

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

## VSEBINA

	Stran
Vehovar Leopold — Metalurški inštitut Ljubljana MEHANIZMI DELOVANJA VODIKA V KOVINAH IN VODIKOVA KRHKOST	1
Vodopivec Franc — Metalurški inštitut Ljubljana TOPOLOGJA RASTI REKRISTALIZACIJSKIH ZRN V JEKLU Z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C V RAZPONU TEMPERATURE 700 do 800 °C	13
Bolčina Marjan — Železarna Štore REŠEVANJE STACIONARNEGA IN NESTACIONARNEGA TEMPERATURNEGA POLJA PO METODI KONČNIH ELEMENTOV NA PC RAČUNALNIKI	21
Risteski Ica B. — Železarna Smederevo PRIMENA ERROR FUNKCIJE U DIFUZIONOM HROMIRANJU	25
<b>TEHNIČNE NOVICE</b>	
Vehovar Leopold — Metalurški inštitut Ljubljana LABORATORIJ ZA KOROZIJSKE RAZISKAVE V SLOVENSKIH ŽELEZARNAH — METALURŠKEM INŠTITUTU	29
XLI. POSVET O METALURGIJI IN KOVINSKIH GRADIVIH	35
OSEBNE VESTI	45

LETO 25 ŠT. 1 — 1991  
ŽEZB BQ 25 (1) 1—48 (1991)

## ŽELEZARSKI ZBORNIK

Izdajajo skupno Železarne Jesenice, Ravne, Štore in Metalurški inštitut Ljubljana

### UREDNIŠTVO

**Glavni in odgovorni urednik:** J. Arh

**Uredniški odbor:** A. Kveder, J. Rodič, A. Paulin, F. Grešovnik, F. Mlakar, K. Kuzman, J. Jamar

**Tehnični urednik:** J. Jamar

**Lektor:** R. Razinger

**Prevodi:** A. Paulin, N. Smajić (angleški jezik), J. Arh (nemški jezik), L. Puš (ruski jezik)

**NASLOV UREDNIŠTVA:** Železarski zbornik, SŽ-Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, Yugoslavia

**TISK:** TK Gorenjski tisk, Kranj

### IZDAJATELJSKI SVET:

prof. dr. M. Gabrovšek (predsednik), Železarna Jesenice  
dr. B. Brudar, Iskra, Kranj

prof. dr. V. Čižman, Univerza v Ljubljani

prof. dr. D. Drobnjak, Univerza v Beogradu

prof. dr. B. Koroušić, Metalurški inštitut Ljubljana

prof. dr. L. Kosec, Univerza v Ljubljani

prof. dr. J. Krajcar, Metalurški inštitut Sisak

prof. dr. A. Križman, Univerza v Mariboru

dr. K. Kuzman, Univerza v Ljubljani

dr. A. Kveder, Metalurški inštitut v Ljubljani

prof. dr. A. Paulin, Univerza v Ljubljani

prof. dr. Z. Pašalić, Železarna Zenica

prof. dr. C. Pelhan, Univerza v Ljubljani

prof. dr. V. Prosenc, Univerza v Ljubljani

prof. dr. B. Sicherl, Univerza v Ljubljani

dr. N. Smajić, Metalurški inštitut v Ljubljani

prof. dr. J. Sušnik, Zdravstveni dom Ravne

dr. L. Vehovar, Metalurški inštitut Ljubljana

prof. dr. F. Vodopivec, Metalurški inštitut Ljubljana

Published jointly by the Jesenice, Ravne and Štore Steelworks, and The Institute of Metallurgy Ljubljana

### EDITORIAL STAFF

**Editor:** J. Arh

**Associate Editors:** A. Kveder, J. Rodič, A. Paulin, F. Grešovnik, F. Mlakar, K. Kuzman, J. Jamar

**Production editor:** J. Jamar

**Lector:** R. Razinger

**Translations:** A. Paulin, N. Smajić (English), J. Arh (German), L. Puš (Russian)

**EDITORIAL ADDRESS:** Železarski zbornik, SŽ-Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, Yugoslavia

**PRINT:** TK Gorenjski tisk, Kranj

### EDITORIAL ADVISORY BOARD:

prof. dr. M. Gabrovšek (Chairman), Iron and Steel Works, Jesenice

Dr. B. Brudar, Iskra, Kranj

Prof. Dr. V. Čižman, University of Ljubljana

Prof. Dr. D. Drobnjak, University of Belgrade

Prof. Dr. B. Koroušić, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. L. Kosec, University of Ljubljana

Prof. Dr. J. Krajcar, Institute of Metallurgy, Sisak

Prof. Dr. A. Križman, University of Maribor

Dr. K. Kuzman, University of Ljubljana

Dr. A. Kveder, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. A. Paulin, University of Ljubljana

Prof. Dr. Z. Pašalić, Iron and Steel Works, Zenica

Prof. Dr. C. Pelhan, University of Ljubljana

Prof. Dr. V. Prosenc, University of Ljubljana

Prof. Dr. B. Sicherl, University of Ljubljana

Dr. N. Smajić, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. J. Sušnik, Health Centre, Ravne

Dr. L. Vehovar, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. F. Vodopivec, Institute of Metallurgy, Ljubljana

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 25

LJUBLJANA

MAREC 1991

Vsebina	Inhalt	Contents	Содержание
Stran	Seite	Page	Страница
L. Vehovar <b>Mehanizmi delovanja vodika v kovinah in vodikova krhkost</b> UDK: 620.193.55:539.56:669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm	L. Vehovar <b>Mechanismus der Wasserstoffwirkung Mettalen und die Wasserstoffsprödigkeit</b> UDK: 620.193.55:539.56:669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm	L. Vehovar <b>Mechanisms of hydrogen action and hydrogen embrittlement</b> UDK: 620.193.55:539.56:669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm	L. Vehovar <b>Механизми воздействия водорода в металлах и водородная ломкость</b> UDK: 620.193.55:539.56:669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm
F. Vodopivec <b>Topologija rasti rekristalizacijskih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C v razponu temperature 700 do 800 °C</b> UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53	F. Vodopivec <b>Wachstumstopologie der rekristallisierten Körner im Stahl mit 1,8 % Si, 0,3 % Al und 0,02 % C im Temperaturbereich zwischen 700 und 800 °C</b> UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53	F. Vodopivec <b>Topology of recrystallized grain growth in steel with 1.8 % Si, 0.3 % Al and 0.02 % C in the temperature range 700 do 800 °C</b> UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53	F. Vodopivec <b>Топология роста пекристаллизованных зерн в стали с 1,8 % Si, 0,3 % Al и 0,02 % C в температурном интервале от 700° до 800 °C</b> UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53
M. Bolčina <b>Reševanje stacionarnega in nestacionarnega temperaturnega polja po metodi končnih elementov na PC računalnikih</b> UDK: 536.241:669.046:621.78.012.5:681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k	M. Bolčina <b>Lösung von stationärem und nichtstationärem Temperaturfeld nach der Methode der Endelemente am PC Rechner</b> UDK: 536.241:669.046:621.78.012.5:681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k	M. Bolčina <b>Solving steady and unsteady temperature field by the method of definite elements on the PCs</b> UDK: 536.241:669.046:621.78.012.5:681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k	M. Bolčina <b>Решение стационарного и нестационарного температурного поля по методу конечных элементов на „ПЦ“ вычислителях</b> UDK: 536.241:669.046:621.78.012.5:681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k
Ice B. Risteski <b>Primena ERROR funkcije u difuzionom hromiranju</b> UDK: 519.21:539.219.3:669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr	Ice B. Risteski <b>Anwendung der Error Funktion beim Diffusionschromieren</b> UDK: 519.21:539.219.3:669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr	Ice B. Risteski <b>Application of error function in diffusion chrome-plating</b> UDK: 519.21:539.219.3:669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr	Ice B. Risteski <b>Применение „эррор“ функции в диффузном хромировании</b> UDK: 519.21:539.219.3:669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr
<b>Tehnične novice</b>	<b>Technische Nachrichten</b>	<b>Technical News</b>	<b>Технические новости</b>
L. Vehovar <b>Laboratorij za korozijske raziskave v Slovenskih železarnah — Metalurškem inštitutu</b>	L. Vehovar <b>Vorstellung des Laboratoriums für Korrosionsuntersuchungen im Metallurgischen Institut der Slowenischen Hüttenwerke in Ljubljana</b>	L. Vehovar <b>The laboratory for corrosion testing at the institute of metalurgy is presented</b>	L. Vehovar <b>Представляем вам лабораторию по коррозионным испытаниям в „Словенские железарне“ — Metallургический институт</b>
XLI. Posvet o metalurgiji in kovinskih gradivih	XLI. Metallurgie Symposium in Portorož	XLI. Symposium on Metallurgy in Portorož	41-ый металлургический симпозиум в г. Порторож
Osebnе vesti	Persönliche Nachrichten	Personal News	Личные сведения



9930/050

359583



# ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 25

LJUBLJANA

MAREC 1991

## Mehanizmi delovanja vodika v kovinah in vodikova krhkost

Vehovar Leopold<sup>\*1</sup>UDK: 620.193.55:539.56:669.788  
ASM/SLA: R2, Q26s, EGm

*S ponovnim uveljavljanjem materiala kot »Material Science« in njegovo uporabo v vse bolj zahtevni procesni tehniki, kjer so prisotni agresivni mediji, stopajo v ospredje novi cilji: za povsem določene elemente, vgrajene v različno strojno opremo, s programirano življenjsko dobo in veliko zanesljivostjo se naj uporabljajo natančno določeni materiali, ki so združljivi z okoljem. Takšna združljivost pa je pogosto problematična v primerih delovanja vodika, ki lahko povzroča številne katastrofe. Novejši naporji so usmerjeni v resne raziskave, ki dajejo nove poglede na njegovo delovanje.*

### 1. UVOD

Poškodbe zaradi delovanja atomskega vodika v kovini spadajo v tako imenovane z okoljem povzročene poškodbe, ki so pogosto, vendar ne nujno, podprte z napetostmi v materialu. Tovrstne poškodbe se manifestirajo v specifičnih zlitinah ali določenih skupinah zlitin v različnih oblikah, kot npr. krhko pokanje, upadanje duktilnosti, mehurjavost, nastajanje hidridov itd. Izraz »vodikova krhkost« je bil do nedavnega uporabljen zato, da bi ponazoril vsa delovanja atomskega vodika v kovini, toda tega je sedaj nadomestil splošen izraz »poškodbe zaradi vodika«, katerega masovno producirajo predvsem korozijski pojavi in drugi elektrokemični procesi. Številni krhki zlomi vitalnih delov opreme v procesnih industrijah, aeronavtiki, termo in jedrskih elektrarnah, pri prevozu tekočih plinov itd., so lahko posledica prisotnosti atomskega vodika, ki se sprošča pri elektrokemičnih procesih zaradi delovanja agresivnih medijev na kovino (vodne raztopine kislin organskega ali anorganskega izvora ob pogosti prisotnosti različnih ionov v vlogi pospeševalcev katodnih elektrokemičnih reakcij, pare, kondenzati, odpadne vode, morska voda, raztopine različnih soli, atmosferilije itd.). V mnogih primerih je prisotno vzajemno delovanje napetostne korozije in vodika, pri čemer pa en proces prevladuje nad drugim. Z vodikom podprto napetostno korozijsko pokanje, v katerem je rast razpoke predvsem pogojena z delovanjem vodika v kristalni mreži, je npr. značilno za številna jekla, zlitine na osnovi niklja, za titanove, aluminijeve zlitine itd.

Poškodbe zaradi vodika pa niso le posledica delovanja atomskega vodika, temveč jih lahko povzročata tudi plinasti vodik (H<sub>2</sub>). Vodičenje kovine iz plinaste faze poteka preko različnih stadijev, med katerimi so bistveni

procesi adsorpcije, kemisorpcije in disociacije H<sub>2</sub> molekul v atomski vodik, kajti samo ta je sposoben migrirati v kristalno mrežo kovine. Direktna poškodba s plinastim vodikom torej niso možne. Atomski vodik, ki je migriral v kristalno mrežo kovine, je t.i. »notranji vodik«. Različni mehanizmi delovanja tega pa povzročajo različne oblike poškodb.

Zanimanje za mehanizme delovanja vodika v kovini pa ni le posledica katastrofalnih poškodb različne procesne opreme, temveč zaradi vse bolj pogostega omenjanja plinastega vodika kot pogonskega goriva prihodnosti. Pri njegovi produkciji, uskladiščenju, transportu in uporabi se porajajo številna vprašanja, povezana z vzdržljivostjo oziroma krhkim pokanjem različnih zlitin.

Na poškodbe zaradi vodika pa ne vpliva le okolje in napetost v materialu, temveč je velikost poškodb odvisna od vrste zlitine, njene kemične sestave, kristalne zgradbe, številnih napak v kristalni mreži, med katerimi so najvplivnejše dislokacije, zasedenosti kristalnih ravnin z atomi, medatomarne razdalje, elektronske konfiguracije, načina kristalizacije kovinskega sistema, mikrostrukture, vrste in načina razporeditve ter količine faz oziroma drugih sestavin, stanja površine, trdnostnih lastnosti in žilavosti materiala itd. Takšni problemi z materialom so torej zelo kompleksni. Povezani so z dogajanjem na elektrodnih površinah (če govorimo o korozijskem oziroma elektrokemičnem izvoru vodika kot najbolj razširjeni obliki vodičenja materiala), s procesi migracije atomskega vodika v kovino, transportom v njeni notranjosti in njegovim destruktivnim delovanjem v kristalni mreži.

### 2. KLASIFIKACIJA PROCESOV VODIČENJA

Poškodbe zaradi vodika so različne, ta raznolikost pa je posledica delovanja različnih mehanizmov vodičenja. V tabeli 1 in 2 je podana na novo zasnovana klasifikacija, ki upošteva različne vrste poškodb (pokanje, mehurjavost, tvorba hidridov, znižanje duktilnosti pri nategu itd.) in ne kot dosedaj, ko so bile številne poškodbe izražene z enim samim izrazom — vodikova krhkost. V tabeli so prikazani materiali, ki kažejo občutljivost do določenih vrst poškodb, pogoji, pri katerih se te poškodbe porajajo, izvor vodika in začetna mesta, od koder starta vodičenje. Naveden je tudi mehanizem za vsako vrsto poškodb. Klasična vodikova krhkost je predstavljena v tabeli 1 s kolektivom treh oblik delovanja vodika, kajti mehanizmi teh so tipični za tovrstno krhkost. Ker je klasična vodikova krhkost najvažnejša in predvsem najbolj razširjena oblika med obravnavanimi, bodo v nadaljevanju številni mehanizmi delovanja »notranjega vodika« (atomskega vodika, ki je migriral v kristalno mrežo) osre-

\*1 dr. Leopold Vehovar, dipl. ing. — Slovenske železarne — Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11

\*\* Rokopis prejet: november 1990  
\*\*\* Originalno preključeno: ŽZB 1991/1

**Tabela 1:** Klasifikacija procesov degradacije kovin zaradi delovanja vodika

	Vodikova krhkost zaradi delovanja okolja	Vodikova krhkost Vodikovo napetostno pokanje	Izguba duktil. pri raztezanju
Tipični materiali	Jekla, Ni-zlitine, metastabilno nerjavno jeklo, titanove zlitine	Ogljikova in malolegirana jekla	Jekla, Ni-zlitine, Be-Cu bronji, Al-zlitine
Običajen izvor vodika	Plinasti H <sub>2</sub>	Toplotni procesi, elektroliza, korozija	Plinasti H <sub>2</sub> , elektrokemično navodičenje z atomskim vodikom
Tipični pogoji za vodičenje	Tlak H <sub>2</sub> plina 10 <sup>-6</sup> do 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>  Zaznavno od -100 do 700° C; največja možnost nastajanja pri ca. 20° C. Vrednost napetosti zelo važna — večja krhkost pri nižjih napetostih, na splošno večja krhkost pri zarezanih vzorcih ali tistih z vgrajeno razpoko	Celoten delež vodika od 0,1 do 10 ppm  Zaznavno od -100 do 700° C največja možnost nastajanja pri 20° C. Vrednost napetosti zelo važna — večja krhkost pri nižjih napetostih, na splošno večja krhkost pri zarezanih vzorcih ali tistih z vgrajeno razpoko	Celoten delež vodika od 0,1 do 10 ppm odvisno od tlaka plinastega vodika  Zaznavno od -100 do 700° C; Pojavlja se ne da bi se zaznala napetost tečenja; napetost važen faktor
Začetek poškodbe	Na površini ali v notranosti; inkubacijska doba ni zaznana	Notranji začetek razpok	Na površini in v notranosti, ali samo v notranosti
Mehanizmi	Površinski ali podpovršinski procesi	Notranja difuzija v področja koncentracije napetosti	Površinski ali podpovršinski procesi

dotočeni predvsem nanjo, in sicer v povezavi z vplivi različnih metalurških dejavnikov. Toda oglejmo si še prej različne oblike poškodb!

#### Vodikova krhkost zaradi delovanja okolja

Pojavlja se med plastično deformacijo zlitin, ki so v stiku s plini, ki vsebujejo vodik, ali z mediji, ki povzročajo korozijo, pri čemer pa je stopnja degradacije odvisna od hitrosti naraščanja napetosti. Zmanjšanje mehanskih lastnosti feritnih jekel, nikljevih in titanovih zlitin ter metastabilnih avstenitnih nerjavnih jekel je večje, če je hitrost naraščanja napetosti majhna, tlak vodika pa velik. S tem počasnejšim naraščanjem obremenitve pa je omogočena migracija absorbiranega atomskega vodika na mesta, kjer lahko doseže največjo koncentracijo.

#### Vodikovo napetostno pokanje

Pogosto je omenjeno kot »z vodikom povzročeno pokanje«, pa tudi »statično utrujanje«. Karakteristično za takšne poškodbe so krhki zlomi, in sicer duktilnih zlitin, katerih pokanje povzroča konstantna obremenitev in prisotnost vodika. Najbolj pogosti zlomi nastajajo pri obremenitvah, ki so pod napetostjo tečenja materiala. Mehanizem vodikovega napetostnega pokanja je odvisen od fugativnosti vodika, trdnosti materiala, njegove toplotne obdelave (mikrostrukture), napetosti in temperature. Za mnoga jekla je karakteristična mejna napetost, pod katero se v prisotnosti vodika ne porajajo zlomi. Ta mejna napetost je funkcija trdnostnega nivoja jekla in medija, ki povzroči navodičenje. Splošno lahko trdimo, da mejna napetost (faktor intenzitete napetosti) pada, če napetost tečenja in trdnost materiala naraščata. Vodikovo napetostno pokanje povzroča nastajanje ostrih enojnih razpok, ki niso razvejane, kot je to značilno za napetostno korozijo. Katastrofalno pokanje jekel v medijih s H<sub>2</sub>S pa je eden od posebnih primerov vodikovega napetostnega pokanja.

#### Izguba duktilnosti pri raztezanju

To je ena od najpogostejših oblik poškodbe zaradi delovanja vodika. Njena značilnost je znižanje raztezka in kontrakcije pri nateznem preizkusu. Pojavlja se v jeklih (tudi nerjavnih) in nikljevih, aluminijevih ter titanovih zlitinah, ki so bile v stiku z medijem, ki producira vodik. Ta oblika poškodbe je še posebej značilna za zlitine spodnjega trdnostnega razreda. Velikost zmanjšanja raztezka, in s tem tudi kontrakcije, je funkcija količine absorbiranega vodika.

#### Vodikov napad

Vodikov napad je visokotemperaturna oblika poškodbe, ki je značilna za ogljikova in malo legirana jekla, ki so bila izpostavljena vodikom pri visokih temperaturah in tlakih. Atomski vodik vstopa v jeklo in reagira z raztopljenim ogljikom ali z ogljikom, ki je vezan kot železov karbid:



Pravzaprav H<sub>2</sub> ne reagira neposredno s Fe<sub>3</sub>C, ampak na površini kovine najprej disociira v H, ki difundira v kristalno mrežo. Pri tem nastaja metan (CH<sub>4</sub>), ki zaradi visokega tlaka povzroča v materialu mikro razpoke, mehurnjavost in praznine. Reakcija poteka po enačbi:



Ta proces je tesno povezan s temperaturo in kemično sestavo materiala. Mejna temperatura znaša ca. 220° C (z naraščanjem temperature hitrosti reakcij naraščajo). Legiranje jekel s kromom in molibdenom je v tem primeru dobrodošlo, saj zaradi velike afinitete do ogljika oba elementa tvorita stabilne karbide. Vodikov napad ni značilen npr. za avstenitna nerjavna jekla. Pri ogljikovih in malo legiranih jeklih pa je razširjenost vodikovega napada odvisna od časa izpostavitve pri neki

**Tabela 2:** Klasifikacija procesov degradacije kovin zaradi delovanja vodika

	Vodikov napad	Mehurjenje	Raztrganine, kosmiči, ribja očesa	Mikro-perforacija	Degradacija plastičnosti	Tvorba hidridov
Tipični materiali	Ogljikova in malolegirana jekla	Jekla, baker aluminij	Jekla (izkovki in ulitki)	Jekla (kompresorji)	Železo, jekla, Ni-zlitine	V, Nb, Ta, Ti, Zr, U
Običajen izvor vodika	Plinasti H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S korozija, elektroliza, plinasti H <sub>2</sub>	Para v stiku z raztaljenim jeklom	Plinasti H <sub>2</sub>	Plinasti H <sub>2</sub> ali navodičenje z atomskim vodikom	Vodičenje iz taline z atomskim vodikom, korozija, elektroliza, varjenje
Tipični pogoji za vodičenje	Do 10 <sup>8</sup> N/m <sup>2</sup> pri 200–595° C	Ekvivalent aktivnosti vodika od 0,2 do 1 × 10 <sup>8</sup> N/m <sup>2</sup> pri 0–150° C	Izločanje pri ohlajanju ingotov	2 do 8 × 10 <sup>8</sup> N/m <sup>2</sup> pri 20–100° C	Delež vodika 1–10 ppm (20° C pri železu) pri tlaku H <sub>2</sub> 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> (različne kovine, T > 0,5 od tališča)	Aktivnost plinastega H <sub>2</sub> izražena s tlakom v območju med 10 <sup>5</sup> do 10 <sup>8</sup> N/m <sup>2</sup> mora presegati mejo topnosti pri ca. 20° C
Iniciacija poškodb	Na površini (razogljčenje), vmesne površine karbid-osnova (tvorba metana)	Notranje napake	Notranje napake	Neznano		Notranje napake
Mehanizmi	Difuzija ogljika (razogljčenje), difuzija vodika (nastajanje mehurčkov)	Difuzija vodika; nastajanje in rast mehurčkov, nastajanje pare	Difuzija vodika do praznin, vključkov itd.	Neznano	Adsorbcija na dislokacije, vpliv trdne raztopine	Izločanje hidridov

temperaturi. Zaradi reakcije po enačbi 2 poteka tudi razogljčenje jekla. Površinsko razogljčenje se pojavlja pri temperaturah nad 540° C.

**Mehurjavost**

Mehurjavost je značilna predvsem za zlitine z majhno trdnostjo, v katerih se atomski vodik na nekovinskih vključkih in drugih napakah v materialu spaja v plinaste ga. Visoki tlaki, ki nastajajo pri tvorbi molekulskega vodika povzročajo v mehki kovini mehurje. V običajnem maloogljčnem konstrukcijskem jeklu, ki je bilo izpostavljeno vlažnemu H<sub>2</sub>S ali luženju, pogosto prihaja do takšnih poškodb.

**Mikroperforacija**

Nastanek mikroperforacije je pogojen z velikim tlakom molekulskega vodika pri razmeroma nizkih temperaturah (sobne temperature). S procesi kemisorbcije se tvori atomski vodik, ki prodira v kristalno mrežo. Mikroperforacija se pojavlja predvsem v jeklih. Poškodbe se manifestirajo v obliki mreže drobnih razpok, ki povečujejo propustnost za pline in različne tekočine korodirnih medijev v kovino.

**Raztrganine, kosmičaste razpoke, ribja očesa**

Raztrganine, kosmičaste razpoke in ribja očesa so značilnosti, ki se pojavljajo v izkovkih in ulitkih zaradi atomskega vodika, ki vstopa v talino med procesom pretaljevanja, ko je njegova topnost večja kot v strjeni kovini. Med ohlajanjem taline se topnost atomskega vodika v kovini drastično zniža; izloča se v prazninah in drugih napakah v kristalni mreži, kjer se spaja v plinasti vodik (tako nastajajo ribja očesa v ulitkih). Del tega notranjega

atomskega vodika pa ostaja nevezan in lahko vpliva pri kovanju. Tako so številne kratke in nepovezane notranje razpoke v izkovkih posledica velikih notranjih lokalnih napetosti, ki so nastale z lokalnim zmanjšanjem topnosti vodika in pri njegovem spajanju v molekulski med ohlajanjem izkovka po vroči predelavi. Na prelomni ploskvi se pojavljajo svetle srebrne površine, ki so videti kot kosmiči oziroma raztrganine, ki se enostavno odkrijejo z jedkanjem. Številne razpoke in ribja očesa v zvarih so lahko posledica absorbiranega atomskega vodika med procesom varjenja (vlažne elektrode itd.).

**Tvorba hidridov**

Tvorba hidridov povzroča krhkost v Mg, Ta, Nb, V, U, Th, Zr in Ti ter v njihovih zlitinah, pa tudi v nekaterih manj znanih zlitinskih sistemih. Železo, pa tudi jekla, ne tvorijo hidridov.

**3. TEORIJE VODIKOVE KRHKOSTI IN DRUGIH POŠKODB ZARADI DELOVANJA VODIKA**

Opisane različne oblike poškodb zaradi delovanja vodika kažejo, da ni enovite teorije, s katero bi bilo možno razložiti vsa dogajanja v materialu. Vodikova krhkost in ostale poškodbe so povezane z vrsto različnih teorij oz. mehanizmov, ki vsaka po svoje poskuša interpretirati vsa ta dogajanja po vstopu (absorbiciji) atomskega vodika v kristalno mrežo kovine. Danes sprejete teorije o mehanizmih poškodb zaradi vodika temeljijo na spremembi tlaka v kovini, površinski adsorbiciji, dekoheziji, povečanju ali zmanjšanju plastičnosti, vodikovem napadu in tvorbi hidridov. Čeprav so bile predložene tudi številne druge teorije, pa vendar predstavljajo te le različne izpeljanke iz naslednjih temeljnih teorij:

### Teorija tlaka

To je ena od starejših teorij, ki jo je razvil Zappfe. Ta trdi, da so vodikove poškodbe posledica difuzije atomskega vodika v kovino. Na ugodnih lokacijah, kot so praznine, številne nečistoče, in na drugih notranjih površinah pa se atomski vodik veže v plinasti vodik ( $H_2$ ). Pri tem se sproščajo visoki notranji tlak (ca.  $10^5$  bara), ki zadoščajo, da se tvorijo mikrorazpoke, z njihovo koalescenco pa tudi makrorazpoke. Čeprav je ta mehanizem, ki ga je razložil Zappfe dovolj prepričljiv za nastajanje mehurjivosti (npr. v jeklih in Ni zlitinah pri veliki fugacitivnosti vodika, povzročeni z elektrokemičnim navodičenjem) in upadanja duktilnosti pri raztezanju, pa vendar ne nudi nobene razlage za krhko pokanje v primerih, ko je parcinalni tlak vodika v kovini manjši od 1 bara ali ko so poškodbe posledica vodikovega napetostnega pokanja.

