



1967 1  
LETO IX

ACRONI

k r 669(091)

ŽELEZAR; teh.pril  
1967

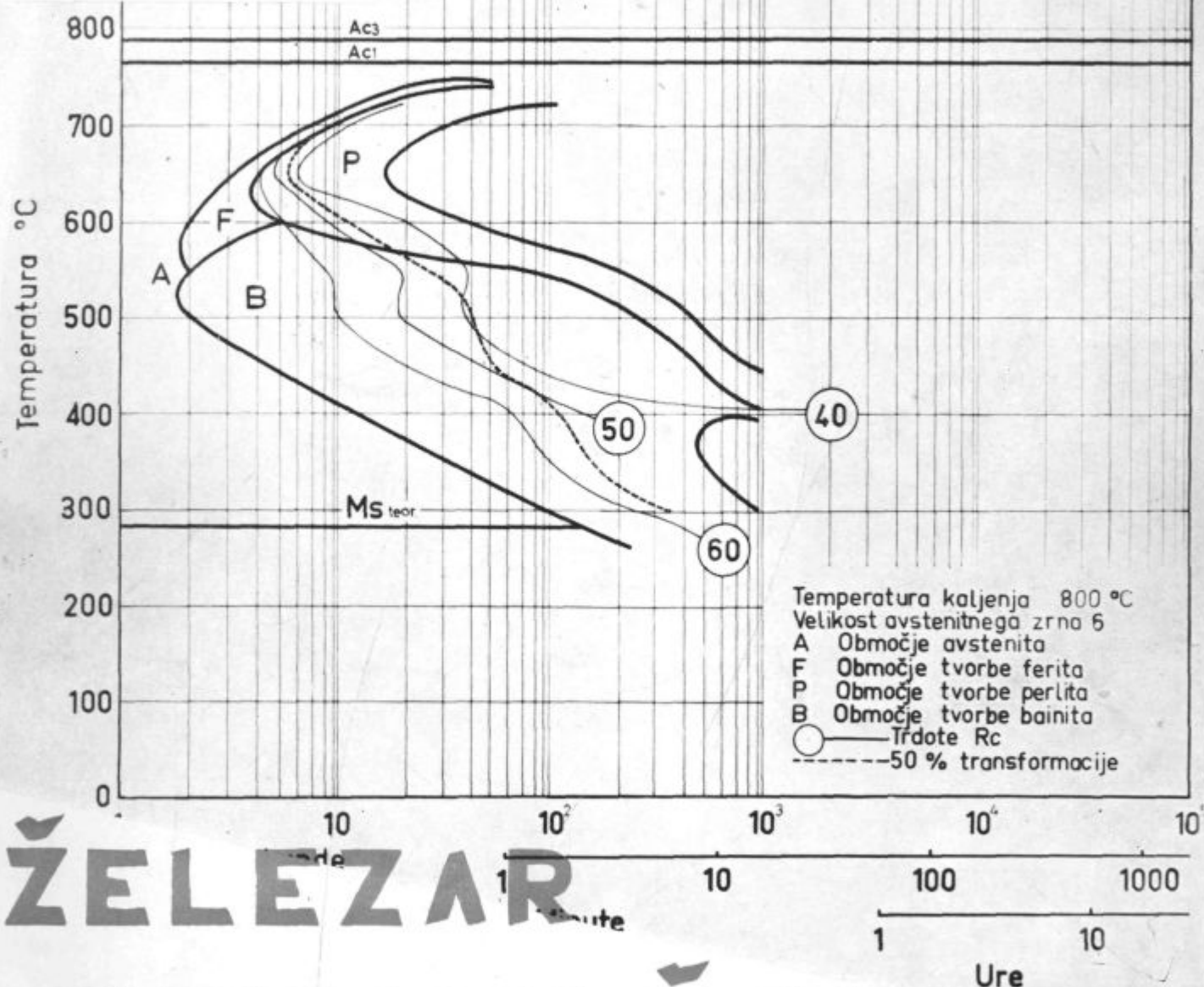


1004233,1

COBISS

STROKOVNA KNJILJENICA

| Si | Mn   | P     | S     | Cu   | Cr   |
|----|------|-------|-------|------|------|
| 30 | 0,30 | 0,020 | 0,011 | 0,12 | 0,52 |



# **Določevanje obdelovalnosti avtomatskih jekel po postopku »Struženje s konstantnim pritiskom«**

## **1. Uvod**

Osnovni motiv za razvoj avtomatskih materialov je bila zahteva predelovalne industrije po cenejših in vedno večjih serijskih delih za njene proizvode. Nagel razvoj avtomatskih strojev, ki obratujejo z veliko storilnostjo, je zahteval materiale, ki bodo lahko zadovoljili proizvodne zmogljivosti teh strojev.

Razvite so bile avtomatske kvalitete številnih kovin kot: Al, Cu, Ni, Ag, bronov, medenine ter jekla. Najbolj primerna za obdelavo na avtomatih je medenina. Najcenejšo in največjo uporabo pa ima avtomatsko jeklo, ki je prav zaradi tega doseglo v zadnjih desetih letih nagel kvaliteten razvoj. Nekatere kvalitete avtomatskega jekla so že povsem izpodrinile drago medenino.

Zahteve, ki se postavljajo pred avtomatska jekla, in ki jih obsega pojem obdelovalnost, so čisto ekonomskega značaja. Večja proizvodnja, manjša poraba energije, večja vzdržnost nožev, ugodna oblika ostružkov, gladka površina ter ozke tolerance izdelkov. Ker je pojem obdelovalnosti zelo širok in kompleksen, je zanj težko najti zares primerno definicijo. Na kratko: obdelovalnost še najbolj definiramo kot sposobnost materiala, da ga oblikujemo z rezilnim orodjem v željeno obliko ali pa kot obnašanje materiala pri rezanju z orodjem.

Poznavanje obdelovalnosti avtomatskih jekel je važno tako za proizvajalca kakor tudi uporabnike teh jekel. Za proizvajalca če si hoče zagotoviti stalen kvaliteten razvoj na tem področju, za uporabnika pa, če si hoče zagotoviti čim večji izkoristek obdelovalnega stroja ob čim boljši kvaliteti izdelkov in čim nižji ceni obdelave.

## **2. Metoda določevanja obdelovalnosti**

Standardnega postopka za določevanje obdelovalnosti avtomatskih jekel ni. Najbolj zanesljive so takojmenovane primerjalne proizvodne metode, ki so specifične za posamezne proizvajalce in uporabnike avtomatskih jekel. Postopek pri teh metodah je enostaven. Pred začetkom proizvodnje določenega kosa v velikih serijah izberemo na enakem obdelovalnem stroju s spreminjanjem pogojev rezanja vrsto jekla ter določimo parametre izdelave, kar naj da maksimalno in najcenejšo proizvodnjo določenega izdelka. Taki poizkusi so večkrat dolgotrajni, predvsem pa zelo dragi.

Manjši proizvajalci in uporabniki si takega razkošja ne morejo privoščiti. Zato uporabljajo indirektno laboratorijske načine določevanja obdelovalnosti jekla. Glavni kriteriji po katerih določimo obdelovalnost so:

- a) vzdržnost rezalnih nožev,
- b) sile, ki nastopajo pri rezanju materiala z orodjem,
- c) oblika nastalega ostružka,
- d) kvaliteta z obdelavo dobljene površine.

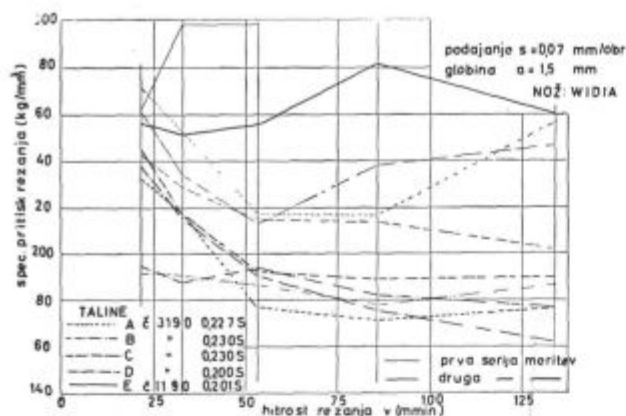
Ker obdelovalnost ni neka enostavna in absolutna lastnost materiala, je vsaka ocena obdelovalnosti več ali manj relativna in velja le za določene pogoje obdelave. Navadno lahko oceno obdelovalnosti izrazimo z neko primerjalno vrednostjo z ozirom na nek drugi material, ki v tem primeru služi kot etalon.

Pogledi na obdelovalnost se danes še zelo razlikujejo, zato je izbira kriterijev in metode za določevanje obdelovalnosti prepuščena posameznikom. Lahko trdimo, da je današnje stanje tako, da si mora vsak izbrati metodo, ki za njegove namene in potrebe najbolj ustreza. V vsakem primeru pa je potrebno upoštevati, da en sam kriterij v nobenem primeru ne more dati dovolj zaključene slike o obdelovalnosti določenega materiala.

## **3. Izbira ustrezne metode**

Za potrebe raziskovalnega dela na področju osvajanja kvalitete avtomatskih jekel v Železarni Jesenice, je bilo izmed številnih predlaganih metod potrebno izbrati in osvojiti tako metodo določevanja obdelovalnosti, s katero bo mogoče zasledovati vplive različnih metalurških faktorjev izdelave in predelave na obdelovalnost avtomatskih jekel.

V ta namen so na Metalurškem inštitutu v Ljubljani opravili poizkuse določevanja obdelovalnosti avtomatskih jekel s klasičnimi metodami »merjenjem sile rezanja« in izoblikovanjem ostružkov, v drugi seriji pa po metodi »določevanja obrabe nožev pri struženju s pomočjo radioaktivnih izotopov«. Analiza rezultatov preizkusov s klasičnimi metodami kaže, da med specifičnimi pritiski pri rezanju za različne šarže ali celo kvalitete avtomatskih jekel ni takih razlik, iz katerih bi se dalo sklepati na razlike pri obdelovalnosti jekla, kar je razvidno iz slike 1.



Slika 1  
Odvisnost specifičnega pritiska od hitrosti rezanja ter vrste avtomatskega jekla

Ce upoštevamo še slabo reproduktivnost rezultatov, lahko zaključimo, da je ta metoda premalo občutljiva in kot taka za ocenjevanje obdelovalnosti avtomatskih jekel neprimerna.

Iz obširne literature o tem področju je razvidno, da imajo klasične metode, s katerimi določamo obrabo pri struženju, nekatere pomanjkljivosti. Za izvedbo preizkusov je potrebna velika količina jekla. Poizkusi so dolgotrajni. Potrebni so preizkušanci večjih premerov, merjenje obrabe noža je komplicirano itd.

Industrija in trgovina potrebuje hitro, enostavno in poceni metodo, ki bo dovolj občutljiva in jo bo mogoče izvesti v normalnih obratovalnih pogojih. Dobljeni rezultati morajo imeti predvsem praktičen pomen. Ena takih metod, ki zadovoljuje tem pogojem, je metoda »določevanja obrabe nožev s pomočjo radioaktivnih izotopov«. Obrabo nožev lahko določimo z merjenjem radioaktivnosti vključkov, kar omogoča ocenjevanje obdelovalnosti jekla po kriteriju vzdržnosti orodja. Poizkus je dovolj občutljiv, da pokaže razlike v obdelovalnosti med posameznimi vzorci avtomatskih jekel, kar je razvidno iz tabelarničnega prikaza specifične obrabe rezalnih nožev pri obdelavi različnih vrst avtomatskega jekla.

| Talina | Izdelovalec | kvaliteta | premer mm | trdota HB | sp obraba mg/min     |
|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| S      | Ž Jesenice  | Č 1290    | 20        | 167       | $18,1 \cdot 10^{-4}$ |
| T      | "           | Č 1290    | 20        | 169       | $5,1 \cdot 10^{-4}$  |
| U      | Stahl Union | 9 S 20 K  | 20        | 182       | $1,44 \cdot 10^{-4}$ |
| V      | Ž Jesenice  | Č 3190 G  | 39        |           | $2,0 \cdot 10^{-4}$  |
| X      | "           | Č 3190 G  | 39        |           | $2,6 \cdot 10^{-4}$  |
| Č      | Češko jeklo |           | 39        |           | $1,75 \cdot 10^{-4}$ |

Slika 2  
Specifična obraba rezalnih nožev pri rezanju različnih vrst avtomatskega jekla

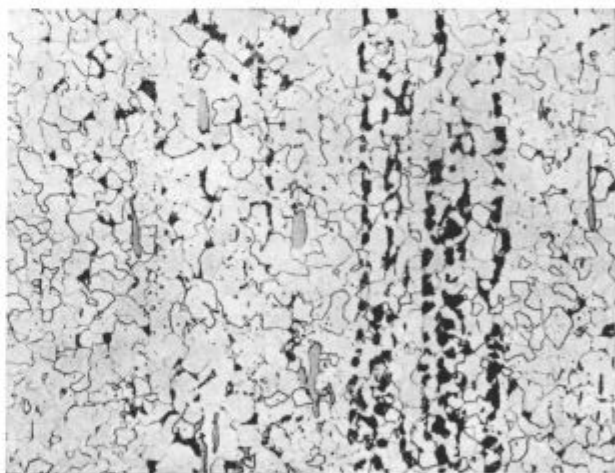
Ta metoda ima velike prednosti pred klasičnimi metodami. Kaže pa, da splošno zadržanost do dela z radioaktivnimi izotopi, zavira njeno širšo uporabo in je zato primerna predvsem za znanstveno raziskovalno delo, ne pa toliko za razvojno delo v industriji.

Na osnovi opisanih podatkov ter zaradi posebnega značaja avtomatskih jekel smo na raziskovalnem oddelku za ocenjevanje obdelovalnosti izbrali metodo »struženja s konstantnim podajanjem pritiskov«, ki je v ZDA zelo razširjena, v Evropi pa postaja vedno bolj pomembna, predvsem za študij in ocenjevanje kvalitete avtomatskih jekel.

#### 4. Avtomatski dodatki in mehanizem rezanja

Preden začnem opisovati naprave kot take, je za razumevanje vrednosti podatkov dobljenih z metodo »struženja s konstantnim podajnim pritiskom«<sup>1</sup> potrebno poznati nekatere osnovne značilnosti avtomatskih jekel.

Za izboljšanje obdelovalnosti dodajajo avtomatskim jeklom, ogljikovim kakor tudi nerjavim, tako imenovane »avtomatske dodatke«, navadno žveplo in svinec, v novejšem času pa tudi selen, telur in bizmut, ki tvorijo v jeklu mehke, nemetalne vključke, sulfide, selenide in podobno. Oblika sulfidnih vključkov MnS v nizkoogljiknem avtomatskem jeklu je prikazana na sliki 3.



Slika 3  
Sulfidni nemetalni vključki v avtomatskih jeklih

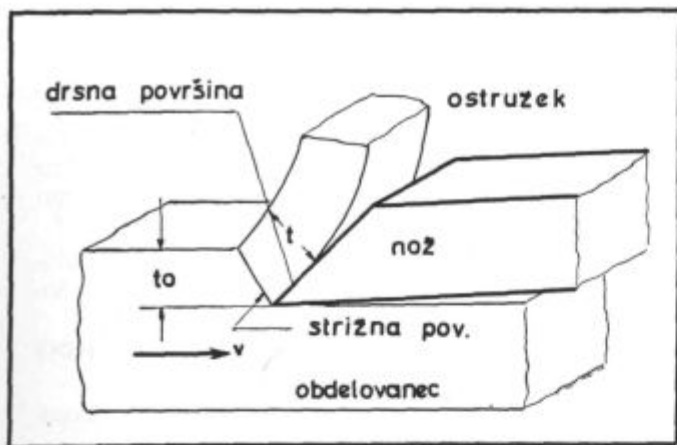
Vloga teh vključkov pri rezanju je razvidna iz naslednje razlage.

Obdelava kovin z odrezovanjem se sestoji iz dveh glavnih operacij. (slika 4)

a) Plastične deformacije kovine z nožem do tvorbe ostružka

b) Drsenje ostružka ob prosti površini noža

S plastično deformacijo kovine se deformirajo tudi mehki nemetalni vključki v dolge in tanke ploščice. V samem ostružku se večinoma razpo-



Slika 4  
Obdelava kovin z odrezovanjem

tegnejo v smeri največjih strižnih napetosti, v coni tečenja pa v smeri, ki je vzporedna drsni površini ostružka.

Tako deformirani sulfidni vključki vplivajo na pogoje rezanja na dva načina:

a) tanki lističi, razpotegnjeni v smeri največjih strižnih napetosti, slabijo drsne ravnine in povzročajo takoimenovano notranje mazanje med temi ravninami pri izoblikovanju ostružka.

b) druga oblika ugodnega vpliva teh zaključkov je, da tvorijo tanko plast na drsni ravnini vključkov in proste površine noža, ki deluje kot zunanje mazivo.

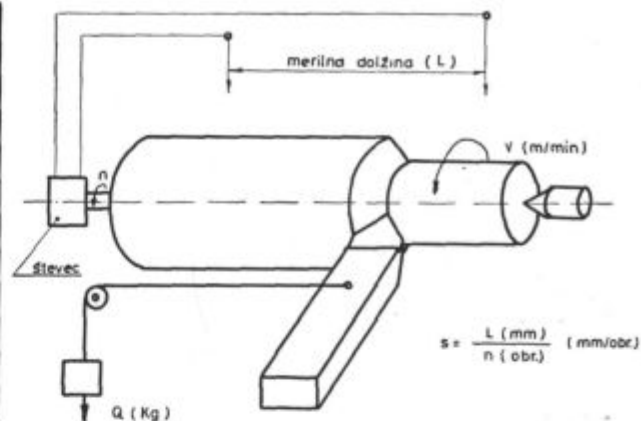
Vloga mehkih nemetalnih vključkov je torej v tem, da lomijo ostružke in zmanjšujejo trenje pri rezanju. Iz teorije rezanja pa je poznano, da je celotna porabljena energija za rezanje vsota energije potrebne za premagovanje strižnih napetosti ter sile trenja rezanja.

Za dobro obdelovalnost je torej zmanjšano trenje pri rezanju, zaradi vpliva mehkih nemetalnih vključkov, odločilnega pomena, seveda pri tem ne smemo zanemariti tudi vpliva drugih fizikalnih lastnosti jekla, katerih vpliv pri rezanju pa je mnogo bolj kompleksen.

### 5.1 Teoretične osnove preizkusa

Poizkus ocenjevanja obdelovalnosti po metodi »struženja s konstantnim podajnim pritiskom« (angl.: Constant Pressure Lathe Test, nemško Gewichtsvorschubverfahren) temelji na dognanju, da se jekla z različno obdelovalnostjo pri konstantnem podajnem pritisku režejo različno hitro. Če za pomik noža uporabimo stalen podajni pritisk, bomo pri jeklih z boljšo obdelovalnostjo dosegli večje podajanje kot pri slabše obdelovalnih jeklih. Shema obravnavanega poskusa je prikazana na sliki 5.

Pri tem poizkusu merimo podajanje pri struženju  $s$  (mm/obr.), ki pri konstantni hitrosti struženja  $v$  (m/min.) rezultira konstantnemu podajanju pritiskov  $Q$  (kg).



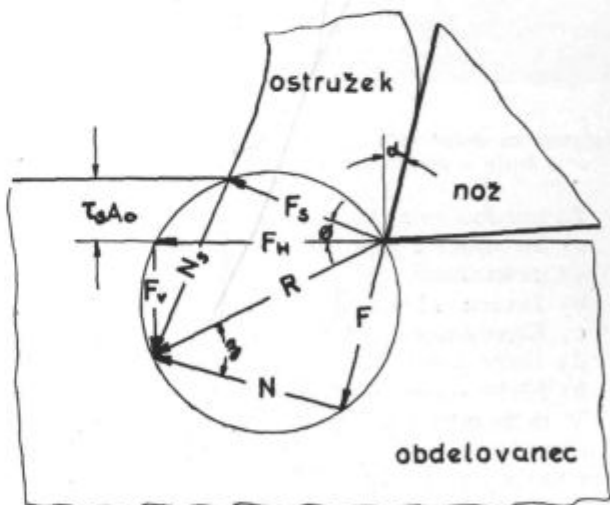
Slika 5  
Shema ocenjevanja obdelovalnosti po metodi »struženje s konstantnim podajnim pritiskom«

Teoretično ta poizkus nikoli ni bil natančno obdelan. Na vprašanje, kaj pri tem poizkusu sploh merimo, je zadovoljivo odgovoril znani ameriški tehnolog dr. Merchant. Njegovo razlago, v zelo poenostavljeni obliki, posredujem v naslednjem odstavku:

Iz analize mehanike rezanja, ki je podana na sliki 6, sledi naslednja odvisnost med silo trenja  $F$  ter vertikalno in horizontalno silo rezanja  $F_v$ ,  $F_H$ .

$$F = F_H \cos \alpha + F_v \sin \alpha$$

je prednji kot noža.



