliv kemijske sestave na lastnosti jekel za verige po toplotni obdelavi

Influence of Chemical Composition on Properties of Steel for Chains after Heat Treatment

A. Rodič, J. Žvokelj, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana*
in

F. Legat, S. Krivec, *Veriga Lesce, Lesce*

Članek obravnava vpliv kemijske sestave jekla 20NiCrMo3 na kaljivost, popuščno obstojnost in mehanske lastnosti.

Če je večina legirnih elementov na spodnji predpisani meji legiranosti ni močno doseči vse lastnosti, ki jih predpisujejo razni standardi.

The paper is concerned with the influence of chemical composition on hardenability tempering resistance and mechanical properties of the steel grade 20NiCrMo3 for chains.

It is difficult to assure properties of steel, prescribed with standards, when majority of alloying elements approach to the lower limit although contents of all elements remain within prescribed tolerances.

1 Uvod

V prispevku želimo na primeru jekla 20NiCrMo3 za verige prikazati in pojasniti odvisnost zagotavljanja optimalnih uporabnih lastnosti od kemijske sestave jekla v standardnem tehnološkem procesu industrijske proizvodnje.

Izredno pomembno je poznavanje vseh medsebojnih vplivov: vsebnosti legirnih elementov, izdelave, predelave, toplotne obdelave jekla in kinetike razvoja mikrostrukture na kakovost izdelka. S spoznavanjem teh vplivov lahko učinkovito izkoristimo vse možnosti modernih naprav in računalniško vodenih tehnologij v proizvodnji jekla. Možnosti, ki jih prinaša računalniško krmiljenje tehnoloških procesov, lahko načrtovalca tehnologije in jeklarja kaj hitro zavedejo v smer splošnega zniževanja vsebnosti legirnih elementov, z namenom izboljševanja ekonomike v proizvodnji. Prav dobro moramo obvladovati poznavanje vplivov in posledic vsebnosti elementov kemijske sestave, če hočemo že v jeklarni ustrezno zagotavljati kakovost kasnejših izdelkov. Z neustreznimi odnosi elementov kemijskih sestav jekla, četudi znotraj predpisanih mej, ki postajajo za moderno tehnologijo razmeroma široke, lahko močno zgrešimo pričakovane ali zahtevane lastnosti proizvodov.

Če se danes raziskovalci z vso vnemo usmerjajo k novim materialom in novim tehnologijam, tudi raziskav klasičnih tradicionalnih proizvodov ne smemo zanemarjati, saj nove možnosti tudi v klasični tehnologiji zahtevajo nove raziskovalne pristope in specifične posege.

2 OPREDELITEV PROBLEMA

Jeklo 20NiCrMo3 sodi v skupino nizkolegiranih jekel za poboljšanje z nizko vsebnostjo ogljika. Uporabljajo ga za verige različnih dimenzij, oblik in kakovostnih razredov.

Že več kot desetletje je to jeklo standardizirano po DIN, UNI, ISO in drugih predpisih. Različne norme predpisujejo v glavnem enako kemijsko sestavo in tudi lastnosti, ki jih

mora jeklo zanesljivo dosegati po predpisani—standardni toplotni obdelavi. Zanimive so ugotovitve zadnjih let, da imajo potrošniki jekla vse več problemov z zagotavljanjem predpisanih lastnosti po standardih, čeprav je kemijska sestava jekla povsem v predpisanih mejah.

