

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

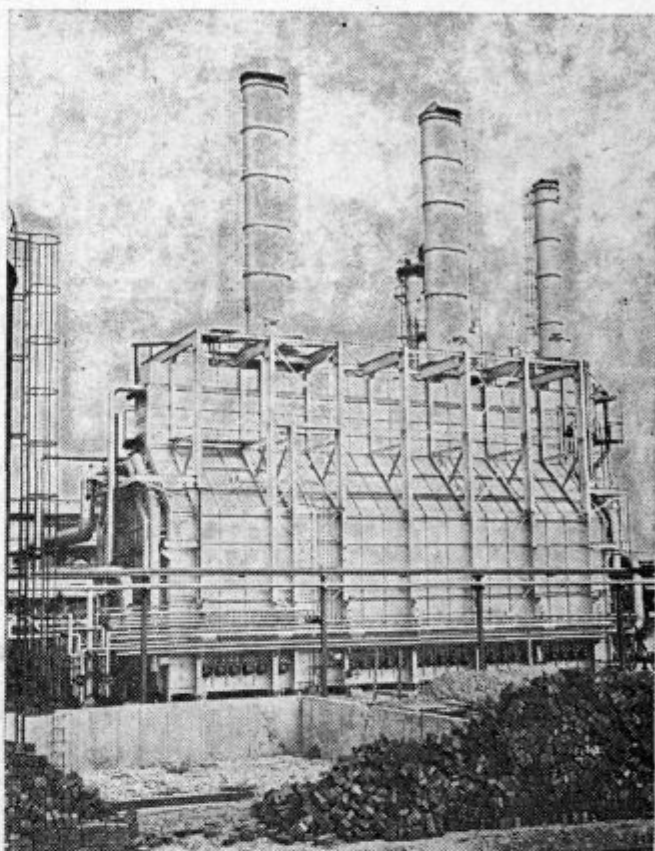
VSEBINA	Stran
Koroušič Blaženko — Metalurški inštitut, Ljubljana APLIKACIJA KISIKOVE SONDE PRI DIREKTNEM DOLOČEVANJU VSEBNOSTI KISIKA V TEKOČEM JEKLU . . . . .	3
Vodopivec Franc, M. Kmetič Metalurški inštitut, Ljubljana; M. Gabrovšek Železarna Jesenice RAZISKAVE VPLIVA VROČE DEFORMACIJE IN IZLOCILNEGA ŽARJENJA NA MIKROSTRUKTURO IN TRDOTO MIKROLEGIRANEGA JEKLA PO NORMALIZACIJI . . . . .	13
Brezigar Boris, I. Kenda, J. Kodrič, F. Repič — Iskra, Nova Gorica HLADNO PREOBLIKOVANJE KOVIN V INDUSTRIJI AVTOELEKTRIKE . . . . .	29
Exel Neža — Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, Ljubljana KOROZIJSKA ODPORNOST CORTEN JEKLA . . . . .	37
Bratina Janez — Železarna Ravne SESALNI KROG — NAPRAVA ZA KOMPENZACIJO JALOVE ENERGIJE IN ZA ZMANJŠEVANJE VIŠJE HORMONSKIH TOKOV . . . . .	41
TEHNIČNE NOVICE Koroušič Blaženko, Metalurški inštitut Ljubljana M. Dobovišek, J. Rodič — Železarna Ravne V. INTERNACIONALNA KONFERENCA O VAKUUMSKI METALURGIJI IN ELEKTRIČNEM PRETALJEVANJU V MÜNCHENU (ZRN) 11. DO 15. OKTOBER 1976 . . . . .	51
Razinger Anton Železarna Jesenice KV 35 — NOVO JEKLO ZA KVALITETNE VIJAKE . . . . .	54

LETO 11 ŠT. 1 - 1977  
ŽEZB BQ 11 (1) 1 — 56 (1977)

*Zaščita dimnikov  
tehnološke peči  
obrata*

*»Platforming«  
v rafineriji*

**INA — Sisak**



## **TEKOL**

podjetje za tehnično zaščitna dela  
Maribor, Titova c. 44

opravlja:

- protikorozijsko zaščito vseh železnih konstrukcij, plovnih objektov, hidroenergetskih objektov itd.,
- plastifikacijo, metalizacijo,
- hidroizolacijo streh,
- zaščito betona in betonskih konstrukcij.

Dela izvršujemo doma in v tujini.

---

# HONEYWELL

**VODILNO PODJETJE V INTEGRIRANI  
AVTOMATIZACIJI**

**VAM NUDI CELO VRSTO INSTRUMENTOV  
ZA MERJENJE, REGULACIJO  
IN AVTOMATIZACIJO**

## **Instrumentacija za procesno industrijo**

Potenciometrski elektronski indikatorji, registratorji in regulatorji — Indikatorji, registratorji in regulatorji pretoka, temperature in pritiska — Miniaturni elektronski instrumenti — Miniaturni pnevmatski instrumenti — Regulacijski ventili s pnevmatskim in električnim pogonom — Termoelementi in pirometri — Enostavni instrumenti za merjenje in regulacijo temperature in pritiska — Procesna računalna

## **Mikrostikala**

Standardna in miniaturna mikrostikala — Sigurnostna in miniaturna mikrostikala — Brezkontaktna stikala — Instrumenti za vgraditev (mV, mA itd.)

Honeywell je organizacija mednarodnega nivoja, ki združuje operativne oddelke za instrumentacijo kontrole gorenja, klimatizacijo in zagrevanje, procesno instrumentacijo, električne enote, mikrostikala, znanstveno instrumentacijo ter sisteme obdelave podatkov. Poglejmo zakaj je Honeywell edini v svetu v stanju nuditi aparature, naprave in tehnično pomoč za ustvaritev kompletnih programov avtomatizacije na različnih področjih in v popolnosti rešiti probleme točno po zahtevah naročnikov. V vsakem Honeywellovem instrumentu je namreč preciznost in izkušnja industrije, ki proizvaja celo 20.000 različnih proizvodov.

---

## **Regulatorji za gretje, hlajenje in klimatizacijo**

Električni regulacijski sistem — Elektronski regulacijski sistem — Pnevmski regulacijski sistem

## **Instrumentacija za gorilce in kotle**

Oljni gorilci za gospodinjstvo — Industrijski oljni gorilci — Plinske peči za gospodinjstva — Industrijski plinski gorilci — Regulatorji za kotle

## **Instrumenti za laboratorijske raziskave**

Pojačala in pretvorniki signala — Visicorder ascilografi — Laboratorijski potenciometrski registratorji — XY registratorji — Laboratorijski standardi — Monitorji — Diferencijski voltmetri in drugi precizni instrumenti — Digitalni merilni instrumenti — Korelatorji — Elektronski biomedicinski sistemi

---

# HONEYWELL

**AUTOMATION**

Sedež: Via Vittor Pisani 13 — 20124 Milano  
predstavnik za Jugoslavijo: Merkantile, Praška 2,  
Zagreb



Za vaš avto, naš novi izdelek

**MOTOROL-SUPER-SAE-10W/50**

**MOTOROL MULTIGRADE**

**SE SAE-10W/30 in 20/40**

– Olje za vse letne čase,  
visoka obstojnost  
in detergenca

– Mednarodni atesti

**PETROL - na vseh servisih PETROL**

---

Vsebina	stran	Inhalt	Seite	Contents	Page	Содержание	страница
Koroušič Blaženko		Koroušič Blaženko		Koroušič Blaženko		Koroušič Blaženko	
Aplikacija kisikove sonde pri direktnem določevanju vsebnosti kisika v tekočem jeklu	3	Der Einsatz der EMK-Sonde bei der direkten Bestimmung des Sauerstoffgehaltes im flüssigen Stahl	3	Application of oxygen probe in direct determination of oxygen content in molten steel	2	Применение кислородного зонда при непосредственном определении содержания кислорода в расплавленной стали	3
UDK: 669.046.552.3:669.787 ASM-SLA: S11r, E9q		UDK: 669.046.552.3:669.787 ASM-SLA: S11r, E9q		UDK: 669.046.552.3:669.787 ASM-SLA: S11r, E9q		UDK: 669.046.552.3:669.787 ASM-SLA: S11r, E9q	
Vodopivec Franc M. Gabrovšek, M. Kmetič		Vodopivec Franc M. Gabrovšek, M. Kmetič		Vodopivec Franc M. Gabrovšek, M. Kmetič		Vodopivec Franc M. Gabrovšek, M. Kmetič	
Raziskave vpliva vroče deformacije in izločilnega žarjenja na mikrostrukturo in trdoto mikrolegiranega jekla po normalizaciji	13	Untersuchungen des Einflusses der Warmverformung und der Ausscheidungsglühung auf das Mikrogefüge und die Härte des mikrolegierten Stahles nach dem Normalglühen	13	Investigations on influence of hot deformation and precipitation annealing on the microstructure and hardness of micro-alloyed steel after normalising	13	Исследования влияния горячей деформации и дисперсионного отжига на микроструктуру и на твердость микросплавной стали после нормализации.	13
UDK: 669.14.018.2:669-153,65 ASM-SLA: Ay-n J 24		UDK: 669.14.018.2:669-153,65 ASM-SLA: Ay-n J 24		UDK: 669.14.018.2:669-153,65 ASM-SLA: Ay-n J 24		UDK: 669.14.018.2:669-153,65 ASM-SLA: Ay-n, J 24	
Brezigar Boris, J. Kenda I. Kodrič, Z. Repič		Brezigar Boris, J. Kenda I. Kodrič, Z. Repič		Brezigar Boris, J. Kenda I. Kodrič, Z. Repič		Brezigar Boris, J. Kenda I. Kodrič, Z. Repič	
Hladno preoblikovanje kovin v industriji avtoelektrike	29	Kaltverformung der Metalle in der autoelektrischen Industrie	29	Cold forming of metals for electrical devices in car industry	29	Холодная деформация металлов в промышленности автотракторного оборудования.	29
UDK: 669-124.3 ASM-SLA: F1-67		UDK: 669-124.3 ASM-SLA: F1-67		UDK: 669-124.3 ASM-SLA: F1-67		UDK: 669-124.3 ASM-SLA: F1-67	
Exel Neža		Exel Neža		Exel Neža		Exel Neža	
Korozijska odpornost Corten jekla	37	Korrosionsbeständigkeit des Corten Wetterfesten Stahles	37	Corrosion resistance of corten steel	37	Коррозионноустойчивость Corten стали.	37
UDK: 620.191.2 : 669.14.018.821 ASM-SLA: K1a		UDK: 620.191.2 : 669.14.018.821 ASM-SLA: K1a		UDK: 620.191.2 : 669.14.018.821 ASM-SLA: K1a		UDK: 620.191.2:669.14.018.821 ASM-SLA: K1a	
Bratina Janez		Bratina Janez		Bratina Janez		Bratina Janez	
Sesalni krog — naprava za kompenzacijo jalove energije in za zmanjševanje višje harmonskih tokov	41	Saugkreis-Anlage zur Kompensation der Blindleistung und für die Erniedrigung der höheren harmonischen Ströme	41	Suction circuit — compensating reactive power and minimising harmonic current	41	Поглощающий контур — устройство для компенсации реактивного тока и отбора	
UDK: 621.039.43 ASM-SLA: UJc, W11a		UDK: 621.039.43 ASM-SLA: UJc, W11a		UDK: 621.039.43 ASM-SLA: UJc, W11a		UDK: 621.039.43 ASM-SLA: UJc, W 11a	
Tehnične novice	51	Technische Nachrichten	51	Technical News	51	Технические новости	51

## **10 let izhajanja Železarskega zbornika**

*Beseda glavnega urednika*

*Letos praznujemo deseto obletnico izhajanja Železarskega zbornika. Ta jubilej mogoče ni tako pomemben po letih, pač pa po uspehih, ki smo jih v tem času dosegli. Ko ocenjujemo ta jubilej in s tem vsebino Železarskega zbornika moramo upoštevati, da je Železarski zbornik nastal z združitvijo skromnih strokovnih glasil, ki so občasno izhajala kot tehnična priloga posameznih železarskih glasil splošnega pomena. Z vztrajnim delom strokovnjakov slovenskih železarn je Železarski zbornik zelo hitro prerastel v strokovno revijo, ki tako po vsebini kakor tudi po tehnični opremi dosega zavidljiv nivo in obseg.*

*Železarski zbornik je bil temeljni kamen v združevanju umskega dela strokovnjakov posameznih železarn in metalurškega inštituta v Ljubljani ter je s svojim delovanjem tako tudi prispeval k uspešni združitvi železarn Jesenice, Ravne in Štore ter metalurškega inštituta v sestavljeno organizacijo združnega dela Slovenske železarne.*

*Vsebina Železarskega zbornika je zelo pestra in široka, saj strokovnjaki obdelujejo problematiko, ki se nanaša tako na izdelavo kakor tudi na predelavo in uporabo plemenitih jekel, ki so osnovni proizvodni program slovenskih železarn. Zato ne preseneča ugotovitev, da je zanimanje za naš Železarski zbornik doma in v tujini vse večje in da ga danes pošiljamo ne le po vsej domovini, temveč tudi po deželah Evrope in Amerike.*

*V prijetno dolžnost mi je, da se na tem mestu v imenu uredniškega odbora zahvalim vsem, ki so prispevali k rasti naše strokovne revije. Posebno zahvalo sem dolžan dosedanjim strokovnim sodelavcem, to je dopisnikom in posameznim organizacijam združenega dela za finančno pomoč pri izdajanju revije v preteklem obdobju.*

*Prepričan sem, da je revija prispevala k boljšemu strokovnemu delu v naših železarnah in vabim vse k nadaljnjemu plodnemu sodelovanju.*



## Aplikacije kisikove sonde pri direktnem določevanju vsebnosti kisika v tekočem jeklu\*

UDK: 669.046.552.3

669.787

ASM/SLA: S11r, E9q

Blaženko Koroušič

*Intenzifikacija jeklarskih procesov sloni danes skoraj izključno na uporabi kisika, bodisi v obliki plina ali v obliki trdnih surovin (ruda, peleti itd.).*

*Kisik pa je tudi tisti element, ki povzroča praktikom vrsto problemov, zlasti v zvezi z dezoksidacijo in čistočo jekla glede nekovinskih vključkov.*

*Razvoj hitrih postopkov za proizvodnjo jekla, kot so pnevmatski postopki, so problem optimizacije kisika pri izdelavi šarže v peči in med litjem zelo aktualizirali.*

*Sodobne metode za določevanje vsebnosti kisika v jeklu slonijo na metodi je manja v z o r c e v. Ravno ta faza predstavlja največjo oviro pri uvajanju rutinske metode za kontinuirano merjenje vsebnosti kisika v jeklarskih agregatih!*

*Razvoj elektrokemične metode za direktno določevanje aktivnosti kisika v tekočem jeklu in njena aplikacija v industriji je omogočilo pridobivanje hitrih informacij o vsebnosti, oz. aktivnosti kisika med procesom izdelave in litja jekla.*

*Kljub številnim prednostim se uporaba EMN-metode širi zelo počasi celo v razvitih industrijskih državah. Današnja situacija je podobna tisti pred 15 leti, ko so jeklarji začeli z rutinskim merjenjem temperature v tekočem jeklu.*

*Namen tega članka je seznaniti jeklarje z možnostmi, ki jih nudi EMN-metoda za direktno določevanje vsebnosti kisika v tekočem jeklu.*

### 1. KISIK V JEKLU

Že od samih začetkov proizvodnje tekočega jekla je bilo praktikom znano, da ima kisik pomembno vlogo in da predstavlja enega od ključ-

nih elementov. Kisik je najbolj odločilen za nastajanje poroznosti, plinskih defektov in nekovinskih vključkov v jeklu.

Kljub številnim izkušnjam, ki so se nabrale do današnjih dni, je določevanje kisika med procesom izdelave šarže še vedno v domeni laboratorijskih preiskav. Dokaz za to je dejstvo, da do danes ni nikakršnih predpisov, ne v domačih ne v inozemskih standardih, glede vsebnosti kisika v gotovih izdelkih (celo vsebnost nekovinskih vključkov predstavlja redko izjemo).

Kisik ima prav gotovo največji vpliv na dezoksidacijsko tehniko in na procese, ki potekajo med strjevanjem ingota (zlasti pri polpomirjenih in nepomirjenih jeklih). Oglejmo si na kratko ti dve pomembni področji:

#### 1.1 Vpliv kisika na dezoksidacijsko prakso in strukturo strjenega jekla

Razvoj dezoksidacijske prakse v zadnjih 30 letih je pokazal, da je količina kisika v jeklu potrebno prilagoditi željenemu tipu ingota. Današnja jeklarska industrija razlikuje v glavnem tri osnovne tipe komercialnih jekel (glej **sliko 1**)<sup>2</sup>:

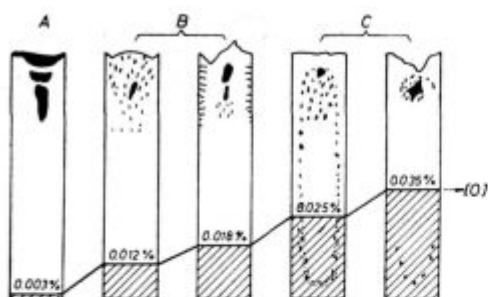
a) pomirjena jekla, pri katerih je kisik vezan na dezoksidacijsko sredstvo, zlasti Si, Al. Zaradi izredno nizke vsebnosti prostega kisika ne poteka med strjevanjem jekla nikakršna reakcija med raztopljenim ogljikom in kisikom:

b) polpomirjena jekla, pri katerih je količina prostega kisika zadostna (z dodatki Mn, Si in Al), da poteka kontrolirana tvorba CO med strjevanjem;

c) nepomirjena jekla, pri katerih paralelno s strjevanjem poteka tudi tvorba in izločanje CO iz taline. Zaradi intenzivnega delovanja »kuhanja« na kristalizacijski fronti so zunanje plasti ingota zelo čiste glede nekovinskih vključkov.

Dr. Blaženko Koroušič, dipl. inž., samostojni raziskovalec na metalurškem inštitutu v Ljubljani

\* Članek predstavlja skrajšani povzetek predavanja, ki ga je imel avtor v DIT v Železarni Štore, 26. 10. 1976



Förster, E., H. Neumann: Arch. Eisenhüttenwes. 39 (1968) 645-49

Slika 1

Shematski prikaz strukture ingotov iz pomirjenega (A), polpomirjenega (B) in nepomirjenega jekla (C) v odvisnosti od vsebnosti kisika (O)

Fig. 1

Schematic presentation of the ingot structure for killed (A), semi-killed (B), and not killed (C) steel depending on the oxygen content (O)

Pri izdelavi pomirjenih jekel se danes najbolj pogosto izvaja dezoksidacija z uporabo aluminija skupaj z dodatki ferozlitin, kot so: FeMn, Fe-Si in v določenih primerih tudi Ca-Si ali specialni močni dezoksidanti. Kontrola dezoksidacije sloni v glavnem na določevanju vsebnosti celotnega kisika v jeklu z različnimi analitskimi tehnikami.

V nekaterih primerih se ocenjuje vsebnost kisika preko ravnotežne ali empirično ugotovljene odvisnosti med kisikom in ogljikom; npr. (pri 1600 °C):

$$K = \% \underline{C} \cdot \% \underline{O} = 0,0023 \quad (1)$$

$$\% \underline{O} = A + \frac{B}{\% \underline{C}} \quad (2)$$

kjer pomenijo: A, B — konstante, odvisne od temperature, vsebnosti ogljika in drugih parametrov.

Toda vse te metode so le približne in veljajo za točno definirane pogoje in kvalitete in zato nimajo širšega pomena.

Kar dejansko potrebujejo jeklarji za boljše kontrolo dezoksidacijske prakse in tehnike litja kvalitetnih jekel, je hitro in točno merjenje koncentracije prostega (aktivnega) kisika v tekočem jeklu v momentu preboda, po dodatku dezoksidantov, pred začetkom litja, oz. med litjem (npr. pri konti litju jekla).

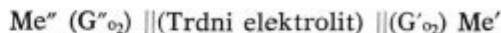
Vse te pogoje je mogoče uspešno zadovoljiti le z direktnim merjenjem vsebnosti kisika («in situ») v tekočem jeklu.

**2. Teoretične osnove določevanja aktivnosti in vsebnosti kisika v tekočem jeklu z EMN-metodo**

Teoretične osnove kisikove sonde za direktno določevanje aktivnosti, oz. vsebnosti kisika v tekočem jeklu so podrobno opisane v številnih publikacijah<sup>1,3-13</sup> zato se bomo omejili le na osnovne principe delovanja.

**2.1. Princip merjenja s kisikovo sondo**

Sonda za merjenje kisika v tekočih kovinah deluje po principu koncentracijske galvanске celice<sup>14</sup> (glej sliko 2).



kjer pomeni: Me'', Me' — elektronski vodniki

G''<sub>O<sub>2</sub></sub>, G'<sub>O<sub>2</sub></sub> — elektrode z različnim kisikovim potencialom, ki jih loči trdni elektrolit s kisikovo ionsko prevodnostjo.

Reverzibilni električni potencial, ki nastane med elektrodami Me'' in Me', je povezan s termodinamično reakcijo:

$$E^0 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{p''_{O_2}}{p'_{O_2}} \quad (4)$$

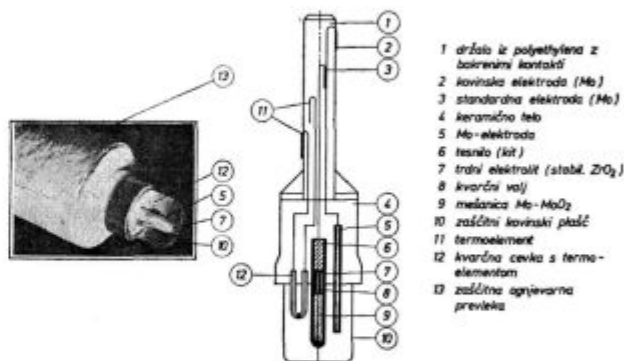
pri čemer pomeni:

- E<sup>0</sup> — elektromotorska napetost v mV
- R — plinska konstanta (= 1.987 cal. mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)
- n — število elektronov, ki sodelujejo pri prenosu O<sup>2-</sup>-ionov
- T — absolutna temperatura (K)
- F — Faradayeva konstanta (= 23061 cal. V<sup>-1</sup>. mol<sup>-1</sup>)

Pri normalni izvedbi kisikovih sond izberemo kot standardno elektrodo G''<sub>O<sub>2</sub></sub>, katere potencial (p''<sub>O<sub>2</sub></sub>) je poznan in konstanten pri temperaturi delovanja sonde.

Iz tega sledi, da je mogoče z merjenjem električnega potenciala E<sup>0</sup> in temperature — T določiti neznani potencial — p'<sub>O<sub>2</sub></sub>, ki je proporcionalen aktivnosti kisika v tekoči kovini

$$\log p'_{O_2} = \log p''_{O_2} - \frac{nFE^0}{RT} \quad (5)$$



Slika 2

Shematski prikaz merilne glave (tipa: Oxytip) in njen zunanji videz

Fig. 2

Schematic presentation of the measuring tip (Oxytip type) and its external appearance



## 2.2 Trdni elektrolit

Najširšo uporabo pri izdelavi kisikovih sond za določevanje kisika v tekočem jeklu je dosegel  $ZrO_2$ , stabiliziran s  $CaO$  ali  $MgO$ . Več avtorjev je poskušalo uporabiti tudi druge tipe oksidnih sistemov, ki kažejo popolno ali delno prevodnost za kisikove ione pri visokih temperaturah, kot so:  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Mg_2SiO_4$ ,  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  in dr.<sup>1, 4, 16</sup>.

Čeprav imajo omenjeni oksidni sistemi določene prednosti v primerjavi s stabiliziranim  $ZrO_2$  (večja korozijska obstojnost, manjša poroznost itd.), se danes skoraj izključno uporablja  $ZrO_2$  kot trdni elektrolit.

Primarne probleme pri izdelavi trdnih elektrolitov lahko formuliramo takole:

1. odpornost na termošoke,
2. elektronska prevodnost pri visokih temperaturah,
3. permeabilnost kisika.

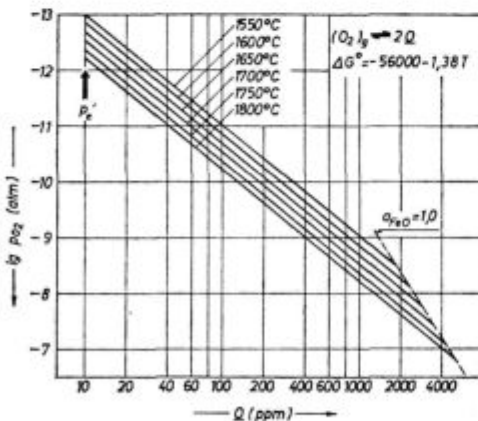
Problemi, ki so vezani na lastnosti elektrolitov na termične šoke, se danes rešujejo na dva načina:

a) izdelava delno stabiliziranega  $ZrO_2$  z določeno kemično sestavo in poroznostjo (Oxytip-sonda)<sup>16</sup>,

b) utalitev majhnega peleta iz stabiliziranega  $ZrO_2$  v kvarčno cevko<sup>17-21</sup>.

Nastopanje elektronske prevodnosti pri visokih temperaturah omejuje uporabo stabiliziranega  $ZrO_2$  kot ionskega vodnika pri nizki aktivnosti kisika. Po podatkih Turkdogan, E. T. in R. I. Fruehan<sup>22</sup> se kot spodnja meja za kritični parcialni pritisk kisika pri 1600 °C navaja vrednost 3.10<sup>-13</sup> atm, kar ustreza vsebnosti kisika okrog 10 ppm v čistem železu (glej sliko 3).

Danes še ni povsem jasno<sup>23,24</sup>, kje dejansko leži spodnja meja za čisto ionsko prevodnost in pri katerih vsebnostih kisika je potrebno korigirati merilne vrednosti zaradi nastopanja elektronske prevodnosti po teoriji Schmalzrieda<sup>25</sup>.



Slika 3

Odvisnost parcialnega pritiska kisika ( $p_{O_2}$ ) od vsebnosti raztopljenega kisika v čistem železu

Fig. 3

Relationship between the oxygen partial pressure ( $p_{O_2}$ ) and the amount of dissolved oxygen in pure iron

## 2.3. Primerjalna (standardna elektroda)

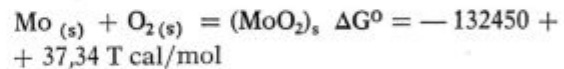
Dosedanje izkušnje pri merjenju kisika v tekočem jeklu so pokazale, da ima standardna elektroda določen vpliv na točnost merjenja. V začetku razvoja EMN-metode je prevladovalo mišljenje, da je »zrak« najidealnejša rešitev, ker njegov parcialni pritisk kisika ( $p''_{O_2} = 0.209$  atm) ni odvisen od temperature. Poznejše meritve permeabilnosti kisika v  $ZrO_2$ <sup>26, 27, 28</sup> so pokazale, da zračna elektroda ni najprimernejša, temveč da imajo pri izbiri elektrod prednost mešanice kovina-kovinski oksid, kot so:  $Mo-MoO_2$  in  $Cr-Cr_2O_3$ .

Današnji proizvajalci komercialnih izvedb sond uporabljajo več tipov standardnih elektrod:

1. Oxytip — sonda:  $Mo-MoO_2$  in  $Cr-Cr_2O_3$  (Hoesch, IRSID, MECI),
2. Celox — sonda:  $Cr-Cr_2O_3$  (Elektro-Nite, Houthalen, Belgija),
3. Fitterer-sonda:  $Mo-MoO_2$  (Oakmant, Pa., USA),
4. US-Steel sonda:  $Cr-Cr_2O_3$  (Leeds & Northrup, North Wales, Pa., USA),
5. MK II — sonde:  $Cr-Cr_2O_3$  (Broken Hill Prop., Shortland, Australia),
6. Oxypac — sonda: zrak (ASEA, Švedska),
7. OXP — sonda: zrak (Leigh Instr. Ontario, Kanada).

Iz tega je razvidno, da se največ uporabljajo sistemi  $Mo-MoO_2$ ,  $Cr-Cr_2O_3$  in zrak. Elektromotorna napetost —  $E^0$  je seveda različna za omenjene tri elektrodne sisteme:

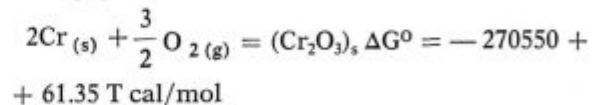
### Mo-MoO<sub>2</sub>:



$$E^0 \text{ (mV)} = -828,8 + 0,8156 T - 0,0992 T \log a_0 \quad (6)$$

$$\log a_0 \text{ (ppm)} = 8,221 - \frac{8356 + 10,08 E^0}{T} \quad (7)$$

### Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



$$E^0 \text{ (mV)} = -1348 + 0,8553 T - 0,0992 T \log a_0 \quad (8)$$

$$\log a_0 \text{ (ppm)} = 8,612 - \frac{13580 + 10,08 E^0}{T} \quad (9)$$

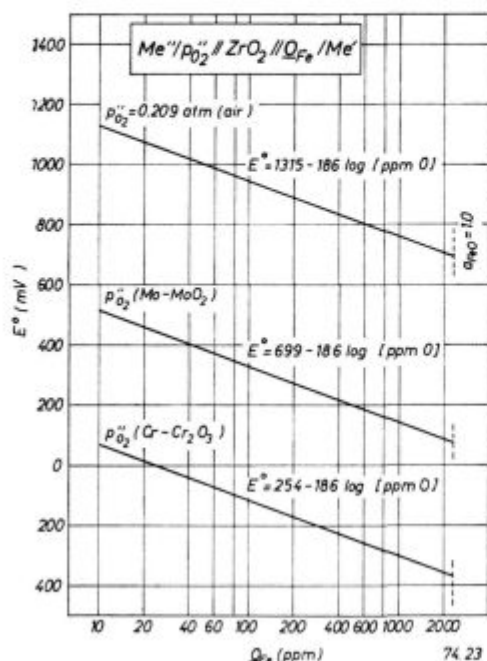
### Zrak:

$$p''_{O_2} = 0,2093 \text{ atm}$$

$$E^0 \text{ (mV)} = 607,1 + 0,3779 T - 0,0992 T \log a_0 \quad (10)$$

$$\log a_0 \text{ (ppm)} = 3,809 + \frac{6120 - 10,08 E^0}{T} \quad (11)$$

V vseh enačbah je  $E^0$  v (mV),  $T$  v (K) in  $a_0$  v (ppm =  $10^{-4}$  %). Na **sliki 4** je pokazana odvisnost med izračunano vrednostjo  $E^0$  (mV) in vsebnostjo kisika za čisto železo pri 1600 °C za tri omenjene elektrodne sisteme.



Slika 4

Odvisnost med izračunano vrednostjo  $E^0$  (mV) in vsebnostjo kisika  $O_{Fe}$  (ppm) za čisto železo pri temperaturi 1600 °C za tri standardne elektrode: air (zrak), Mo-MoO<sub>2</sub>, in in Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fig. 4

Relationship between the calculated  $E^0$  (mV) and the oxygen content,  $O_{Fe}$  (ppm), for pure iron at 1600 °C for three standard electrodes: air, Mo-MoO<sub>2</sub>, and Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2.4. Merjenje temperature

Pri uporabi mešanice Me-MeO<sub>2</sub> kot standardna elektroda je za točno merjenje nujno potrebno poznavanje temperature, ker je kisikov potencial —  $p''_{O_2}$  močno odvisen od temperature.

Nekateri avtorji izkoriščajo termoelement istočasno kot elektronski vodnik za standardno elektrodo, toda pri tem obstaja možnost kontaminacije platinskih vodnikov kovine standardne elektrode (npr. Cr, Mo itd.).

Zato ima večina komercialno izdelanih sond termoelement ločeno od galvanske celice (glej **sliko 2**).

Kot termopar se najbolj pogosto uporablja PtRh30%-PtRh6%, ki dovoljuje natančno merjenje do 1700 °C, kar povsem zadošča praktičnemu namenu.

## 2.5. Zaščita merilne glave

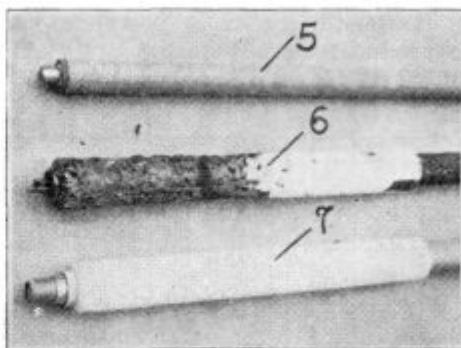
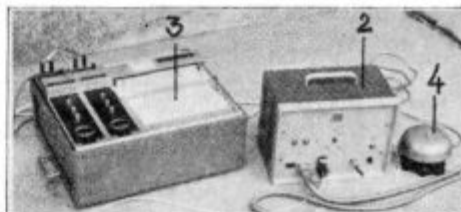
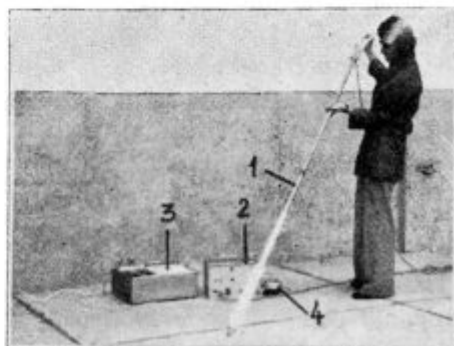
Pri potapljanju merilne glave v tekoče jeklo obstaja možnost kontaminacije trdnega elektrolita z žilindro (to velja zlasti za meritve v peči).

Da bi to preprečili, je potrebno merilno glavo zaščititi s kovinskim plaščem (glej **sliko 2**), ki se v kontaktu s tekočim jeklom hitro odtali.

## 3. Konstrukcija kisikove sonde in izdelava merilne naprave

Kisikova sonda za direktno določevanje vsebnosti kisika v tekočih kovinah je sestavljena iz pet osnovnih elementov (glej **sliko 5**):

1. merilna glava (oznaka: 7),
2. držalo za merilno glavo (oznaka: 1),
3. merilna naprava z avtomatiko (oznaka: 2),
4. merilni instrument (oznaka: 3),
5. signalni zvonec (oznaka: 4)



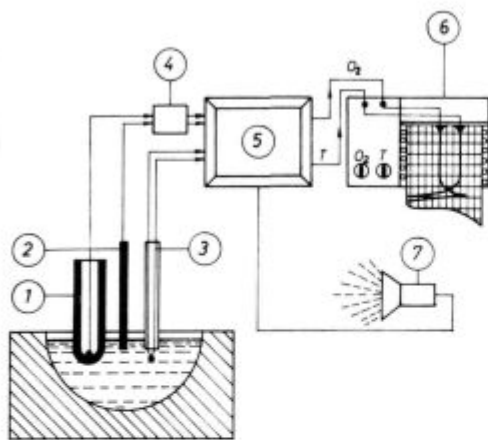
Slika 5

Fig. 5

Na **sliki 6** je prikazana blok-shema merjenja, ki smo jo uporabili pri naši izvedbi kisikove sonde.

### 3.1. Merilna glava

Merilna glava predstavlja galvansko-koncentracijsko celico, ki smo jo detajlno opisali v poglavju 2.1. Kot smo že omenili, se danes za direktno



Slika 6

Blok-shema merilne naprave za direktno merjenje vsebnosti kisika v tekočih kovinah

Fig. 6

Scheme of the measuring device for direct measurement of the oxygen content in molten metals

določevanje vsebnosti kisika v jeklu najbolj pogosto uporabljajo merilne glave z utaljenim trdim elektrolitom v kvarčno cevko in trdnim elektrolitom odpornim proti termičnim šokom.

Naše poskuse, izdelave merilnih glav smo usmerili na prvi tip, tj. utaljevanje  $ZrO_2$ -peletov v kvarčno cevko.

Kvarčna cevka je imela dimenzije:  $D_s = 7$  mm,  $D_i = 5,0$  mm in  $L = 9$  cm. Po večkratnih neuspeh poskusih nam je uspelo razviti tehniko utaljevanja  $ZrO_2$ -peleta v kvarčno cevko brez nastopanja kakršnihkoli razpok z zadostno plinsko nepropustnostjo.

Analiza stroškov izdelave 50—100 merilnih glav je pokazala, da bi se njihova cena zelo približevala komercialno izdelanim merilnim glavam.

Zato smo se odločili za nakup gotovih merilnih glav. Zunanji videz Oxytip merilnih glav je razviden s slike 5.

### 3.2. Držalo za merilno glavo

Kot je razvidno s slike 5, se merilna glava namontira na jekleno držalo, dolžine okrog 3 m. Električni kontakti so utaljeni in teflonsko maso in je na ta način omogočena hitra in zanesljiva zamenjava merilnih glav.

### 3.3. Merilna naprava z avtomatiko

Električni potencial, ki nastane v galvanski koncentracijski celici v kontaktu s tekočim jeklom, se preko posebnega napetostnega ojačevalca in sistema filtrov veže na registrirni instrument (analognega ali digitalnega tipa).

Električni potencial termoelementa izkoriščamo za avtomatsko odpiranje relejnega sistema, ki je v povezavi z merilnim instrumentom in signalnim zvoncem.

Čas merjenja (od potopitve merilne glave v talino do konca merjenja) je mogoče regulirati v mejah 5—20 s.

### 3.4. Merilni instrument

Pri naših poskusih smo za merjenje elektromotorske napetosti uporabili oba tipa merilnih naprav:

1. digitalni voltmeter, A 200 (Solartron) z vhodno impedenco nad 10000 MOhm v območju 0—1000 mV in natančnostjo merjenja 100 mikrovoltov,

2. dvokanalni registrirni instrument, Servogor 2, tipa RE 520 z vhodno impedenco 10 MOhm v območju 0—1000 mV z natančnostjo merjenja  $\pm 20$  mikrovoltov.

Vklop in izklop motorja za premik papirja na registrirnem instrumentu (vklapljanje motorja) je avtomatski na osnovi temperaturnega gradienta merilne glave.

### 3.5. Signalni zvonec

Konec merjenja s kisikovo sondo določa avtomatska naprava, ki je povezana z močnim električnim zvoncem. Na ta način je operater pravočasno obveščen, kdaj mora potegniti sondo iz taline.

## 4. ANALIZA REZULTATOV

Pri oceni dobljenih rezultatov smo izhajali iz dveh znanih dejstev:

1. natančnost EMN-metode,
2. natančnost primerjalne metode:
  - a) natančnost metode,
  - b) heterogenost vzorca.

### 4.1. Natančnost EMN-metode

Na natančnost EMN-metode vpliva več dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši:

- a) natančnost merjenja elektromotorske napetosti,
- b) natančnost merjenja temperature,
- c) homogenost taline v momentu merjenja.

Kot smo že omenili, je EMN-kisikove sonde dana z enačbo:

$$E^0 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{p''_{O_2}}{p'_{O_2}} \quad (4),$$

oziroma pri uporabi standardne elektrode ( $p''_{O_2} = Mo/MoO_2$ ):

$$E^0 = -828,8 + 0,8156 T - 0,0992 T \log a_0 \quad (6)$$

Enačba (4) oz. (6) daje natančno povezavo med  $E^0$  in  $a_0$  le v primeru, če je ohmska prevodnost elektrolita (stabilizirani  $ZrO_2$ ):

$$t_{O^{2-}} \geq 0,98$$

Laboratorijske preiskave so pokazale, da ionska prevodnost stabiliziranega Zn O<sub>2</sub> pada s padajočo vrednostjo parcialnega pritiska kisika (vsebnosti kisika v talini).

Pri zelo nizkih parcialnih pritiskih kisika lahko postane ionska prevodnost zelo nizka. Po teoriji Schmalzrieda<sup>25</sup> je mogoče korigirati elektromotorske napetosti, če so poznani podatki o tki.: p'<sub>e</sub> — kritičnem parcialnem pritisku, pri katerem sta ionska in elektronska prevodnost enaki (tj. t<sub>02</sub> — = 0.5).