Slika 6  
Odvisnost med silami in koti pri ortogonalnem rezanju kovin

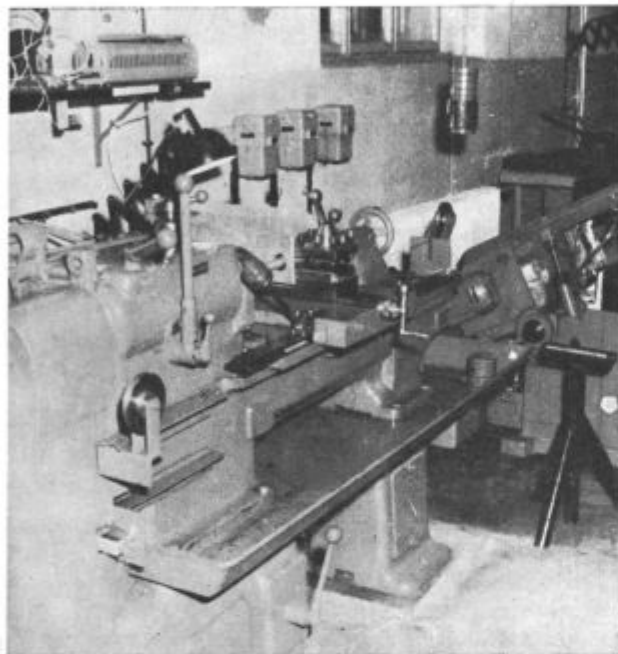
Ta enačba velja splošno in ni odvisna od oblike ostružka, zato jo lahko uporabimo tudi pri pogojih obravnavanega poizkusa. Ker je pri danem poskusu prednji kot  $\alpha$  majhen, lahko drugi člen enačbe, v primerjavi s prvim členom zane-marimo. Sledi torej, da je pri poskusu horizontalna sila  $F_H$  direktno proporcionalna sili trenja  $F$ .



Z drugimi besedami, pri tem poizkusu merimo podajanje  $s$ , ki je potrebno, da se med nožem in ostružkom ustvari določeno trenje. Poizkus je torej zelo občutljivo merjenje trenja pri rezanju in je kot tak še posebno primeren za ocenjevanje obdelovalnosti avtomatskih jekel.

## 5.2 Opis naprave

Naprava za določevanje obdelovalnosti, ki jo uporabljamo na raziskovalnem oddelku, je prikazana na sliki 7.



Slika 7

Naprava za določevanje obdelovalnosti po metodi »struženja s konstantnim podajnim pritiskom«

Za izvedbo poizkusa potrebujemo:

- Stružnico s suportom sproščenim od pogonskega mehanizma
- Zavoro, ki preprečuje izmikanje suporta
- Konstantni pritisk na nož
- Večje število rezalnih nožev
- Števec za merjenje števila obratov

V ta namen smo ustrezno predelali revolver-sku stružnico R. Končar, RM 530 — 8/4 z motorjem moči 2.3—3.0 kW in dvojno hitrostjo 705 do 1420 obr./min. s predležjem RTES 40 ter normalno, veliko in malo jermenico. Možnih je 42 različnih obratov vrtenja v območju 67—1600 obr./min.

Suport z vpenjalno glavo, ki je bil v ta namen posebej izdelan, je sproščen od pogonskega mehanizma in sloni na krogličnih ležajih ter prosto drsi po vodilnih letvah. Potrebno vlečno silo dosežemo s pomočjo uteži, ki so prosto obešene in preko škripčevja zvezane radialno s suportom. Posebna zavora pritrjena na suportu, preprečuje izmikanje suporta nazaj.

Kot je razvidno iz teorije, je za izvedbo poizkusa potrebna točno določena in konstantna geo-

metrija brušenja rezalnih kotov noža. Pri naših poizkusih uporabljamo nože iz domačega brzoreznega jekla BRc, ki so brušeni po predpisih Stahl und Eisen Prüfblatt 1166—52. Po podatkih iz literature in prakse je razvidno, da ima kvaliteta brušenja odločilen vpliv na rezultate struženja, zato posvečamo brušenju posebno pozornost in smo v ta namen nabavili tudi poseben stroj.

Za merjenje števila obratov stružnice na določeni stružni dolžini uporabljamo naslednje instrumente:

- impulzni električni števec Hengstler F043 max 25 imp/sek.
- dva magnetna preklopnika tip MI/W Baumgartner
- transformator + selenski usmernik

Instrumenti so povezani zaporedno, tako da je mogoče šteti obrate na poljubni stružni dolžini. Razmerje med stružno dolžino in ustreznim številom obratov stružnice nam da podajanje  $s$

$$s = \frac{L}{n} \quad (\text{mm/obr})$$

$L$  = dolžina struženja [mm]  
 $n$  = število obratov

## 5.3 Pogoji preizkusa

Pogoji preizkusa so naslednji:

Globina struženja  $t = 2$  mm  
 Hitrost struženja: 35—100 m/min.

Območje hitrosti sovpada s hitrostjo struženja avtomatskih jekel v praksi. Veliko število možnih kombinacij obratov vretena omogoča struženje različnih premerov vzorcev jekla v območju 20 do 50 mm premera pri isti obodni hitrosti.

Geometrija brušenja:  $\alpha 8^\circ$ ,  $\gamma 12^\circ$ ,  $\kappa 60^\circ$ ,  $\lambda 4^\circ$ .

Radius konice: 0,5 mm, presek  $20 \times 20$  mm

Navadno opravimo poizkus pri petih različnih obremenitvah v območju 1—10 kg v dveh paralelakah.

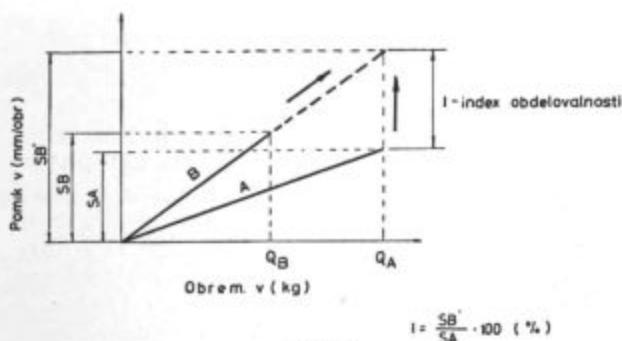
Poraba jekla je majhna in znaša 2—2,5 mm jekla ustrezne debeline.

Celoten preizkus s potrebnimi predpripravami traja 4 ure, eno struženje traja le nekaj minut.

## 5.4 Ocenjevanje obdelovalnosti

Opisana metoda ocenjevanja obdelovalnosti ima izrazito primerjevalni značaj. Tehnika izračunavanja indeksa obdelovalnosti je razvidna iz slike 8.

Razlike obdelovalnosti med posameznimi jekli so v velikosti podajanja  $s$  pri dani obremenitvi  $Q$ . Indeks obdelovalnosti  $I$  se izrazi z razmerjem podajanja  $s_A$  znanega (etalonskega) jekla (A) in podajanja  $s_B$  neznanega jekla (B), pri konstantnih pogojih preizkusa. Linearna odvisnost med  $s$  in  $Q$  omogoča neposredno medsebojno primerjavo različnih vzorcev avtomatskih jekel, ki jih je zaradi različne obdelovalnosti treba preizkusiti z različ-



Slika 8  
Ocena obdelovalnosti

nimi utežmi. Mogoča je torej ekstrapolacija podatkov, da se lahko izvede primerjava pri standardnih pogojih preizkusa.

Iz literature je razvidno, da obstaja zadovoljiva linearna primerjava med rezultati ocene obdelovalnosti jekla po metodi »struženja s konstantnim podajnim pritiskom« ter rezultati preiskave obdelovalnosti jekla z dolgotrajnimi proizvodnimi metodami, pa tudi z rezultati preiskave s klasičnimi laboratorijskimi metodami merjenja vzdržnosti rezalnih nožev.

V ZDA so metodo »struženja s konstantnim podajnim pritiskom« prevzeli kot standardno metodo merjenja obdelovalnosti avtomatskih jekel. Indeksi obdelovalnosti so izračunani na osnovi etalonskega jekla vrste B 11 12, za katerega so prevzeli indeks obdelovalnosti 100 %.

## 6. Uporaba metode pri raziskovalnem delu

Pri raziskovalnem delu na področju razvoja kvalitete ogljikovih in nerjavečih avtomatskih je-

kel v Železarni Jesenice smo ta način ocenjevanja obdelovalnosti uspešno uporabili pri študiju najboljših pogojev izdelave in predelave za dobro in enakomerno obdelovalnost posameznih vrst avtomatskih jekel. Izmed številnih tovrstnih preiskav navajam nekaj karakterističnih primerov v ilustracijo uporabnosti te metode v raziskovalne namene.

**Prvi primer:** Način izdelave jekla ter različna kemična analiza posameznih vrst ogljikovih avtomatskih jekel ima za posledico različno obdelovalnost teh jekel. Preiskovali smo obdelovalnost treh vzorcev avtomatskega jekla različnih kvalitet in to:

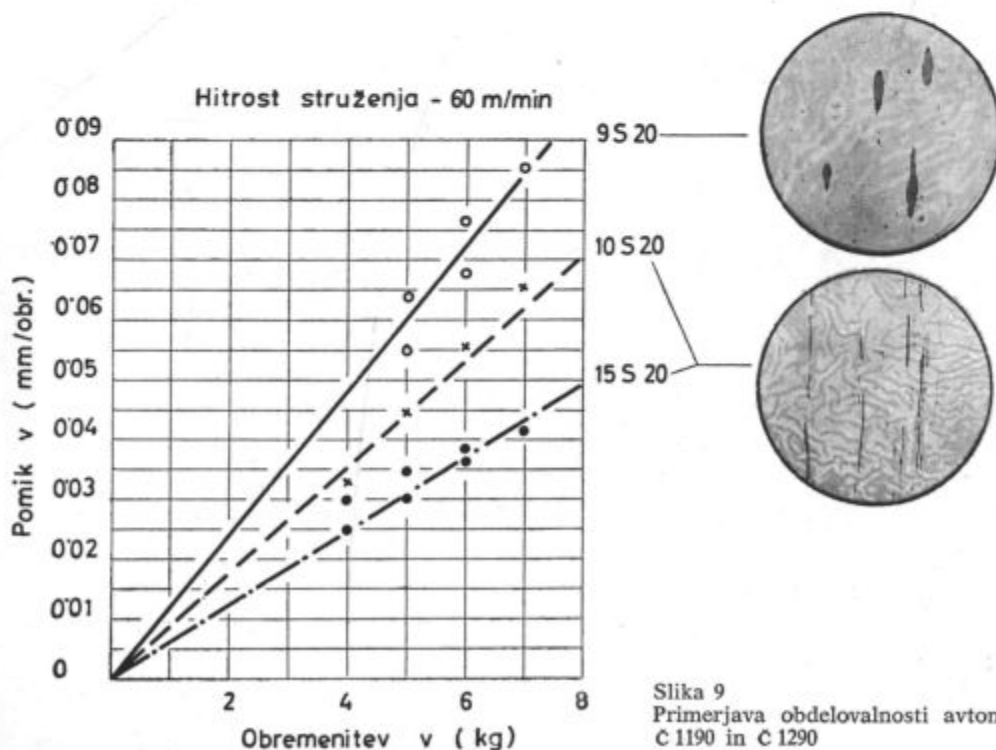
- nepomirjeno jeklo vrste 9 S 20
- pomirjeno jeklo vrste Č 1190
- pomirjeno jeklo vrste Č 1290

Kemična sestava vzorcev jekla je naslednja:

| Vrsta  | % C  | % Si | % Mn | % P   | % S   |
|--------|------|------|------|-------|-------|
| 9S20   | 0.08 | 0.01 | 0.74 | 0.076 | 0.214 |
| Č 1190 | 0.10 | 0.22 | 0.83 | 0.060 | 0.243 |
| Č 1290 | 0.16 | 0.28 | 0.68 | 0.025 | 0.198 |

Preiskava sulfidnih vključkov je pokazala, da ima nepomirjeno jeklo manj razpotegnjene sulfidne vključke ovalnega tipa (indeks deformabilnosti  $\epsilon_i = 0.85$ ), pomirjeno jeklo pa močno razpotegnjene vključke, indeks deformabilnosti  $\epsilon_i > 1.5$ ). Vsi vzorci jekla so bili preiskani v normaliziranem stanju.

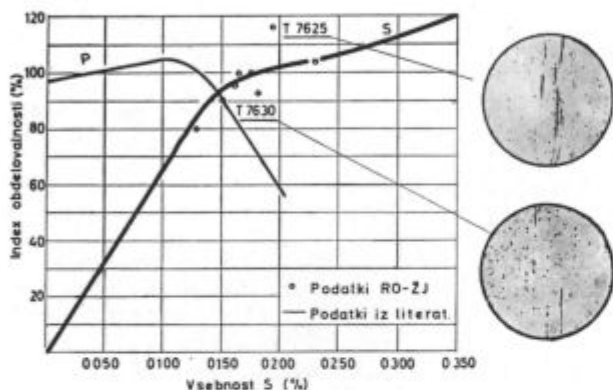
Rezultati preiskave obdelovalnosti teh vzorcev jekla so prikazani na sliki 9.



Slika 9  
Primerjava obdelovalnosti avtomatskih jekel vrste 9S20, Č 1190 in Č 1290

Najboljšo obdelovalnost kaže nepomirjeno jeklo, kar je posledica ugodne oblike sulfidnih vključkov. Različna obdelovalnost pomirjenih vrst avtomatskega jekla pa je posledica različne vsebnosti žvepla. Rezultat kaže, da ima oblika sulfidnih vključkov močnejši vpliv kot vsebnost žvepla.

**Drugi primer:** Vpliv vsebnosti žvepla ter oblike sulfidnih vključkov na obdelovalnost smo preiskali tudi pri kislini odpornem avstenitnem avtomatskem jeklu vrste Č 4590. Iz rezultatov, ki so prikazani na sliki 10, je razvidno, da se obdelovalnost te vrste jekla v določenem območju vsebnosti žvepla le malo spreminja, kar je izrednega pomena za enakomerno obdelovalnost različnih šarž tega jekla. Poizkusi so potrdili tudi ugoden vpliv ovalnejših sulfidnih vključkov na obdelovalnost te vrste jekla.



Slika 10  
Vpliv vsebnosti žvepla na obdelovalnost avstenitnega avtomatskega jekla Č 4590

Kot je razvidno iz slike, se naši podatki popolnoma ujemajo z ustreznimi tovrstnimi rezultati iz literature.

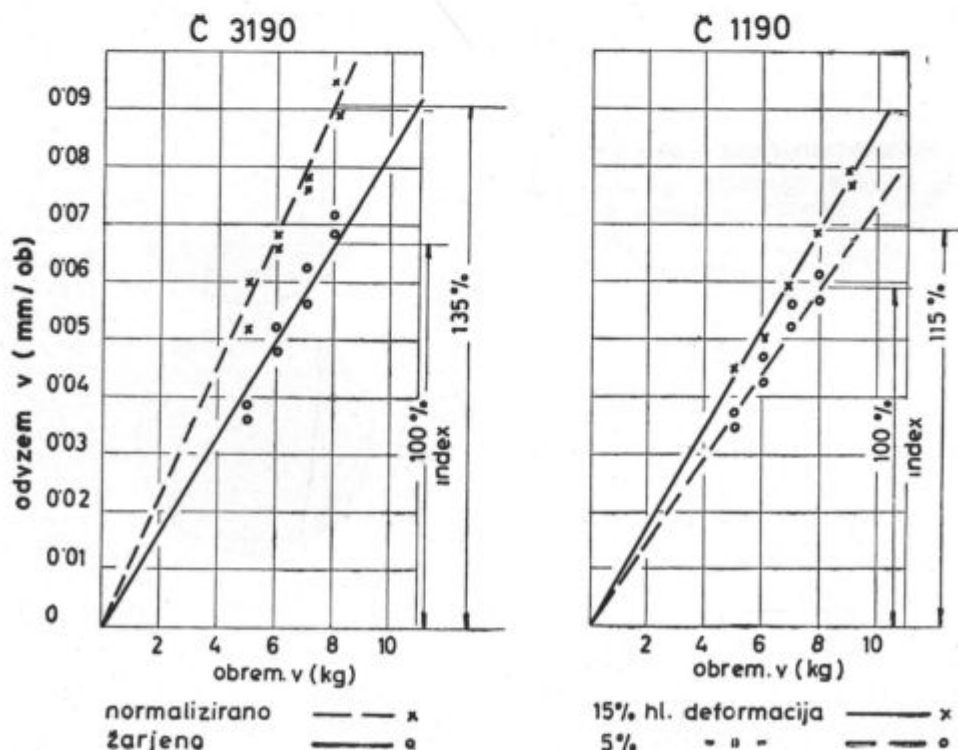
**Tretji primer:** Obdelovalnost ogljikovih avtomatskih jekel je v veliki meri odvisna tudi od oblike in utrditve mikrostrukture jekla, kar je pogojeno z ustreznim načinom toplotne obdelave in stopnje hladne predelave jekla. Na sliki 11 so prikazani rezultati preiskav o vplivu načina toplotne obdelave na obdelovalnost jekla vrste Č 3190, in o vplivu stopnje hladne predelave na obdelovalnost nizko ogljičnega jekla vrste Č 1190.

Rezultati preiskav obdelovalnosti kažejo ugodnejši vpliv lamelarne oblike perlita, ki se izoblikuje pri normalizaciji jekla vrste Č 3190 pred strukturo mehko žarjenega jekla. Pri jeklu vrste Č 1190 pa je razviden ugoden vpliv večje utrditve ferita, ki jo dosežemo z večjo stopnjo hladne deformacije.

Rezultat jasno kaže, da je s tem načinom ocenjevanja obdelovalnosti mogoče zaznati poleg vpliva sulfidnih vključkov in sestave jekla tudi vpliv mikrostrukture jekla na obdelovalnost, kar zopet dokazuje veliko vrednost te metode.

Iz vseh treh prikazanih primerov je lepo razviden nizek raztros rezultatov, ki je v mejah  $\pm 5$  odstotkov, kakor zahteva literatura.

**Četrti primer:** »V novejšem času je bil na področju avtomatskih jekel narejen velik korak naprej. Uvajanje novih avtomatskih dodatkov v redno proizvodnjo avtomatskih jekel vse bolj izloča analizo jekla kot prevzemni kriterij za kvaliteto avtomatskega jekla. Osnovno merilo za kvaliteto



Slika 11 Vpliv stopnje hladne predelave in načina toplotne obdelave na obdelovalnost ogljikovih avtomatskih jekel

avtomatskega jekla je njegova obdelovalnost. Indeks obdelovalnosti, ki ga dobimo po metodi struženja s konstantnim podajnim pritiskom, omogoča klasifikacijo posameznih vrst avtomatskih jekel na osnovi njihove obdelovalnosti. Tovrstni podatki, ki jih najdemo v tujih katalogih, veljajo po navadi za hladno vlečeno stanje.

Številne meritve obdelovalnosti vseh vrst avtomatskega jekla na raziskovalnem oddelku nam dovoljujejo primerjavo indeksov obdelovalnosti domačih jekel v hladno vlečenem stanju z indeksi, ki jih za tuja sorodna jekla najdemo v literaturi. Primerjava je razvidna iz naslednje tabele:

| Vrsta jekla JUS | Analiza jekla                                   | Indeks obdelovalnosti | Primerjava AISI | Indeks obdelovalnosti DIN |
|-----------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|
| Č 3990          | 0.06 % C<br>0.89 % Mn<br>0.122 % P<br>0.300 % S | 125                   | C 1213          | 9SMn 23 135/140           |
| Č 1190          | 0.06 % C<br>0.67 % Mn<br>0.068 % P<br>0.248 % S | 108                   | C 1111          | 10S20 90/91               |
| Č 1290          | 0.17 % C<br>0.72 % Mn<br>0.067 % P<br>0.190 % S | 90                    | C 1115          | 15S20 81/85               |
| Č 3190          | 0.20 % C<br>1.22 % Mn<br>0.050 % P<br>0.226 % S | 112                   | C 1116          | — 91/96                   |

Iz tabele je razvidna dobra skladnost dobljenih podatkov v relativnem merilu. Manjša odstopanja, ki nastopajo v absolutni vrednosti, so predvsem posledica različnih etalonskih jekel in deloma različnih pogojev preizkusa. Rezultati nam torej dovoljujejo oceno in klasifikacijo domačih avtomatskih jekel v primerjavi s tujimi vzorci jekla.

## 7. Zaključek

Rezultati velikega števila preiskav obdelovalnosti avtomatskih jekel po metodi »struženja s konstantnim podajnim pritiskom« na raziskovalnem oddelku Železarne Jesenice potrjujejo vrednost metode in pravilnost izbire tega načina ocenjevanja obdelovalnosti avtomatskih jekel.

Rezultati kažejo, da je ta metoda posebno primerna za študij vpliva metalurških faktorjev na obdelovalnost ter za hitro kontrolo kvalitete avtomatskega jekla. Nizka cena preizkusa, njegova enostavnost ter dobra reproduktivnost so velike prednosti te metode pred ostalimi znanimi laboratorijskimi metodami za ocenjevanje obdelovalnosti avtomatskih jekel.

## Literatura:

- Transaction of the ASME 1949 (F. W. Bougler i dr.)
- Stahl und Eisen 1961 št. 1 (H. Becker)
- Stahl und Eisen 1964 št. 5 (H. Becker)
- Poročilo Metalurškega inštituta, nal. 174, 238, 330
- Metal Data 1952, (J. L. Hoyt)
- Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing (Kobayashi)



## Vpliv dušika na izločitvene pojave v avstenitnih Cr-Mn-Ni jeklih z visokim odstotkom ogljika

### Uvod

Standardno avstenitno jeklo združuje korozijsko odpornost z veliko duktilnostjo, vendar ima mejo 0,2 % pri sobni temperaturi samo okoli 22–28 kp/mm<sup>2</sup>. Čeprav se da meja 0,2 % občutno povečati s hladno predelavo, pa to ni ugodno, ker se zmanjša duktilnost toliko, da nadaljnja predelava ni več mogoča in tudi tako izboljšane mehanske lastnosti se ne ohranijo nespremenjene pri povišanih temperaturah.