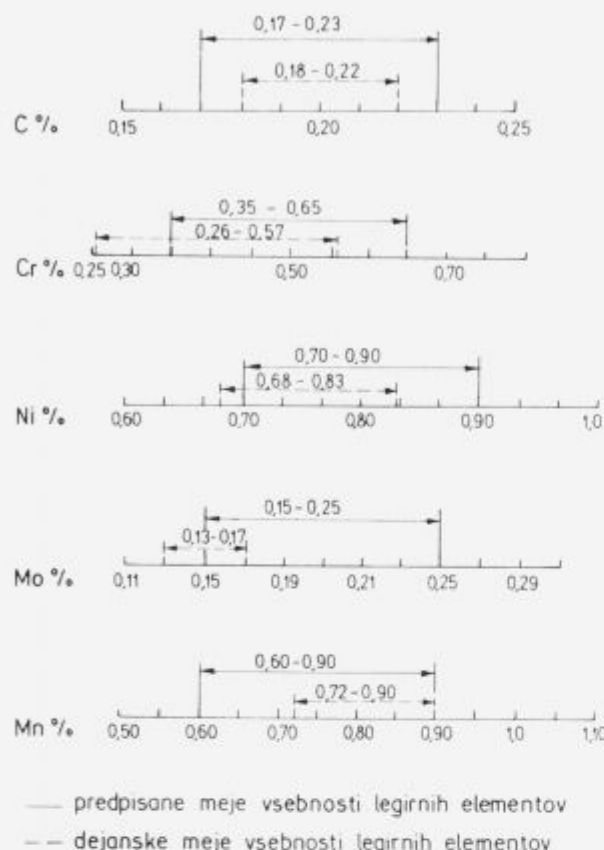
Jeklo danes proizvajamo v sodobnih pečeh z modernimi napravami za sekundarno metalurgijo in z računalniško podprtim krmiljenjem tehnologije. Vse to omogoča zoževanje statističnega trosenja vsebnosti posameznih legirnih elementov v mejah kemijske sestave in odpira možnost pomembnega premikanja ciljanih vsebnosti elementov znotraj s standardom predpisanih mej.

Te možnosti jeklarji, ki ne razmišljajo o lastnostih končnega proizvoda, prav radi izkoristijo za svojo ekonomiko, kar je tudi povsem razumljivo. Prihranki, doseženi s splošnim "na spodnjo mejo", so v velikih jeklarskih pečeh zelo veliki in ekonomsko izredno vabljivi. Ob tem pa se lastnosti izdelkov iz teh jekel močno oddaljujejo od pričakovanih. Nekontrolirano izkoriščanje teh, z razvojem danih možnosti, kaže na odsotnost informacijskega sistema in organizacije integralnega krmiljenja kakovosti.

3 UGOTOVITEV STANJA

3.1 Kemijska sestava

Z analizo porazdelitve smo za 63 uporabljenih šarž jekla 20NiCrMo3 primerjali ugotovljene vsebnosti posameznih elementov s predpisanimi mejami po standardu. Na sliki 1 prikazujemo samo primerjavo dejanskih območij vsebnosti elementov s predpisanimi. Vsebnosti ogljika so lepo centrirane v sredino. Vsebnosti kroma, niklja in posebno molibdena so v spodnjem delu zahtevanega območja in celo pod spodnjo dopustno mejo. Porazdelitev vsebnosti mangana pa je pomaknjena do zgornje dopustne meje.



Slika 1. Širine trosenja vsebnosti legirnih elementov za 63 talin jekla 20NiCrMo3.

Figure 1. Scattering ranges of alloying elements for 63 heats of steel grade 20NiCrMo3.

3.2 Kaljivost in popustna obstojnost

Z normami je predpisan Jominy pas kaljivosti¹ za temperaturo avstenitizacije 880°C, ki je tudi v proizvodni tehnologiji najprimernejša za kaljenje verig.

Na sliki 2 je prikazan Jominy pas garantirane kaljivosti za jeklo 20NiCrMo3, v katerem je vrisana Jominy krivulja šarže s podano sestavo. Jominy krivulja leži blizu spodnje meje pasu kaljivosti, kar je ob kemijski sestavi tudi razumljivo. Četudi je kaljivost še v mejah, so z njo povezane uporabne lastnosti pod povprečjem.

Popustni obstojnosti jekla pri ugotavljanju ustrezne kemijske sestave sploh ne posvečamo pozornosti, vendar vemo, da je vpliv posameznih kemijskih elementov zelo velik, in da s kaljivostjo samo ne moremo zagotavljati mehanskih lastnosti, če je karakteristična popustna obstojnost jekla zaradi sestave neustrezna.