### Adsorpcijska teorija

Ta teorija predlaga t. i. adsorpcijski — Petchev mehanizem, po katerem adsorbirani atomski vodik znižuje površinsko energijo kovine in s tem olajšuje oblikovanje razpoke. Zmanjšanje površinske energije kovine z adsorpcijo vodika na površini v neposredni bližini razpoke pa omogoča lažje napredovanje razpoke, saj je tudi delo, potrebno za zlom, manjše. Vendar pa obstaja precej dokazov proti tej teoriji; bistvena pomanjkljivost je zelo slabo vrednotenje dela, ki je kljub zmanjšanju površinske energije potrebno za zlom. Če je vpliv površinske energije nad delom tako prevladujoč, čemu potem nastajanje nezveznosti razpok, ki so tipične za pokanje v prisotnosti vodika?

### Dekohezijska teorija

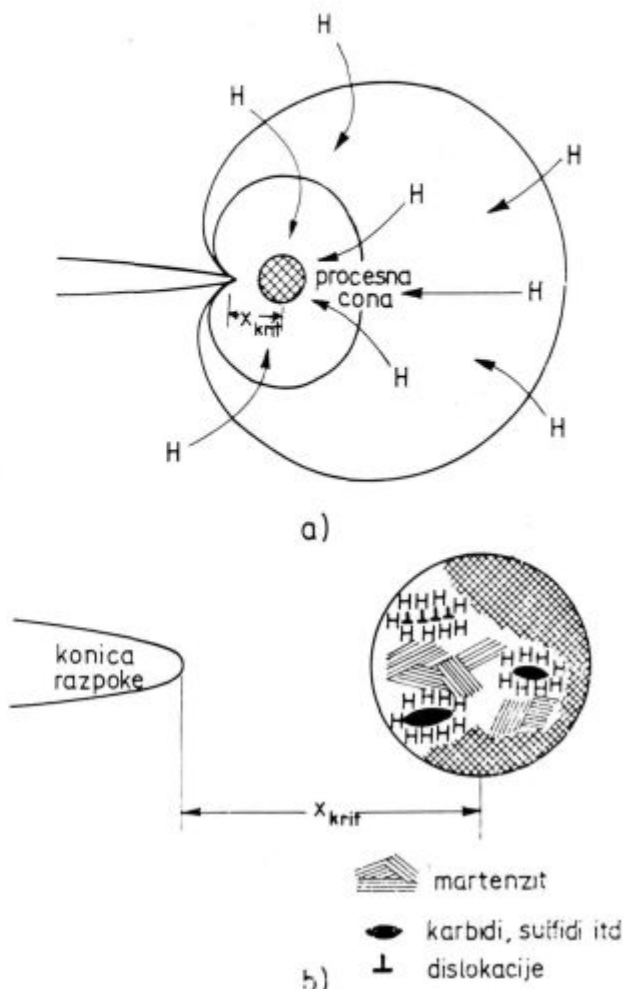
Troianijev dekohezijski mehanizem, ki ga je prevzel in še izpopolnil Oriani, temelji na dejstvu, da atomski vodik slabi vezalno silo med atomi kovine. To je možno na tistih lokacijah, kjer je vodik skoncentriran, to se pravi v področjih triosnega napetostnega stanja po Troianiju oziroma v konici razpoke po Orianiju, kjer je prisotna napetost in številne mikrostrukturne sestavine, ki poleg dislokacij in drugih napak v kristalni mreži tudi omogočajo kopičenje vodika v tem področju (slika 1). Tako je nastanek razpoke, hitrost njenega napredovanja in morfologija prelomne površine razpoke v tesni povezavi s stanjem površine kovine, velikostjo kristalnega zrna, zasedenostjo kristalnih mej z nečistočami, razporeditvijo nekovinskih vključkov in različnih drugih sestavin v matrici.

### Teorija plastične deformacije

Osnova te teorije je vzajemno delovanje atomskega vodika z dislokacijami v konici razpoke. Vodik dejansko omogoča večjo gibljivost dislokacij s tem, da lokalno zmanjša silo, ki je sicer potrebna za njihovo gibanje. Večja gibljivost dislokacij povzroča lokalno zmeščanje materiala v konici razpoke oziroma zmanjšanje napetosti tečenja, kar omogoča lažje napredovanje razpoke. Takšen učinek so ugotovili pri nekaterih jeklih, pa tudi v Ni-zlitinah. V nasprotju s tem pa vzajemno delovanje vodika z dislokacijami v konici razpoke lahko povečuje trdoto in s tem tudi napetost tečenja. Posledica tega so krhki transkristalni ali interkristalni zlomi. Ker napredovanje razpoke omogoča nastajanje novih dislokacij v korenu razpoke, je gonilna sila stalno prisotna.

### Teorija tvorbe hidridov

Po tej teoriji povzročata krhke zlome Nb, V, Ta, Zr, Ti, U in Mg ter njihovih zlitin nastajanje krhke hidridne faze,



Slika 1

Delovanje notranjega vodika v konici razpoke. Interakcija vodika z različnimi sestavinami mikrostrukture je v področju največjih napetosti, ki nastopajo na razdalji  $x_{krit}$ .

Fig. 1

Action of internal hydrogen on the crack point. Interaction of hydrogen with various constituents of microstructure in the region of maximal strains which occur at the distance  $x_{krit}$ .

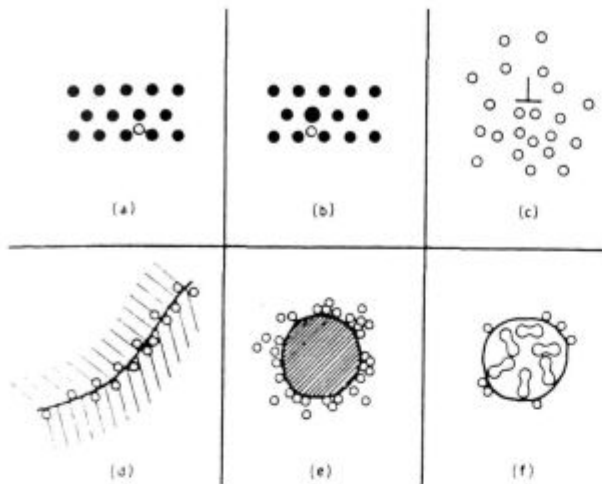
ki je izredno občutljiva na napetosti v materialu. Posledica povečanega volumna hidridne faze so visoki pritiski in deformacija kristalne mreže, kar še dodatno povečuje krhkost.

### Teorija pasti

Eden od temeljnih dejavnikov, ki določa občutljivost Fe-zlitin do poškodb zaradi vodika, se nanaša na fenomen pasti. Pasti, na katere se lahko ujame atomski vodik v kovini, predstavljajo napake v kristalni mreži, številne nečistoče ali določene mikrostrukturne sestavine (slika 2). Na teh pasteh se lahko atomski vodik združuje v molekule (Zappfe mehanizem), večja lokalna koncentracija atomskega vodika pa zmanjšuje vezalno silo med atomi železa (mehanizem Troiano-Oriani) itd.

Študije difuzije atomskega vodika v železu in različnih jeklih so pokazale, da obstaja neka začetna časovna zakasnitev pri merjenju t. i. navideznega poteka difuzije atomskega vodika skozi Fe oz. jekleno membrano, še preden je doseženo stacionarno stanje difuzije. Ta časovna zakasnitev je posledica zasedbe pasti z atomi





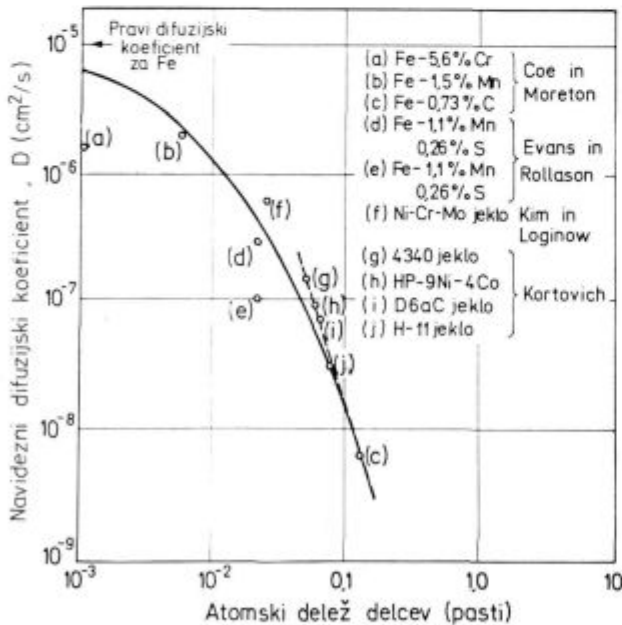
**Slika 2**

Shematski prikaz mest v mikrostrukturi, ki jih lahko zasedejo atomi vodika: a) trdna raztopina, b) v paru s tujim substitucijsko raztopljenim atomom, c) na dislokacijah, d) po mejah kristalnih zrn, e) na vmesni površini vključek — osnova, f) v praznini, kjer se je že spojil v H<sub>2</sub>.

**Fig. 2**

Schematic presentation of areas in the microstructure which can be occupied by hydrogen atoms: a) solid solution, b) in pair with alien substitutionally dissolved atom, c) on dislocations, d) on grain boundaries, e) on the inclusion/matrix interface, f) in vacancy where it is already recombined into H<sub>2</sub>.

vodika. Dejstvo je, da navidezna difuzija vodika v jeklu strmo pada (časovna zakasnitev se povečuje) z naraščanjem koncentracije in značajem pasti (slika 3). Lahko trdimo: hitrost difuzije vodika v kovini, v kateri so prisotne pasti, je funkcija aktivacijske energije pasti, vezalne



**Slika 3**

Zmanjševanje navidezne difuzije vodika z naraščanjem deleža pasti

**Fig. 3**

Reduction of apparent hydrogen diffusion with the increased portion of traps.

energije pasti in gostote pasti. Čeprav sposobnost difuzije vodika pada z naraščanjem števila različnih pasti, pa je količina ulovljenega vodika večja, kar povečuje občutljivost kovine za vodikovo krhkost.

Ujetje vodika v pasti razumemo kot vezavo atomov vodika na že omenjene nečistoče, defekte itd. To vezavo atomov vodika na različne pasti bi lahko pripisali lokalnemu električnemu polju, temperaturnemu gradientu, kemičnemu potencialnemu gradientu ali preprosto fizikalnemu ujetju.

Te pasti so lahko gibljive (dislokacije, napake zloga) ali stabilne (kristalne meje, karbidni delci, posamezni raztopljeni atomi v kristalni mreži). Pasti so bodisi reverzibilne bodisi irreverzibilne. Če pasti zadržujejo atome vodika le kratek — omejen čas, govorimo o reverzibilnih, če pa je zasedba pasti z vodikom dolgotrajna, kar je posledica velike vezalne energije, pravimo, da so to irreverzibilne pasti. V tabeli 3 je prikazana klasifikacija različnih pasti v jeklu. Energija interakcije med pastjo in vodikom predstavlja merilo za vezalno silo. Iz velikosti energije lahko sodimo o tem, ali je past reverzibilna ali irreverzibilna. Ti podatki so izjemno pomembni za razvoj jekel, odpornejših proti poškodbam zaradi delovanja vodika.

V železu bo celotna vezalna energija (B) med nečistočo (pastjo) in vodikom izražena z W<sub>1</sub>, ki predstavlja

**Tabela 3: Klasifikacija pasti (za vodik) v jeklu**

Tip pasti	Naziv pasti		(a) Energija interakcije eV	Značaj pasti
	Elementi levo od Fe	Elementi z negativ. ε <sub>H</sub> (b)		
Točkovni	...	Ni	(0,083)	Najbolj verjetno reverzibilne
	Mn	Mn	(0,09)	
	Cr	Cr	(0,10)	
	...	V	(0,16)	Reverzibilne
	...	Ce	(0,16)	
	...	Nb	(0,16)	
	...	Ti	0,27	Precej irreverzibilne
	...	Sc	(0,71)	
	...	Ca	(0,98)	
	...	K	la	(0,98)
...	...	Nd	(1,34)	
Linijski	Dislokacije		0,31 0,25 (povprečne vrednosti)	Reverzibilne Reverzibilne
	Ploščat ali dvodimen- zijski	Vmesna površina delec/osnova TIC (nekoherentne) Fe <sub>3</sub> C MnS	0,98 0,8—0,98	Irreverzibilne, postajajo vse bolj reverzibilne, kolikor bolj so delci povezani
Meje zrn			0,27 (povprečna vrednost) 0,55—0,61 (veliko- kotne)	Reverzibilne Reverzibilne ali irreverzibilne
Dvojčki				Reverzibilne
Prostorski	Praznine		> 0,22	

(a) Vrednosti energije interakcije so bodisi eksperimentalne, bodisi računске

(b) ε<sub>H</sub> je koeficient interakcije. Njegova negativna vrednost pomeni, da past privlači vodik k sebi.

neko energijo pri elastičnem vzajemnem delovanju med pastjo in vodikom ter energijo  $U_1$ , ki pa upošteva še številno valenčnih elektronov nečistoče. Vezna energija  $B$ , ki predstavlja tudi sposobnost ujetja vodika v past, je:

$$B = U_1 + W_1 \quad (3)$$

Če pasti širijo kristalno mrežo, ima  $W_1$  negativen predznak. Ujetje v past se lahko pričakuje, ko je vrednost  $B$  negativna. Za nekatere pare kovina-vodik so te vrednosti podane v tabeli 4.

Tabela 4

Ulovljeni H v paru	B (eV)	$W_1$ (eV)	$U_1$ (eV)
Co—H	> 0	-0,007	+ 0,08
Ni —H	> 0	-0,038	+ 0,16
Pd—H	> 0	-0,153	+ 0,16
Ti —H	-0,27 do -0,45	-0,096	-0,32
Zr —H	< 0	-0,321	-0,32
Cr —H	< 0	-0,113	-0,16
Mn—H	< 0	-0,028	-0,08
Mo—H	< 0	-0,117	-0,16
V —H	< 0	-0,038	-0,24
C —H	-0,034	-0,107, -0,171	—
N —H	-0,138	-0,110, -0,174	—

Nečistoče levo od železa v periodnem sistemu imajo negativno  $U_1$ , kot tudi  $W_1$ , kar omogoča učinkovito adsorbcijo vodika na te pasti. Na desni strani od železa imajo sicer ugodno  $W_1$ , toda prispevek  $U_1$  je tako velik in nasproten, da te vrste nečistoč ne predstavljajo pasti za vodik. Elementi Ti, Cr, Mn, Mo, V, C in N v jeklu torej niso zaželeni v obliki nečistoč, ko se postavlja v ospredje vprašanje dobre odpornosti proti vodikovi krhkosti.

#### 4. IZVORI ATOMSKEGA VODIKA

Atomski vodik je lahko prisoten v materialu, še preden je bil ta izpostavljen različnim delovnim medijem. Tako ostaja vodik v materialu pri procesu strjevanja taline (v zvarih ali ingotih) ali kot posledica toplotnih obdelav v atmosferi vodika. Toda ker vodičenje preko teh postopkov po obsegu poškodb ni primerljivo s korozijskimi in drugimi elektrokemičnimi procesi (proizvod pa je v vseh primerih atomski vodik), se omejimo le na naslednje procese:

##### Vpliv korozije in drugih elektrokemičnih procesov na nastajanje atomskega vodika in vodikove krhkosti

Kinetika elektrokemičnega izločanja vodika iz korodirnega medija je važen dejavnik pri reševanju vodikove krhkosti. Korozijski proces je sestavljen iz parcialnega anodnega procesa (raztapljanje, t. j. oksidacija kovine M na anodi s produkcijo kovinskega iona  $M^{n+}$  in osvobajanje  $n$  valenčnih elektronov):



in parcialnega katodnega procesa (redukcija oksidacijskega sredstva iz korodirnega medija; v kislem mediju so to  $H^+$  ioni, ki na katodi reagirajo z elektroni, sproščeni pri anodni reakciji, ob tvorbi plinastega vodika  $H_2$ ):



Enačba 5 predstavlja le sumaren proces katodnega izločanja plinastega vodika, vendar pa je ta proces dejansko sestavljen iz vrste različnih vmesnih stadijev. Prvi stadij je transport  $H^+$  iona h katodnim elektrodnim povr-

šinam, za tem pa sledi razelektrjenje teh ionov s tvorbo atomskega vodika, ki se adsorbira na katodni površini ( $H_{ad}$ ):



Za nadaljni stacionarni potek korozijskega procesa je potrebno, da so katodne površine zasedene s  $H_{ad}$  in da je tudi omogočeno stalno odvajanje teh s te površine. Adsorbirani atomi vodika pa se lahko odstranijo s:

— katalitičnim spajanjem (mehanizem Volmer-Tafel)



— elektrokemično desorbcijo (mehanizem Volmer-Heyrowsky)



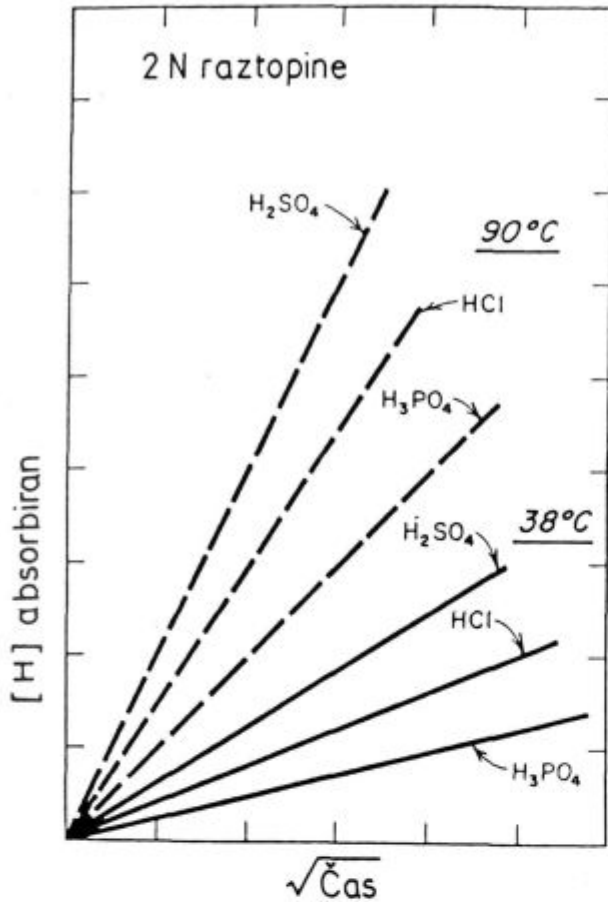
Toda reakcije 6, 7 in 8 zaradi specifičnosti elektrokemičnih procesov niso vedno povsem izvedljive. Po teoriji »zadrževanja razelektrjenja  $H^+$  iona« domnevamo, da je najpočasnejša stopnja pri katodnem izločanju plinastega vodika reakcija 6 in od tod tudi trditev ruske šole, da je vodikova krhkost v vodnih raztopinah dejansko posledica vstopa  $H^+$  ionov v kovino. Po teoriji zadrževanja spajanja dveh  $H_{ad}$  v molekulo vodika pa se predpostavlja, da je najpočasnejša reakcija 7. Ne glede na napovedi teh dveh in še številnih drugih teorij, je rezultat takšnega poteka elektrokemičnih reakcij zaostajanje atomskega vodika ( $H_{ad}$ ) na katodnih površinah, kar povzroča t. i. »prenapetost izločanja vodika«. S pojavom prenapetosti pa se poraja večja možnost migracije atomskega vodika z elektrodne površine v notranjost kristalne mreže. Čim večja je prenapetost, tem večja je lahko stopnja navodičenja kovine pri korozijskem procesu. Prenapetost izločanja vodika pa ni odvisna le od zunanjih dejavnikov (vrsta korodirnega medija, t. j. elektrolita in dogajanja v njem), temveč predvsem od notranjih — metalurških dejavnikov v materialu, ki korodira (kemična sestava, mikrostruktura, nečistoče, stopnja hladne predelave itd.).

Zaradi večje koncentracije  $H^+$  ionov so kisli mediji večji povzročitelji navodičenja kot bazični. Možnost pojavnosti navodičenja raste z znižanjem pH vrednosti. Pri bazičnih je možno navodičenje z zunanjo polarizacijo pri potencialih, ki so v katodnem področju.

Različni anioni v disociiranih kislinah pa lahko bistveno spremenijo reakcijo adsorbcije vodika. Raziskave, opravljene na maloogljiknem jeklu v različnih raztopinah kislin, kažejo znatno razliko v količini adsorbiranega vodika — **slika 4**. V  $HNO_3$  raztopinah je vodikova krhkost slabo izražena ali pa sploh ne nastopa zaradi redukcije nitratnega iona ( $NO_3^-$ ) z atomskim vodikom oz.  $H^+$  ionov v  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $N_2$  ali celo  $NH_3$ . V nekaterih primerih lahko  $HNO_3$  izzove krhkost pri koncentracijah od 0,3 do 0,8 N. Pri večjih koncentracijah pa nitratni ioni pomikajo potencial kovine v žlahtnejše področje (k pozitivnejšim potencialom). Ta pomik pa je povezan z velikim zmanjšanjem hitrosti nastajanja atomskega vodika in njegove adsorbcije.

Številni elementi, raztopljeni v korodirnih medijih, imajo vpliv na kinetiko razvoja vodika in na njegov vstop v kristalno mrežo železa in železovih zlitin. Dejstvo je, da že zelo majhne količine teh pospeševal znatno povečujejo adsorbcijske oz. adsorbcijske procese. Za te snovi se je udomačil izraz »katodni strupi« ali »katodna pospeševala«. Znane strupe predstavljajo elementi V-A in VI-A skupine periodnega sistema (**slika 5**), pa tudi jod v raztopini kislin, cianidni ion v alkalnih raztopinah, ali pa soli težkih kovin, kot so Hg, Sn in Pb.

Strupi delujejo različno. Ioni joda, sulfidni in cianidni so poznani po tem, da imajo izredno veliko adsorbcijsko



Slika 4

Vpliv vrste raztopine in temperature na količino absorbiranega vodika v maloogljiknem jeklu

Fig. 4

Influence of solution type and temperature on the amount of absorbed hydrogen in low-carbon steel.

spособnost na površino kovine. Mnogi strupi tvorijo stabilne hidride, kot npr.  $H_2S$ ,  $H_2Te$ ,  $H_2Se$ ,  $PH_3$ ,  $AsH_3$  in  $SbH_3$ . V elementarni obliki dajejo As, Sb, Bi, Hg, Pb in Sn zelo majhen tok pri reakcijah, katerih osnova je razvijanje vodika. Posledica tega je že omenjena prenapetost izločanja. Vrstni red učinkovitosti na hitrost permeacije atomskega vodika skozi maloogljikno jeklo je naslednji:



Mnogi dokazi kažejo pomemben vpliv strupov na zmanjšanje vezalne sile med kovino in vodikom, kar pospešuje absorpcijo vodika v kristalno mrežo. Prisotnost takšnih molekul z veliko adsorpcijsko sposobnostjo na površini kovine lahko poruši zvezo med atomi kovine, s tem da znižuje kohezijsko silo. Zaradi tega nastala pregrupacija atomov pa omogoča vdor vodika v notranjost materiala. Takšni akceleratorji navodičenja torej odstranijo različne površinske pregrade in s tem zmanjšujejo aktivacijsko energijo, potrebno za različno stopnjo migracije vodika v notranjost materiala. Adsorbirane snovi povzročajo na površini kovine različne poškodbe. Ker imajo vodikovi atomi izrazito tendenco migracije k dislokacijam, ki so se tako porajale v površinskem pasu, je povsem jasno, da takšne snovi predstavljajo katalizatorje vodikove krhkosti.

Enako kot pri koroziji, tudi drugi elektrokemični procesi (galvaniziranje, luženje, elektroliza itd.) omogočajo

V	VI	VII
N	O	F
P	S	Cl
As	Se	Br
Sb	Te	I
Bi	Po	At

Slika 5

Del periodičnega sistema z elementi (občrtano), ki pospešujejo vodičenje

Fig. 5

Part of periodic system with elements (encircled) which accelerate the hydrogen pick-up.

pojav vodikove krhkosti. Znani so primeri krhkosti po luženju ali številne poškodbe srednje in zelo trdnih jekel v galvanski tehniki (npr. vijaki). Izjemno nevarna je katodna zaščita zelo trdnih jekel (npr. prednapete armiranobetonske konstrukcije), ker se v potencialnem območju katodne zaščite odvijajo le katodne reakcije elektroke-mičnega procesa, ki producirajo  $H_{ad}$ .

#### Vodičenje iz plinaste faze

Vodičenje iz plinaste faze poteka preko mnogih stadijev, katerih vrstni red je naslednji:

- fizikalna adsorbcija  $H_2$  na površino kovine,
- kemisorbcija molekule  $H_2$ ,
- disociacija molekule  $H_2$  v atomski vodik, ki je povzročitelj vodikove krhkosti.

Mnogi od teh procesov vodičenja iz plinaste faze ni-so najbolj razumljivi, ni pa še tudi jasno, katera od teh stopenj je odločilna za hitrost difuzije atomskega vodika v notranjost kovine. Za napredovanje vodika v notranjost pa je potrebna določena aktivacijska energija, saj je atomski vodik čvrsto vezan na površino (ta vez je močnejša kot v primeru vezave molekulskega vodika). Ker je aktivacija nekaterih od navedenih procesov odvisna od temperature, je povsem jasno, da je le-ta eden od dominantnih dejavnikov. Večina, če ne celo vse od navedenih stopenj, so specifične za določene materiale in tesno povezane z njihovo mikrostrukturo ter stanjem površine. Čisti, nekorodirani deli površin, nastali s plastično deformacijo ali kot posledica delovanja kemičnih oziroma elektrokemičnih reakcij, so prednostna mesta za adsorbcijo, pri čemer znaša velikost Van der Waalove ve-zne energije na površini manj kot 0,1 eV/mol. Tudi proces kemisorbcije in tvorba atomskega vodika se bosta prvenstveno odvijala na teh delih površine. Vendar pa se mnoge nečistoče v jeklu (C, P, S, O) in tudi legirni elementi (Cr, Ni, Mo) izločajo na površini jekla ali na površini že izoblikovane razpoke. Za C, S in O je bilo dokazano, da zmanjšujejo energijo, potrebno za vezavo vodika.