Možnost razvijanja avstenitnega jekla s sposobnostjo izločitvene utrditve je bila dolgo vabljiva, ker je jeklo mehko in induktivno v homogeniziranem stanju in je zato tudi preoblikovanje takega jekla lahko. Po preoblikovanju se jeklo lahko utrdi še dodatno s staranjem pri temperaturah od 650–750° C, kjer še ni pojavov škajanja. Sedaj smo dosegali visoko trdnost z izločitvenim utrjenjem večinoma iz feritne ali martenzitne strukture. Večina do sedaj znanih izločitveno utrjenih nerjavečih jekel se je v resnici transformirala pred staranjem v martenzit in jih zato ne moremo označiti kot avstenitna.

Taka jekla imenujemo skupno »Mar aging« jekla. Mehanske vrednosti teh jekel so odvisne od popolnosti transformacije v martenzit, kar lahko dosežemo z enostavno toplotno obdelavo, ki pa je odvisna od ozkih tolerančnih mej kemične sestave, zaradi česar je proizvodnja takih jekel otežkočena in omejena.

### Teoretske osnove

Čeprav bo v tej prilogi večina govora o medsebojnem vplivu C in N na izločitveno utrditve, je treba predhodno objasniti vplive, ki jih imajo nekateri elementi na utrjanje strukture s trdno raztopino.

### Feritotvorni elementi

Vpliv dodatka močnih feritotvornih elementov so nekateri avtorji (1) opazovali na jeklu z naslednjo sestavo: 0,1 % C, 15 % Cr, 25 % Ni in 0,02 % N. Taka osnovna sestava jekel je bila izbrana zato, ker tudi dodatki do 10 % silicija, molibdena, volframa ali vanadija ne povzročajo nastopanja delta ferita v strukturi. Efekt trdne razto-

pine Nb in Ti je težko oceniti zaradi male raztopnosti NbC in TiC, kar omejuje utrjanje s trdno raztopino in ker se prepleta ta efekt s pojavom disperzijskega utrjanja.

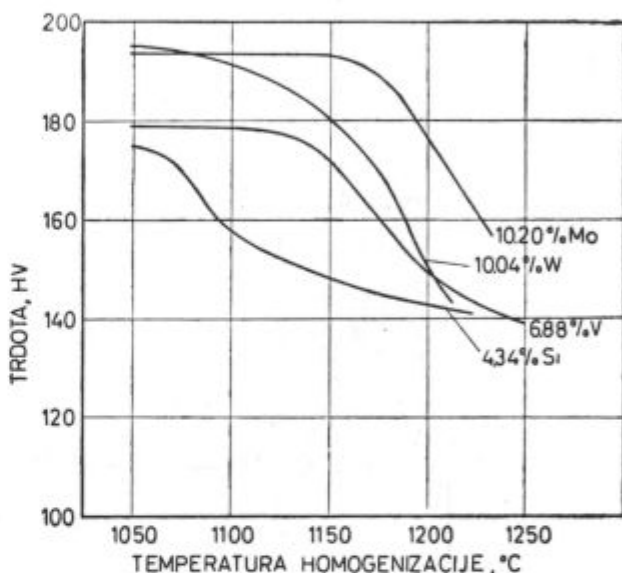


Diagram št. 1 — Vpliv temperature homogenizacije na trdoto

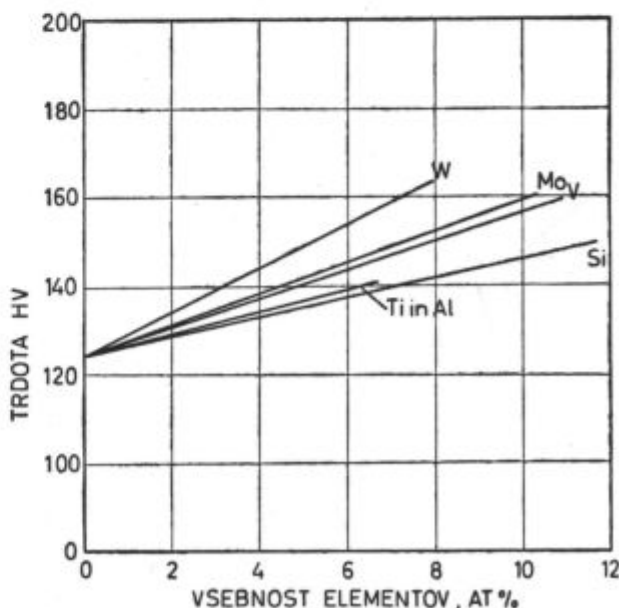


Diagram št. 2 — Vpliv feritotvornih elementov na trdoto

Ugotovljeno je bilo, da z naraščajočo temperaturo homogenizacije trdota pada (diagram št. 1). Pri nižjih temperaturah homogenizacije prevladuje efekt disperzijske utrditve, ki se z naraščajočo temperaturo izgublja, prevladovati pa začne efekt utrditve zaradi trdne raztopine. Ker je rezultat nižja trdota, lahko zaključimo, da je disperzijska utrditev občutnejša od one zaradi trdne raztopine.

Vendar je efekt zlitinskih dodatkov na narastek trdote zaradi trdne raztopine mogoče prikazati grafično (diagram št. 2).

Ta narastek trdote temelji na naslednjih dejstvih:

Tabela 1

| Element | narastek trdote<br>HV/at % | medatomska<br>razdalja<br>Å |
|---------|----------------------------|-----------------------------|
| Si      | 2,38                       | 2,35                        |
| V       | 3,85                       | 2,63                        |
| Mo      | 4,00                       | 2,72                        |
| W       | 4,10                       | 2,74                        |

Iz tabele 1 je razvidno, da je efekt utrditve zaradi trdne raztopine večji pri tistih elementih, ki imajo večje razlike v atomskih premerih v primerjavi z železom, ki ima mrežno konstanto 2,49 Å.

#### Avstenitotvorni elementi

Za študij vpliva dodajanja avstenitotvornih elementov so izbrali isti avtorji kot osnovo jeklo z 0,1 % C, 18 % Cr, 10 % Ni in 0,02 % N, ki ima  $M_s$  temperaturo dovolj nizko, da se prepreči transformacija v martenzit, ki bi pri preiskavah onemogočala točne rezultate. Temu osnovnemu jeklu so dodajali do 15 % mangana, niklja, kobalta in do 5 % bakra. Ugotovili so, da je trdota narasla po naslednjih vrednostih:

Tabela 2

| Element | narastek trdote<br>HV/at % | Å<br>razdalja<br>medatomska |
|---------|----------------------------|-----------------------------|
| Ni      | 0                          | 2,48                        |
| Co      | 0,6                        | 2,50                        |
| Mn      | 1,3                        | 2,65                        |
| Cu      | 2,96                       | 2,55                        |

Grafično se da to prikazati v diagramu št. 3.

Iz primerjave diagramov št. 2 in št. 3 vidimo, da je končni efekt utrditve avstenitotvornih in feritotvornih elementov približno enak (narastek trdote za okrog 30 Vickersov). Razlika je le v tem, da feritotvorni elementi kažejo kontinuirno nara-

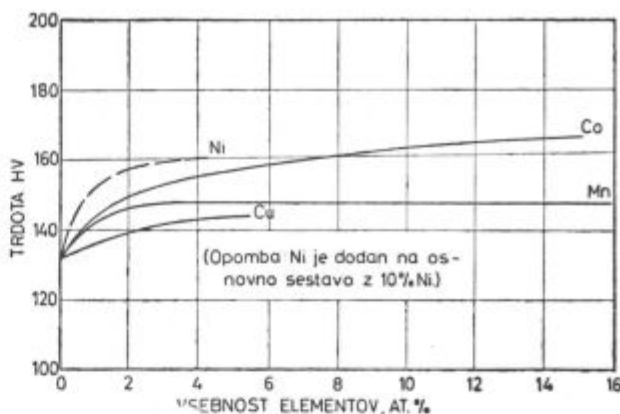


Diagram št. 3 — Vpliv avstenitotvornih elementov na trdoto

ščanje trdote z naraščajočo vsebnostjo elementa, dočim pri avstenitotvornih elementih že po začetnih dodatkih (okrog 2 at %) dosežemo velik skok trdote, ki se pozneje bistveno ne poveča s povečano vsebnostjo dodanih elementov.

#### Intersticijski elementi

Poseben pomen pri utrditvi zaradi trdne raztopine imajo intersticijski elementi C, N in B. Vpliv teh elementov je bil preiskan na jeklu z osnovo 18 % Cr in 10 % Ni. Vpliv C in N na utrditev je prikazan v diagramih št. 4 in št. 5.

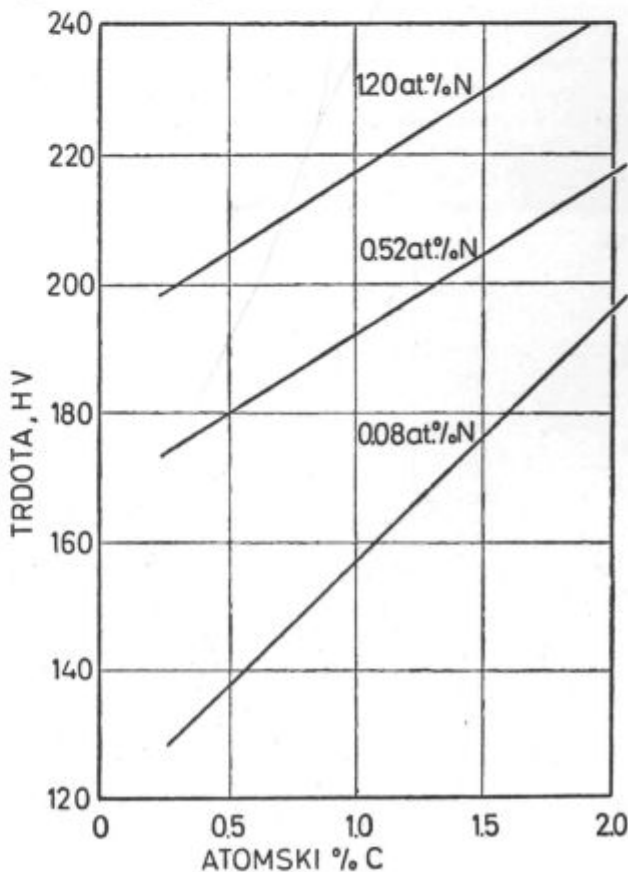


Diagram št. 4 — Vpliv N na trdoto

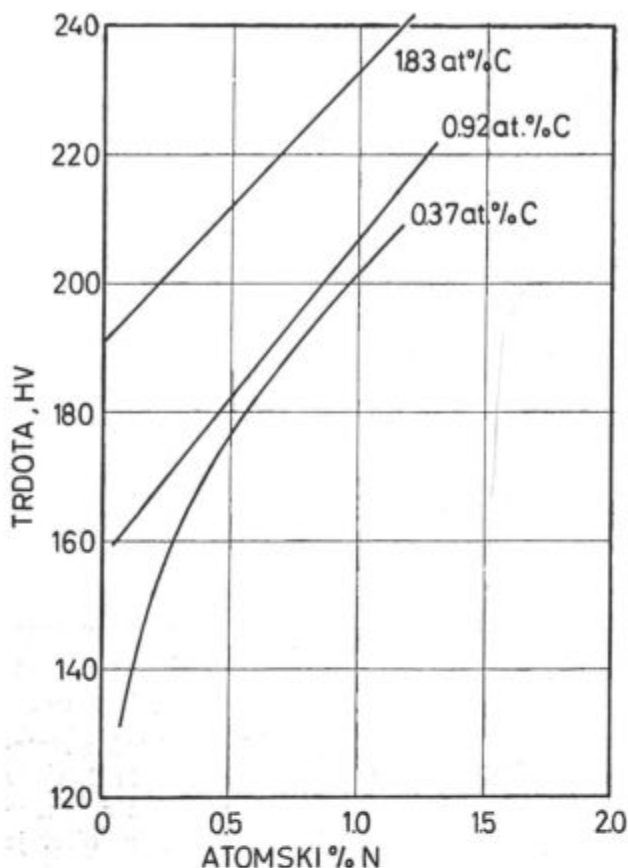


Diagram št. 5 — Vpliv C na trdoto

Osnovno kar tu lahko opazimo je, da je utrditev zaradi trdne raztopine pri intersticijskih elementih v primerjavi s substitucijskimi zelo velika. Skupni vpliv utrditve, zaradi trdne raztopine na mejo 0,2 % v homogeniziranem stanju za vse tipe elementov, je podan v diagramu št. 6.

Največji pomen intersticijskih elementov pa je v tem, da lahko s primernim staranjem, to je z izločitveno utrditvijo, mejo 0,2 % še občutno povečamo, kar pri substitucijskih elementih ni mogoče doseči.

### Eksperimentalni rezultati

Ta nekoliko obširen teoretičen uvod je bil potreben, da bi lažje razumeli probleme, ki se pojavljajo v zvezi z obliko izločkov, kar ima še dodatni efekt na mehanske lastnosti, predvsem na lezenje in duktilnost jekla.

Do sedaj skopo objavljeni podatki o medsebojnem vplivu ogljika in dušika na utrditev avstenitnega nerjavečega jekla so omejeni na naslednja dejstva:

a) utrditveni efekt pri nizkoogljčnih jeklih z N je omejen na področje kristalnih mej in zato narastek trdote ni velik. Dodani elementi, vključno močni karbidotvorci, n. pr. Nb in Ti, imajo majhen vpliv oziroma celo negativen zaradi znižanja vsebnosti aktivnega ogljika. Pri takih jeklih se pojavi rahel utrditveni efekt le pri zelo visokih temperaturah homogenizacije.

b) najmočnejši vpliv na utrditev je odvisen od vsebnosti C in N. Pri nizkih vsebnostih C (pod 0,30 % C) opazimo celo padec trdote, kar lahko razložimo s tem, da z naraščajočim N narašča topnost ogljika (diagram št. 7).

c) na osnovi zgornje ugotovitve je za utrditev najmerodajnejša vsota C + N, čeprav je vpliv C večji od vpliva N. Vpliv vsote C + N na trdoto strukture je prikazan v diagramu št. 8.

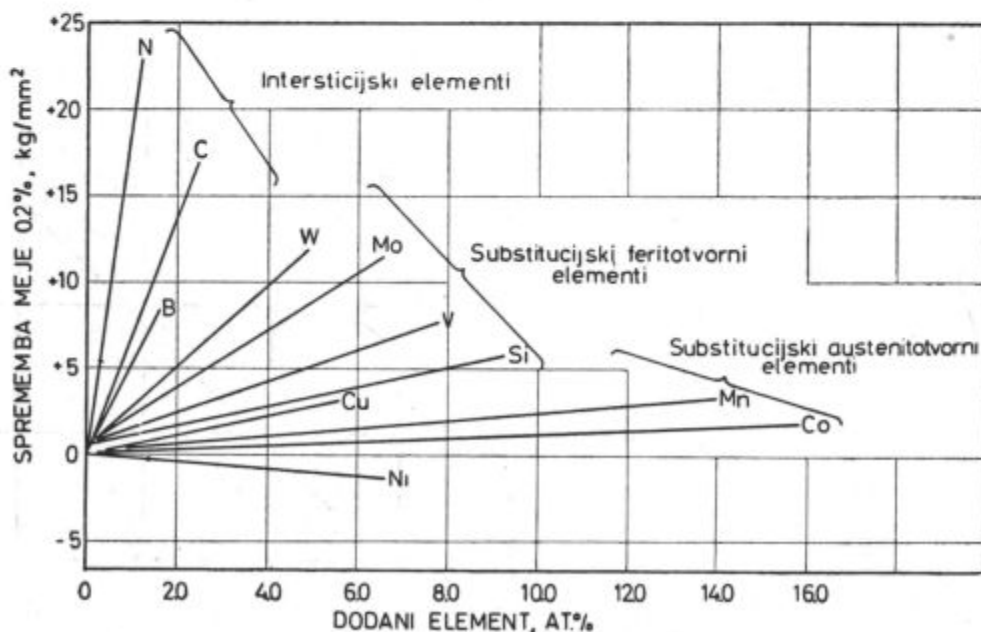


Diagram št. 6 — Vpliv utrditve zaradi trdne raztopine

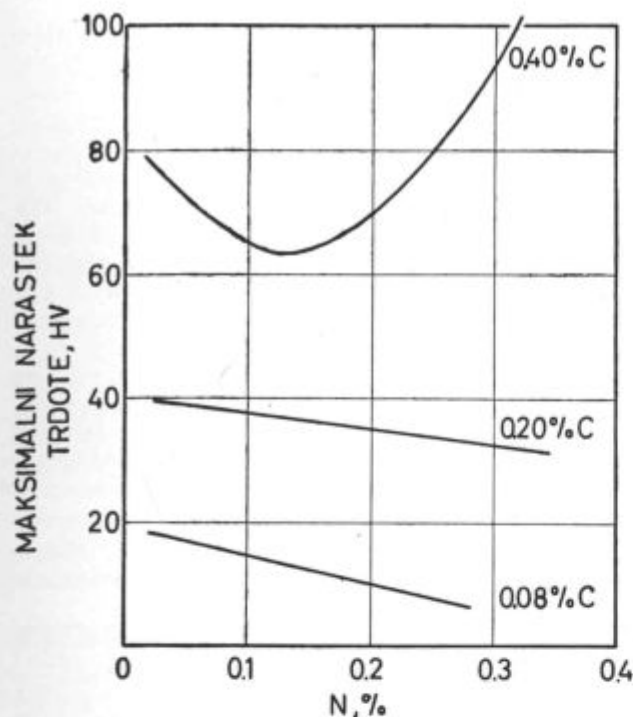


Diagram št. 7 — Vpliv C na narastek trdote avstenita v staranem stanju

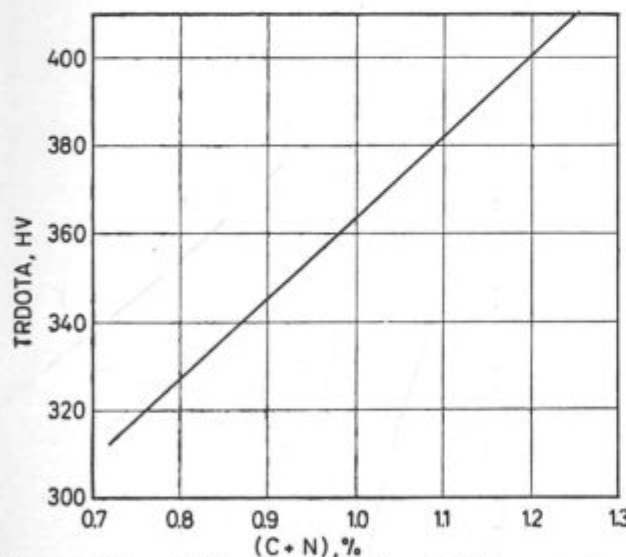


Diagram št. 8 — Vpliv vsote (C+N) na trdoto avstenita

Medsebojni vpliv ogljika in dušika smo raziskovali na avstenitnih jeklih z naslednjo sestavo:

|     | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Ni   | N     |
|-----|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| 101 | 0,52 | 0,30 | 9,17 | 0,048 | 0,020 | 22,08 | 3,92 | 0,35  |
| 102 | 0,58 | 0,26 | 9,30 | 0,040 | 0,010 | 21,32 | 3,86 | 0,47  |
| 103 | 0,07 | 0,19 | 8,14 | 0,020 | 0,032 | 21,36 | 4,40 | 0,38  |
| 104 | 0,43 | 0,14 | 8,44 | 0,038 | 0,024 | 21,84 | 3,96 | 0,032 |

Jeklo s tako visoko vsebnostjo Cr in Mn smo izbrali zato, ker ta dva elementa raztapljata velike količine dušika (do 0,7% N), kar omogoča tudi veliko raztopnost ogljika v homogeniziranem stanju.

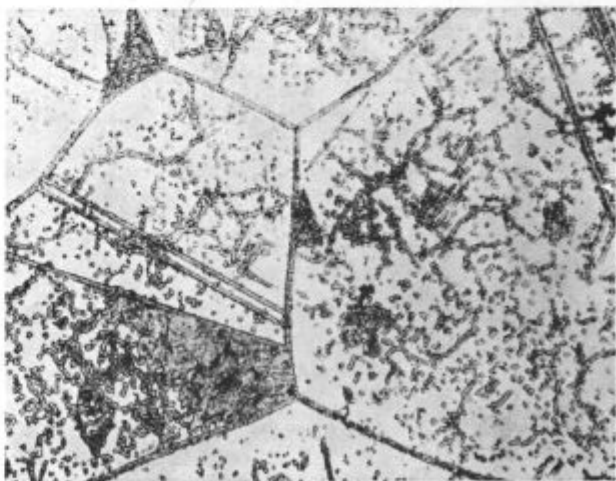
Ta povečana raztopnost ogljika je posledica raztezanja kristalne rešetke, ki jo povzroči dušik ko vstopa intersticijsko v avstenit in se zato pri tako visoki vsebnosti C izenačita vpliva ogljika in dušika na enako vrednost. Ti dve dejstvi, t. j. visoka vsota C + N in izenačen vpliv obeh elementov tudi edina omogočata zasledovanje medsebojnega vpliva obeh elementov na obliko izločkov pri izločitveni utrditvi.