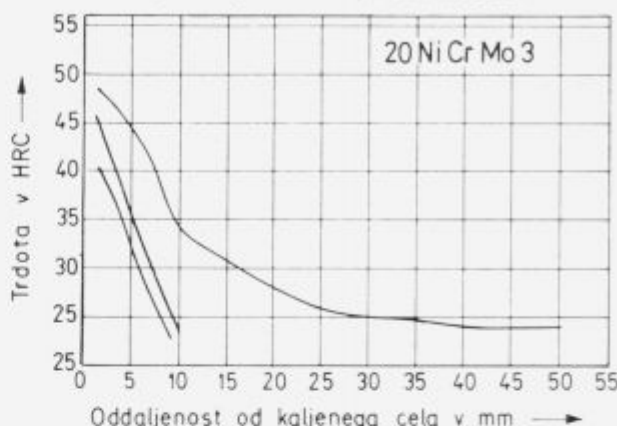
3.3 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti jekla 20NiCrMo3 po končni toplotni obdelavi s kaljenjem in popuščanjem so močno odvisne od osnovne mikrostrukture po kaljenju in od popustnih efektov.

Pri kontroli jekla za verige je z normami zahtevana natezna trdnost $R_m = \min .1180 \text{ N/mm}^2$, $R_e = \min .980 \text{ N/mm}^2$, raztezek $A = \min .10\%$, kontrakcija $Z = \min .50\%$, žilavostno delo je min. 40 J. Te lastnosti mora

Vsebnost legirnih elementov v ut %

C = 0,22 Si = 0,21 Mn = 0,74 Cr = 0,40 Ni = 0,75
 Mo = 0,17. Kaljeno s temperature 880°C



Slika 2. Jominy pas kaljivosti jekla 20NiCrMo3 z vrisano Jominy krivuljo in sestavo podano ob sliki.

Figure 2. Jominy hardenability band of steel grade 20NiCrMo3 with a Jominy curve of a heat with given composition.

imeti jeklo po kaljenju v vodi s temperaturo 880°C in 1 urnim popuščanjem na 420°C.

Ta zahteva standardov predstavlja v proizvodnji verig večje težave, kot bi jih od tovrstnega jekla s povprečno sestavo v predpisanih mejah pričakovali.

4 RAZPRAVA, POJASNILA IN UGOTOVITVE

S celovito raziskavo smo pojasnili vplive variacij kemijske sestave jekla 20NiCrMo3 na mehanske lastnosti po končni toplotni obdelavi s pomočjo sistematičnega preizkušanja kaljivosti, popustne obstojnosti in metalografskih analiz mikrostrukture po kaljenju in popuščanju.

S kaljivostjo označujemo sposobnost jekla, da pri hitrem ohlajanju iz avstenitnega območja zadrži avstenit do martenzitne ali do bainitno martenzitne premene.

Na kaljivost jekla vplivajo:

- legirni elementi
- temperatura in čas avstenitizacije
- velikost avstenitnega zrna
- ohlajevalna hitrost

Pri standardiziranem preizkušanju kaljivosti po Jominyjevi metodi so parametri avstenitizacije s temperaturo, časom in načinom ohlajanja predpisani—torej konstantni.

Ohlajevalna hitrost je vzdolž Jominy preizkušanca različna in sicer od tiste, ki na čelu probe ustreza intenzivnemu ohlajanju v vodi, do tiste pri glavi probe, ki ustreza ohlajanju na mirujočem zraku.

Vplivni spremenljivki sta torej velikost avstenitnega zrna, predvsem pa vsebnost legirnih elementov. Pri jeklu 20NiCrMo3 lahko velikost zrna smatramo za konstanto, kar utemeljujemo z naslednjim:

standard predpisuje vsebnost aluminija od 0.020 do 0.050% in dušika maks. 0.012%, ki zagotavljata drobno zrna na temperaturi kaljenja tudi v primeru, če je vsebnost aluminija

na spodnji predpisani meji. AlN zavira migracijo mej, kar je zelo pomembno posebno pri varjenju verig.