#### 5. KINETIKA TRANSPORTA ATOMSKEGA VODIKA V KOVINO

Posamezni mehanizmi transporta atomskega vodika v kristalno mrežo so razmeroma komplicirani in povezani z mnogimi dejavniki, ki so si v medsebojni odvisnosti. Tako je transport vodika odvisen že od mikrostrukturnih

napetostnih gradientov, od njegove interakcije z dislokacijami, možnostjo, da se ujame v »pasti« kristalne mreže itd. V primerih, ko je izvor atomskega vodika plinasti vodik ali neka elektrokemična reakcija, stanje površine kovine pomembno vpliva na kinetiko transporta. Običajno lahko trdimo, da je gibljivost vodika v večini kovin razmeroma velika. Sposobnost difuzije je torej velika, zato pa je potrebna nizka aktivacijska energija. V temperaturnih območjih, v katerih se običajno pojavlja vodikova krhkost, je vrednost difuzijske konstante približno  $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Na mestih, kjer nastajajo prelomi, je torej možno pričakovati znatne količine vodika.

Prostorsko centrirana kubična kristalna mreža omogoča največjo hitrost difuzije. Kovine Nb, Ti, V, Ta, Fe in njihove zlitine s to kristalno zgradbo pa kažejo tudi največjo občutljivost do vodika, celo pri nizkih temperaturah. W in Mo, ki imata majhno difuzijsko sposobnost za vodik, sta razmeroma neobčutljiva za raztopljeni vodik. Podobno manjšo občutljivost kažejo tudi sistemi s ploskovno centrirano kubično in gsto zloženo heksagonalno mrežo, kar je razumljivo, saj je gostota atomov tu večja, mobilnost vodika pa zaradi tega precej manjša. Aktivacijska energija, potrebna za difuzijo vodika, znaša v teh primerih od 21 do 63 kJ/mol.

Material postane občutljiv za vodik takrat, ko difundira na določena potencialna področja kritična količina vodika, pod katero se razpoka ne bo niti inicirala niti napredovala, kar izključuje nastajanje vodikove krhkosti. Takšna potencialna področja so že omenjene raznolike pasti. Tako moderna teorija vodikove krhkosti sloni na pojavu ujetja vodika na pasti (angl. trapped hydrogen). Po tej teoriji se bo torej pojavila razpoka takrat, ko količina ulovljenega vodika na mestu razpoke preseže kritično vrednost. Potrebno je torej operirati z izrazom »ulovljeni vodik«, kajti v mnogih kovinah, npr. paladiju ali monokristalih, je difuzija atomskega vodika zelo velika, nagnjenost k vodikovi krhkosti pa zelo majhna, saj ni možno spajanje v  $\text{H}_2$  na lokacijah, kjer naj bi bile prisotne pasti. Očitno pa je, da takšni kovinski sistemi niso podvrženi vodičenju niti na osnovi dekohezije med atomi kovine zaradi delovanja intersticijsko raztopljenega vodika, kar propagira mehanizem Troiano-Oriani. Takšne kovine so torej odporne proti vodikovi krhkosti (razen, če ni izvedena intenzivna in dolgotrajna katodna polarizacija).

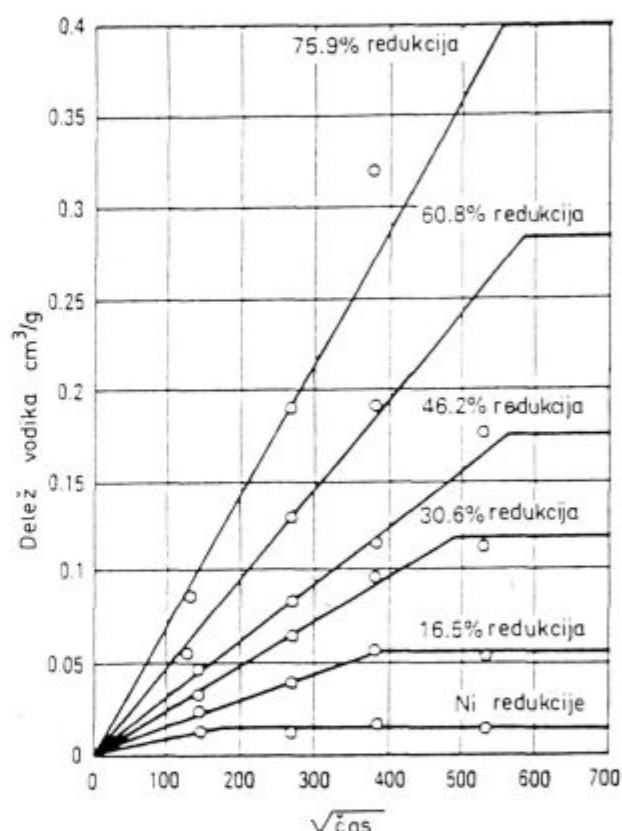
Transport atomskega vodika v kovino temelji na dveh difuzijskih mehanizmih:

- intersticijski difuziji,
- difuziji s pomočjo dislokacij.

Intersticijska difuzija je možna takrat, kadar atomi vodika v kristalni mreži zasedejo vmesne prostore, ne pa ogljišča elementarne celice. Takšen proces je možen v trdnih raztopinah, v katerih so intersticijsko raztopljeni atomi majhni glede na atome osnovne kovine. Takšna difuzija je značilna za ogljik, dušik in vodik v železu. Njeno delovanje ni pogojeno z obstojem napak v kristalni mreži, difuzijski procesi pa so razmeroma hitri. Difuzija atomskega vodika v kovino je povezana z nizko aktivacijsko energijo, ki znaša v kovinah s kubično prostorsko centrirano kristalno zgradbo le od 4 do 21 kJ/mol. S tem je omogočena difuzija pri razmeroma nizkih temperaturah. Vendar pa se difuzija lahko močno zmanjša, aktivacijska energija pa naraste, če se vodik ujame v pasti.

Transport vodika skozi kovino omogoča tudi gibanje dislokacij, kar je še posebej evidentno pri nizkih temperaturah, kjer je intersticijska difuzija znatno manjša. Ta prenos atomskega vodika je torej hitrejši kot z intersticijsko difuzijo, prenesene količine na daljše razdalje pa so znatne. V tem primeru se vodik nahaja v obliki Cottrellove atmosfere, njegova izjemna gibljivost pa je pove-

zana z veliko vezavno energijo, ki obstaja med njim in dislokacijami, katere jasno predstavljajo učinkovite pasti. Intersticijska energija med vodikom in dislokacijami znaša približno 0,3 eV. Eksperimenti in teoretični izračuni kažejo, da hitrost difuzije vodika s pomočjo dislokacij v primerjavi z intersticijsko difuzijo presega faktor  $10^4$ . Hladna plastična deformacija kovin vedno vodi do povečanja dislokacij. V resnici je dislokacija izražena z nekim elastičnim napetostnim poljem, ki vzajemno deluje z raztopljenimi H atomi. To pa je tudi vzrok za povečanje nagnjenosti materiala do vodičenja. Dodatno pa lahko plastična deformacija povzroči znatne spremembe v mehanizmu površinske adsorpcije. Številne površinske mikro-razpoke in praznine, nastale pri hladni predelavi, predstavljajo učinkovite pasti. Vpliv hladne predelave ogljikovega jekla na količino absorbiranega vodika je prikazan na sliki 6.



Slika 6

Vpliv hladne redukcije ogljikovega jekla na količino absorbiranega vodika. Test je bil opravljen na žici s premerom 13 mm v  $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$  pri  $35^\circ \text{C}$ .

Fig. 6

Influence of cold reduction of carbon steel on the amount of absorbed hydrogen. Test was made on the wire of 13 mm diameter in  $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$  at  $35^\circ \text{C}$ .

Vodik bo difundiral v kovino na mestih, kjer je potrebna najmanjša aktivacijska energija (različne napake na površini, določene nečistoče in faze v materialu, izvori dislokacij, ugodno orientirane kristalne meje itd.). V kovini pa se lahko vodik nahaja kot:

- intersticijsko raztopljeni atomski vodik v obliki atomskega oblaka (po drugih navedbah je to oblak protonov  $\text{H}^+$ ), ki ima težnjo po zasedbi pasti ali njegovi migraciji navzven,

- atomski, ki je priklenjen na pasti,
- molekulski, ki je nastal s spajanjem atomskega na pasteh
- vezan kot hidrid.

Povsem jasno je, da molekulski vodik ni več gibljiv. Svoje delo je opravil pri pretvorbi v plin, in sicer s tem, da je molekula plina izvršila pritisk na soseščino (Zappfov mehanizem), v kateri lahko tvori mikrorazpoke, z združevanjem teh makrorazpok, pa tudi druge vrste poškodb.

Atomski vodik, ujet v past, pa se pri dovolj visoki aktivacijski energiji (npr. z dovajanjem toplote ali z deformacijo kristalne rešetke) odtrga in ponovno postane gibljiv. Ravno ta gibljivi pa je nevaren, ker na ugodnih lokacijah, t.j. na pasteh, ki so sposobne akumulirati največ vodika, zmanjšuje vezalno silo med atomi kovine, lahko se spaja v molekulskega ali pa v določenih kovinskih sistemih tvori nevarne hidride. Na osnovi delovanja gibljivega vodika pa se lahko porajajo zapozneli lomi, ki so ena najbolj značilnih oblik časovnega delovanja vodika. Železo in mehko maloogljčno jeklo ni občutljivo za zapoznele lome. Pri zelo trdnih jeklih (npr.  $R_m > 500 \text{ N/mm}^2$ ) pa se po določenem času lahko porajajo zapozneli lomi, ki so značilni za večino poškodb v praksi, nastalih zaradi delovanja vodika. Takšno zapoznelo delovanje se prvenstveno negativno manifestira na žilavost oz. duktilnost pri natezanju, in sicer na mestih, kjer je možno lokalno preseganje meje tečenja in kjer so prisotne pasti z nizko aktivacijsko ter veliko interakcijsko energijo. Posledica tega so krhki cepilni prelomi, ki pa so lahko tudi interkristalne narave.

Nastajanje zapoznelih lomov je razdeljeno v tri obdobja:

1. inkubacijsko obdobje
2. propagacija razpoke
3. končni zlom

V fazi inkubacije atomski vodik migrira na ugodna mesta (pasti) oz. v predele, kjer je prisotno povečanje napetosti, npr. triosno napetostno stanje na čelu razpoke. Ko je na takšnem mestu dosežena kritična količina ulovljenega vodika, nastane prva razpoka, ki pa z nadaljnim delovanjem vodika raste. Končni prelom nastopi, ko material ne vzdrži aplicirane napetosti.

Veliko je bilo izdelanih raziskav na področju vodikove krhkosti v plinski atmosferi vodika, ki lahko predstavlja sredstvo za nastajanje atomskega vodika (s procesi kemisorbcije). Če izhajamo iz zakonitosti, ki jih nudi ta zunanji plinasti vodik in notranji atomski, lahko zapišemo:

$$C_H = \eta (T) P_{H_2}^{1/2} \quad (9)$$

Pri tem je  $\eta (T)$  konstanta, odvisna od temperature,  $P_{H_2}$  pa parcialni tlak plina. **Enačba 9** torej predstavlja topnost atomskega vodika v kovini, ki je nastal z disociacijo molekulskega ( $H_2$ ) iz plinske faze.

Ravnotežna koncentracija vodika ( $C_H$ ), ki se nahaja v mnogih intersticijskih mestih kristalne mreže železa, narašča s temperaturo  $T$  in z zunanjim tlakom  $P_e$  vodikove atmosfere:

$$C_H = 42,7 P_e^{1/2} \exp \left( -\frac{6500}{RT} \right) \text{ (ppm)} \quad (10)$$

Povsem jasno je, da je koncentracija notranjega vodika (intersticijsko raztopljenega in vezanega na pasti) večja v jeklih kot železu. Njegova večja absorbcija v jeklih je posledica večjega števila pasti, kar lahko povežemo z različnimi stanji predelave, mikrostrukture oz. trdnostjo (z naraščanjem trdnosti raste količina absorbiranega vodika v jeklu).

Nad  $150^\circ \text{C}$  ( $T > 423 \text{ K}$ ) difuzijska konstanta  $D_H$  za vodik ravno tako narašča s temperaturo, in sicer eksponentialno:

$$D_H = 1,4 \times 10^{-3} \exp \left( -\frac{3200}{RT} \right) (> 423 \text{ K}) \quad (11)$$

Z naraščanjem temperature pa postajajo tudi pasti aktivnejše (potrebna je manjša energija aktivacije), kar se manifestira z večjo akumulacijo vodika v njihovi okolici. Povsem jasno je, da količina ulovljenega vodika ne raste linearno z naraščanjem temperature, saj obstaja nad nekim temperturnim nivojem težnja po večji difuziji raztopljenega in ulovljenega atomskega vodika navzven. Na ta način se z dovajanjem energije atomski vodik odtrga iz objema pasti (postane intersticijsko raztopljen v obliki oblaka atomskega vodika) in pri dovolj visokih temperaturah celo difundira na površino kovine. Poenostavljeno lahko to reakcijo zapišemo takole:



$[H]$  = H ulovljen v past

$\square$  = past

Reakcija 12 je torej reverzibilna, kajti pri določenih nižjih temperaturah (odvisno od tipa zlitine) bo obstajala tendenca vezave H na past.

Difuzivnost, določena z merjenjem količine plinastega vodika (atomski, ki izstopa na površino se spaja v molekulskega), potrjuje zgornje navedbe. Pri temperaturah, nižjih od  $150^\circ \text{C}$  ( $T < 423 \text{ K}$ ), se difuzija vodika navzven hitro zmanjšuje. To je izraženo z naslednjo enačbo:

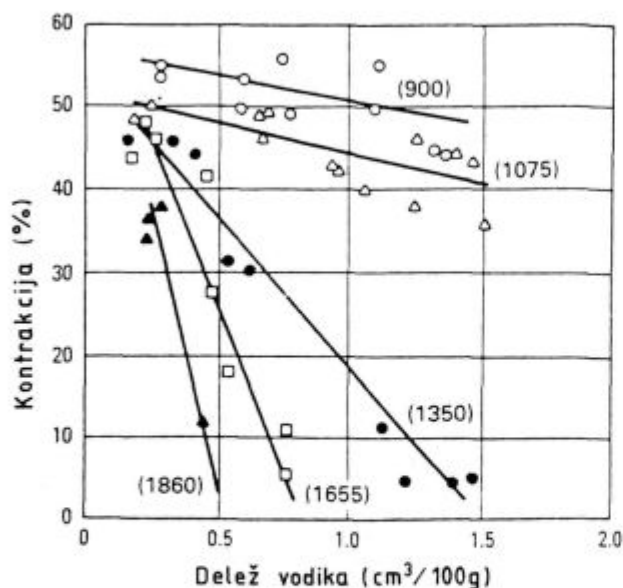
$$D_H = 0,12 \exp \left( -\frac{7280}{RT} \right) (T < 423 \text{ K}) \quad (13)$$

Po luženju jeklenih izdelkov ali pa po galvanskem nanašanju različnih kovinskih prevlek je torej potrebno čim prej izgnati v kovini absorbirani vodik, ker lahko le-ta tvori zapoznele lome. Izganjanje mobilnega ali na pasteh ujetega atomskega vodika pa je dovolj učinkovito le pri temperaturah, ki so višje od  $150^\circ \text{C}$  (običajno žarimo pri  $200$  do  $250^\circ \text{C}$ ). Vendar je izločanje notranjega vodika nemogoče iz naprav v procesni tehniki in iz številnih drugih konstrukcij (npr. prednapete armiranobetonske konstrukcije, jeklene morske ploščadi za črpanje nafte, naftni cevovodi, rezervoarji itd.), kjer je bilo vodičenje možno pri delovanju korozije. V takšnih primerih je torej potrebna vgradnja takšnih materialov, ki imajo povečano ali visoko odpornost proti vodikovi krhkosti.

## 6. POGOJI ZA NASTANEK IN RAZVOJ RAZPOKE

Čas, potreben za zlom vodičenega materiala, je precej odvisen od njegove trdnosti in žilavosti. Material z večjo trdnostjo lahko sprejme manjšo količino vodika kot mehkejši pri še isti kontrakciji, ki je na **sliki 7** prikazana kot funkcija koncentracije absorbiranega vodika. Pri zelo trdnih jeklih ob prisotnosti vodika povsem izgine vpliv napetosti tečenja in žilavosti. Isti problem pa srečamo tudi pri običajnih maloogljčnih konstrukcijskih jeklih, ki so bila izpostavljena agresivnim korodirnim medijem (npr. korozija v  $H_2S$  raztopinah — petrokemija, kemična industrija itd.).

Po mehanizmu tlaka (Zappfe) je navodičenje posledica delovanja plinastega vodika, nastalega s spajanjem absorbiranega atomskega. V tem primeru razpoka na-



Slika 7  
Vpliv trdnosti materiala in deleža vodika na kontrakcijo

Fig. 7  
Influence of material strength and the hydrogen content on the contraction (toughness).

preduje na osnovi združevanja mikrorazpok oz. praznin, nastalih pri ekspanziji molekul  $H_2$ , ki povzročajo tlak ( $P$ ). Za napredovanje nestabilne razpoke je torej potreben naslednji notranji tlak plinastega vodika:

$$P_{H_2} = 10^{1.5} \exp \frac{-\eta_{krit} F}{2 RT} \quad (14)$$

$\eta_{krit}$  = kritična prenapetost izločanja vodika

$F$  = Faradayeva konstanta

$R$  = plinska konstanta

$T$  = temperatura

Pri tej prenapetosti se pod površino kovine ujame kritična količina vodika ( $C_{krit}$ ). Ta količina je dovolj velika, saj se spreminja narava kristalne mreže (njena deformacija). Kritično koncentracijo lahko izračunamo iz kritičnega tlaka  $P_{krit}$  in iz difuzijske konstante  $D$ , ki se določi z metodo prepustnosti vodika skozi membrano debeline  $L$ :

$$P_{krit} = (DF/L) C_{krit} \quad (15)$$

Difuzijo vodika skozi kovino lahko opišemo z drugim Fickovim zakonom:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (16)$$

Ko koncentracija ( $C$ ) preseže kritično vrednost ( $C_{krit}$ ), to je tisto največjo količino vodika, ki se npr. v železu intersticijsko raztaplja (enačba 10), se preostali atomski vodik začne vezati na pasti. Šele pri  $C_{krit}$  pa se začnejo razvijati efektne razpoke. Reakcija vezave vodika na pasti gre v tem primeru od desne na levo v enačbi 12.

V primeru delovanja dekohezijskega mehanizma, ki je najbolj pogosto prisoten, pa zakonitosti, povezane z enačbama 14 in 15, ne veljajo. V tem primeru je potrebna neka druga kritična količina atomskega vodika, pri kateri je zmanjšanje vezalne sile med atomi železa dovolj učinkovito.

## 7. MEHANIZMI NAPREDOVANJA RAZPOKE ZARADI DELOVANJA VODIKA IN MORFOLOGIJA PRELOMNIH POVRŠIN

Proces krhkega pokanja lahko razdelimo v tri stadije:  
— nastanek razpoke,  
— počasna rast razpoke,  
— hitro nestabilno napredovanje razpoke.

Nastanek razpoke je povezan z zaostalimi notranjimi napetostmi ali tistimi, ki so posledica mehanske obremenitve in pri tem nastalimi dislokacijami, z delovanjem na površini adsorbiranega vodika ali na osnovi absorbiranega vodika tik pod površino. Začetna mikrorazpoka se lahko tvori z zagozdenjem nakopičenih dislokacij (npr. ob kristalni meji) ter kasnejšo koalescenco takšnih grupacij, pa tudi ob vključkih, različnih fazah itd. Takšno začetno jedro pa se lahko poraja tudi z delovanjem ene molekule vodika (v odvisnosti pač od trdnostnih lastnosti in žilavosti materiala), nastale po absorpciji atomskega. Če napetost v materialu narašča, narašča tudi število napak na površini kovine in v njeni notranjosti. To pa omogoča nastajanje novih jeder in povečanje koncentracije nadaljnjih količin absorbiranega vodika ter njegovo hitrejšo delovanje.

Po vzpostavi začetnih mikrorazpok oz. praznin, ki so lahko le z vodikom zasedeni medprostori v kristalni mreži, ter z združevanjem teh napak se prične rast mikrorazpoke. Hitrost napredovanja te, pa tudi topologija prelomne površine, je odvisna od vrste materiala, temperature preizkušanja ali obratovanja in od trdnostnih lastnosti predvsem od napetosti tečenja. V kovinah s prostorsko centrirano kubično mrežo (jeklo) je pri nizkih temperaturah prisoten hiter nastanek in napredovanje razpoke, oziroma hiter nastanek združevanje in napredovanje razpoke.

Za zelo trdne zlitine, ki so bolj ali manj toge, je značilno, da se v materialu pred razpoko tvori večje število manjših praznin oz. z vodikom zasedenih medprostorov, kot pri zlitinah z znižano oz. majhno trdnostjo, kjer so te praznine redkejšje. Posledica tega so krhki zlomi z majhnim razmikom ustja razpoke pri zelo trdnih materialih, pri materialih z majhno trdnostjo pa žilavi, z večjim razmikom ustja.

Nastajanje krhkih zlomov v določenih materialih, kjer je prisotna vodikova krhkost, je možno razložiti s pospeševanjem procesov drsenja v konici razpoke z dislokacijami, ki postanejo v prisotnosti atomskega vodika v področju triosnosti (na čelu konice razpoke), bolj gibljive. To lahko izrazimo z enačbo:

$$\frac{C_{H_2}^0}{C_H^0} = \exp \left( \frac{\bar{V}_H \sigma_3}{RT} \right), \quad (17)$$

pri čemer sta  $C_H^0$  in  $C_{H_2}^0$  koncentraciji atomskega vodika v kristalni mreži proč od konice razpoke ter v napetostnem polju pred konico razpoke.  $\bar{V}_H$  je parcialni molarni volumen raztopljenega vodika v kristalni mreži,  $\sigma_3$  je sferična komponenta napetostnega polja,  $R$  je plinska konstanta in  $T$  temperatura.

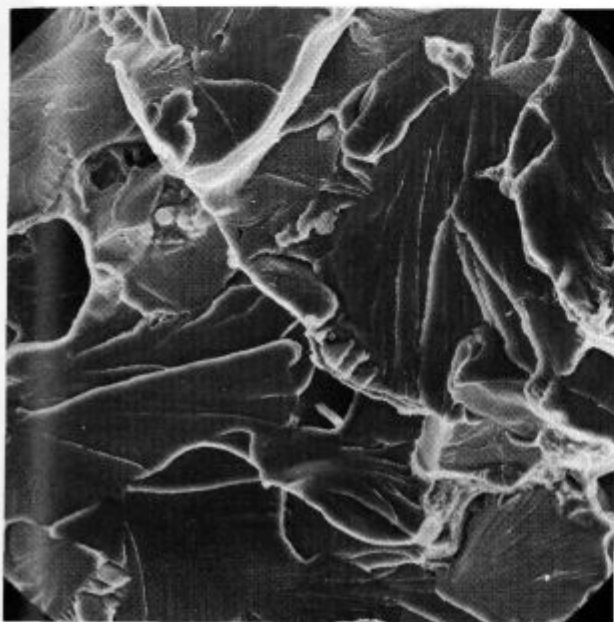
Koncentracija vodika pa lahko na čelu razpoke še narašča z interakcijo med tistim raztopljenim vodikom v glavnini kristalne mreže in napetostnim poljem, ki ga povzročajo dislokacije v področju triosnosti. Pretok vodika je torej v tesni povezavi z napetostnim gradientom med področjem na čelu razpoke in ostalim nedeformiranim. Posledica napetostnega gradienta je tudi gradient kemičnega potenciala vodika med obema področjema. Takšna razlika v kemičnem potencialu pa povzroča stalno migracijo vodika iz nedeformirane okolice v napetostno polje zaradi težnje po izenačitvi njegove koncen-

tracije. Večja prisotnost vodika povečuje gibljivost dislokacij (te delujejo kot transportno sredstvo za vodik), s tem pa je omogočeno lokalno drsenje vzdolž aktivnih drsnih ravnin v področju trisnosti oziroma lokalno krhko transkristalno cepljenje. Iz takšne začetne razpoke se razvije enovita transkristalna razpoka s cepilnim morfološkim izgledom lomnine. Opisani način napredovanja razpoke je tipičen za nikelj in njegove zlitine.

Delovanje vodika v jeklih z majhno trdnostjo pretežno povzroča žilave prelome, čeprav najdemo pogoste

primere krhkih, ki so nastali z izrazitim prenasitčenjem materiala z atomskim vodikom (katodna zaščita, laboratorijski preizkusi s poudarjeno katodno polarizacijo, delovanje H<sub>2</sub>S itd.). Takšno delovanje je lahko podprto še z delovanjem korozijskih strupov in drugih pospeševalcev anodnih in katodnih procesov. Na **sliki 8** je prikazan videz prelomne površine po vodičenju jekla Č.1204. Prisotni so krhki transkristalni cepilni prelomi; v določenih conah, kjer je bil vpliv vodika manjši, pa zasledimo mešano naravo prelomne površine — **slika 9**.

Na **sliki 10** je prikazana shema, s pomočjo katere je možno prikazati vrsto preloma, katerega morfoloija prelomne površine je odvisna od številnih dejavnikov: način transporta vodika, smeri njegovega širjenja oz. delovanja, vpliva različnih izločkov napak v kristalni mreži itd. Vodik torej povzroča krhke transkristalne cepilne prelome, krhke interkristalne in duktilne.

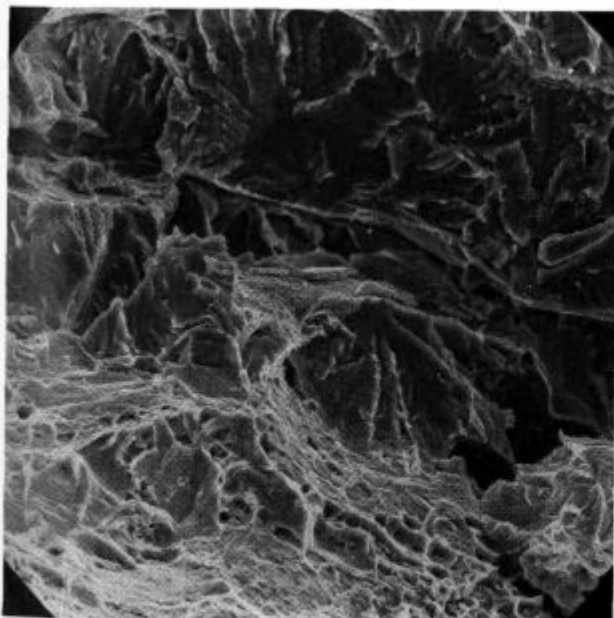


**Slika 8**

Cepilni prelom v vodičeni coni jekla Č.1204

**Fig. 8**

Slitting fracture in the hydrogen-pick up zone of Č.1204 steel.