Z rentgenografsko preiskavo pri elektrolizi jekla dobljenih ostankov je dokazano, da so izločki karbidi sestave  $M_{23}C_6$  z zelo majhnimi količinami nitridov  $Cr_2N$ . Oboji izločki pa lahko nastopajo bodisi v obliki lamel kot je to razvidno iz mikrostrukture staranega jekla št. 103 (glej sliko št. 1) ali pa v globularni obliki kot je bilo to ugotovljeno pri jeklu št. 104 (glej sliko št. 2). Oboje jekel pa ima v homogeniziranem stanju enako strukturo, to je avstenit s primarnimi kompleksnimi karbidi Cr in Mn (slika št. 3).



HV 376

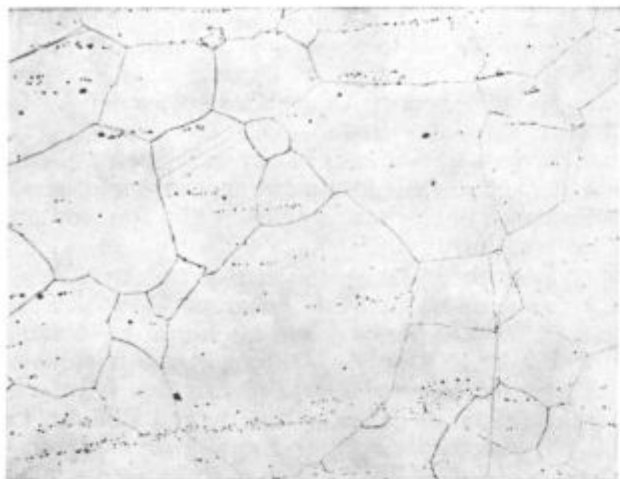
Slika 1  
Jeklo št. 103 — starano



HV 360

Slika 2  
Jeklo št. 104 — starano





HV 235

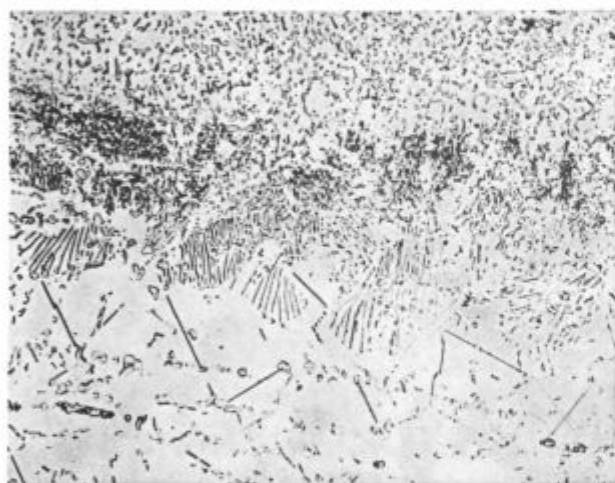
500×

Slika 3  
Jeklo št. 103 in št. 104 — homogenizirano

Ta različna izoblikovanost karbidov in trditvev nekaterih avtorjev, npr. Hsiao in Dulis (2), da izločanje v obliki lamel povzroča večje lezenje jekla, drugih pa, kot npr. Irvine (3), da zmanjšuje duktilnost jekla ter skupna ugotovitev, da lamelarno izločanje škoduje kvaliteti jekla in da jo je zato treba preprečiti, nas je privedla, da smo študirali vpliv obeh elementov na obliko izločenih karbidov. V ta namen smo jeklo št. 103 cementirali in jeklo št. 104 nitrirali. V obeh primerih so bile za uspešno izvedbo difuzije potrebne sorazmerno visoke temperature preko 1000—1050° C.

S kemično analizo smo pozneje ugotovili, da je narasla količina ogljika v cementiranem vzorcu jekla št. 103 od 0,07 % C na 0,82 % C in količina dušika v nitriranem vzorcu jekla št. 104 od 0,032 % N na 0,666 % N.

Po cementiranju oziroma nitriranju smo vzorce homogenizirali pri temperaturi 1180° C. Mikrostrukture tako obdelanih vzorcev so razvidne iz



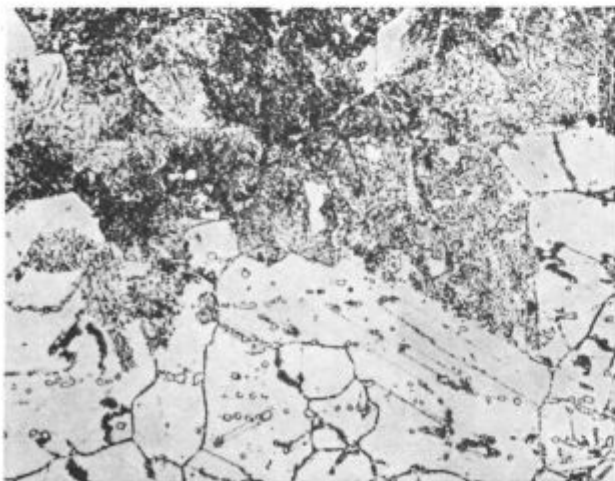
500×

a) po nitriranju in homogenizaciji 1180° C/1<sup>h</sup>



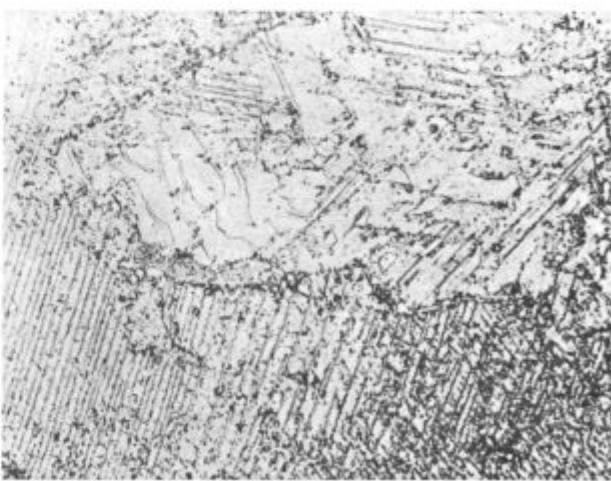
500×

a) po cementiranju in homogenizaciji 1180° C/1<sup>h</sup>



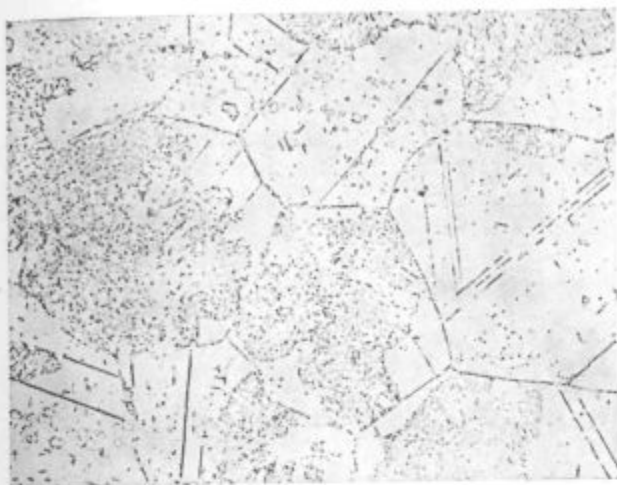
HV 383 — 500×

b) po nitriranju in homogenizaciji ter staranju 760° C/16<sup>h</sup>  
Slika 4  
jeklo št. 103

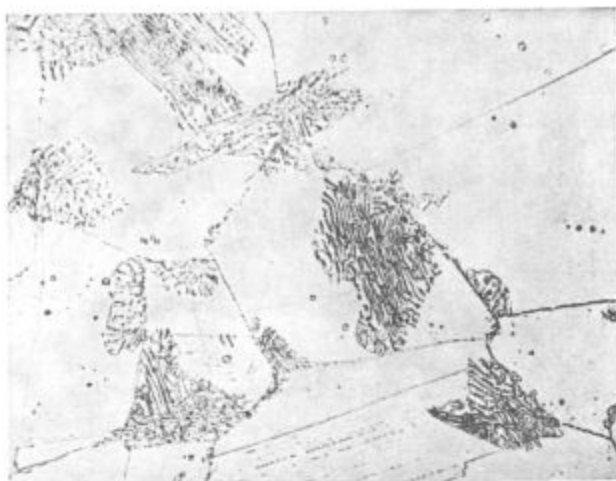


HV 394 — 500×

b) po cementiranju in homogenizaciji ter staranju 760° C/16<sup>h</sup>  
Slika 5  
jeklo št. 104



HV 350 — 500 ×  
Slika 6  
jeklo št. 103 in 104 po staranju



HV 230 — 500 ×  
Slika 7  
jeklo št. 103 in 104 — po staranju — jedro

slik št. 4 a in 5 a. Iz obeh slik vidimo, da nismo v vsej plasti dosegli homogene avstenitne strukture. Vzrok temu je, da z naraščajočo vsebnostjo C ob prisotnosti N narašča temperatura homogenizacije takole:

|          |         |
|----------|---------|
| 0,08 % C | 1050° C |
| 0,20 % C | 1150° C |
| 0,40 % C | 1200° C |

Ker je v zunanjih delih difuzijskih plasti količina ogljika nad 0,4 %, so se zadržali karbidi v prvotnem, to je neraztopljenem stanju.

Po staranju pri temperaturi 760° C smo zasledili tik pod prvotnimi igličastimi karbidi v smeri proti jedru vzorca, lamelarne karbide podobne perlitu (slika št. 4 b zgornji rob in slika 5 b).

Naprej v smeri proti jedru se pojavljajo globularno izločeni karbidi (slika št. 6), ki so enaki za jeklo št. 103 in št. 104.

Prav v jedru, ko je s sigurnostjo izločen vsak vpliv cementacije oziroma nitiranja, pa lahko opazimo zopet lamelarno izločanje karbidov, ki je omejeno predvsem na področje mej kristalnih zrn (slika 7).

Na podlagi izmerjenih mikrotrdot v presledkih 0,02 mm in s predpostavko, da je v primeru cementiranega jekla dušik konstanten oziroma v primeru nitiranega jekla ogljik konstanten preko vsega preseka, lahko s pomočjo diagrama št. 8 določimo približne vsebnosti obeh elementov v posameznih delih difuzijskih plasti.

Tako npr. za sliko 4 b na podlagi diagrama št. 8 predvidevamo, 1,11 % (C + N) — 0,43 % C = 0,68 % N, medtem ko je s kemično analizo ugotovljeno 0,666 % N. V primerih slike 5 b pa 1,18 % (C + N) = 0,38 % C = 0,80 % N. S kemično analizo pa je bila ugotovljena količina ogljika 0,82 % C.

Značilno je, da v obeh teh primerih nastopajo v strukturi lamelarni karbidi.

Za primer globularno izločenih karbidov znaša trdota po Vickersu okrog 350 HV (glej sliko 6), in je vsota po diagramu št. 8 (C + N) = 0,94 %, kar da v primeru cementiranega vzorca 0,38 % N in 0,56 % C, v primeru nitiranega vzorca pa 0,43 % C in 0,51 % N.

### Zaključki

1. Preiskava medsebojnega vpliva ogljika in dušika na obliko izločenih karbidov pri staranju je pokazala, da ima vsota C + N predvsem vpliv na temperaturo homogenizacije.

2. Najvažnejšo vlogo pri izoblikovanju izločenih karbidov ima razmerje C : N, ki mora biti v mejah 1,4 : 1 do 1 : 1,4. Vsako drugo razmerje, ki je občutnejše v korist enemu ali drugemu elementu, pospešuje izločanje lamelarnih karbidov. To je ugotovljeno pri jeklih z nizkim C in visokim N ter v jeklih z visokim C in nizkim N (slika 7).

3. Vsota C + N večja od 1,0, to je povečana količina C + N, povzroča lamelarno izločanje tudi če je razmerje C : N v zahtevanih mejah, ker pri staranju, to je izločitveni utrditvi narastejo koherentne napetosti, ki pogojujejo lamelarno izločanje.

### Literatura:

1. K. J. Irvine, DT Llewellyn in F. B. Pickering — JISI 1961, 199 st. 153
2. C. M. Hsiao, H. T. Dulis. Trans. Americ. Soc. Metal. 1960, 52 Str. 855
3. isto kot 1.
4. Poročilo raziskovalnega oddelka Železarne Jesenice

## Vpliv mangana na strukturo avstenitnega nerjavečega jekla legiranega z dušikom

### Splošno

Vsa nerjaveča avstenitna jekla so visoko legirana jekla. Že sama beseda »nerjaveča« pove, da so ta jekla obstojna v številnih kislinah, bazah itd. Ta obstojnost pa je odvisna od agresivnega sredstva ter od njegove temperature — in je največja pri nizkih temperaturah in pri nizkih koncentracijah agresivnih komponent. Z naraščanjem temperature in koncentracije pa ta obstojnost pada. Ta padec korozijske obstojnosti ni linearen in ni za vsa sredstva in vsa nerjaveča jekla enak. Zato uporabljamo vrsto kvalitet.

Če dodamo jeklu posamezne legirne elemente, se močno spremenijo njegove mehanske, fizikalne ter kemične lastnosti. Nerjaveča jekla so legirana predvsem s Cr, Ni, Mo itd. Korozijska obstojnost jekel pa narašča predvsem z naraščajočo vsebnostjo Cr. Jeklo, ki vsebuje pod 13% Cr, ni odporno proti koroziiji. Šele nad to vrednostjo Cr pride do pasivnosti površine. Ostali legirni elementi samo

še povečajo to odpornost jekel proti kislini v raznih reagentih.

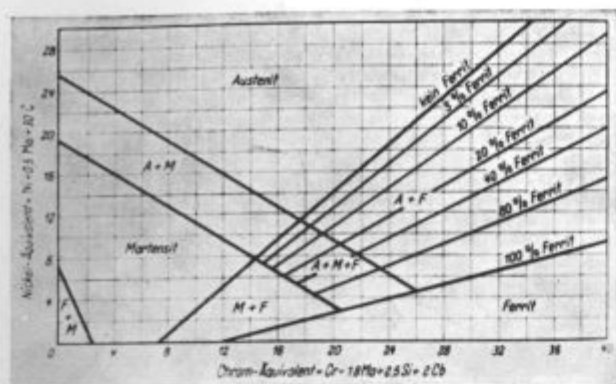
Vsa nerjaveča jekla razdelimo z ozirom na kemično sestavo v tri osnovne skupine in to v Cr, CrNi ter CrMn jekla. Nekatere lastnosti teh jekel so prikazane v tabeli I.

Vsa nerjaveča jekla pa nimajo enake strukture. Odvisno od vsebnosti posameznih legirnih elementov lahko dobimo feritno, avstenitno ter martenzitno strukturo ali kombinacijo dveh struktur. Te različne strukture pa dobimo glede na to, ali so ta jekla legirana z nekaterimi alfatvornimi elementi kot so Cr, Si, Mo, Ti itd. ter z gamatvornimi elementi kot so Mn, Ni, N, C.

Vpliv dveh ali več legirnih elementov ne moremo sešteti. Poznano je, da dva elementa skupaj močnejše učinkujeta kot bi lahko pričakovali od vsote posameznih. Zato obstoja še vedno malo diagramov, ki bi tolmačili vpliv teh spremljevalnih legirnih elementov.

Tabela 1: Karakteristične lastnosti nerjavečih jekel

| Osnovna kemična sestava jekel | Cr                                                                                                                                   |                      | Cr-Ni                                                                                   | Cr-Mn                                                                           |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                               | martenzitna                                                                                                                          | feritna              |                                                                                         |                                                                                 |
| Fizikalne lastnosti           | dajo se kaliti                                                                                                                       | se ne dajo kaliti    | Avstenitna se ne dajo kaliti                                                            |                                                                                 |
| Mehanske lastnosti            | kot ostala konstrukcijska in orodna jekla                                                                                            | manj žilava          | bolj žilava kot ostala konstrukcijska jekla. V razmerju s trdnostjo majhna meja lezenja |                                                                                 |
| Hladna predelava              | odvisno od trdote in vsebnosti Cr in C                                                                                               |                      | Slabša na račun močne nagnjenosti k utrjenju                                            |                                                                                 |
| Sposobnost varjenja           | samo pri nizkem % C                                                                                                                  | se dajo slabo variti | odlično se dajo variti                                                                  |                                                                                 |
| Korozijska obstojnost         | dobra samo v pasiviziranem stanju, to pomeni dobro obstojna proti rjavenju in HNO <sub>3</sub> , drugače samo protislabilim kislinam |                      | Dobra v aktivnem stanju, torej obstojna proti nekaterim močnejšim kislinam              | Dobra samo v pasivnem stanju, to je v glavnem proti rjavenju in slabim kislinam |
| Ognjeodpornost                | razmeroma dobra v medijih vsebujočih S in C                                                                                          |                      | Slaba v medijih vsebujočih S in C                                                       | Omejena na račun visokega Mn                                                    |



Slika 1  
Strukturalni diagram CrNi jekel, upoštevajoč legirane elemente

Če želimo torej vsaj približno določati kakšno strukturo naj bi imelo jeklo, moramo sešteti koeficiente, ki odgovarjajo deležu in lastnostim elementov. Te ekvivalente prištejemo nato kromovi ali nikljevi vsebnosti po naslednji empirični formuli:

$$K_{Cr} = Cr + 1.8 Mo + 2.5 Si + 2 Nb (Ti)$$

$$K_{Ni} = Ni + 0.5 Mn + 30 C$$

Dobljene vrednosti vnesemo v Schöfflerjev diagram, ki je razviden na sliki 1.

Vendar tudi ta diagram ni popoln in velja le za strukture, ki nastanejo pri hitri ohlavitvi z visokih temperatur.

### Avstenična nerjaveča jekla

V to skupino spadajo jekla tipa 18-8. So izredno odporna proti kislinam. To odpornost pa daje jeklu predvsem Cr in Ni. Vsebnost Cr je skoraj konstantna in se giblje med 17–19 %, medtem ko niha vsebnost Ni med 8–12 % in celo do 14 %. Za izboljšanje odpornosti proti kislini pa legiramo jeklo še z drugimi elementi kot so Mo, Cu, Ti, Nb itd. Zadnja dva elementa dajemo jeklu predvsem za povečanje njegove odpornosti proti interkristalni koroziji.

Vsi ti elementi vplivajo delno tudi na druge lastnosti jekla, vendar jih ne dajemo jeklu s tem namenom.

Od fizikalnih lastnosti je za predelavo jekla v vročem stanju izredno važna toplotna prevodnost. Poznano je, da je toplotna prevodnost avstenitnih jekel pri 20° C za približno 50 % manjša kot pri navadnih C jeklih pri isti temperaturi. Ta prevodnost pa narašča s temperaturo hitreje kot pri C jeklih, tako da se prevodnosti obeh izenačita pri temperaturi 700–800° C. Prav zaradi tega pojava je čas predgrevanja avstenitnih jekel daljši. Če je le mogoče, je treba ta nerjaveča avstenitna jekla počasi predgrevati na temperaturo 700–800° C in šele nato hitro ogreti na temperaturo valjanja ali kovanja.

Tališče jekel tipa 18-8 je v temperaturnem intervalu 1400–1450° C, odvisno pač od vsebnosti elementov. Specifično teža imajo približno 7.8 kg na dm<sup>3</sup>. Jeklo ima praviloma avstenitno strukturo in je nemagnetno. Rahlo magnetno postane le tedaj, če ga legiramo z alfatvornimi elementi, kot npr. Mo ali če jeklo s čisto avstenitno strukturo hladno valjamo ali vlečemo. Pri tem se iz avstenitne osnove izločata ferit in martenzit.

Pri mehanskih lastnostih je za ta jekla značilno, da imajo zelo nizko mejo razteznosti in zelo visoko vrednost za raztezek in kontrakcijo. Trdnost jekla se giblje med 50–70 kp/mm<sup>2</sup>. Jeklo ima velike sposobnosti hladnega deformiranja, vendar z naraščajočo hladno deformacijo zelo hitro utrdi. Sposobnost za hladno deformacijo pa zelo hitro pada z naraščajočo vsebnostjo C.

Varilne sposobnosti te skupine jekla so odlične.

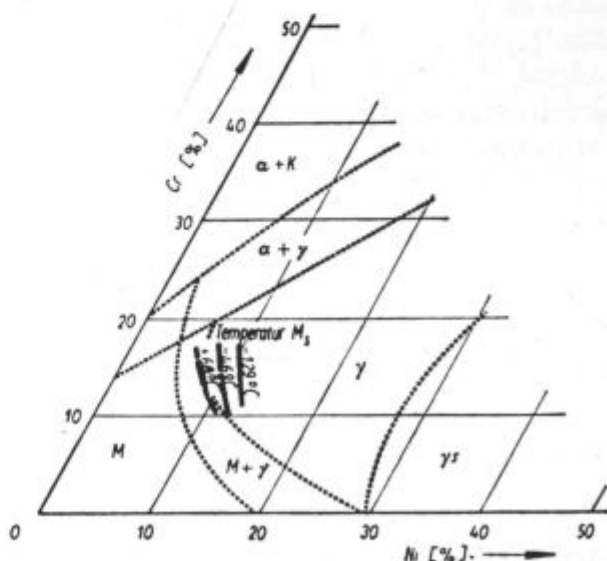
Edino toplotno obdelavo, ki jo izvedemo na teh jeklih z namenom, da izboljšamo mehanske lastnosti ter da postane jeklo primerno odporno proti kislini, je gašenje, ki ga izvedemo s temp. 1050–1100° C z ohlajevanjem v vodi.