Po podatkih Swinkelsa in sodelavcev je p'<sub>e</sub> za stabilizirani ZrO<sub>2</sub> le funkcija temperature<sup>24</sup>:

$$\log p'_e = 17.806 - \frac{62998}{T}$$

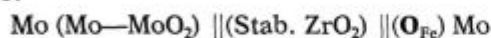
Na osnovi analize teh podatkov in omenjene teorije Schmalzrieda<sup>25</sup> lahko ugotovimo, da je vpliv elektronske prevodnosti trdnega elektrolita tem večji, čim višja je temperatura in čim nižja je aktivnost kisika v talini.

Korekture je potrebno izvršiti le pri vsebnostih kisika pod 100 ppm (pri tem napaka doseže vrednosti že 10 %).

Nadaljnja napaka, ki jo moramo upoštevati pri merjenjih kisika s sondo, je natančnost merjenja elektromotorske napetosti in temperature. Vpliv teh dveh parametrov lahko ocenimo na osnovi totalnega diferenciala enačbe (6). Rezultati so navedeni v tabeli 1:

Natančnost merjenja		T (°C)	Relativna napaka (v %) pri merjenju aktivnosti kisika v tekočem jeklu			
T	E		a <sub>0</sub> = 0.0050	a <sub>0</sub> = 0.020	a <sub>0</sub> = 0.050	a <sub>0</sub> = 0.100
5 °C	2 mV	1600	9.8	9.6	9.5	9.4
5 °C	4 mV	1600	12.3	12.1	12.0	11.9
10 °C	2 mV	1600	17.2	16.8	16.6	16.4

Tabela 1 — Vpliv natančnosti merjenja elektromotorske napetosti in temperature s kisikovo sondo:



Iz tabele 1 je razvidno, da ima na natančnost merjenja aktivnosti kisika zelo močan vpliv temperatura. Pri uporabi kisikove sonde za industrijske namene je potrebno torej zagotoviti naslednje pogoje:

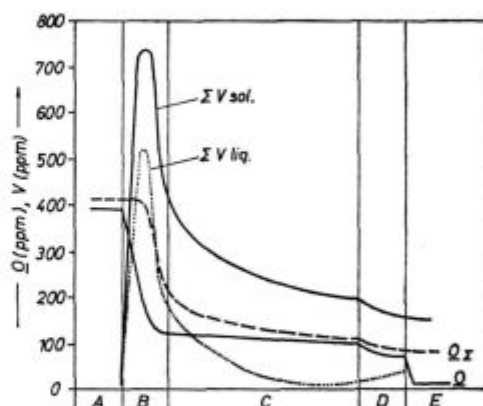
točnost merjenja EMN = ± 2 mV

točnost merjenja temperature = ± 5 °C

#### 4.2. Natančnost primerjalne metode (skupni kisik)

EMN-metoda za določevanje vsebnosti (aktivnosti) kisika v tekočih kovinah je po svoji zasnovi absolutna metoda in zato v principu ni potrebno uporabljati primerjalnih testov.

Toda glede na dejstvo, da EMN-metoda omogoča določevanje aktivnega kisika in klasične metode celokupnega kisika, je zanimiva komparacija rezultatov, ki omogoča vpogled v mehanizem izločanja oksidnih nekovinskih vključkov (glej sliko 7).



Slika 7

Shematska ponazoritev fenomenov, ki spremljajo dezoksidacijo jekla in izločanje vključkov (Plöckinger, E., M. Wahlster)

Fig. 7

Schematic presentation of phenomena accompanying the deoxidation of steel and precipitation of precipitates (Plöckinger, E., M. Wahlster)

#### 4.2.1. Natančnost metode

Na Metalurškem inštitutu v Ljubljani uporabljamo za določevanje vsebnosti kisika v jeklu metodo nosilnega plina\*.

Natančnost metode, oz. reproduktivnost rezultatov kontroliramo s standardnimi vzorci (normale) po zahodnonemških predpisih BAM, in sicer za naslednja koncentracijska območja:

- $\bar{X} = 31 \text{ ppm}$   
 $S = \pm 3 \text{ ppm}$   
 $V = \pm 9,67 \%$
- $\bar{X} = 84 \text{ ppm}$   
 $S = \pm 6 \text{ ppm}$   
 $V = \pm 7,14 \%$
- $\bar{X} = 113 \text{ ppm}$   
 $S = \pm 7 \text{ ppm}$   
 $V = \pm 6,19 \%$
- $\bar{X} = 312 \text{ ppm}$   
 $S = \pm 10 \text{ ppm}$   
 $V = \pm 3,21 \%$

\* Metoda sloni na taljenju vzorca (dimenzij:  $\varnothing 5 \times 7 \text{ mm}$ ) v grafitnem lončku, pri čemer nastaja CO, ki se nato oksidira v CO<sub>2</sub>, nakar sledi določevanje koncentracije CO<sub>2</sub> s konduktometrično metodo.

Obdelava podatkov, dobljenih z omenjeno metodo za spodnjo mejo koncentracije kisika, je dala naslednje vrednosti:

$$\bar{X} = 29 \text{ ppm}$$

$$S = \pm 3,6 \text{ ppm}$$

$$V = \pm 12,41 \%$$

kar za izbrano število paralelek povsem ustreza predpisom za to področje. Na osnovi tega konstatiramo, da je natančnost uporabljene primerjalne metode povsem zanesljiva.

#### 4.2.2. Heterogenost vzorca

Ena od največjih pomanjkljivosti standardnih metod za določevanje kisika v jeklu je prav gotovo heterogenost vzetege vzorca.

Danes so metode analitske tehnike določevanja kisika v jeklu veliko bolj dognane, kot je samo vzorčevanje. Čeprav je razvoj tudi na tem področju opazen (uvajanje posebnih načinov jemanja vzorcev — »pin probe«, Leco-sistem itd.) leži še vedno jedro problema v heterogenosti vzorca.

V literaturi je o tem zelo veliko podatkov<sup>20</sup>, zato se bomo omejili na naše rezultate.

Statistična obdelava velikega števila paralelno vzeti preizkušancev za določevanje kisika je pokazala, da je zveza med »pin« (B) in »kvanto« (A) preizkušancem linearna:

$$\Sigma O_B (\%) = 0,0054 + 0,615 \Sigma O_A (\%)$$

Iz te enačbe sledi, da »pin probe« dajo nekoliko višje vrednosti kisika v področju nizkih koncentracij (izpod 0,014 % O) in nižje vrednosti v območju višjih vsebnosti kisika (nad 0,014 % O).

### 5. PRIMERJAVA CELOTNI KISIK — AKTIVNI KISIK

Na aplikacijo kisikove sonde v industrijskih pogojih je mogoče računati le pri naslednjih pogojih:

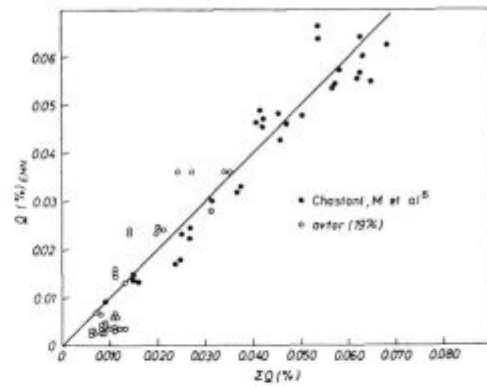
- 1) zadosti visoka natančnost metode (reproduktivnost:  $\pm 10 \%$ ),
- 2) cena merjenja.

Pri analizi prvega vprašanja večina avtorjev izhaja iz primerjalnega testa: celotni kisik, določen s standardno kemično analizo, in kisik, določen s kisikovo sondo.

Na **sliki 8** je prikazana ta primerjava skupaj z rezultati Chastanta in sodelavcev<sup>15</sup>. Po oceni teh avtorjev je natančnost metode v omenjenih mejah  $\pm 10 \%$ . Tudi drugi avtorji so prišli do podobnih rezultatov<sup>12, 13, 22</sup>.

Večina teh podatkov se nanaša na nepomirjena in polpomirjena jekla, pri katerih je zveza med celotnim in aktivnim kisikom zelo visoka, s koeficientom aktivnosti kisika  $f_0 \cong 1,0$ .

Statistična obdelava lastnih podatkov, ki se nanašajo na pomirjeno in delno nepomirjeno sta-



Slika 8

Odvisnost med vsebnostjo celotnega kisika ( $\Sigma O$  %) in aktivnega kisika ( $O_{EMN}$  %), določenega s kisikovo sondo

Fig. 8

Relationship between the total oxygen content (% O) and the active oxygen (%  $O_{EMN}$ ) determined by the oxygen probe

nje, kaže, da je vsebnost aktivnega kisika v pomirjenih talinah znatno nižja, kot to kaže analiza celotnega kisika. Pri višjih vsebnostih kisika pa je obratna situacija. To velja zlasti za taline, ki so obdelane s plinskim kisikom (oksidativna perioda).

Čeprav je število meritev premajhno za eksaktnjšo analizo, so te tendence izrednega pomena za prakso.

#### 5.1. Pomirjeno jeklo

V industrijskih pogojih obstaja vrsta dejavnikov, ki vplivajo na natančnost merjenja:

- 1) heterogenost taline v peči, ponvi, kokili itd.,
- 2) prisotnost nekovinskih vključkov.

Heterogenost taline je do danes le na splošno poznana in obstajajo le kvalitativne študije. Zato je vprašanje heterogenosti taline, zlasti v peči, velikega praktičnega pomena.

Naši poskusi so pokazali, da je največja homogenost taline v indukcijskih pečeh.

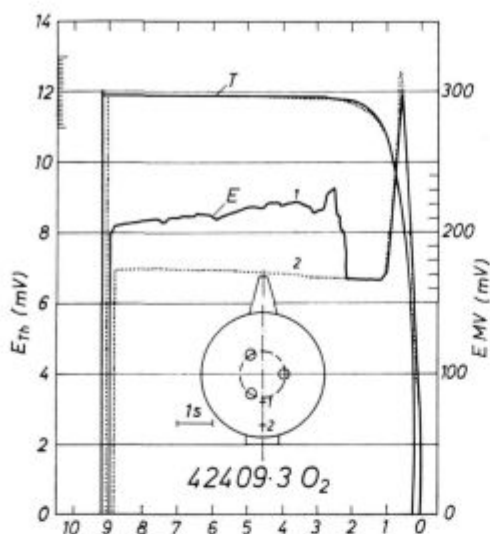
V elektroobločnih pečeh je heterogenost taline dokaj velika in se spreminja s časom taljenja.

Na **sliki 9** je jasno opaziti obstoj konvektivnih tokov v talini, ki spreminjajo oksidacijski potencial v bližini merilnega mesta.

Tako ugotavljamo, da je vsebnost kisika v obrobem delu peči (bližje steni peči) večja kot v sredini peči (bližje elektrodam). To smo opazili enako na 10-tonski in 40-tonski peči.

Obstoj heterogenosti je mogoče potrditi tudi v jeklarski ponvi takoj po preobodu (glej **sliko 10**), kjer ugotavljamo večjo vsebnost kisika pod površino žilindre (0,0048 % O), kot na večji globini (v povprečju 0,0024 % O).

Iz tega sledi zaključek, da bo treba v bodoče posvetiti posebno pozornost heterogenosti taline, zlasti pri meritvah kisika v peči.



Slika 9  
Temperatura in aktivnost kisika v tekočem jeklu EC-80, 30 min po dodatku Al za preddezoksidacijo (šarža 42409, 10 T peč)

Fig. 9  
Temperature and oxygen activity in molten EC-80 steel 30 minutes after Al for predeoxidation was added (melt 42409, 10 t furnace)

5.2. Nekovinski vključki

Standardne kemične analize za določevanje kisika dajejo, kot smo že poudarili, skupni kisik v jeklu:

$$\Sigma O = \Sigma O_{\text{aktivni}} + \Sigma O_{\text{vezani}}$$

Prisotnost nekovinskih vključkov je očitna zlasti v pomirjenih jeklih (po dezoksidaciji z Al ali Ca-Si), pri katerih se nastali oksidni vključki niso uspeli še izločiti iz taline.

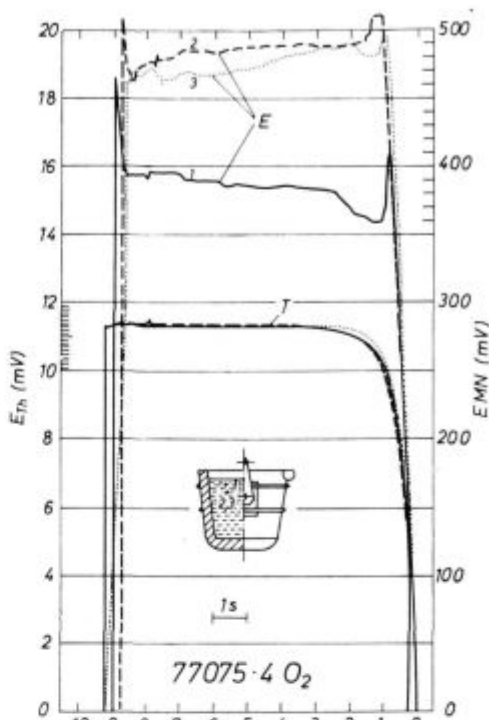
Za potrditev tega smo primerjali vsebnost celotnega kisika z aktivnim kisikom za jeklo EC-80 v talini takoj po obdelavi z Al in Ca-Si (glej sliko 11). Iz slike sledi, da vsebnost aktivnega kisika odgovarja pseudo-ravnotežnemu stanju v sistemu Fe-Mn-Al-O (Hilty & Crafts<sup>22</sup>) medtem, ko je vsebnost celotnega kisika znatno višja zaradi prisotnosti suspendiranih oksidnih vključkov.

Zanimivost teh ugotovitev je v dejstvu, da bo mogoče z enostavnim merjenjem aktivnega kisika po EMN-metodi oceniti vsebnost topnega aluminija v jeklu, in sicer še v času, ko je mogoče izvršiti njegovo korekturo.

Če se bo potrdila ta ugotovitev, je prav gotovo aplikaciji kisikove sonde odprta pot tudi na področju nizkolegiranih konstrukcijskih jekel in jekel za popljšanje, kar je zlasti pomembno za kontrolirano dezoksidacijo teh jekel pri kontilitju.

6. ZAKLJUČKI

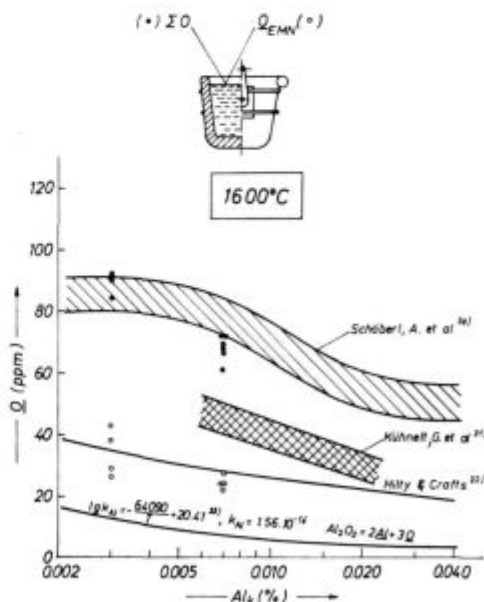
Številni poskusi direktnega določevanja vsebnosti kisika v tekočem jeklu so pokazali, da nova metoda daje zanesljive in reproduktivne rezultate



Slika 10  
Temperatura in aktivnost kisika v tekočem jeklu ECMo-80 (šarža 77075) po dezoksidaciji v ponvi (40 T peč)

Fig. 10  
Temperature and oxygen activity in molten ECMo-80 steel (melt 77075) after deoxidation in ladle (40 t furnace).

v laboratorijskih in industrijskih pogojih. Pri določevanju kisika (»in situ«) s kisikovo sondo ni potrebno vzorčevanje tekoče kovine. Izognitev tej



Slika 11  
Odvisnost med vsebnostjo kisika in kislino-topnega aluminija v konstrukcijskih jeklih pri temperaturi 1600 °C

Fig. 11  
Relationship between the oxygen content and the acid-soluble aluminium in structural steel at 1600 °C

operaciji, na kateri slonijo dosedanje metode, pomeni veliko pridobitev, kajti ravno vzorčevanje tekoče kovine v industrijskih pogojih predstavlja zelo kritično operacijo in onemogoča rutinsko analizo kisika.

Uvajanje elektrokemične metode za določevanje kisika nudi jeklarju boljšo kontrolo oksidacijske tehnike in večjo zanesljivost pri izdelavi polpomirjenih in pomirjenih jekel.

Dosedanje meritve so pokazale, da je natančnost metode določevanja vsebnosti kisika v tekočem jeklu z elektro-kemično metodo precej odvisna od merilnega mesta, oz. od homogenosti taline (cca  $\pm 10\%$ ).

Ekonomska analiza vpeljane metode je pokazala, da se cena za eno meritev kisika lahko primerja s ceno za določevanje kisika po standardni metodi: vzorčevanje + analiza.

Pri tem ni upoštevano dejstvo, da pri merjenju kisika s kisikovo sondo odpade paralelno merjenje temperature tekočega jekla, kar dodatno znižuje ceno merjenja.

Metoda, ki jo je razvil in osvojil Metalurški inštitut v Ljubljani, se je pokazala kot dovolj zanesljiva za delo v industrijskih pogojih (jeklarnah in jeklolivarnah).

#### LITERATURA

- Koroušić B.: Rudar. melatur. zbornik 3—4 (1969) 395—401; *ibid.* 1 (1970) 43—57
- Knüppel H.: Desoxidation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen — Verlag »Stahleisen m. b. H., Düsseldorf 1970 S. 9—11
- Ohtani M., K. Sanbongi: Tetsu to Hagané 48 (1962) 534—537
- Luzgin V. P., et al.: *Izv. VUZ, Čer. met.* 6, 9 (1963) 50—54
- Fischer W. A., W. Ackermann: *Arch. Eisenhüttenwes.* 36 (1965) 643—648, 695—698
- Fitterer G. R.: *J. Metals* 18 (1966) 961—966, *ibid.* *J. Metals* 19, 9 (1967) 92—96
- Matsushita Y., K. S. Goto: *Trans. ISIJ.* 6 (1966) 131—138
- Engell H.-J. et al.: *Hoesch-Ber.* 2 (1967) 146—155
- Schwerdtfeger K.: *Trans. Metall. Soc. AIME* 239 (1967) 1276—1281
- Catoul P., et al.: *Centre Nation. Rech. Metall.* Nr. 11 (1967) 57—62
- Turkdogan E. T., R. I. Fouchan: *Yearb. Amer. Iron Steel Inst.* (1968) 279—302
- Ulrich K. H., K. Borowski: *Arch. Eisenhüttenwes.* 39 (1968) 259—263
- Pargeter J.: *J. Metals* 20, 10 (1968) 27—31
- Kiukkola K., C. Wagner: *J. Electrochem. Soc.* 104 (1957) 379—387
- Chastant M., et al: *Communication, Re 94, Decem.* (1971)
- Javojski V. I., et al.: *Izv. VUZ. Čern. met* 71 (1971) 534—537
- Russel C. K., et al: *J. Metals*, 11 (1971) 44—47 (2110)
- Hanos B., et al.: *ASEA Journal Vol. 45, 4* (1972) 113—114
- Ihida M., Y. Kawai: *Trans, ISIJ. Vol. 12* (1972) 269—275
- Povolockii D. Ja al: *Izv. VUZ. Čer met.* 12 (1973) 49—52 (2957)
- Turkdogan E.: *JISI*, 1 (1972) 21—36 (2068)
- Turkdogan E. T., R. I. Fruehan: *Canad. Metall. Quarterly, Vol. 11, 2* (1972) 371—384
- Chastant M., et al: *Europ. Gem. Kohle u. Stahl, Techn. Forsch. »Stahl« Abschlussber. Ver. Nr. 6210—21/070.1973, Eur. 5091 d, e, f*
- Swinkels D. A., et al.: *Proc: Nat. Open Hearth Bas Oxy. Steel Comm. Iron Steel Div., Amer Inst. min. metall, petrol. Eng. Vol. 55* (1972) S. 74/79
- Schmalzried H.: *Zeit Physik. Chem. N. F.* 38 (1963) 87—102
- Möbius H.-H., R. Hartung: *Silikattechnik* 16 (1965) 276—281
- Fischer W. A., D. Janke: *Arch Eisenhüttenwes.* 41 (1970) 1027—1033
- Koroušić B.: *Rudar. Metal. Zbornik št. 213* (1971) 275—289, *isto Stahl u. Eisen* 93 (1973) 446—448
- Burghard H.: *Freib. Forschung B* 145 (1969)
- Schöberl A., W. Holzgruber, H. Raisky: *Radex-Rundschau* (1964)
- Kühnelt G., R. Plessing, H. Raisky: *Berg — u. Hüttenmannhafte* 11, 116 Jhg. S. 399—406
- Hilty B. C., W. Crafts: *J. Metals* 188 (1950) S. 414—424
- MeLean A., R. G. Ward: *JISI*, 1 (1966) 8—11

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die zahlreichen Versuche der direkten Bestimmung des Sauerstoffgehaltes im flüssigen Stahl haben ergeben, dass die neue Methode zuverlässige und reproduktionsfähige Ergebnisse in laboratorischen wie auch in industriellen Bedingungen liefert.

Bei der Bestimmung des Sauerstoffes mit der EMK-Sonde entfällt die Probennahme des flüssigen Stahles. Die Ausweichung dieser Operation auf welcher die bisherigen Bestimmungsmethoden beruhen, bedeutet ein grosses Gewinn, denn gerade die Probennahme des flüssigen Stahles in Betriebsbedingungen stellt eine kritische Operation dar und macht eine routinenmässige Sauerstoffbestimmung unmöglich.

Die Einführung einer elektrokemischen Methode für die Bestimmung des Sauerstoffes bietet dem Stahlwerker eine bessere Kontrolle der Oxydation und eine grössere Sicherheit bei der Erzeugung halbberuhigter und beruhigter Stähle.

Die bisherigen Messungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit der Sauerstoffbestimmung im flüssigen Stahl mit der elektrochemischen Methode im beträchtlichen Masse von dem Messpunkt bzw. von der Homogenität der Schmelze (cca  $\pm 10\%$ ) abhängt.

Die Wirtschaftlichkeit der eingeführten Methode zeigte, dass der Preis für eine Sauerstoffmessung mit dem Preis für die Bestimmung nach der konventionellen Methode: Probenvorbereitung und Analyse, verglichen werden kann.

Wenn man noch berücksichtigt, dass damit eine parallele Badtemperaturmessung überflüssig ist, so werden die Kosten der Sauerstoffmessung noch billiger.

Die Methode welche von dem Metallurgische Institut in Ljubljana eingeführt worden ist, hat sich bei der Arbeit in Industriebedingungen (Stahlwerke, Stahlgessereien) als genügend zuverlässig erwiesen.

## SUMMARY

Numerous tests of direct determination of oxygen content in molten steel showed that the new method gives reliable and reproducible results in laboratory and industrial conditions.

In determining oxygen »in situ« by the oxygen probe, no sampling of molten metal is needed. Thus the operation which is very critical in industrial conditions is avoided since sampling does not allow routine analysis of oxygen.

Introduction of the electrochemical method for oxygen determining offers a better control of the oxydation process and greater certainty in manufacturing semi-killed and killed steel.

The performed measurements till now showed that the accuracy of the method depends a great deal on the homogeneity of the melt and thus on the chosen area of the measurement (about  $\pm 10\%$ ).

Economical analysis of the introduced method showed that the price for one oxygen measurement can be compared with the price of oxygen determination by the standard method: sampling + analysis.

Since parallel measurement of the melt temperature is not needed when oxygen probe is used, therefore the total price for the measurement is even lower.

The method developed in the Institute of Metallurgy in Ljubljana is enough reliable for work in industrial conditions (steelworks and steel foundries).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные исследования непосредственного определения содержания кислорода в расплавленной стали показали, что этот новый метод дает надежные и репродуктивные результаты в лабораторных и в промышленных условиях.

При определении кислорода (»in situ«) с кислородным зондом употребление жидкого металла как образца не необходимо. Избежание этой операции на которую опираются предыдущие методы представляет большое приобретение, так как, именно отбор образцов расплавленного металла представляет весьма критическую операцию и не дает возможность выполнять рутинные анализы кислорода.

Введение электрохимического метода определения кислорода дает сталевару возможность более успешно следить за техникой раскисления и большую надежность при изготовлении полуспокойной и спокойной стали.

Прежние измерения показали, что точность метода определения содержания кислорода в жидкой стали электрохимическим способом зависит главным образом от места измерения, относ. от однородности расплава (прибл.  $\pm 10\%$ ).

Экономическая сторона метода показала, что стоимость одного измерения кислорода можно сравнить с стоимостью определения кислорода по стандартному методу: приготовление образца + анализ. При этом нельзя упустить, что при измерении кислорода с кислородным зондом отпадает параллельное измерение т-ры, что уменьшает цену измерения.

Метод, которого развил и усвоил Металлургический Институт в Любляне оказался довольно надежным для работ при промышленных условиях (в сталеплавильных и сталелитейных заводах).



# Raziskave vpliva vroče deformacije in izločilnega žarjenja na mikrostrukturo in trdoto mikrolegiranega jekla po normalizaciji

ASM/SLA: Ay-n J<sub>24</sub>  
UDK: 669.14.018.2 : 669-153.65

F. Vodopivec, M. Gabrovšek in M. Kmetič

## 1. UVOD

Mikrolegirana jekla predstavljajo velik napredek pri izboljšanju kvalitete in uporabnosti jekel, ki jih sicer radi označimo s pojmom masovna jekla, zato ker se uporabljajo v velikih količinah. Odlikujejo se po visoki meji plastičnosti, visoki žilavosti, nizki prehodni temperaturi žilavosti, po dobrih tehnoloških lastnostih in zadovoljivi varivosti. Jekla vsebujejo le majhne količine legirnih elementov, predvsem niobija in vanadija. Izoblikovali sta se dve tehnologiji predelave jekel. Ena je tako imenovano kontrolirano valjanje, to je valjanje v določenem temperaturnem intervalu po določenem načrtu redukcij debeline. Po literaturnih podatkih je v tem primeru predvsem važna končna temperatura valjanja in končna redukcija, da dobi jeklo finožrnato, vendar rekristalizirano mikrostrukturo iz ferita in perlita, kar mu poleg izločilne utrditve zagotovi dobre uporabne lastnosti. V strokovnem tisku je zelo veliko razprav in in člankov o kontroliranem valjanju, od začetnih razprav Irvina in Pickeringa<sup>1</sup>, Morrisona<sup>2</sup>, preko člankov, ki obravnavajo izoblikovanje mikrostrukture in izločilno utrditev pri kontroliranem valjanju, na pr.: Jones in Rotwell<sup>3</sup>, Duckworth, Philipps in Chapman<sup>4</sup>, Baker<sup>5,6</sup>, Philipp in Crane<sup>7</sup> ter posebno Irvine, Gladmann, Orr in Pickering<sup>8</sup>, ki obravnavajo poleg učinka valjanja, še učinek količine mikrolegirnih elementov ter ogljika in mangana. Pomembne so tudi razprave, ki obravnavajo samo izločilno utrditev, predvsem mehanizem izločanja, velikost delcev, njihovo razdelitev in utrditev, ki jo povzročata njihova prisotnost, na pr.: Gray, Webster in Woodhead<sup>9</sup>, Mandry, Namdar in Wache<sup>10</sup>, Tanino in Aoki<sup>11</sup>, Constant, Grumbach in Sanz<sup>12</sup>, Battle in Honeycombe<sup>13</sup>, Hornbogen in Minuth<sup>14</sup> ter Gabrovšek<sup>15</sup>. Objavljeno je bilo še precej razprav, ki obravnavajo različne poglede na nastanek izločkov. S teoretičnega gledišča je zanimivo delo Le Bona, Rofes-Vernisa in Rossarda<sup>16</sup>, ki obravnava vpliv prisotnosti niobija v jeklu, v trdi raztopini v avstenitu, ali v obliki izločkov, na

utrditev in rekristalizacijo avstenita pri vroči predelavi jekla.

Zelo izčrpno razpravo o vplivu mikrolegiranja na lasnosti jekel so objavili Meyer, Bühler in Heisterkamp<sup>17</sup>. Vedeti je potrebno, da je bil Meyer nosilec razvoja na področju mikrolegiranih jekel v ZR Nemčiji in je objavil številne razprave o problemih teh jekel.

Valjarne, ki za kontrolirano valjanje niso bile grajene ali preurejene, lahko valjajo le pri zmanjšani produktivnosti, seveda ob pogoju, da valjarska stojala lahko brez posledic prenašajo velike sile, ki nastajajo pri močnih redukcijah jekla, ki je sorazmerno trdo zaradi nizke končne temperature predelave.

Druga pot izkoriščanja učinka mikrolegiranja je kombinacija valjanja in toplotne obdelave. V tem primeru pogoji valjanja niso tako strogo opredeljeni, manjše pa so tudi obremenitve valjarskih ogrodi. Mislimo, da smemo šteti k temu postopku v dobro dejstvo, da je zaradi dodatne toplotne obdelave manj možnosti, da bi v ploščah prišlo do tako izrazite slojaste razdelitve ferita in perlita, da bi bile lastnosti jekla v smeri pravokotno na ravnino valjanja bistveno slabše, kot v ravnini valjanja. To je posebno važno v primerih, ko so na ploščah kotni zvari, pri katerih izrazita slojavost in zelo sploščeni sulfidni vključki močno zmanjšujejo nosilnost pločevine v smeri debeline in povzročajo lamelno trganje.

V strokovnem tisku o drugem postopku skoraj ni podatkov, iz naše obrazložitve pa izhaja, da je tehnološko manj ugoden, vendar še vedno zanimiv. Zato je upravičeno prizadevanje, da se bolje spoznajo procesi, od katerih so odvisne lastnosti jekla po predelavi in toplotni obdelavi in se tako eventualno najde pot za dopolnitev tehnologije predelave.

Ta raziskava je zanimiva tudi za primer, ko pogoji uporabe zahtevajo normalizacijo zvarjenih konstrukcij ali odkovkov iz mikrolegiranih jekel.

Velja si zapomniti, da je potrebno za optimalno izkoriščenost mikrolegiranja in da bi dosegli ugodne mehanske in tehnološke lastnosti jekla, doseči naslednje:

— enakomerno mikrostrukturo iz ferita in perlita s čim manjšimi kristalnimi zrni,

Dr. Franc Vodopivec, dipl. inž. je samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu v Ljubljani

Dr. Marin Gabrovšek, dipl. inž., direktor TKR Železarne Jesenice

M. Kmetič, sodelavec Metalurškega inštituta v Ljubljani

— doseči čim manj plastasto razdelitev ferita in perlita in s tem približati lastnosti jekla v smeri pravokotno na ravnino valjanja lastnosti v ravnini valjanja in

— končno doseči čim večji učinek izločilne utrditve, vendar le do meje, ko afinacija kristalnih zrn ohrani jeklu dobro žilavost in nizko prehodno temperaturo.

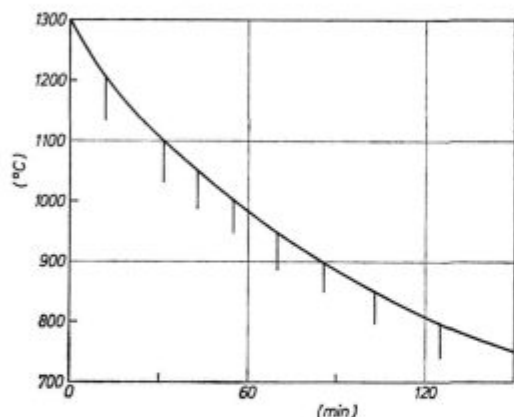
## 2. NAČIN DELA

Za raziskavo smo izbrali tri jekla, pomirjena z aluminijem, katerih sestave so v tabeli 1. Vsa jekla imajo enako osnovno sestavo, eno je brez dodatka mikrolegiranih elementov, drugo je legirano z niobijem, tretje pa je legirano z niobijem in vanadijem.

Tabela 1 — Sestava jekel

Element: v %	Č 0562	Niobal 43	Nioval 47
C	0,18	0,16	0,17
Si	0,38	0,50	0,44
Mn	1,21	1,44	1,39
Al	0,030	0,066	0,033
Nb	—	0,062	0,057
V	0,009	—	0,055
N	0,0064	0,0128	0,0127
Cu	0,14	0,22	0,16

Vzorci jekel smo topilno ogrevali eno uro pri 1300 °C, nato v peči ohladili na temperaturno deformacijo (sl. 1) in deformirali z enim udarcem na padalnem kladivu v temperaturnem intervalu med 1300 in 750 °C. Energija kladiva je bila konstantna, zato je stopnja deformacije padala od



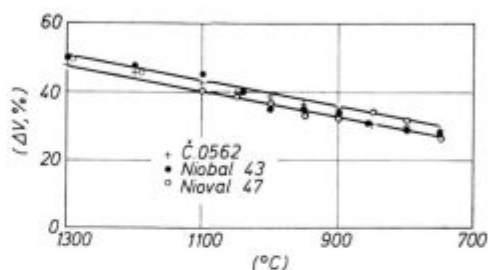
Slika 1

Prikaz ohlajanja jekel v peči z označenimi temperaturami deformacije

Fig. 1

Presentation of cooling steel in furnace with marked temperatures of deformation

približno 50 % na približno 30 % (sl. 2). Velikost vzorcev je bila 100 × 13 × 6 mm, zato smo lahko opravili le metalografske preiskave in meritve trdote.



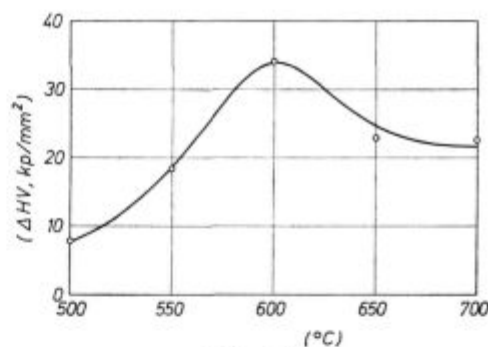
Slika 2

Stopnja deformacije v odvisnosti od temperature

Fig. 2

Degree of deformation depending on the temperature

V obeh mikrolegiranih jeklih je prišlo do statične rekristalizacije po deformaciji do temperature 1050 °C. Pod 1000 °C je ostal avstenit nerekrystaliziran, med obema temperaturama pa je prišlo do delne rekristalizacije. Jeklo brez mikrolegiranih dodatkov je rekristaliziralo po deformaciji do mnogo nižje temperature in samo po deformaciji pri 750 °C je ostal avstenit nerekrystaliziran, deloma rekristaliziran pa pod 850 °C.



Slika 3

Vpliv temperature izločilnega žarjenja (trajanje 1<sup>h</sup>) na pridobitev trdote jekla Nioval 47

Toplotna obdelava: Topilno ogrevanje 1<sup>h</sup> pri 1300 °C, ohlajitev na zraku in izločilno ogrevanje

Fig. 3

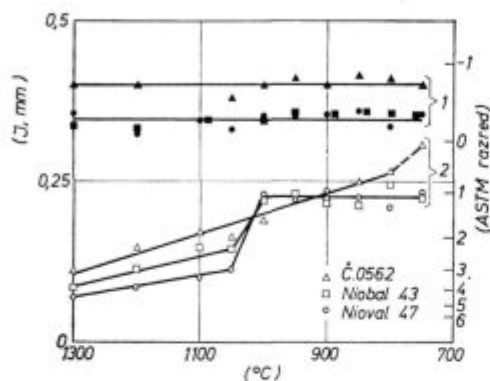
Influence of precipitation annealing temperature (1<sup>h</sup>) on the hardness increase of Nioval 47 steel. Heat treatment: dissolution annealing 1 hour at 1300 °C, cooling in air, and precipitation annealing

Po deformaciji so bili vzorci ohlajeni na zraku ali kaljeni v vodi. Nato so bili na zraku ohlajeni vzorci izločilno ogrevani eno uro pri 600 °C, kar povzroči največjo izločilno utrditev (sl. 3) in normalizirani pri 920 °C. Vzorci, kaljeni s temperature deformacije, so bili le normalizirani. Del vzorcev, na katerih smo določili velikost avstenitnih zrn, je bil kaljen s temperature normalizacije.

Velikost avstenitnih zrn smo določili po metodi linearne intercepcije. Na vsakem vzorcu smo določili trdoto iz povprečja 12 do 15 meritev.

## 3. REZULTATI IN KOMENTAR

Velikost avstenitnih zrn pred deformacijo (po toplinem ogrevanju) je bila skoraj enaka v vseh jeklih. V deformiranem in rekristaliziranem stanju je velikost avstenitnih zrn naraščala s padanjem temperature deformacije (sl. 4). Mogoče je bila temu vzrok vzporedno padajoča intenziteta deformacije. Velikost avstenitnih zrn, merjena v smeri

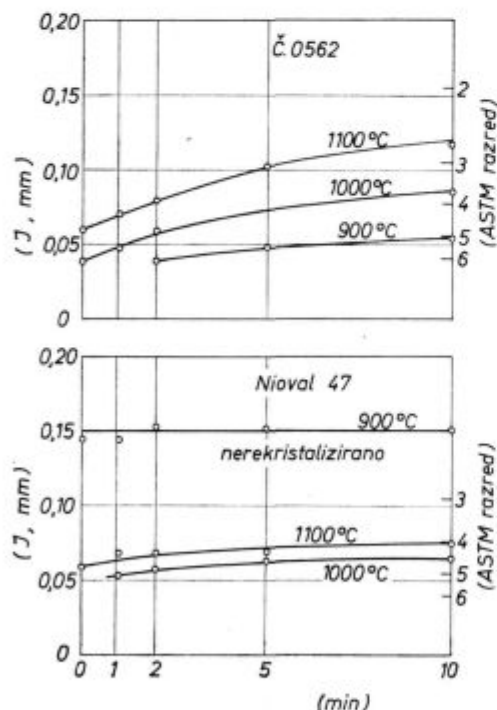


Slika 4

Vpliv temperature deformacije na intercepcijsko dolžino avstenitnih zrn v smeri deformacije v deformiranem (1) in v nedeformiranem jeklu (2)

Fig. 4

Influence of the temperature of deformation on the intercepting length of austenite grains in the direction of deformation in the deformed (1) and underformed (2) steel



Slika 5

Vpliv zadržanja jekla po deformaciji na temperaturi deformacije na intercepcijsko dolžino rekristaliziranih zrn avstenita

Fig. 5

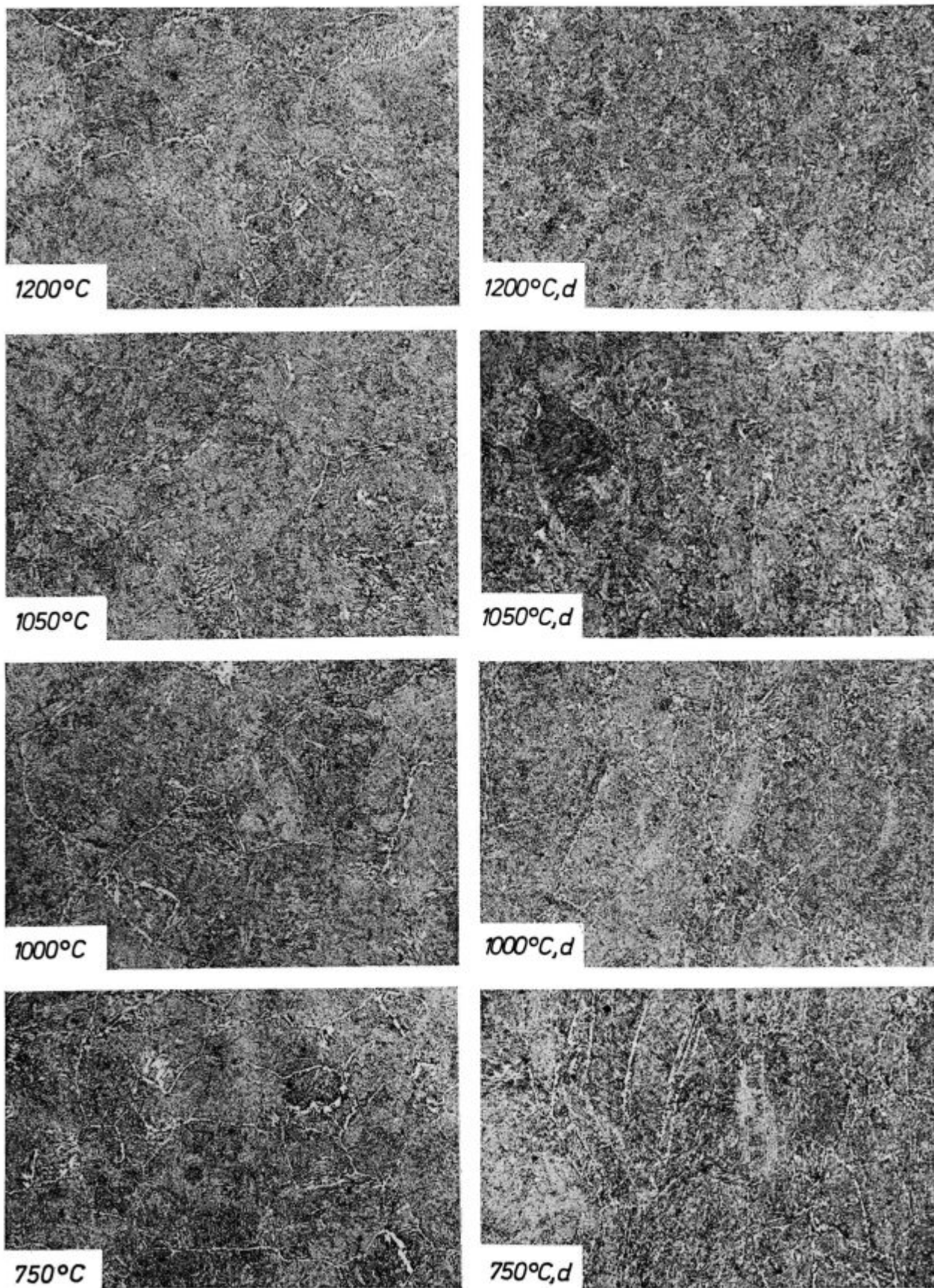
Influence of keeping steel after deformation at the temperature of deformation on the intercepting length of recrystallized austenite grains

Tabela 2 — Stanje avstenita v vzorcih, ki so bili po deformaciji kaljeni v vodi

Temperatura deformacije °C	Č 0562 (5)	Niobal 47 (6) in Niobal 47 (4)
1300	rekristaliziran	rekristaliziran
1200	rekristaliziran	rekristaliziran
1100	rekristaliziran	rekristaliziran, obstojajo posamezna nerekristalizirana zrna
1050	rekristaliziran	približno polovico rekristaliziran
1000	rekristaliziran, obstojajo posamezna nerekristalizirana zrna	nerekristaliziran, obstojajo majhna rekristalizirana polja, ki med seboj niso povezana
950	približno polovično rekristaliziran	nerekristaliziran
900	pretežno nerekristaliziran	nerekristaliziran
850	nerekristaliziran, obstojajo majhna rekristalizirana polja, ki med seboj niso povezana	nerekristaliziran
800	nerekristaliziran	nerekristaliziran
750	nerekristaliziran	nerekristaliziran

deformacije, je zrasla v intervalu parcialne rekristalizacije na skoraj konstantno velikost v obeh mikrolegiranih jeklih. Mikroskopski videz avstenitnih zrn v vzorcih, ki so bili kaljeni s temperature deformacije (tabela 2), je potrdil grafikon na sl. 4. Primerjava med tabelo in grafikonom pa pokaže, da prihaja do nadaljevanja rekristalizacije tudi med ohlajanjem jekla Č 0562 na zraku, saj se pojavljajo v kaljenih vzorcih nerekristalizirana avstenitna zrna pri približno 100 °C višji temperaturi.