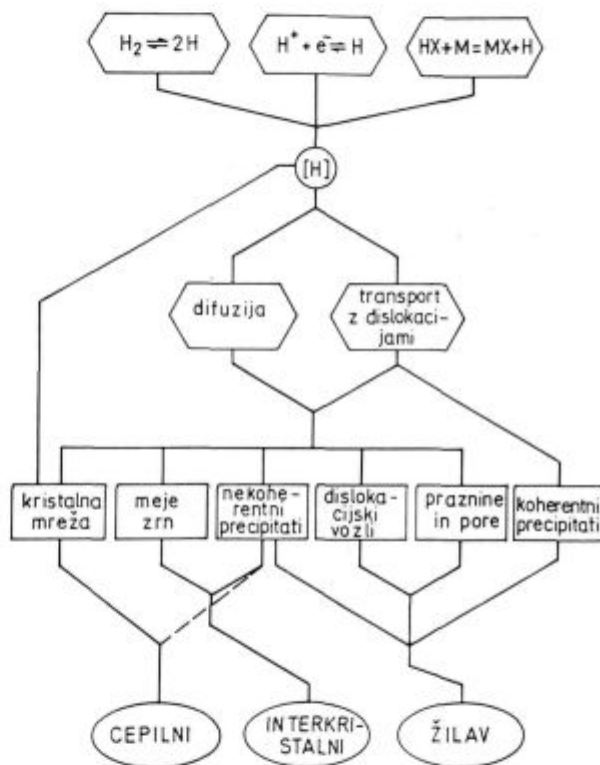


**Slika 9**

Mešan prelom po vodičenju Č.1204 jekla

**Fig. 9**

Mixed fracture after hydrogen pick up in Č.1204 steel.



**Slika 10**

Shematski prkaz različnih izvorov vodika, transportnih poti in mikrostrukturnih značilnosti, ki vplivajo na vrsto preloma. Prekinjena črta predstavlja nastajanje cepilnih zlomov hidridne faze.

**Fig. 10**

Schematic presentation of various origins of hydrogen, of transport paths, and of microstructural characteristics which influence the type of fracture. Interrupted line represents the formation of slitting fractures of hydride phase.

**LITERATURA**

1. Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 13 — Corrosion st. 163—173, 283—302, 329—332, 1255—1259
2. M. O. Speidel, P. M. Fourt: Stress Corrosion Cracking nad Hydrogen Embrittlement in Industrial Circumstances, SCC and HE of Iron Base Alloys, June 12—16, 1973, Unieux-Firminy, France, 57—60.
3. H. Spähn, G. H. Wagner, U. Steinhoff: Stress Corrosion Cracking and Cathodic Hydrogen Embrittlement in the Chemical Industry, SCC and HE, Unieux-Firminy, France 1973, 81—109.

4. E. N. Pugh: A Post Conference Evaluation of our Understanding of the Failure Mechanisms, SCC and HE, Unieux-Firminy, France 1973, 37—49
5. M. G. Fontana, R. W. Staehle: *Advances in Corrosion Science and Technology*, Volume 7, Plenum Press — New York, London, 53—162
6. L. L. Shreir: *Corrosion*, Volume 1, 8:5
7. R. N. Parkins: *Environmental Aspects of Stress Corrosion Cracking in Low Strength Ferritic Steels*, st. 601—618, Unieux-Firminy, France 1973, SCC and HE of Iron Base Alloys
8. R. M. Latanision: *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement: Differences and Similarities*, Chicago Symposium-Environment-Sensitive Fracture of Engineering Materials, 1977, 61—64
9. R. Gibala: *Hydrogen Defect Interactions in Iron Base Alloys, SCC and HE of Iron Base Alloys*, Unieux-Firminy, France 1973, 244—270
10. H. K. Birnbaum: *Hydrogen Related Failure Mechanisms in Metals*, st. 331, *Environment-Sensitive Fracture of Engineering Materials*, Symposium Chicago, 1977
11. A. Kawashima: *Corrosion* V. 32, No. 8, 1976, 321—331
12. A. S. Tetelman: *The Mechanism of Hydrogen Embrittlement in Steel*, st. 446—461, *Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking*, Symposium-Ohio State University 1967
13. R. D. Mc Cright: *Effects of Environmental Species and Metallurgical Structure on the Hydrogen Entry into Steel*, st. 306—325, *Stress Corrosion Cracking and HE of Iron Base Alloys*, Unieux-Firminy, France 1973
14. J. F. Newman, L. L. Shreir: *Corrosion Science*, 9, 1969, 631, 1969
15. J. O. M. Bockris: *On Hydrogen Damage and the Electrical Properties of Interfaces*, st. 286—305, *SCC and HE of Iron Base Alloys*, Unieux-Firminy, France 1973
16. A. W. Thompson: *Effect of Hydrogen on Behaviour of Materials*, A. I. M. E., New York, 1976, 467
17. G. Philipponeau, J. Gallard: *Third International Congress on Hydrogen and Materials*, 1982, 761—766
18. M. Smalowski: *Congres International L'hydrogen dans les metaux*, Paris 1972, 300
19. G. E. Kerns, M. T. Wang, R. W. Staehle: *SCC and HE in High Strength Steels* st. 701, Unieux-Firminy, France 1973
20. L. Vehovar, M. Gabrovšek, J. Kotnik: *Korozijska odpornost visokotrdnostnih mikrolegiranih jekel v medijih petrokemije*, Poročilo Metalurškega inštituta, 1989
21. *Perspectives in Hydrogen in Metals*, Edited by M. F. Ashby, J. P. Hirth, Pergomon Press, 1986, 145—162, 259—267, 341—342, 381—385, 421—435, 573—579, 581—687, 693—700, 717—728

## ZUSAMMENFASSUNG

Zahlreiche Beschädigungen in der Prozesstechnik und anderen Industriezweigen verursacht durch Wirkung von atomarem Wasserstoff im Kristallgitter haben Spröde Brüche vitaler Teile der Ausrüstungen und dadurch einen grossen Wirtschaftsschaden zur Folge. Im Interesse der Materialerzeuger, der Hersteller der Einrichtungen und der Verbraucher ist es, dass die Probleme der Wasserstoffsprödigkeit erläutert wer-

den. Die Erkenntnis diesartiger Problematik ermöglicht die Entwicklung und Produktion besserer Materialien mit längerer Lebensdauer und grösserer Sicherheit. Aus dieser Sicht gesehen werden im Artikel verschiedene Beschädigungen wegen der destruktiven Wasserstoffwirkung, gelöst im Kristallgitter von Metallen und dieser Verbindung bedeutsame Mechanismen bzw. Theorien bearbeitet.

## SUMMARY

Numerous damages in chemical process technology and in other industrial branches have the origin in the action of atomic hydrogen in lattice, and they are exhibited in brittle fractures of vital equipment parts, and thus a great economic damages is made. The manufacturers of materials and equipment, and their users are interested to elucidate the problems connected to

the hydrogen embrittlement. This knowledge enables to design and manufacture better materials with longer life and greater safety. From this viewpoint the paper analyzes various damages due to destructive action of dissolved hydrogen in the lattice of metals, the connected mechanisms and theories.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механизм воздействия водорода в металлах и водородная ломкость из-за воздействия атомарного водорода в кристаллической решетки численные повреждения в процессной технике и иных видах промышленности являются причиной ломких изломов основных узлов оборудования, а тем самым и большого хозяйственного ущерба. Интерес изготовителей материалов и оборудования, а также потребителей есть испытать проблему водородной ломкости. Сознания об этой

проблематики нам позволяют проектирование и продукцию лучших материалов, имеющих большую долговечность и качество. С этой точки зрения в статье рассматриваются различные повреждения, являющиеся вследствие деструктивного воздействия водорода, растворенного в кристаллической решетки металлов, а также все более важные механизмы т.е. теории в связи с этим.



## Topologija rasti rekristaliziranih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C v razponu temperature 700 do 800 °C

Franc Vodopivec\*<sup>1</sup>

UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57  
ASM/SLA: J23c

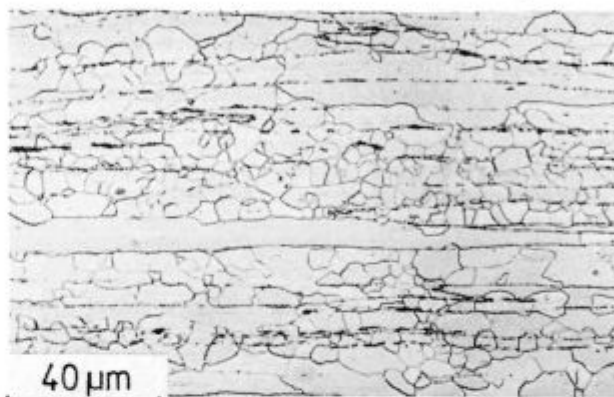
*Izotermna kinetika rasti zrn pri 700 °C, porazdelitev zrn po številu stranic in številom stranic sosedov, ki obkrožajo neko zrno, število stičišč zrn, razmerje med številom stranic in povprečno velikostjo zrn.*

### 1. UVOD IN CILJ DELA

Več razlogov je, zakaj kristalna zrna, ki sestavljajo mikrostrukturo kovin, niso stabilna pri segrevanju pri visokih temperaturah, razen v primerih, ko kovina vsebuje močne inhibitorje, ki v nekem razponu temperature ustavijo ali pa vsaj pomembno zavrejo proces migracije kristalnih mej. Ti razlogi so različna velikost zrn, različno število sosedov in stranic v ravnini opazovanja oz. sosedov v prostoru, sekundarna rekristalizacija s tvorbo teksture, in končno, sprememba sestave kovine med žarjenjem, na primer razogljčenje jekla. V že objavljenih delih sta bila opisana mikromorfologija rekristalizacije z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C jekla in tudi kinetika rasti z rekristaliziranih zrn (1, 2). Kinetika rasti je parabolična s eksponentom  $e = 1/2$ , razogljčenje jekla med žarjenjem pa skokoma pospeši rast zrn, ki pa je tudi sicer hitrejša v jeklu z manj ogljika v trdni raztopini v feritu. To delo je usmerjeno v pojasnitev topologije procesa rasti, torej v spremembo oblike zrn, ki jo opisujeta števili stranic in stičišč ter korelacija teh pojavov s topološkimi značilnostmi prve lupine sosedov, vse v odvisnosti od spremembe velikosti zrn. Pri nizkih temperaturah rast vseh zrn ni enakomerna, ker je odstopanje od ravnotežja različno na različnih mestih. Rast in sprememba oblike zrn sta pri srednjih temperaturah hitrejši tam, kjer je odstopanje od ravnotežja največje; pri visokih temperaturah, ko je mobilnost atomov večja, pa je rast vsesplošna, zato so lahko tudi kinetične zakonitosti drugačne kot pri srednjih temperaturah (Atkinson 3).

### 2. METODIKA DELA

Za laboratorijsko delo smo izbrali jeklo, ki ima mikrostrukturo iz ferita in majhne količine karbidov v temperaturnem razponu med 700 in 800 °C. Količina in velikost karbidnih zrn nista tolikšni, da bi lahko inhibirali proces rasti zrn v uporabljenem razponu temperature. Jeklo vsebuje tudi toliko aluminija in mangana, da nitridni in sulfidni izločki nastanejo že pri strjenju, zato so premalo številni za zaznavno inhibicijo procesa rasti zrn. To temperaturno območje je bilo izbrano iz dveh razlogov. Pri nižjih temperaturah se s procesom primarne rekristalizacije lahko razvijejo velika prizmatična zrna, na obrusku jih vidimo kot do mm dolge enakomerne pasove (slika 1). Ta zrna so relativno stabilna, opazili smo jih deset in



Slika 1.

Nepopolno rekristalizirana mikrostruktura po 10-min. zadržanju jekla pri temperaturi 650 °C

Fig. 1

Uncompletely recrystallized microstructure after 10 minute keeping steel at 650 °C

več minut po tem, ko je bila njihova okolica popolnoma rekristalizirana. Trdota jekla v njih je bila podobna, kot trdota rekristalizirane okolice s poligonalnimi zrni. To je dokaz, da je poprava v silicijevem feritu praktično enako učinkovita kot rekristalizacija pri izločanju deformacijske utrditve. Prizmatično obliko zrn razlagamo namreč z »in situ« rekristalizacijo z rastjo poligonizacijskih zrn, ki je omejena s plastasto porazdelitvijo karbidne faze, nastalo zaradi nizke temperature vročega valjanja. Te oblike odprave deformacijske utrditve pri temperaturi 700 °C nismo več opazili. Razlog zato so hitrejša rekristalizacija ter večja topnost in večji izločki karbidne faze v feritu, zaradi česar plastasta porazdelitev praktično ne omejuje procesa rekristalizacije. Temperaturni razpon preizkusov je bil navzgor omejen pri 800 °C, ker se pri tej temperaturi že pojavlja anormalna rast zrn (slika 2) zaradi anizotropije v energiji kristalnih mej (Rollett, Srolovitz in Anderson, 4), med tem ko anormalne rasti zaradi anizotropije v mobilnosti kristalnih mej nismo opazili.

Tudi čas zadržanja pri temperaturi 700 °C je bil omejen na 10 minut, na višjih temperaturah pa na 5 minut, zato da ni bilo pomembne anormalne rasti zrn.

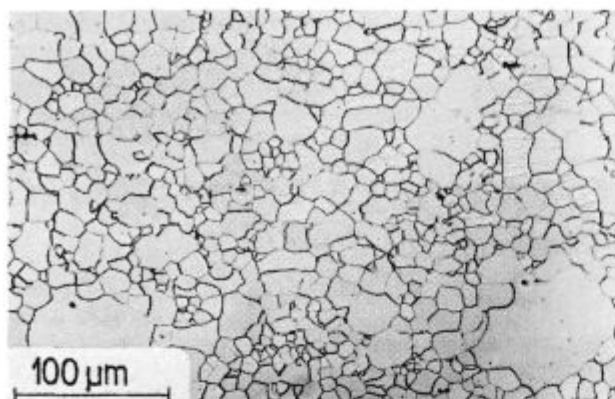
Vse preizkuse smo napravili na pločevini z debelino 0,35 mm, ki je bila hladno izvaljana s stopnjo deformacije okoli 80 %. Žarjenje se je izvršilo v svinčeni kopeli z mešanjem, zato da je bilo segrevanje na delovno temperaturo čim krajše.

Vse meritve velikosti in oblike zrn smo napravili ročno na posnetkih mikrostrukture dvojne standardne velikosti pri povečani 200 do 1000 ×. Na vsakem vzorcu je bilo posneto po več slik, toliko, da je bilo 1500 do 2000 zrn upoštevano pri meritvah linearne velikosti (premera)

\*<sup>1</sup>dr. Franc Vodopivec, dipl. ing. met. — SŽ — Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

\*\* Rokopis prejet: nov. 1990

\*\*\* Originalno objavljeno: ZEB 25 (1991) 1



**Slika 2.**

Mikrostruktura z anormalno rastjo posamičnih zrn po žarjenju 10 min. pri 800°C

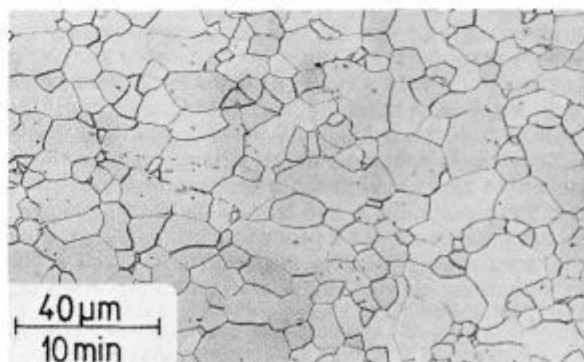
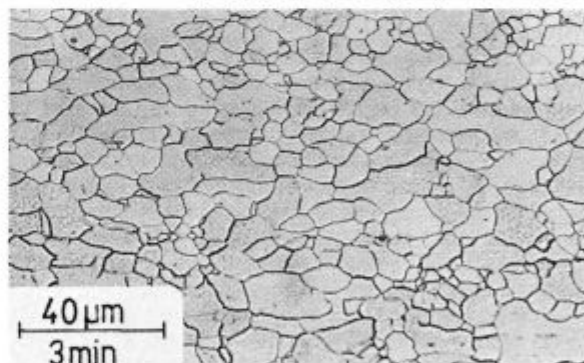
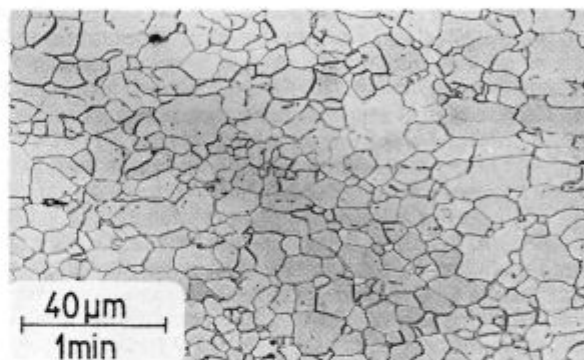
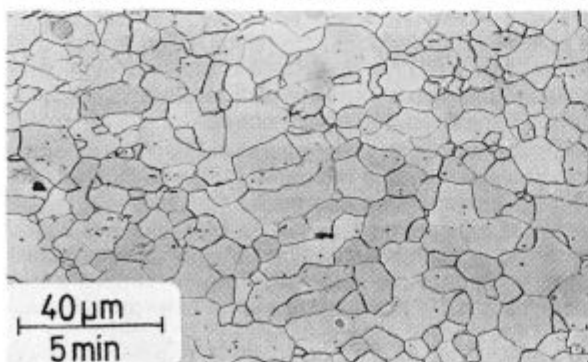
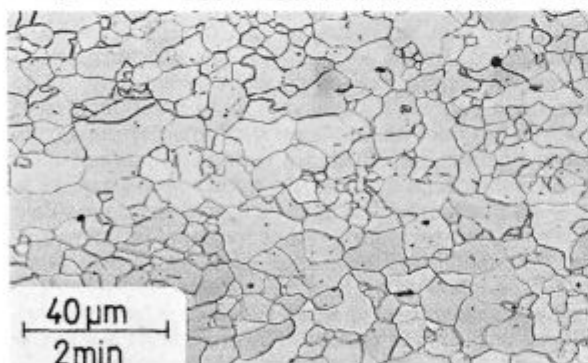
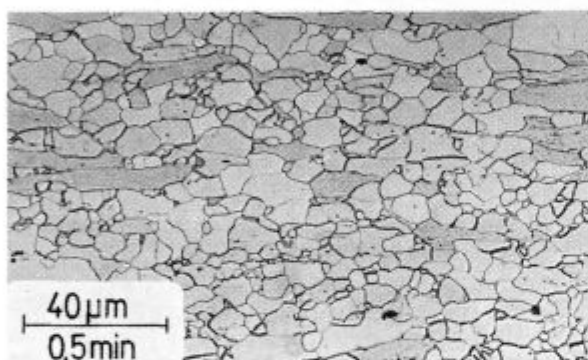
**Fig. 2**

Microstructure with abnormal growth of single grains after 10 minute annealing at 800°C

zrn po metodi linearne intercepcije in po metodi površine ter 500 do 600 zrn pri štetju števila s stranic zrn, torej števila sosedov, stičišč več zrn, stranic sosedov in meritev velikosti posamičnih zrn. Pri stičiščih nismo razločevali med takimi s tremi ali več zrn. V izračunih nismo upoštevali deleža zrn z dvema stranicama, ker je bilo njihovo število pod 0,2%. Opazili pa smo jih v vseh primerih. Rezultate smo obdelali z upoštevanjem sodobnih teorij o kinetiki izotermne rasti rekristaliziranih zrn in teorij o njihovi topologiji.

### 3. KINETIKA IZOTERMNE RASTI ZRN

Na **sliki 3** je prikazana mikrostruktura po 30 sek., 1 min., 2 min., 3 min., 5 min. in 10 min. zadržanja v svinčeni kopeli pri temperaturi 700°C. Na slikah se hitro razločijo nekatere mikromorfološke značilnosti rasti zrn, na primer: zrna so vse večja in bolj poligonalna (torej poliedrična v prostoru), čim daljše je žarjenje; pazljivo opazovanje pa pokaže po 30 sek. žarjenja še precej nerekrystalizirane kovine, pa tudi pri eni minuti zadržanja rekristalizacija še ni popolnoma končana.



**Slika 3.**

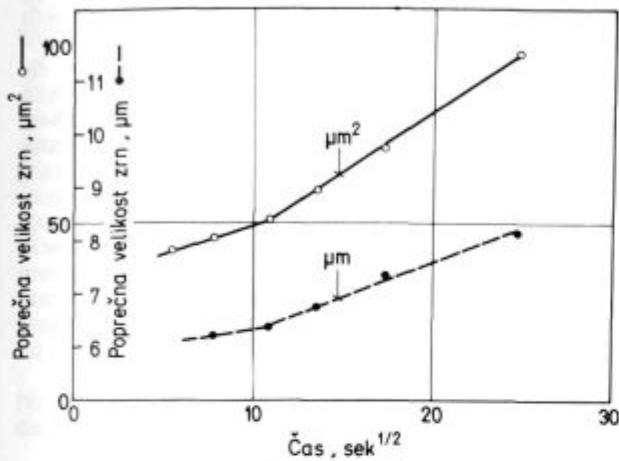
Posnetki mikrostrukture po različno dolgem žarjenju pri 700°C

**Fig. 3**

Photographs of microstructure after varied duration of annealing at 700°C

Na **sliki 4** je prikazana kinetika izotermne rasti za linearno velikost, intercepcijsko dolžino  $R$ , v grafikonu je zapisana kot povprečna velikost zrn v  $\mu\text{m}$  in za povprečno površino zrn v  $\mu\text{m}^2$  (A). Kinetika v obeh primerih sledi isti parabolični zakonitosti

$$R = R_0 + k_1 t^{1/2} \text{ oziroma } A = A_0 + k_2 t^{1/2}$$



**Slika 4.**

Kinetika izotermne rasti zrn pri 700°C. Velikost zrn je izražena s povprečno površino in z intercepcijsko dolžino, ki je sorazmerna premeru zrn

**Fig. 4**

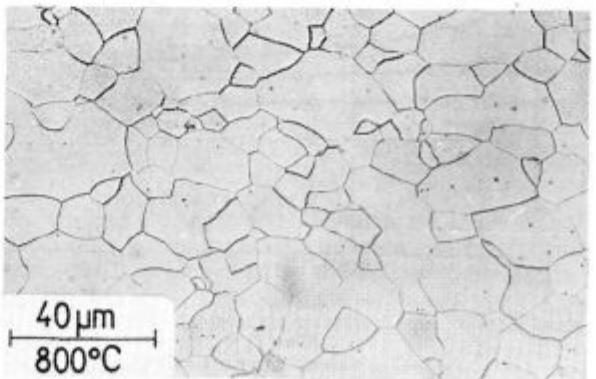
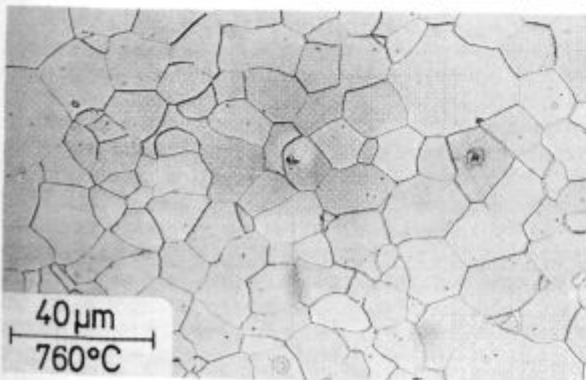
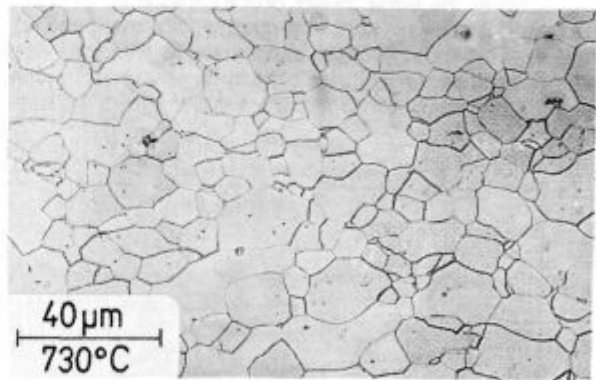
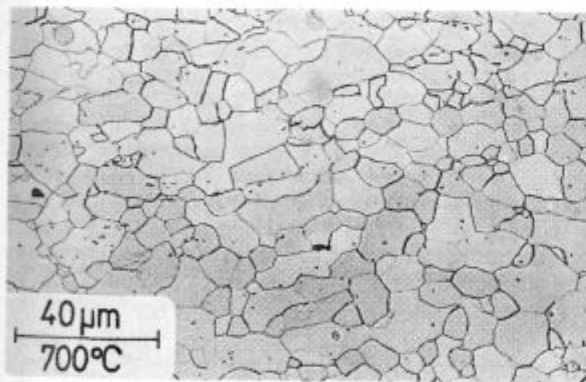
Kinetics of isothermal grain growth at 700°C. The grain size is expressed by the average surface area and with the intercept length being proportional to the grain diameter

v katerih sta  $k_1$  in  $k_2$  različni parabolični konstanti rasti,  $t$  pa je trajanje žarjenja. V obeh prikazih, linearnem in v površinskem je na odvisnosti prelom pri ca. 2 min. izotermnega zadržanja. Pod to časovno mejo je rast počasnejša, nad njo pa hitrejša. Počasnejša rast pri nižji temperaturi je najverjetneje dokaz nedokončane rekristalizacije.

Zaradi nastanka novih majhnih zrn je rast prej nastalih zrn navidezno počasnejša. Po teoriji, ki sta jo postavila Burke in Turnbull (5), je parabolična kinetika dokaz, da je gonilna sila za rast zrn razlika v ukrivljenosti meje zrna. Po tej teoriji transport atomov preko meje poteka v smeri središča ukrivljenosti, torej konkavna meja napreduje na račun konveksne.

V obsežnem pregledu o procesih rasti zrn navaja Atkinson (3) številne primere odstopanja od parabolične kinetike z eksponentom  $e = 1/2$ . Večino teh odstopanj pripisujejo parcialni inhibiciji migracije, najbolj pogosto vplivu nečistoč, ki so na mejah obogatene v trdni raztopini (solute drag). Raziskave serije jekel s podobno sestavo so tudi v preteklosti pokazale parabolično kinetiko rasti zrn z eksponentom  $e = 1/2$  (1, 2) ter skokovito povečanje rasti zaradi razogljčenja pri časih, daljših od 10 min. ali pri temperaturah nad 800°C.