### Vpliv posameznih elementov na spremembo faznih struktur

#### Vpliv Cr in Ni

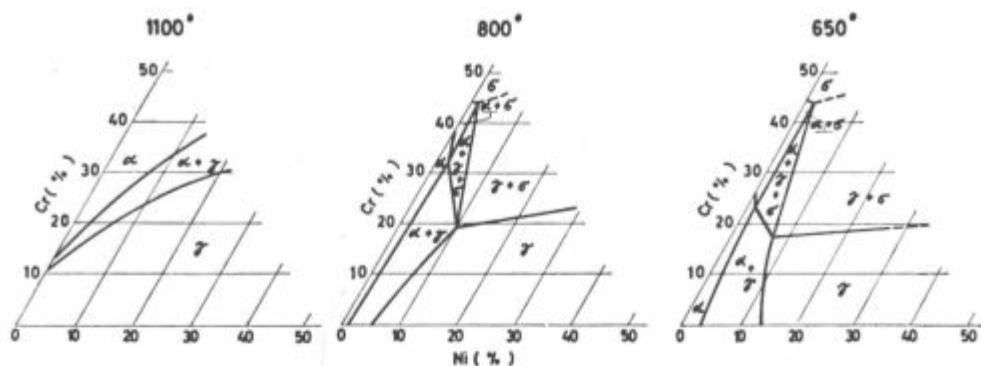
Cr je element, ki ga prištevamo k skupini alfatvornih elementov. Pri nerjavečih avstenitnih jeklih nastopa skupaj z Ni, ki je izrazit gamatvorni element.

Ker je delovanje obeh elementov tesno povezano med seboj, bomo njun vpliv obravnavali skupaj. V ta namen nam služijo ternarni diagrami Fe-Cr-Ni. Za študij običajno uporabljamo izotermične preseke pri različnih temperaturah, ki nam omogočajo pregled struktur od solidus črte pa do sobne temperature.



Slika 2  
Diagram stanja Fe-Cr-Ni pri 20° C





Slika 3  
Izotermni preseki sistema Fe-Cr-Ni

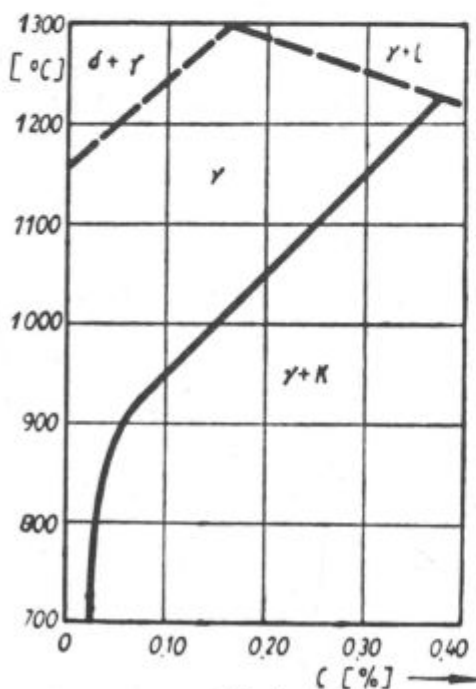
Kakor je iz ternarnih diagramov na slikah 2 in 3 razvidno, je jeklo tipa 18-8 vseskozi avstenitno in zato ta jekla niso kaljiva.

Več o vplivu Cr in Ni bomo govorili v naslednjih poglavjih.

### Vpliv C

Ogljik je izredno močan gamatvorni element. Kakor je razvidno iz slike 4, se topnost C v avstenitu spreminja in je odvisna od temperature.

Avstenit topi pri 1100°C približno 0,25 % C. Če pa jeklo vsebuje večje količine C kot ga lahko topi pri določeni temperaturi, potem se izločajo iz avstenita kompleksni karbidi Cr in Fe tipa (Cr-Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.



Slika 4  
Topnost ogljika v avstenitu

Topnost C torej s temperaturo pada in povsod tam, kjer imamo opravka s spremembo temperature, lahko pričakujemo njegovo izločanje ali raztapljanje. Če jeklo segrejemo na temperaturo

gašenja se tako C raztopi v trdi raztopini avstenita. Pri počasnem ohlajevanju pa pride do izločanja C po kristalnih mejah, kjer se tvorijo Cr karbidi.

Izločanje in raztapljanje C oziroma Cr karbidov je vezano na difuzijske procese. Pri temperaturi izločanja C je difuzija Cr iz gama trdne raztopine premajhna, da bi izenačila koncentracijo Cr v neposredni bližini nastalih karbidov. V neposredni bližini karbidov je torej območje revno na Cr in vsebnost istega pade celo pod 12 %, to je pod vrednostjo, kjer jeklo ni več pasivno. Zaradi tega pojava pride do poslabšanja korozijske obstojnosti jekla. Da se temu pojavi izognemo, legiramo jeklo s stabilizatorji, ki zaradi večje proste energije vežejo nase C in tako onemogočijo nastanek Cr karbidov.

### Vpliv N

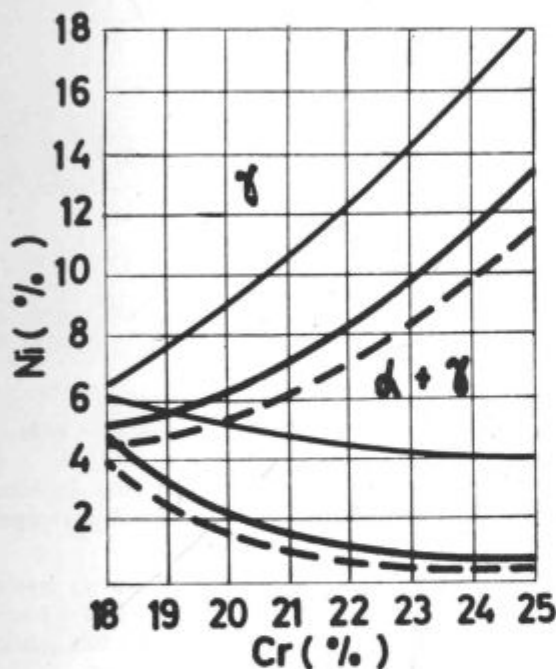
Dušik je element, ki zelo razširja avstenitno območje. Dodajamo ga namenoma nerjavečim jeklom za nadomestilo Ni. Dušik se veže v jeklu s Cr in Mn ter tvori nitride. S tem zmanjša vsebnost prostega Cr v jeklu in na ta način delež ferita. Fazne meje se premaknejo k višjim procentom Cr.

Pri jeklih tipa 18-8 učinkuje dodatek N na stabilizacijo avstenitne strukture. Cr nitridi, ki se tvorijo, imajo to lastnost, da znižajo kritično ohlajevalno hitrost in podpirajo martenzitno premeno. Zaradi tega je izločanje škodljivih Cr karbidov nekoliko počasnejše, kar je posebno ugodno pri kratkotrajnem ogrevanju jekla na temperaturnem območju 500—800°C. Vseeno pa so ta jekla podvržena interkristalni koroziji, če jih dalj časa segrevamo na tem temperaturnem območju. Dodatek Ti ne preprečuje nagnjenosti k interkristalni koroziji, ker se Ti zaradi velike afinitete do dušika veže v TiN in ne v TiC. Ugodnejše učinkuje v tem smislu Nb in Ta, ki imata večjo afiniteto do C kot do N. Najbolj učinkovito vpliva na zmanjšanje nagnjenosti k interkristalni koroziji znižanje C pod 0,05 %. Izločanje Cr nitridov nima kvarnega pliva na odpornost jekla proti interkristalni in frontalni koroziji.

Navadna C jekla vsebujejo 0.002 — 0.012 % N. Preiskave raztopnosti N v Cr jeklih pa so pokazale da se količina dušika lahko giblje v mejah približno 1/100 vsebnosti Cr. Pri Mn jeklih znaša količina N tudi 1/100 vrednosti Mn.

Dušik dodajamo jeklu v obliki FeCr nitre in FeMn nitre. Koliko % N je potrebno za nadomestilo neke določene količine Ni, nam pove diagram na sliki št. 5.

— Austenit - Ferit območje brez N  
 — " " z 0,15 % N  
 - - - " " z 0,25 % N



Slika 5

Premaknitev mejnih linij v strukturnem diagramu Cr-Ni jekel z N

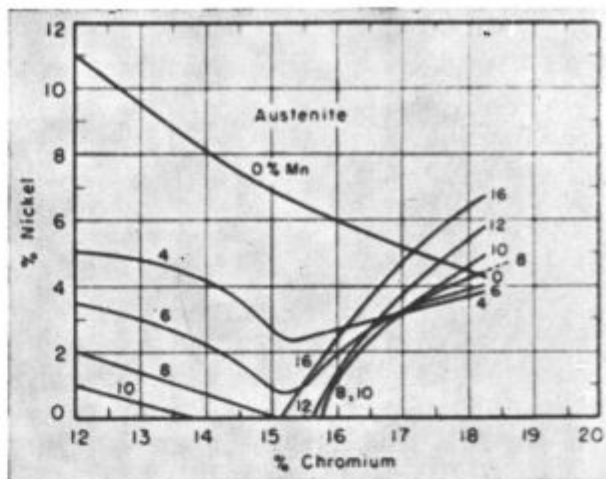
Iz diagrama je razvidno, da se z dodatkom N meje avstenitno-feritnega območja premaknejo k nižjim % Ni. Iz tega sledi, da z ozirom na višino Cr lahko z 0.15 % N nadomestimo 2 — 4 % Ni in z 0.25 % N okrog 2.5 — 6 % Ni.

#### Vpliv Mn

Mangan je gamatvorni element. Z dodatkom mangana Cr-Ni jeklom dosežemo poleg dobre korozijske obstojnosti tudi visoko stabilnost avstenita, vendar mora vsebovati jeklo nad 15 % Cr.

Kako vpliva Mn na velikost avstenitnega območja Cr-Ni jekla, pokaže diagram na sliki 6.

Tudi Mn lahko nadomesti del Ni v teh jeklih, čeprav je za polovico šibkejši gamatvorni element kot Ni.



Slika 6

Vpliv Mn na velikost avstenitnega območja pri jeklih z 0.10—0.12 % C in 0.08—0.15 % N

Poleg tega, da nam Mn poveča stabilnost avstenita, poveča tudi sposobnost vroče predelave jekla. Vendar Ni ne moremo v celoti nadomestiti z Mn, ker tako jeklo ni korozijsko obstojno in nima dobrih mehanskih lastnosti.

#### Izdelava, predelava ter lastnosti jekla 18-4-N Izdelava jekla

Z ozirom na visoke cene in pomanjkanje Ni so v svetu pričeli izdelovati nerjaveče avstenitno jeklo na bazi Mn ter N. Iz literature poznamo, da N lahko nadomesti del Ni s tem, da jeklo obdrži iste fizikalne karakteristike, posebno pa odpornost proti kislini, kot jeklo 18—8.

V RO smo izvedli potrebne preiskave, da bi ugotovili vpliv različnih koncentracij Mn na homogenost strukture ter na fizikalne lastnosti jekla pri sicer nespremenjeni vsebnosti Cr, Ni ter N.

Vse taline smo izdelali v VF laboratorijski talilni peči. Kot vložek smo uporabljali nizkoogljično jeklo, ki smo ga legirali z FeCr affiné, FeCr nitré, FeMn suraffiné ter s potrebnim Ni. Jeklo smo vlili v 5 kg bloke.

Dušik smo dodajali v talino v obliki 4 % FeCr nitré in to v takih količinah, da smo dosegli nje-govo maksimalno raztopnost v jeklu glede na vsebnost Cr in Mn.

Izdelali smo številne taline, ki so vsebovale od 0.5 — 10 % Mn. Vsi ostali elementi so bili v predpisanih mejah in pri vseh talinah konstantni, tako da smo lahko sledili le vplivu različnega % Mn.

Istočasno smo izdelali tudi nekaj klasičnih talin tipa 18—8 brez stabilizatorjev za primerjavo rezultatov s talinami legiranimi z Mn in N.

Tabela 2

| Talina             | C %       | Si %    | Mn %    | Cr %  | Ni %    | N %      |
|--------------------|-----------|---------|---------|-------|---------|----------|
| 1                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 0,5—1,0 | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| 2                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 3 —3,5  | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| 3                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 4 —4,5  | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| 4                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 5 —5,5  | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| 5                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 7 —7,5  | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| 6                  | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 9 —10   | 17—19 | 3,5—4,5 | 0,2—0,25 |
| Primerjalna talina | 0,08—0,12 | 0,3—0,5 | 0,8—1,0 | 17—19 | 8 —10   | —        |

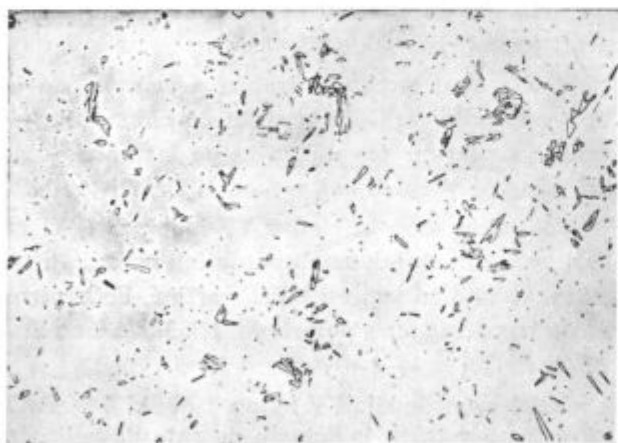
Vlite bloke smo počasi ogrevali do temperature 800° C in nato hitro ogreli na temperaturi kovanja 1150° C. Bloke smo kovali v palice Ø 15 milimetrov. Palice smo nato gasili s temperaturo 950 — 1200° C in to v intervalu po 50° C.

#### Metalografska preiskava

Da bi ugotovili homogenost strukture ter optimalno temperaturo gašenja, smo vse toplotno obdelane palice metalografsko preiskali. Zasledovali smo vpliv toplotne obdelave in vsebnost Mn na delež ferita v strukturi. Ugotovili smo:

Taline, ki so vsebovale izpod 5 % Mn so imele heterogeno avstenitno feritno strukturo, one z nad-5 % Mn pa popolnoma homogeno avstenitno strukturo.

V talini z 1 % Mn gašeni s temperaturo 1100° C smo zasledili v avstenitni osnovi velike količine ferita. Kakor je razvidno iz slike 7, nastopa ferit v karakteristični igličasti obliki. Meje avstenitnih zrn niso vidne, ker smo obrus jedkali z jedkalom za odkrivanje ferita.

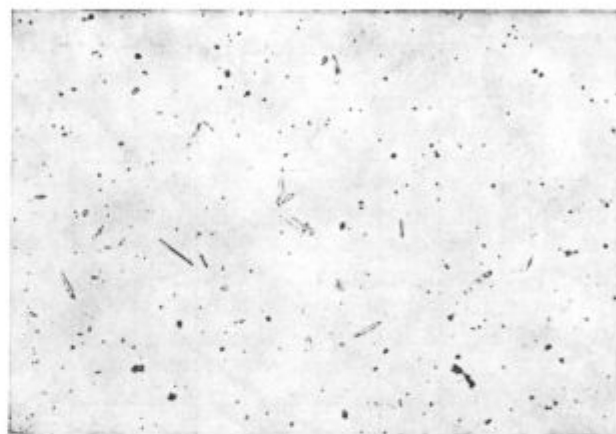


Slika 7 — 100×

Jedkano z ortonitrofenolom. Gašeno 1100° C — voda

V talini s 3 % Mn gašeni s temperature 1100° C pa smo zasledili neprimerno manjše količine ferita. Kakor je razvidno iz slike 8 nastopa ferit v drobni igličasti obliki enakomerno razpršeni po vsem preseku.

Popolnoma avstenitno strukturo pa smo dobili pri talini s 5 % Mn, ki jo vidimo na sliki 9.



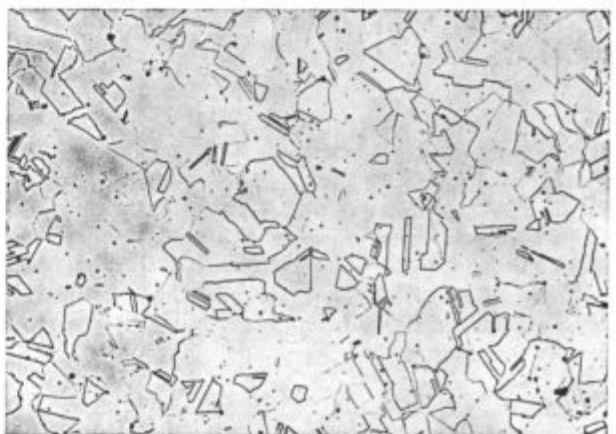
Slika 8 — 100×

Jedkano z ortonitrofenolom. Gašeno 1100° C — voda

Avstenitna zrna so lepo vidna in zelo drobna. Feritnih zrn ni opaziti. Talino smo gasili s temperature 1100° C v vodi.

Vse ostale taline z nad 5 % Mn pa so imele popolnoma homogeno avstenitno strukturo identično tisti, ki jo prikazuje slika 9. Zato teh struktur ne bomo navajali.

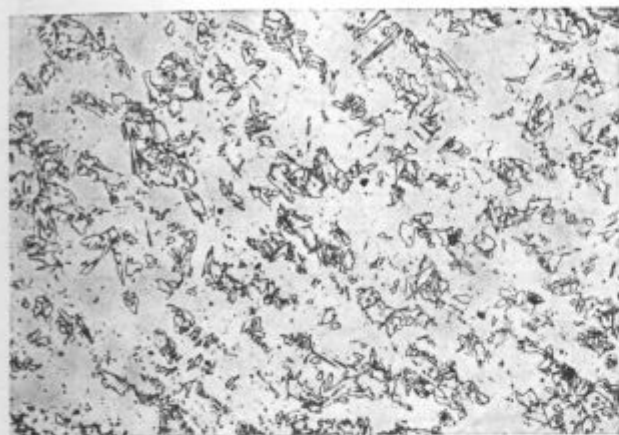
Tudi temperatura gašenja vpliva na izločanje ferita. Ugotovili smo, da delež ferita v avstenitu narašča s padajočo temperaturo gašenja.



Slika 9 — 100×

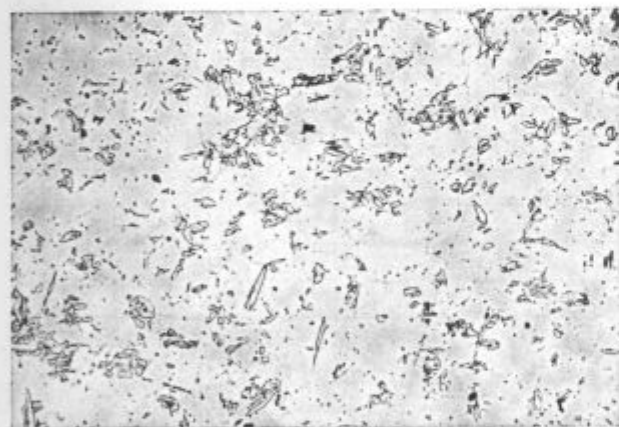
Jedkano z V 2A jedkalom. Gašeno 1100° C — voda

Na sliki 10 vidimo strukturo taline z 1% Mn, gašeno s temperature 950° C v vodi. Če primerjamo to strukturo s strukturo iste taline samo gašene s temperature 1100° C — glej sliko 7 — bomo ugotovili, da vsebuje talina gašena z nižje temperature neprimerno večjo količino ferita. Ferit nastopa v obeh primerih v igličasti obliki.



Slika 10 — 100×  
Jedkano z ortonitrofenolom. Gašeno 950° C — voda

Isto smo zasledili tudi pri talini s 3% Mn, ki jo prikazuje slika 11.



Slika 11 — 100×  
Jedkano v zlatotopki. Gašeno 950° C — voda

Tudi pri tej strukturi je količina ferita neprimerno večja kot pri isti talini vendar gašeni s temperature 1100° C — glej sliko 8. Pri talini s 5% Mn, gašeni s temperature 950° C smo dobili popolnoma avstenitno strukturo identično strukturi na sliki 9. Za primerjavo navajam še strukturo jekla tipa 18—8 gašenega s 1100° C. Struktura je popolnoma avstenitna brez izločenega ferita. Slika 12. Tudi pri gašenju s temperature 950° C smo dobili enako strukturo.

Če sedaj primerjamo vpliv toplotne obdelave in vpliv vsebnosti Mn na delež ferita v strukturi, lahko poudarimo, da z rastočo koncentracijo Mn pada delež ferita v strukturi pri enaki temperaturi



Slika 12 — 100×  
Jedkano z V 2A jedkalom. Gašeno 1100° C — voda

gašenja. Prav tako pada delež ferita z rastočo temperaturo gašenja pri sicer enaki vsebnosti Mn.