Temperatura, pri kateri po deformaciji ni prišlo do rekristalizacije avstenita, je nekoliko višja od temperature, ki jo navajajo Dillarmore, Dewnap in Frost<sup>18</sup>. Ta razlika je verjetno posledica precej velike hitrosti ohlajanja vzorcev po deformaciji. Dejansko se je pokazalo pri izotermnem zadržanju jekel po deformaciji na temperaturah deformacije 900, 1000 in 1100 °C, da ni prišlo do dotične rekristalizacije le pri 900 °C, pri 1000 °C pa se je izvršila v eni minuti (sl. 5). Pri tem ogrevanju je bila rast rekristaliziranih zrn avstenita mnogo počasnejša v jeklu z niobijem in vanadijem kot v jeklu brez mikrolegiranih dodatkov. Iz sl. 5 je mogoče izračunati, da znaša aktivacijska energija za linearno rast avstenitnih zrn le 14 kcal/gr. atom, če pa upoštevamo volumsko rast,

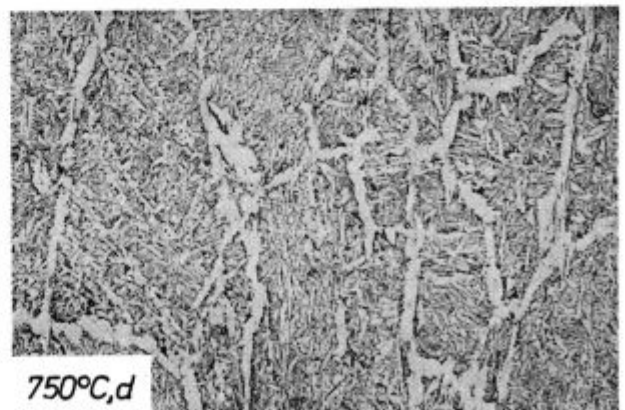
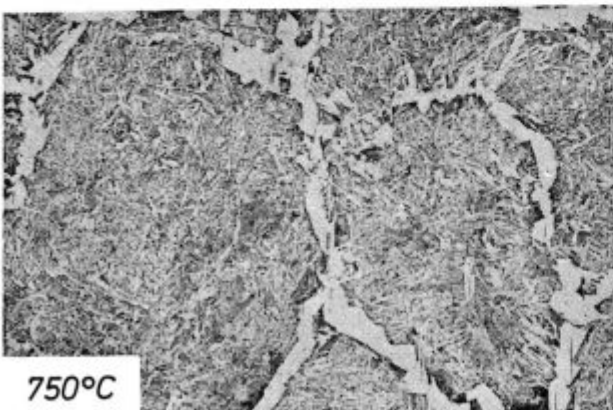
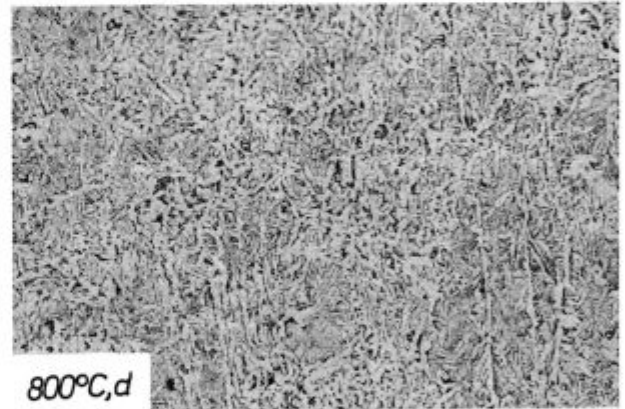
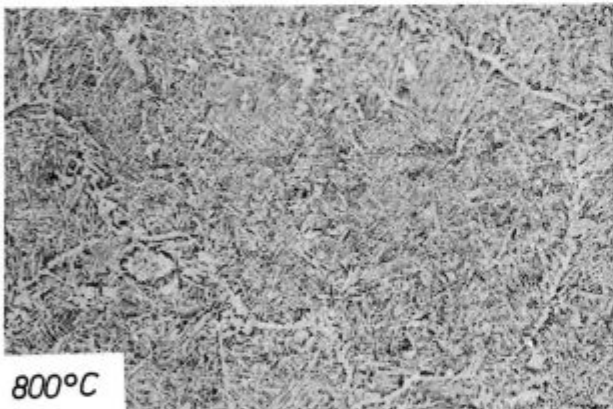
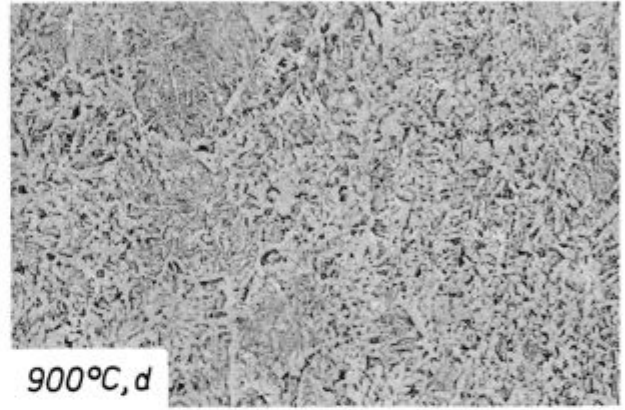
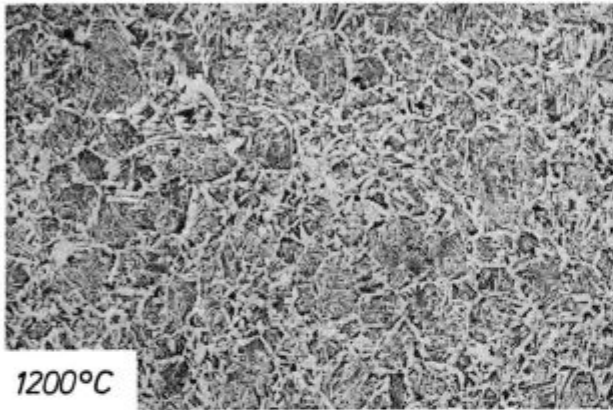
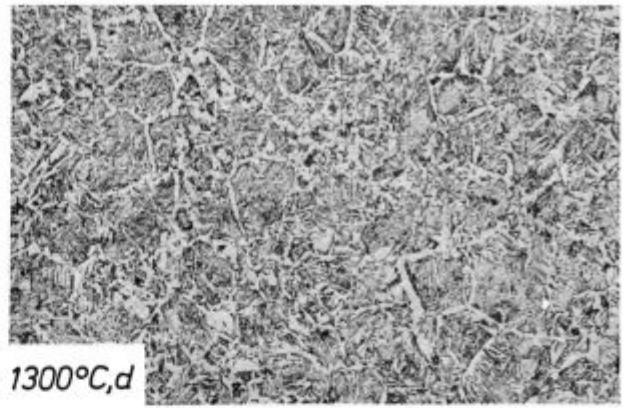
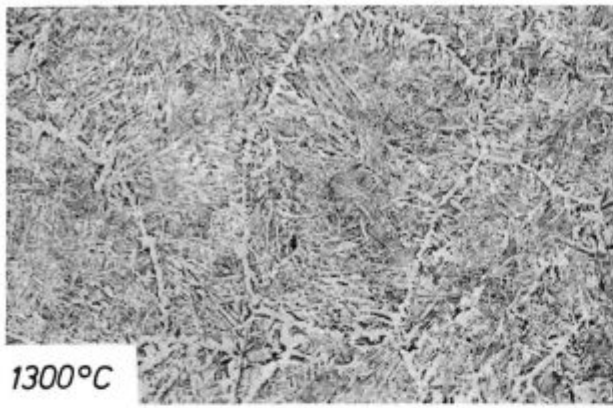


Slika 6

Pov. 50 ×, jedkano z nitalom. Mikrostruktura jekla Niobal 43 po ohladitvi na zraku z različnih temperatur deformacije: deformirano jeklo ima oznako d, nedeformirano jeklo je brez oznake

Fig. 6

Magnification 50 ×, nital etched. Microstructure of Niobal 43 steel after cooling in air from various temperatures of deformation: deformed steel is marked with d, undeformed steel is without mark



Slika 7

Pov. 50  $\times$ , jedkano z nitalom. Mikrostruktura jekla Č0562 po ohladitvi na zraku z različnih temperatur deformacije. Deformirano jeklo ima oznako d, nedeformirano je brez oznake

Fig. 7

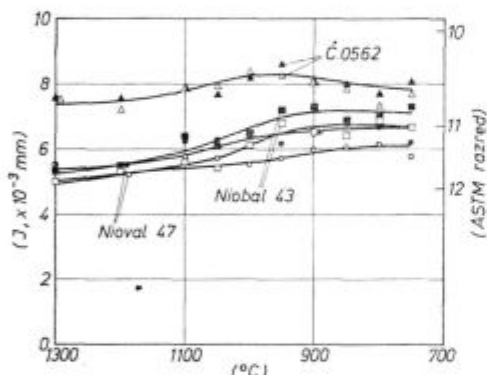
Magnification 50  $\times$ , nital etched. Microstructure of Č.0562 steel after cooling in air from various temperatures of deformation: deformed steel is marked with d, undeformed steel is without mark

znaša ta energija 42 kcal/gr. atom. Ta vrednost je nekoliko nizka, zato je vprašljivo, ali je prišel do izraza pri 10-minutnem ogrevanju resnično temperaturno aktiviran proces ali pa so prišli do izraza tudi vplivi predhodne deformacije avstenita.

Torej inhibira prisotnost niobija v jeklu statično rekristalizacijo in rast kristalnih zrn avstenita. Pri enaki osnovni sestavi ter enakih deformacijskih in temperaturnih pogojih pride do statične rekristalizacije jekla pri približno 150 °C nižji temperaturi, če v jeklu ni niobija. To potrjujejo opazovanja, ki so jih objavili Wilber, Bell, Bucher in Childs<sup>19</sup> in se le deloma ujema s trditvami Irwina, Gladmanna, Orra in Pickeringa<sup>8</sup>.

Po ohladitvi na zraku z deformacijske temperature sta imeli mikrolegirani jekli bainitno mikrostrukturo s feritno mrežo po mejah avstenitnih zrn (sl. 6). Jeklo Č 0562 je imelo v enakih pogojih deformacije bolj grobo mikrostrukturo z več ferita bainitnega tipa, malo perlita in širšo feritno mrežo po mejah (sl. 7).

Po normalizaciji so imela vsa jekla mikrostrukturo iz ferita in perlita. Intercepcijska dolži-



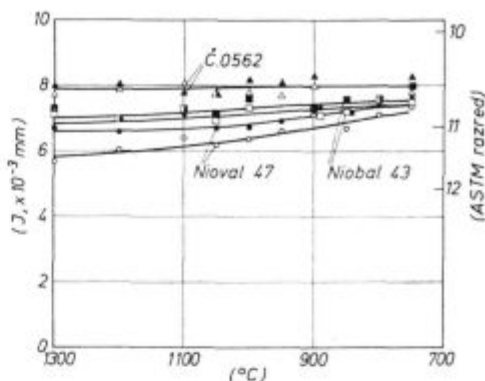
Slika 8

Vpliv temperature deformacije na intercepcijsko dolžino feritno-perlitne mikrostrukture normaliziranih jekel. Beli znaki — deformirano jeklo, črni znaki — nedeformirano jeklo. Pred normalizacijo so bila jekla 1 uro izločilno ogrevana pri 600 °C.

Fig. 8

Influence of temperature of deformation on the intercepting length of ferrite-pearlite microstructure of normalized steel. Circles — deformed steel, dots — undeformed steel. Before normalizing, steel was precipitation annealed 1 hour at 600 °C

na te mikrostrukture nekoliko raste s padanjem temperature deformacije (sl. 8 in 9). Po deformaciji in pred normalizacijo so imela jekla zelo različna avstenitna zrna, razlika je znašala do 4 razrede ASTM skale. Ta razlika ni povzročila nobene izmerljive razlike v intercepcijski dolžini po normalizaciji. Torej je pomembna le realna velikost avstenitnih zrn na temperaturi normalizacije, ne pa velikost zrn, katero je imelo jeklo pred ogrevanjem za normalizacijo, če želimo doseči fino-zrnato mikrostrukturo po normalizaciji. Izločilno ogrevanje pred normalizacijo zmanjšuje intercep-



Slika 9

Enako kot sl. 8, vendar za jekla, ki pred normalizacijo niso bila izločilno ogrevana

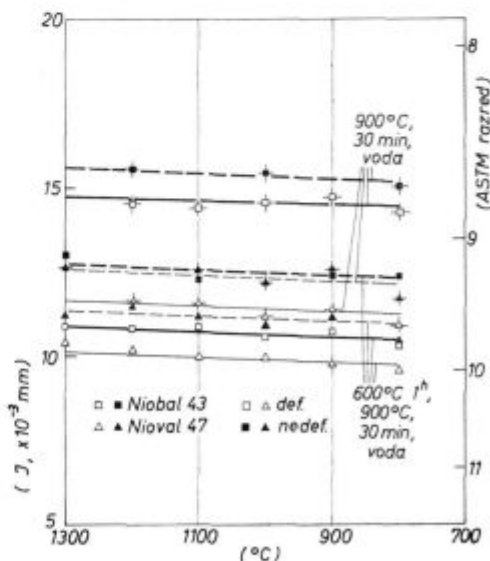
Fig. 9

The same as Fig. 8 for steel which were not precipitation annealed before normalising

cijsko dolžino po normalizaciji v obeh mikrolegiranih jeklih, v jeklu Č 0562 pa je skoraj brez vpliva.

Intercepcijska dolžina za avstenitna zrna pri temperaturi normalizacije skoraj ni odvisna od temperature deformacije v obeh mikrolegiranih jeklih (sl. 10), saj spada razlika med 1300 in 750 °C v interval merilnega odstopanja. Zaradi deformacije se velikost avstenitnih zrn nekoliko zmanjša; kaže, da je statična rekristalizacija skoraj brez učinka.

Izločilno ogrevanje pomembno zmanjša velikost avstenitnih zrn pri temperaturi normalizacije v obeh mikrolegiranih jeklih. Značilno pa je, da so pri enakih pogojih manjša avstenitna zrna v jeklu Nioval 47 kot v jeklu Niobal 43.

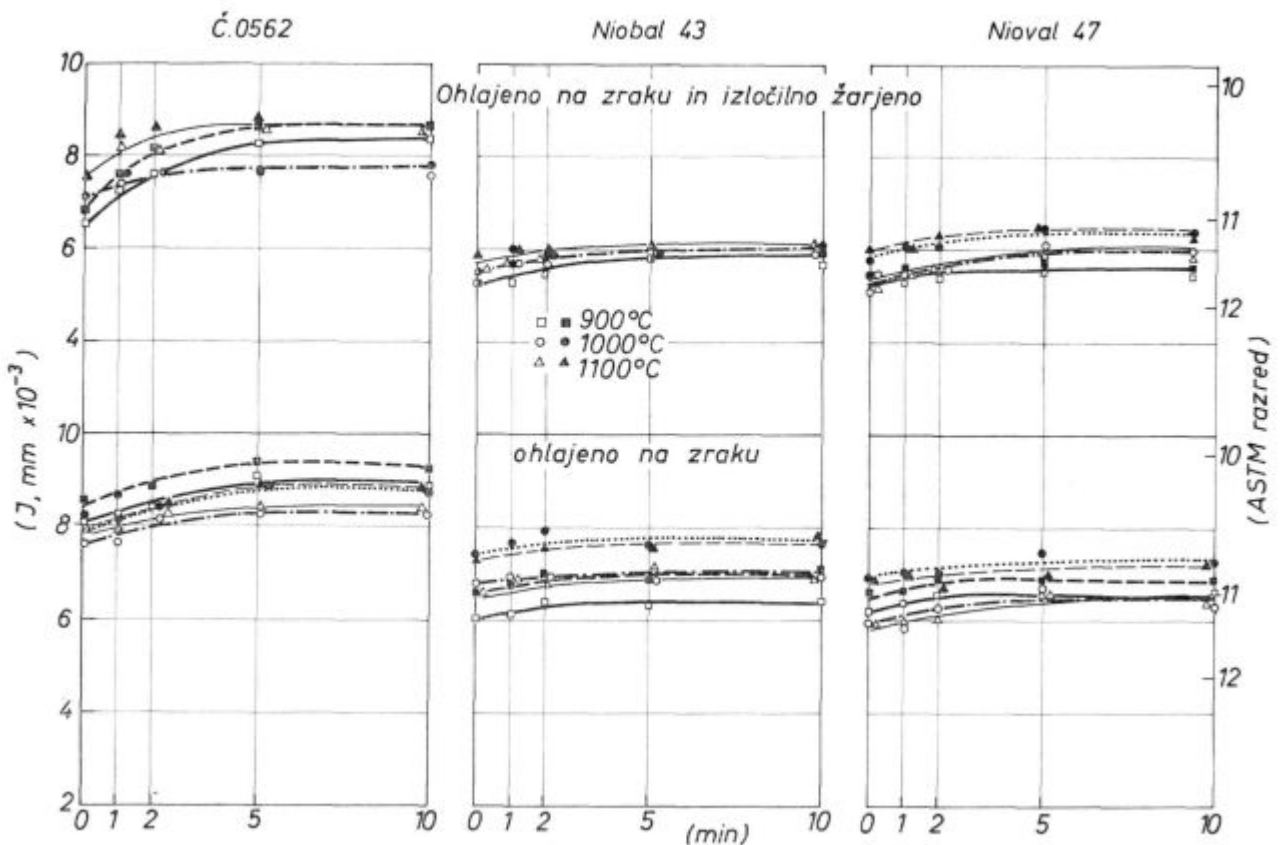


Slika 10

Vpliv temperature deformacije na velikost avstenitnih zrn v jeklih Niobal 43 in Nioval 47

Fig. 10

Influence of temperature of deformation on the size of austenite grains in Niobal 43 and Nioval 47 steel



Slika 11

Vpliv trajanja zadržanja jekel na temperaturi deformacije na intercepcijsko dolžino feritno perlitne mikrostrukture po normalizaciji. Bele točke — deformirano jeklo, črne točke — nedeformirano jeklo

Fig. 11

Influence of the holding time of steel at the temperature of deformation on the intercepting length of ferrite-pearlite microstructure after normalising. Circles — deformed steel, dots — undeformed steel

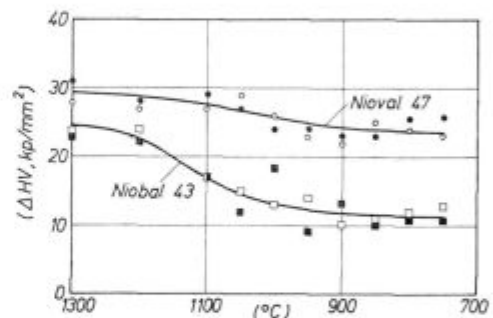
Izotermno zadržanje jekla po deformaciji na temperaturi deformacije ima za posledico rahlo naraščanje velikosti zrn feritno perlitne mikrostrukture po normalizaciji (sl. 11). Pri enaki deformaciji in temperaturi so zrna večja v jeklu Č 0562 kot v mikrolegiranih jeklih, med katerima skoraj ni razlike.

Natančen pregled grafikona na sl. 11 pa kaže, da je mikrostruktura finejša po deformaciji in zadržanju na nižji temperaturi. Podoben je vpliv same deformacije. Zrna so manjša, če je bilo jeklo pred normalizacijo izločilno žarjeno.

Količino niobija in vanadija, ki sta bila zadržana v trdni raztopini v feritu pri ohlajanju po deformaciji je mogoče oceniti iz velikosti utrditve jekla pri izločilnem ogrevanju pri 600 °C. Na sl. 12 vidimo, da znižanje temperature deformacije zmanjšuje izločilno utrditev obeh mikrolegiranih jekel, vendar močnejše utrditev jekla Niobal 43. Padec izločilnega pridobitka trdote je nekoliko hitrejši v intervalu med 1200 in 1000 °C kot pri nižjih temperaturah.

Izotermno zadržanje jekel po deformaciji pri temperaturah deformacije 1100 in 1000 °C ne vpliva na izločilno utrditev (sl. 13). Razlika med de-

formiranim in nedeformiranim jeklom je v intervalu merilnega odstopanja. V osnovi različna je izločilna utrditev po deformaciji in zadržanju pri 900 °C. Že po prvi minuti zadržanja na temperaturi pride do znatnega padca izločilnega pridobitka trdote v deformiranem in v nedeformiranem jeklu.



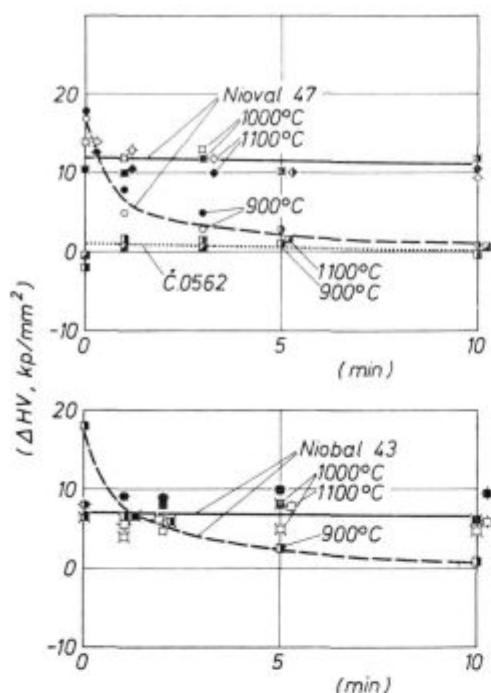
Slika 12

Vpliv temperature deformacije na pridobitev trdote pri izločilnem ogrevanju 1<sup>h</sup> pri 600° C

Bele točke — deformirano jeklo, črne točke — nedeformirano jeklo

Fig. 12

Influence of temperature of deformation on the hardness increase at precipitation annealing 1 hour at 600 °C



Slika 13

Vpliv trajanja zadrževanja jekla po deformaciji pri temperaturi deformacije na pridobitek trdote pri izločilnem ogrevanju 1<sup>h</sup> pri 600 °C. Bele točke — deformirano jeklo, črne točke — nedeformirano jeklo.

Fig. 13

Influence of the holding time of steel after deformation at the temperature of deformation on the hardness increase at precipitation annealing 1 hour at 600 °C. Circles — deformed steel, dots — undeformed steel

Topnostni produkti za niobijev karbonitrid v avstenitu, katere navajajo Hannaerz, Lindborg in Lehtinen<sup>20</sup>, kažejo, da je bil v obeh mikrolegiranih jeklih pri vseh treh temperaturah karbonitrid v prenasičeni trdni raztopini v avstenitu.

Na osnovi slik 4, 5, 12 in 13 lahko sklepamo, da deformacija jekla z enim udarcem in eventualna statična rekristalizacija, ki ji sledi, nista povzročili pospešene tvorbe izločkov pri temperaturi deformacije, oz. rekristalizacije. Torej je verjetno pospešeno izločanje v začetku zadrževanja jekla po deformaciji pri 900 °C, znak tega izločanja je padajoči pridobitek trdote zaradi izločilnega ogrevanja, posledica velike prenasičenosti avstenita z niobijevim karbonitridom.

Pridobitek trdote pri izločilnem ogrevanju je močno odvisen od pogojev ohlajanja jekla po deformaciji ali žarjenju. Pridobitek je največji, če ohlajanje da jeklu 100 % bainitno mikrostrukturo. Vsaka difuzijska premena povzroči pospešeno tvorbo karbonitridnih izločkov. Ohlajanje vzorcev na sl. 12 in 13 ni bilo identično, zato ni umestno primerjati pridobitek trdote v obeh primerih, ampak je upravičena samo primerjava vzorcev iste serije, ki so bili ohlajeni v identičnih pogojih.

Raziskave izločkov v elektronskem mikroskopu na ogljenih ekstrakcijskih replikah so poka-

zale, da nastajajo med počasnim ohlajanjem jekla v peči izločki niobijevega karbonitrida z linearno velikostjo nad 2000 Å. To zmanjšuje količine niobijevega karbonitrida, ki je na voljo za izločilno utrditev. Mogoče kaže nekoliko hitrejši padec trdote v intervalu med 1200 in 1000 °C. nad hitrejšo izločanje zaradi optimalne kombinacije hitrosti difuzije niobija v avstenitu in hitrosti nastajanja kali niobijevega karbonitrida.

V jeklu Niobal 37, ki je legirano z niobijem in vanadijem, je izločilni pridobitek trdote večji in se manj spreminja z zmanjšanjem temperature deformacije. Vzrok je izločilna utrditev zaradi tvorbe vanadijevega karbonitrida. Ta ima večji topnostni produkt v avstenitu kot niobijev karbonitrid in zato ostaja v trdni raztopini v avstenitu do nižje temperature kljub počasnemu ohlajanju jekla v peči. To se ujema z dognanji, ki so jih objavili Meyer, Bühler in Heisterkamp<sup>17</sup>.

Iz primerjave sl. 5 s slikami 8, 9 in 11 z upoštevanjem sl. 12 in 13 bi lahko sklepali, da je potrebna manjša množina aktivnih karbonitridnih izločkov za inhibicijo rasti avstenitnih zrn, kot za inhibicijo rasti feritnih zrn med kontinuirno premeno pri ohlajanju jekla po ogrevanju za normalizacijo. Metalografske preiskave so pokazale precejšnjo razliko v mikrostrukturi po normalizaciji med jeklom, ki je bilo pred normalizacijo izločilno žarjeno, in jeklom, ki ni bilo izločilno žarjeno. V prvem primeru je bila feritno perlitna mikrostruktura mnogo manj acikularna. Razlika je bila najbolj izrazita pri jeklu Niobal 43 (sl. 14 in 15) in izvira predvsem iz porazdelitve in velikosti zrn lamelnega perlita (sl. 16 in 17). Acikularnost se je zmanjševala tudi pri znižanju temperature deformacije. Podoben, vendar komaj razločen vpliv, je imela pri isti temperaturi deformacija jekla.

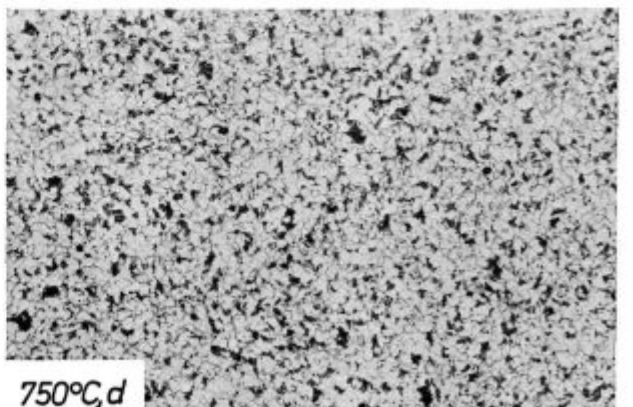
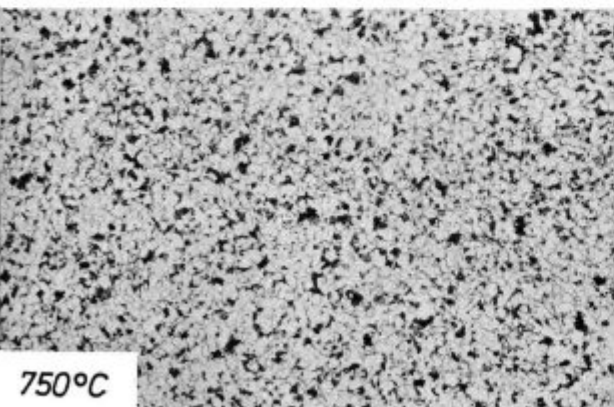
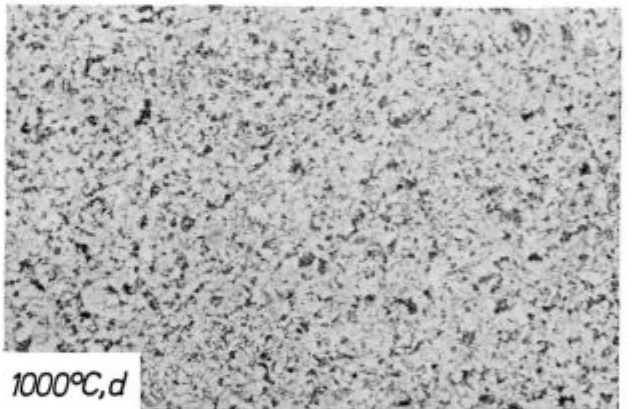
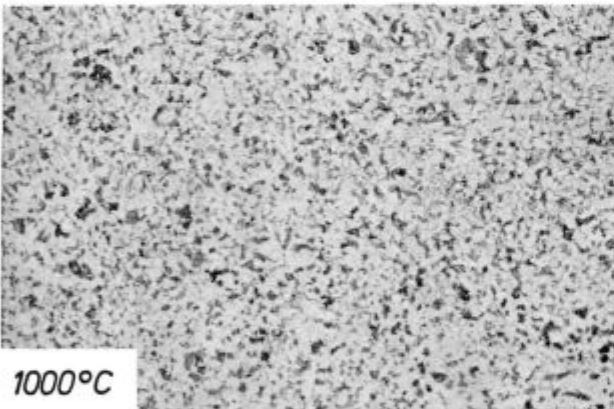
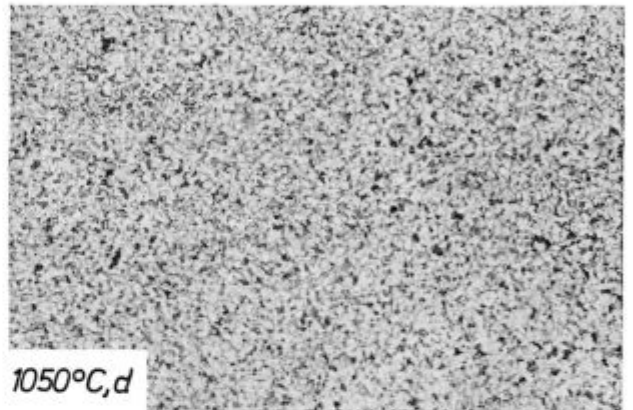
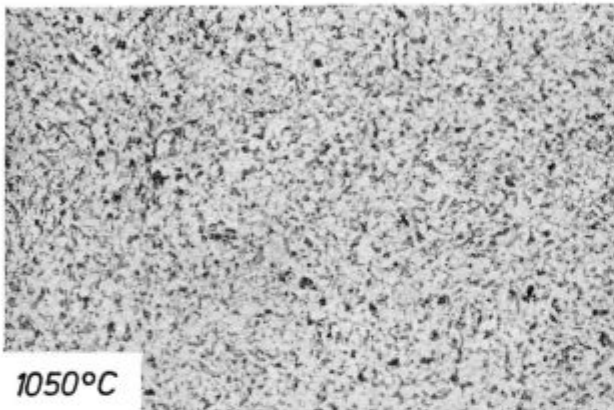
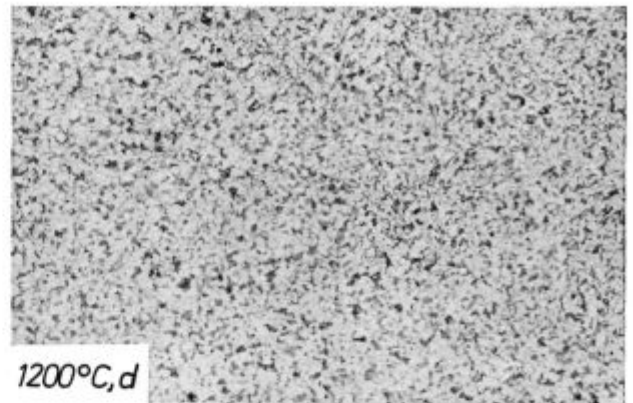
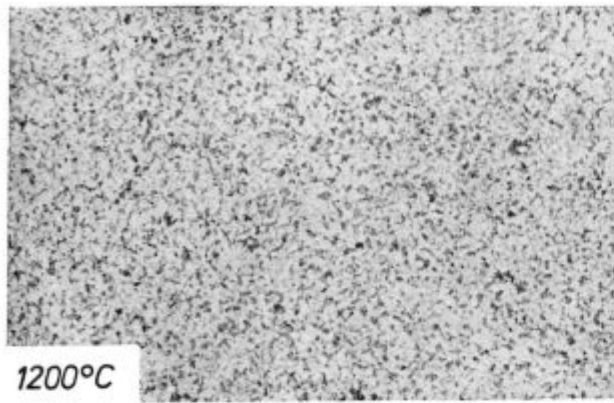
Analize v elektronskem mikroanalizatorju so pokazale, da ni razlike v razdelitvi mangana in niobija med feritom in perlitom, ki bi jo lahko vsebinsko povezali z deformacijo, rekristalizacijo in izločilnim ogrevanjem.

V tabeli 3 vidimo, da je v vseh primerih v perlitu več mangana kot v feritu; pri niobiju, kjer je bilo večje trosenje, pa ni nobene sistematične razlike.

Pri izločilnem ogrevanju normaliziranih vzorcev jekla Niobal 43 je bil pridobitek trdote do 5 kp/mm<sup>2</sup> v obeh primerih, to je v jeklu, ki je bilo, in v jeklu, ki ni bilo izločilno ogrevano pred normalizacijo. To pomeni, da je ostalo v obeh primerih razmeroma malo in približno enako niobija v trdni raztopini v feritu.

Preiskave v elektronskem mikroskopu so pokazale, da so v jeklu podobni karbonitridni izločki po normalizaciji, ne glede na to, ali je bilo jeklo pred tem izločilno ogrevano ali ne. Izločki so bolj gosti in večji po kristalnih mejah, kot pa v notranjosti kristalnih zrn (sl. 18, 19 in 20).