Za preverjanje zanesljivosti teh trditvev smo s posebno serijo poizkusov spremljali kinetiko rasti avstenitnega zrna v temperaturnem območju od 800°C do 1050°C in s časi avstenitacije od 30 minut do 2 uri. Pod vplivom temperature in časa držanja na temperaturi se je velikost zrna spreminjala od velikosti 9 do 7.5 po ASTM primerjalni tabeli. Tako majhne razlike v velikosti avstenitnega zrna ne izražajo zaznavnega vpliva na kaljivost jekla. Jominy vzorci, kaljeni s temperatur 850, 900 in 950°C, so imeli na posameznih oddaljenostih od kaljenega čela razlike trdot največ 0.5 HRC.

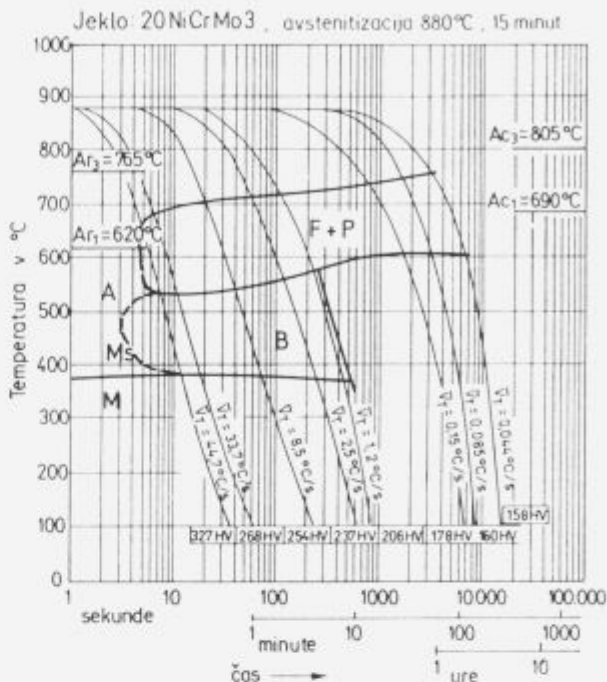
V ozkem območju normalnih temperatur avstenitacije in posebno ob standardizirani temperaturi avstenitacije 880°C lahko torej vpliv velikosti avstenitnega zrna na kaljivost zanemarimo.

Pri analizah kaljivosti na osnovi rezultatov Jominyjevih preizkusov se torej lahko omejimo samo na vpliv kemijske sestave.

Širina Jominy pasu na posameznih oddaljenostih od kaljenega čela preizkušanca ponazarja vplive legirnih elementov znotraj predpisanih mej.

Z matematično statistično obdelavo velikega števila Jominy krivulj pridemo do jakostnega vpliva posameznega legirnega elementa na posameznih oddaljenostih od kaljenega čela.

Jakostni vpliv legirnih elementov je shematsko prikazan na sliki 3².



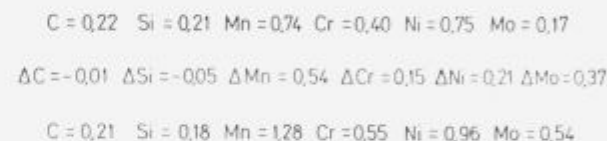
Slika 3. Shematski prikaz vpliva legirnih elementov na kaljivost jekel.

Figure 3. Schematically presented influences of alloying elements on hardenability.

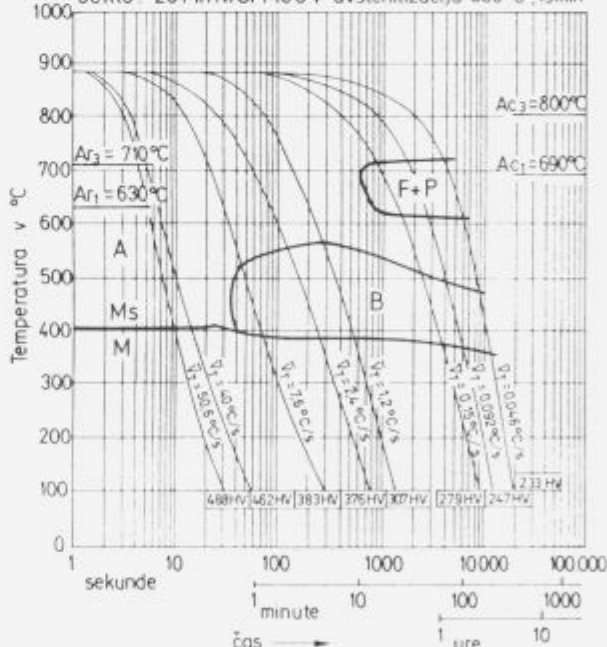
S statistično analizo regresije lahko dokaj dobro kvantificiramo jakostne vplive posameznih legirnih elementov za posamezne oddaljenosti od kaljenega čela.