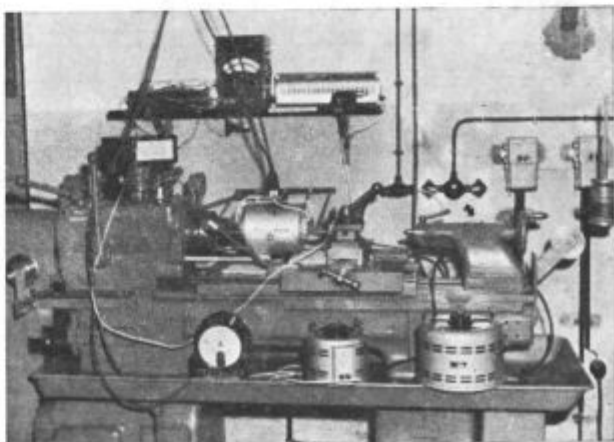
#### Obdelovalnost jekla

Iz vsega navedenega lahko zaključimo, da smo dosegli popolno homogenizacijo avstenitne strukture pri temperaturi gašenja 1100° C ter pri vsebnosti Mn nad 5%.

Vendar smo sedaj morali ugotoviti pri vseh poizkusnih talinah tudi sposobnost deformacije v vročem, ker je le-ta funkcija homogenosti strukture jekla. To smo ugotavljali s torzijskimi poizkusi.

Torzijske preizkuse smo opravili na preurejeni univerzalni strožnici z vgrajeno ogrevno pečico. Shematski prikaz tega stroja vidimo na sliki 13.

Preizkusna palica je bila vpeta na eni strani v fiksno, na drugi strani pa v vrtečo se glavo s 100 obratov v minuti. Pri torzijskih preizkusih smo merili število vrtljajev do porušitve pri posameznih temperaturah. Temperaturo pri kateri smo dosegli maksimalno število vrtljajev, smo smatrali za optimalno temperaturo vroče predelave. Literatura navaja sicer, da je začetna temperatura valjanja približno za 30° C pod temperaturo, pri kateri dosežemo optimalno število vrtljajev.



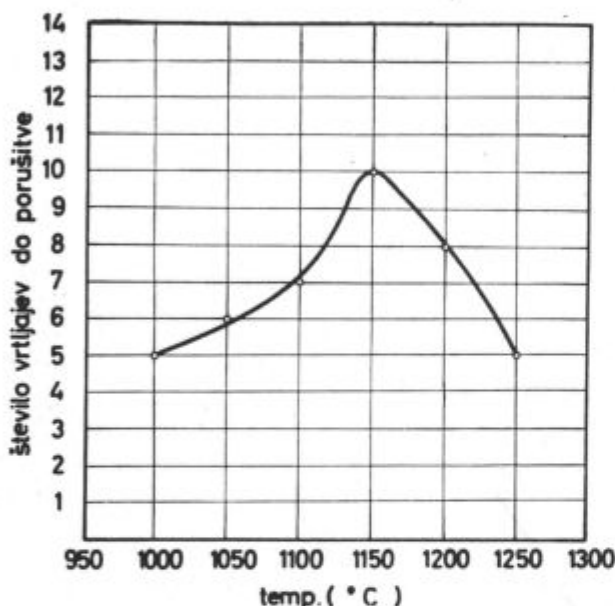
Slika 13  
Shema torzijskega preizkusa



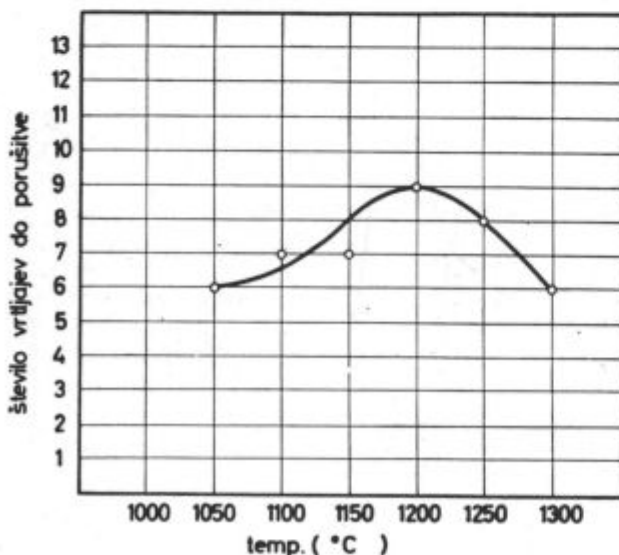
Ugotovitve torzijskih poizkusov smo nanašali na diagrame. Navajali bomo samo vrednosti talin z vsebnostjo 1, 3, 5, 10 % Mn.

Plastičnost zgoraj navedenih talin smo določevali pri temperaturi 900 — 1300° C v intervalu od 50° C. To temperaturno območje smo si izbrali zato, ker odgovarja temperaturnemu območju valjanja. Število vrtljajev, ki smo jih dosegli pri neki določeni temperaturi dokler se niso palice prelomile, smo nanašali v diagram in tako dobili tako imenovane deformacijske krivulje.

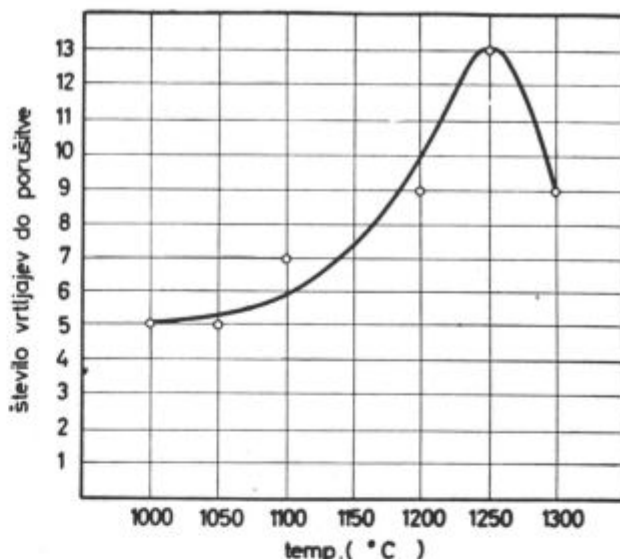
Primer take krivulje vidimo na sliki 14. Na abscisi je nanešena temperatura na ordinati pa število vrtljajev do porušitve. Poizkuse smo opravili na palici z 1 % Mn. Čas segrevanja na temperaturo znaša 30 min. Optimalne pogoje smo dosegli



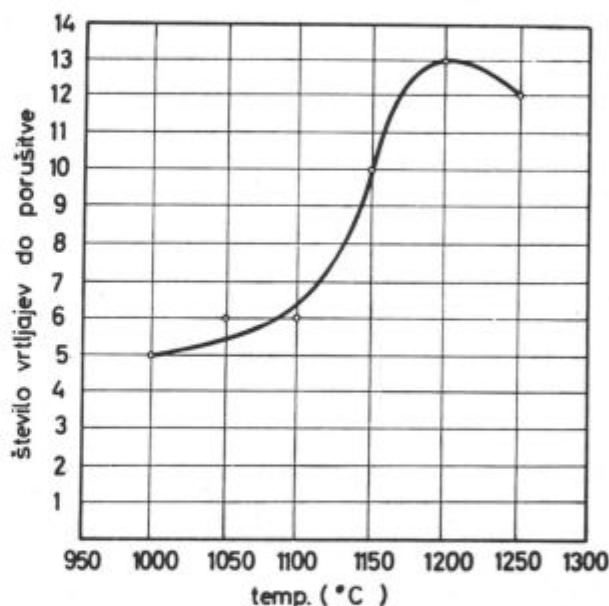
Slika 14  
Deformacijska krivulja taline z 1 % Mn



Slika 15  
Deformacijska krivulja taline s 3 % Mn



Slika 16  
Deformacijska krivulja taline s 5 % Mn



Slika 17  
Deformacijska krivulja taline z 10 % Mn

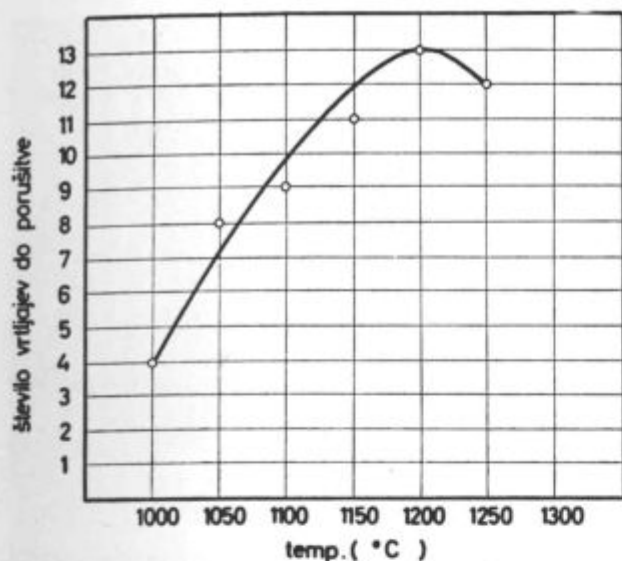
pri temperaturi 1150° C in to 10 vrtljajev do porušitve.

Na sliki 15 pa vidimo tako deformacijsko krivuljo palice taline s 3 % Mn. Temperatura kjer nastopa maksimalno število torzij se je za razliko od prejšnje taline premaknila na 1200° C, plastičnost jekla pa je nekoliko nižja.

Slika 16 prikazuje deformacijsko krivuljo taline s 5 % Mn. Optimalna temperatura deformacije je pri temperaturi 1250° C.

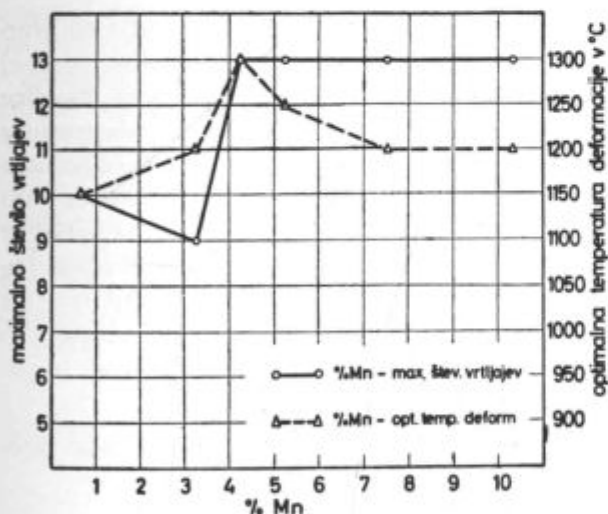
Slika 17 prikazuje deformacijsko krivuljo taline z 10 % Mn. Krivulja se nekoliko razlikuje od tiste na sliki 16, vendar so vrednosti, števila vrtljajev do porušitve enaka.

Za primerjavo navajam še deformacijsko krivuljo taline tipa 18—8. Slika 18.



Slika 18  
Deformacijska krivulja taline 18/8

Na osnovi rezultatov, ki so vrisani na navedenih diagramih, smo izdelali skupno deformacijsko krivuljo. Iz teh diagramov smo povzeli za vsako talino obe karakteristiki, to je optimalno temperaturo deformacije in maksimalno število vrtljajev in nanašali v diagram v odvisnosti od vsebnosti Mn. Slika 19.



Slika 19  
Vpliv Mn na optimalno temperaturo deformacije in na maksimalno število vrtljajev

Iz zgornjega diagrama lahko sklepamo, da je plastičnost talin z nizko vsebnostjo Mn zelo slaba. Ta plastičnost pa doseže maksimum pri talini s 5% Mn. Tako obnašanje maksimalnega števila vrtljajev v odvisnosti od % Mn si lahko tolmačimo na podlagi rezultatov metalografskih preiskav. Taline z nizko vsebnostjo Mn imajo zelo heterogeno strukturo, ki je vzrok za zelo slabo plastičnost

taline. Pri talini s 5% Mn pa nastopi že popolnoma avstenitna struktura in posledica tega je povečano število vrtljajev do porušitve. Ker se ta struktura z rastočim % Mn ne spremeni, tudi število vrtljajev ostane isto.

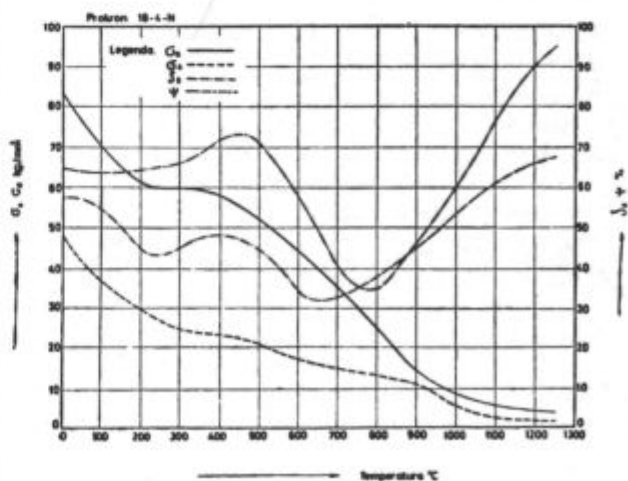
Optimalna temperatura deformacije se odvisno od % Mn ponaša nekoliko drugače. Iz diagrama na sliki 19 vidimo, da temperatura deformacije narašča z naraščajočo vsebnostjo Mn vse dokler ne doseže svoj maksimum pri 5% Mn.

Na podlagi diagramov optimalne deformacijske sposobnosti jekla lahko zaključimo:

1. Talina z več kot 5% Mn ima isto sposobnost deformacije kot jeklo tipa 18—8.
2. Talina z več kot 5% Mn ima glede na homogeno strukturo najboljšo deformacijsko sposobnost.
3. Najvišjo temperaturo deformacije v vročem ima talina s 5% Mn.

### Mehanske lastnosti

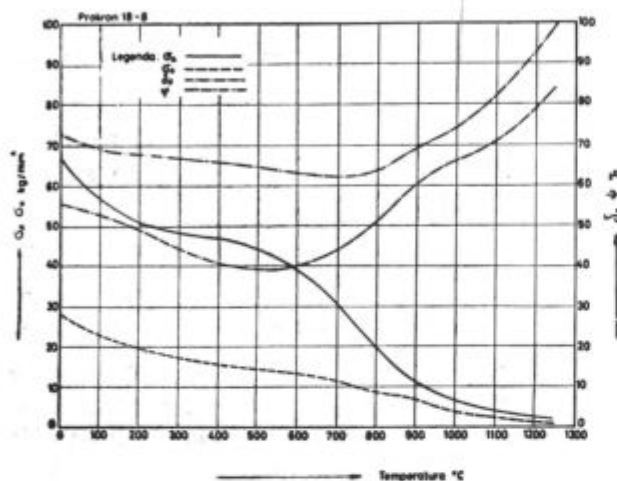
S torzijskimi preiskavami deformacij v vročem smo ugotovili, pri kateri temperaturi ima jeklo določene sestave najboljšo sposobnost deformacije. nismo pa dobili odgovora o odpornosti oziroma trdnosti jekla pri temperaturi tople predelave. Da bi to ugotovili, smo pri talinah z različnimi % Mn ter primerjalni talini tipa 18—8 preiskali trdnosti pri različnih temperaturah. Preiskave smo izvedli v temperaturnem območju 20 — 900° C in to v intervalu 100° C ter v temperaturnem območju 900 — 1250° C v intervalu 50° C. Ker smo najboljše pogoje obdelovalnosti v vročem dosegli pri 5% Mn, navajamo trdnost te taline. Doseženi rezultati so razvidni iz slike 20.



Slika 20  
Mehanske vrednosti taline s 5% Mn v temperaturnem območju 20—1250° C

Kakor je iz diagrama razvidno, meja razteznosti ter meja porušitve normalno padata z naraščajočo temperaturo, drugače pa se obnašata krivulji raztezka in kontrakcije, katerih vrednost v temperaturnem območju 500—800° C močno pade in sicer zaradi izločanja Cr karbidov po kristalnih mejah avstenita. Ta pojav bomo obravnavali pozneje pri korozijski obstojnosti jekel. Strukturo s tako izločenimi Cr karbiti vidimo na sliki 29.

Za primerjavo navajam še diagram mehanskih vrednosti taline tipa 18—8. Palice so bile trgane pod popolnoma enakimi pogoji kot prej omenjene taline — slika 21.



Slika 21

Mehanske vrednosti taline 18-8 v temperaturnem območju 20—1250° C

Če primerjamo oba diagrama, vidimo, da pri temperaturi plastične deformacije ni med njima praktično bistvenih razlik. Posebno nizke so vrednosti za mejo razteznosti in mejo porušitve.

Iz vsega navedenega lahko sklepamo, da se jeklo s 5% Mn da normalno valjati ali kovati tako kot nerjaveče jeklo tipa 18-8.

### Preiskave korozijske obstojnosti

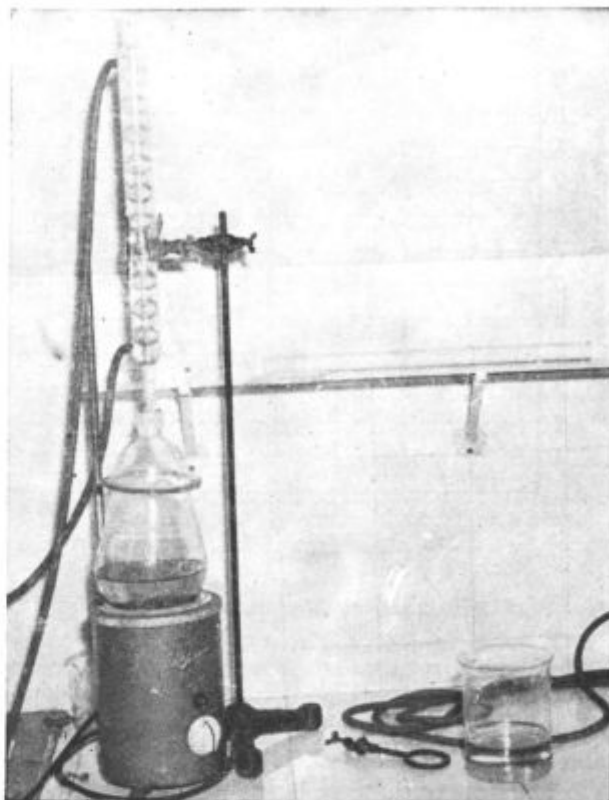
Po raziskavah deformacijske sposobnosti talin smo preiskovali še korozijske obstojnosti jekla 18-4-N. Ker naj bi bilo to jeklo popolnoma enakovredno jeklu 18—8 brez stabilizatorjev, smo izvedli tudi v tem primeru vse preiskave vzporedno.

Poseben poudarek je bil ravno na raziskavah korozijske obstojnosti talin 18-4-N legiranih z različnim % Mn.

Ker se korozija pojavlja v različnih oblikah, smo poleg ugotavljanja interkristalne korozije v Straussovi raztopini ugotavljali tudi stopnjo frontalne korozije v istem mediju.

### Interkristalna korozija

Interkristalno korozijo smo določevali na dva različna načina in sicer vizuelno na upogibih zvarjenih ploščic ter metalografsko.

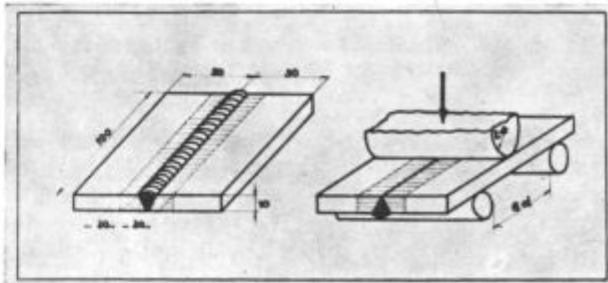


Slika 22

Aparatura za preizkus po Straussu

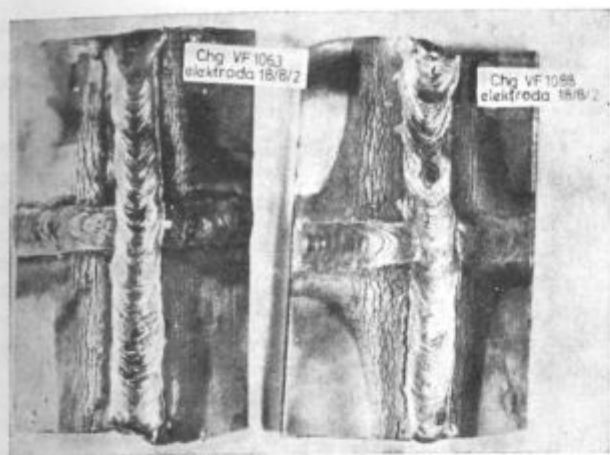
Za določevanje interkristalne korozije na zvarjenih vzorcih smo izdelali za vsako talino posebej ploščice primerne velikosti ter jih zvarili. Ploščice so bile pred varjenjem gašene s temperature 1100° C. Pri varjenju smo uporabljali domačo elektrodo tipa 18-8-2. Tako pripravljene ploščice smo preizkusili v Straussovi raztopini. To je preizkus v vreli raztopini destilirane vode, hidriranega bakrovega sulfata, koncentrirane H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ter Cu ostružkov. Poizkus traja 15 ur. V ta namen smo uporabljali posebno napravo s hladilnikom in pečico, ki jo vidite na sliki 22.

Dimenzijo ploščic, obliko zvara ter način upogibanja kaže slika 23.



Slika 23

Velikost vzorcev ter način upogibanja



Slika 24  
Preizkus interkristalne korozije

Ta upogibni preizkus zvarjenih ploščic je najprimernejši za določevanje interkristalne korozije zvarov ter prehodne cone.

Po končanem kuhanju smo vzorce upognili okoli trna za  $90^\circ$  in ugotavljali razpoke v prehodni coni vzdolž upogibne smeri — glej sliko 24. Objavljamo le eno sliko in sicer taline s 5% Mn, ker je bila interkristalna korozija pri vseh ostalih talinah enaka.