Na **sliki 5** je prikazana mikrostruktura po 5 min. zadržanju pri temperaturah 700, 730, 760 in 800°C, na **sliki 6** pa je prikazana odvisnost med premerom zrn in povprečno površino zrn ter absolutno temperaturo. Odvisnost je eksponencialna Arheniusova s prelomom pri okoli 760°C. Nad to mejo so zrna večja. To ne pomeni, da je pri višji temperaturi rast rekristaliziranih zrn hitrejša, nasprotno zaradi povečanja količine ogljika v trdni raztopini v feritu je celo počasnejša, kot bi pričakovali na osnovi

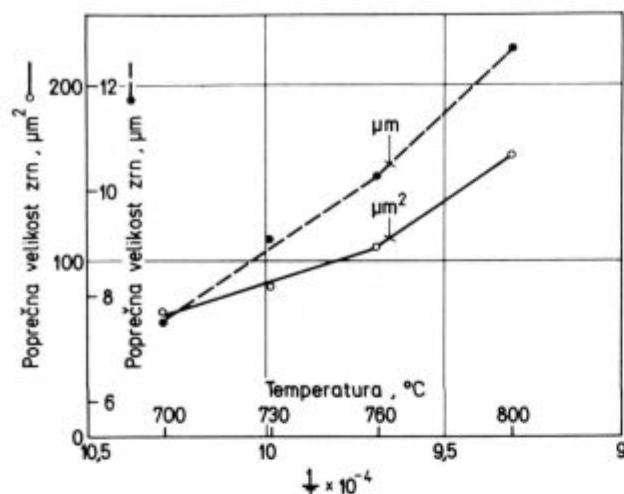


**Slika 5.**

Posnetki mikrostrukture po petminutnem žarjenju pri označenih temperaturah

**Fig. 5**

Photographs of the microstructure after 5 minute annealing at mentioned temperatures



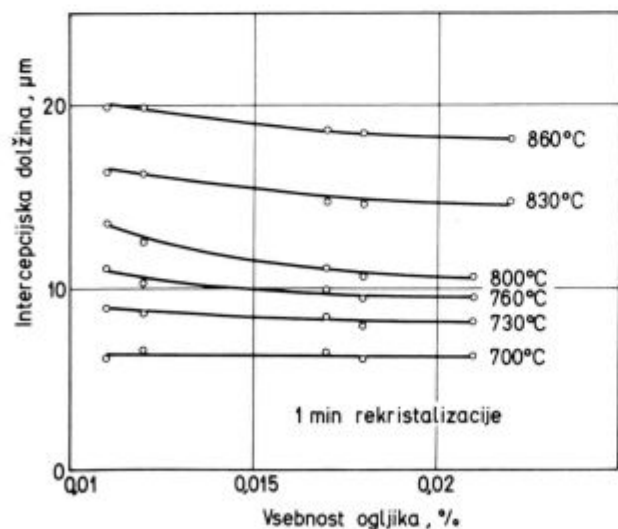
Slika 6.

Vpliv temperature na povprečno velikost zrn po petminutnem žarjenju

Fig. 6

Influence of temperature on the average grain size after 5 minute annealing

ekstrapolacije z nižjih temperatur. Večja zrna pri 800° so rezultat večje začetne velikosti rekristaliziranih zrn. Dokaz za to trditev je **slika 7** (6), ki kaže velikost rekristaliziranih zrn v jeklih iste vrste, vendar z različno vsebnostjo ogljika po 1 min. zadržanja pri različnih temperaturah. Očitno je, da ogljik vpliva na proces rasti zrn in da so pri enakih pogojih zrna tem večja oziroma rast je tem hitrejša, čim manj je ogljika v trdni raztopini v ogljiku. To kaže na možnost, da ogljik zavira proces migracije zaradi segregacije po mejah, ki je tem manjša, čim manj ima jeklo ogljika. Mobilnost atomov ogljika pa je tolikšna, da se zavorna sila segregacije ne odraža na eksponentu kinetike rasti, ki ostaja parabolna z eksponentom 1/2.



Slika 7.

Vpliv količine ogljika na velikost zrn po 1-min. žarjenju pri različnih temperaturah

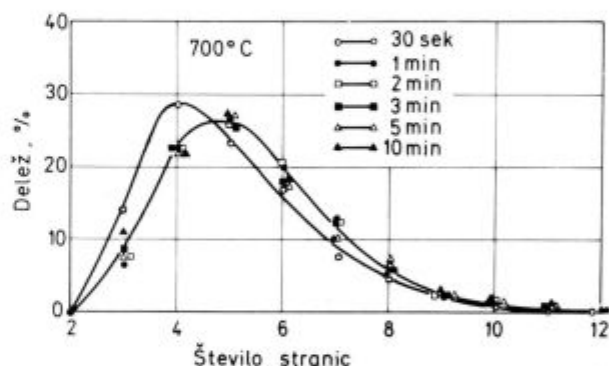
Fig. 7

Influence of carbon content on the grain size after 1 minute annealing at various temperatures

#### 4. ŠTEVILO STRANIC KRISTALNIH ZRN

V procesu normalne rasti zrn ostaja porazdelitev zrn po številu stranic (sosednjih zrn) konstantna (3). Razlog je, da se proces rasti zrn odvija brez prekinitve in bi se ustavil le, če bi imela vsa zrna šesterokotno obliko in enako velikost s kotom 120° v stičišču. Tega pa v realnih mikrostrukturah ni, zato zrna z manj kot 6 stranicami nprestanost nastajajo, ker se z zmanjševanjem velikosti zmanjšuje tudi število stranic (Hillert 7), čeprav pri tem raste povprečna velikost vseh zrn. V vseh primerih porazdelitev ni log normalna, torej ne dobimo premice, če narišemo kumulativno pogostost v odvisnosti od števila stranic. Po najkrajšem, 30 sek. segrevanju, ima največ zrn 4 stranice, po 1 do 10 minut zadržanja pri temperaturi pa je porazdelitev zrn po številu stranic identična v razponu standardne deviacije (**slika 8**). Največje je število zrn s 5 stranicami, v vseh časovnem razponu segrevanja pa je delež zrn s 4 stranicami večji od deleža zrn s šestimi stranicami. Na **sliki 9** vidimo, da ostaja pri enakem času zadrževanja pri temperaturah 700 in 730°C porazdelitev enaka, pri temperaturah 760 in 800°C pa naraste delež zrn s 6 stranicami, ki jih je največ po žarjenju pri 800°C.

Na **sliki 10** sta prikazana vpliv trajanja zadržanja pri 700°C in 5 min. zadržanja v razponu temperature 700 do

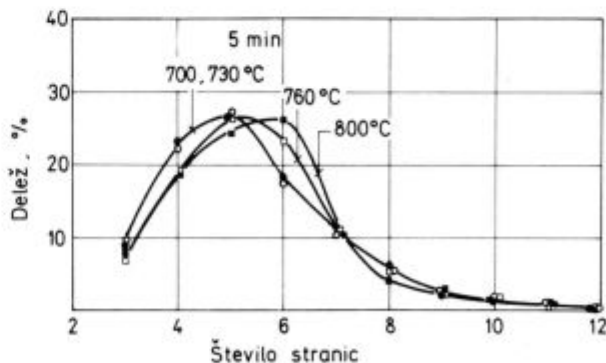


Slika 8.

Delež zrn z naraščajočim številom stranic po različno dolgem žarjenju pri 700°C

Fig. 8

Part of grains with the increasing number of sides after varied durations of annealing at 700°C

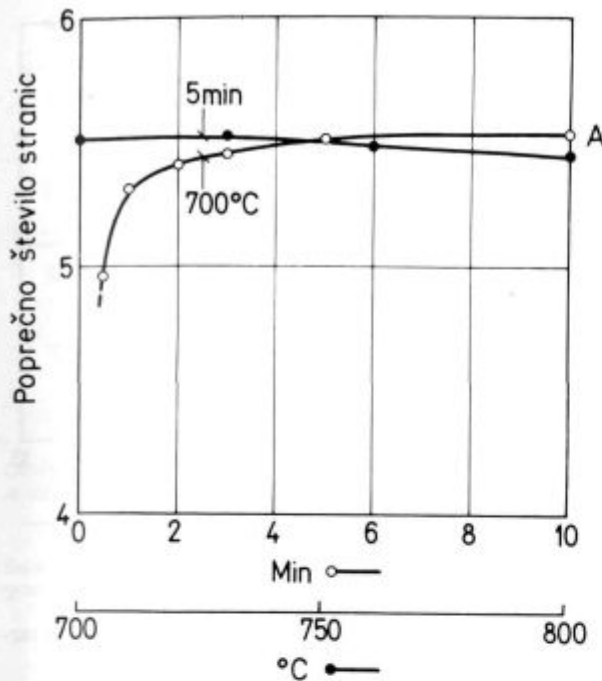


Slika 9.

Delež zrn z različnim številom stranic po 5-min. žarjenju med 700 in 800°C

Fig. 9

Part of grains with varied number of sides after 5 minute annealing between 700 and 800°C



Slika 10.

Povprečno število stranic sosedov v odvisnosti od trajanja izotermnega žarjenja pri 700°C in po 5-min. žarjenju v razponu med 700 in 800°C

Fig. 10

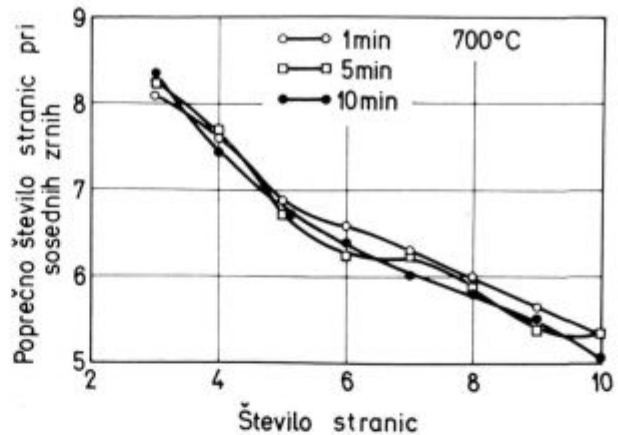
Average number of sides of neighbouring grains depending on the duration of isothermal annealing at 700°C, and after 5 minute annealing between 700 and 800°C

800°C na povprečno število stranic zrn. To število s časom raste, vendar se že po 5 min. zadržanju asimptotično približa vrednosti 5,55. Iz tega sklepamo, da idealne in ravnolične šesterkotne oblike zrn v tem materialu ni mogoče doseči pri tehničnih časih zadržanja pri temperaturah razogljčenja in rekristalizaciji neorientirane elektropločevine. Povprečno število stranic se nekoliko zmanjšuje z naraščanjem temperature, vendar so razlike znotraj standardne deviacije štetja, ki je pri zrnih z največ stranicami sicer pod 5 %, pri zrnih z mnogo stranicami pa dosega do 10 %, če se med seboj primerjajo rezultati štetja na več mikroposnetkih istega vzorca.

### 5. ŠTEVILO STRANIC SOSEDNIH ZRN

Proces migracije kristalnih mej, torej proces rasti zrn, se odvija z napredovanjem in nazadovanjem meje dveh zrn. Zato nam podatek o tem, kolikšno je število stranic sosednega zrna da tudi predstavo o povprečni stabilnosti vsakega zrna. Rezultate za tri čase zadržanja pri 700°C prikazuje slika 11. Število stranic sosednih zrn se zmanjšuje, ko raste število stranic zrna, ki leži med njimi. Odvisnost bi lahko približali dvema premicama z različnim naklonom, ki se sekata približno pri povprečnem številu stranic 5,55. Torej, čim več stranic ima neko zrno, tem manj stranic imajo povprečno njegovi sosedji. To je logično. Kasneje bomo namreč videli, da so zrna z več stranicami večja, zato bolj stabilna in požirajo svoje sosedje, ki se zmanjšujejo in se jim zmanjšuje tudi število stranic.

Temperatura zadržanja vpliva na število stranic pri sosedih, močneje pri zrnih z malo stranicami, ki se zmanjšuje, ko temperatura raste do 760°C, nato pa je



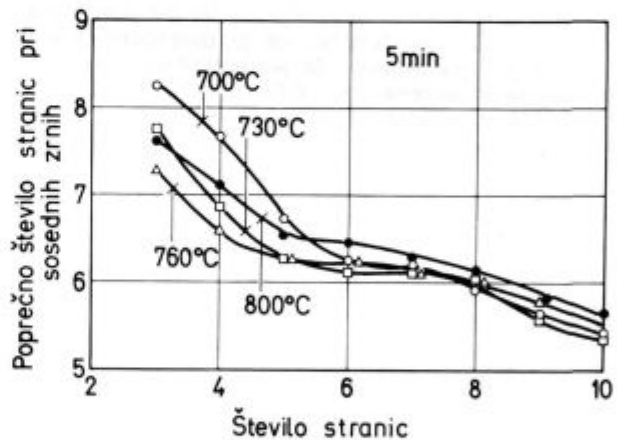
Slika 11.

Razmerje med številom stranic nekega zrna in povprečnim številom stranic sosedov, ki ga obkrožajo, za tri čase žarjenja pri 700°C

Fig. 11

Ratio between the number of sides of a grain and the average number of sides of the neighbouring grains, for three various times of annealing at 700°C

znova večje po žarjenju pri 800°C (slika 12). Sprememba je verjetno v zvezi s količino ogljika v raztopini v feritu, ki pa je v tem trenutku ne znano razložiti, lahko pa kaže tudi na vpliv kakega drugega dejavnika.



Slika 12.

Razmerje med številom stranic nekega zrna in povprečnim številom zrn sosedov, ki ga obkrožajo po 5-minutnem žarjenju v razponu 700 do 800°C

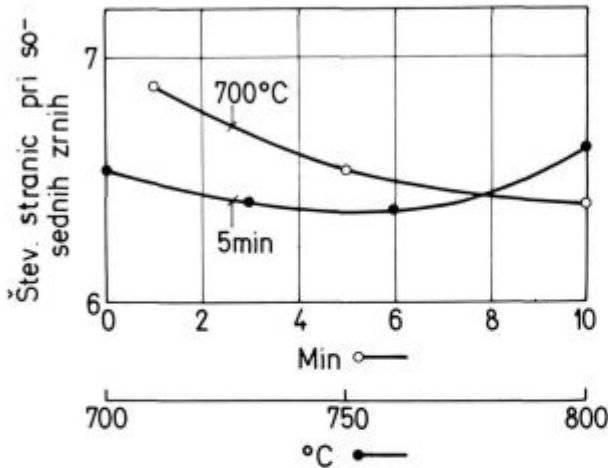
Fig. 12

Ratio between the number of sides of a grain and the average number of sides of neighbouring grains after 5 minute annealing between 700 and 800°C

Povprečno število stranic sosednih zrn je pri 700°C odvisno od trajanja žarjenja v temperaturnem razponu 700 do 800°C, spreminja pa se tudi pri izohromem žarjenju (slika 13). Po Weaireu (8) je število stranic nekega zrna ( $n$ ) povezano s številom stranic njegovih sosedov z izrazom

$$m_n = 5 + \frac{6 + \mu}{n}$$

V izrazu je  $\mu$  varianca števila stranic, ki se izračuna iz izraza



Slika 13.

Povprečno število stranic sosednih zrn v odvisnosti od časa žarjenja pri 700°C in temperature v razponu med 700 in 800°C

Fig. 13

Average number of sides of neighbouring grains depending on the annealing time at 700°C and on the temperature in the range between 700 and 800°C

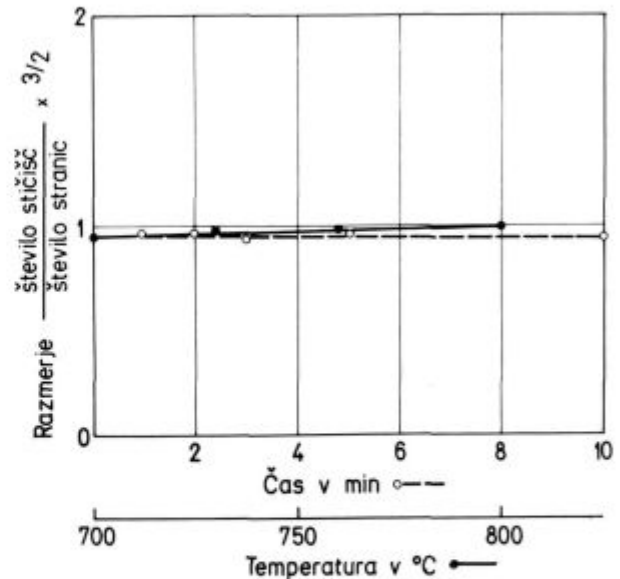
$$\mu = \sum_{i=1}^{\infty} (i-6)^2 f_n$$

s  $f_n$  deležem zrn z  $n$  stranicami.

Poglejmo, kako se empirični rezultati ujema s to odvisnostjo. Za 5 min. zadržanje pri temperaturi 700°C je  $\mu = 3,27$ . Če upoštevamo, da je povprečno število stranic 5,50, izračunamo, da je teoretično povprečno število stranic sosedov  $m_n = 6,68$ . Empirično je za iste pogoje žarjenja določeno  $m_n = 6,54$ , kar je zadovoljivo ujemanje. Ujemanje je še boljše v primeru 5 min. žarjenja pri 800°C, kjer je izračunano  $m_n = 6,69$ , empirično pa določeno  $m_n = 6,62$ . V drugih primerih so razlike večje. Odstopanja niso velika, pa tudi ne sistematična in njihovo poreklo je verjetno tudi statistično odstopanje meritev. Varianca  $\mu$  je namreč v razponu od 3,23 do 2,83. Če upoštevamo povprečno varianco vseh meritev, razen za 1 min. zadržanje pri 700°C, izračunamo po Weairu, da je povprečno  $m_n = 6,64$ , povprečno empirično pa je določeno  $m_n = 6,55$ , kar je zadovoljivo ujemanje in potrjuje teoretično predvidevanje. Odstopanje je večje v primeru, ko zrna rastejo v nepopolnoma rekristaliziranem okolju, ali pa, če kak nov efekt vpliva na mobilnost kristalnih mej, na primer že omenjene segregacija ogljika po mejah zrn.

## 6. STIČIŠČA TREH ALI VEČ ZRN

Vsako zrno ima toliko stranic, kolikor ima v dvodimenzionalni ravnini mest, kjer se dotika svojih sosedov, ponavadi treh, redko štirih. Vendar pa v realni mikrostrukturi število stranic ni enako številom stičišč, ker stranice ( $n$ ) pripadajo samo dvema zrnoma, stičišča ( $s$ ) pa trem ali več zrnoma. Na sliki 14 je prikazano razmerje  $3s/2n$  v odvisnosti od izotermnega zadržanja pri 700 in od izohronega zadržanja v razponu temperature 700 do 800°C. Razmerje je konstantno pri 700°C in rahlo raste, ko raste temperatura, vendar ostaja vedno pod 1. Torej je stičišč 4 zrn tem manj, čim višja je temperatura žarjenja, vendar pa je razlika majhna in neodvisna od časa zadržanja 1 do 10 minut pri 700°C, pri katerem zrna zrastejo več kot dvakrat. Pri 700°C je ca. 5% stičišč s 4 zrn, pri 800 pa okoli 1%. V obeh primerih je to število majhno



Slika 14.

Vpliv trajanja žarjenja pri 700°C in med 700 do 800°C na razmerje števila stičišč do števila stranic

Fig. 14

Influence of annealing time at 700°C, and in the range 700 to 800°C on the number of contact points/number of sides ratio

in je zato vprašljivo, koliko stičišča s 4 zrn v 2-dimenzionalni ravnini, ki so manj stabilna od stičišč s tremi zrn (9), pomembno vplivajo na kinetiko rasti zrn.

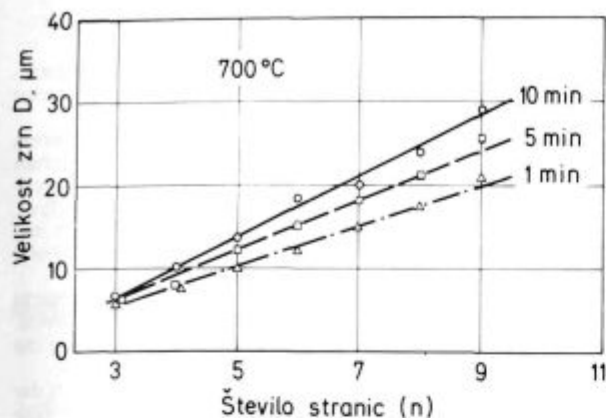
## 7. VELIKOST ZRN Z RAZLIČNIM ŠTEVILOM STRANIC

Teorija predvideva, da so zrna z več stranicami večja iz dveh razlogov. Eden je, da je pri njih zaradi poliedrične oblike z več ploskvami, ki se bolj približujejo krogli, delež površinske energije proti celotni energiji manjši, zato je tudi manjša skupna energija zrna, drugi pa je, da se zrna z več kot 6 stranicami lahko uredijo v prostorski sklad le, če so njihove meje konkavne, med tem imajo zrna z manj kot 6 stranicami konveksne meje (3). Opazovanje realnih mikrostruktur na obrusku včasih pokaže, da raste zrno z manj stranicami v 2-dimenzionalni ravnini na račun zrna z več stranicami. Razlaga za tak primer je v preseku poliedrov, ki imata v prostoru različno število ploskev, pri čemer je lahko presek čez tistega, ki ima več ploskev prostoru, v 2-dimenzionalni ravnini poligon z manj stranicami. V povprečju pa zrna z več stranicami rastejo na račun zrn z manj stranicami. Na sliki 15 je prikazana odvisnost med številom stranic in linearno velikostjo zrn za tri čase žarjenja pri 700°C. V vseh primerih povprečna velikost zrn ( $R$ ) raste proporcionalno s številom stranic. Odvisnost opisuje enačba:

$$R = k_3 (n - n_0)$$

z  $n_0 = 1$ . To odvisnost je empirično ugotovilo že več avtorjev (8, 9, 10), z računalniško simulacijo so jo potrdili Rollovitz in sodelavci (11), ki so tudi našli, da je  $n_0 = 2$ , teoretično pa jo je utemeljil Rivier (12). Je logična, zato ker proces rasti poteka na mejah.

Izohromno zadržanje v temperaturnem razponu 700 do 800°C (slika 16) kaže tudi enako odvisnost med številom stranic in povprečno velikostjo, z  $n_0$  nekoliko pod 1. Velja ponovno opozoriti, da sta odvisnosti za temperaturi 700 in 730°C zelo blizu in znatno nižji kot odvisnosti za 760 in 800°C.

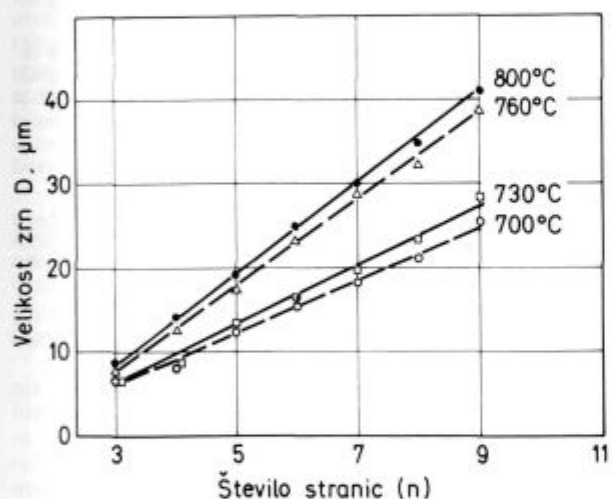


Slika 15.

Odvisnost med številom stranic in povprečno velikostjo zrn, ki je izražena s povprečnim premerom D za tri različne čase žarjenja pri 700 °C

Fig. 15

Relationship between the number of sides and the average grain size, expressed by the average diameter D for three various times of annealing at 700 °C



Slika 16.

Odvisnost med številom stranic zrn in povprečno velikostjo zrn, ki je izražena s povprečnim premerom D za 5-minutno žarjenje v razponu temperature 700 do 800 °C

Fig. 16

Relationship between the number of grain sides and the average grain size, expressed by the average diameter D for 5-minute annealing between 700 and 800 °C

## SKLEPI

Izvršena je topološka analiza procesa rasti feritnih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C v temperaturnem intervalu 700 do 800 °C in v trajanju do 10 min. žarjenja. Za poskuse je bila uporabljena 0,35 mm debela pločevina, hladno deformirana nad 80 %. Žarjenje se je izvršilo v svinčeni kopeli. Velikost zrn in podatki za ovrednotenje njihove oblike so dobljeni z ročnim merjenjem in štetjem na posnetkih s povečavo 200 in 1000 × z dvojno standardno velikostjo.

Raziskava je pokazala naslednje:

— kinetika izotermne rasti rekristaliziranih zrn pri 700 °C sledi parabolični odvisnosti z koeficientom  $e = 1/2$ , ne glede na to, ali se meri površina zrna ali pa njihov premer;

— v procesu rasti zrn ostaja porazdelitev zrn po številu stranic konstantna in anormalna. Največ zrn ima 5 stranic, povprečje pa pri trajanju žarjenja nad 5 min. pri 700 °C limitira k 5,55 stranicam. S povišanjem temperature se porazdelitev pomika k večjemu deležu zrn s 6 stranicami;

— število stranic sosedov ( $n_s$ ) nekoga zrna se zmanjšuje, ko raste število stranic zrna med njimi ( $n_p$ ). V grobem približno velja, da je povprečno število stranic sosednih zrn  $n_s \approx n_p + 1$ . Sicer pa  $n_s$  rahlo pada pri žarjenju 1 do 10 min. pri 700 °C, po pet minutnem žarjenju pa je nižje pri 730 in 760 °C, kot pri 700 in 800 °C;

— število stičišč štirih zrn dosega največ 4 % celotnega števila stičišč zrn. Iz tega sklepamo, da stičišča ne vplivajo pomembno na kinetiko rasti zrn;

— linearna velikost zrn je sorazmerna številu njihovih stranic v vsem časovnem in temperaturnem razponu žarjenja jekla.

## LITERATURA

1. F. Vodopivec, F. Marinšek: Steel Research 57, 1986, 10, 531
2. F. Vodopivec, F. Marinšek, F. Grešovnik, O. Kürner: Želzarski Zbornik 21, 1987, 1, 29
3. H. V. Atkinson: Acta Metallurgica 36, 1988, št. 3469
4. A. D. Rollett, D. J. Srolovitz, M. P. Anderson: Acta Metallurgica 37, 1989, 4, 1227
5. J. E. Burke, D. Turnbull: Progr. Met. Phys. 1952, 220
6. F. Vodopivec, F. Marinšek: Poročilo MI Ljubljana, 88.034, 1988
7. M. Hillert: Acta Metallurgica 13, 1965, 227
8. C. H. Desch: J. Inst. Metals 22, 1919, 241, Loc. cit. ref. 12
9. P. A. Beck: Adv. Phys. 3, 1954, 245. Loc. cit. ref. 12
10. D. A. Aboav, T. G. Langdon: Metall. 1, 1969, 333 in 2, 1969, 171. Loc. cit. ref. 12
11. D. J. Srolovitz, M. P. Anderson, P. S. Dahni in G. S. Grest: Acta Metallurgica 32, 1984, 793
12. N. Rivier: Philosophical Magazine B, 52, No. 3, 1985, 795

## ZUSAMMENFASSUNG

Topologische Analyse des Ferritkornwachstumsprozesses im Stahl mit 1,8 % Si, 0,3 % Al und 0,02 % C im Temperaturintervall 700 bis 800 °C und einer Glühzeit bis 10 Min. ist durchgeführt worden. Für die Untersuchungen ist 0,35 mm starkes kaltgewaltes Blech mit einem Verformungsgrad über 80 % angewendet worden. Das Glühen ist im Bleibad durchgeführt worden. Korngrösse und Angaben für die Bewertung deren Form sind durch Handmessungen und Zählung auf Aufnahmen 200× und 1000× mit zweifacher Standardgrösse, erreicht worden.