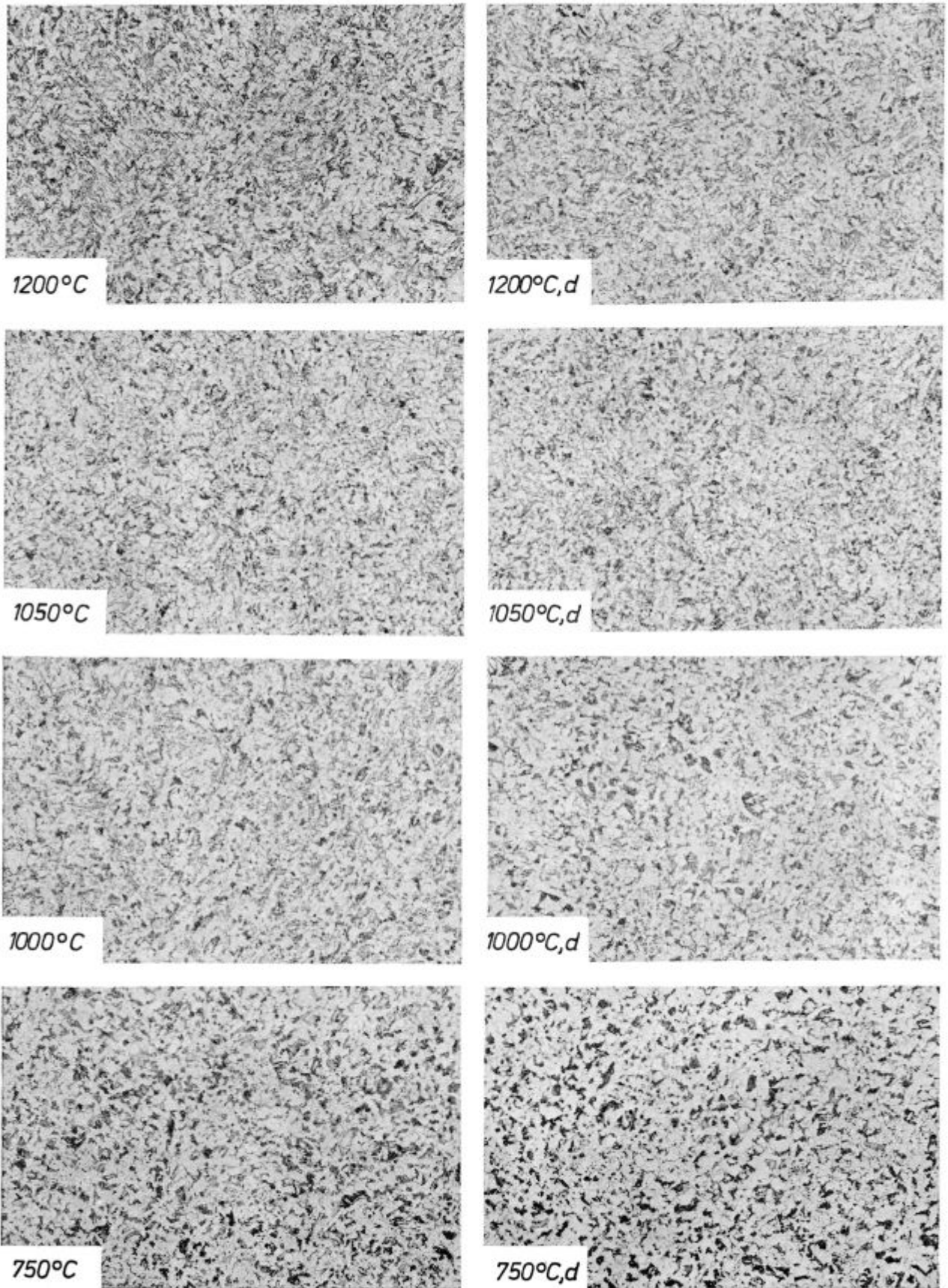


Slika 14

Pov. 100  $\times$ , jedkano z nitalom. Mikrostruktura jekla Niobal 43 po ohladitvi na zraku z različnih temperatur deformacije, izločilnem ogrevanju in normalizaciji. Deformirano jeklo ima oznako d, nedeformirano jeklo je brez oznake

Fig. 14

Magnification 100  $\times$ , nital etched. Microstructure of Niobal 43 steel after air cooling from various temperatures of deformation, precipitation annealing and normalising. Deformed steel is marked with d, undeformed steel is without mark

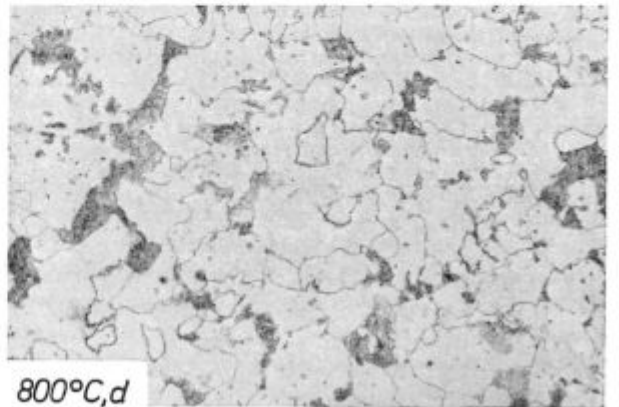
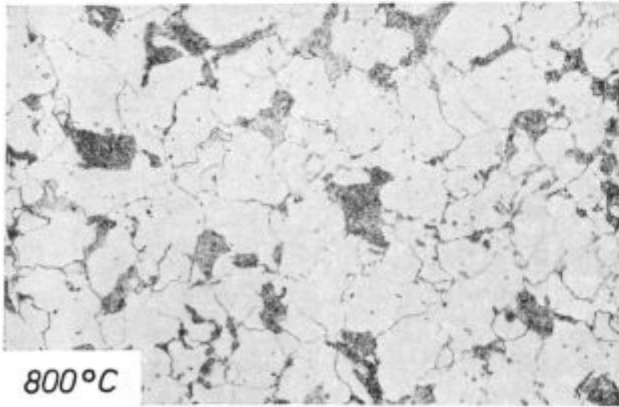
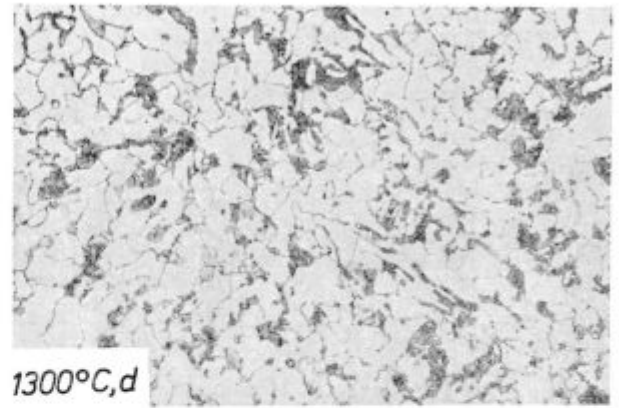
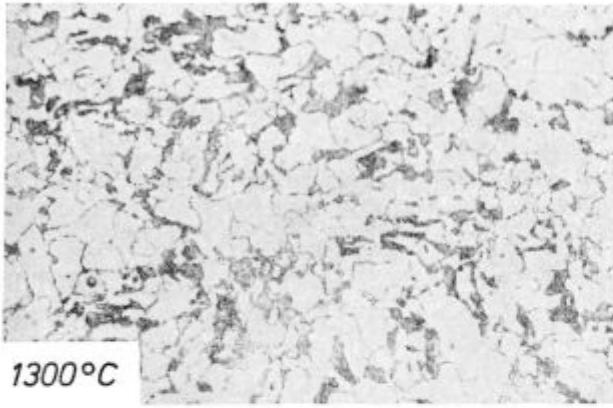


Slika 15

Pov. 100 ×, jedkano z nitalom. Mikrostruktura jekla Niobal 43 po ohladitvi z različnih temperatur deformacije in normalizaciji. Deformirano jeklo ima oznako d, nedeformirano jeklo je brez oznake

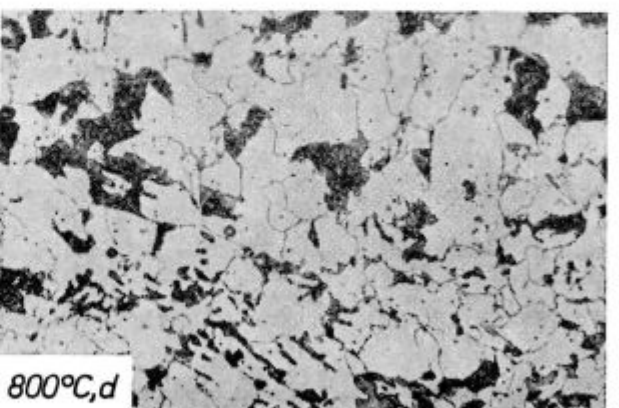
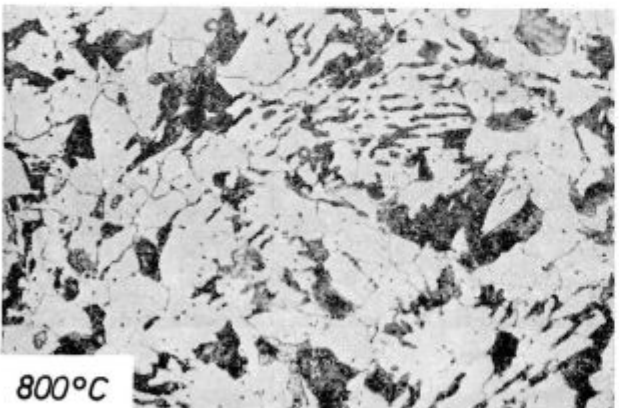
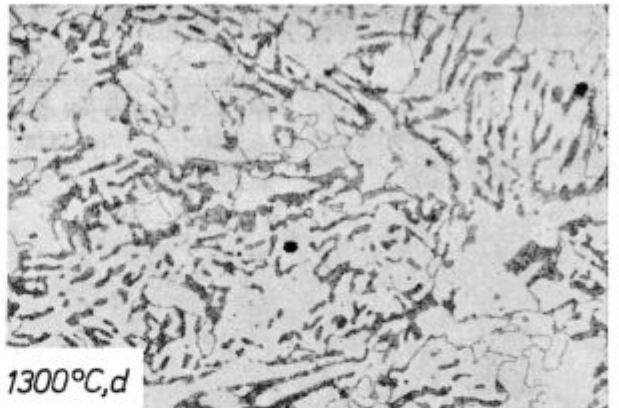
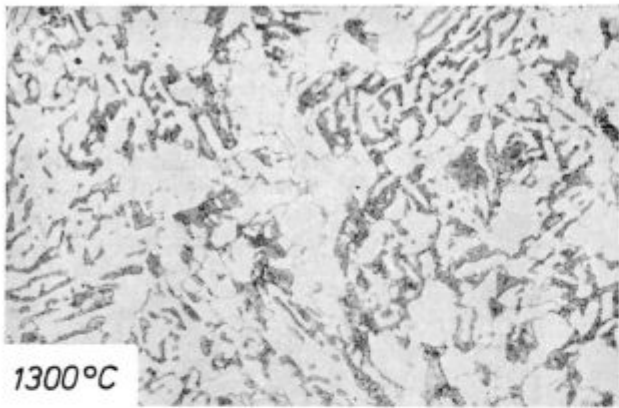
Fig. 15

Magnification 100 ×, nital etched. Microstructure of Niobal 43 steel after cooling from various temperatures of deformation and normalising. Deformed steel is marked with d, undeformed steel is without mark



Slika 16  
Pov. 500 ×, jedkano z nitalom. Podobno kot sl. 14, vendar pri večji povečavi

Fig. 16  
Magnification 500 ×, nital etched. The same as Fig. 14



Slika 17  
Pov. 500 ×, jedkano z nitalom. Podobno kot sl. 15, vendar pri večji povečavi

Fig. 17  
Magnification 500 ×, nital etched. The same as Fig. 15

Tabela 3 — Porazdelitev mangana in niobija med ferit in perlit<sup>1</sup>. Jeklo Niobal 43, normalizirano stanje

Temperatura °C	Stanje	Ferit		Perlit	
		Mn	Nb	Mn	Nb
1300	def.,	1/0,15 <sup>2</sup>	1/0,18	1,05/0,15	0,87/0,25
750	def.,	1/0,13	1/0,31	1,08/0,11	1,08/0,49
1300	def., izl. žarjen	1/0,14	1/0,23	1,03/0,12	0,95/0,26
1300	def., izl. žarjen	1/0,04	1/0,15	1,06/0,06	0,97/0,14
750	izl. žarjen	1/0,04	1/0,64	1,06/0,06	1,02/0,50
750	izl. žarjen	1/0,08	1/0,61	1,05/0,10	0,84/0,63

1. V feritu je privzeta koncentracija 1.
2. V števcu je koncentracija, v imenovalcu pa koeficient variacije, izračunan na osnovi meritev v 15 različnih točkah.

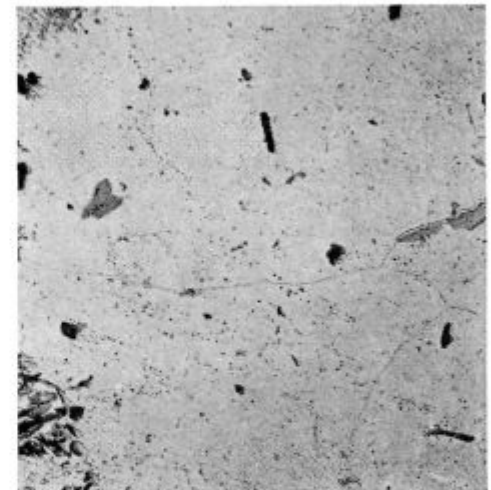
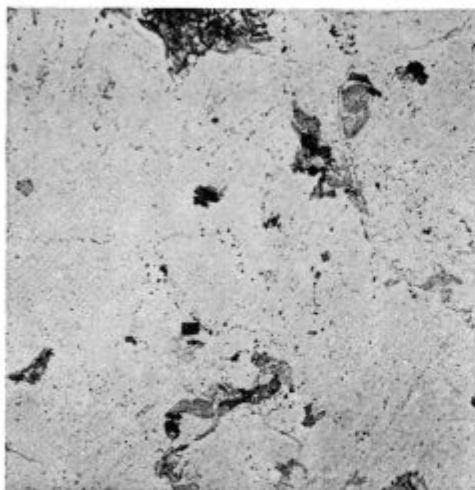


Slika 18 a in b

Pov. 6000 ×, ogljena replika ekstrahirana v brom metanolu. Jeklo je bilo ohlajeno do 900° C, deformirano in normalizirano. Vzorec a je bil pred normalizacijo izločilno žarjen

Fig. 18 a and b

Magnification 6000 ×, carbon replica extracted in bromine methylalcohol. Steel was preliminary cooled to 900 °C, deformed and normalized. Sample a was precipitation annealed before normalising

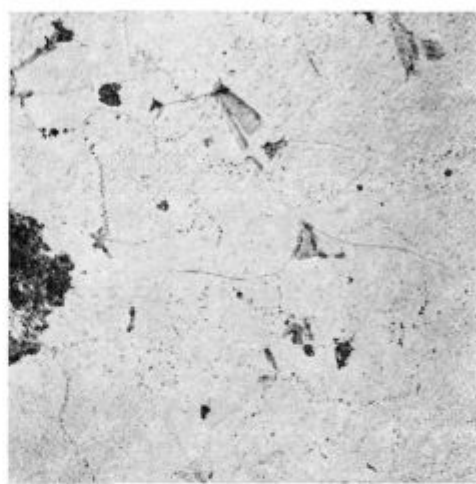
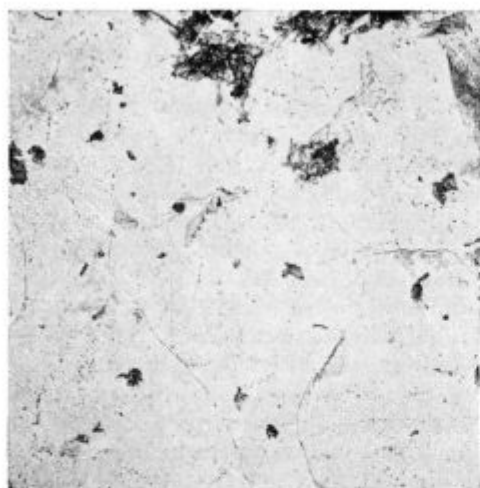


Slika 19 a in b

Pov. 6000 ×, ogljena replika, ekstrahirana v brom metanolu. Podobno kot sl. 18, vendar za temperaturo deformacije 1000° C

Fig. 19 a and b

Magnification 6000 ×, carbon replica was extracted in bromine methylalcohol. The same as in Fig. 18, only temperature of deformation was 1000 °C



Slika 20 a in b

Pov. 6000 ×, ogljena replika, ekstrahirana v brom metanolu. Podobno kot sl. 18, vendar za temperaturo deformacije 1100° C

Fig. 20 a and b

Magnification 6000 ×, carbon replica was extracted in bromine methanol. The same as in Fig. 18, only temperature of deformation was 1100° C

Povprečna velikost približno 150 izločkov je za ca. 50 % večja po kristalnih mejah, kot v notranjosti kristalnih zrn (tabela 4), ni pa nobene razlike med jeklom, ki je bilo pred normalizacijo izločilno ogrevano, in jeklom brez izločilnega ogrevanja pred normalizacijo.

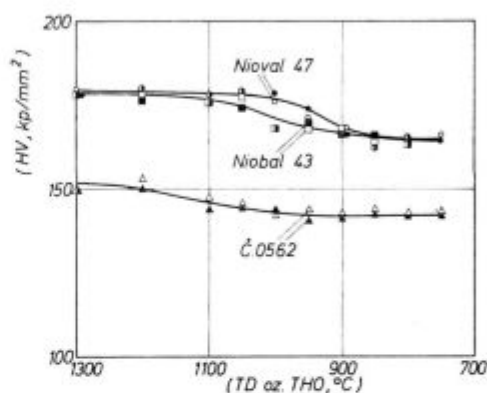
Povečanje trdote pri izločilnem ogrevanju je posledica tvorbe enakomerno porazdeljenih drobnih izločkov<sup>17</sup>. Med normalizacijskim ogrevanjem zaradi višje temperature izločki zrastejo povsod, vendar močneje po kristalnih mejah avstenita.

Tabela 4 — Velikost izločkov\* v normaliziranih vzorcih jekla Niobal 43 (v Å)

Toplotna obdelava	Kristalne meje	Notranjost zrn
Deformirano pri 900, ohladitev na zraku do 20 °C, izločilno ogrevano, normalizirano	341 ± 106	192 ± 50
Deformirano pri 1100 °C ohladitev na zraku do 20 °C, izločilno ogrevano, normalizirano	304 ± 120	201 ± 67
Ohlajeno v peči do 900 °C, ohlajeno na zraku do 20 °C, normalizirano	324 ± 130	208 ± 60
ohlajeno v peči do 1100 °C, ohlajeno na zraku do 20 °C, normalizirano	305 ± 118	214 ± 55

\* Povprečna velikost 150 izločkov, ki se pri 6-kratni povečavi razločijo na posnetkih z izvorno povečavo 6000 ×

Kljub temu je avstenit, ki je imel izločke v začetku ogrevanja za normalizacijo, bolj odporen proti rasti zrn, kot avstenit, ki je imel niobijev karbonitrid v trdni raztopini in so zato izločki nastajali med ogrevanjem za normalizacijo. To dokazuje, da inhibira niobijev karbonitrid (in manj aluminijev nitrid in vanadijev karbonitrid, ki sta prisotna v aktivnih izločkih pri temperaturi normalizacije v manjši količini kot niobijev karbonitrid), močneje rast avstenitnih zrn, če je v trenutku začetka ogrevanja za normalizacijo v obliki drobnih izločkov, kot če je v trdni raztopini. Lahko tudi sklepamo, da v začetku ogrevanja za normalizacijo rast avstenitnih zrn prehitveva tvorbo



Slika 21

Vpliv temperature deformacije na trdoto jekel po normalizaciji. Pred normalizacijo so bila jekla izločilno žarjena. Beli znaki — deformirano jeklo, črni znaki — nedeformirano jeklo

Fig. 21

Influence of temperature of deformation on the steel hardness after normalising. Before normalising steel was precipitation annealed. Circles — deformed steel, dots — undeformed steel

izločkov niobijevega karbonitrida. Končno lahko sklepamo, da je vzrok razlike v mikrostrukturi med jeklom, ki je bilo, in jeklom, ki ni bilo pred normalizacijo izločilno ogrevano, le razlika v velikosti realnih avstenitnih zrn v obeh primerih.

Trdota deformiranega in nedeformiranega jekla je pri normalizaciji skoraj enaka in se rahlo zmanjšuje s padanjem temperature deformacije (sl. 21 in 22).

Izotermno zadržanje jekel po deformaciji na temperaturi deformacije je brez zaznavnega učinka na trdoto po normalizaciji (sl. 23). Razlika v

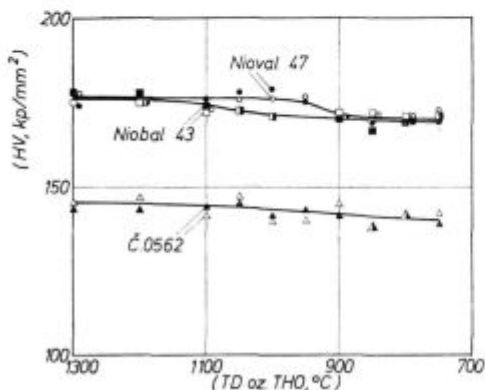
trdoti zaradi različnih temperatur zadrževanja po deformaciji je majhna in enakega značaja kot na sl. 22 in 23.

Ce upoštevamo opisane raziskave mikrostrukture in trdote, lahko pridemo do splošnega zaključka, da dosežemo v normaliziranem stanju enakovredno kvaliteto mikrolegiranih jekel, če jih ocenjujemo s stališča trdote in mikrostrukture, s tem da nadomestimo nizko končno temperaturo valjanja, zaradi katere pride do tvorbe izločkov niobijevega karbonitrida med predelavo, z višjo končno temperaturo valjanja, primernim ohlajanjem in izločilnim ogrevanjem.

#### 4. ZAKLJUČKI

Preizkusili smo deformacijo in toplotno obdelavo treh različnih jekel z namenom, da ugotovimo, kako vpliva temperatura deformacije, velikost avstenitnih zrn in izločilno ogrevanje na mikrostrukturo in trdoto mikrolegiranih jekel.

Rezultati dela kažejo, da je razlika v velikosti avstenitnih zrn pred normalizacijo do 4 razrede ASTM skale (razlika v velikosti zrn po vroči deformaciji in eventualni rekristalizaciji jekla) skoraj brez vpliva na velikost avstenitnih zrn pri temperaturi normalizacije in velikost feritnih in perlitnih zrn v normaliziranem jeklu. Velikost teh zrn in regularnost mikrostrukture normaliziranega jekla sta odvisni od tega, ali je bil v trenutku začetka ogrevanja za normalizacijo niobij v trdni raztopini ali v drobnih, enakomerno razporejenih

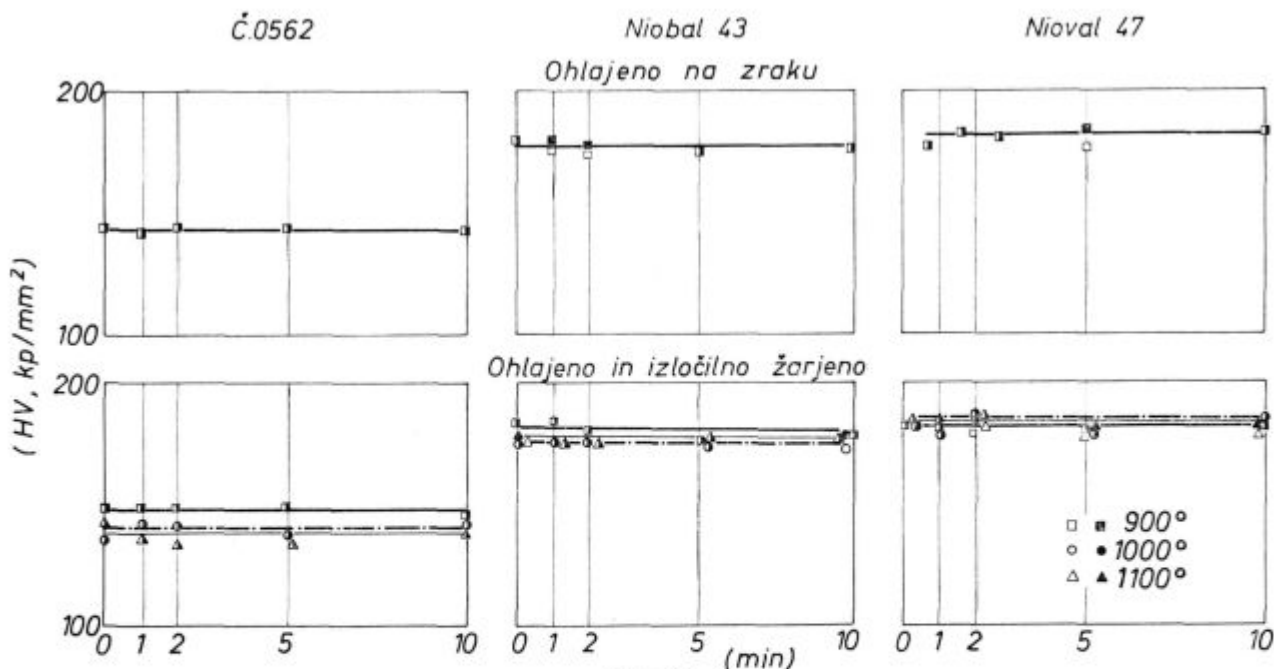


Slika 22

Enako kot sl. 21, vendar za jekla, ki pred normalizacijo niso bila izločilno žarjena

Fig. 22

The same as in Fig. 21, but for steel which was not precipitation annealed before normalising



Slika 23

Vpliv trajanja zadržanja jekla po deformaciji na temperaturi deformacije na trdoto jekla po normalizaciji. Beli znaki — deformirano jeklo, črni znaki — nedeformirano jeklo

Fig. 23

Influence of the holding time of steel (after deformation) at the temperature of deformation on the hardness of steel after normalising. Circle — deformed steel, dots — undeformed steel

izločkih. Inhibicijski vpliv niobija na rast zrn je večji in vpliv na izoblikovanje enakomerne feritno perlitne mikrostrukture normaliziranega jekla je boljši, če je pred normalizacijo niobij v drobnih izločkih.

Med normalizacijo prihaja do rasti in prerazporeditve izločkov tako, da so enako veliki in podobno razporejeni izločki v jeklu, ki je bilo pred normalizacijo izločilno žarjeno, in jeklom, ki je imelo niobij v trdni raztopini. Kljub temu pa ohranijo ugoden vpliv na jeklo izločki, ki so nastali med ogrevanjem pri nižji temperaturi.

Vroča deformacija jekla z enim udarcem in tej deformaciji ustrezna eventualna statična rekristalizacija jekla ne povzročita izločanja niobijevega karbonitrida v obsegu, ki bi ga mogli zaznati s pridobitkom trdote pri izločilnem ogrevanju (ca. 0,01 % Nb).

Različna temperatura deformacije in zadrževanja jekla na temperaturi deformacije 900 do 1100 °C do 10 minut skoraj ne vplivata na trdoto jekla po normalizaciji.

Iz rezultatov tega dela in z upoštevanjem trdote in mikrostrukture kot kriterijev za oceno je mogoče sklepati, da je mogoče nadomestiti nizko temperaturo konca predelave jekla, mikrolegiranega z niobijem, s končno predelavo pri višji temperaturi, primernim ohlajanjem in izločilnim žarjenjem, če je potrebno jeklene polproizvode ali konstrukcije normalizirati.

To delo sta materialno podprli SŽ Železarna Jesenice in Raziskovalna skupnost Slovenije.

## BIBLIOGRAFIJA

1. K. J. Irvine in F. B. Pickering: JISI 201, 1963, št. 11, 944—959.
2. W. B. Morrison: JISI 201, 1963, št. 4, 317—325.
3. J. D. Jones in A. B. Rothwell: ISI spec. Pub. 108, 1966.
4. W. E. D. Duckworth, R. Philips in J. A. Chapman: JISI 203, 1965, 1108—1112.
5. T. N. Baker: JISI 211, 1973, 502—510.
6. T. N. Baker: Metals Technology 1, 1974, 126—131.
7. B. L. Philipp in F. A. A. Crane: JISI 211, 1973, 658—659.
8. K. J. Irvine, T. Gladmann, J. Orr in F. B. Pickering: JISI 208, 1970, 717—726.
9. J. M. Gray, D. Webster in J. H. Woodhead: JISI 203, 1965, 812—818.
10. Mandry P., R. Namdar in C. Wache: Rev. Metal 66, 1969, 563—573.
11. M. Tanino in K. Aoki: Transactions JISI 8, 1968, 337—345.
12. A. Constant, M. Grunbach in G. Sanz: HTM 26, 1971, 364—374.
13. A. D. Battle in R. W. Honeycombe: JISI 211, 1973, 284—289.
14. E. Hornbogen in E. Minuth: Arch. Eisen. 44, 1973, 621—628.
15. M. Gabrovšek: Železarski zbornik 6, 1972, 11—24.
16. A. Le Bon, J. Rofes-Vernis in C. Rossard: Mem. Scient. Rev. Metall. 70, 1973, 577—588.
17. L. Meyer, H. E. Bühler in F. Heisterkamp: Thyssen-forschung 3, 1971, 8—43.
18. I. L. Dillamore, R. F. Dewsnap in M. G. Frost: Metals Technology 2, 1975, 294—302.
19. G. A. Wilber, J. R. Bell in W. J. Childs: Trans. Metall. Soc. AIME, 242, 1968, 2305—2308.
20. N. E. Hannaerz, U. Lindborg in H. Lehtinen: Journal of ISI 206, 1968, 68—72.

## ZUSAMMENFASSUNG

Es sind Versuche der einstufigen Warmverformung der Mn, MnNb und MnNbV Konstruktionsstähle im Temperaturintervall zwischen 1300° und 750 °C durchgeführt worden. Die verformten Proben sind teilweise ausscheidungsgeglüht, teilweise nicht geglüht und dann normalgeglüht worden. Auf diesen Problem sind lichtmikroskopische und elektronenmikroskopische Untersuchungen und Härtemessungen durchgeführt worden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass der Unterschied in der Austenitkorngröße, welcher vor dem Normalglühen 4 Klassen der ASTM Reihe betragen hat (der Unterschied in der Korngröße nach der Warmverformung und eventueller Rekristallisation), praktisch keinen Einfluss auf die Austenitkorngröße bei der Temperatur der Normalglühung und auf die Ferrit- und Perlitkorngröße im normalgeglühten Zustand hat.

Die Größe der Körner und die Regelmäßigkeit des Mikrogefüges des normalgeglühten Stahles hängen davon ab, wenn im Zeitpunkt des Anlaufes der Normalglühung Niobium in einer festen Lösung oder in feinen gleichmäßig verteilten Ausscheidungen war.

Der hemmende Einfluss des Niobiums auf das Wachstum der Körner ist grösser und der Einfluss auf die Ausbildung eines homogenen ferritisch perlitischen Mikrogefüges eines normalgeglühten Stahles ist besser, wenn vor dem Normalglühen das Niobium in feinen Ausscheidungen vorliegt.

Während des Normalglühens kommt es zum Wachsen und Veranordnen der Ausscheidungen, so dass diese im Stahl, welcher ausscheidungsgeglüht war, gleich gross und ähnlich verteilt sind wie im Stahl, welcher das Niob in fester Lösung hatte. Trotzdem behalten die Ausscheidungen, welche während der Erwärmung bei niedriger Temperatur entstanden sind, einen günstigen Einfluss auf den Stahl.

Warmverformung des Stahles mit einem Schlag und dieser Verformung folgende statische Rekristallisation des Stahles verursachen keine Ausscheidung des Niobkarbonitrides in dem Umfang, dass wir ihr durch eine Erhöhung der Härte beim Ausscheidungsglühen (ca 0,01% Nb) wahrnehmen könnten.

Verschiedene Warmformgebungstemperatur und ein Anhalten auf der Warmformgebungstemperatur von 900 bis 1100° C bis zu 10 Minuten, haben praktisch keinen Einfluss auf die Härte nach der Normalglühung.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit und mit der Berücksichtigung der Härte und des Mikrogefüges als Beurteilungskriterien ist es möglich zu schliessen, dass es möglich ist die niedrige Temperatur am Ende der Warmverformung eines mit Niob mikrolegierten Stahles mit einer Endverformung bei höherer Temperatur, einer geeigneten Kühlung und Ausscheidungsglühung zu ersetzen, wenn es nötig ist die stählernen Halbprodukte oder Konstruktionen einer Normalglühung auszusetzen.

## SUMMARY

Structural Mn, MnNb, and MnNbV steel were hot deformed in one step between 1300 and 750° C. Some of the deformed samples were precipitation annealed, but all were then normalized. They were investigated in optical and electron microscope, and their hardness was measured.

The results show that difference in the size of austenite grains before normalising achieves four degrees of ASTM scale (i. e. difference after hot deformation and eventual recrystallization of steel) but this difference has practically no influence on the size of austenite grains at the normalising temperature and on the size of ferrite and pearlite grains in normalized steel. The size of these grains and the regularity of the microstructure of normalized steel depend on the form of niobium at the beginning of normalising, i. e. whether it is in solid solution or in fine uniformly distributed precipitates. Inhibition influence of niobium on the grain growth is greater and the influence on the formation of uniform ferrite-pearlite microstructure of normalized steel is more favourable if niobium is finely precipitated before normalising.

During normalising, the grains grow and the precipitates are rearranged so that the precipitates in the steel

which was precipitation annealed before normalising and in the steel which contained niobium in solid solution are of the same size and similarly distributed. Nevertheless, the precipitates which were formed during heating at lower temperatures preserve their favourable influence on steel.

Hot deformation of steel with one blow, and the eventual static recrystallization of steel after the deformation do not cause precipitation of niobium carbonitride in such an extent that hardness will be increased during precipitation annealing (about 0.01 % Nb).

Various temperatures of deformation and keeping steel at the temperature of deformation between 900 and 1100° C up to 10 minutes proved to have practically no influence on the steel hardness after normalising.

The results of this investigation, if hardness, and microstructure are taken as the measure, lead to the conclusion that the low temperature of the end of working niobium microalloyed steel can be substituted with final working at higher temperature, with suitable cooling and precipitation annealing, if steel semiproducts or structures are to be normalized.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены опытные результаты исследования одноступенчатой горячей деформации инструментальных сталей марок Mn, MnNb и MnNbV при  $t$ -ном интервале между 1300 и 1700° C. Образцы, взятые для выполнения деформации были частью подвергнуты дисперсионному отжигу и после этого нормализованы. Исследование образцов выполнено с оптическим и электронным микроскопом, определена также твердость. Результаты работы показали, что величина аустенитных зерен до нормализации до 4-го класса по шкале ASTM (разница в величине зерен после горячей деформации и возможная рекристаллизация стали) практически без влияния на величину аустенитных зерен при  $t$ -ре нормализации и величине ферритных и перлитных зерен в нормализованной стали. Величина этих зерен и регулярность микроstructures нормализованной стали зависят от состояния в котором находился ниобий в момент начала нагрева для выполнения нормализации, т. е. в твердом растворе или в форме мелких, равномерно расположенных выделений. Замедлительное влияние ниобия на рост зерен и его влияние на образование равномерной феррито-перлитной микроstructures нормализованной стали увеличено, если ниобий до нормализации в форме мелких выделений. В течении нормализации наступает объемное увеличение

и перегруппировка выделений, так что правильное расположение и величина выделений полученное дисперсионным отжигом стали до нормализации одинакова с микроstructures выделений стали в которой ниобий находился в твердом растворе. Несмотря на это, благоприятное влияние на сталь сохранили выделения, которые образовались нагреванием при более низкой  $t$ -ре.

Горячая деформация стали с одним ударом и возможно последующая статическая рекристаллизация стали не вызывают выделение карбонитрида ниобия в такой мере, чтобы оказалась возможность его влияния на повышение твердости стали при дисперсионном отжиге (прибл. 0,01 % Nb). Различная  $t$ -ра деформации и задерживание стали при  $t$ -ре деформации 900—1100° C в течении 10 мин. практически не влияет на твердость стали после нормализации.

Из результатов этой работы, при учете твердости и микроstructures как критериев для оценки, можно подвести следующее: низкую  $t$ -ру при конце переработки микросплавной с ниобием стали можно заменить с обработкой при более высокой  $t$ -ре применив соответствующее охлаждение и дисперсионный отжиг в случае надобности по нормализации полупродуктов или в отдельных конструкциях.



# Hladno preoblikovanje kovin v industriji avtoelektrike

UDK: 669-124.3  
ASM/SLA: F, 1—67

B. Brezigar, I. Kenda, I. Kodrič, Z. Repič

*Uvedba tehnologije hladnega preoblikovanja v industrijo avtoelektričnih izdelkov je zahtevala intenzivno delo na treh področjih: materiali in toplotna obdelava, orodja in faze izdelave ter površinska priprava. Članek nam poleg opisa tehnologije podaja predvsem nekaj praktičnih izkušenj s tega področja.*

*Pojavlja se potreba po organiziranem sodelovanju proizvajalcev surovin, izdelovalcev orodij in predelovalcev, ker bi lahko na ta način najlažje premostili začetne težave.*

Industrija avtoelektrike je zasledovala izdelavo sestavnih delov drugod po svetu že od vsega začetka proizvodnje. Tako so se v začetku šestdesetih let začeli pojavljati v avtoelektričnih agregatih nekateri sestavni deli, ki so bili izdelani s hladnim stiskanjem. Uvedba takih delov je pomenila ponovnostavitev in izboljšanje konstrukcije. Zato smo tudi pri nas polagoma začeli razmišljati o tem. Vendar pa pogoji v šestdesetih letih za uvedbo te tehnologije pri nas niso bili dovolj zreli. Naša proizvodnja je razmeroma majhna, saj je pač rasla skupaj z domačo motorno industrijo. Serije posameznih izdelkov so bile majhne, izdelki so se med sabo močno razlikovali. Prav tako pa tudi nizka akumulativnost ni dovoljevala večjih vlaganj v raziskavo in preizkušanje novih tehnologij. Za uvedbo hladnega kovanja pa je bilo treba izpolniti nekaj pogojev, od katerih je rentabilnost eden najvažnejših.

S projektom izgradnje obrata za proizvodnjo zaganjalnikov za osebna vozila, ki ima kapaciteto pol milijona izdelkov na leto, je bila izpolnjena večina teh pogojev. Poenotena konstrukcija izdelkov z enakimi sestavnimi deli je dala rentabilno letno količino hladno kovanih delov. O plasmanu odkovkov izven naše delovne organizacije takrat nismo razmišljali, saj nismo vedeli, koliko časa bodo trajale »otroške bolezni« nove tehnologije. Obenem pa sorodne industrije niso kazale preveč zanimanja za hladne odkovke. Obseg nove investicije je tudi omogočil nakup potrebne opreme in orodij, saj so pri tej tehnologiji že na začetku potrebna velika kapitalna vlaganja.

Da smo se tako odločili, je mnogo prispeval tudi pokojni dipl. ing. Marjan Lavrenčič, dolgoletni vodja tehnološkega razvoja kranjske Iskre in predavatelj na Fakulteti za strojništvo. Prenesel nam je svoje izkušnje in pomagal navezati stike z nosilci te tehnologije v tujini.

Ko je bila sprejeta odločitev za novo tehnologijo, smo začeli intenzivno delati na treh bistvenih področjih:

1. materiali in toplotna obdelava
2. orodja in faze izdelave
3. površinska obdelava

Kar se tiče izbire stiskalnic in stroja za sekanje surovcev, smo se naslonili na izkušnje in sugestije izbranega dobavitelja, saj sami na tem področju nismo mogli dobiti podatkov pri uporabnikih.

Pričujoči prispevek smo zato tematsko razdelili na omenjena področja, pri čemer je vsak član našega tima obdelal svoje področje. Poudariti velja, da nimamo namena ukvarjati se splošno s hladnim stiskanjem jekla in teoretskimi osnovami, saj je o tem že napisano mnogo knjig in člankov, zlasti v tuji literaturi. Naš namen je opisati probleme in rešitve pri izdelavi hladno kovanih delov za naše izdelke ter opozoriti na nujnost tesnejše povezave vseh, ki sodelujejo v tem procesu: železarji, proizvajalci opreme, orodjarji, proizvajalci kemikalij in predelovalci.

## Materiali

Materiale za hladno oblikovanje delimo v tri glavne skupine:

a) jekla, primerna za sestavne dele, ki naj imajo minimalno preoblikovalno trdnost  $k_f$ , z malo ali nič poudarka na mehanski trdnosti. Sem štejejo najmehkejša jekla z največ 0,1 % C in minimalno vsebnostjo drugih elementov;

b) jekla, kjer je potrebno s hladno deformacijo doseči večjo mehansko trdnost. To so jekla z okoli 0,1 % C in 0,5 % Mn, ki lahko po stiskanju dosežejo natezno trdnost do 625 N/mm<sup>2</sup>;

c) jekla za sestavne dele, ki morajo vzdržati velike obremenitve. Ta jekla morajo poleg zadovoljive preoblikovalnosti imeti tudi zadostno vsebnost ogljika in legirnih elementov. Te sestavine omogočajo doseganje zadovoljive trdnosti, žilavosti in odpornosti proti obrabi, seveda s primerno toplotno obdelavo po hladnem stiskanju.

Brezigar Boris, met. teh. — tehnolog termične obdelave in hladnega preoblikovanja. ISKRA Nova Gorica

Kenda Ivan, dipl. inž. — tehnolog hladnega preoblikovanja.

Kodrič Ivan, inž. — projektant, vodja skupine.

Repič Zvonko, dipl. inž. — direktor TOZD MZ.

Naši hladno stiskani deli spadajo v prvo in tretjo skupino. Za dele, kjer mehanske lastnosti niso bistvene, uporabljamo jeklo JMP 10. Za dele, kjer zahtevamo določeno trdnost in odpornost proti obrabi, uporabljamo jeklo Č 4320.

Jeklo JMP 10 je za naše potrebe razvila Železarna Jesenice iz standardnega jekla Č 1121. Omenjeno jeklo ima nižjo vsebnost ogljika C, Si, P in tudi ostalih spremljajočih elementov ter nekovinskih vključkov. Je posebej pomirjeno in odporno proti staranju. Dobavno stanje je normalizirano in hladno vlečeno v toleranci h 11. Valjan material zaenkrat ne pride v poštev, ker bi se surovci preveč razlikovali v teži. V dobavnih pogojih so definirane tudi mehanske lastnosti in preoblikovalna sposobnost. Dobavljeno jeklo trenutno zadovoljuje glede kvalitete, doseči pa bo treba še nižjo preoblikovalno trdnost. Specializirani proizvajalci takih jekel v tujini so že razvili posebna jekla z veliko preoblikovalno sposobnostjo (v Nemčiji Ma 6, v Italiji Ca 10). Posebne zahteve pri teh jeklih se postavljajo za oksidne in sulfidne vključke ter vsebnost Cr in Cu. Dalje se zahteva dobra kvaliteta površine, da pri velikih deformacijah ne pride do razpok. (Manjša globina risov kot po JUS, brez uvaljane škaže).