Po vsem tem smo zaključili, da jeklo 18-4-N ne glede na vsebnost Mn ni odporno proti interkristalni koroziji, če ga segrevamo v temperaturnem območju  $500\text{--}800^\circ\text{C}$ , kar je bil seveda primer tudi pri varilnem poizkusu.

Interkristalno korozijo smo raziskovali tudi na različno toplotno obdelanih vzorcih. V ta namen smo izdelali skuske primerne velikosti v obliki valjčkov, ki so se med seboj minimalno razlikovali v teži. Interkristalno korozijo smo določevali metalografsko.

Preiskovali smo vzorce gašene s temperature  $1100^\circ\text{C}$  ter gašene in naknadno žarjene vzorce. Žarjenje smo izvedli v temperaturnem območju  $500\text{--}800^\circ\text{C}$  za dobo 1 do 250 ur. Na tako prepa-

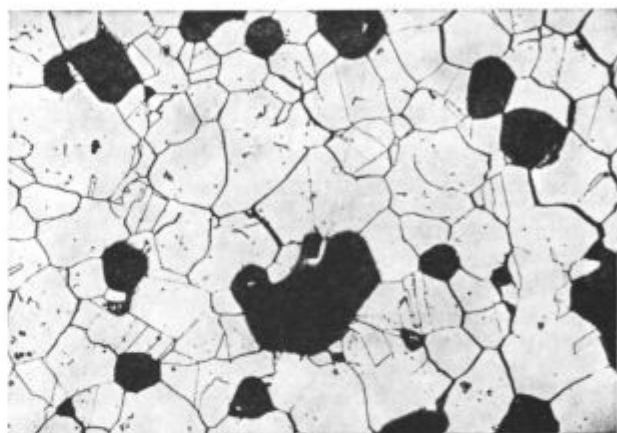


Slika 25 —  $100\times$   
Jedkano z V 2A jedkalom. Gašeno  $1100^\circ\text{C}$  — voda

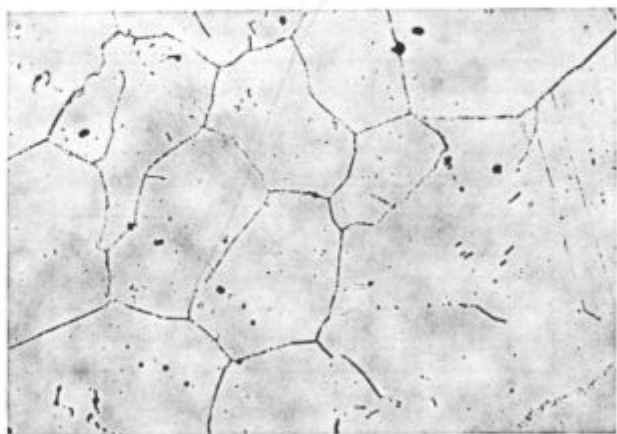
riranih valjčkah smo raziskovali interkristalno korozijo v Strausovi raztopini pod enakimi pogoji kot pri zvarjenih ploščicah.

Doseženi rezultati so naslednji: za gašene in v Strausovi raztopini preizkušene vzorce smo ugotovili, da so popolnoma obstojni proti tovrstni koroziji, ne glede na vsebnost Mn. Enako velja tudi za jeklo 18-8.

Na sliki 25 vidimo popolnoma homogeno avstenitno strukturo taline s 5% Mn brez najmanjših znakov interkristalne korozije. Strukture ostalih talin ne bomo navajali, ker so popolnoma enake navedeni strukturi.



Slika 26 —  $100\times$   
Jedkano z V 2A jedkalom. Gašeno  $1100^\circ\text{C}$  — voda ter žarjeno  $650^\circ\text{C}/24^{\text{h}}$ . Talina s 5% Mn



Slika 27 —  $500\times$   
Jedkano z V 2A jedkalom. Gašeno  $1100^\circ\text{C}$  — voda ter žarjeno  $650^\circ\text{C}/24^{\text{h}}$ . Talina s 5% Mn

Popolnoma drugačna je slika pri gašenih in naknadno žarjenih vzorcih vseh talin. Žarili smo pri  $650^\circ\text{C}$ . Ugotovili smo popoln razpad kristalnih zrn — slika 26.

Globina interkristalne korozije je znašala pri vseh vzorcih od 0.5—1 mm. Vzrok za tako močno interkristalno korozijo je treba iskati v izločenih Cr karbidih po kristalnih mejah. Te izločene Cr karbide vidimo na sliki 27.



Popolnoma enaki so rezultati tudi pri talini 18-8 brez stabilizatorjev.

Iz vsega tega lahko torej zaključimo, da je gašenje edina primerna oblika toplotne obdelave jekel 18-4-N. Z gašenjem teh jekel dosežemo, da ostanejo karbidi prisilno raztopljeni v trdni raztopini avstenita. Tako toplotno obdelana jekla so popolnoma obstojna proti interkristalni koroziji. Z naknadnim žarjenjem v temperaturnem območju 500—800° C pa pride do že omenjenega izločanja Cr karbidov, kar poslabša korozijsko obstojnost.

#### Frontalna korozija

Vzorci valjčkov za frontarno korozijo so bili izdelani in obdelani popolnoma enako kot za interkristalno korozijo.

Preiskovali smo gašene (1100° C) vzorce in vzorce, ki so bili predhodno gašeni ter naknadno žarjeni v temperaturnem območju 500—800° C za dobo 1 do 250 ur.

Tako pripravljene vzorce vseh talin, vključno taline 18-8, smo točno stehtali, izmerili površino ter preizkusili v že opisanem Straussovem reagentu. Po 15-urnem preizkusu v tej raztopini smo vzorce ponovno stehtali in izračunali morebitne izgube na teži, ki smo jih izrazili v g/m<sup>2</sup>.h. Na osnovi teh podatkov smo po ocenjevalni tabeli določili stopnjo frontalne korozije. Tabela 3 kaže tako ocenjevalno stopnjo.

Tabela 3: Ocenjevalna tabela korozijske obstojnosti

| Razred korozijske obstojnosti | Stopnja | Izgube na teži g/m <sup>2</sup> , h | Zmanjšanje debeline stene na eni strani (mm/leto) |
|-------------------------------|---------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| popolnoma korozijsko obstojno | 0       | 0.0— 0.1                            | 0,0— 0,01                                         |
| dobro korozijsko obstojno     | 1       | 0.1— 1.0                            | 0,1— 1,1                                          |
| slabo korozijsko obstojno     | 2       | 1.0—10.0                            | 1,1—11,1                                          |
| korozijsko neobstojno         | 3       | nad 10.0                            | nad 11,1                                          |

Preizkuse smo vodili v več paralelkah in smo pri ocenjevanju stopnje frontalne korozije upoštevali povprečno vrednost. Vzorce smo tehtali na 4 decimalni tehtnici.

Na podlagi doseženih rezultatov smo izdelali program korozijskih izgub v odvisnosti od % Mn — slika 28.

Izjenih vzorcih. Izgube na teži močno padajo do vrednosti približno 3 % Mn, nad to vrednostjo pa so izgube na teži več ali manj konstantne. Razlike izgub na teži med posameznimi talinami so majhne in so nekako skladne s prehodom iz dvofazne avstenitno-feritne v enofazno avstenitno strukturo. Podčrtati pa moramo še enkrat, da so izgube na teži pri gašenih in naknadno žarjenih vzorcih neprimerno večje kot pri samo gašenih vzorcih, ne glede na vrsto taline.

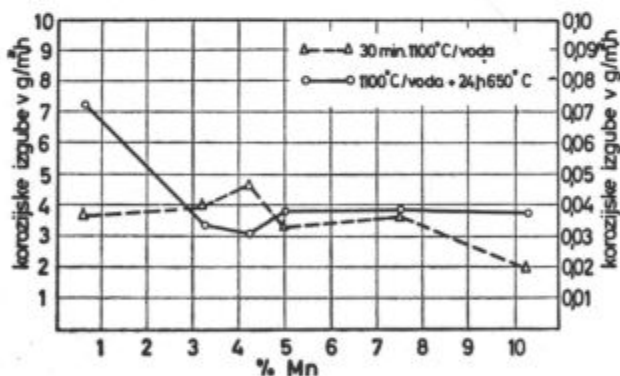
Ce primerjamo dosežene rezultate z ocenjevalno tabelo 3, vidimo, da spadajo gašeni in naknadno žarjeni vzorci v razred 3, to je v skupino slabe korozijske obstojnosti, gašeni vzorci pa v razred 0, to je skupino popolne korozijske obstojnosti.

Interesantna je to, da smo ugotovili močno interkristalno korozijo pri vseh tistih vzorcih, ki so bili podvrženi tudi močni frontalni koroziji.

Da bi ugotovili in dokazali vzroke slabe frontalne korozijske obstojnosti talin, smo vse vzorce še metalografsko preiskali. Analiza teh vzorcev je pokazala močno izločanje Cr karbidov po kristalnih mejah, kar je seveda povzročilo padec odpornosti talin proti kislinam. Taka struktura je bila identična strukturi na sliki 27.

Popolnoma enako strukturo smo dobili na enako toplotno obdelani talini jekla tipa 18-8. Struktura je prikazana na sliki 29.

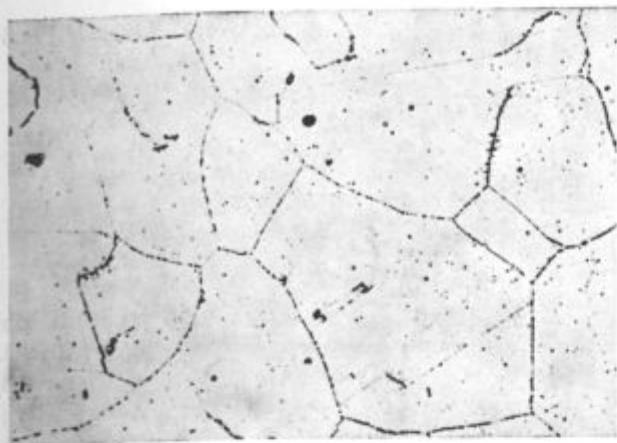
Prikazati hočem še strukturo taline s 5 % Mn, ki je bila gašena in naknadno žarjena pri temperaturi 750° C. Čas žarjenja je znašal 250 ur. Slika 30.



Slika 28

Korozijske izgube različno toplotno obdelanih talin v odvisnosti od vsebnosti Mn

Diagram nam jasno kaže razliko med vzorci, ki so bili gašeni s temperature 1100° C in vzorci, ki so bili po gašenju še za dobo 24 ur žarjeni pri 650° C. Če pregledamo rezultate gašenih vzorcev, vidimo, da so vsi vzorci talin popolnoma obstojni proti frontalni koroziji. Karakteristično je, da je korozija pri gašenih vzorcih skoraj konstantna vse do vrednosti 7 % Mn. Nad to vrednostjo se korozijska obstojnost še izboljša. Popolnoma drugačno pa je stanje korozije pri gašenih in naknadno žar-



Slika 29 — 500×  
Elektrolitsko jedkano v 15 % Cr kislini. Talina 18-8. —  
Gašeno 1100° C — voda ter žarjeno 650° C/24h

Cr karbidi so izločeni v velikih količinah po kristalnih mejah in po zrnih. Difuzija Cr atomov je že tako napredovala, da je vsebnost Cr zravna na nad rezistenčno mejo (13 % Cr), tako da je ta



Slika 30 — 500×  
Elektrolitsko jedkano v 15 % Cr kislini. Talina s 5 % Mn.  
Gašeno 1100° C — voda in žarjeno 750°/250h

talina odporna proti interkristalni in frontalni koroziji. Poleg Cr karbidov so v strukturi izločeni Cr nitridi, ki nastopajo v obliki karakterističnih iglic. Čeprav je količina Cr nitridov sorazmerno velika, nimajo velikega vpliva na korozijsko obstojnost jekel. Cr nitridi poslabšajo le mehanske lastnosti jekla, predvsem njegovo duktilnost.

### Zaključek

Namen preizkusov je bil ugotoviti vpliv različnih % Mn na homogenost strukture, na obdelovalnost v vročem, na mehanske lastnosti ter na frontalno in interkristalno korozijo jekla 18-4-N.

Vse preiskave smo vzporedno opravili tudi na talini 18-8 zaradi primerjave rezultatov. Dosegli smo naslednje:

1. Homogeno avstenitno strukturo dosežemo pri talinah z nad 5 % Mn.

2. Optimalno deformacijsko sposobnost smo dosegli pri jeklih z nad 5 % Mn.

3. Vsi gašeni vzorci ne glede na % Mn so bili zelo dobro obstojni proti interkristalni in frontalni koroziji.

4. Vsi gašeni in naknadno v temperaturnem območju 500—800° C žarjeni vzorci ne glede na čas žarenja in ne glede na % Mn, so pokazali zelo slabo obstojnost glede interkristalne in frontalne korozije.

5. Prehodna cona zvarov gašenih vzorcev ni odporna proti interkristalni koroziji.

6. Vsebnost feritov pri talinah z nizko vsebnostjo Mn pada z naraščajočo temperaturo gašenja.

7. Preiskave so pokazale, da so vsi dosoženi rezultati jekla 18-4-N popolnoma enakovredni rezultatom jekla tipa 18-8 brez stabilizatorjev.

8. Mehanske lastnosti jekla 18-4-N so skoraj enake lastnostim jekla 18-8, izjema je meja razteznosti, ki je pri jeklih legiranih z Mn precej višja.

## Avtomatsko varjenje pod praškom

### Avtomatizacija v varilni tehniki

Nenehni razvoj tehnike vključuje v sebi dve osnovni smeri, ki se pri vsakem procesu tesno dopolnjujeta; to sta mehanizacija in avtomatizacija. Če se je mehanizacija polastila posameznih faz dela, je avtomatizacija uspešno posegla v neki delovni proces kot celoto. S popolnoma samostojno kontrolo vseh operacij in v nekaterih primerih še s takojšnjim popravkom nedovoljenih odstopanj.

Osnovni cilj avtomatizacije v varilni tehniki je nedvomno povečanje produktivnosti dela, izboljšanje kvalitete varjenja (varilec se bo lahko zaradi pridobivanja na času posvetil boljši pripravi dela) ter iztrgati varilca fizičnemu delu, škodljivemu vplivu atmosfere, ki jo pri ročnem varjenju zastrupljajo plini kot proizvod metalurških procesov varjenja in po možnosti zakriti oblok ter končno preprečiti vpliv varilčevega slabega počutja zaradi prisiljenega položaja telesa na sam proces varjenja.

Vedno širše uvajanje avtomatiziranih varilnih postopkov, bo sproščalo vedno večje število varilcev, istočasno pa bo zahtevalo tudi višjo kvalifikacijo — varilca strokovnjaka.

### Prednosti avtomatskega varjenja pod praškom

Avtomatsko varjenje pod praškom U P (Unter Pulver Schweissung) priznано od mednarodnega inštituta za varjenje (IIW — INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, ali IIS — INSTITUT INTERNATIONAL DE LA SOUDURE) prištevamo med visokoproduktivne varilne postopke.

Tolikšno stopnjo produktivnosti dosežemo predvsem z veliko gostoto električnega toka. Postopek namreč dopušča uporabo visokih jakosti toka pri razmeroma majhnem premeru žice. Poznano je, da normalno uporabljamo tok jakosti od 200 do 1800 A, v izrednih primerih pa tudi do nekaj 1000 A (5000 A). Gostota električnega toka je pri tem neprimerno večja kot pri ročnem varjenju in doseže vrednosti od 20—300 A/cm<sup>2</sup>.

Drugi vzroki doseganja visoke storilnosti omenjenega varilnega postopka so: možnost nastavitve velike varilne hitrosti; najpogostejše uporabljamo hitrosti med 150—200 m/h, za varjenje

tanke pločevine pa narastejo hitrosti tudi do 300 m/h; majhna toplotna prevodnost varilnega praška in minimalno sevanje toplote skozi nasuti prašek, omogočata visok izkoristek med varjenjem nastale toplotne energije. Tako dosežemo v primerjavi z ročnim varjenjem, kjer znaša izkoristek dovedene električne energije le 40 %, pri varjenju pod praškom do 97 %.

Tolikšen izkoristek dovedene energije ima za posledico tudi globok uvar. Možnosti izkoriščanja globokega uvara pa omogočijo pocenitev varilnega procesa, ker pri zmernih debelinah osnovnega materiala odpadejo predhodne obdelave zvarnih stranic. V naši industriji že z domačimi varilnimi materiali uspešno varimo pločevino debeline 20 do 25 mm brez predhodne obdelave zvarnih stranic. Poizkušajo pa variti tudi debelejšo pločevino.

Zagotovitev za visoko stopnjo produktivnosti pri tem varilnem postopku je tudi visoka varilna konstanta, ki znaša 14—17 kg/A h, pri tandem varjenju, kjer kombiniramo dvojno dodajanje žice pa celo 25—30 kg/A h. Avtomatsko varjenje pod praškom omogoča izdelavo visokokvalitetnih zvarov. Zvari so ob pravilno zbranih varilnih parametrih in dobrem varilnem dodatnem materialu brez por in žilindrnih vključkov homogeni, rentgensko neoporečni. Omenjeni postopek tudi zagotavlja nizko vsebnost vodika v zvaru.

### Opis varilnega postopka

Postopek prištevamo k obločnemu varjenju. Pod vplivom visoke temperature obloka med obema elektrodama, to je med žico in osnovnim materialom, pride več ali manj istočasno (odvisno od vrste praška) do stalitve osnovnega in dodatnega materiala. K dodatnemu materialu prištevamo žico, ki se na aparatu odvija s kolobarja in teče, drsno priključena na električni tok, običajno pravokotno proti osnovnemu materialu ter varilni prašek, ki se vsipa po cevi h kontaktu med žico in osnovnim materialom. Omenjeni kontakt med žico in osnovnim materialom je popolnoma pokrit s praškom, tako da je oblok neviden. Zato tudi procesa samega ni mogoče direktno opazovati, ampak ga kontroliramo z električnimi instrumenti.



Slika 1  
ISKRIN aparat EPP 1100 med varjenjem

Prosta višina žice, to je razdalja med priključkom električnega toka in žico in kontaktom na osnovnem materialu ter višina nasutega praška, morata biti vedno pravilno določena. Nepravilna nastavitve obeh višin ima lahko za posledico nekvaliteten zvar. Dovodi praška in žice ter vsi električni inštrumenti so pritrjeni na vozilu, ki potuje vzdolž osnovnega materiala. Hitrost pomikanja aparata pomeni tudi hitrost varilnega procesa. Z inštrumenti na aparatu reguliramo hitrost varjenja, jakost varilnega toka in napetost. Kontakt med žico in osnovnim materialom vzpostavimo normalno kot pri ročnem varjenju, ali pa si pomagamo z železovim prahom, ki ga nasujemo na kontaktno mesto in povzroča visok upor, lahko pa uporabimo za vžig visokofrekvenčni tok.

S pomikanjem obloka vzdolž zvarnih stranic pride staljeno jeklo zvara izven območja obločnih temperatur in se prične počasi strjevati. Žlindra, ki se je v staljenem stanju zaradi manjše specifične teže nabrala na površini staljenega jekla, se prav tako strdi v trdo, običajno steklasto skorjo, ki preprečuje prehitro ohlajevanje strujočega se zvara. Ohlajeno skorjo z zvara po popolni ohladitvi zlahka odstranimo, če so metalurški procesi med varjenjem potekali pravilno. Ta žlindrina skorja je v bistvu silikatne oziroma aluminatne sestave in jo ob dobri predelavi ponovno lahko uporabimo skupaj s svežim praškom. Vendar je taka zmes nekontrolirana in je za ponovno varjenje ne priporočamo. Prašek, ki se med procesom ni stalil poberemo z zvara, presejemo in takoj spet uporabimo.



Slika 2  
LINDEJEV aparat med varjenjem cevi



## Dodajni materiali

Osnovna dodajna materiala sta žica in prašek. Izberemo ju po kvaliteti jekla. Homogen zvar, ki je ob pravilno izbranem dodajnem materialu dosegel zahtevano kemično analizo, ima tudi zahtevane mehanske lastnosti. Nepravilno kemično analizo zvara ali nepravilne mehanske lastnosti zvara moramo največkrat odpraviti s popravkom dodajnega materiala.

### Žica

Žica je izdelana iz elektro jekla in se razlikuje od ostalih žic z večjo čistočo ter občajno povečano koncentracijo mangana. Je hladno vlečena v točnih dimenzijah z dopustnimi tolerancami. Po zad-

| Žica  | C %       | Si %      | Mn %      | S %        | P %        |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| EPP 1 | 0,06—0,10 | 0,03—0,05 | 0,50—0,60 | maks. 0,03 | maks. 0,03 |
| EPP 2 | 0,06—0,10 | 0,03—0,05 | 1,00—1,20 | maks. 0,03 | maks. 0,03 |

Žice z nizkim manganom se uporabljajo le v kombinaciji s taljenimi praški z visokim manganom ali z bazičnimi sintranimi praški z nižjo koncentracijo mangana.

Da bi se izognili nevarnosti razpokanosti zvarov v vročem, z namenom, da bi preprečili poroznost zvarov tudi pri oksidiranem osnovnem materialu in da bi istočasno izboljšali zvarom mehanske lastnosti, je v svetu šel razvoj tudi v smeri izdelave žic z visokim manganom ( $S 4 = 2\% \text{ Mn}$ ,  $S 5 = 2,5\% \text{ Mn}$ ,  $S 6 = 3\% \text{ Mn}$ ).