Untersuchungen haben folgendes gezeigt:

— Die Kinetik von isothermen Wachstum der rekristallisierten Körner bei 700 °C folgt der parabolischen Abhängigkeit mit dem Koeffizienten  $e = 1/2$  unabhängig davon ob die Kornfläche oder deren Durchmesser gemessen wird;

— Im Kornwachstumsprozess bleibt die Kornverteilung nach der Seitenzahl konstant und abnormal. Die grösste Zahl der Körner hat 5 Seiten. Der Durchschnitt limitiert bei einer

Glühzeit über 5 Min bei 700 °C zu 5,55 Seiten. Mit der Temperaturerhöhung verschiebt sich die Verteilung zu grösserem Anteil der Körner mit 6 Seiten.

— Die Seitenzahl von benachbarten Körnern ( $n_s$ ) eines Kornes wird kleiner von der Zahl der Seiten des Kornes zwischen denen ( $n_c$ ) er wächst. In grober Annäherung gilt, dass die durchschnittliche Zahl der Seiten von Nachbarkörnern  $n_s \approx n_c + 1$  ist. Anderfalls fällt  $n_s$  nur sanft beim Glühen von 1 bis 10 Min. bei 700 °C. Nach fünfminütiger Glühung ist es niedriger bei 730 und 760 °C als bei 700 und 800 °C;

— Die Zahl der Kontaktpunkte von vier Körnern erreicht höchstens 4 % von der Gesamtzahl der Kornkontaktpunkte. Daraus kann entnommen werden, dass die Kontaktpunkte die Kornwachstumskinetik nicht bemerkenswert beeinflussen;

— Die lineare Korngrösse ist verhältnismässig gleich der Seitenzahl im gesamten Zeit und Temperaturintervall der Glühung von Stahl.

## SUMMARY

The topology analysis of the ferrite grain growth process in steel with 1.8 % Si, 0.3 % Al, and 0.02 % C was made in the temperature range 700 to 800 °C, and for up to 10 minutes annealing. Tests were made with a 0.35 mm thick sheet, being cold deformed for over 80 %. The annealing was done in the lead bath. The grain sizes and the data for the evaluation of their shapes were determined by manual measuring and counting on photographs at magnifications of 200 and 1000 times with double standard size.

The investigation gave the following conclusions:

— kinetics of isothermal recrystallized grain growth at 700 °C follows the parabolic law with the coefficient  $e = 1/2$  regardless to the measured surface area or diameter of grains;

— in the grain growth process the distribution of grains according to the number of their sides remains constant and abnormal. The majority of grains has 5 sides while the average number for a 5 minute annealing at 700 °C approaches to the

value of 5.5 sides. The increased temperature shifts the grain distribution towards those with 6 sides.

— the number of sides of neighbouring grains ( $n_s$ ) is reduced with the increased number of sides of a central grain ( $n_c$ ). In rough approximation the average number of sides of neighbouring grains is  $n_s \approx n_c + 1$ . Further, a slight reduction of  $n_s$  was observed in progressive annealing from 1 to 10 minutes at 700 °C, after 5 minute annealing it was lower at 730 and 760 °C than at 700 and 800 °C;

— number of four-grain contact points does not exceed 4 % of total number of grain contact points. Thus the conclusion can be made that contact points do not essentially influence the kinetics of grain growth;

— linear grain size is proportional to the number of the grain sides in the overall time and temperature intervals of annealing steel.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен был топологический анализ процесса роста ферритных зерн в стали с 1,8 % Si, 0,3 % Al и 0,02 % C в температурном интервале 700 до 800 °C и с продолжительностью 10 мин. отжига. Для испытания использовали холоднодеформированный (свыше 80 %) лист толщиной 0,35 мм. Отжиг произведен в свинцовой ванне. Величина зерн и данные, необходимые для оценки их формы, получены ручным измерением и вычислением на съёмках, увеличенных на 200 и 1000 раз с двойным стандартным размером.

Испытание показало следующее:

— кинетика изотермического роста рекристаллизованных зерн следит за параболической зависимости с коэффициентом  $e = 1/2$ , независимо от того измеряем ли поверхность зерн или их диаметр;

— в процессе роста зерн остается разделение зерн по числу сторон константно и аномально. Большинство зерн имеет 5 сторон, при отжиге продолжительностью свыше

5 мин при 700 °C число сторон в среднем лимитирует к 5,55 сторон. Повышением температуры разделение зерн по числу сторон имеет тенденцию повышения доли зерн с 6 сторонами;

— число сторон соседей ( $n_c$ ) одного зерн уменьшается с ростом число сторон зерн между ними ( $n_n$ ). В основном можем сказать, что среднее число сторон соседних зерн составляет  $n_c \approx n_n + 1$ . Ну,  $n_c$  несколько уменьшается при отжиге 1 до 10 мин и при 700 °C, а после 5 мин отжига является меньшим при 730° и 760 °C чем при 700° и 800 °C;

— число точек соприкосновения 4 зерн достигает макс. 4 % общего числа точек соприкосновения зерн, из чего можно заключить, что точки соприкосновения не имеют большего значения за кинетику роста зерн;

— линейная величина зерн является соразмерной числу их сторон во всем временном и температурном интервале отжига стали.



## Reševanje stacionarnega in nestacionarnega temperaturnega polja po metodi končnih elementov na PC računalnikih

Marjan Bolčina\*<sup>1</sup>

UDK: 536.241:669.046:621.78.012.5:681.3.06  
ASM/SLA: J2g, D6, U4g, U4k

S hitrim razvojem računalniške tehnologije se v inženirski praksi vse pogosteje uporabljajo numerične metode reševanja konkretnih problemov reševanja polj, opisanih z diferencialnimi enačbami. Danes je takšen način projektiranja ekonomsko in kakovostno upravičen in postaja nujen.

Naša naloga je reševanje nestacionarnih temperaturnih polj poljubnih objektov in izdelava ustreznega računalniškega programa. Pri tem imamo lahko definirane kot robne pogoje vsiljene temperature ali toplotne tokove ali notranje izvore toplotnega toka, ki jih povzročajo električni tok. Tako lahko projektiramo (glede na temperaturno polje) objekte, kot na primer: hladilna telesa, segrevanje kovinskih in izolacijskih delov, temperaturno obremenljivost el. zbiralk, indukcijsko kaljenje in indukcijsko taljenje kovin.

### UVOD

V nadaljevanju torej iščemo rešitev dvodimenzionalnega ali aksisimetričnega trodimenzionalnega, časovno odvisnega temperaturnega polja, ki ga na objektu poljubne geometrije poleg materiala in okolice povzročajo vsiljene temperature, toplotni tokovi in toplotni izvori (električni tokovi).

Ker ne obstaja splošna analitična metoda za reševanje problemov takšne vrste, moramo iskati rešitve z numeričnimi metodami ali s simulacijo konkretnega primera na analognem računalniku. Ker so ustrezni analogni računalniki zelo dragi, praktično vedno uporabljamo numerične metode, prirjene za digitalne računalnike. Numerične metode v splošnem ločimo na metodo končnih diferenc in metodo končnih elementov. Izbira metode se vse močnejše nagiba v korist metode končnih elementov.

Pri uporabi metode končnih elementov objekt poljubne oblike razdelimo na poljubne končne elemente znane geometrije. Na splošno velja, da večje število končnih elementov (manjši, kot so), poveča natančnost iskane rešitve sistema. Natančnost rešitve pa je odvisna tudi od predvidene funkcije polja znotraj elementa. Izbrali smo trikotno obliko končnega elementa, ker z njo najlažje opišemo poljubno obliko obravnavanega objekta. Zaradi znanih prednosti naravnih (area) koordinat pred Katerzijevimi (lažje integriranje, singularnost matrik) smo izvedli ustrezne transformacije.

### STACIONARNO STANJE

S stališča stacionarnega prenosa toplote nas je zanimala temperaturna porazdelitev po posameznih elemen-

tih indukcijske lončne peči, še posebej pa temperaturni gradient v ovoju induktorja. Induktor se namreč greje zaradi prevajanja izmeničnega električnega toka, ki zaradi skin efekta ni enakomerno porazdeljen po bakrenem profilu, pa tudi zaradi prevajanja toplote taline skozi ognjeodporno obzidavo.

### NESTACIONARNO STANJE

Število sarž, ki jih lahko stopimo z enkrat pripravljeno ognjeodporno obzidavo, je odvisno tudi od temperature, ki jo doseže talina na meji z obzidavo. To področje prenosa toplote je v časovnem prostoru relativno neraziskano, zato smo si zadali nalogo, da to problematiko natančneje obdelamo. Ker se indukcijska lončna peč v prvi aproksimaciji obnaša kot integrator vhodne moči, moramo omenjeno problematiko reševati v nestacionarnem časovnem področju.

Kot bomo videli kasneje, se največ električne energije v vložku pretvori v toploto prav ob obzidavi. Ta je direktno odvisna od moči peči in frekvence napajalne električne napetosti. Zato lahko prihaja na teh mestih do neželjenih nadtemperatur, ki presegajo dovoljeno temperaturo neke ognjeodpore obzidave, medtem ko vložek na sredini še ni dosegel niti temperature taljenja. (Dobljene rezultate pa bi lahko uporabili tudi na področju kaljenja ali toplotnega čiščenja).

Pri reševanju električnega dela indukcijske lončne peči smo pristopili k izvornemu načinu. Rezultat analitične analize teoretičnega izhodišča, podanega s Fredholmovo integralno enačbo II. vrste

$$E_s(J_e, J_m) - 1/J_e = E_o(J_o)$$

$$H_s(J_e, J_m) - 1/J_m = H_o(J_o)$$

je specialni programski paket IMF-CAD, ki iz geometrijskih in snovnih parametrov konstruirane peči izračuna električne veličine (el. impedanco, el. napetosti, el. tokove itd) v posameznih točkah indukcijske lončne peči (7). Pri tem je za numerični izračun uporabljena metoda končnih elementov. Rezultati so podani numerično (tabelarno) in grafično. Izhodni podatki iz tega programa za dano peč (el. tokovi) so tudi vhodni podatki za analizo prenosa toplote, kar je cilj naše naloge. Podrobnejši opis tega programa presega namen tega dela.

### REŠEVANJE DIFERENCIALNE ENAČBE PRENOSA TOPLOTE PO METODI KONČNIH ELEMENTOV

Računalniški program je napisan na osnovi naslednjih matematičnih izhodišč: Fourierjeva diferencialna enačba širjenja toplote (1), vsiljene z induciranim električnim tokom (npr.: v indukcijski lončni peči) je:

$$\text{div}(k \text{ grad}T) + \rho c \delta T / \delta t = \sigma J^2 = \delta q / \delta V \quad T = T(x, y, z, t)$$

\*<sup>1</sup> Marjan Bolčina, dipl. ing. — Slovenske železarne — Železarna Štore

\*\* Rokopis prejet: november 1990

\*\*\* Originalno publicirano: ŽZB 25 (1991) 1

Za prakso so pomembni tudi naslednji robni pogoji, ki jih opišemo z obrazcem:

$$k \delta T / \delta n = h (T - T_o)$$

- predpisana temperatura ali toplotni fluks na delu površine
- predpisana konvekcija (radiacija)

### GALERKINOV POSTOPEK

Predvidimo, da so dane diferencialne enačbe  $L(\tau) = f$  in  $R(\tau) = g$ , pri čemer sta  $L(\tau)$  in  $R(\tau)$  diferencialna operatorja, tako da je enačba polja temperature zadovoljena po površini in na robovih objekta.

$$L(\tau) = \delta / \delta x_i (k \delta T / \delta x_i) + Q = \rho c (\delta T / \delta t) = f$$

$$R(\tau) = -k (\delta T / \delta n) = h (T - T_o) = g$$

Integracijska enačba Galerkinovega postopka (2, 3) se tako glasi:

$$\int_A [L(\tau) - f] \cdot u \cdot dA + \int_S [R(\tau) - g] \cdot u \cdot dS = 0$$

Funkcijo  $T$  izrazimo s polinomom, ki v polju zadošča diferencialni enačbi, na robovih pa zavzame predpisane robne vrednosti, in izenačimo njeno variacijo  $\delta T$  s funkcijo  $u$ :

$$T = b_1 T_1 + b_2 T_2 + b_3 T_3 + \dots + b_n T_n$$

$$u = \delta T$$

$$\int_A [L(\tau) - f] \cdot \delta T_k \cdot dA + \int_S [R(\tau) - g] \cdot \delta T_k \cdot dS = 0 \quad (k = 1, 2, 3 \dots n)$$

Zgornjo enačbo lahko direktno uporabimo v metodi končnih elementov tako, da jo formiramo za vsak končni element. Polinom zapišemo zato v matrični obliki  $T = [b] [T]^e$ . Pri tem je  $[b]$  interpolacijska matrika,  $[T]^e$  pa vektor vozliščnih temperatur končnega elementa.

Da si olajšamo diferenciranje v zgornji enačbi in da se izognemo polinomom višjega reda, operator  $L(\tau)$  transformiramo:

$$L(\tau) = [\delta / \delta x_i M_i(\tau)] + L'(\tau) \text{ oziroma}$$

$$L(\tau) \delta T = \delta / \delta x_i [M_i(\tau) \delta T] -$$

$$- M_i(\tau) [\delta / \delta x_i (\delta T)] + L'(\tau) \delta T$$

Po urejanju in združevanju dobimo naslednjo variacijsko integralno enačbo:

$$\int_A \{ (Q - \rho c \delta T / \delta t) \delta T + k \delta T / \delta x_i [\delta / \delta x_i (\delta T)] \} dA + \int_S h (T - T_o) \delta T dS = 0$$

Ko vpeljemo diskretizacijo za končni element temperature in njene variacije v obliki:

$$T = b_i T_i \text{ oziroma } \delta T = b_i \delta T_i;$$

lahko dobi prejšnja enačba obliko:

$$H_{ij} T_j + L_{ij} (\delta T / \delta t) + F_j = 0$$

$$H_{ij} = H_1 + H_2 = \int_A [k (\delta b_i / \delta x_i) (\delta b_j / \delta x_i) dA + \int_S h b_i b_j dS =$$

$$F_j = F_1 + F_2 = \int_A Q b_j dA + \int_S h b_j T_o dS$$

$$L_{ij} = \int_A \rho c b_i b_j dA$$

Da bi lahko rešili enačbo končnega elementa in pripadajoče integrale, moramo določiti matriko  $[b]$ , kot interpolacijsko funkcijo polja v elementu. Nato lahko zapišemo:

$$\begin{aligned} T^e &= [b] [T] \\ T^e &= T(x, y, z) \quad [T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (\text{vektor vozliščnih temperatur}) \end{aligned}$$

Kot smo že omenili, smo vzeli trikotno obliko končnega elementa, z vozliščnimi točkami 1, 2, 3 (i, j, k). Prav tako smo predvideli, da se temperatura znotraj končnega elementa širi linearno, torej:

$$T^e = c_1 + c_2 x + c_3 y = [a] [c]$$

$$[a] = [1, x, y]$$

$$[c] = [c_1, c_2, c_3]^T$$

Konstante v  $[c]$  določimo iz robnih pogojev, saj poznamo vrednosti temperatur  $[T] = [T_1, T_2, T_3]$  v vozliščnih točkah  $x_n, y_n$

$$[T] = [a_n] [c]$$

$$[b] = [a] [a_n]^{-1} = [a] [B]$$

če  $[B]$  izrazimo s katezijevimi koordinatami:

$$[B] = 1/2A \begin{bmatrix} x_2 y_3 - x_3 y_2 & x_3 y_1 - x_1 y_3 & x_1 y_2 - x_2 y_1 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_2 - x_3 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} =$$

$$= 1/2A [[B_1], [B_2], [B_3]],$$

pri čemer je  $A$  površina trikotnika končnega elementa. Nato računamo integrale matrik  $[H]$ ,  $[L]$ ,  $[F]$ . Kot smo že omenili, bomo postopek izvedli v brezdimenzijskih (area) koordinatah  $(l_1, l_2, l_3)$ . Velja zakonitost  $l_1 + l_2 + l_3 = 1$ . Katezijeve in area koordinate so v linearni odvisnosti. Pri računanju integralov si pomagamo z obrazcem:

$$\int_A l_1^m l_2^n l_3^p dA = 2A (m! n! p!) (m+n+p+2)!^{-1}$$

Sledi konkretno določanje integralov matrik  $[H]$ ,  $[L]$ ,  $[F]$ :

$$\begin{aligned} [H_1] &= k \int_A ([B]^T (\delta [a]^T / \delta x) (\delta [a] / \delta x) [B]) + \\ &+ ([B]^T ((\delta a)^T / \delta y) ((\delta a) / \delta y) [B]) dA \end{aligned}$$

Po urejanju sledi končni izraz za  $H_1$ :

$$[H_1] = k/4 A \begin{bmatrix} y_{23}^2 + x_{32}^2 & y_{23} y_{31} + x_{32} x_{13} & y_{23} y_{12} + x_{32} x_{21} \\ y_{31}^2 + x_{13}^2 & y_{31} y_{12} + x_{13} x_{21} \\ y_{12}^2 + x_{21}^2 \end{bmatrix} \text{ SIMETRIČNO}$$

$$[H_2] = h \int_S [b]^T [b] dS = h \int_S \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} [l_1, l_2, l_3] dS =$$

Ker gre za konvekcijo, ki je le na robovih, je  $l_3 = 0$ . Po integraciji po dolžini dobimo:

$$[H_2] = h l_3 / 6 \begin{bmatrix} 2, & 1, & 0 \\ 1, & 2, & 0 \\ 0, & 0, & 0 \end{bmatrix}$$

Pri tem sta vozlišči 1 in 2 na začetku in koncu  $l_3$  (na robu objekta), vozlišče 3 pa je v notranjosti objekta.

$$[L] = \rho c \int_A [b]^T [b] dA = \rho c A / 12 \begin{bmatrix} 2, & 1, & 1 \\ 1, & 2, & 1 \\ 1, & 1, & 2 \end{bmatrix}$$

$$[F_1] = Q \int_A [b]^T dA = Q A / 3 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$[F_2] = h \int_S [b]^T dS = h l_i / 2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} dS$$

Po sumiranju enačbe  $H_{ij}T_j + L_{ij}(\delta T/\delta t) + F_i = 0$  po vseh končnih elementih dobimo matrično enačbo celotnega sistema:

$$[H] [\Phi] + [L] [\delta\Phi/\delta t] + [F] = 0$$

Tako lahko računamo vektor vozliščnih temperatur  $[\Phi]$  za predpisane časovne intervale ali končno stacionarno stanje. V primeru časovno odvisnih problemov lahko uporabimo metodo desnih diferenc /2,4/. Če predvidimo, da se temperatura v malem časovnem intervalu spreminja linearno, lahko zapišemo:

$$[\Phi]_t = [\Phi]_{t-\Delta t} + 1/2 ([\delta\Phi/\delta t]_{t-\Delta t} + [\delta\Phi/\delta t]_t) \Delta t$$

in:

$$[\delta\Phi/\delta t]_t = -[\delta\Phi/\delta t]_{t-\Delta t} + 2/\Delta t ([\Phi]_t - [\Phi]_{t-\Delta t})$$

po ureditvi zadnjih treh enačb lahko zapišemo:

$$([H] + 2/\Delta t [L]) [\Phi]_t = [L] [\delta\Phi/\delta t]_{t-\Delta t} + 2/\Delta t [L] [\Phi]_{t-\Delta t} - [F]$$

Postopek računanja je naslednji: najprej izračunamo vektor  $[\Phi]$ , za prvi časovni interval. Temu sledi določevanje odvoda temperature  $[\delta\Phi/\delta t]$ , na koncu prvega časovnega intervala. Postopek ponavljamo za drugi, tretji in n-ti časovni interval. Seveda moramo podati (pri raču-

nanju prvega intervala) začetne pogoje, in sicer za  $[\Phi]_0$  in  $[\delta\Phi/\delta t]_0$ . Začetna temperatura je običajno temperatura okolice,  $[\delta\Phi/\delta t]_0$  pa za sisteme višjega reda lahko predvidimo, da je 0 ali pa ga določimo iz enačb  $pc (\delta\Phi/\delta t)^e = \sigma J^2 = Q$  za posamezni element.

### RAČUNALNIŠKI PROGRAM ZA REŠEVANJE TEMPERATURNEGA POLJA

Računalniški program smo napisali po prej navedenem Galerkinovem postopku v matrični obliki.

Težili smo k temu, da bi bili vhodni podatki sistema in rešitve sistema čim bolj grafično podprti, pri tem pa naj grafika ne bi po nepotrebnem zmanjševala razpoložljivega računalniškega spomina in hitrosti izvajanja programa. Zato smo napisali ustrezen CAD program. Več kot ima računalnik linearnega RAM pomnilnika na razpologo, več elementov lahko vsebuje obravnavani objekt. Tako lahko na Mega 2 ATARI ST računalniku (2Mb RAM linearno) rešujemo probleme z več kot 600 elementov v relativno izredno kratkem času (nekaj minut).

Celoten program je zbir procedur (podprogramov), zato je fleksibilen, odprt, objektno orientiran in ga je relativno lahko modificirati. Z pomočjo CAD (GEM) vmesnika pa smo program podprli s prijaznim okoljem za interaktivno delo na PC računalniku, saj vsebuje avtomatski generator topologije sistema in robnih pogojev. Namenjen je predvsem za reševanje Fouriejeve enačbe, kjer je temperatura posledica virov toplote, povzročene z električnim tokom. Takšni primeri so el. vodniki, el. zbiralke, uporovni grelci, indukcijsko kaljenje, taljenje in kuhanje.

## EDITOR el.gostote

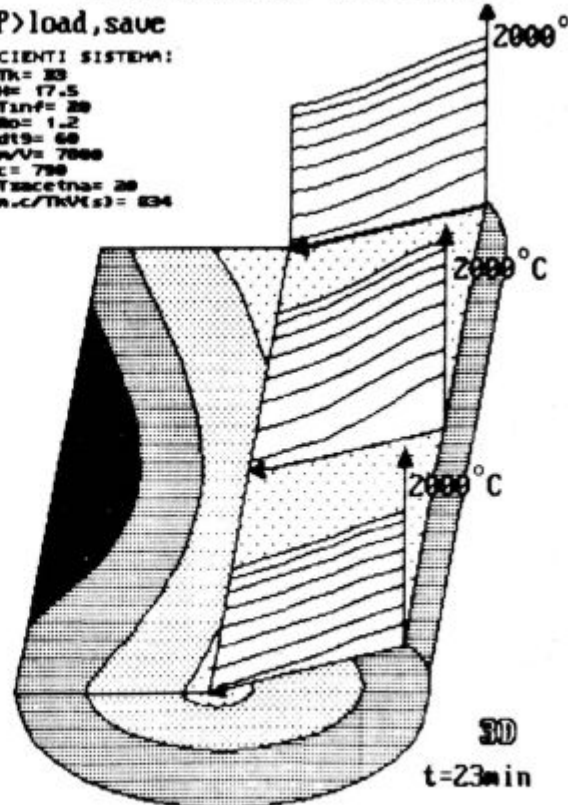
$\theta < 0.068(m)$ ,  $y < 0.21(m)$   
224 elementov, 135 vozlišč

<ESC>new <+>run <INS>edit <CURSOR>move <HELP>load,save

<=>KOEFIICIENTI SISTEMA:

Th = 23  
H = 17.5  
Tinf = 20  
Bo = 1.2  
dtS = 60  
mVz = 7000  
c = 790  
Tzacetna = 20  
a.c/TK(x) = 0.34

28	56	84	112	140	168	196	224
27	55	83	111	139	167	195	223
26	54	82	110	138	166	194	222
25	53	81	109	137	165	193	221
24	52	80	108	136	164	192	220
23	51	79	107	135	163	191	219
22	50	78	106	134	162	190	218
21	49	77	105	133	161	189	217
20	48	76	104	132	160	188	216
19	47	75	103	131	159	187	215
18	46	74	102	130	158	186	214
17	45	73	101	129	157	185	213
16	44	72	100	128	156	184	212
15	43	71	99	127	155	183	211
14	42	70	98	126	154	182	210
13	41	69	97	125	153	181	209
12	40	68	96	124	152	180	208
11	39	67	95	123	151	179	207
10	38	66	94	122	150	178	206
9	37	65	93	121	149	177	205
8	36	64	92	120	148	176	204
7	35	63	91	119	147	175	203
6	34	62	90	118	146	174	202
5	33	61	89	117	145	173	201
4	32	60	88	116	144	172	200
3	31	59	87	115	143	171	199
2	30	58	86	114	142	170	198
1	29	57	85	113	141	169	197



Rešitev sistema prikazana na grafičnem monitorju

Rešitve obravnavanega sistema po metodi končnih elementov dobimo v tabelarni in grafični obliki. Geometrija objekta se avtomatsko skalira na velikost zaslona, v vozlišča elementov se izpišejo iskane rešitve temperature oz. barvna lestvica, v elemente pa povprečne temperature elementov oziroma vrednosti električnih tokovnih gostot in pripadajočih toplotnih tokov. Prav tako dobimo izpis koeficientov sistema, pri katerih smo določene koeficiente in opazujemo tendenco novih rešitev. Na ta način smo dobili dobro orodje za inženirsko projektiranje.

#### LITERATURA

- Holman J. P.: HEAT TRANSFER, McGraw-Hill, New York, 1986
- Prelog E.: METODA KONČNIH ELEMENTOV, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1975
- Zienkiewicz O. C.: FINITE ELEMENT METHOD, McGraw-Hill, London, 1975.
- Kenneth H. H.: FINITE ELEMENT METHOD FOR ENGINEERS, John Wiley & Sons, New York, 1975
- DRUGI JUGOSLOVANSKI SIMPOZIJ O METODI KONČNIH ELEMENTOV IN RAČUNALNIŠKEM PROJEKTIRANJU, VTŠ Maribor, Maribor, 1979, 186—210
- Baker A. J.: FINITE ELEMENT COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS, McGraw-Hill, Washington, 1985
- Željznov M., Popovič M., Valenčič V., Sinigoj A., Korez A.: RAČUNALNIŠKI PROGRAM «IMF-CAD» ZA PROJEKTIRANJE ELEKTRIČNEGA DELA INDUKCIJSKIH LONČNIH PEČI Z RAČUNALNIŠKIM SISTEMOM «ATARI ST», Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1987.
- Okorokow N. W.: ELEKTRISCHE SCHMELZOFEN FÜR DIE EISENMETALLURGIE, VEB Verlag Technik, Berlin, 1953,
- Benkowsky G.: INDUKTIONSERWARMUNG, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965.
- Hinton E. Owen D. R. J.: FINITE ELEMENT COMPUTATIONS, Pineridge Press Limited, Swansea, 1979

#### ZUSAMMENFASSUNG

Mit der schnellen Entwicklung der Rechentechnologie, vor allem auf dem Gebiet der Personenrechner werden in der Ingenieurpraxis immer öfter numerische Methoden bei der Lösung konkreter Probleme der Feldlösungen angewendet, welche durch Differentialgleichungen beschrieben sind. Heutzutage ist solche Art der Projektierung aus ökonomischen und Qualitätsgründen gerechtfertigt und wird nötig.