Regresijske enačbe, vgrajene v računalniški sistem jeklane, dajejo neposredne napovedi tehnologu v obliki računalniškega dialoga.

Iz Jominy krivulj ali pasov lahko s pomočjo Wyssovih³ nomogramov napovedujemo trdoto gotovih izdelkov različnih dimenzij na površini, v sredini ali po preseku. Za



Jeklo: 20NiCrMo3, avstenitacija 880°C, 15 minut



Slika 4. Vpliv legirnih elementov na kinetiko premera pri kontinuirnem ohlajanju.

Figure 4. Influence of alloying elements on transformation kinetics at continuous cooling.

jeklo 20NiCrMo20 smo izbrali vzorca s premeroma 7 in 25 mm, ki predstavljata mejni dimenziji za verige iz tega jekla.

Glede na vsebnost legirnih elementov lahko na palici s premerom 7 mm po kaljenju s temperature 880°C v olju pričakujemo trdote 40–48 HRC, kar ustreza trdotam v oddaljenosti 2 mm od kaljenega čela Jominy vzorca. Pri premeru 25 mm pa pričakujemo trdote 32–44 HRC, ki ustrezajo oddaljenosti 5 mm od kaljenega čela, kar označujemo z J_5 mm.

Vpliv ohlajevalne hitrosti na kinetiko premen najbolj nazorno prikazujemo s TTT diagramom. Slika 4 prikazuje kontinuirni TTT diagram, katerega sestava je navedena med diagramoma. Vsi legirni elementi so v spodnji polovici predpisanih mej, razen ogljika. Samo za prikaz vpliva legirnih elementov na kinetiko premen pri kontinuirnem ohlajanju prikazujemo na spodnjem delu slike 4 TTT diagram za jeklo 23MnNiCrMo54. Med obema diagramoma so navedene razlike v vsebnosti posameznih legirnih elementov. Elementi Ni, Cr, Mo in Mn vplivajo na kinetiko premen tako, da pomikajo perlitno in bainitno stopnjo v desno k daljšim časom, obenem pa ločujejo perlitno stopnjo od bainitne. S tem elementi povečujejo kaljivost, kar pomeni, da lahko še pri manjših ohlajevalnih hitrostih preprečimo premeno v perlitno stopnjo in dosežemo manjše deleže bainita v mikrostrukturi martenzita.

Popustna obstojnost predstavlja odpornost jekla določene sestave proti "mehčanju" pri določenem času držanja na določeni temperaturi popuščenja.

Popustni efekti neposredno in zelo pomembno vplivajo na doseganje mehanskih lastnosti. Potekajo v štirih fazah oz. v štirih temperaturnih območjih, ki so odvisna od mikrostrukture, vsebnosti legirnih elementov in od časa zadrževanja na določeni temperaturi. Iz literature³ smo vzeli štiri diagrame o vplivu legirnih elementov na prirastek trdote po enournem popuščenju čistega martenzita na določenih temperaturah popuščenja (slika 5). Prirastki trdot se prištevajo dobljenim trdotam ogljikovega jekla, popuščanega na istih temperaturah.