Za varjenje kotnih zvarov oziroma zvarov, kjer je nevarnost, da bi se pojavile pore, pogostejše uporabljamo žice z nizkim manganom in večjo koncentracijo silicija; vendar je postavljena zgornja meja vsebnosti silicija in sicer  $0,25\%$ . Nikakor pa pri praških z nizkim silicijem ni mogoče nadoknaditi izostalo koncentracijo  $\text{SiO}_2$  v prašku s povečano koncentracijo silicija v žici.

Za varjenje legiranih jekel uporabljamo lahko tudi višje legirane žice v kombinaciji s praškom z nizkim silicijem, običajno pa uporabljamo nizko-legirane žice v kombinaciji z namensko izdelanim varilnim praškom.

### Varilni prašek

Varilni prašek je žici enakovreden dodajni material. Med varjenjem ima na proces tako fizikalen kot kemičen vpliv. Po fizikalni strani prašek zakriva staljeno jeklo in omogoča boljši toplotni izkoristek, istočasno pa preprečuje vstop atmosferskih plinov v zvar. Tudi oblika zvara je v največji meri odvisna od sestave varilnega praška. S svojo kemično sestavo pa mora prašek zagotoviti pravilno legiranje zvara.

Po namenu uporabe delimo praške v:

1. praške za hitro varjenje
2. praške za globoko prodiranje (za globoko penetracijo)

njem vleku utrjeno žico je treba mehko odžariti, da omogočimo lažje nastavitve na aparat in lažje vodenje s tekalnimi kolesi. Za nemoteno kontinuirano varjenje je posebno važna enakomerna debelina žice. Kontinuirano varjenje bo odvisno od površine žice. Za ohranitev čiste površine in dobrega kontakta na aparatu žico pobakrimo. Zarjavela ali kakorkoli umazana žica lahko povzroči diskontinuirano varjenje in tvorbo poroznih zvarov.

Železarna Jesenice proizvaja sedaj dve vrsti žic namenjenih za avtomatsko varjenje pod praškom: EPP 1 in EPP 2, v dimenzijah od 2 do 6 mm po predpisih, ki jih zahtevajo standardi in registri. Kemična analiza obeh domačih žic je razvidna iz spodnje tabele:

3. praške za varjenje tanke pločevine
4. praške za premoščanje širših špranj
5. praške za navarjanje

Praški za hitro varjenje in praški za varjenje tanke pločevine so večinoma enake sestave. Pri obeh vrstah je potrebna nizka viskoznost staljenega praška. Da bi omogočili kontinuirano odtaljevanje praška je nujno, da ima prašek nizko tališče; za kontinuirano vzdrževanje obloka, kar je pri visokih hitrostih varjenja in tankih pločevinah še posebno važno, pa mora prašek vsebovati komponente nizkih ionizacijskih napetosti.

Pri praških za globoko penetracijo poskušamo med varilnim procesom proizvesti čim več toplote, ki bo omogočila raztaliti večjo količino osnovnega materiala. Izvori toplote pa so različni, eksotermni procesi:

1. Razelektrenje, ki nastopi med pozitivnim ionom in elektronom ali pozitivnim in negativnim ionom, je vedno povezano s sprostitvijo toplotne energije, ki je po iznosu enaka energiji ionizacije v prvem primeru in nekaj zmanjšani energiji ionizacije v drugem primeru. Število razelektrenj je odvisno od koncentracije nabitih delcev v obloku.

2. Tudi asociacija kot fizikalni pojav združevanja atomov nastopi v določenih primerih kot močan izvor toplotne energije.

3. Pri varjenju z dodajnim materialom za globoko penetracijo naletimo na kemične reakcije, ki potekajo močno eksotermno. Te kemične reakcije so neodvisne od nastavljene polaritete med varjenjem.

Na dobro premoščanje špranj pri varjenju vplivamo s pravilnim odtaljevanjem dodajnega materiala.

Praški za navarjanje vsebujejo elemente, ki legirajo osnovni material in dajejo visoko trdoto.



Slika 3  
Taljenje in granuliranje praška

Poznana je tudi razdelitev varilnih praškov po načinu izdelave:

1. taljeni praški
2. sintrani praški
3. aglomerirani praški

Prašek običajno raztalimo v električni trofazni peči, v literaturi priporočajo 1000 do 1100 A na eni elektrodi. Ker so elektrode pri taljenju potopljene v talino, je delovanje take peči pravzaprav uporovno. Če izdelujemo na taki peči varilne praške stabilne kvalitete, proces taljenja in granuliranja lahko vodimo kontinuirano, v obratnem primeru pa diskontinuirano s točnim kontroliranjem temperature vlivanja. V električ-

nih pečeh talimo predvsem praške z visokim tališčem. Praške z nizkim tališčem pa talimo lahko tudi v rotacijskih pečeh na nafto.

Pred slehernim taljenjem je treba surovine skrbno kontrolirati, zdrobiti na primerno granulacijo in homogenizirati. Heterogeni vložek daje ne-kvaliteten material, čemur so vzrok različna stališča posameznih komponent.

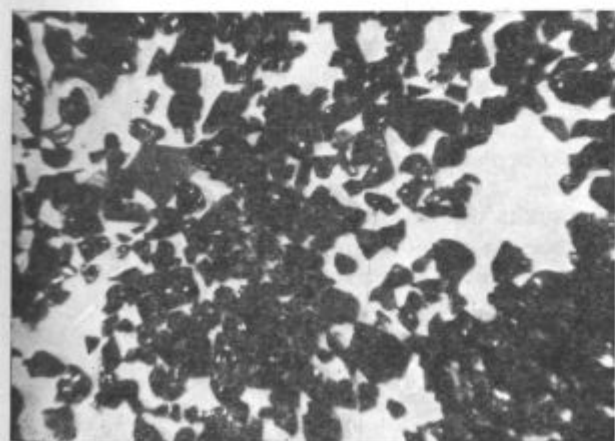
Homogeno talino, ki ima odgovarjajočo temperaturo, granuliramo v hladni vodi; pri tem dobimo amorfen granulat različne barve. Zrna granulata so podobna obarvanemu zdrobljenemu steklu. Granulat moramo v nadaljnjih fazah predelave drobiti na pravilno dimenzijo zrn. Zdrobljena zrna posušimo pri temperaturi 200—300° C, če so zrna kompaktna in neporozna. Pri praških, ki so penaste, močno porozne sestave, mora biti temperatura sušenja višja. Končno prašek presejemo. Spodnja frakcija, pod 0,2 (0,3) mm je neuporabljiva. Prah pri varjenju dobro tesni in ne propušča pri varjenju nastalih plinov v atmosfero. Zaostali plini lahko povzročajo hrapavost površine zvara ali celo poroznost. Granulacijo praška prilagodimo zahtevam kupca. Različni načini varjenja pod praškom ter različni parametri zahtevajo namreč različno granulacijo praška.

Domače praške EP 10, EP 20 in EP 30 izdelujemo v granulaciji

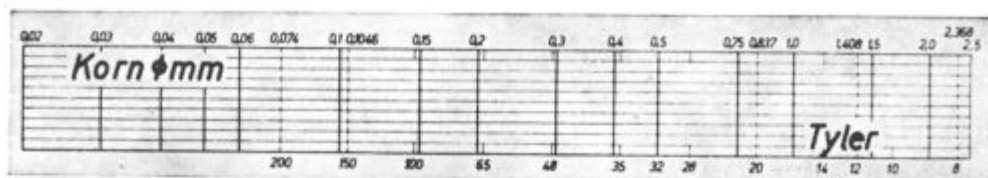
12 × 48 — 1,4 — 0,3 mm

10 × 48 — 1,7 — 0,3 mm

Oznake, ki so določene po Tylerju, so razvidne iz spodnje tabele:



Slika 4  
Taljeni prašek



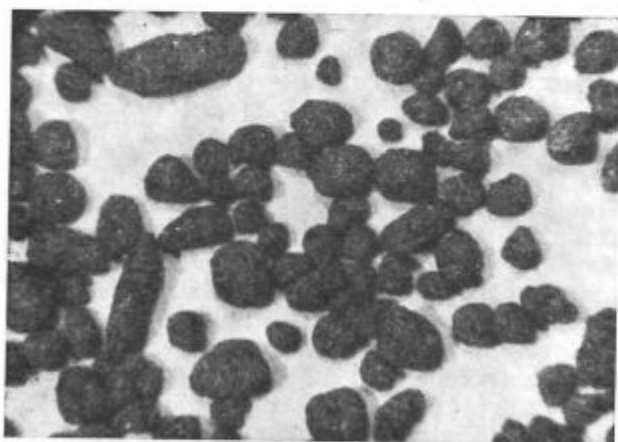
Slika 5  
Granulacija po Tylerju



Slika 6  
Sintrani prašek

Sintrani in aglomerirani praški niso več steklaste sestave. Zrna so porozna, močno higroskopa in zato bolj občutljiva na vlažnost zraka.

Sintrane praške sintramo pri temperaturi med 900—1000° C.



Slika 7  
Aglomerirani prašek

Aglomerirani praški so samo sušeni pri temperaturi do 600° C. Pri obeh vrstah moramo shomogenizirane surove komponente pred sintranjem oziroma sušenjem vezati z vodnim steklom in granulirati v posebnih granulatorjih na pravilno obliko zrn. Ti praški vsebujejo, zaradi dodanega vodnega stekla, večje količine alkalij, kar ugodno vpliva na stabilizacijo obloka. Vendar je povečana koncentracija alkalij v dodatnem materialu nevar-

na zaradi pojava poroznosti zvarov. To velja tudi za taljene praške ali elektrode za ročno varjenje. Če so bile alkalije na začetku razvoja dodatnega materiala osnovne komponente za povečanje stabilizacije obloka, so danes že veliko izgubile na svojem prvotnem pomenu. Takó sintranje kot sušenje varilnih praškov je ekonomsko najbolj ugodno v rotacijskih pečeh. V Vzhodni Nemčiji, deželi z visoko stopnjo razvoja varilne tehnike, pa proizvajajo sintrane praške domala v celoti v dragih tunelskih pečeh. Pri tem surov material predhodno briketirajo v opečni format. Čas sintranja vsakega briкета znaša 22 ur. Po sintranju briquete zdrobijo in odsejejo tako kot taljene praške, na zahtevano dimenzijo zrna. Pri tem običajno odpade 30 % sintrane materiala kot neuporabnega, ker se je pri drobljenju spremenil v prah. Uporabnost sintranih in aglomeriranih praškov se je posebno v zadnjem času razširila predvsem na srednje in visoko legirana jekla.

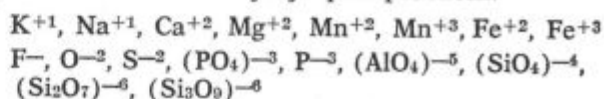
Še ena razdelitev varilnih praškov se pojavlja v svetu varilne tehnike. To je razdelitev v:

1. kisle praške
2. nevtralne praške
3. bazične praške

Ta razdelitev temelji na vsebnosti elementov, predvsem prve in druge ter četrte vertikale Mendeljevega periodičnega sistema elementov. Po vsej verjetnosti bo nadaljnji razvoj dodatnega materiala pokazal nepravilnost oziroma vsaj nepotrebnost takšne razdelitve. Tudi pri dodatnem materialu za ročno varjenje je podobna razdelitev netočna.

Vsi alkalni, zemljoalkalni oksidi ter oksidi ostalih težkih kovin se ne obnašajo v talini pri temperaturi obloka molekularno, temveč ionsko. Pri vsem tem pa ni važno ali določen ion daje pri hidrolizi alkalni ali kisli elektrolit. Važnejši je naboj in velikost iona. Ioni z velikim elektrostatičnim nabojem in majhnim premerom vplivajo na okolico s precejšnjo jakostjo lastnega polja. Pri tem je znano, da ima  $Mn^{+3}$  zelo velik vpliv na metalurške reakcije pri varjenju pod praškom.

Spodnja razpredelnica prikazuje pozitivne in negativne ione, ki nastopajo v kemičnih reakcijah pri avtomatskem varjenju pod praškom:



Baziciteto praškov merimo s primerjavo oksidov alkalij, zemljoalkalij in nižje valenčnih oksidov težkih kovin s kislimi oksidi.

Po Segerjevi formuli računamo bazičnost praška:

$$\frac{2x(R_2^{+1}O, R^{+2}O) + 6y(R_2^{+3}O_3)}{2z(R^{+4}O_2)}$$

## SILIKATI:

| kisli                      | nevtralni                  | bazični                     |                             |                             |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Disilikati                 | Metasilikati               | Ortosilikati                | Parasilikati                |                             |
| $R_2^{+1}O \cdot 2SiO_2$   | $R_2^{+1}O \cdot SiO_2$    | $2R_2^{+1}O \cdot SiO_2$    | $3R_2^{+1}O \cdot SiO_2$    | $4R_2^{+1}O \cdot SiO_2$    |
| 2.4                        | 2.2                        | 4.2                         | 6.2                         | 8.2                         |
| $R^{+2}O \cdot 2SiO_2$     | $R^{+2}O \cdot SiO_2$      | $2R^{+2}O \cdot SiO_2$      | $3R^{+2}O \cdot SiO_2$      | $4R^{+2}O \cdot SiO_2$      |
| 2.4                        | 2.2                        | 4.2                         | 6.2                         | 8.2                         |
| $R_2^{+3}O_3 \cdot 6SiO_2$ | $R_2^{+3}O_3 \cdot 3SiO_2$ | $2R_2^{+3}O_3 \cdot 3SiO_2$ | $3R_2^{+3}O_3 \cdot 3SiO_2$ | $4R_2^{+3}O_3 \cdot 3SiO_2$ |
| 6.12                       | 6.6                        | 12.6                        | 18.6                        | 24.6                        |
| B = 0.5                    | B = 1                      | B = 2                       | B = 3                       | B = 4                       |

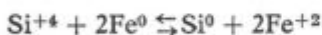
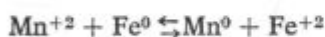
## Kemizem metalurških procesov pri varjenju pod praškom

Pri varjenju nizkoogljičnih jekel moramo zagotoviti predvsem naslednjim zahtevam:

1. Zvar je treba zaradi odgora nekaterih elementov iz osnovnega materiala dolegirati iz dodajnega materiala.

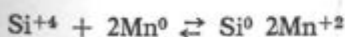
Pri varjenju s praški EP 10, EP 20 ali EP 30 je zagotovljena minimalna koncentracija mangana v zvaru, in sicer 1%. Legiranje mangana v zvar poteka predvsem iz komponent, v katerih je mangan dvo ali trivalenten. Intenzivnost prehoda vsakega elementa iz praška v zvar pa je odvisna od mesta, ki ga omenjeni element zavzema v napetostni vrsti (pri višji temperaturi), od njegove vsebnosti v prašku in žici ter od ostalih varilnotehničnih pogojev. Vrstni red napetostne vrste pri višji temperaturi je do danes še slabo poznan.

Legiranje z osnovnimi elementi Si in Mn poteka 97% v kapljici po znanih reakcijah:



Omenjene reakcije potekajo pri visokih temperaturah (pri temperaturi obloka) od leve proti desni, pri nizkih temperaturah v času strjevanja zvara pa se poveča tendenca obratne reakcije, to je oksidacije Mn in Si.

Istočasno pa iz obeh zgornjih reakcij zaključujemo, da je možna tudi tretja reakcija:



Reakcija poteka, če je v staljenem zvaru dovolj mangana. V obratni smeri pa poteka reakcija v primeru, če vsebuje zvar visoko koncentracijo silicija.

Potek metalurških reakcij je v glavnem odvisen od sestave varilnega praška.

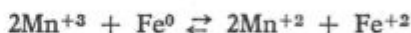
Na kontaktni površini staljenega jekla in staljenega praška se zbirajo večinoma ioni z največ-

x, y, z predstavljajo g mole različnih kovinskih oksidov.

Teoretično lahko nastopajo v staljenih praških naslednji silikati:

jim ionskim momentom (ionski moment je razmerje med nabojem in premerom iona).

Šibkejši ioni pa so odrinjeni nazaj v žlindro. Iz teorije je poznano, da je ionski moment trivalentnega Mn še enkrat večji od dvovalentnega. Prej omenjeni praški vsebujejo malo trivalentnega Mn (do 0.5%), vendar to že zadostuje, da se pojavi naslednja reakcija:



Omenjena reakcija zaradi večje porabe Fe atomov zavira redukcijo mangana in silicija v zvar po prejšnjih osnovnih reakcijah. Zato je izkoristek pri močno oksidnih praških na legirnih elementih razmeroma majhen.

Legiranje elementov v zvar je odvisno v precejšnji meri tudi od jakosti in napetosti toka. Odgor elementov je predvsem občuten pri spremembi jakosti toka od 200 do 400 A. Spremembe med 500 do 1000 A niso tako zaznavne. Povečanje dolžine obloka, skratka povečanje napetosti ugodno vpliva na legiranje elementov v zvar.

2. Dezoksidacijski procesi se morajo med varjenjem pravilno in dokončno razviti.

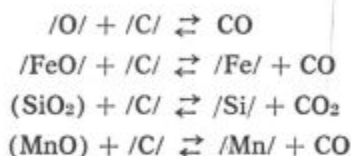
Koncentracija kisika v zvaru je pri varjenju pod praškom odvisna predvsem od vsebnosti letega v osnovnem in dodajnem materialu. Prehod atmosferskega kisika v zvar praktično ni mogoč. Kisik je v zvaru prisoten v obliki oksidnih vključkov ali pa je direktno raztopljen v zvaru. Kisik v zvaru pa je izredno škodljiv, posebno ker koncentracije kisika do 0.01% že močno vplivajo na zmanjšanje žilavosti pri nizkih temperaturah.

Pri golih elektrodah, kjer ni prisotnih dezoksidantov, je koncentracija kisika v zvaru do 0,2%. Pri oplášenih elektrodah od 0,08—0,12%. Pri zvarih izdelanih s praškom oziroma v zaščitni atmosferi pa do 0,1%. Pogosto pa te koncentracije prerastejo omenjeno vrednost, kar ima za posledico hitri padec mehanskih lastnosti zvarov.



Z dezoksidanti Al, Ti, Si, C, Mn, to so elementi, ki imajo večjo kemično afiniteto do kisika kot železo in ostali elementi, lahko občutno zmanjšujemo koncentracijo kisika v zvaru.

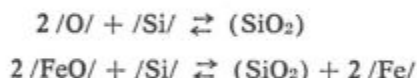
Element ogljik nastopa pri varjenju kot dober dezoksidant, posebno pri temperaturah nad 1700°C. Največjo afiniteto do kisika kaže ogljik iz žice in to v času tvorbe kapljice. Zanimive so tudi ugotovitve o odgoru C pri ročnem in avtomatskem varjenju; pri prvem znaša 70 % pri drugem pa 60 %. Dezoksidacija z ogljikom poteka po naslednjih reakcijah:



Vendar so za toplotno dezoksidacijo, tudi pri nižjih temperaturah potrebni še ostali dezoksidanti:

Močan dezoksidant v procesu varjenja je tudi Si in to že pri nizkih koncentracijah (0.1—0.2 %)

Dezoksidacija s Si poteka po naslednjih reakcijah:



Nastali  $SiO_2$  se takoj veže z bazičnimi oksidi v silikate, kar ima za posledico močan pomik zgornjih reakcij v desno, v smeri pravilne dezoksidacije.

Mangan je v procesu varjenja že slabši dezoksidant.

Dezoksidacijski procesi ostalih elementov, ki kažejo pri varilnih procesih veliko afiniteto do  $O_2$ , so manj poznani, vendar bo znanost varilne tehnike kaj kmalu ugotovila, da bodo moderni dezoksidanti, ki jih danes še ne uporabljamo, prinesli pravo revolucijo v varilno tehniko, pa naj bo to pri ročnem ali avtomatskem varjenju. Prav gotovo so danes temu najbližji Japonci.

Dovolj je še procesov pri varjenju pod praškom, ki so s stališča fizikalne kemije interesantni, vendar naj za enkrat ta grobi oris zadostuje.

Poglejmo le še, kaj smo danes dosegli doma v razvoju domačih varilnih praškov.

Sedaj razpolaga železarna s 4 varilnimi praški. Trije so taljeni (EP 10, EP 20, EP 30) in eden sintran (SP 10). Prva dva sta metasilikatna, od katerih je EP 10 zaradi vsebovanja določenih komponent prilagojen pretežno za varjenje z enosmernim tokom. Varjenje z omenjenim praškom na izmenični tok je možno le s transformatorji z višjo napetostjo prostega toka (72 V). Prašek EP 20 je posebno izdelan za varjenje z izmeničnim tokom. Zadnji taljeni prašek EP 30 je ortosilikatne sestave in ga zaenkrat najbolj uporabljajo pri navarjanju (z odgovarjajočimi žicami do 300 BH). Sintrani prašek je aluminaten, z določenimi korekturami ga lahko uporabimo za navarjanje različnih osnovnih materialov ali za zvarjanje višje legiranih jekel.

Zvari dobljeni z omenjenimi praški v kombinaciji z žicami EPP 1, EPP 2 so kvalitetni in odgovarjajo zahtevam tujih registrov.

Taljene praške že redno proizvajamo, sintrani prašek pa še poskusno. Vsi varilni praški so za železarno dovolj interesantni, da jih vključimo med redne izdelke, skupaj z ostalimi dodajnimi materiali.