Unsere Aufgabe war Lösung nichtstationärer Temperaturfelder beliebiger Objekte und die Herstellung von entsprechendem Rechnerprogramm. Dabei können als Randbedingungen eindringende Temperaturen oder Wärmeströme oder innere Ursprünge des Wärmestromes definiert werden, die durch elektrischen Strom verursacht werden. So können (hinsichtlich auf das Temperaturfeld) Objekte wie z.B. Kühlkörper, erwärmen von Metall und Isolationsteilen Temperaturbeanspruchung elek-

trischer Sammelleitungen Induktionshärtung und Induktions-schmelzung von Metallen projektiert werden.

Die Lösungen dieser Objekte nach der Methode der Endelemente werden in tabelarischer und graphischer Form erhalten. Die Geometrie des Objektes wird automatisch auf die Größe des Monitors skaliert, in den Knotenpunkten der Elemente werden die gesuchten Temperaturlösungen bzw. Farbenskala und in die Elemente die durchschnittlichen Temperaturen der Elemente, bzw. die Werte elektrischer Stromdichte und der zugehörigen Wärmeströme ausgeschrieben. Ebenso erhalten wir einen Auszug der Koeffiziente des Systemes bei welchen die gegebene Lösung erhalten worden ist. Nach Bedarf können nur bestimmte Koeffiziente geändert und die Tendenz neuer Lösungen beobachtet werden. Alles das stellt ein gutes Mittel für das Ingenieurprojektieren dar.

#### SUMMARY

The fast development of computer technology, especially with PCs, numerical methods of solving concrete problems connected to fields described by differential equations are more and more used in engineering. Today such a way of designing is economically and qualitatively justified and it is becoming a necessity.

Our task was to solve unsteady temperature fields of optional objects and to prepare a suitable computer program. As boundary conditions there can be defined the imposed temperatures or heat flows or internal sources of heat flows which are caused by electric current. Thus the objects like cooling bodies, heating of metallic and insulator parts, temperature load-

bility of electric buses, induction hardening and induction melting of metals can be designed (according to temperature field).

Solutions for these objects by the method of definite elements can be obtained in tables or graphically. The geometry of object is automatically scaled on the size of screen, the nodes of elements are marked with sought solutions of temperature or by colour scale while in elements the average temperatures of elements or values of electric current densities and corresponding heat flows appear. Also coefficients of the system are written out for the given solution. If necessary only single coefficients can be varied, and the trend of new solutions can be observed. Thus a good tool is obtained for engineering designing.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вследствие быстрого развития вычислительной технологии, прежде всего в области персональных вычислителей, в инженерной практике все более используют численные методы решения конкретных проблем решения полей, описанных с дифференциальными уравнениями. Такой способ проектирования в настоящее время является экономическим и качественно целесообразным, а также нужным.

Нашим заданием явилось решить нестационарные температурные поля каких-либо объектов и подготовка соответствующей вычислительной программы. При этом как предельные условия могут быть определены установленные температуры или тепловые токи или внутренние источники теплового тока, причиной которых является электрический ток. Этим способом можем проектировать (смотря на температурное поле) объекты, как напр: охладительные те-

ла, нагревание металлических и изоляционных частей, температурную нагрузку ел. накопителей, индукционную закалку и индукционную плавку металлов.

Решения этих объектов по методу конечных элементов получаем в форме таблицы и графика. Геометрия объекта автоматически приспособляется величине экрана, в узлах элементов появляются требование решения температуры, т. е. цветная шкала, а в элементах средних температуры элементов, т. е. размеры плотности электрических токов и размеры соответствующих токов теплоты. На экране также появляются коэффициенты системы при которой мы получили данное решение. По потребности можем изменять только определенные коэффициенты и смотреть тенденцию новых решений. Этим способом мы получили хороший инструмент для инженерного проектирования.

## Primena error funkcije u difuzionom hromiranju

Risteski Ice B.\*<sup>1</sup>

UDK: 519.21:539.219.3:669.269  
ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr

U radu su dokazane analitičke jednačine za određivanje površinske koncentracije, pri difuzionom hromiranju kao funkcija vremena. Isto tako određeni su i parcijalni difuzioni koeficijenti. Proračun je izveden pomoću error funkcije.

### UVOD

U prethodnom istraživanju<sup>1</sup>, autor je dokazao kvadratne formule za određivanje parcijalnih koeficijenata difuzije u binarnom sistemu sa n-faza i (n-1)-faznih granica. Taj proračun može biti iskorišćen pri reakcionoj difuziji.

Raspodela koncentracije, elementa po preseku difuzione zone, karakteriše se sa prisutnosti povećane koncentracije<sup>2</sup>, koja se posmatra na mestima prelaza iz jedne faze u drugu i odgovara granicama dvofaznih oblasti tih faza, pri datoj temperaturi na odgovarajućem dijagramu stanja uzajamno delujućih elemenata.

U radu<sup>3</sup> predložen je proračun koeficijenata difuzije za više faznih difuzionih slojeva, pri pretpostavci da koeficijenti difuzije u različitim slojevima ne zavise od koncentracije i koncentracija na spoljnoj površini ne zavisi od vremena, a granice faza menjaju se po paraboličnom zakonu.

U formulama rada<sup>3</sup>, za određivanje koeficijenata difuzije u više faznih sistema nisu proučeni neki postojeći praktični uslovi, što i onako dovodi do bitnih grešaka.

Za bolji konkretni proračun neophodno je, da se uzima u obzir vremenska zavisnost površinskih koncentracija, kao što je to učinjeno u ovom radu, pri rešavanju problema difuzionog hromiranja pomoću parabolične parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda.

### FORMULACIJA PROBLEMA

Neka koncentracija na spoljnoj površini uzorka linearno zavisi od vremena, t. j.  $C(0, t) = \alpha t$ , a koncentracije na granicama faza su zadate i ne zavise od vremena, sem toga granice faza menjaju se po paraboličnom zakonu.

Zadatak se svodi na rešavanje difuzione jednačine:

$$D_k C_{xx}^k(x, t) = C_t^k(x, t), \quad (1)$$

pri uslovima:

$$\begin{aligned} & y_{k-1}(t) \leq x \leq y_k(t), \\ & C^k[y_{k-1}(t), t] = Z_{k-1}, \quad (k = 2, 3, \dots, n+1); \\ & C^k[y_k(t), t] = C_k, \quad (k = 2, 3, \dots, n+1); \\ & C^1[y_0(t), t] = \alpha t; \\ & C^1[y_1(t), t] = A t; \\ & y_k(t) = 2b_k \sqrt{t}, \quad (k = 1, 2, \dots, n+1). \end{aligned} \quad (2)$$

### REŠENJE PROBLEMA

Iz rada<sup>3</sup> rešenje jednačine:

$$DC_{xx}(x, t) = C_t(x, t), \quad (3)$$

pri koncentraciji na spoljnoj površini uzorka:

$$C(0, t) = \Phi(t) \quad (4)$$

je jednačina:

$$C(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \Phi\left(t - \frac{x^2}{4D\mu^2}\right) e^{-\mu^2} d\mu, \quad (5)$$

a za  $\Phi(t) = \alpha t$ ,

$$\begin{aligned} C(x, t) = \alpha t \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} + \right. \\ \left. \left(1 + 2\frac{x^2}{4Dt}\right) \operatorname{erf} C\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Tada kao rešenje jednačine (1) pri uslovima (2) jednačina:

$$\begin{aligned} C^k(x, t) = (1 - \delta_k) \left[ A_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_k t}}\right) + B_k \right] + \\ + \delta_k \alpha t \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} e^{-\frac{x^2}{4D_k t}} + \right. \\ \left. \left(1 + 2\frac{x^2}{4D_k t}\right) \operatorname{erf} C\left(\frac{x}{2\sqrt{D_k t}}\right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{za } k=1 \\ 0, & \text{za } k \neq 1 \end{cases}$$

gde je:

$\delta_k$  — simbol Kroneckera-Weierstrassa.

$A_k$  i  $B_k$  određuju se iz formule:

$$A_k = \frac{\delta_k}{\operatorname{erf}\left(\frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{b_k}{\sqrt{D_k}}\right)}; \quad (8)$$

$$B_k = \frac{C_k \operatorname{erf}\left(\frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}}\right) - Z_{k-1} \operatorname{erf}\left(\frac{b_k}{\sqrt{D_k}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{b_k}{\sqrt{D_k}}\right)}; \quad (9)$$

$$\delta_k = Z_{k-1} - C_k, \quad \text{za } k = 2, 3, \dots, n+1.$$

U više opštijim slučajevima zadatak se svodi na rešavanje jednačine:

\*<sup>1</sup> Ice B. Risteski, Institut za rudarstvo i metalurgiju, p.p. 454, Rudnici i Železarnica Skopje, 91000 Skopje

\*\* Rokopis prejet: nov. 1990

\*\*\* Originalno publicirano: ŽEZB 25 (1991) 1

$$D_k C_{xx}^k(x, t) = C_t^k(x, t), \tag{10}$$

pri uslovima:

$$y_{k-1}(t) \leq x \leq y_k(t),$$

$$C^1[y_0(t), t] = \begin{cases} at, & \text{za } t < t_1, \\ at + at_1, & \text{za } t \geq t_1, \end{cases}$$

$$C^1[y_1(t), t] = At + Bt_1,$$

$$C^k[y_{k-1}(t), t] = Z_{k-1}, \quad (k = 2, 3, \dots, n+1)$$

$$C^k[y_k(t), t] = C_k, \quad (k = 2, 3, \dots, n+1); \tag{11}$$

Razmatra se dovoljno veći vremenski interval, kada

$$y_k = 2b_k \sqrt{t}, \quad (k = 1, 2, \dots, n+1)$$

gde su:

a, A, B, C<sub>k</sub>, b — konstanti.

Rešenje jednačine (10) za uslove (11) je izraz:

$$C^k(x, t) = (1 + \delta_k) \left[ A_k \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} \right) + B_k \right] +$$

$$+ \delta_k \operatorname{at} \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} e^{-\frac{x^2}{4D_k t}} + \left( 1 + \frac{t_1}{t} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 2 \frac{x^2}{4D_k t} \right) \operatorname{erf} C \left( \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} \right) \right], \text{ za } t \geq t_1 \tag{12}$$

i

$$C^k(x, t) = (1 + \delta_k) \left[ A_k \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} \right) + B_k \right] +$$

$$+ \delta_k \operatorname{at} \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} e^{-\frac{x^2}{4D_k t}} + \right.$$

$$\left. + \left( 1 + 2 \frac{x^2}{4D_k t} \right) \operatorname{erf} C \left( \frac{x}{2\sqrt{D_k t}} \right) \right], \text{ za } t < t_1, \tag{13}$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{za } k=1 \\ 0, & \text{za } k \neq 1 \end{cases}$$

gde je:

$\delta_{k1}$  — simbol Kroneckera-Weierstrassa,

$$A_k = \frac{Z_{k-1} - C_k}{\operatorname{erf} \left( \frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{b_k}{\sqrt{D_k}} \right)}; \tag{14}$$

$$B_k = \frac{C_k \operatorname{erf} \left( \frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}} \right) - Z_{k-1} \operatorname{erf} \left( \frac{b_k}{\sqrt{D_k}} \right)}{\operatorname{erf} \left( \frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{b_k}{\sqrt{D_k}} \right)}; \tag{15}$$

$$(k = 2, 3, \dots, n+1) \quad A_1 < \infty \quad i \quad B_1 < \infty.$$

Količine mase  $m_k$ , koje se nalaze u momentu vremena  $t$  na granicama raspodele faze  $k$  i  $k+1$ , može se naći iz izraza<sup>3</sup>:

$$\left. \begin{aligned} m_k &= -D_k \int_0^1 C_x^k[y_k(t), t] dt - C_k y_k(t); \\ m_k &= -D_{k+1} \int_0^1 C_x^{k+1}[y_k(t), t] dt - Z_k y_k(t). \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

Po analogiji sa radom<sup>3</sup> dobija se:

$$\frac{m_{k-1}}{2\sqrt{t}} + Z_{k-1} b_{k-1} = \frac{(1 + \delta_k) A_k \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_{k-1}^2}{D_k}} +}{\frac{m_k}{2\sqrt{t}} + C_k b_k} = \frac{(1 + \delta_k) A_k \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_k^2}{D_k}} + \dots}{\dots}$$

$$+ \delta_k \left[ -\frac{at}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_{k-1}^2}{D_k}} + \frac{4b_{k-1}^2 at}{3D_k} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_{k-1}^2}{D_k}} + \right.$$

$$\left. + \delta_k \left[ -\frac{at}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_k^2}{D_k}} + \frac{4b_k^2 at}{3D_k} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_k^2}{D_k}} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{2b_{k-1} at}{3} \operatorname{erf} C \left( \frac{b_{k-1}}{\sqrt{D_k}} \right) - \frac{at}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} \left( 1 + 2 \frac{b_{k-1}^2}{D_k} \right) e^{-\frac{b_{k-1}^2}{D_k}} - \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{2b_k at}{3} \operatorname{erf} C \left( \frac{b_k}{\sqrt{D_k}} \right) - \frac{at}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} \left( 1 + 2 \frac{b_k^2}{D_k} \right) e^{-\frac{b_k^2}{D_k}} - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{at_1}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_{k-1}^2}{D_k}} \right] \right. \tag{17}$$

$$\left. \left. - \frac{at_1}{3} \sqrt{\frac{D_k}{\pi}} e^{-\frac{b_k^2}{D_k}} \right] \right.$$

Jednačina (17) važi za  $t \geq t_1$ . Za  $t < t_1$ , odsutno je  $at$ , u (17). Iz izraza (17) za  $k \neq 1$  dobije se:

$$\frac{m_{k-1}}{2\sqrt{t}} + Z_{k-1} b_{k-1} = e^{\frac{b_k^2 - b_{k-1}^2}{D_k}} \frac{m_k}{2\sqrt{t}} + C_k b_k, \tag{18}$$

gde je:

$$D_k = \frac{b_k^2 - b_{k-1}^2}{1n \frac{m_{k-1} + Z_{k+1} 2b_{k-1} \sqrt{t}}{m_k + C_k 2b_k \sqrt{t}}} =$$

$$= \frac{y_k^2 - y_{k-1}^2}{4t} \frac{1}{\ln \frac{m_{k-1} + Z_{k+1} y_{k-1}}{m_k + C_k y_k}}. \tag{19}$$

Za  $k = 1$  dobija se

$$\frac{m_0}{m_1 + C_1 y_1} = \frac{2 + \frac{t_1}{t}}{e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - 4 \frac{b_1^2}{D_1} e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - b_1 \sqrt{\frac{b_1}{D_1}} \operatorname{erf} C \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} \right) + \dots}$$

$$+ \left( 1 + 2 \frac{b_1^2}{D_1} \right) e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} + \frac{t_1}{t} e^{-\frac{b_1^2}{D_1}}. \tag{20}$$

Izraz (20) važi za  $t \geq t_1$ . Za  $t < t_1$ , odsutno je  $t_1/t$  u (20).

Za malo  $\xi = \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} = \frac{y_1}{2\sqrt{D_1 t}}$  (do 0,1) dobija se:

$$D_1 = \frac{y_1^2}{4t} \frac{[(m_1 + C_1 y_1) \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) + 2m_0]^2}{\left\{ -m_0 \pm \sqrt{m_0^2 - [(m_1 + C_1 y_1) \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) + \dots} \right.}$$

$$\leftarrow \dots \dots \dots, \text{ za } t \geq t_1, \quad (21)$$

$$\leftarrow \dots \dots \dots + 2m_0 \left[ (C_{m_1} + C_{y_1}) - m_0 \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) \right]$$

$$D_1 = \frac{y_1^2}{t} \cdot \frac{(m_1 + C_{y_1} + m_0)^2}{\left\{ -m_0 \pm \sqrt{m_0^2 - 4[(m_1 + C_{y_1})^2 - m_0^2]} \right\}^2}, \text{ za } t < t_1, \quad (22)$$

Koncentracija pri difuziji u  $\alpha$ -Fe ( $k=1$ ) iz (4) i (5) je:

$$C^1(x, t) = at \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} e^{-\frac{x^2}{4D_1 t}} + \left( 1 + \frac{t_1}{t} + \frac{x}{2D_1 t} \right) \operatorname{erf} C \left( \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) \right], \text{ za } t \geq t_1, \quad (23)$$

$$C^1(x, t) = at \left[ -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} e^{-\frac{x^2}{4D_1 t}} + \left( 1 + \frac{x^2}{2D_1 t} \right) \operatorname{erf} C \left( \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) \right], \text{ za } t < t_1, \quad (24)$$

Koncentracija pri difuziji u  $\gamma$ -Fe ( $k=2$ ) iz (11) i (12) je:

$$C^2(x, t) = A_2 \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) + B_2 \quad (25)$$

gde je:

$$A_2 = \frac{Z_1 - C_2}{\operatorname{erf} \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{b_2}{\sqrt{D_2}} \right)},$$

$$B_2 = \frac{C_2 \operatorname{erf} \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_2}} \right) - Z_1 \operatorname{erf} \left( \frac{b_2}{\sqrt{D_2}} \right)}{\operatorname{erf} \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{b_2}{\sqrt{D_2}} \right)}. \quad (26)$$

Oredimo koeficijente difuzije. Iz (19) za difuziju u  $\gamma$ -Fe ( $k=2$ ) dobija se:

$$D_2 = \frac{y_2^2 - y_1^2}{4t} \cdot \frac{1}{\ln \frac{m_1 + Z_1 y_1}{m_2 + C_2 y_2}}. \quad (27)$$

Za difuziju u  $\alpha$ -Fe ( $k=1$ ) iz (20) dobija se:

$$\frac{m_0}{m_1 + C_{y_1}} = \frac{2 + \frac{t_1}{t}}{e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - 4 \frac{b_1^2}{D_1} e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - 2b_1 \sqrt{\frac{\pi}{D_1}} \operatorname{erf} C \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} \right) + \left( 1 + 2 \frac{b_1^2}{D_1} \right) e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} + \frac{t_1}{t} e^{-\frac{b_1^2}{D_1}}}, \text{ za } t \geq t_1, \quad (28)$$

$$\frac{m_0}{m_1 + C_{y_1}} = \frac{2}{e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - 4 \frac{b_1^2}{D_1} e^{-\frac{b_1^2}{D_1}} - 2b_1 \sqrt{\frac{\pi}{D_1}} \operatorname{erf} C \left( \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} \right) + \dots}$$

$$\leftarrow \dots \dots \dots + \left( 1 + 2 \frac{b_1^2}{D_1} \right) e^{-\frac{b_1^2}{D_1}}, \text{ za } t < t_1. \quad (29)$$

Za malo  $\xi = \frac{b_1}{\sqrt{D_1}} = \frac{y_1}{2\sqrt{D_1 t}}$  (do 0,1) dobija se:

$$D_1 = \frac{y_1^2}{4t} \cdot \frac{\left[ (m_1 + C_{y_1}) \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) + 2m_0 \right]^2}{\left\{ -m_0 \pm \sqrt{m_0^2 - [(m_1 + C_{y_1}) \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) + \dots]} \right\}^2}$$

$$\leftarrow \dots \dots \dots, \text{ za } t \geq t_1, \quad (30)$$

$$\leftarrow \dots \dots \dots + 2m_0 \left[ (m_1 + C_{y_1}) \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) - m_0 \left( 2 + \frac{t_1}{t} \right) \right]^2$$

$$D_1 = \frac{y_1^2}{t} \cdot \frac{(m_1 + C_{y_1} + m_0)^2}{\left\{ -m_0 \pm \sqrt{m_0^2 - 4[(m_1 + C_{y_1})^2 - m_0^2]} \right\}^2}, \text{ za } t < t_1, \quad (32)$$

**APLIKACIJA ANALITIČKIH REZULTATA PRI DIFUZIONOM HROMIRANJU**

Obradom rezultata difuzije hroma u Armco-čelik, Č 0147N, 15 XMΦKP (prema GOST-u) i Č 1331 po formulama iz rada<sup>3</sup> i po formuli (30), dobijaju se za  $\alpha$ -fazu podaci dati u tabeli 1.

Tabela 1: Eksperimentalni podaci

Čelik	Temperatura K	D m <sup>2</sup> /s	E J/mol	D m <sup>2</sup> /s	E J/mol
Armco-čelik	1373	2,5 · 10 <sup>-13</sup>	144555	1,55 · 10 <sup>-13</sup>	230450
	1473	9,7 · 10 <sup>-13</sup>		2,70 · 10 <sup>-13</sup>	
	1573	2,2 · 10 <sup>-13</sup>		3,90 · 10 <sup>-12</sup>	
	1653	4,7 · 10 <sup>-12</sup>		4,80 · 10 <sup>-12</sup>	
Č 0147N	1373	4,1 · 10 <sup>-13</sup>	154192	2,50 · 10 <sup>-13</sup>	238830
	1423	5,7 · 10 <sup>-13</sup>		2,50 · 10 <sup>-13</sup>	
	1473	7,0 · 10 <sup>-13</sup>		1,61 · 10 <sup>-12</sup>	
	1523	2,7 · 10 <sup>-12</sup>		3,10 · 10 <sup>-12</sup>	
	1573	3,4 · 10 <sup>-12</sup>		6,10 · 10 <sup>-12</sup>	
15 XMΦKP (po GOST-u)	1473	3,6 · 10 <sup>-13</sup>	162153	4,50 · 10 <sup>-13</sup>	266065
	1523	2,7 · 10 <sup>-12</sup>		1,90 · 10 <sup>-12</sup>	
	1573	6,1 · 10 <sup>-12</sup>		4,30 · 10 <sup>-12</sup>	
Č 1331	1373	6,6 · 10 <sup>-14</sup>	167600	3,70 · 10 <sup>-14</sup>	276540
	1423	1,3 · 10 <sup>-13</sup>		2,30 · 10 <sup>-13</sup>	
	1523	3,8 · 10 <sup>-13</sup>		1,00 · 10 <sup>-12</sup>	
	1573	5,2 · 10 <sup>-13</sup>		2,00 · 10 <sup>-12</sup>	

**DISKUSIJA O REZULTATIMA**

Rezultati dobijeni u ovom radu, po redu veličina koeficijenata difuzije hroma u železa, dobro se slažu sa izmerenim rezultatima izvršenim u drugim radovima<sup>4</sup>. Ipak veličina aktivacione energije dobijena u našem radu je veća nego u literaturi<sup>3</sup>. Utvrđena je podudarnost dobijenih podataka sa podacima istraživanja difuzije hroma u  $\alpha$ -železo pomoću izvanredno egzaktnih metoda (metod radioaktivnih indikatora).

Vrednosti  $D_0$ , dobijeni u ovom radu takođe se nalaze u boljoj podudarnosti sa podacima takvih ispitivanja<sup>4</sup>, nego  $D_0$  iz rada<sup>3</sup>. Pri promeni površinske koncentracije u vremenu, koeficijenti difuzije izračunati u našem radu, pokazuju bitno veće povećanje sa povećanjem temperature, nego što je dobijeno u radu<sup>3</sup>.

## ZAKLJUČAK

U radu su dokazane egzaktno analitičke formule za određivanje koncentracije pri difuziji hroma u  $\alpha$  — Fe ( $k=1$ ) i  $\gamma$  — Fe ( $k=2$ ) kao funkcija vremena. Određeni su isto tako i parcijalni difuzioni koeficijenti. Uopšte rečeno, rešen je problem difuzionog hromiranja pomoću parabolodne parcijalne diferencijalne jednačine drugog reda. U proračunu je korišćena error funkcija, t. j. Gaussova funkcija greške.

## LITERATURA

1. I. B. Risteski: Metalurgija, 25(1986)4, 163—168.
2. I. B. Risteski: Metall, 43(1989)7, 627—631.
3. G. N. Dubinin: Diffuzionnoe hromirovanie splavov, Mašinstroenie, Moskva 1964.
4. M. A. Krištal: Mehanizm diffuzii v železnih splavah, Metallurgija, Moskva 1972.

## ZUSAMMENFASSUNG

In der Arbeit werden genaue analytische Formeln für die Bestimmung der Konzentration bei der Diffusion von Chrom in  $\alpha$  — Fe ( $k=1$ ) und  $\gamma$  — Fe ( $k=2$ ) als Funktion der Zeit gegeben. Ebenso sind auch die partiellen Diffusionskoeffiziente bestimmt worden. Allgemein gesagt, das Problem der Diffusionschromie-

rung ist mit Hilfe der parabolischen partial-differential Gleichung zweiter Reihe gelöst worden. In der Berechnung ist die Error Funktion d. h. die Gauss-Funktion der Fehler angewendet worden.

## SUMMARY

Paper proves the exact analytical equations for determining concentrations in chromium diffusion into  $\alpha$  — Fe ( $k=1$ ) and  $\gamma$  — Fe ( $k=2$ ) as time functions. Also partial diffusion coefficients were determined. In general, the problem of diffusion

chromeplating is solved by parabolic partial differential equation of second order. In calculation the error function, i. e. Gauss error function, was applied.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы доказаны эгзактне аналитические формулы для определения концентрации при диффузии хрома в  $\alpha$  — Fe ( $k=1$ ) и  $\gamma$  — Fe ( $k=2$ ) как функция времени. Также определены и парциальные диффузионные коэффициенты. В

общем решена проблема диффузного хромирования с помощью параболического парциального дифференциального уравнения второго класса. Расчет произведен с помощью эррор функции, т. е. Гауссовой функции ошибки.