Na osnovi statističnih obdelav velikega števila eksperimentalnih popustnih krivulj sta Pousot in Mayner⁵ razvila enačbo, ki z zadovoljivo natančnostjo predvideva trdote po enournem popuščenju martenzita med 400 in 600°C:

$$HV = 67 - 755C + 47Si - 156Mn + 5Ni + 37Cr - 470Mo + (91 + 852C + 136Mn - 11Cr + 528Mo) \frac{10^3}{P}$$

P = parameter popuščenja

$1/P = 1/T - 0.043 \log t/t_0$

$T = K$

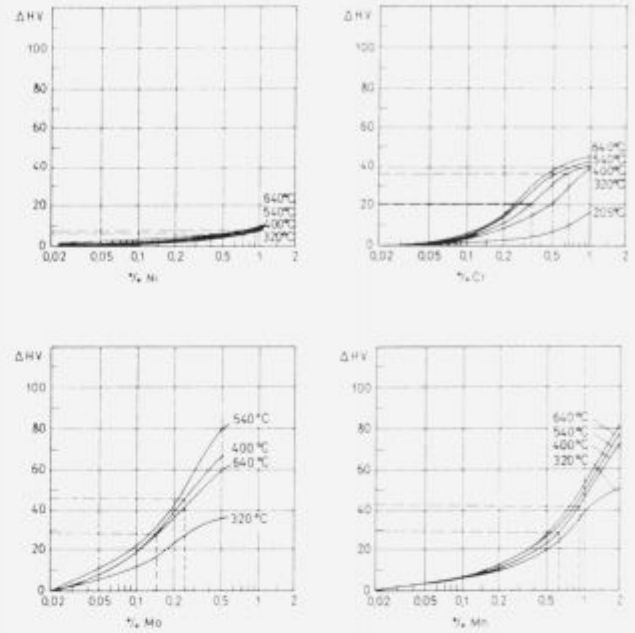
$t =$ čas v urah

$t_0 = 1$ ura

Pri naših raziskavah smo preverjali uporabnost enačbe in ocenili smo jo kot zadovoljivo. Pri tem pa je treba pripomniti, da v našem primeru jekla 20NiCrMo3 nismo popuščali čistega martenzita, ampak martenzitno strukturo z okoli 15% bainita. Izračunali smo trdoto HV za dva primera sestave jekla 20NiCr-Mo3:

- prvič, da so vsi elementi na spodnji meji predpisane kemijske sestave;
- drugič, da so vsi elementi na zgornji meji predpisane kemijske sestave.

V prvem primeru smo za popuščenje 1 uro na 400°C izračunali trdoto 382 HV, kar ustreza natezni trdnosti okoli



Slika 5. Vpliv vsebnosti legirnih elementov na prirastek trdote po popuščenju martenzita.

Figure 5. Influence of alloying elements on difference of hardness at tempering of martensite.

1220 N/mm², če bi izhajali iz čistega martenzita. V drugem primeru bi pričakovali trdoto 453 HV, kar ustreza natezni trdnosti R_m okoli 1447 N/mm², če tudi v tem primeru izhajamo iz čistega martenzita.

Naslednji trije diagrami na sliki 6 prikazujejo odvisnost mehanskih lastnosti od temperature popuščenja za jeklo 20NiCrMo3 s kemijsko sestavo, ki je napisana nad diagrami. Preizkušanci za natezni in žilavostni preizkus so bili kaljeni s temperature 880°C v vodi in olju. Po kaljenju v olju smo dobili 30–35% bainita in 65–70% martenzita, po kaljenju v vodi pa 10–15% bainita in 85–90% martenzita. Iz diagramov nazorno vidimo vpliv mikrostrukture po kaljenju na popustne lastnosti jekla. Večji delež martenzita v mikrostrukturi daje višjo natezno trdnost, kar je razumljivo, omogoča pa tudi višjo mejo tečenja in večje žilavostno delo.