Za trdnostno in površinsko obremenjene dele uporabljamo jeklo Č 4320. Te dele smo prej izdelovali na stružnih avtomatih iz paličnega jekla kvalitete Č 4721 z dodatkom žvepla. To jeklo pa za hladno stiskanje naših delov ni posebno primerno, ker ima previsoko deformacijsko trdnost. Zato smo preizkusili ter ugotovili, da ustreza jeklo Č 4320.

Ravnokar potekajo nadaljnji preizkusi, da bi jeklo Č 4320 zamenjali z jeklom Č 4120, ki ima boljšo preoblikovalnost. Razliko v mehanskih lastnostih pa bi nadoknadili z boljšo toplotno obdelavo po stiskanju.



Slika 1

Retortne peči za toplotno obdelavo odkovkov

Fig. 1

Retort furnaces for heat treatment of cold formed parts

## Toplotna obdelava

Opremo za toplotno obdelavo stiskancev (slika 1) nam je dobavila firma Aichelin in sestoji iz dveh vertikalnih retortnih peči, ohlajevalne naprave, naprave za vakuumiranje in razvijalca zaščitnega plina. Peči in razvijalec so kurjene s plinom. Retorte so opremljene z ventilatorji za mešanje atmosfere, da je izenačevanje temperature hitrejše. Peči krmili programski regulator, ki omogoča poljubno hitro ohlajanje šarže. Maksimalna teža šarže je 1200 kg.

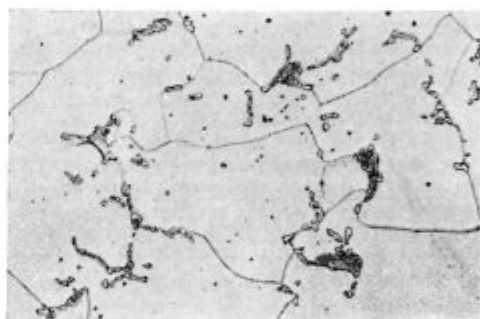
Šaržo pred segrevanjem vakuumiramo in nato uvajamo zaščitni plin. V pečeh se izvaja segrevanje, zadrževanje na temperaturi in kontrolirano ohlajanje, v hladilni napravi pa se nadaljuje nekontrolirano ohlajanje.

Izvajamo tele postopke:

mehko žarjenje, vmesno žarjenje in normalizacijo.

Mehko žarjenje je sorazmerno draga operacija, zato običajno ne žarimo jekla do popolne sferoidizacije, razen v primerih, ko je preoblikovalna trdnost materiala na meji vzdržljivosti orodja.

Sferoidizacijo izvajamo s segrevanjem na 690° C, zadrževanjem 4 ure na tej temperaturi in ohlajanjem. Č 4320 ohlajamo kontrolirano na

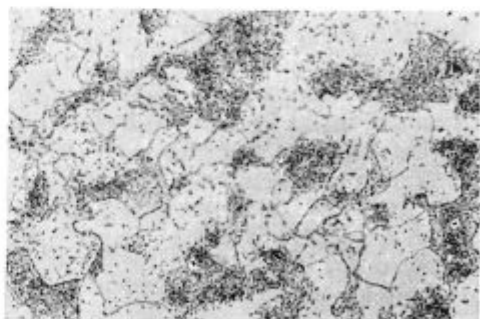


Slika 2

Struktura jekla JMP 10 po sferoidizaciji povečava 500 × 500 ×

Fig. 2

Structure of JMP 10 steel after spheroidisation. Magnification.



Slika 3

Struktura jekla Č 4320 po sferoidizaciji povečava 500 × 500 ×

Fig. 3

Structure of Č 4320 steel after spheroidisation. Magnification.

550° C s hitrostjo 15° C/h, naprej pa ohlajamo nekontrolirano. Jeklo JMP 10 ohlajamo nekontrolirano direktno z žarilne temperature.

Medfazno žarjenje, oziroma rekristalizacijo izvajamo na temperaturi 670–690° C.

Naj omenimo še, da zadnjo fazo dela, lonček pred reduciranim vlekrom, žarimo na boljšo obdelovalnost in ne na najboljšo preoblikovalnost.

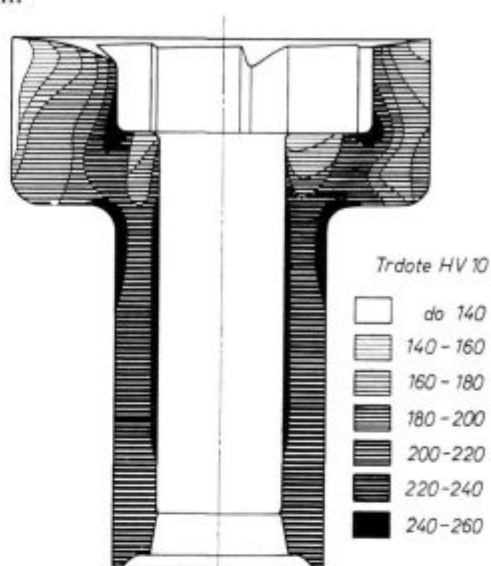
Vzdržljivost orodja je kljub temu zadovoljiva, odrezovanje pa tudi ne dela težav.

### Orodja in faze izdelave

Vhodni material za odkovek ima razumljivo najvažnejšo vlogo na začetku procesa projektiranja orodja — to je pri določevanju načina preoblikovanja, števila preoblikovanih stopenj ter potrebne števila medfaznih žarjenj. Osnovne podatke dobimo iz krivulje deformacijske trdnosti materiala. Te vrednosti nato vskladimo s predhodnimi praktičnimi izkušnjami o vedenju materiala in silami, ki se pojavljajo pri različnih postopkih preoblikovanja.

Zaradi zahtevnega in razvejanega raziskovalnega dela, ki je potrebno v tej fazi dela, predvsem, ker si pri nas tehnologija hladnega preoblikovanja šele utira pot v industrijsko proizvodnjo, smo se že zgodaj povezali z nosilci ustreznih smeri na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, z Metalurškim inštitutom ter Slovenskimi železarnami. Že od

vsega začetka smo naleteli na veliko razumevanje in podporo. Eden prvih rezultatov takega načina dela so poleg razvoja domačih jekel za preoblikovanje tudi raziskave, ki jih je za našo tovarno opravil Dr. Kveder z Metalurškega inštituta v Ljubljani.

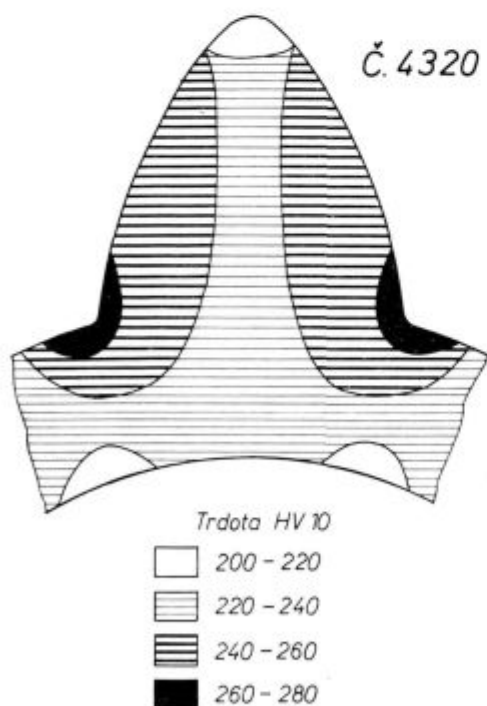


Slika 5

Utrditve materiala na prerezu pesta sklopke

Fig. 5

Work hardening of material on the cross section of the barrel



Slika 4

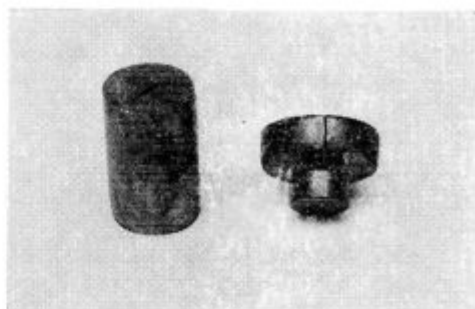
Prikaz utrditve materiala na zobu pastorka po predhodnem preoblikovanju

Fig. 4

Presentation of the work hardening of material on the pinion tooth after preliminary forming

Raziskave vzrokov pogostih lomov orodja, prikazanega na sliki 8, metalografskih posnetkov, ki so vključeni v ta prispevek, posebej pa še grafično zelo dognan prikaz porazdelitve trdot po stiskanju na naših zahtevnejših odkovkih (sliki 4 in 5) nam predstavljajo trdno osnovo za razjasnitev številnih, čisto praktičnih težav v proizvodnji.

Preoblikovalne lastnosti materiala, ki nam ga dobavlja Železarna Jesenice, so dokaj dobre, predvsem pa je kvaliteta glede na preoblikovalnost večji del na enaki višini. Tega pa ne moremo trditi za kvaliteto obdelave vlečenih palic. Napaki v materialu (slika 6), predvsem zavaljanost, povzročata



Slika 6

Napaki v materialu: zavaljenost in ostanek lukerja

Fig. 6

Faults in material: overlapping, sink hole remnant

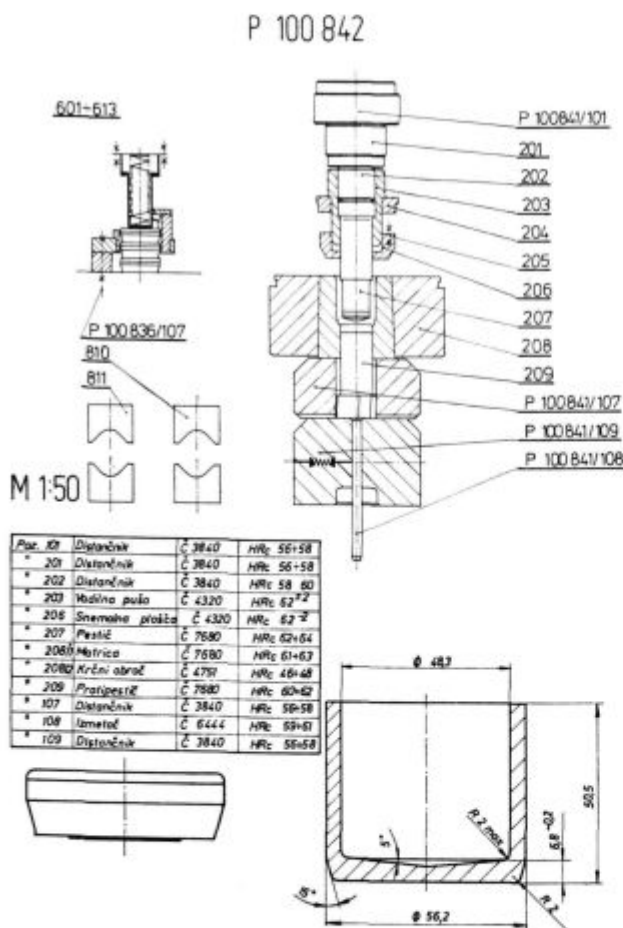
resne težave pri preoblikovanju. Surovec je seveda izmeten, poleg tega pa pretrgana fosfatna in mazalna plast na razpoki povzročita takojšnje lepljenje materiala na matrico.

Pri materialih za orodje smo v večini vezani na materiale točneje na orodna jekla, ki so trenutno na zalogi pri trgovski mreži. Posebno na področju razvoja hitroreznih jekel, primernih za hladno preoblikovanje, je skrajni čas, da se z usklajeno akcijo pri razvoju teh jekel med železarnami in predelovalno industrijo zagotovi nemoten razvoj tehnologiji hladnega preoblikovanja. Orientacija na uvožene materiale in dele orodij ne sme postati dolgoročna rešitev.

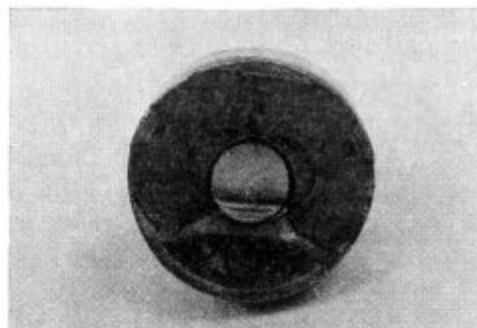
Konstrukcija, izdelava ter vzdrževanje orodja so vsekakor ključne točke pri procesu hladnega preoblikovanja. »Predimenzioniranja orodja«, za katerim se lahko skriva tudi nedodelana konstrukcijska rešitev, pri mnogih orodjih za hladno kovanje, enostavno ni mogoče uporabiti. Specifične obremenitve kritičnih delov orodja so mnogokrat tako visoke, da je le deset odstotkov razlike med delovnimi obremenitvami in obremenitvami, ki povzročajo lom orodja. Nekih splošno veljavnih pravil pri konstruiranju orodij, posebno večsto-

penjskih, ni mogoče utrditi. Edino, kar lahko z gotovostjo pričakujemo, so težave z novim orodjem pri poizkusni proizvodnji. Postopek hladnega preoblikovanja je sicer posebno v tuji literaturi zelo dobro teoretično obdelan, tudi v domači raziskovalni dejavnosti je opaziti nekaj tehtnih prispevkov, vendar nam lahko teoretične raziskave dajejo le splošne smernice. Izkušnje in praktični rezultat v proizvodnji pa dajo dokončno sodbo o novi konstrukciji. Na (sliki 7) je prikazana konstrukcija za — lahko bi rekli — klasičen način hladnega preoblikovanja, protismerno iztiskanje materiala. Na sestavnici so vneseni materiali, ki jih najpogosteje uporabljamo.

Osvajanje tehnologije izdelave orodij zahteva velika vlaganja v strojno opremo ter sposobne strokovnjake. Zasluga teamskega dela je, da nam je uspelo v razmeroma kratkem času toliko osvojiti tehnologijo izdelave orodij, da v domači orodjarni izdelujemo vse, tudi najzahtevnejše dele orodij. Priznati pa moramo, da nam je slaba kvaliteta domačih jekel nekajkrat predstavljala nerešljiv problem. Ker smo mnogokrat prisiljeni kupovati hitrorezna jekla od trgovske mreže celo brez atestov, je seveda kvaliteta teh jekel temu primerena. Slabi kvaliteti materiala se pridruži še nezanesljiva termična obdelava, ker v lastni tovarni še nimamo kalilnice za hitrorezna jekla. Napake se nato največkrat pokažejo šele v proizvodnji, ko se po nekaj udarcih na stroju orodje zlomi ali defor-



Slika 7  
Tipično enostopenjsko orodje za protismerno iztiskanje  
Fig. 7  
Typical one-station tool for backward extrusion



Slika 8  
Zlomljen oblikovni pestil. Vzrok je nepravilna porazdelitev karbidov v jeklu

Fig. 8  
Broken forming punch, caused by irregular distribution of carbides in steel

mira (slika 8). Vse to izredno podraži izdelavo, in kar je najtežje, povzroči zastoje v proizvodnji. V takih primerih smo prisiljeni iskati kratkoročne rešitve z naročanjem delov orodij v tujini, kjer nam lahko zagotovijo neoporečen material in termično obdelavo, prilagojeno potrebam orodij za hladno preoblikovanje.

Pri vtečenih orodjih postopoma zamenjujemo hitrorezna jekla s karbidnimi trdinami in smo ob dobrem sodelovanju domače industrije dosegli že lepe uspehe.

## Površinska obdelava

Površinska obdelava stiskancev je zelo važna, saj je prav razvoj primernih mazil poleg ustreznih materialov za orodja največ pomenil za razvoj tehnologije hladnega kovanja.

Priprava površine sestoji iz fosfatiranja in nanosa mazalnega filma. Izbira maziva je po naših izkušnjah odvisna predvsem od stopnje deformacije in od oblike preoblikovanca. V proizvodnji uporabljamo za mazanje milo na stearatni bazi ter tekoče in suho mazivo na osnovi molibdenovega disulfida. Omenjeno milo se kot mazivo najbolj pogosto uporablja, pri zahtevnih delih pa je njegova uporabnost omejena z velikimi površinskimi tlaki in temperaturo, ker prihaja do trganja mazalnega filma. Druga nevsječnost pa je nabiranje odvečnega mila v zaprtih delih orodja, kar zahteva pogosto čiščenje orodja. Uporaba mila se je pokazala zelo ugodna pri reducirnem vleku in nakrčevanju z manjšo deformacijo.

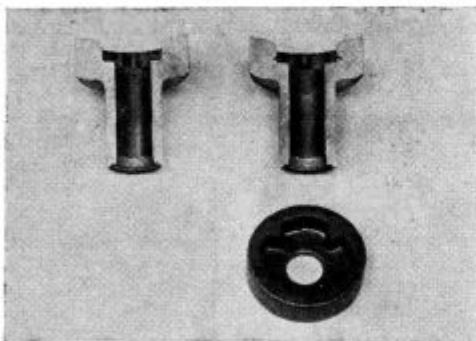
Težje probleme smo uspeli rešiti z mazivi na osnovi MoS<sub>2</sub>. Ta maziva dobro mažejo tudi notranje površine votlih delov, prebitka maziva v orodju pa enostavno rešujemo z odpihovanjem. Na ta način smo uspeli zmanjšati eksplozije maziva, ki so se pojavljale pri protismernem stiskanju lončka in so neugodno vplivale na orodje in stroj.

Izkušnje so tudi pokazale, da kombinacija moli-kota in ustreznega olja ne pride v poštev tam, kjer so matrice deljene. Zaradi visokih tlakov pronica olje med sestavljene matrice in jih odpira.

Lep primer pravilne izbire maziva in postopka mazanja imamo pri oblikovanju pesta sklopke: (slika 9).

Z običajnim načinom mazanja je stalno prihajalo do trganja materiala pri dnu profila, s posebnim postopkom mazanja pa je problem odpadel.

Površinsko obdelavo izvajamo v bobnih na napravi domače izdelave. Dobavitelj na žalost še ni uspel usposobiti naprave za avtomatsko obratovanje, kar je pogoj za enakomerno kvaliteto. Zato delamo ročno, so pa rezultati malo slabši. Pogosto



Slika 9

Izbira pravilnega načina mazanja je odpravila razpoke na dnu profila

Fig. 9

Correct lubrication eliminated cracks in the section base

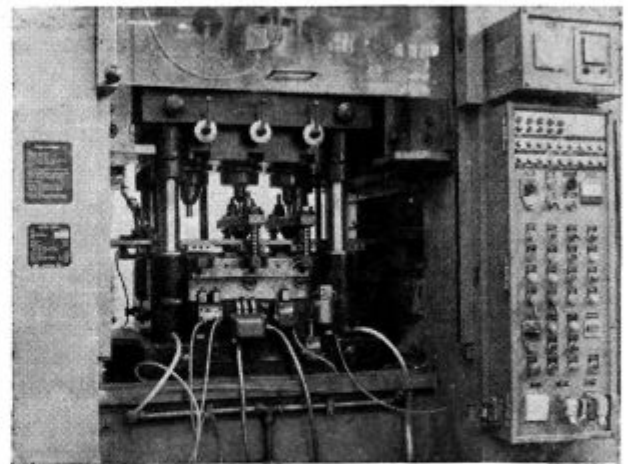
pa kontroliramo izrabljenost posameznih kopeli in temperaturo. Uporabljamo kemikalije domačih proizvajalcev za fosfatiranje, pri mazivih pa smo vezani na uvoz.

## Strojna oprema

Za sekanje surovcev imamo posebne avtomatske škarje firme Komatsu Maypres. Škarje imajo priključen šaržer za palice in sortirno napravo za izločanje koncev palic. Hitrost odrezavanja je večja kot pri mehanskih stiskalnicah, zato je odrez bolj paralelen in točnejši. K boljšemu odrezu pripomore tudi pravilno izbran vhodni material: vlečena in normalizirana palična jekla. Na škarjah dosegamo precejšnjo točnost pri teži surovcev. Tako znaša toleranca pri 325 g težkem surovcu le + 0,5 g. Taka točnost je pri zaprtem preoblikovalnem orodju neobhodno potrebna. Vzdržljivost odreznih orodij je primerna, dosegamo okoli 40.000 kosov na eno brušenje.

Za stiskanje uporabljamo dve 630-tonski transferni stiskalnici. Stiskalnici sta izvedeni iz Mayevo kinematiko, ki omogoča manjšo hitrost paha v delovnem hodu, medtem ko je hitrost paha v praznem hodu pospešena. Na ta način so precej optimalno združeni velika produktivnost stroja in dobri pogoji za tečenja materiala.

Stiskalnice so opremljene z izmetači v mizi in v pahu. Postopek stiskanja je avtomatski, transport obdelovancev, gibanje paha in izmetačev so enotno krmiljeni. V krmilni krog so vključena varovala na vseh postajah, ki preprečujejo lom orodij zaradi nepravilnega transporta ali drugih motenj. Stiskalnice so opremljene z indikatorjem obremenitve, ki je v praksi zelo koristen pokazatelj spremenjenih pogojev stiskanja. Proti preobremenitvi so stiskalnice zavarovane s hidravlično



Slika 10

Orodni prostor stiskalnice OKN 630 z vgrajenim trostopenskim orodjem

Fig. 10

Tool seat in OKN 630 extrusion press with built-in three-station tool

varovalno napravo. Trenutno delamo na stiskalnicah z eno-dvo in trostopenjskimi orodji, možno pa je vgraditi tudi petstopenjsko orodje (slika 10). S povečanjem stopenj postane urejanje stroja izredno zahtevno in občutljivo, zanesljivost obratovanja pa pade.

### Zaključek

Naš oddelek hladnega stiskanja danes kljub številnim težavam redno dobavlja odkovke za našo proizvodnjo avtoelektričnih agregatov. Težišče dela je sicer na jeklenih odkovkih, izdelujemo pa tudi stiskance iz aluminija in bakra (slika 11). Vendar problematika pri neželeznih delih še daleč ni tako obsežna kot pri jeklu. Trenutni obseg proizvodnje v oddelku hladnega oblikovanja znaša cca. 150 ton jeklenih odkovkov in cca. 30 ton Al in Cu delov na leto.

Za konec bi radi omenili še: potrebno je v državnem okviru ustanoviti telo, ki bo skrbelo za povezavo vseh udeležencev, katerih prispevek je pomemben za uspeh hladnega kovanja.

Povezati bo treba univerze, proizvajalce surovin, proizvajalce orodij, proizvajalce opreme in predelovalce. Večina industrijsko razvitih držav ima taka telesa, ki so včlanjena v mednarodni grupi za hladno kovanje s sedežem v Parizu.



Slika 11  
Izbor hladnih stiskancev  
Fig. 11  
Selection of cold formed parts

V okviru te grupe si izmenjujejo izkušnje in izdajajo posebni standardi, ki olajšujejo reševanje problemov.

Verjamemo, da bi z organiziranim sodelovanjem lažje prebrodili začetne težave, saj skupaj z nekaterimi drugimi podjetji orjemo ledino na področju masivnega stiskanja jekla v Jugoslaviji, če izznamemo proizvodnjo vijačnega materiala, ki je specifična.

## ZUSAMMENFASSUNG

Grosse Serien ähnlicher Erzeugnisse haben die Einführung der Kaltverformungstechnologie in unserer Produktion ermöglicht.

Für Teile wo mechanische Eigenschaften nicht von wesentlicher Bedeutung sind, wird der Stahl JMP 10 angewendet, Teile wo eine höhere Festigkeit und Abriebfestigkeit verlangt wird, werden aus einem CrMn Einsatzstahl Č 4320 geformt, beide Stahlsorten sind kaltgezogen.

Die Wärmebehandlung der Presslinge wird in einer Schutzgasatmosphäre in einem senkrechten Retortenofen durchgeführt.

Das Weichglühen wird bei einer Temperatur von 690° C und langsamer Abkühlung bis 550° C, und die Zwischen-glühung auf einer Temperatur von 670° C bis 690° C durchgeführt.

Die Verformungseigenschaften des Materials sind zufriedenstellend. Schwierigkeiten verursacht eine unste-

tige Oberflächenbeschaffenheit der gezogenen Stäbe. Die Werkzeuge sind aus einheimischen Werkzeugstählen gefertigt, und die Gesamtwerkzeugfertigung ist in der eigenen Werkstatt eingenommen worden.

Ein qualitätsmässiges Schmiermittel ist für ein erfolgreiches Verformen von entscheidender Bedeutung. In der Produktion wird Seife auf Stearatbasis und ein fließendes und ein trockenes Schmiermittel auf Grund des Molybdändisulfides angewendet. Die Anwendung der Seife ist durch die hohen Oberflächenspannungen und hohe Temperatur begrenzt.

Um die Anfangsschwierigkeiten leichter zu überbrücken, wäre es nötig, die Hersteller der Rohstoffe und der Werkzeuge, die Verarbeiter und die Universitäten enger zu verbinden, um die Probleme zusammenstimmend zu lösen.

## SUMMARY

Great series of similar products enable to introduce cold forming also in this industrial branch. For parts where mechanical properties are not essential JMP 10 steel is used while parts with higher demands for strength and wear resistance are made of Č 4320 steel. Both steel qualities are cold drawn. Heat treatment of extruded parts takes place in vertical retort furnaces in controlled atmosphere. Spheroidation is achieved at 690° C with consequent slow cooling to 550° C and intermediate annealing between 670 and 690° C.

Workability of material is satisfactory, difficulties

occur because of inconsistent quality of treated drawn bars. Tools are made of domestic tool steel, and they are completely manufactured in our own tool plant.

Correct lubrication is essential for successful working. Stearate soap, and liquid and solid lubricants of molybdenum bisulphide are used. Application of soap is limited with high surface pressures and temperature. In order to overcome initial difficulties more successfully, coordinate cooperation between the university institutions, raw material producers, tool makers, and steel consumers is demanded.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство серий подобных изделий нам дали возможность ввести в наше производство технологию холодной деформации.

Детали, при которых механические свойства не представляют существенное значение изготавливаются из стали марки JMR 10, между тем для деталей повышенной вязкости и износостойкости служит сталь марки S 4320. Обе марки стали подвергаются холодному волочению.

Термическая обработка прессованных продуктов выполняется в защитной атмосфере в вертикальных ретортных печах. Сфероидизация выполнялась при  $t$ -ре  $690^{\circ}$ , медленное охлаждение до  $550^{\circ}$ , а отжиг при дальнейшей обработке при  $t$ -рах  $670$ — $690^{\circ}$  С.

Способность материала к деформации удовлетворительна; затруднение представляет только непостоянность качества обра-

ботки волоочных прутков. Инструменты изготовлены из домашней инструментальной стали, также приготовление инструментов усвоено в домашнем цехе.

Существенное значение для достижения хорошей деформации представляет качество выполнения смазки. В производстве употребляли стеариновое мыло и жидкие и сухие смазки на базе дисульфида молибдена. Употребление мыла ограничено вследствие высокого поверхностного давления и вследствие высокой температуры.

Для успешного преодоления начальных затруднений было бы необходимо более тесная связь между университетом, производителями сырья и инструментов, также и с исполнителями переработки и, таким образом совместным сотрудничеством выполнять возникшие вопросы.





# Korozijska odpornost CORTEN jekla

(nadaljevanje)

UDK: 620.191.2:669.14.018.821

ASM/SLA: K1a

Neža Exel

Navedeni so rezultati nadaljevanja korozijskih poizkusov, t. j. izgube debeline po 3,4 in 6 letih atmosferske izpostave za domače in italijansko jeklo v ljubljanski, bohinjski in kranjski atmosferi in rezultati novih poizkusov z določanjem izgube debeline po načinu z odtapljanjem.

## 1. UVOD

Konec maja 1970. leta smo pričeli s korozijskimi poizkusi nizko legiranega jekla, ki je odporno na atmosfersko korozijo in je znano pod imenom »corten« ali »jekor«.

V članku iz l. 1973<sup>1</sup> smo objavili rezultate dvoletne korozije domačega jekla v ljubljanskem in bohinjskem ozračju in enoletne rezultate italijanskega jekla v Kranju.

Iz navedb v članku je razvidno, da je bila korozijska izguba debeline domačega jekla po dveletni izpostavi v Ljubljani 0,09 mm, v Bohinju pa 0,065 mm. V Kranju je bila enoletna izguba debeline italijanskega jekla izražena kot povprečje iz vzorcev treh fasadnih strani, 0,064 mm.

Debelino vzorcev pred korozijo in po njej smo v teh poizkusih določali v prečnih metalografskih obruskih.

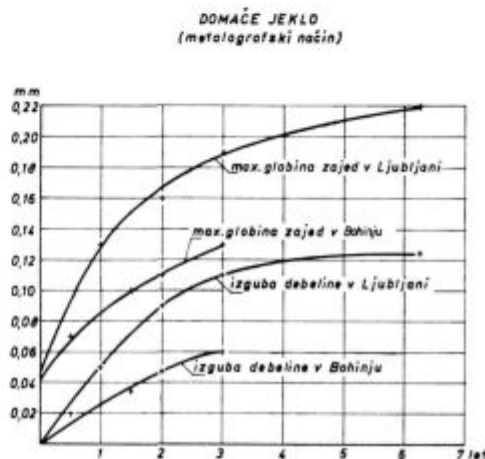
## 2. Nadaljevanje poizkusov

Korozijske poizkuse z vzorci domačega jekla smo v Bohinju nadaljevali do skupno treh let, v Ljubljani do nekaj več kot šest let; poizkuse z italijanskim jeklom v Kranju pa delamo 4 leta. Vzorci domačega jekla so bile ploščice  $10 \times 10 \times 0,2$  cm.

Rezultati nadaljevanja so za domače jeklo prikazani na sliki 1 kot izguba debeline in globina največjih zajed. Metalografsko določena izguba debeline je po 3-letni izpostavi v Bohinju dosegla 0,06 mm, v Ljubljani pa po 6 letih okrog 0,13 mm. Po šestih letih se je korozija v Ljubljani praktično ustavila.

Na sliki 2 so prikazane krivulje izgub debeline za fasadno oblogo iz italijanskega jekla v Kranju za dobo okrog 4 let. Izgube so posebej navedene za severno stran, kjer je korozija največja, za pročelje, kjer je najmanjša in kot povprečje treh strani. Povprečje izgub je znašalo do marca 1976. leta okrog 0,11 mm. Krivulje kažejo jasno zmanjševanje korozije s časom. V sliki 3 je prikazano

napredovanje korozije po letih v prečnih metalografskih obruskih iz vzorcev pročelja. Vzorce za meritve jemljemo na najvišjem robu fasade, t. j. pod streho, kjer je garažna ploščad. Streha je dvignjena nad fasado, tako da je ploščad s strani odprta in izpostavljena zunanjemu zraku. Medtem ko je zunanja stran fasadnih plošč izpostav-

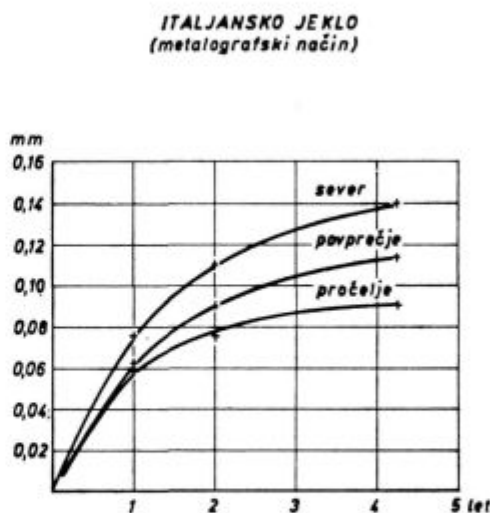


Slika 1

Napredovanje izgub debeline in globine zajed s časom v ljubljanskem in bohinjskem ozračju

Fig. 1

Increasing thickness losses and depths of notches with time in the Ljubljana and Bohinj atmosphere



Slika 2

Napredovanje izgub debeline s časom v Kranju

Fig. 2

Increasing thickness losses with time in the Kranj atmosphere

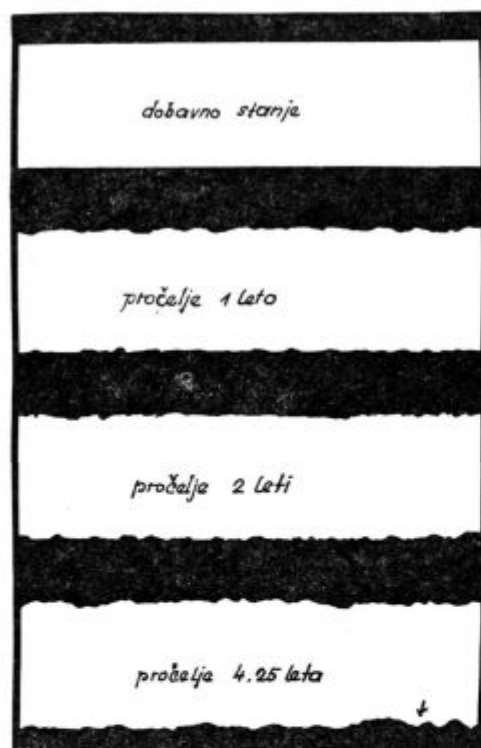
Neža Exel, dipl. inž., Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij

ljena vsem vremenskim vplivom, je »notranja« izpostavljena zunanjemu zraku in njegovi vlagi ter izpušnim plinom, ne pa vplivu sonca in pada vin. Ugotovili smo, da je »notranja« stran bolj korodirana kot zunanja — glej spodnji rob posnetka za 4 leta na sliki 3 (puščica!). Globina največje korozijske zajede dosega ca 0,18 mm.

Pri metalografskem načinu določanja izgub debeline v teh poizkusih je bila povprečna prvotna debelina najprej merjena v obrusku še nekoro diranega vzorca, kasneje pa smo največjo, še obstoječo debelino v vsakokratnem korodiranem stanju jemali kot prvotno, predpostavljajoč, da na vrhovih korozijskih zajed (katodah mikročlenov) še obstaja prvotna debelina. Ta način smo morali uporabiti zato, ker se je dogajalo, da smo po koroziji izmerili v obrusku večjo povprečno debelino, kot je bila prvotna, kar pomeni, da je izhodna debelina po vzorcu toliko variirala, da en obrusek za njeno določitev ni zadoščal. Način določanja izhodne debeline v obruskih smo imenovali 1. metalografski način, za razliko od 2. načina, pri katerem smo izhodno debelino izračunali iz teže vzorca.

### 3. Novi poizkusi

Ker smo hoteli metalografski način določanja izgub preveriti po metodi z odtapljanjem koro-



Slika 3

Korozijske zajede v prečnih metalografskih obruskih iz fasadne pločevine debeline 2 mm iz vzorcev pročelja v Kranju

Fig. 3

Corrosion pits in transversal metallographic samples of the 2 mm front sheets. Sample taken in Kranj

zijskih produktov, smo januarja 1973. leta pričeli z novo izpostavo vzorcev domačega in italijanskega jekla, ki so bili vzeti iz iste pločevine (istih šarž) kot v prejšnjih poizkusih. Vzorci so bili ploščice  $9 \times 9 \times 0,2$  cm in smo jih izpostavili v Ljubljani, na dvorišču Zavoda za raziskavo materiala.

Pri metodi z odtapljanjem najprej tehtamo nekoro dirane vzorce, torej v izhodnem stanju; po vsakem času korozijske izpostave se odstrani rja z odtapljanjem v inhibirani kislini in očiščene vzorce zopet tehtamo. Izgubo teže vzorca preračunamo v izgubo debeline; s slepim preizkusom se določi še odtapljanje samega jekla in to upošteva pri izračunu.

V 3 letih (jan. 1973 — jan. 1976) smo štirikrat določili izgubo debeline, vsakič na 3 vzorcih obeh vrst jekel. Rezultati odtapljanja so navedeni v tabeli 1.

Tabela 1

vzorec jekla	izguba debeline z odtapljanjem			
	po 8 mes.	po 15 mes.	po 27 mes.	po 3 letih
domače	0,061 mm	0,112 mm	0,142 mm	0,170 mm
italijansko	0,060 mm	0,105 mm	0,129 mm	0,148 mm

Kot je razvidno, daje metoda odtapljanja znatno večje izgube debelin, kot smo jih za enak čas dobivali z metalografskim načinom določanja.

Za kontrolo smo po 3 mesecih (april 1976) ponovno določili izgube, pri čemer pa smo pred odtapljanjem odrezali komade za obruske. Na ta način smo od istih vzorcev dobili rezultate za metalografski način in odtapljanje.

Pri metalografiji smo uporabili 1. in 2. način, ki je bil izvedljiv zato, ker smo imeli izhodne teže vzorcev, pa tudi izmere pred rezanjem in po njem za obruske. Iz teh podatkov smo izračunali povprečne izhodne debeline. V tabeli 2 navajamo rezultate izgub za 3,25 leta po vseh načinih.

Tabela 2

vzorec jekla	izguba debeline po 3.25 leta		
	z odtapljanjem	po 1. metal. nač.	po 2. met. nač.
domače	0,177 mm*	0,140 mm	0,170 mm
italijansko	0,143 mm	0,113 mm	0,130 mm

\* z upoštevanjem rezultata tabele 1 dobimo povprečje 0,172 mm.

Iz tabele 2 je razvidno, da je razlika v določanju izgub po obeh metalografskih načinih občutna: pri domačem jeklu daje 2. način za okrog 20 % večje izgube kot prvi, pri italijanskem pa za ca 15 %. Drugi metalografski način se bolj približa odtapljanju kot prvi.

Odtapljanje daje pri domačem jeklu za 23 % večje vrednosti kot 1. metalografski način, medtem

ko razlika proti 2. metal. načinu ni pomembna; pri italijanskem jeklu daje odtapljanje za ca 27 % večje vrednosti kot 1. metalografski način in za ca 10 % večje kot drugi.

Slabost metalografskih načinov je v malem vzorcu in negotovosti izhodne debeline. Pri načinu z odtapljanjem smo ugotovili, da izgube slepih preizkusov variirajo; pri domačem jeklu so te razlike majhne in praktično ne vplivajo na rezultat izgube, pri italijanskem (ki se bolj odtaplja) pa so večje in bi izguba debeline lahko bila tudi za nekaj odstotkov večja (5–6 %). Metoda odtapljanja se nam zdi pravilnejša.

#### 4. Primerjava in tuji podatki

Da bi mogli primerjati vse izpostave, smo metalografsko dobljene rezultate korigirali na vrednosti, ki bi jih dalo odtapljanje in narisali krivulje na sliki 4. Iz teh krivulj je razvidno:

— Italijansko jeklo daje pod enakimi pogoji za okrog 17 % nižje izgube debeline kot domače (glej krivulji 3 in 2), kar je verjetno pogojeno s pravilnejšo sestavo italijanskega jekla (1).

— Na izgubo debeline vpliva koledarsko obdobje izpostave, kot kaže domače jeklo, izpostavljeno v Ljubljani: skupna izguba za 3,25 leta v obdobju 1973–76 (krivulja 2) je za okrog 25 % večja proti tisti iz obdobja 1970–76 (krivulja 1), kar bi kazalo na večjo agresivnost v zadnjih letih; morda pa se je pri izpostavi 1973–76, ki se je pričela pozimi (januarja), težje tvorila začetna zaščitna plast rje kot pri izpostavi 1970–76, ki se je pričela poleti (junija).

— Pri domačem jeklu prve izpostave je v 6 letih prišlo do praktične zaustavitve korozije s skupno izgubo debeline ca 0,15 mm. Pri drugi izpostavi — krivulja 2 — bo zaustavitev nastopila šele pri večji izgubi debeline. Pri italijanskem

jeklu v Kranju — krivulja 4 — se po 4 letih že kaže zaustavljanje korozije pri izgubi okrog 0,14 mm, v Ljubljani pa bo tudi nastopilo šele po večji izgubi — krivulja 3.

Za splošno presojo velikosti izgub debeline navajamo nemške podatke, ki veljajo za korozijske izpostave v mestih Gelsenkirchen in Duisburg. Izgube so bile določene po načinu odtapljanja. Enoletne izgube so bile različne glede na leto izpostave, n. pr. v letu 1962–63 je bila izguba debeline 0,098 mm, v letu 1963–64 je bila podobna, medtem ko je v letu 1964–65 dosegla 0,14 mm ali 40 % več. Iz teh podatkov so zaključili, da agresivnost ozračja ni vsako leto enaka. Skupna izguba po 3 letih je bila v Gelsenkirchnu 0,20 mm, kar je veliko. To razlagajo tako, da so vzorci izpostavljeni ob hladilnem stolpu, kjer je vedno zelo visoka vlaga; v Duisburgu je bila skupna izguba debeline po istih 3 letih le 0,11 mm.

Nadaljevanje poizkusov (3) je dalo po 8 letih skupno izgubo v Gelsenkirchnu 0,34 mm, pri čemer pa krivulja izgub s časom še ne kaže na skorajšnjo ustavitev korozije. Za Duisburg je skupna 8-letna izguba debeline 0,20 mm, krivulja pa kaže na skorajšnjo ustavitev. Navedena je še skupna izguba debeline za izpostavo v Muhlheimu za 4 leta, ki znaša 0,10 mm. Iz preiskav je še razvidno, da je korozija večja na spodnji strani poizkusnih ploščic (ki jih niso obračali), kar razlagajo z daljšim zadrževanjem vlage in nečistoč na tej strani. Za izrazito podeželjsko okolje navajajo 4-letne izgube debeline 0,05 mm.

#### 5. ZAKLJUČKI

Korozijski poizkusi z vzorci domačega in italijanskega »corten« jekla v ljubljanski, bohinjski in kranjski atmosferi so pokazali naslednje:

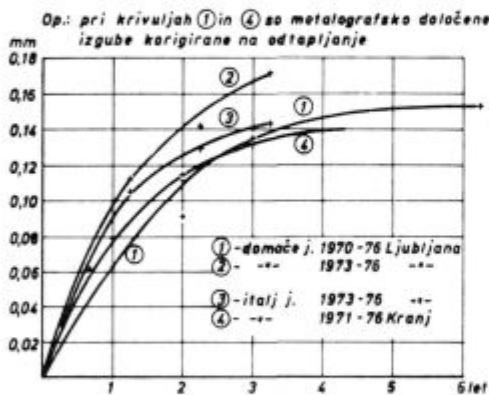
— Izguba debeline jekla, določena z odtapljanjem, je pri 6-letni korozijski izpostavi dosegla 0,15 mm ob praktični zaustavitvi korozije, vendar kaže drug, 3-letni poizkus, da je izguba lahko tudi večja (morda za 25 %), ker je odvisna od agresivnosti ozračja med korozijskim obdobjem in od letnega časa pričetka izpostave.

— Italijansko jeklo daje na splošno manjše izgube debeline kot domače, kar si razlagamo s pravilnejšo sestavo tega jekla. Po 3 oz. 4 letih so izgube dosegle okrog 0,14 mm ob izraziti tendenci zaustavljanja korozije.

— Določanje izgub debeline po načinu odtapljanja korozijskih produktov daje večje vrednosti kot metalografski načini; razlika je lahko do 25 %. Metoda odtapljanja imamo za pravilnejšo.

— Starejši podatki za izgubo debeline, ki navajajo za industrijsko atmosfero 0,05–0,07 mm (4) in (5) so gotovo preoptimistični, bi veljali kvečjemu za podeželjsko atmosfero, kot dokazujejo naši poizkusi v Bohinju. Tudi bi še veljali v primeru, da je ena stran jekla zaščitena s premazi.

DOMAČE IN ITALJANSKO JEKLO  
(odtapljanje)



Slika 4

Napredovanje izgub debeline s časom v Ljubljani in Kranju

Fig. 4

Increasing thickness losses with time in Ljubljana and Kranj

— Največje korozijske zajede v površini jekla so v naših poizkusih dosegle do 0,25 mm globine in se postavlja vprašanje vpliva teh zajed na utrujenostno odpornost in duktilnost. Na letošnjem korozijskem posvetovanju v tujini (6) je bilo omenjeno, da opažajo nekakšen vpliv, ni pa bilo povedano, kolikšen. To vprašanje bi bilo pomembno predvsem za nosilne konstrukcije iz »corten« jekla. Pri njihovem dimenzioniranju bi kazalo upoštevati tudi korozijsko zmanjšanje debeline, predvsem pri majhnih debelinah jekla.

## LITERATURA

1. N. Exel: *Železarski zbornik* 7 (1973) št. 1, s. 31—41
2. W. Schwenk, H. Ternes: *Stahl u. Eisen* 88 (1968) Nr. 7, 4. april, s. 318—321
3. K. Bohnenkamp in dr.: *Stahl u. Eisen* 93 (1973), Nr. 22, 25. okt. s. 1054—1060
4. C. P. Larrabee, S. K. Koburn: *Proc. 1st Intern. Congres Metals Corrosion*, London, 1962, s. 276—284
5. kot literatura 4 in 6 v članku 1
6. 2. Korrosionum: *Korrosion u. Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe im Hoch- u. Ingenieurbau*, Disseldorf, 14.—16. jan. 1976

## ZUSAMMENFASSUNG

Resultate der Korrosionsprüfung des wetterfesten »Corten«-Stahles werden angegeben. Der durch Korrosion entstandene Dickenverlust wurde an Proben  $90 \times 90 \times 2$  mm bestimmt, welche aus 2 Stahlchargen mit unterschiedlichem P- und Cr-Gehalt stammten. Die Auslagerung in städtischer (Ljubljana, Kranj) und ländlicher Atmosphäre dauerte 3 bzw. 6 Jahre. Der Dickenverlust in städtischer Atmosphäre, bestimmt aus dem Gewichtsverlust, betrug für den »normalen« Stahl 0.14 bis 0.15 mm, wobei die Korrosion praktisch zum Stillstand kam, für den Stahl mit niedrigerem P- und Cr-Gehalt aber 0.155 bis ca 0.20 mm,

abhängig von der atmosphärischen Aggressivität während der Korrosionsdauer und der Jahreszeit des Auslagerungsanfangs. Der Dickenverlust in ländlicher Atmosphäre betrug nach 3 Jahren 0.06 mm mit sichtlicher Tendenz zum Stillstand.

Die tiefsten Korrosionseinfressungen erreichten bisher 0.25 mm was einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und Duktilität haben könnte.

Die metallographische Bestimmung des Dickenverlustes ergab im Vergleich zur Dickenbestimmung aus dem Gewichtsverlust bis zu 25 % kleinere Werte.

## SUMMARY

Experimental results of corrosion tests with Corten steel which is resistant to atmospheric corrosion are cited in the paper. Reduction of thickness due to corrosion was determined on samples with dimensions  $90 \times 90 \times 2$  mm. Two steel melts were used. Phosphorus and chromium content varied in the two melts. Exposure to urban (Ljubljana, Kranj) and countryside (Bohinj) atmosphere lasted 3 and 6 years. The reduction of thickness was calculated from the weight loss. Thickness of steel with »normal« composition was reduced for 0.14 to 0.15 mm, then corrosion stopped. In steel with lower P and Cr content the

thickness was reduced between 0.155 and 0.20 mm depending on the aggressiveness of the atmosphere and the season of the beginning of the experiment. The reduction of thickness in the countryside atmosphere was 0.06 mm after 3 years with evident tendency of corrosion to stop. The deepest corrosion notches reached 0.25 mm and they could influence the fatigue resistance and ductility of steel. Metallographic determination of the reduction of thickness gave about 25 % lower values than the previous method.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты коррозионного испытания стали марки »Corten« стойкое против атмосферной коррозии. Потеря толщины вследствие коррозионного воздействия была определена на образцах размера  $90 \times 90 \times 2$  мм из двух плавок стали, которые различались между собой при содержании P и Cr. Коррозионное воздействие в городской (Люблина, Крань) атмосфере и в провинции (Бохинь) длилось 3 оти. 6 лет. Потеря толщины в городской среде определена на основании потери тяжести при стали »нормального« состава составляла 0,14—0,15 мм, при чем действие коррозии практически останавливалась. Потеря стали с уменьшен-

ным содержанием P и Cr составляла 0,155 до приб. 0,20 мм в зависимости от агрессивности атмосферы во время воздействия и от времени года начала воздействия. Потеря толщины в провинции после 3 лет составляла 0,06 мм с очевидным стремлением к прекращению. Самые глубокие коррозионные разъемы оказались пока при 0,25 мм; это бы могло повлиять на усталостную прочность и на дуктильность стали. Металлографическое определение потерь толщины дало результаты которые до 25 % ниже от результатов полученных определением потери тяжести.

# Sesalni krog

## - naprava za kompenzacijo jalove energije in za zmanjševanje višje harmonskih tokov

Bratina Janez

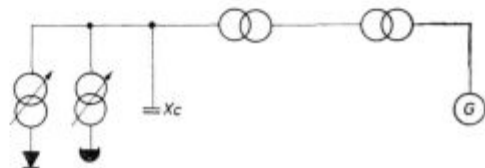
V vsakem večjem zaokroženem elektroenergetskem sistemu se vprašanja elektrotehnike in elektrogospodarstva zelo hitro srečajo pri kompenziranju jalove energije, oz. moči, ki jo jemljejo potrošniki tega sistema iz napajalnega omrežja. Pri manjših sistemih nastopa posamična lokalna ali skupinska centralna kompenzacijska naprava, priključena kot fiksna ali regulacijska skupina kondenzatorjev na nizko napetost. Karakteristike odjema, cena jalove energije in kapitalni stroški kompenzacijske naprave so edina merila za določitev najbolj gospodarske kompenzacijske naprave preprostih porabnikov. S koncentracijo velikih moči, kot jo imamo n. pr. v metalurških obratih, je nujno preiti na visokonapetostno kompenzacijo, kjer se poleg omenjenih meril vsiljujejo nove zahteve in elektrotehnične omejitve, ki jih določajo tako potrošniki kot elektroenergetske naprave. V članku so podane osnove in napotki, s pomočjo katerih se da graditi kompenzacijska naprava tudi v kompliciranih pogojih.

Kompenzacija jalove energije je aktualna v prenosu, distribuciji in eksploataciji električne energije. Ekonomski in nekateri tehnični vidiki kompenzacijskih naprav so široko popularizirani; v večjih elektroenergetskih sistemih, kot npr. v železarnah, pa kompenzacija jalove energije razkrije latentne karakteristike potrošnikov, ki zahtevajo posebno obravnavo in reševanje. Zaradi notranjih izvorov višje harmonskih tokov, ki jih generirajo usmerniške naprave in obločne peči, niso te samo izvor onesnažitve napetosti, temveč predstavljajo nevarnost, da jih kompenzacijske naprave ojačajo. S tem je vprašljiva smiselnost kompenzacije, saj je stvarni faktor moči  $\lambda = g \cdot \cos \varphi$  (pri čemer je  $g$  razmerje med tokom osnovne frekvence in med celotnim tokom), ta pa je lahko prav zaradi višje harmonskih tokov mnogo manjši od 1, čeprav smo izbrali kompenzacijsko napravo za fazni faktor  $\cos \varphi = 1$ . Najpogostejše kompenzacijske naprave so kompenzacijski kondenzatorji, katerih značilnost je, da lahko poleg toka osnovne frekvence vodijo brez preobremenitve velike deleže višjih harmonskih tokov; tudi, če je delež višjih harmonskih tokov enak toku osnovne frekvence, je kompenzacijski kondenzator preobremenjen tokovno za  $\sqrt{2} = 1,42$ , medtem ko

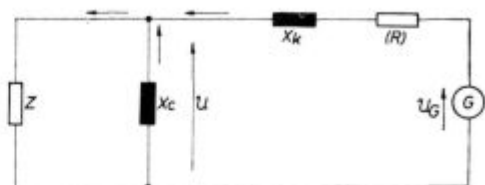
predpisi dopuščajo preobremenitev 1,5. Kompenzacijski kondenzatorji omogočajo poleg kompenzacije jalove energije osnovne frekvence tudi razbremenitev omrežja višjih harmonskih tokov, s čimer dosežemo nadaljnje zboljšanje faktorja moči in čiščenje sinusnega vala napetosti, seveda če kompenzacijske kondenzatorje pravilno vgradimo k potrošniku.

### Kondenzator in napajalna mreža

Na sl. 1 je prikazano omrežje, kjer generator električne energije preko transformatorjev napaja potrošnik (usmerniško napravo); potrošnikove potrebe po jalovi energiji krije kompenzacijska



Slika 1  
Napajalno omrežje in potrošniki s kompenzacijsko napravo  
Fig. 1  
Feeding line and consumers with the compensation device



Slika 2  
Nadomestna shema omrežja in potrošnikov  
Fig. 2  
Substitution scheme of the line and consumers

kondenzatorska baterija. Na sl. 2 so prikazane fazne upornosti celotnega sistema. Ohmske upornosti prenosnega sistema bomo zanemarili in bomo računali le z induktivno upornostjo mreže, ki jo diktira kratkostična moč  $P_k$  opazovalnega sistema:

$$X_k = \frac{U^2}{P_k}$$

Kapacitivno upornost kondenzatorske baterije dobimo iz njene moči  $P_c$ :

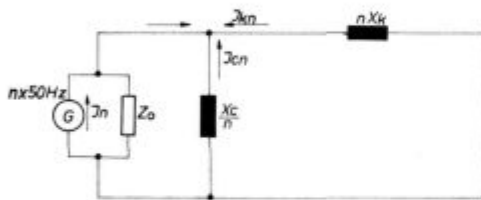
$$X_c = \frac{U^2}{P_c}$$

Bratina Janez je diplomirani inženir elektrotehnike in je vodja elektrotehniške službe v Železarni Ravne.

Za celoten sistem lahko predpostavljamo, da je sestavljen iz linearnih elementov; upornosti omrežja in kondenzatorske baterije niso odvisne niti od velikosti niti od smeri toka. Njihove upornosti so odvisne zgolj od frekvence. Če označimo z  $n$  mnogokratnik višje harmonskih tokov proti osnovni frekvenci, se upornosti posameznih elementov omrežja spremenijo s frekvenco, kot sledi:

$$X_{kn} = n \cdot X_k \quad X_{cn} = \frac{X_c}{n}$$

Če gledamo in obračunavamo razmere ob višje harmonskih tokovih, se ne spremenijo samo nastopajoči parametri, temveč tudi nadomestna shema. Generator električne energije za osnovno frekvenco postane za razmere višjih harmonskih tokov pasivni element, ki je že vključen v impedanci mreže. Po drugi strani pa postane usmernik (ali obločna peč) generator; s to razliko, da generira v omrežje, ki je prikazano na sl. 3 tok višje har-



Slika 3

Nadomestna shema omrežja in potrošnikov za višje harmonske tokove

Fig. 3

Substitution scheme of the line and consumers for harmonic currents

monskih ne pa napetost. Iz slike je tudi razvidno, da predstavljata induktivna upornost omrežja in kapacitivna upornost kompenzacijskega kondenzatorja paralelni nihajni krog z vsiljenim višjeharmonskim tokom, ki praktično ni odvisen od impedanc omrežja. Posledica tega je, da z naraščajočo upornostjo nihajnega kroga raste tudi napetost nihajnega kroga. Najvišjo napetost dobimo ob resonančnih pogojih za nihajni krog:

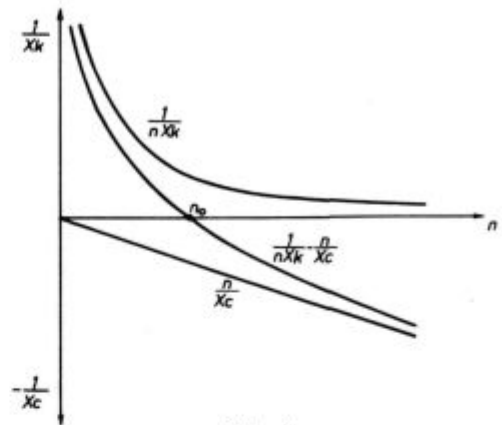
$$X_{kn} = X_{cn}$$

Iz tega sledi, da dobimo resonanco pri  $n$  višjem harmonskem toku, če je razmerje impedanc (moči) omrežja in kompenzacijske baterije:

$$n = \sqrt{\frac{X_c}{X_k}} = \sqrt{\frac{P_k}{P_c}}$$

Za 5-harmonsko so resonančni pogoji izpolnjeni, če je moč kompenzacijske baterije ( $P_c$ ) 1/25 ali 4 % kratkostične moči napajalnega omrežja ( $P_k$ ). Za 11-harmonsko pa dobimo resonanco že pri kondenzatorski bateriji, katere moč je 0,8 % kratkostične moči. Tu pa smo že globoko v področju, ki ga zahtevajo za kompenzacijske moči večji potrošniški kompleksi.

Vendar ni dovolj, da na osnovi navedenih enačb ugotovimo le, če se nahajamo s svojo kompenzacijsko napravo v resonančnem primeru. Pogledati je potrebno na celoto, ki jo tvorita paralelna upornost mreže in kondenzatorske baterije.



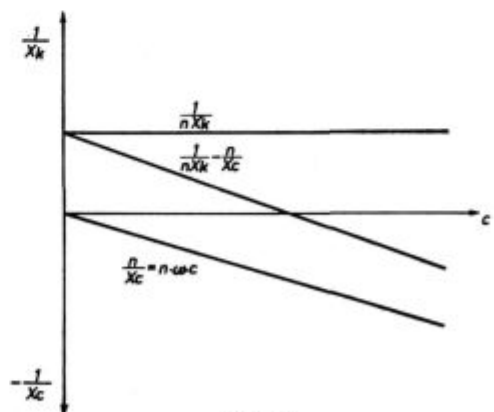
Slika 4

Prevodnost nihajnega kroga omrežja — kondenzatorska baterija v odvisnosti od frekvence

Fig. 4

Conductivity of the oscillating circuit line — bank of condensers depending on the frequency

Na sl. 4 si bomo pogledali odvisnost prevodnosti takšnega nihajnega kroga od frekvence. S prevodnostmi računamo zaradi paralelne vezave. Vidimo, da prevodnost mreže s frekvenco pada, prevodnost kondenzatorjev pa raste. Prevodnost nihajnega kroga predstavlja vsota obeh prevodnosti. V točki, kjer dobimo prevodnost kroga nič, imamo resonanco. Iz krivulj se tudi razbere, da pomeni vgraditev kondenzatorjev v mrežo zmanjšanje njene prevodnosti za vse primere, ko je frekvenca manjša od resonančne frekvence, pa tudi za primere, ko je frekvenca nekaj večja od te kritične točke. Šele pri precej višjih frekvencah postane prevodnost nihajnega kroga večja kot je prevodnost same mreže. Na sl. 5 je prikazana odvisnost prevodnosti nihajnega kroga od velikosti



Slika 5

Prevodnost nihajnega kroga omrežja — kondenzatorska baterija v odvisnosti od kapacitivnosti baterije

Fig. 5

Conductivity of the line — bank of condensers oscillating circuit depending on the bank capacity

kondzatorske baterije (pri konstantni frekven-  
ci). Vidimo, da je prevodnost mreže konstantna,  
prevodnost kondenzatorjev pa z njihovo velikostjo  
raste. Pri resonančnih pogojih je prevodnost ni-  
hajnega kroga nič. Iz sl. 5 je razvidno, da prevod-  
nost nihajnega kroga z naraščajočo kapacitiv-  
nostjo baterije pada (do vrednosti nič), nato pa  
ponovno narašča. Nihajni krog bo dobil večjo pre-  
vodnost od omrežja šele takrat, ko bo prevodnost  
kondenzatorjev vsaj dvakrat tolikšna kot omrežja.

Ta izvajanja so bila važna zaradi tega, da smo  
ugotovili, v katerih primerih pomeni vgradnja  
kompensacijskih kondenzatorjev povečanje upornosti  
sistema kondenzator — mreža, kajti ne samo  
ob resonanci, temveč v vseh teh primerih pomeni  
to za v omrežju nastopajoče višje harmonske to-  
kove njihovo pojačanje. Vsiljeni višje harmonski  
tokovi povzročijo v paralelnem nihajnem krogu  
večji padec napetosti, ki vodi k povečanju teh to-  
kov znotraj nihajnega kroga, torej med kondenzator-  
sko baterijo (potrošnikom) in omrežjem.

Upornost paralelnega nihajnega kroga je:

$$X_r = \frac{1}{\frac{1}{X_{kn}} - \frac{1}{X_{cn}}} = \frac{X_{kn} \cdot X_{cn}}{X_{cn} - X_{kn}}$$

Napetost, ki jo povzroči vsiljen tok višje har-  
monskega toka  $I_n$  na nihajnem krogu, je:

$$U_r = I_n \cdot X_r$$

Tok, ki ga povzroči vsiljen višje harmonski tok  
v omrežju, je:

$$I_{kn} = \frac{U_r}{X_{kn}} = I_n \frac{X_r}{X_{kn}} = I_n \frac{X_{cn}}{X_{cn} - X_{kn}} = I_n \frac{1}{1 - n^2 P_c/P_k}$$

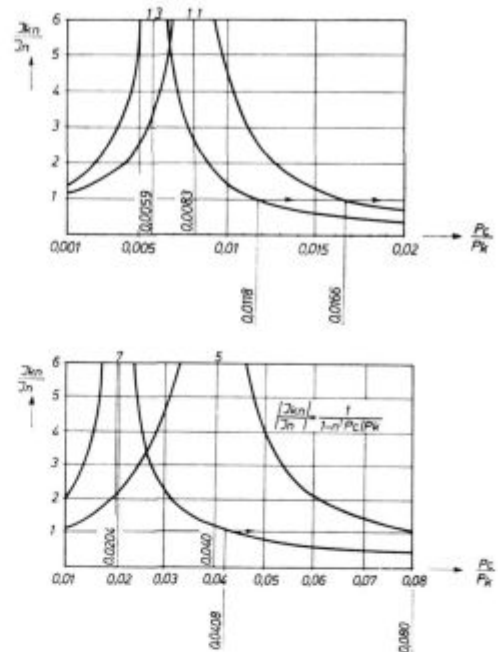
Tok, ki ga povzroči vsiljen harmonski tok skozi  
kondzatorsko baterijo:

$$I_{cn} = \frac{U_r}{X_{cn}} = I_n \frac{X_r}{X_{cn}} = I_n \frac{X_{kn}}{X_{cn} - X_{kn}} = I_n \frac{n^2}{P_k/P_c - n^2}$$

Na sl. 6 so na podlagi zgornjih enačb izračunane  
resonančne krivulje, ki kažejo odvisnost višje  
harmonskih tokov za  $n = 5, 7, 11, 13$  za posamezna  
razmerja kondzatorske moči proti kratkostični  
moči omrežja. Poleg jasno izraženih resonančnih  
pogojev, vidimo, da pomeni vgraditev kompenza-  
cijskih kondenzatorjev skoraj v vseh primerih  
večanje višje harmonskih tokov v omrežju. Ti to-  
kovi se v omrežju zmanjšajo šele, če moč kompen-  
zacijskih kondenzatorjev preseže določeno vred-  
nost. Vrednosti se dajo izračunati iz neenačbe:

$$P_c/P_k \geq \frac{2}{n^2}$$

Nevarnostim ojačanja višje harmonskim tokovom  
 $n = 5$  ( $n = 7$ ) se bomo torej izognili, če bomo  
vgradili kompenzacijsko baterijo, ki ima 8 %  
(4 %) kratkostične moči mreže. Tako velike kom-  
pensacijske moči so redke.



Slika 6  
Resonančne krivulje za  $n = 5, 7, 11, 13$   
Fig. 6  
Resonance curves for  $n = 5, 7, 11, 13$

Nevarnostim, ki jih prinaša vgraditev kondenzatorjev v sistem, se lahko izognemo tako, da vgradimo pred kondenzator dušilko take impedance, da bo njih skupna upornost za višje harmonske predstavljala vedno induktivno upornost. V tem primeru ne bomo dobili paralelnega nihajnega kroga iz induktivnosti mreže in kapacitivnosti kondenzatorja, ker se zaradi pred kondenzator vgrajene dušilke ta za višje harmonske ponaša kot induktivna upornost: dobimo torej dvoje paralelnih induktivnih upornosti, ki pa ne moreta ustvariti resonančnih pogojev. Dušilka, ki je serijsko postavljena pred kondenzator, zapira višje harmonskim tokovom pot v kondenzator, zato ji pravimo tudi zaporna dušilka. Vrednost, ki jo mora imeti dušilka, da postane zaporna, sledi iz pogoja, da se morata dušilka in kondenzator za višje harmonske tokove vesti induktivno:

$$X = X_D - X_C = X_D \cdot n - \frac{X_c}{n}$$

torej pri pogoju, da je

$$X_D \cdot n > \frac{X_c}{n}$$

$$X_D > \frac{1}{n^2} X_c$$

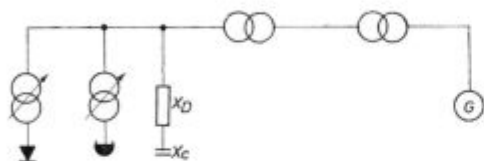
Iz te neenačbe sledi, da mora imeti dušilka za najnižje pričakovani višje harmonski tok ( $n = 5$ ) minimalno vrednost 4 % upornosti kondzatorske baterije. 4 % vrednost bi nam dala resonančne pogoje za serijsko vezano dušilko in kondenzator, zato izberemo bistveno višjo vrednost. Običajno računamo vsaj s 6 % dušilko. Zavedati pa se je

potrebno, da nam 6 % dušilka porabi 6 % kompenzacijske moči kondenzatorjev za magnetizacijo in da se zaradi dušilke na kondenzatorjih približno za enak procent poveča napetost.

**Sesalni krog**

Zamisel o dušilki kot induktivni upornosti, ki jo vežemo v serijo pred kondenzatorje, pa predstavlja prav tako možnost, da bosta ta dva pasivna elementa ustvarila v določenih pogojih serijski resonančni krog (sl. 7). Resonančni pogoji nastopijo pri dušilki impedance  $X_D$ :

$$X_D = \frac{1}{n_o^2} X_c$$



Slika 7

Napajalno omrežje in potrošniki s kompenzacijsko napravo s sesalnim krogom

Fig. 7

Feeding line and consumers with the suction circuit as a compensator

Upornost takega resonančnega kroga za oni višji harmonski tok, za katerega je ta uglašen, je enaka nič in predstavlja za ta tok kratek stik. Celoten višji harmonski tok bo torej iz omrežja izsesali. Zato tudi pravimo takemu resonančnemu krogu sesalni krog. Iz zgornje enačbe lahko ugotovimo, da potrebujemo za posamezne  $n$  — harmonske tokove dušilke takih vrednosti:

$n_o$	5	7	11	13
$X_D/X_c$	0,04	0,024	0,0083	0,0059

Zaradi omejitev vklopnih tokov kondenzatorjev je priporočljivo pred kondenzatorje vgraditi vklopno dušilko, ki mora imeti 1 % do 1,5 % upornosti kondenzatorjev. Iz zgornje tabele pa je razvidno, da nam lahko za 5 in z harmonsko le nekoliko večja, za 11 in 13 pa zgolj točneje definirana vklopna dušilka, že naredi ustrezen sesalni krog.

Zaporedna vezava induktivne in kapacitivne upornosti pa ustvarja tudi za tokove nazivne frekvence spremembe razmer: tako dobimo na kondenzatorju za toliko povišano napetost, kolikoršen je padec napetosti na dušilki

$$U_c/U = \frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} = a$$

$$U_D/U = \frac{1}{n_o^2 - 1} = b$$

V spodnji tabeli so izračunane vrednosti iz enačb

$n_o$	5	7	11	13
$U_c/U$	1,042	1,021	1,008	1,006
$U_D/U$	0,042	0,021	0,008	0,006

Kompenzacijska moč na kondenzatorju je torej sestavljena iz kompenzacijske moči kondenzatorja osnovne frekvence:

$$P_{cl} = 3a^2 U_f^2 \omega C$$

kjer računamo s fazno napetostjo  $U_f$ , s krožno frekvenco  $\omega$  in kapacitivnostjo kondenzatorjev  $C$  ter iz jalovega višje harmonskega toka  $I_n$ , ki ga iz omrežja sesa krog:

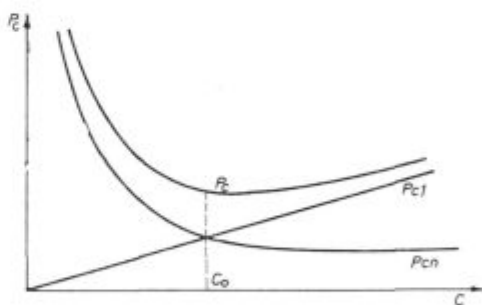
$$P_{cn} = \frac{3 I_n^2}{n \omega C}$$

Za kondenzatorsko baterijo je merodajna skupna moč

$$P_c = P_{cl} + P_{cn} = 3a^2 U_f^2 \omega C + \frac{3 I_n^2}{n \omega C}$$

Iz sl. 8 je razviden potek posameznih moči v odvisnosti od kapacitivnosti baterije. Kompenzacijska moč osnovne frekvence raste sorazmerno s kapacitivnostjo, kompenzacijska moč višje harmonske pa obratno sorazmerno s kapacitivnostjo. Kondenzator, kjer bo skupna moč najmanjša, dobimo iz pogojev

$$\frac{d P_c}{d C} = 0 \rightarrow C_o = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{I_n}{a \omega U_f}$$



Slika 8

Kompenzacijske moči osnovnega toka in višje harmonskega toka v odvisnosti od kapacitivnosti baterije

Fig. 8

Compensating effect of basic current and harmonic currents depending on the capacity of the bank of condensers

Ta pogoj je tudi dosežen, ko je  $P_{cl} = P_{cn}$ ! Iz sl. 8 tudi sledi, da je sesalni krog možen pri majhnih kapacitivnostih. Vidno pa je, da s tako kapacitivnostjo ne bi dosegli velikega efekta v kompenzaciji jalovih moči osnovne frekvence in da bi kondenzatorjevo moč pravzaprav že definirala moč višje harmonskega toka. Osnova za določanje kapacitivnosti kondenzatorske baterije je seveda potreba po jalovi energiji, oz. jalovi moči ( $P_{cl}$ ) osnovne frekvence, ki jo zahtevajo potrošniki.



Zato se odločamo za velike kapacitivnosti C in velike moči  $P_{ct}$ . S tem pa pada tudi delež moči višje harmonskega toka ( $P_{cn}$ ) v skupnem deležu moči ( $P_c$ ) kompenzacijske baterije. Skupni efektivni tok osnovnega in višjega harmonskega toka dobimo iz enačbe

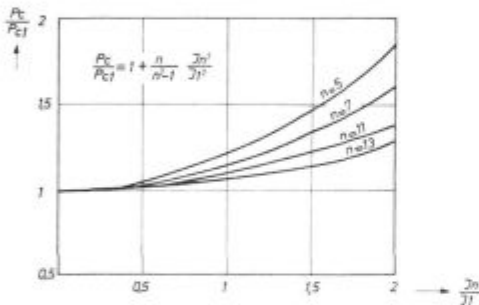
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_n^2}$$

S pomočjo prej navedenih enačb pa se da izraziti odnos moči v odvisnosti od tokov

$$\frac{P_c}{P_{ct}} = 1 + \frac{n}{n^2 - 1} \frac{I_n^2}{I_1^2}$$

Enačba je grafično prikazana na sl. 9, kjer se vidi, da višje harmonski tokovi glede na moč slabo obremenjujejo kondenzatorje. Če računamo z maksimalno dopustno tokovno obremenitvijo kondenzatorjev  $I = 1,5 I_1$ , kakor jo dopuščajo predpisi, nam to da najvišji še dopustni višji harmonski tok skozi kondenzator:

$$\frac{I_n}{I_1} = \sqrt{\frac{P_c}{P_{ct}} - 1} = \sqrt{1,5^2 - 1} = 1,12$$



Slika 9

Razmerje kompenzacijskih moči v odvisnosti od razmerja tokov

Fig. 9

Ratio of compensating effects related to the current ratio

Tak najvišje dopustni višje harmonski tok pa bo po moči preobremenil kondenzatorsko baterijo pri 5-harmonskem toku 26 %, pri 7-harmonskem toku 18,5 %, pri 11-harmonskem toku 11,5 ter pri 13-harmonskem toku 9,7 %.

Za dimenzioniranje sesalnega kroga je zatorej izhajati predvsem iz potreb po jalovi energiji ali jalovi moči osnovne frekvence potrošnikov; preko te je lahko že dokončno definirana kapacitivnost kompenzacijske baterije. To lahko spremenimo zelo močni posamezni višje harmonski tokovi lastnih potrošnikov ali pa celo višje harmonski tokovi, ki prihajajo preko magistralnih napajalnih vodov v sesalni krog kompenzacijske naprave.

**Sesalni krog in mreža**

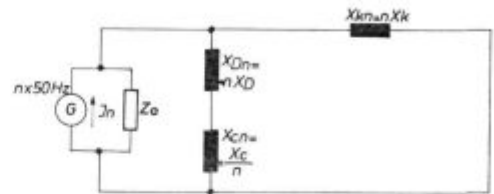
Zaradi jasnosti smo posamezne elemente sesalnega kroga in mreže skupno prikazali na sl. 10 za razmere, kakršne nastajajo pri višje harmon-

skih tokovih, katerih izvor je generator G. Z mnogokratnikom višje harmonskih tokov n se posamezne upornosti spreminjajo:

upornost mreže  $X_{Kn} = n \cdot X_K$

upornost dušilke  $X_{Dn} = n \cdot X_D$

upornost kompen. baterije  $X_{Cn} = \frac{X_c}{n}$



Slika 10

Nadomestna shema napajalnega omrežja, potrošnikov in kompenzacijske naprave s sesalnim krogom

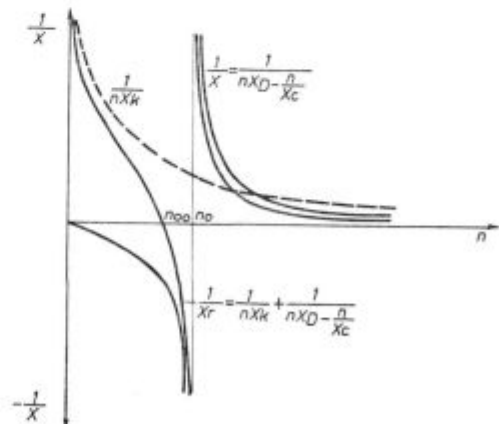
Fig. 10

Substitution scheme of the feeding line, consumers and the suction circuit as a compensator

Serijska vezava upornosti dušilke in kapacitivne upornosti kompenzacije lahko izrazimo z nadomestno upornostjo:

$$X'_n = nX_D - \frac{X_c}{n}$$

Ta pa nastopa v paralelni vezavi z upornostjo mreže. Te razmere so v odvisnosti od n prikazane na sl. 11, kjer se jasno vidi, da je nadomestna ali skupna prevodnost vseh nastopajočih elementov za resonančno frekvenco neskončna. Novi moment, ki nastopa pri obračunu z upoštevanjem elementov sesalni krog in mreža, pa je prav tako razviden iz sl. 11: pri določeni frekvenci  $n_{\infty}$  postane prevodnost sistema nič, oz. upornost neskončna. To pa pomeni, da se bodo vsi morebitni višje harmonski tokovi v okolici  $n_{\infty}$  močno ojačali in tako ojačani tekli v mrežo. Pri projektira-



Slika 11

Prevodnost omrežja — sesalni krog v odvisnosti od frekvence

Fig. 11

Conductivity of the line-suction circuit system depending on the frequency

nju torej ni dovolj spoznati razmere v resonanci, temveč so nevarne razmere za višje harmonske tokove onih frekvenc, ki so nižje od resonančne.

Iz zgoraj nakazanega obračuna nadomestne vezave elementov po sl. 10 se da izraziti razmerje:

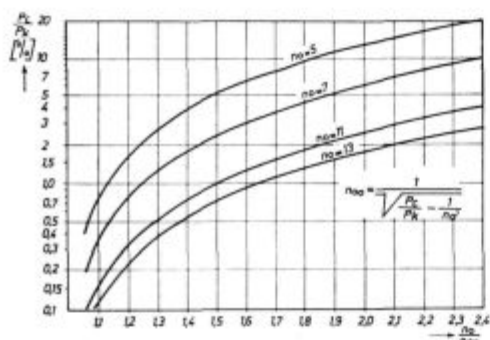
$$\frac{X_k}{X_r} = \frac{n P_c/P_k}{\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - 1} + \frac{1}{n}$$

kjer so:  $X_r$  — nadomestna upornost sistema  
 $n_0$  — mnogokratnik resonančne frekvence

Iz pogoja za  $X_k/X_r = 0$  lahko dobimo frekvenco  $n_{oo}$ , pri kateri je prevodnost sistema nič:

$$n_{oo} = \frac{1}{\sqrt{P_c/P_k + \frac{1}{n_0^2}}}$$

Ta odnos je prikazan na sl. 12. Iz znanih  $n_0$  in  $n_{oo}$  lahko ugotovimo, pri katerem razmerju  $P_c/P_k$  dobimo kritično območje. Na pr.: imamo sesalni krog za 7-harmonsko ( $n_0 = 7$ ); v omrežju nastopajo tudi izraziti 5-harmonski tokovi. Kritično območje za 5-harmonske ( $n_{oo} = 5$ ) bo pri razmerju  $P_c/P_k = 2\%$ .



Slika 12

Korelacije pogojev, ob katerih je upornost sistema mreža — sesalni krog neskončna

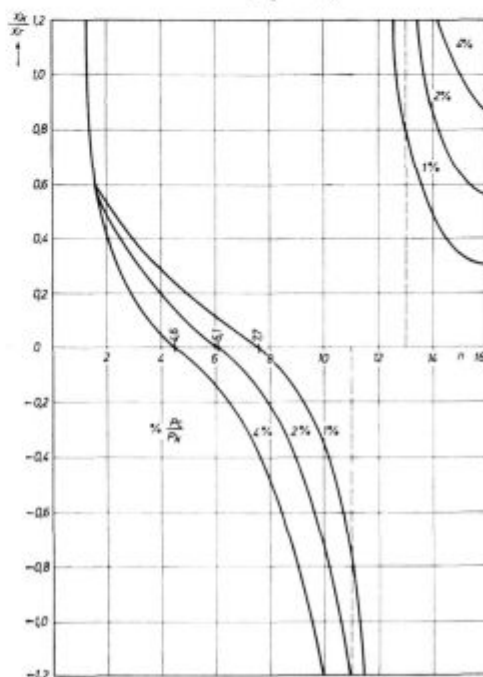
Fig. 12

Correlations of conditions that the resistivity of the line — suction circuit system is infinite

Analiza razmer celotnega sistema pa se ne more zadovoljiti samo z določitvijo ene karakteristike, na pr. z določitvijo  $n_{oo}$ . Na sl. 13 je prikazan potek  $X_k/X_r$  za  $n_0 = 12$  za različne  $P_c/P_k$ . Iz poteka je razvidno, da se z večanjem moči kondenzatorske baterije  $P_c$  ali z padanjem kratkostične moči omrežja ( $P_k$ ) zmanjšuje kritična frekvenca  $n_{oo}$  in se širi resonančno območje. Vidimo, da nam velike kompenzacijske moči, oz. majhne kratkostične moči v sistemih, kjer nastopa več višje harmonskih tokov, ne bodo povzročale težav. Prav tako je na dlani rešitev za take sisteme, kjer imamo več višje harmonskih tokov, namreč, da je najprej potrebno zgraditi sesalni krog za najnižji nastopajoči višje harmonski tok (npr.: 5), naslednja stopnja v izgradnji bo šele sesalni krog za naslednjo harmonsko (na pr. 7).