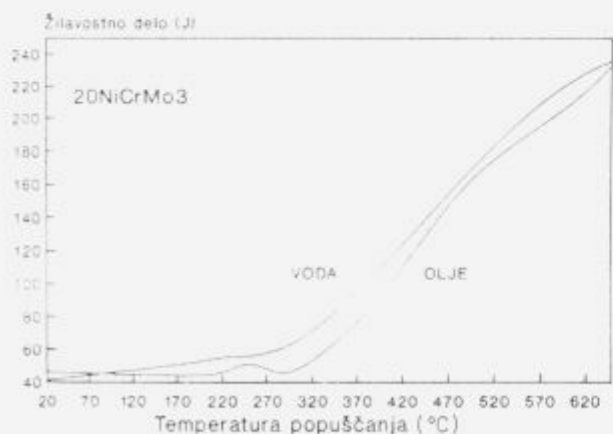
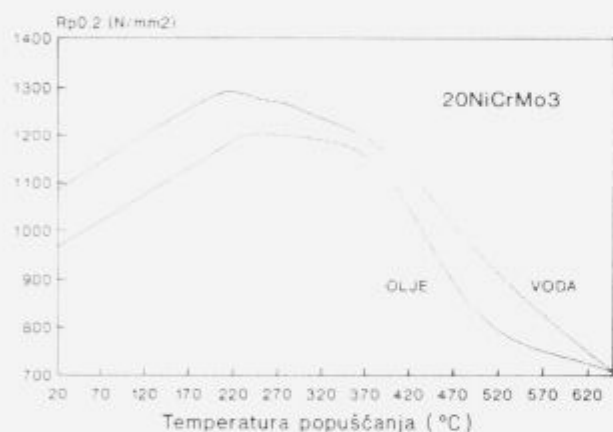
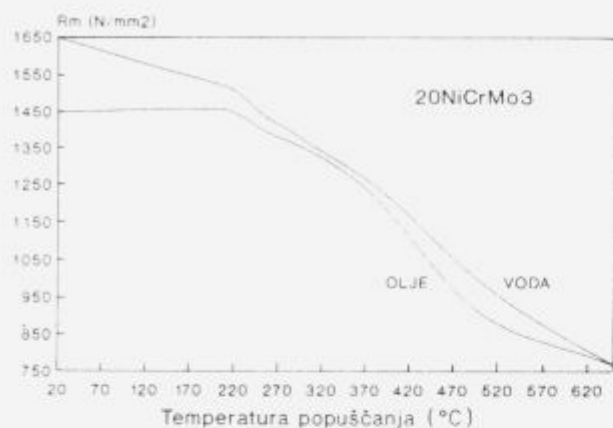
5 ZAKLJUČEK

S tem prispevkom smo želeli opozoriti, da ob silnem razvoju novih materialov in tehnologij nikakor ne smemo zanemariti ali podcenjevati raziskav klasičnih materialov, ki se proizvajajo po sicer klasični tehnologiji, vendar z moderno opremo, z novimi sredstvi in računalniško podprtimi sistemi. Prav zaradi modernizacije, ki odpira nove možnosti za razvoj kakovosti v proizvodnji, so nujno potrebne sistematične raziskave, da bi te možnosti sploh lahko izkoristili.

Nove možnosti, ki so dane in tudi v naši proizvodnji očitne, lahko ob zanemarjanju celovitih sistemov zagotavljanja kakovosti ostanejo neizkoriščene ali pa celo privedejo do padanja kakovosti, česar ne bi smeli dopustiti.

Vsebnost legirnih elementov v ut. %

C = 0,22 Si = 0,21 Mn = 0,74 Cr = 0,40 Ni = 0,75
Mo = 0,17. Kaljeno s temperature 880 °C



Slika 6. Vpliv mikrostrukture na popustne lastnosti jekla 20NiCrMo3.

Figure 6. Influence of microstructure on tempering resistance of steel 20NiCrMo3.

6 Literatura

- ¹ DIN 17115 Stähle für geschweisste Rundstahlketten (technische Lieferbedingungen)
- ² Jakostni vpliv leg. elem., interna naloga Železarne Ravne P67-22
- ³ Wyss U.: Auswertungsmöglichkeiten der Hartbarkeitsprüfung nach Stirnabschreckmethode, Harterei—Technische Mitt-Riebensachm, Bd. 6, H. 2, str. 9–40
- ⁴ J. Rodič, J. Šegel: Process Control and Quality Assurance; Know-how presentation—Železarna Ravne, 1980
- ⁵ A. Ponsot, Ph. Maynier, J. Comon, P. Bastien: Application d'une equivalence entre le temps et la temperature de revenu a l'etude de la durete de la martensite des aciers au carbone et faiblement allie's, Revue de Metallurgie—Juin
- ⁶ Naloga IMT 90-074