Razmerje med vsiljenim višje harmonskim tokom ( $I_n$ ) in višje harmonskim tokom, ki ga absorbira omrežje ( $I_{kn}$ ), smo za enostaven primer že izrazili v prvem poglavju. Na izvajanju tega poglavja tj. na upoštevanju vseh nastopajočih elementov, se to razmerje da izraziti:

$$\frac{I_n}{I_{kn}} = \frac{X_k \cdot n}{X_r} = \frac{P_c/P_k}{1 - \frac{1}{n_0^2}} + 1$$



Slika 13

Prevodnost sistema omrežje — sesalni krog za  $n = 12$

Fig. 13

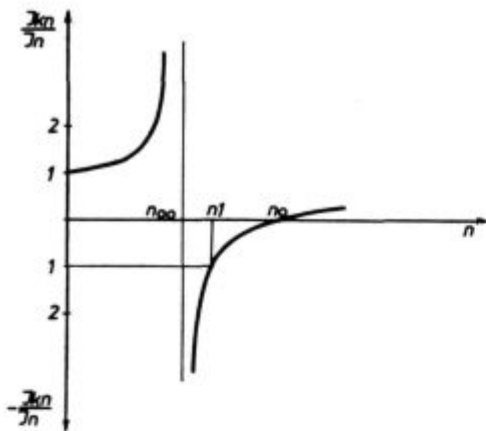
Conductivity of the line — suction circuit system for  $n = 12$

Enačba sama ne pove dosti, njena funkcija, ki je prikazana na sl. 14 pa ima določene značilnosti. Jasno je vidno, da je za višje harmonske tokove višjega reda od  $n_0$  razmerje  $I_{kn}/I_n$  manjše od 1, kar pomeni, da se ti višje harmonski tokovi z vgradnjo sesalnega kroga za frekvenco  $n_0$  slabijo. Iz slike je tudi razvidno, da mejne vrednosti ne predstavlja  $n_0$ , niti  $n_{oo}$ , temveč tisti harmonski tok ( $n_1$ ) imenujemo ga kritični harmonski, pri katerem je razmerje  $I_{kn}/I_n = 1$ . Pri harmonskih tokih, ki so manjšega reda, dobimo ojačenje teh harmonskih tokov v omrežju, za one pa, ki so večji od  $n_1$ , pa slabljenje.

Iz prejšnje enačbe sledi izraz za kritični mnogokotnik višje harmonskega toka

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{0,5 P_c/P_k + \frac{1}{n_0^2}}}$$

Iz sl. 14 je ponovno razvidno, zakaj gradimo najprej sesalni krog za višje harmonski tok najnižjega reda. Z določenimi pogoji lahko nastanejo



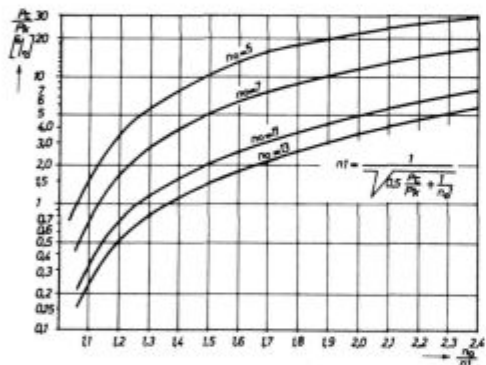
Slika 14

Razmerje med omrežnim višje harmonskim tokom in vsiljenim višje harmonskim tokom za sistem omrežje — sesalni krog

Fig. 14

Ratio between the line harmonic current and the imposed harmonic current for the line — suction circuit system

namreč okoliščine, v katerih bi lahko za harmonski tok najnižjega reda nastopile ojačitve v omrežju. Če ugotovimo, da je ta tok frekvenčno višji od  $n_1$ , ni bojazni za ojačitev. Slika funkcije za  $n_1$  je prikazana na sl. 15.



Slika 15

Korelacija pogojev, ob katerih nastopa slabljenje omrežnih višje harmonskih tokov za sistem omrežje — sesalni krog

Fig. 15

Correlation of conditions that line harmonic currents are minimized in the line — suction circuit system

Jačanje višje harmonskih tokov, ki imajo svoje izvore pri potrošnikih, na omrežni strani, ni samo kritično zaradi povečanja prenosnih izgub, deformacije napetosti, slabšanja faznega faktorja, povzročanja motenj, itd., ampak ima lahko direktno posledico, t.j. povečanje obremenitve kompenzacijskih kondenzatorjev.

Ojačani višje harmonski tokovi so posledica paralelnega nihajnega kroga med sesalnim krogom, ki je za te nižje harmonske tokove postal kapacitiven, in mrežo, ki je v vsakem primeru induktivna. Tokovi se večajo in odštevajo tako, da je razlika med tokom iz omrežja in tokom skozi kompenzacijsko baterijo enaka vsiljenemu toku:

$$I_n = I_{kn} - I_{cn}$$

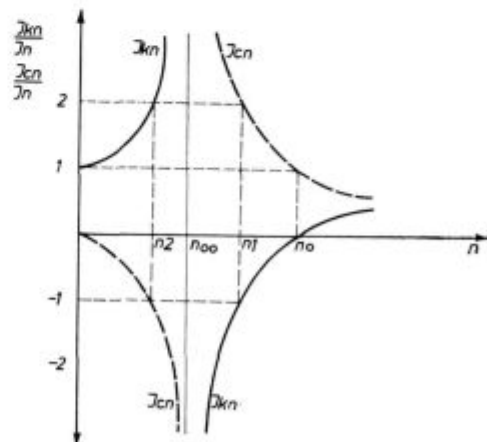
Tok skozi kompenzacijsko baterijo se da izračunati iz tele relacije:

$$\frac{I_n}{I_{cn}} = \frac{1}{n_o^2 - n^2} + 1$$

Tudi iz te enačbe si lahko izračunamo karakteristično vrednost za  $n$ , pri kateri postane tok skozi baterijo večji od generiranega višjega harmonskega toka:

$$n_2 = \frac{1}{\sqrt{2 P_c/P_k + \frac{1}{n_o^2}}}$$

Na sl. 16 so ponovno prikazani višje harmonski tokovi, ki jih povzroči vsiljeni tok  $I_n$  na omrežni strani ( $I_{kn}$ ) in na kondenzatorski strani ( $I_{cn}$ ). Vidimo, da se za vse primere višjih harmonskih tokov, katerih frekvenca je večja od kritične vrednosti  $n_1$ , mrežni in kondenzatorski tok zmanjšata ( $I_{kn}/I_n < 1$ ,  $I_{cn}/I_n < 2$ ). Njeni vrednosti sta za frekvenci večje od  $n_o$  pozitivni. V primeru resonance ( $n_o$ ) je višje harmonski tok v omrežju nič ( $I_{kn} = 0$ ), kajti vsega absorbira sesalni krog ( $I_{cn} = I_n$ ). Pri harmonskih tokovih z nižjimi frekvencami od  $n_o$  se smer omrežnega toka ( $I_{kn}$ ) obrne. Pri potrošnikih generirani višje harmonski tok povzroči pritikanje toka te frekvence iz omrežja. Pri frekvencah, manjših od  $n_1$ , je ta višje harmonski tok večji od generiranega. Dobimo torej ojačanje omrežnega toka! Istočasno se krepi tudi višje harmonski tok skozi kondenzatorsko baterijo, saj je tudi zdaj razlika teh dveh tokov generirani višje harmonski tok. Pri frekvenci  $n_{oo}$  je ta okrepitev višje harmonskih tokov ( $I_{kn}$ ,  $I_{cn}$ ) neskončno. Pri frekvenci  $n_2$  dobimo kondenzatorski tok, ki je enak generiranemu ( $I_{cn} = I_n$ ), omrežni tok pa je seveda tudi dvojne vrednosti ( $I_{kn} = 2 I_n$ ). Pri frek-



Slika 16

Omrežni in kondenzatorski višje harmonski tokovi za sistem omrežje — sesalni krog.

Fig. 16

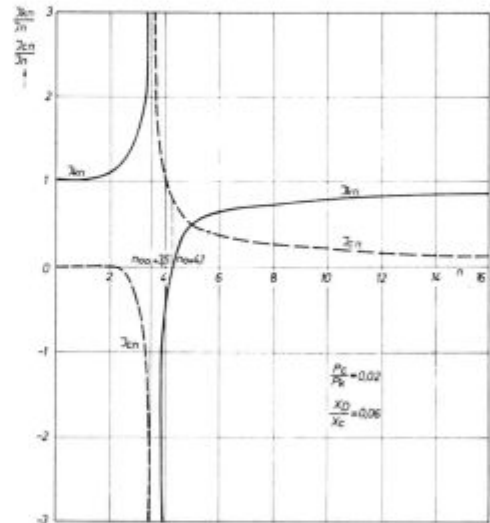
Line and condenser harmonic currents for the line — suction circuit system

vencah manjših od  $n_{\infty}$  se obrneta tudi smeri obeh višje harmonskih tokov:  $I_{kn}$  teče v omrežje,  $I_{cn}$  pa iz kondenzatorske baterije.

Sesalne kroge za posamezne frekvence je potrebno graditi po vrsti nastopajočih višjih harmonskih: najprej za 5, nato 7 itd. Tudi vklapljati jih je v takem vrstem redu, izklapljati pa v obratnem. Ni pa potrebno vedno graditi sesalnih krogov za vse nastopajoče frekvence: v določenih pogojih lahko sesalni krog uporabimo za dva sosednja harmonska tokova, na pr. s tem, da zgradimo za 11- in 13-harmonski tok sesalni krog z resonančno frekvenco  $n = 12$ . Iz sl. 16 je razvidno, da bomo dobili v omrežju oba toka (11 in 13) močno oslABLJENA, vendar le s pogojem, da bo kritična frekvenca  $n_1$  manjša od 11. Na sl. 17 so prikazane izračunane vrednosti za tak primer, iz katerih je razvidno, da lahko sesalni krog  $n = 12$  uporabimo vedno, razen če ni razmerje  $P_c/P_k$  pod 0,25 %, torej skoraj v vseh primerih. Iz sl. 17 pa je tudi razvidno, da je tak sesalni krog nevaren v primeru, če imamo v omrežju nastopajoči 5- ali 7-harmonski tok.

Na osnovah tega poglavja bomo glede na delovanje že opisane zaporne dušilke ugotovili, da do-bimo zaradi njene visoke upornosti ( $X_D/X_C = 0,06$ ) nizko resonančno frekvenco ( $n_0 = 4,1$ ) ter npr. za  $P_c/P_k = 0,02$  nizko kritično frekvenco  $n_1 = 3,8$ . Vidi se, da imajo vsi višji harmonski tokovi ki nastopajo v omrežju, višjo frekvenco od kritične in zato ne more priti do nikakršnih ojačan-j teh tokov. Opisane razmere so prikazane na sl. 18,

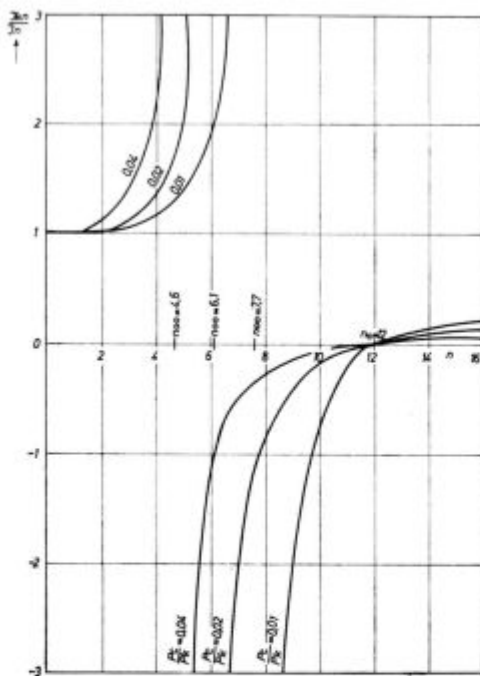
kjer se vidi, da zaporna dušilka razdeli tokove višjih harmonskih frekvenc na omrežje ( $I_{kn}$ ) in na kondenzatorsko baterijo ( $I_{cn}$ ) ter jih zmanjšuje v vsakem primeru, in to tako, da je njih vsota enaka toku izvora ( $I_n$ ).



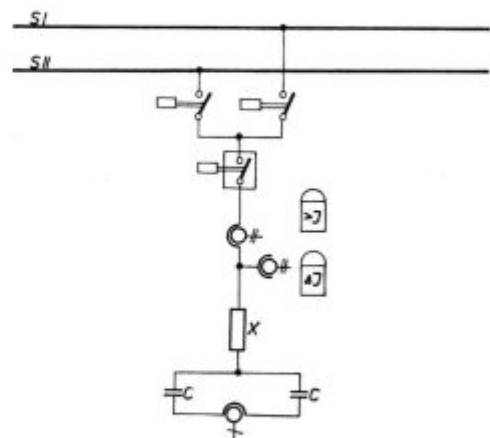
Slika 18  
Tokovne razmere pri zaporni dušilki  
Fig. 18  
Current conditions at the blocking choke

**Gradnja sesalnega kroga**

Sesalne kroge gradimo običajno za visokonapetostno, oz. sredjenapetostno kompenzacijo napetosti od 5 kV do 35 kV. Shema celotne naprave je prikazana na sl. 19, kjer se vidi, da je sesalni krog priklopljen na klasično opremljeno visokonapetostno celico z ustrezno močnim stikalom ter pretokovnimi zaščitnimi napravami. Dušilka je običajno zgrajena kot zračna dušilka za notranjo ali zunanjo montažo. Važno je, da ima ustrezno kratkostično trdnost, ker je njena kratkostična napetost običajno nizka — kot že omenjeno — od-

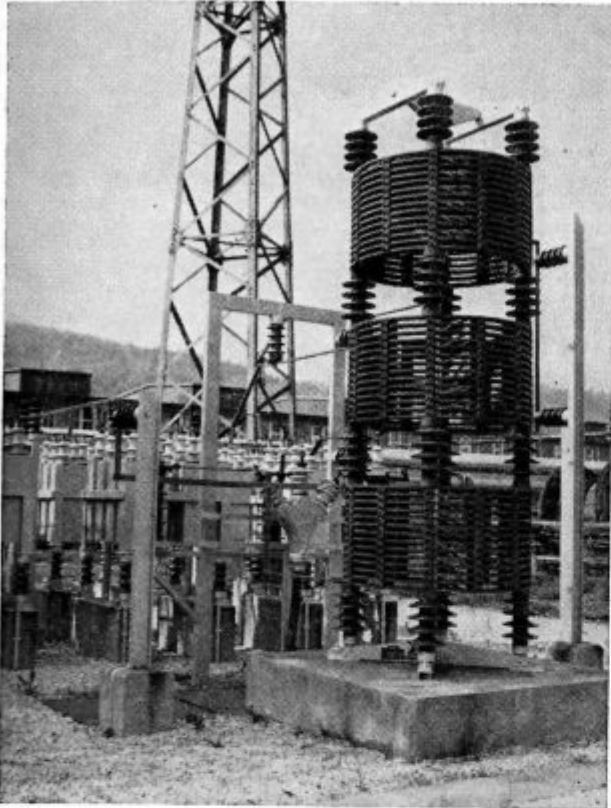


Slika 17  
Omrežni višje harmonski tokovi za sistem omrežje — sesalni krog za  $n = 12$   
Fig. 17  
Line harmonic currents for the line — suction circuit system for  $n = 12$



Slika 19  
Visokonapetostna kompenzacijska naprava s sesalnim krogom  
Fig. 19  
High tension compensator with suction circuit

visna od frekvence višjeharmonskega toka ter moči kondenzatorske baterije. Visokonapetostne kondenzatorje razdelimo v dve v zvezdo vezani skupini; v posamezni fazi, odvisno od napetosti



Slika 20

Kompensacijska naprava Zelezarne Ravne 2400 kVAr 20 kV s sesalnim krogom za 250 Hz (projekt in izvedba IMP Ljubljana)

Fig. 20

Compensator, 2400 kVAr — 20 kV in Ravne Ironworks, with 250 c. p. s. suction circuit (Engineering and construction by IMP, Ljubljana)

imamo lahko tudi več zaporednih kondenzatorjev. Običajno izberemo kondenzatorsko napetost nekaj višjo od nazivne, saj bomo del kondenzatorske moči potrebovali poleg osnovne frekvence še za moč, ki jo bomo dobili iz višjeharmonskega toka resonančne frekvence. Če izberemo n. pr. za sesalni krog za ( $n = 5$ ) 15 % višjo napetost kondenzatorjev, odpade od tega 4 % na povečano napetost na kondenzatorjih zaradi pred njimi vgrajene dušilke in nam ostane za povečanje moči le 11 % napetosti. Dejansko pomeni to 11 % povečanje napetosti 21 % zmanjšanje moči osnovne frekvence: kompensacijske moči bomo torej dobili le 79 %, 21 % jo imamo rezervirane za višje harmonske tokove. Tako nizko izrabo kompensacijske naprave bomo seveda redko predvideli, raje bomo izkoristili možnosti preobremenitve kompensacijskih kondenzatorjev. Kondenzatorje smo razdelili v dve v zvezdo vezani skupini zaradi lažjega nadzora in zaščite celotne naprave. Oba zvezdišča kondenzatorjev namreč povežemo preko tokovnega (napetostnega) transformatorja in nanj priključimo zaščitno napravo. To nam registrira tudi zelo majhne nesimetrije med obeh zvezdama, če pride do poškodb posameznih elementov kondenzatorjev.

#### LITERATURA

1. Leistungsfaktorbesserung durch Kondensatoren, W. Kafka, H. Reizuch, Siemens-Zeitschrift 5/1953
2. Verbesserung des Leistungsfaktors und Herabsetzung von Oberschwingungen durch Siebkreise, N. Hofmann; Elektrizitätswirtschaft 6/1957
3. Siebkreise zur Verbesserung des Leistungsfaktors bei Stromrichteranlagen, M. Hofmann; Siemens-Zeitschrift 4/1957
4. Oberschwingungen in Niederspannungsnetzen, F. Bieger; Siemens-Zeitschrift 8/1975
5. Vprašanje napetosti in kompenzacije v železarstvu, J. Bratina, Energetika u crnoj metalurgiji, Sisak 1971
6. Elektroenergetske instalacije v industriji, J. Bratina; Posvetovanje o električnih instalacijah, Radenci 1975

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Blindleistungkompensationsanlagen sind meistens als Kondensatorbatterien ausgelegt. Solange wir nur mit den Strömen der Netzfrequenz zu tun haben, verursacht uns der Einbau der Kondensatoren in ein elektroenergetisches System keine Schwierigkeiten. Wegen der generierten höheren harmonischen Ströme, welche von den derzeitigen Abnehmern wie Gleichrichteranlagen oder Lichtbogenöfen verursacht werden, kann für die Ströme aus der parallelen Bindung der Netzinduktivität und der Kondensatorkapazität ein paralleler Schwingungskreis entstehen. Dieser verursacht eine Stärkung von den Abnehmern (oder aus dem Netz) eingedrückten höheren harmonischen Stromes einer Resonanzfrequenz sowohl im Netz wie durch die Kondensatorbatterie. Die Entstehung solcher ungünstiger Verhältnisse kann auf zwei Arten gelöst werden: mit einer Sperrdrossel, welche den höheren harmonischen Strömen den Weg durch die Kondensatorbatterie verhindert, oder mit einer Saugdrossel, welche einen Serienresonanzkreis für einen bestimmten höheren harmonischen Strom

bildet und für welchen der Widerstand dieses Kreises sehr klein ist.

In beiden Fällen wird vor die Kondensatorbatterie eine Drossel eingebaut, welche zugleich auch als Einschalt-drossel dient. Im ersten Fall ist die Drossel grösser und muss so dimensioniert sein, dass die hintereinander gebundene Induktivität der Drossel und Kondensatorkapazität für alle auftretenden höheren harmonischen Ströme der Verbraucher einen induktiven Widerstand bedeuten. So kann dieser resultierende Induktivwiderstand mit der Netzinduktivität keinen neuen parallelen Schwingungskreis bilden. Im Falle eines Saugkreises ist für dessen Resonanzfrequenz der Kreiswiderstand gleich Null; der gesamte höhere harmonische Strom dieser Frequenz wird deshalb in den Saugkreis einlaufen. Für Frequenzen die höher sind als die Resonanzfrequenz wird der Saugkreis ein Induktivwiderstand, in diesen Fällen wird der Saugkreis mit der Netzinduktivität nicht einen parallelen Schwingungskreis bilden können. Für Frequenzen die

niedriger sind als die Resonanzfrequenz wird der Saugkreis ein Kapazitätswiderstand, welcher unter bestimmten Bedingungen mit der Netzinduktivität einen neuen parallelen Schwingungskreis bilden wird. Dieser würde wieder eine Gefahr für die Stärkung der höheren harmonischen Ströme dieser neuen Resonanzfrequenz darstellen. Um diese Gefahren zu umgehen, werden die Saugkreise für Frequenzen gebaut, der Reihe nach wie sie auftreten: zuerst für 5, dann für 7 u. s. w. Unter bestimmten Bedin-

gungen kann ein Saugkreis auch für zwei benachbarte Frequenzen gebaut werden. Zum Beispiel Saugkreis für  $n = 12$  für höhere harmonische Ströme mit  $n = 11$  und 13.

Im Artikel sind die Beziehungen der einzelnen Parameter des elektroenergetischen Systemes analytisch dargestellt, so dass es bei dem Bau oder der Exploatierung der Kompensationsanlagen möglich ist mit den richtigen Eingriffen die Gefahren auszuweichen und der Kompensation eine volle Betriebsleistung zuzusichern.

## SUMMARY

Reactive power is most often compensated by a bank of condensers of a certain capacity. Dealing with current of basic — line frequency, inserting condensers into electro-energetic system does not represent difficulties. Due to harmonic currents caused by consumers like rectifiers and electric arc furnaces, a parallel oscillating circuit with these currents appears in a parallel connection with the line conductivity and condenser capacity. This causes the increased harmonic current, imposed by consumers (or from the line), of a resonant frequency in the line and through the bank of condensers. Such unfavourable conditions can be solved in two ways: by a blocking choke which prevents harmonic current to flow through the bank of condensers, or by a suction choke which creates a serial resonant circuit for a certain harmonic current and for which the resistance of this circuit is very low. In both cases, simultaneously also a starting choke is built before the bank of condensers. In the first case, this choke is bigger and of such dimensions that the series of the choke capacity and of the condenser capacity represent an inductive resistance for all the harmonic currents of consumers. Thus the resulting inductive resistance cannot form an new parallel oscillating circuit with the

line inductivity. When a suction circuit is in question, the circuit resistance for its resonant frequency is zero: the total harmonic current of this frequency will flow into the suction circuit. In frequencies higher than the resonant one, the suction circuit will represent an inductive resistance, and in such a case the suction circuit will not create a parallel oscillating circuit with the line inductivity. In frequencies lower than the resonant one, the suction circuit will represent a capacitive resistance which could form a parallel oscillating circuit with the line inductivity in certain conditions. In order to avoid the new danger of the increased harmonic currents of the new resonant frequency, the suction circuits are constructed for the frequencies in the order of their appearance: at first for 5, then for 7, etc. In special conditions the suction circuit can be constructed also for the two neighbouring frequencies: e. g. the suction circuit for  $n_s = 12$  for the harmonic currents with  $n = 11$  and 13. The paper presents analytically and graphically relationships of single parameters in the electro-energetic system that the compensation can be prepared in the correct way and that it will function with a high efficiency.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройства для компенсации реактивного (безваттного) тока обычно представляют собой батареи конденсаторов определенной емкости. Если речь идет только о токах основной сетевой частоты, тогда включение конденсаторов в электроэнергетические системы не связано с какими-либо затруднениями. Однако такими потребителями тока, какими теперь являются например выпрямительные устройства и электродуговые печи, генерируются токи высших гармоник. При параллельном подсоединении к сети конденсаторов индуктивность и емкость дают параллельный колебательный контур. При этом как в самой сети, так и в конденсаторной батарее токи гармоник, исходящие от потребителя (или от сети) усиливаются вследствие резонансного эффекта.

Из такого неблагоприятного положения выход можно найти двояким способом: или встроить заградительный дроссель, который воспрепятствует прохождению токов высших гармоник сквозь конденсаторную батарею, или же подсоединить поглощающий дроссель, который создаст последовательный резонансный контур для определенных гармоник при минимальном сопротивлении самого контура. В обоих случаях перед конденсаторной батареей подсоединяется дроссель, который в то же время выполняет и роль пускового дросселя.

В первом случае дроссель побольше. Он должен быть рассчитан так, чтобы связанные в последовательную цепь дроссель и конденсаторы образовали индуктивное сопротивление для всех появляющихся высших гармоник. Суммарное индуктивное сопротивление этого контура не может при этом привести к обра-

зованию нового параллельного колебательного контура совместно с сетевой индуктивностью.

Во втором случае (поглощающий контур) сопротивление контура при резонансной частоте равно нулю: ток гармоники резонансной частоты, следовательно, полностью поглощается поглощающим контуром. При наличии гармоник с высшей, в сравнении с резонансной, частотой поглощающий контур будет представлять собой индуктивное сопротивление, причем он не в состоянии образовать параллельный колебательный контур совместно с индуктивностью сети. А в случае появления частоты ниже резонансной поглощающий контур сыграет роль емкостного сопротивления, которое в определенных условиях образует совместно с индуктивностью сети новый параллельный колебательный контур. Последний может вызвать опасность усиления токов высших гармоник этой новой резонансной частоты. С целью избежать такой опасности поглощающие контуры встраиваются из расчета на появляющиеся частоты в порядке их появления: сначала для 5-й, затем для семикратных и т. д. Для определенных конкретных условий поглощающий контур можно встраивать и для двух соседних гармоник, например для  $n = 11$  и 13 при  $n_s = 12$ .

Взаимозависимость отдельных параметров электроэнергетической системы в статье иллюстрируется аналитически и графоаналитически. При производстве и использовании компенсационных устройств можно на этой основе избежать опасности и обеспечить полный эффект компенсации.

# Tehnične novice

## V. Internacionalna konferenca o vakuumski metalurgiji in električnem pretaljevanju v München-u (ZRN) 11. do 15. oktober 1976

B. Koroušič, M. Dobovišek, J. Rodič

### 1. UVOD

Namen V. internacionalne konference v Münchenu je bil, da nadaljuje s tradicijo, ki se je začela s 1. konferenco iz leta 1964. Sestanek ekspertov iz celega sveta je izredna priložnost, da se izmenjajo mišljenja in rezultati na področju vakuumske metalurgije in sekundarnih rafinacijskih postopkov. Diskusija je zajela tako praktične kakor tudi teoretične aspekte tega zelo perspektivnega področja.

Področje električnega pretaljevanja pod žlindro je vključeno v konferenco zaradi tesne tehnične povezanosti z analognimi procesi. Posebna pozornost je posvečena reševanju problemov na tem področju tudi zaradi naraščajočega interesa v rafinaciji pomembnejših neželeznih kovin.

Na posvetovanju je bilo prečitano okoli 60 predavanj, ki so zajela naslednja področja:

1. Fizikalno-kemični procesi v vakuumski metalurgiji,
2. Vakuumska obdelava tekočega jekla,
3. Vakuumska obdelava tekočih neželeznih kovin z vključno vakuumsko destilacijo,
4. Talilni in pretaljevalni procesi pod vakuumom,
5. Analogni procesi in toplotna obdelava v vakuumu,
6. Fizikalno-kemični problemi EPŽ-procesa,
7. Karakteristike EPŽ-naprav in tehnološke izkušnje,
8. Izdelava težkih kovaških odkovkov po EPŽ-postopku,
9. Ekonomski aspekti in avtomatizacija EPŽ-procesa,
10. Procesni modeli in metode, vakuumsko-metalurških procesov.

Vsa navedena poglavja na konferenci niso bila seveda enakovredno obdelana, kar je tudi razumljivo glede na obseg predavanj in časovne omejitve. Predavanja bodo v celoti objavljena od organizatorja v obliki »proceedings«, tako, da se v tem poročilu lahko omejimo le na najpomembnejša izvajanja.

V. internacionalne konference v Münchenu se je udeležilo okoli 200 ekspertov iz 26 dežel (ZDA, SSSR, ZRN, Avstrije, Francije, ČSSR, Japonske, Italije, Anglije, Švice, Švedske itd.). Organizacijo kongresa je zelo uspešno izpeljala firma Leybold-Heraeus GmbH & Co. KG iz Hanau, ZRN pod vodstvom prof. M. Wahlster.

### 2. NAJPOMEMBNEJSI DOSEŽKI NA PODROČJU VAKUUMSKE METALURGIJE

**W. Kurz** je v svojih izvajanjih opozoril na veliki pomen sekundarnih faz (kot so: nekovinski vključki in pare) na plastične lastnosti kovin in zlitin. Tvorba sekundarnih faz je na splošno ozko povezana z mehanizmom strjevanja zlitin. Dendritna morfologija in faktorji, ki določajo porazdelitev faz v končni fazi strjevanja igrajo pomembno vlogo pri študiju plastičnosti in so predmet številnih raziskav.

**K. Lange, Institut für Eisenhüttenkunde, Tech. Hochschule, Aachen** je obdelal pomembno področje kinetike izmenjave vodika in dušika med plinsko fazo in tekočim železom v vakuumu in pri preprihanju tekočega jekla z argonom. Z uporabo Sievertsove metode je določil koefi-

ciente masnega prenosa  $K_H$  in  $K_N$  v binarnih, tekočih zlitinah Fe-Cr, Fe-Mn, Fe-Ni in Fe-Si.

Zelo zanimivo je bilo predavanje **H. Jacobi** z **Max-Planck Instituta, Düsseldorf** o prenosu toplote med ingotom in kokilo med litjem železa v vakuumu in različnih plinskih atmosferah. Rezultati laboratorijskih preiskav so pokazali, da je kvaliteta litega ingota zelo močno odvisna od vrste uporabljene atmosfere, kar avtor povezuje z vplivom plinov na površinsko medfazno napetost med kokilo in tekočo talino.

O mehanizmu odtranjevanja in koagulacije oksidnih vključkov pri vakuumski obdelavi jekla sta poročala dva avtorja: **M. Kepka s sodelavci (Škoda, Plzen, ČSSR)** in **G. Zahs s sodelavci (Vacmetal GmbH, Duisburg, ZRN)**. V prvem predavanju je bilo govora o mehanizmu nastanka oksidnih vključkov pri vakuumskem litju kovaških ingotov teže 48 do 71 ton za 4 različne kvalitete jekla z 0,2 do 0,85 % C legirana s Mn, Ni, Cr, Mo in Zr. Rezultati teh preiskav so pokazali, da je sestava oksidnih vključkov v strjenem jeklu v konsistenci s sestavo žlindre in produkti dezoksidacije. G. Zahs in sodelavci so izdelali matematični model, ki sloni na kompliciranem statističnem vrednotenju z uporabo energije disipacije. Numerična izračunavanja za več znanih vakuumskih procesov pod različnimi pogoji so potrdila veljavnost uporabljenega modela.

**G. Maas s sodelavci** je opisal delovanje 150 tonske RH-vakuumske naprave v jeklarni Thyssen, Henrichshütte AG in podal nekatere rezultate vakuumske obdelave LD-talini. Naprava je konstruirana za kapaciteto okoli 70.000 t jekla mesečno in je opremljena z dodatnim kisikovim tokom (pretok 1500 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/h) za obdelavo nerjavnih jekel.

Zanimivi so tudi rezultati **H. Nashiva** in **T. Nagahata (Wakayama Works of Sumimots Metal Industries, Japan)**, o najnovejših dosežkih pri tehnologiji DH-postopka. Njihovi rezultati so npr. pokazali, da natančnejša kontrola temperature preboda (v mejah  $\pm 10^\circ\text{C}$ ) občutno prispeva k boljši kontroli vsebnosti aluminija v obdelanem jeklu.

Za proizvodnjo visoko-legiranih jekel (npr. nerjavnih jekel) je prav gotovo zanimiva aplikacija BV-procesa (Fried. Krupp Hüttenwerke AG) o katerem sta poročala **J. Berve, W. Hallemeir, G. Stolte**. Postopek se deli v nekaj sekvenc, pri čemer se izkorišča ogrevanje taline v loncu (z električno energijo — obločno ali s kemično energijo — kisikov, vakuumski rafinacijski sistem). Vakuumiranje jekla se izvaja lahko preko curka (sistem lonec — lonec), kar je zelo primerno za izdelavo jekel pri katerih se izvaja odžveplanje preko vpihavanja kalcija. Pri BV-procesu je dana možnost avtomatičnega legiranja jekla.

Podobne izkušnje pri uporabi vakuuma so podali **Kaiser, G** in **A. Eggenhofer (Vereinigte Edelmetalle AG, Ternitz — Avstrija)**. Postopek je znan v literaturi in ga zato ne bomo posebej predstavljali.

Kot zadnje predavanje iz področja vakuumske obdelave tekočega jekla je imel **G. Patelsky s sodelavci (Thyssen Edelmetalle AG, Witten, ZRN)**. S posebno vgrajenim senzorjem (kisikova sonda) je vršena meritve parcialnega pritiska kisika v plinih pri vakuumski obdelavi jekla v 50 tonski VOD — napravi. Dobljeni rezultati so pokazali,

da obstaja direktna zveza med  $pO_2$  v plinih in hitrostjo razogljčenja jekla. Poskusi so zelo natančno pokazali, da je pri VOD-postopku zelo pomemben vpliv vpihavanja argona. Zanimivi so tudi rezultati termodinamičnih izračunavanj v cilju določevanja kritične vsebnosti ogljika pri vakuumski obdelavi nerjavnih jekel (začetek »odgora« kroma).

### 3. NAJPOMEMBNEJSI DOSEŽKI NA PODROČJU ELEKTRIČNEGA PRETALJEVANJA POD ŽLINDRO (EPZ-POSTOPEK)

Uvodno predavanje prof. K. Schwerdtfegerja je orisalo nekatere osnovne probleme iz teorije EPZ-procesa. Teoretični model, ki ga je le omenil avtor odpira široke možnosti pri študiju vodika v jeklu, »odgora« titana v nerjavnih jeklih in pdb. Zlasti zanimivi so poskusi merjenja električne prevodnosti žlindre pri različnih frekvencah toka.

Prof. T. El Gammal in G. Pateisky sta podala rezultate laboratorijskih in industrijskih poskusov uporabe žlindre tipa  $CaO-Al_2O_3$  na mesto standardnih  $CaF_2$  — žlinder. Čeprav kvaliteta površine ingotov ni bila povsem zadovoljiva, sledi iz industrijskih poskusov ugotovitev, da žlindre tipa  $CaO-Al_2O_3$  lahko v nekaterih primerih nadomestijo standardne EPZ-žlindre.

Matematični model toke žlindre in kovine pri EPZ-postopku, ki sta ga podala prof. J. Szekely in A. H. Dilawari (Massachusetts Institute of Technology, ZDA) daje dokaj nazorno sliko tokovnih dogajanj v žlindrini in kovinski kopeli. Toda, enako kot pri vseh dosedanjih modelih, avtorji izhajajo iz zelo poenostavljene slike EPZ procesa, kar nekoliko zmanjšuje vrednost dobljenih rezultatov.

V predavanju W. Thomasa (Leybold-Heraeus) o vplivu elektrode in posebej elektrodnega konusa na tehnološke značilnosti EPZ-peči je podana teoretična analiza EPZ-procesa z električnega stališča. Zaradi številnih predpostavk na katerih sloni model je vrsta vprašanj o veljavnosti izpeljanih odvisnosti.

Venal, W. V., H. J. Klein, E. W. Kelley, K. L. Love (Cabot-Stellite in US Air Force Moter. Labor.) so podali rezultate izdelave votlih ingotov (508 OD  $\times$  254 OD mm) iz jekla 4330 Mod. Preiskave makro in mikrostrukture, morfologija in porazdelitev nekovinskih vključkov ter meritve in interpretacija medendritnih razdalj so pokazale, da ima lita struktura votlih ingotov vrsto prednosti v primerjavi z standardnimi ingoti.

Analogne preiskave s EPZ-ingoti premera  $\varnothing$  400 do  $\varnothing$  760 mm iz istega jekla so pokazale, da se žilavost pretaljenega jekla bistveno ne spreminja s stopnjo kovanja, razen v začetni fazi (1:1), ko se opaža močan padec.

O tehnoloških značilnostih najnovejše 50 tonske EPZ peči v Thyssen Henrichshütte sta poročala L. Rohde in D. Lohr. Peč je zgrajena na sodobnih principih (tehnika zamenjave elektrod, dvizna kokila, čistilne naprave za pline itd.). Premer ingotov se giblje med  $\varnothing$  600 in 1340 mm in max. višina 4,5 m. Možna je tudi izdelava slabov: 650  $\times$  1320 mm. Zelo zanimivi so podatki o izkoristkih: elektroda — EPZ ingot: 95–98 %, EPZ-ingot — odkovk: 94 % v poprečju. Avtorja sta posebej poudarila pomen obvladovanja metalurških reakcij pri pretaljevanju jekel, kar velja zlasti za kontrolo aluminija.

Lherbier, L. V., F. M. Richmond (Cyclop Corporation, ZDA) sta obravnavala zelo pomembno področje in sicer primerjavo lastnosti 12 % Cr nerjavnega jekla izdelanega po vakuumskem obločnem postopku (VAR) in po EPZ-postopku.

Njihovi rezultati so potrdili dosedanje empirične ugotovitve, da VAR-postopek ugodno vpliva na nižjo vsebnost plinov in oligoelementov medtem ko EPZ občutno izboljšuje čistočo jekla, daje boljše površino ingota in s tem večje izkoristke pri nadaljnji predelavi. Iz zaključkov sledi, da EPZ ni primeren za vse vrste specialnih jekel, čeprav avtorja priznavata, da je pri tem dokaj neraziskano področje optimalne tehnologije pretaljevanja.

Do analognih zaključkov so prišli tudi Ballantyne, A. K., A. Mitchell in R. J. Kennedy (Teledyne-Allvac, ZDA), ki so še bolj poudarili vpliv tehnoloških parametrov na kvaliteto pretaljenega jekla.

Nishiwaki, M., T. Yamaguchi, M. Koba (Nippon Steel Co. Japonska) so poročali o izkušnjah pri delu z veliko, bifilarno EPZ-napravo za izdelavo slabov, kakor tudi o kvaliteti izdelanih slabov in debele pločevine (dimenzije slabov 510  $\times$  2400  $\times$  4200 mm = 40 ton, 510  $\times$  1900  $\times$  3800 mm = 29 ton, 300  $\times$  1900  $\times$  3800 mm = 17 ton). Peč ima 5600 kVA, monofazna A. C. = 60 Hz., 4 elektrode z dvojno bifilarno tehniko, dvizni kristalizator. Praktične izkušnje so pokazale veliki vpliv tehnologije taljenja na makro-segregacije (V-segregacije), zlasti pomemben je vpliv sekundarnega hlajenja. Zelo pereč problem predstavlja prenos vodika iz zračne atmosfere v jeklo, kar so dokaj uspešno rešili z uporabo kontrolirane plinske atmosfere ( $N_2 + O_2$ ) nad žlindro.

Izdelava valjev za toplo in hladno valjanje predstavlja že dalj časa zelo zanimivo področje za EPZ-postopek. Jäger, H., Ch. Kubisch (Vereinigte Edelmetallewerke, Avstrija) sta poročala o izboljšanju lastnosti valjev za hladno predelavo, izdelanih po EPZ-postopku. Avtorja sta posebno pozornost posvetila ekonomski analizi (primerjava konvencionalno in po EPZ-izdelani valji). Iz zaključkov sledi, da poleg izboljšane mikrohomogenosti treba posebej poudariti povečanje življenjske dobe valjev za 20–40 % v enakih delovnih pogojih. EPZ-valji so manj občutljivi na tvorbo razpok kar uporabniki valjev navajajo kot največjo prednost.

Prof. Medovar (Paton inštitut za varilno tehniko — SSSR) je opozoril na zelo ugodne rezultate, ki se dobijo pri uporabi elektrod litih iz LD-kvalitet jekel. Legiranje osnovne taline med taljenjem je mogoče izvršiti na standardni način z dodatki v žlindro, ali preko pomožne elektrode. Oba načina legiranja imata znatne prednosti v primerjavi z legiranjem osnovne taline v LD-konvertorju, ker se dosežejo boljši učinki in ugodnejša porazdelitev legirnih elementov.

O izdelavi 12 % Cr nerjavnega jekla (za rotorje modernih, visoko-turažnih parnih turbin) preko EPZ-tehnologije so poročali Kühnelt, G., A. Diebold, Th. Skamletz, E. Krainer (Vereinigte Edelmetallewerke, Avstrija). EPZ-ingoti,  $\varnothing$  1000 mm so bili izdelani pod žlindro  $CaF_2-Al_2O_3-CaO$  pri čemer je uporabljena specialna tehnika za pretaljevanje in in dezoksidacijo, ki omogoča kontrolo vsebnosti Al pod 0,01 %. Po kovanju ingota na ustrezne dimenzije ( $F_0/F = 3,6$ ) in primerni toplotni obdelavi so mehanske preiskave pokazale zelo ugodne lastnosti (visoke vrednosti 0,2 meje in ugodna žilavost).

Izdelava velikih kovaških ingotov predstavlja velik problem in vse razvite tehnologije iščejo še vedno optimalne rešitve. V zadnjem času je bilo veliko govora o treh principiellno različnih metodah, ki pa vse izkoriščajo EPZ-postopek kot osnovo:

1. Izdelava EPZ-ingotov v preničnem kristalizatorju z uporabo več-elektrodnega sistema (tehnika zamenjave elektrod),

2. Izdelava EPZ-ingota z uporabno kokilo, tki. MHKW-postopek pri čemer kot kokila služi večji votli ingot, katerega jedro natalimo z porab. elektrodo.

3. Kombinacija klasičnega litja z EPZ-tehniko, tki. BEST-postopek, pri katerem se zapolnitev »glave« ingota izvrši z nataljevanjem porabne elektrode.

O prvi metodi so izčrpno poročali A. Choudhury, R. Jauch, H. Löwenkamp (Stahlwerke Röchlting - Burbach, ZRN). Izdelava velikih kovaških ingotov, premera do 2300 mm predstavlja nedvomno največji uspeh na področju EPZ-tehnologije. Procesne značilnosti so pri tako velikih presekih toliko specifične, da zahtevajo maksimalne parametre taljenja, optimalno izbiro žlindre, preprečitev reakcij med žlindro in plinsko fazo itd. Obvladanje toplotnih in na splošno energetskih parametrov je posebej poudarjeno pri tem postopku. Zaradi dendritne rasti je struktura zelo homogena v primerjavi z konvencionalno, litimi



ingoti. Gostota litega jekla (26 Ni Cr MoV 11 5) doseže po celem preseku vrednosti  $7,84 \text{ g/cm}^3$ . Čistoča glede nekovinskih vključkov je izredno visoka, kar je pogoj za visoke mehanske lastnosti jekla.

Isti avtorji so podali tudi zelo zanimive rezultate o izdelavi 30 tonskih EPZ-ingotov iz jekla 12 %Cr za rotorje ( $\varnothing 1000 \text{ mm}$  in dolžina  $5000 \text{ mm}$ ). Dobljeni so odlični rezultati glede mehanskih lastnosti za diske in rotorje turbin. Ultrazvočne preiskave rotorjev so pokazale, da ni notranjih napak in makrosegregacij. Tudi vsebnost deltaferita je občutno nižja kot pri konvencionalno izdelanih ingotih.

Predavanje **R. Schumann-a (Leybold-Heraeus)** je služilo kot dopolnilo in je dalo dodatne informacije o tehnologiji izdelave velikih EPZ-ingotov.

**W. Austel, Ch. Maidron** sta opisala tehnološke značilnosti novega MHKW-procesa in pretaljevalne naprave v Klöckner-Werke-Osnabrück (ZRN). Dobljeni rezultati kažejo, da je s to tehnologijo mogoče izdelati visoko-kvalitetne EPZ-ingote največjih dimenzij. Glede na dejstvo, da je postopek šele pred kratkim dosegel industrijsko zrelost je še vrsta vprašanj, ki so vezani na tehnologijo taljenja.

Z naraščajočo velikostjo ingota naraščajo tudi težave glede vsebnosti nekovinskih vključkov (zlasti v »nogi« ingota), segreg, ogljika, žvepla, fosforja in kisika. BEST-postopek o katerem so poročali **Machner, P., H. Jäger, G. Kühnelt, E. Plöckinger (Vereinigte Edelstahlwerke, Avstrija)**

predstavlja kombinacijo klasičnega litja in EPZ-postopka. Postopek je v literaturi že dovolj poznan zato ga ne bomo ponovno predstavljali.

Zanimiva je predvsem primerjava ekonomskih pokazateljev med BEST in EPZ-postopkom. Primerjava je izvršena na jeklu za rotorje (NiCrMoV) — teža ingota 22 ton. Analiza je pokazala, da stroški izdelave ingota po BEST-postopku znašajo le 1/3 tistih za EPZ-ingot. Izkoristki so pri kovanju za 70 % nižji pri BEST, kot pri konvencionalno izdelanem jeklu. Avtorji so poudarili, da je BEST-postopek, posebej zanimiv za izdelavo zelo velikih kovaških ingotov in glede na dejstvo, da je oprema za ta postopek veliko cenejša kot pri analogni EPZ-napravi je treba temu postopku tudi pri nas posvetiti večjo pozornost.

Peta konferenca o vakuumski metalurgiji in električnem pretaljevanju pod žlindro v Münchenu, ZRN je ponovno pokazala, da je internacionalna izmenjava raziskovalnih dosežkov na področju procesne tehnike in reševanja številnih metalurških problemov edina možna in ekonomsko upravičena pot. Izredno visoke stroške za raziskave je danes mogoče občutno znižati le z povezovanjem in transferom znanja. Vedno večje zahteve porabnikov specialnih jekel in zlitin narekujejo uporabo novih postopkov, katerih izbira, optimizacija in racionalizacija zahteva visokostrokovno znanje, pri čemer je informiranost strokovnjakov, ki delajo na teh področjih eden od ključnih pogojev.

# KV 35 - novo jeklo za kvalitetne vijake

Anton Razinger

## 1. Splošno o jeklu

Jekla za kvalitetne vijake in matice uvrščamo v perspektivni program kvalitetnih jekel Železarne Jesenice. Proizvodnja teh jekel naj bi dosegla cca 6000 ton. Potrebe po jeklih za kvalitetne vijake in matice so na jugoslovanskem tržišču zelo velike, potrošniki jekel pa so skoraj v celoti vezani na uvoz.

Glede na zahtevane trdnosti lastnosti vijakov se za izdelavo kvalitetnih vijakov uporabljajo plemenita ogljikova in nizkolegirana jekla. Po podatkih analize tržišča se v Jugoslaviji največ jekla za kvalitetne vijake porabi za izdelavo vijakov trdnostnega razreda 8.8 (DIN 267 blatt 3—1967). Standardizirani vrsti ogljikovih nelegiranih jekel Cq 35 in Cq 45 (DIN 1654—1954) ne ustrezata popolnoma zahtevam sodobne tehnologije izdelave vijakov trdnostnega razreda 8.8, in sicer zato, ker jeklo Cq 35 nima zadostne kaljivosti, jeklo Cq 45 pa ima visoko preoblikovalno trdnost.

Za izdelavo vijakov trdnostnega razreda 8.8 se v Zapadni Evropi vse bolj uveljavlja plemenito srednjegljično jeklo s povišano vsebnostjo Cr, ki združuje dobro kaljivost in preoblikovalnost v hladnem. Ta vrsta jekla za kvalitetne vijake ni standardizirana, različni proizvajalci izdelujejo to jeklo s svojimi oznakami (38 Cr 1, C 35 Cr in podobno). Ker področje jekel za kvalitetne vijake tudi v JUS ni obdelano, proizvajamo takšno jeklo tudi v železarni Jesenice pod svojo oznako KV 35 (ime jekla je zaščiteno).

## 2. Zahtevane lastnosti jekla<sup>1</sup>

Da bi iz jekla KV 35 lahko izdelali vijake trdnostnega razreda 8.8, mora imeti to jeklo naslednje fizikalne in tehnološke lastnosti:

a) Jeklo mora biti izvaljano v ozkih dimenzijskih tolerancah (DIN 59115—1968). Površina žice mora biti gladka ter brez površinskih napak, ki bi kvarno vplivale na preoblikovanje vijakov in njihov estetski videz.

b) V dobavnem stanju mora biti jeklo sposobno za plastično preoblikovanje v hladnem do zahtevane stopnje deformacije. Jeklo mora biti homogeno, mikrostruktura jekla pa krogličasti cementit v feritni osnovi.

c) Jeklo mora biti kaljivo v olju [HRC 40 min. do D max. 12 mm.] Predpisane mehanske lastnosti v poboljšanem stanju [ $T_N$  650/670 °C]

$\sigma_m$  80 do 100 kp/mm<sup>2</sup>

$\sigma_v$  min. 66 kp/mm<sup>2</sup>

$\delta_5$  min. 16 %

$\Psi$  min 40 %

HB 235 do 300 kp/mm<sup>2</sup>

( $\rho$  DVM min. 7 kpm/cm<sup>2</sup>)

Za žico v dobavnem stanju je predpisana tudi max. dovoljena globina razogljene plasti (mm) (DIN 1654—tab. 4. 5)

premer žice (mm)	0,09	0,10	0,11	0,12	0,15	0,18
maks. glob. razoglj.	6—7	7—8	8—9	9—10	10—12	12—14

## 3. Pogoji izdelave in obseg kontrole kvalitete jekla

Raziskovalno delo pri osvajanju kvalitete jekla KV 35 je potekalo v tesnem sodelovanju s tovarno vijakov UNIS—TADIV iz Konjice, kjer so bili opravljeni tudi vsi tehno-

loški preizkusi. Na osnovi priporočil iz literature, preiskav tujih vzorcev jekla ter lastnega raziskovalnega dela smo za jeklo KV 35 postavili naslednjo kemično sestavo:

0.34—0.40 % C

0.25—0.40 % Si

0.60—0.75 % Mn

0.30—0.45 % Cr

Postavili smo naslednjo omejitev nečistoč in spremljajočih elementov: 0.035 % S, 0.035 % P ter 0.25 % Cu, 0.025 % Sn, 0.15 % Ni, 60 ppm N

Da bi že inherentno zagotovili pogoje za dobro preoblikovalnost, izdelujemo jeklo KV 35 samo v SM pečeh. Pred vlivanjem talino preprihomo z argonom. Homogenost preverjamo z UZ na polfabrikatih, katerih površina se v celo ti očisti z brušenjem.

Da bi dosegli željene dimenzijske tolerance in kvaliteto površine žice, zahtevamo strogo kontroliran režim vročega valjanja žice. Zeljeno visoko stopnjo sferidizacije cementita ter odsotnost razogljenja na površini dosegamo z izvirno tehnologijo zaščite površine žice in sferoidizacijskega žarjenja v zvonastih žarilnih pečeh.<sup>2</sup> Pred odpremo potrošnikom, preverimo kvaliteto površine s krčilnim preizkusom na vsakem kolobarju na obeh koncih, dosežemo stopnjo sferoidizacije, globino razogljenja ter trdnostne lastnosti pa preverimo pri vsaki žaritvi na treh kolobarjih.

Pri vsaki šarži kontroliramo še kaljivost v olju ter trdnost in žilavost jekla v poboljšanem stanju do premera žice 14 mm. Sposobnost jekla za plastično preoblikovanje občasno preverimo s tlačnim preizkusom v laboratoriju za plastično preoblikovanje na strojni fakulteti v Ljubljani.

## 4. Doseženi nivo kvalitete

Z raziskovalnim delom osvajanja kvalitete in proizvodnje jekla za kvalitetne vijake KV 35 smo pričeli leta 1973. Industrijska proizvodnja je stekla v letu 1975, v letu 1976 smo odpremili 1040 ton jekla (1 žarilna peč), v letu 1977 pa planiramo odpremo 2500 ton (3 žarilne peči).

Dosežena kvaliteta jekla KV 35, oz. zanesljivost kvalitete je razvidna iz statistične analize rezultatov preiskav jekla, izdelanega v letih 1975 in 1976.

Tabela 1—Vsebnost elementov v šaržni analizi

Leto	1976 (n = 33)		1975 (n = 15)	
	$\bar{X}$ (%)	s (%)	$\bar{X}$ (%)	s (%)
C	0.37	0.02	0.36	0.02
Si	0.30	0.06	0.32	0.03
Mn	0.67	0.06	0.67	0.04
Cr	0.38	0.04	0.39	0.04
P	0.015	0.003	0.014	0.004
S	0.028	0.004	0.025	0.005
Cu	0.15	0.02	0.17	0.02
Sn	0.013	0.003	0.015	0.004
N			0.0056	0.0010

Mgr. Anton Razinger, dipl. inž., raziskovalni oddelek Železarne Jesenice

Tabela 2— Mikrostruktura in čistoča jekla

Vrsta preiskav	n	$\bar{X}$	s
st. sferoidizacije (%)	182	92.6	5.4
gl. razogljivenja (mm)	182	0.05	0.02
čistoča po JK <sup>1</sup> A + C	59	1.75	0.34
B + D		1.65	0.21

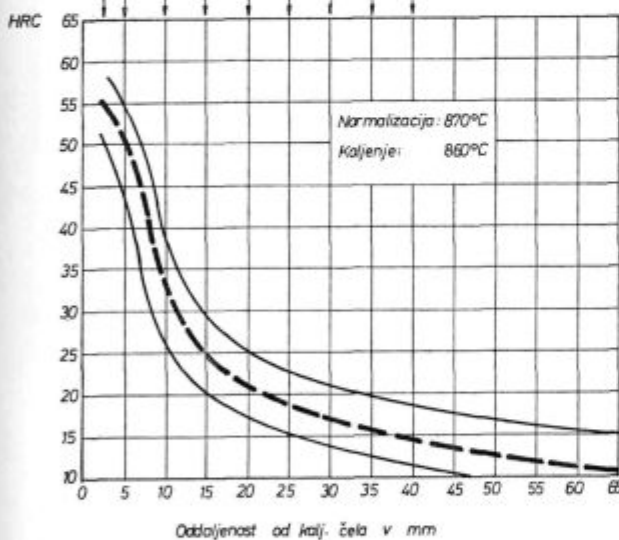
Op 1: vzorci za preiskavo, odrezani iz gredic kv. 135 mm

Tabela 3— Trdnost jekla v dobavnem stanju

Debelina žice	n	$\sigma_m$ (kp/mm <sup>2</sup> )		$\bar{X}\sigma_m$ (kp/mm <sup>2</sup> )	
		X	s	+ 1 s	- 1 s
8 do 9	147	54.7	1.6	56.3	53.1
9.5 do 10.5	151	53.6	1.6	55.2	51.2
12 do 14	68	54.9	1.4	56.4	53.6

KV 35	% C	% Mn	% Cr
	0.35	0.69	0.35

Odgovarajoči premer okroglih palic za isto trdnost na površini odtosno v sredini								Trdnost	Kaljenje
100								Na površini	V vodi
10	26	54	70	86	100	112	124	V sredini	H= 2
7	15	42	58	74	88	100	112	Na površini	V olju
5	10	28	42	54	68	80	90	V sredini	H= 0.4

Slika 1  
Pas garantirane kaljivosti za jeklo KV 35

## Kaljivost jekla:

Območje garantirane kaljivosti, ki je prikazano na sliki 1, je ugotovljeno na osnovi normalne statistične porazdelitve rezultatov preiskav kaljivosti vzorcev 38 šarž po metodi Jominy.<sup>2</sup> (95 % statistična zanesljivost)

Tabela 4— Mehanske lastnosti jekla v poboljšanim stanju (n = 48)

vrsta preisk. <sup>1</sup>	$\bar{X}$	s
$\sigma_v$ (kp/mm <sup>2</sup> )	79.9	3.8
$\sigma_m$ (kp/mm <sup>2</sup> )	88.6	3.3
$\delta_2$ (%)	17.6	1.1
$\Psi$ (%)	63.4	2.2
žilavost povm	15.4	2.4

op<sup>1</sup> Trdnost se nanaša na žico, debeline 10 mm

Vzorci za preiskavo žilavosti, odrezani iz blumov kv. 135 milimetrov

## Sposobnost jekla za preoblikovanje v hladnem:

Karakteristična krivulja tečenja za jeklo KV 35,<sup>1</sup> dobljena s pomočjo diskontinuirnega tlačnega preizkusa, je prikazana v sliki 1

## 6. Zaključek

Za izdelavo vijakov trdnostnega razreda 8.8 smo osvojili plemenito ogljikovo jeklo KV 35. Na osnovi statistične analize rezultatov laboratorijskih preiskav vzorcev jekla iz redne proizvodnje lahko zagotovimo s 95 % statistično zanesljivostjo zahtevane lastnosti jekla:

- odstotnost napak na površini žice
- globina razogljivenja pod dovoljeno mejo
- zahtevana kaljivost jekla v olju  $D \leq 12$  mm
- zahtevane mehanske lastnosti v poboljšanim stanju do premera žice 16 mm
- krivulja tečenja  $k_t = C \phi^2$  za tlačni preizkus z naslednjimi karakteristikami:

C max. = 950 N/mm<sup>2</sup>

n min. = 0.220

 $\phi$ , max. = 1.6

## LITERATURA

- Billigmann, Feldmann: Stauchen und Pressen Carl Hanser Verlag München 1973
- Termička obrada čelika — ing. Jože Rodič, Metalburo Zagreb 1969
- K. Kuzman: Železarski Zbornik 1973, št. 4
- A. Razinger: Železarski zbornik 1969, št. 4

Železarna Jesenice  
Raziskovalni oddelek

### Krivulja tečenja za jeklo KV 35

Jeklo za kvalitetne vijake

Značilna kemična analiza

0.35% C	0.35% Cr	0.039% Al
0.38% Si	0.18% Cu	
0.69% Mn	0.021% Sn	

Mehanske lastnosti

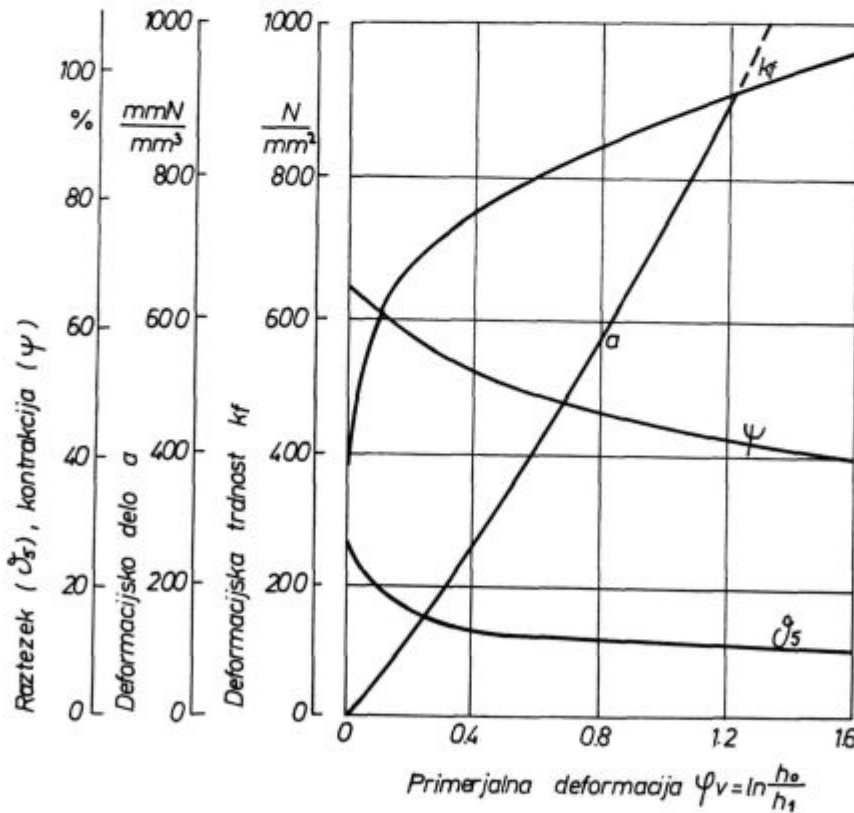
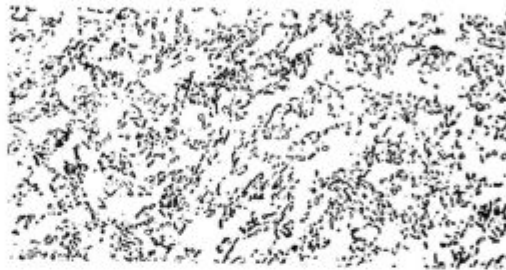
meja raztezanja  
trdnost  
raztezek  
kontrakcija

Sferoidizacijsko žarjeno

$\sigma_v =$	36.2	kp/mm <sup>2</sup>
$\sigma_m =$	55.9	kp/mm <sup>2</sup>
$\delta_5 =$	29.2	%
$\psi =$	68.5	%

Mikrostruktura

pov. 500x



Krivulja izdelana z diskontinuirnim tlačnim preiskusom v laboratoriju za plastično preoblikovanje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani leta 1975

Slika 2

# VSEBINA

UDK: 669.046.552.3:669.787

ASM/SLA: S11, E9q

Metalurgija — jeklarstvo — določevanje kisika  
kisikova sonda

B. Koroušič

**Aplikacija kisikove sonde pri direktnem določevanju vsebnosti kisika v tekočem jeklu**

Železarski zbornik 11 (1977) 1 s 3—12

Elektrokemična metoda (EMN) za določevanje aktivnega kisika v tekočem jeklu se že nekaj let uspešno uporablja pri kontrolirani dezoksidaciji pomirjenih in nepomirjenih jekel.

Opisana je uporabnost EMN metode pri direktnem določevanju vsebnosti kisika v industrijskih pogojih. Podane so osnovne značilnosti merilne aparature in način uporabe. Podrobno so analizirani pogoji, ki vplivajo na natančnost merjenja.

Nakazana je možnost uporabe kisikove sonde pri kontrolirani dezoksidaciji jekla z aluminijem.

Avtorski izveleček

UDK: 620.191.2:669.14.018.821

ASM/SLA: K1a

Jeklo — korozija — jeklo odporno na atmosfersko korozijo — corten  
N. Exel, L. Vehovar

**Korozijska odpornost Corten jekla**

Železarski zbornik 11 (1977) 1 s 37—40

Z domačim in italijanskim »corten« jeklom, ki je odporno na atmosfersko korozijo so se vršili večletni korozijski poskusi v 2 mestnih in 1 podeželski atmosferi. Korozija je bila ocenjevana z izgubo debeline pločevinskih vzorcev, bodisi v metalografskih obruskih, bodisi iz izgube teže. Tuje jeklo je dalo tekom 4 let izgubo debeline 0,14—0,15 mm ob praktični zaustavitvi korozije; domače jeklo, ki je po Cr in P na spodnji meji, pa daje do zaustavitve večje izgube in sicer 0,15 do 0,20 mm; višina izgub je pri tem odvisna od agresivnosti atmosfere in letnega časa začetka izpostave. V podeželski atmosferi so bile izgube domačega jekla le ca. 0,06 mm. Na splošno je višina korozijskih izgub v skladu s tujimi navedbami. Metalografski način določanja izgub debeline daje do 20 % nižje vrednosti kot določanje iz izgube teže.

Avtorski izveleček

UDK: 669.14.018.2:669—153.65

ASM/SLA: AY-n, I24

Metalurgija — deformacija v vročem — mikrolegirano jeklo — normalizacija

F. Vodopivec, M. Gabrovšek, M. Kmetič

**Raziskave vpliva vroče deformacije in izločilnega žarjenja na mikrostrukturo in trdoto mikrolegiranega jekla po normalizaciji**

Železarski zbornik 11 (1977) S 13—28

Izvršeni so bili preiskusi deformacije jekla v temperaturnem intervalu med 1300 in 750° C preiskusi izločilnega ogrevanja in normalizacije. Rezultati kažejo, da dobi jeklo po izločilnem ogrevanju in normalizaciji finejšo in bolj regularno feritno perlitno mikrostrukturo kot po sami normalizaciji. Vpliv izločilnega ogrevanja na normalizirano mikrostrukturo in velikost austenitnih zrn je večji kot vpliv temperature deformacije. V normaliziranem jeklu izločki enako veliki in porazdeljeni ne glede na temperaturo deformacije in ne glede na to, ali je bilo jeklo pred normalizacijo izločilno ogrevano ali ne.

Avtorski izveleček

DK: 621.039.43

ASM/SLA: UJc, W11a

Elektrotehnika — jalova energija  
dušilka

J. Bratina

**Sesalni krog — naprava za kompenzacijo jalove energije in za zmanjševanje višje harmonskih tokov**

Železarski zbornik 11 (1977) 1 s 41—50

Z vgradnjo dušilke predkompenzacijske kondenzatorje se da pri določenih pogojih ustvariti resonančne razmere, ki predstavljajo za določen višje harmonski tok zelo zmanjšano upornost: tak sklop induktivnosti dušilke in kapacitivnosti kondenzatorjev potegne iz napajalnega omrežja ustrezne višje harmonski tok. Na ta način čistimo elektroenergetske sisteme, v katerih se ti tokovi generirajo zaradi vgrajenih usmerniških naprav ali obločnih peč.

V članku so podani konstrukcijski napotki in izvedbe sesalnih krogov, kakršne prihajajo v upoštevanje pri veleodjemalnih električne energije kot so npr. železarne.

Avtorski izveleček

UDK: 669.—124.3

ASM/SLA: F1-67

Metalurgija — hladno preoblikovanje

B. Brežigar, I. Kenda, I. Kodrič, Z. Repič

**Hladno preoblikovanje kovin v industriji avtoelektrike**

Železarski zbornik 11 (1977) S 29—35

Uvedba tehnologije hladnega preoblikovanja v industrijo avtoelektričnih izdelkov je zahtevala intenzivno delo na treh področjih: materiali in toplotna obdelava, orodja in faze izdelave ter površinska priprava. Članek nam poleg opisa tehnologije podaja predvsem nekaj praktičnih izkušenj s tega področja.

Pojavlja se potreba po organiziranem sodelovanju proizvajalcev surovin, izdelovalcev orodij in predelovalcev, ker bi lahko na ta način najlažje premostili začetne težave.

Avtorski izveleček

# INHALT

UDK: 620.191.2:669.14.018.821

ASM-SLA: K1a

Stahl-Korrosion — Wetterfester Stahl — Corten

N. Exel, L. Vehovar

**Die Korrosionsbeständigkeit des Corten Stahles**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 S 37—40

Es sind mehrjährige Korrosionsuntersuchungen mit einem einheimischen und einem italienischem wetterfesten »Corten« Stahl in 2 städtischen und einer ländlichen Atmosphäre durchgeführt worden. Die Bewertung der Korrosion erfolgte durch die Dickenverlustbestimmung der Blechproben oder an den metallographischen Schliffen, oder aus dem Gewichtverlust. Am fremden Stahl ist nach einem vierjährigen Test ein Dickenverlust von 0,14 bis 0,15 mm bei dem praktischen Korrosionsstillstand zu erkennen; an dem einheimischen Stahl, welcher an Cr und P ärmer ist, sind bis zu dem Korrosionsstillstand grössere Verluste und zwar 0,15 bis 0,20 mm zu erkennen. Die Verlustgrösse ist dabei von der Angriffs-lust der Atmosphäre und der Jahreszeit des Auslagerungsanfangs abhängig.

In der ländlichen Atmosphäre betragen die Verluste des einheimischen Stahles nur ca 0,06 mm. Im allgemeinen ist die Höhe der Korrosionsverluste im Zusammenhang mit den Angaben in der Zeitschrift.

Die metallographische Bestimmung des Dickenverlustes ergibt eine bis zu 20 % niedrigere Werte als die Bestimmung nach dem Gewichtsverlustverfahren.

Auszug des Autors

UDK: 669.046.552.3:669.787

ASM-SLA: S11r, E92

Metallurgie — Stahlerzeugung — Sauerstoffbestimmung  
EMK Sonde

B. Koroušič

**Der Einsatz der EMK-Sonde bei der direkten Bestimmung des Sauerstoffgehaltes im flüssigen Stahl**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 S 3—12

Die elektrochemische Methode (EMK) für die Bestimmung der Sauerstoffaktivität im flüssigen Stahl wird schon einige Jahre erfolgreich bei der Kontrolle des Desoxidationsgrades bei den beruhigten und unberuhigten Stählen angewendet.

Die Anwendbarkeit der EMK Methode bei der direkten Bestimmung des Sauerstoffes in Industriebedingungen ist beschrieben. Die Grundeinheiten der Messapparatur und die Art der Anwendung sind gegeben. Im einzelnen sind die Bedingungen, welche die Messgenauigkeit beeinflussen, beschrieben.

Die Möglichkeit der Anwendung der EMK Sonde bei der kontrollierten Desoxydation des Stahles mit Aluminium ist angegeben.

Auszug des Autors

UDK: 621.039.43

ASM-SLA: UJC, W11a

Elektrotechnik — Blindleistung — Drossel

I. Bratina

**Saugkreis-Anlage zur Kompensation der Blindleistung und für die Erniedrigung der höheren harmonischen Ströme**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 S 41—50

Mit dem Einbau einer Drossel vor den Kompensationskondensatoren kann man in bestimmten Bedingungen Resonanzverhältnisse schaffen, welche für einen höheren harmonischen Strom einen sehr kleinen Widerstand darstellen. Eine solche Kupplung der Induktivität der Drossel und der Kapazität der Kondensatoren zieht aus dem Speiseleitungssystem einen entsprechenden höheren harmonischen Strom. Auf diese Weise werden die elektroenergetischen Systeme gereinigt in denen sich diese Ströme wegen der eingebauten Gleichrichter oder Lichtbogenöfen generieren.

Im Artikel werden die Konstruktionsanweisungen und die Ausführungen der Saugkreise angegeben, welche bei Grossabnehmern der elektrischen Energie, wie zum Beispiel Hüttenwerken in Frage kommen.

Auszug des Autors

UDK: 669.14.018.2:669—153.65

ASM-SLA: AY-n, 124

Metallurgie — Warmverformung — Mikrolegierter Stahl  
Normalglühen

F. Vodopivec, M. Gabrovšek, M. Kmetič

**Untersuchungen des Einflusses der Warmverformung und der Ausscheidungsglühung auf das Mikrogefüge und die Härte des mikrolegierten Stahles nach dem Normalglühen.**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 S 13—28

Es sind Versuche der Warmverformung des Stahles im Temperaturintervall zwischen 1300° und 750° C, weiter die Versuche der Ausscheidungsglühung und der Normalglühung durchgeführt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Stahl nach der Ausscheidungs- und Normalglühung ein feineres und regelmässigeres ferritisch-perlitisches Mikrogefüge als nur nach der Normalglühung erhält.

Der Einfluss der Ausscheidungsglühung auf das normalisierte Mikrogefüge und die Austenitkorngösse ist grösser als der Einfluss der Verformungstemperatur. Im normalgeglühten Stahl sind die Ausscheidungen gleich gross. Die Verteilung der Ausscheidungen ist unabhängig von der Verformungstemperatur und davon, ob der Stahl vor der Normalglühung ausscheidungsgeglüht war oder nicht.

Auszug des Autors

UDK: 669.—124.3

ASM-SLA: F1-67

Metallurgie — Kaltverformung

B. Brezigar, J. Kenda, I. Kodrič, Z. Repič

**Kaltverformung der Metalle in der autoelektrischen Industrie**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 S 29—35

Die Einführung der Technologie der Kaltverformung in der Industrie für die Erzeugung der autoelektrischen Teile hat eine intensive Arbeit auf folgenden drei Gebieten verlangt:

1. Das Material und die Wärmebehandlung
2. Werkzeuge und die Arbeitsfolge und
3. Die Oberflächenvorbereitung.

Im Artikel werden neben der Beschreibung der Technologie vor allem einige praktische Erfahrungen aus diesem Gebiet gegeben.

Es zeigt sich das Bedürfnis nach einer organisierten Zusammenarbeit zwischen den Rohstoffherzeugern, der Werkzeughersteller und der Verarbeiter, da nur auf diese Weise die Anfangsschwierigkeiten überwunden werden können.

Auszug des Autors

# CONTENTS

UDK: 620.191.2:669.14.018.821

ASM/SLA: K 1a

Steel-Corrosion-Corrosion resistant steel-Corten steel

N. Exel, L. Vehovar

**Corrosion resistance of Corten steel**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 P. 37—40

Corrosion tests which lasted few years were made with home made and Italian Corten steel (resistant to atmospheric corrosion) in two urban and one countryside atmosphere. Corrosion was estimated by the reduction of the thickness of sheet samples — metallographic determination, evaluation from the weight loss. The thickness of foreign steel was reduced for 0.15—0.15 mm in 4 years when corrosion practically stopped. Home made steel with Cr and P on the lower limit corroded more. Thickness loss was 0.15 to 0.20 mm depending on the aggressiveness of the atmosphere and the season of the beginning of the test. In countryside atmosphere the thickness loss of home made steel was only 0.06 mm. The corrosion losses in generally agree with data given abroad. Metallographic method for determining the reduction of the thickness gives about 20 % lower values than the weight loss method.

Author's Abstract

UDK: 669.046.552.3:669.787

ASM/SLA: S 11r, E 9q

Metallurgy-Steelmaking-Oxygen determination — Oxygen probe

B. Koroušić

**Application of Oxygen probe in direct determination of Oxygen content in molten steel**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 P. 3—12

Electrochemical method (EMF) for determining active oxygen in molten steel is successfully used for controlled deoxidation of killed and semi-killed steel already for some years.

Applicability of EMF method for direct determination of oxygen content in industrial conditions is described. Basic characteristics of the measuring device and the way of use are given. Conditions influencing the accuracy of measurements are analyzed in details. Application of oxygen probe in controlled deoxidation with aluminium is indicated.

Author's Abstract

DK: 621.039.43

ASM/SLA: UJc, W1a

Electrical engineering, Reactive power, Choke

J. Bratina

**Suction circuit — compensating reactive power and minimising harmonic current**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 P. 41—50

Building choke before the compensation condensers can in certain conditions cause resonance which represents a highly reduced resistance for harmonic currents; the combination of the choke inductivity and the condenser capacity sucks a corresponding harmonic current from the line. Thus the electro-energetic systems in which harmonic currents appear due to rectifiers and electric arc furnaces can be cleaned.

The paper presents engineering instructions and the constructions of suction circuits important for great consumers of electric energy like iron and steel works.

Author's Abstract

UDK: 669-14.018-2:669—153.65

ASM/SLA: A y-n, J 24

Metallurgy-Hot deformation-Microalloyed steel-Normalising

F. Vodopivec, M. Gabrovšek, M. Kmetič

**Investigations on influence of hot deformation and precipitation annealing on the microstructure and hardness of micro-alloyed steel after normalising**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 P. 13—28

Steel was deformed between 1300 and 750 °C, precipitation annealed, and normalized. The results show that finer and more regular ferrite-pearlite microstructure is formed after precipitation annealing and normalising than merely after normalising. Influence of the precipitation annealing on the normalized microstructure and the size of austenite grains is greater than the influence of the deformation temperature. In the normalized steel the precipitates are of the same size and similarly distributed regardless of the deformation temperature and irrespective whether steel was precipitation annealed or not before normalising.

Author's Abstract

UDK: 669.—124.3

ASM/SLA: F 1—67

Metallurgy-Cold forming

B. Breziger, J. Kenda, J. Kodrič, Z. Repič

**Cold forming of metals for electrical devices in car industry**

Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 P. 29—35

Introduction of cold forming in this industrial branch demanded intensive work in three fields: materials and heat treatment, tools, and steps of manufacturing and surface treatment. Beside the description of technology some practical experiences in this field are given in the paper.

Organized cooperation between the raw material producers, tool makers, and steel consumers is needed to overcome initial difficulties.

Author's Abstract

# СОДЕРЖАНИЕ

УДК: 669.046.552.3: 669.787  
 АСМ/САА: S 11r, E 9q

Металлургия-сталеплавильное производство-определение кислорода — кислородный зонд.

В. Korošič

**Применение кислородного зонда при непосредственном определении содержания кислорода в расплавленной стали.**  
 Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 с 3—12

Электрохимический метод (ЭХМ) определения активного кислорода в расплавленной стали уже несколько лет успешно применяется при контролируемом раскислении спокойной и кипящей стали.

Описано применение ЭХМ метода при непосредственном определении содержания кислорода в промышленных условиях. Поданы основные характеристики измерительного прибора и способ его употребления. Подробно рассмотрены условия, которые влияют на точность измерения. Указана возможность применения кислородного зонда при контролируемом раскислении стали с алюминием.

Автореф.

УДК: 620.191.2:669.14.018.821  
 АСМ САА: K 1a

Сталь устойчивая против атмосферной коррозии — коррозия-corten.

N. Exel, L. Vehovar

**Коррозионноустойчивость Corten стали.**  
 Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 с 37—40

С домашней и итальянской сталью марки «corten», которая устойчива против атмосферной коррозии, выполнялись несколько лет опыты для определения коррозионноустойчивости этой марки стали при двух случаях влияния городской атмосферы и при одном случае атмосферы в провинции. Критерий для оценки представляет уменьшение толщины жестяных образцов; уменьшение определено при помощи металлографических шлифов или при потере тяжести. Образцы из чужой стали потеряли в течении 4-ех лет 0,14—0,15 мм толщины, при этом коррозия практически прекратилась. При домашней стали с содержанием Сг и Р в нижних пределах, до прекращения действия коррозии потери сравнительно больше, т. е. 0,15—0,20 мм, при чем величина потерь зависит от агрессивности атмосферы и от периода времени начала влияния атмосферы. Потери домашней стали в атмосфере в провинции составляли всего прибл. 0,06 мм. Вообще величина коррозионных потерь согласуется с заграничными показаниями. Металлографическое определение потерь толщины дает результаты, которые прибл. до 20 % ниже от величин полученных определением потери тяжести.

Автореф.

УДК: 669.14.018.2:669—153.65  
 АСМ САА: А у-п, J 24

Металлургия — деформация в горячем состоянии — азотированная легированная сталь — нормализация.

V. Vodopivec, M. Gabrovšek, M. Kmetič

**Исследования влияния горячей деформации и дисперсионного отжига на микроструктуру и на твердость микросплавной стали после нормализации.**  
 Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 с 13—28

Рассмотрены результаты испытания стали на деформацию в темп-ном интервале 1300—750°, также результаты дисперсионного отжига и нормализации. Результаты показали, что сталь после дисперсионного отжига и после нормализации приобретает более тонкую и более правильную ферритоперлитную микроструктуру при сравнении с структурой полученной только при выполнении нормализации стали. Влияние дисперсионного отжига на нормализованную микроструктуру и на величину аустенитных зерен интенсивнее в сравнении с влиянием t-ры деформации. В нормализованной стали выделения по величине одинаковы, одинакового распределения, независимо от t-ры деформации и независимо от того, была ли сталь до нормализации подвергнута дисперсионному отжигу или нет.

Автореф.

УДК: 621.039.43  
 АСМ САА: UJc, W 11a

J. Bratina

**Поглощающий контур — устройство для компенсации реактивного тока и отбора токов гармоник**  
 Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 с 41—50

Если перед компенсационным конденсатором установить дроссель, то при определенных условиях можно создать резонансную обстановку, т. е. свести на минимум сопротивление для тока высших гармоник; при таком сочетании индуктивности дросселя и емкости конденсаторов из сети питания отбирается ток высших гармоник. Таким методом можно из электро-энергетических систем выфильтровывать токи, которые в них генерируются работающими выпрямительными устройствами или электродуговыми печами.

В статье рассматриваются вопросы конструктивного исполнения поглощающих контуров применительно к условиям токо-снабжения крупных электропотребителей, в частности металлур-гических заводов.

Автореф.

УДК: 669.—124.3  
 АСМ/САА: F 1-67

Металлургия — холодная деформация.

В. Brežigar, J. Kenda, J. Kodrič, Z. Repić

**Холодная деформация металлов в промышленности автотракторного оборудования.**  
 Zelezarski zbornik 11 (1977) 1 с 29—35

Введение технологии холодной деформации в промышленно-сти автотракторных изделий требовала интенсивную затрату труда в трех областях: материалы и термическая обработка, инструменты и фазы изготовления и приготовление поверхности изделия.

Кроме описания технологии рассмотрено несколько практических работ из этой области.

Возникает необходимость по организованном сотрудничестве производителей сырья, изготовителей инструментов и выполни-телей переработки, так как совместным сотрудничеством можно лучше всего преодолеть начальные затруднения.

Автореф.



---

Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Clani Jože Rodič, dipl. inž., Viktor Logar, dipl. inž., dr. Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik.

Oproščeno plačila prometnega davka na podlagi mnenja Izvršnega sveta SRS  
— sekretariat za informacije št. 421-1/72 od 23. 1. 1974

Naslov uredništva: ZPSŽ — Zelezarna Jesenice, 64270 Jesenice, tel. št. 81-341  
int. 880 — Tisk: GP »Gorenjski tisk«, Kranj