## TEHNIČNE NOVICE

### **Predstavljamo vam laboratorij za korozijske raziskave v slovenskih železarnah — Metalurškem inštitutu**

Vehovar Leopold<sup>\*1</sup>

*V tem prispevku želimo na enostaven način podati informacijo o korozijskem laboratoriju na Metalurškem inštitutu v Ljubljani, o njegovi najnovejši opremljenosti, možnosti raziskav, povsem bežno pa smo obdelali tudi nekatere metode, ki bralcu nudijo le orientacijo pri njegovem snovanju lastnih raziskav, ali reševanju problemov, povezanih s korozijo. Namenoma nekoliko razširjen uvod jasno prezentira, kako pomembna je borba proti delovanju različnih vrst korozije.*

#### 1. UVOD

Odločilna dejavnika v bodočem razvoju vsake industrializirane dežele sta zmogljivost industrije in uspešnost izvoza produktov. V tem kontekstu pa so surovine in iz njih pridobljene kovine oz. zlitine ključnega pomena. Poznano je, da so vsaj evropske dežele zelo odvisne od mineralnih surovin in še posebej energije, zato je korozija pomembna postavka, ki znatno vpliva na nacionalni dohodek. Dejstvo je, da so korozijski procesi irreverzibilni, kar pomeni izgubo materiala in energije. Na ta način nezadržno pojemajo, bodisi rudnine bodisi kovine. Svetovna surovinska baza je torej pičila in z rudami ne moremo razpolagati tako neodgovorno. Cilji v visoko razvitih industrijskih deželah so torej jasni; vse je usmerjeno v varčevanje materiala zaradi senzacionalnih števil v zvezi z zalogami rud, ceno energijo in predvsem uničujočega pohoda korozije. Iz vsega tega sledi, da bo bodoči razvoj usmerjen v pridobivanje številnih novih zlitin z optimalno kemično sestavo in mehanskimi lastnostmi, ki bodo uporabne za natančno določene elemente, z definirano življenjsko dobo, veliko zanesljivostjo oz. varnostjo obratovanja ter združljivostjo z okoljem. Pri vsem tem pa ima korozija pomembno vlogo.

Analize različnih inštitucij v svetu kažejo, da znašajo škode, ki jih povzročajo korozija v industrijsko razvitih deželah od 2 do 4,2 % narodnega dohodka — v ZDA npr. ca. 126 milijard \$/leto. Če operiramo s takšnimi podatki, potem je povsem jasno, čemu uvrščajo korozijo med največje uničevalce človeških dobrin in energije.

Študij različnih oblik korozije torej ni le akademskega značaja. Korozija se je hitro razvila v eksaktno znanost. Večji del tega progressa je možno pripisati razvoju številnih raziskovalnih tehnik, ki so omogočile študij korozijskih procesov. Na osnovi hitrih sodobnih korozijskih testov je možno napovedati korozijsko obnašanje različnih zlitin v različnih korozijskih medijih. Laboratorijski testi so še posebej uporabni za kontrolo kvalitete, selekcijo

materialov in za študij mehanizmov korozije. Večina metod je že standardiziranih in v rabi po vsem svetu.

V Slovenskih železarnah, kamor je naše delo predvsem usmerjeno, so se nakopičili različni problemi, povezani s kvaliteto naših jekel in litin, ki se vgrajujejo v vitalne dele različne strojne opreme, namenjene številni procesni tehniki v kemični industriji, petrokemiji, rudarstvu, prehranbeni, lesno predelovalni in papirni industriji, pa tudi ladjedelnstvu in drugim oblikam transporta, elektrarnam itd. V takšnih pogojih so storitve korozijskega laboratorija zelo iskane.

#### 2. IZGLED IN SESTAVA KOROZIJSKEGA LABORATORIJA

##### 2.1. Elektrokemične raziskave

Večji del elektrokemičnih raziskav temelji na potenciometričnih meritvah, ki omogočajo določanje različnih korozijskih dejavnikov pri medsebojni odvisnosti potencial-tok. Merilo za korozijsko hitrost je korozijski tok, saj je masa korodirane kovine proporcionalna količini električnega naboja oz. elektrine, ki se je tvorila na vmesni površini kovina-korozijski medij (elektrolit). Model 342 — PRINCETON APPLIED RESEARCH, ki je instaliran na Metalurškem inštitutu (**slika 1**), ustreza navedenim zahtevam. Omogoča hitro določanje korozijske odpornosti zlitin v različnih korozijskih medijih. Delovna elektroda (testni preizkušanelec) je v obliki majhne tablete s premerom 15,5 mm in debelino do 3,2 mm. Vse meritve so računalniško podprte, sistem različnih menujev,



**Slika 1:**

Računalniško podprto elektrokemično določanje korozijske odpornosti zlitin z Modelom 342-PAR; levo potenciostat s korozijsko celico, v sredini računalnik, na desni tiskalnik za zapis rezultatov, gra. jv itd.

<sup>\*1</sup> dr. Leopold VEHOVAR, dipl. ing. — slovenske Železarne — Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

zbranih v programskem paketu, pa omogoča vodenje devet eksperimentov:

1. Potenciodinamična polarizacija
2. Taflov zapis
3. Polarizacijska upornost
4. Ciklična potenciodinamična polarizacija
5. Potenciokinetična reaktivacija
6. Potenciostatska metoda
7. Galvanostatska metoda
8. Galvanska korozija
9. Korozijski potencial

Potek različnih procesov je možno opazovati neposredno na ekranu. Čas trajanja eksperimentov je odvisen od hitrosti dviga potenciala v enoti časa. Ti časi se gibljejo od nekaj minut do ca. 2 uri (večji del le od 10 do 40 minut). Instrument je izjemno senzibilen, saj meri korozijske tokove v mikroamperih, reproducibilnost rezultatov pa je velika.

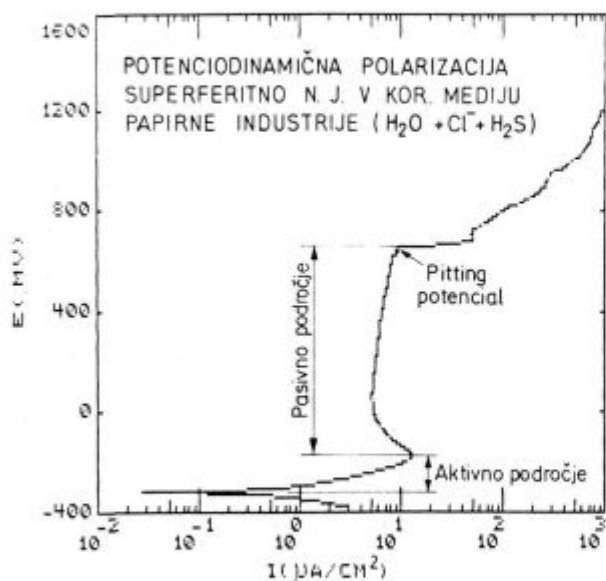
S posameznimi elektrokemičnimi eskerimenti je možno določiti naslednje:

### Potenciodinamična polarizacija

Ta tehnika postopnega dviga potenciala v enoti časa k pozitivnejšim vrednostim (torej potenciodinamična sprememba potenciala) spreminja korozijsko stabilnost kovine. Z njegovim naraščanjem postaja material termodinamično vse manj stabilen, kar pomeni, da narašča tudi korozijski tok, ki predstavlja merilo za stopnjo korozije. Na ta način se pridobi neka splošna kvalitativna slika o obnašanju materiala v nekem mediju (**slika 2**). Iz oblike krivulje je možno soditi o korozijski odpornosti, morebitni pasivaciji, pitting potencialu itd. Iz spodnjega katodnega dela krivulje in zgornjega anodnega pa je dodatno možno računati korozijsko hitrost in polarizacijsko upornost, iz katere je tudi možno prognozirati stopnjo korozije.

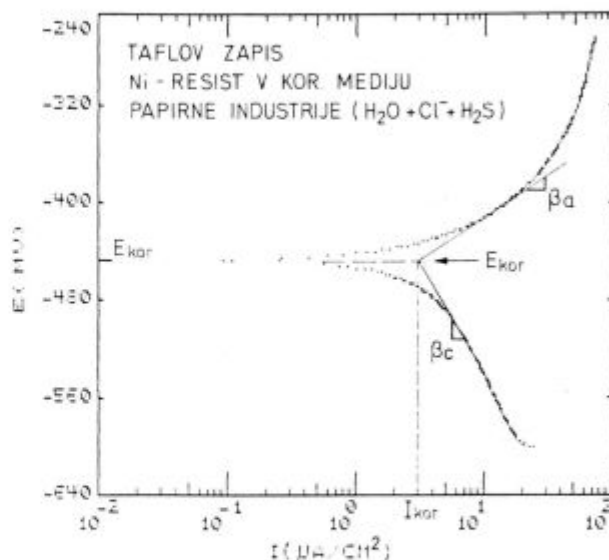
### Taflov zapis

Tudi to je potenciodinamična metoda, ki jo dejansko uporabljamo le za ugotavljanje korozijske hitrosti zlitin v različnih korozijskih medijih (**slika 3**). Zapis je predstav-



**Slika 2:**

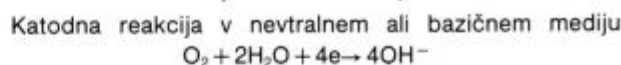
Tipična potenciodinamična polarizacijska krivulja za superferitno nerjavno jeklo v korozivnem mediju papirne industrije ( $H_2O + Cl^- + H_2S$ )



**Slika 3:**

Taflov zapis pri koroziji legirane litine namenjene za valje v korozivnem mediju ( $H_2O + Cl^- + H_2S$ )

ljen s spodnjo katodno krivuljo, ki ponazarja parcialno katodno reakcijo redukcije različnih oksidacijskih sredstev iz elektrolita (npr.  $H^+$ ,  $O_2$  itd.) in zgornjo anodno, s katero je podano odtapljanje kovine (oksidacija kovine z njenim prehodom v kovinske ione, t. j. katione  $M^{n+}$ ). Ker je korozijski proces sestavljen iz anodne in katodne reakcije, lahko zapišemo npr. korozijo železa v kislem ali nevtralnem oz. bazičnem mediju takole:



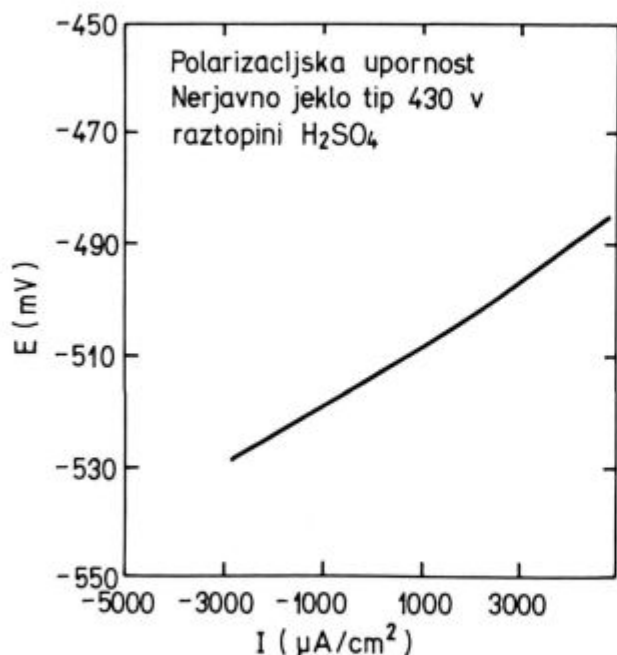
Zaradi različne hitrosti izločanja kovinskih ionov iz anode v elektrolit in različne stopnje redukcije oksidacijskih sredstev iz korozijskega medija pri reakciji z valenčnimi elektroni, sproščenimi pri anodni reakciji, je nagnjenost anodne ali katodne krivulje različna. Ravni del ene ali druge krivulje predstavlja t. i. Taflovo premico, nagnjenost pa je izražena s Taflovo konstanto, ali tudi faktorjem naklona ( $\beta_a$  je anodna Taflova konstanta,  $\beta_c$  pa katodna Taflova konstanta). V presečišču anodnega in katodnega dela premice dobimo na abscisi gostoto korozijskega toka ( $i_{kor}$ ), iz katerega računalnik računa korozijsko hitrost, na ordinati pa korozijski potencial ( $E_{kor}$ ).

### Polarizacijska upornost

Tehnika ugotavljanja polarizacijske upornosti omogoča zelo hitro določanje korozijske hitrosti. V ozkem potencialnem območju  $\pm 25$  mV glede na  $E_{kor}$  se meri rezultirajoči tok, ki je pri takšni odvisnosti predstavljen s premico — **slika 4**. Nagnjenost takšne premice kot funkcije potencial-tok ustreza polarizacijski upornosti, ki v kombinaciji s Taflovima konstantama omogoča določanje korozijskega toka, ki je osnova za izračun korozijske hitrosti.

1. Polarizacijska upornost ( $R_p$ ):

$$R_p \text{ (k}\Omega\text{)} = \frac{\Delta E \text{ (mV)}}{\Delta I \text{ (}\mu\text{A)}}$$



Slika 4: Tipičen zapis za polarizacijsko upornost

2. Korozijski tok ( $i_{kor}$ ):

$$i_{kor} (\mu A/cm^2) = \frac{(\beta_a)(\beta_c)}{2.3(\beta_a + \beta_c)} (A) (R_p)$$

A = površina vzorca v cm<sup>2</sup>

3. Korozijska hitrost (mm/leto):

$$\text{Korozijska hitrost} = \frac{(i_{kor})(EW)}{\rho}$$

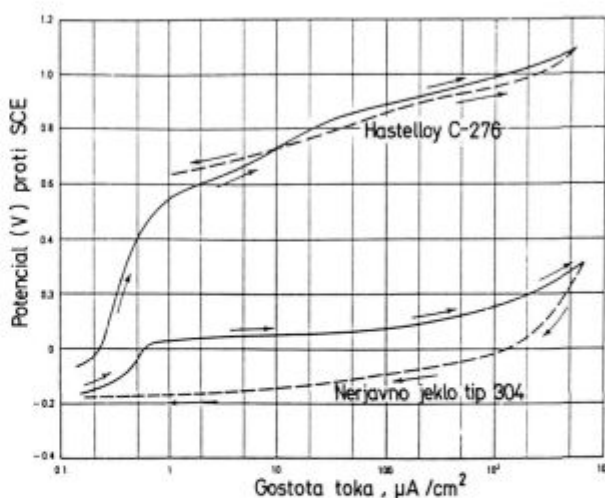
EW = ekvivalentna teža v gramih  
 ρ = gostota materiala v g/cm<sup>3</sup>

Ker je tudi določanje polarizacijske upornosti računalniško podprto, je povsem jasno, da izračune od točke 1 do 3 opravi računalnik sam.

**Ciklična potenciodinamična polarizacija**

Ciklična potenciodinamična polarizacija nudi kvalitativne poglede na mehanizme nastajanja pittinga (korozijskih izjed) v pasivnih filmih (slika 5). Pri študiju pasivnosti in na tej osnovi določanja odpornosti različnih zlitin (nerjavna jekla, nikljeve zlitine itd.), je torej potrebno izkoristiti prednosti te metode, ki dovolj prepričljivo napoveduje možnost rušenja pasivnosti.

Bistvo metode je tvorba pasivnega filma, ki nastaja pri anodni potenciodinamični polarizaciji (posname se anodni del krivulje), temu sledi z nadaljnim dvigom potenciala preko točke E<sub>pit</sub> (pitting potencial) rušenje pasivnosti, kar povzroči izrazito naraščanje korozijskega toka, v končni fazi pa se s polarizacijo v nasprotni smeri izvede bolj ali manj učinkovita ponovna pasivacija (repasivacija) prej nastalih pitov. Sposobnost repasivacije se manifestira s postopnim upadanjem korozijskega toka. Material ima majhno tendenco za nastajanje pittinga, če je tako tvorjena zanka ozka, oziroma pri čim višjem potencialu se zaključijo zanka, tem večja je odpornost pasivnega filma. Podobno lahko trdimo: višja ko je lega zanke v sistemu potencial-tok, kvalitetnejši je film (na sliki 5 ima Hastelloy C-276 večjo odpornost kot nerjavno jeklo 304).



Slika 5: Ciklična potenciodinamična polarizacija za Hastelloy C-276 in nerjavno jeklo 304 v 3,5 % raztopini NaCl

**Potenciokinetična reaktivacija**

Potenciokinetična reaktivacija ali tudi anodna reaktivacijska polarizacija predstavlja metodo, ki omogoča študij občutljivosti nerjavnih jekel do interkristalne korozije zaradi izločanja Cr karbidov ali Cr nitridov po mejah zrn. Z merjenjem količine elektrine (Q), nastale v času obratne potenciodinamične polarizacije, iz pasivnega področja skozi področje aktivne korozije do korozijskega potenciala (slika 6), je omogočena zaznava interkristalne korozije. Večja ko je senzibilnost materiala, večja je integrirana površina, ki ustreza količini elektrine.

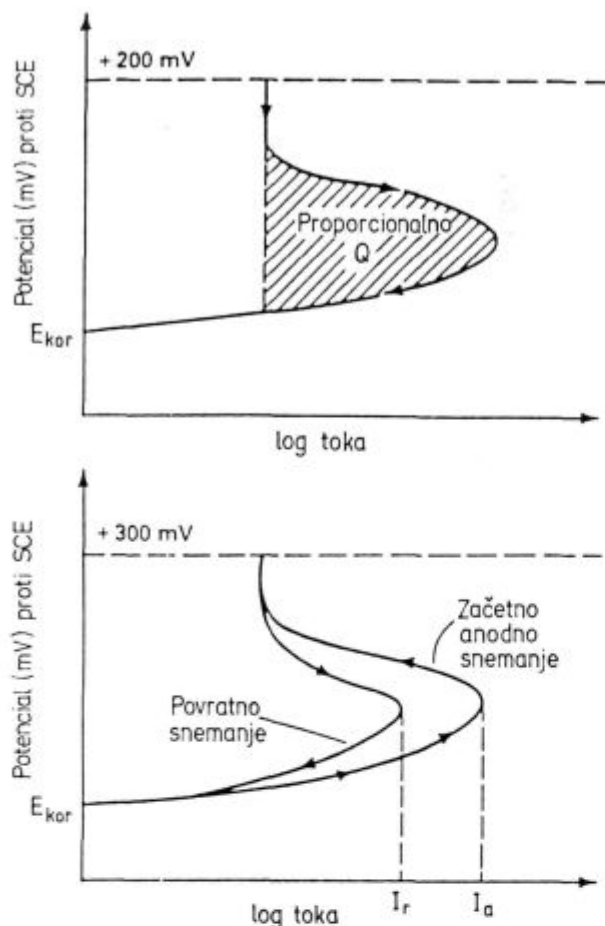
Modifikacija prejšnje tehnike predstavlja Akashijev postopek; z anodno polarizacijo preko aktivnega področja v pasivno, ki ji sledi polarizacija v obratni smeri, se določi razmerje med  $I_r/I_a$ , ki predstavlja merilo za senzibilnost do interkristalne korozije ( $I_r$  je maks. tok, ki je prisoten pri povratni polarizaciji,  $I_a$  pa maks. tok, ki se pojavlja pri začetni anodni polarizaciji). Čim večja je prisotnost Cr karbidov oz. Cr nitridov, tem večje je osiromašenje matrice s kromom in tem manjša je možnost repasivacije teh področij. Ker je ponovna pasivacija poškodovanih mest nepopolna, se pojavlja tok  $I_r$ , ki narašča z naraščanjem osiromašenja s kromom oz. z upadanjem repasivacije tako osiromašenih mest. Pri nerjavnih jeklih, ki niso občutljiva na interkristalno korozijo, ostaja pasivni film pri povratni polarizaciji intakten, značilna konica (peak) pa manjka.

**Potenciostatska metoda**

Potenciostatski eksperiment je omejen na določevanje toka v nekem časovnem obdobju, pri konstantnem potencialu. Takšen način dela omogoča študij vodikove krhkosti (katodna polarizacija, pri kateri polariziramo preizkušanelec z urivanjem toka pri konstantnem potencialu, katerega vrednost je v katodnem področju), ali napetostne korozije (anodna polarizacija, pri kateri vrivamo tok pri konstantnem potencialu, ki se nahaja v anodnem področju).

**Galvanostatska metoda**

Pri konstantnem toku opazujemo potencial v nekem časovnem obdobju. Ta tehnika je uporabna za rušenje pasivnega filma pri konstantnem toku, medtem ko opa-



Slika 6:

Shema dveh postopkov potenciokinetične reaktivacije:  
a) Novak-Clark metoda, b) Akashi metoda

zujemo spremembo potenciala. Na tej osnovi je tudi zasnovano merjenje debeline filma.

### Galvanska korozija

V tem primeru se določuje korozijski tok, ki nastaja v nekem časovnem obdobju pri koroziji dveh kovin z različnimi potencialoma. Metoda je torej primerna za ugotavljanje možnosti kombinacije različnih materialov, kar pogosto iščejo v procesni tehniki, gradbeništvu itd.

### Korozijski potencial

Ta tehnika je primerna za spremljanje korozijskega potenciala kovine, izpostavljene delovanju korozijskega medija v določenem časovnem obdobju. Pri takšnem eksperimentiranju dejansko ugotavljamo čas, ki je potreben, da se doseže ravnotežno stanje (posredno tudi hitrost za doseganje tega stanja), ki vodi do zamiranja korozijskega procesa.

Med vsemi navedenimi elektrokemičnimi metodami je vsekakor v praksi najbolj rabljenih prvih pet.

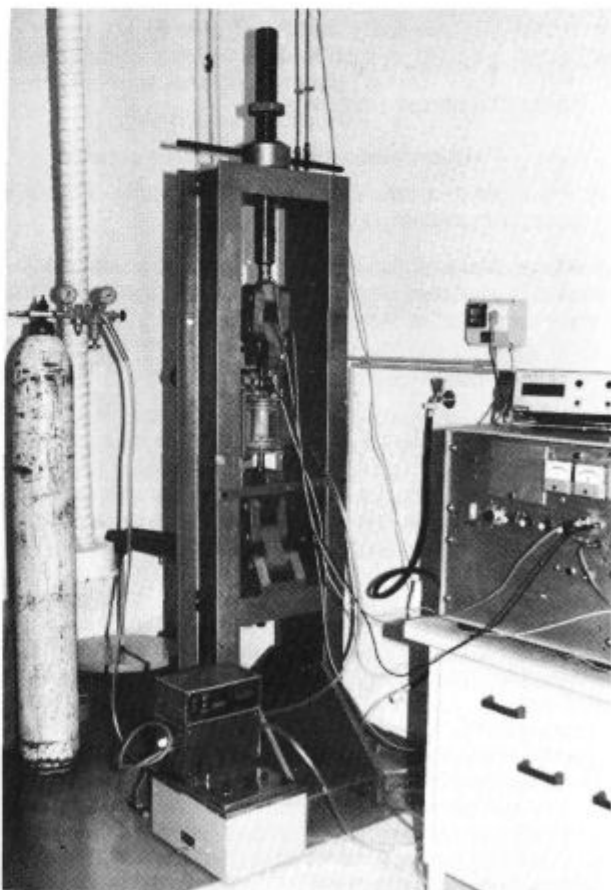
## 2.2. Raziskave napetostne korozije in povezava te s poškodbami zaradi istočasnega delovanja vodika

Za takšno raziskovalno delo smo s pomočjo vseh treh slovenskih železarn in drugih podjetij v Sloveniji — predvsem Hidromontaže, Belta, Mostovne, Aluminija Komen in še nekaterih drugih, usposobili center za napeto-

stno korozijo in vodikovo krhkost. To je pomemben dosežek, saj je tovrstna problematika v središču pozornosti vseh korozijskih kongresov zadnjih 15 let. Napetostno pokanje zaradi napetostne korozije ali kombinacije te z vodikom, je zelo pogost pojav zaradi naraščanja novih tehnologij, kjer se pojavljajo vedno bolj agresivni mediji in zahteve po materialih z višjimi dopustnimi napetostmi, ob istočasno večji zahtevi po daljši življenjski dobi in varnem obratovanju. Posledica neznanja so številni katastrofalni lomi vitalnih delov opreme v kemični in petrokemični industriji, rudarstvu, transportu, termo elektranah in še v mnogi drugi procesni tehniki.

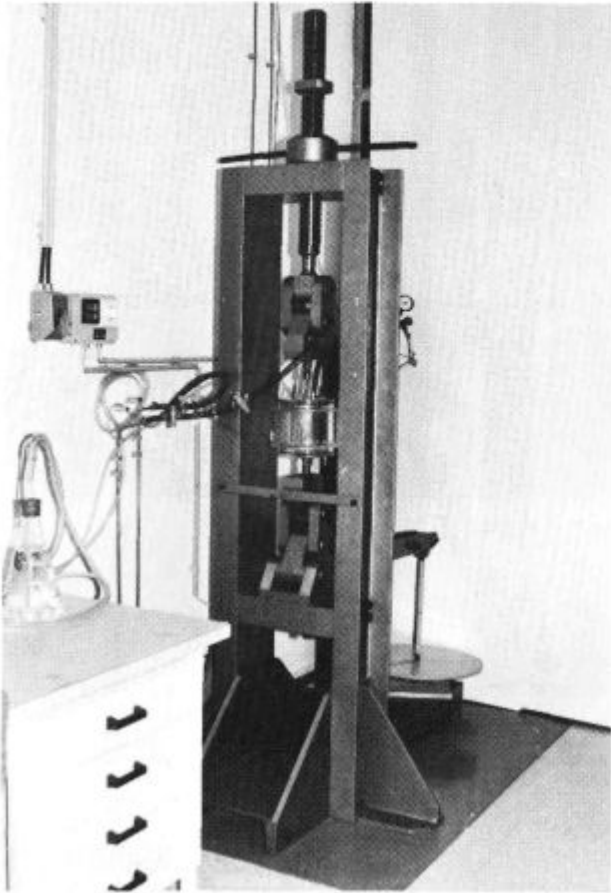
Krhkost kovin zaradi napetostne korozije in vodikove krhkosti je zelo kompleksen pojem, povezan z različnimi teorijami in mehanizmi. Ti mehanizmi so v tesni povezavi z mikrostrukturo kovine, njeno kristalno zgradbo in napakami v kristalni mreži, kemično sestavo, elektronsko zgradbo, napetostmi v materialu, vrsto korozijskega medija itd. Študij obeh fenomenov je torej zelo kompleksen, določeni mehanizmi pa nedorečeni in težko razumljivi.

Na slikah 7 in 8 je predstavljen del opreme iz tega laboratorija, ki z anodno polarizacijo preko časovno zelo stabilnega potenciostata omogoča študij napetostne korozije v kombinaciji z vodikovo krhkostjo, s katodno polarizacijo pa čisto vodikovo krhkost. Slednje smo izpopolnili še z meritvami permeabilnosti jekel za vodik, s čimer je omogočen študij vpliva različnih past (nečistoč, dislokacij in drugih mikrostrukturnih konstituentov) na pojav krhkosti v korozijskih medijih.



Slika 7:

Naprava za obremenjevanje preizkušancev in sklop preostalih aparatov za raziskavo napetostne korozije in vodikove krhkosti



Z dodatno raziskovalno opremo kemičnega laboratorija (številne analize korozijskih produktov, medijev in vsebnosti absorbiranega vodika z visokotemperaturno ekstrakcijo v vakuumu), s pomočjo klasične mikroskopije, fraktografske analize prelomnih površin na Scanning elektronskem mikroskopu, mikroanalize na elektronskem mikroanalizatorju in mehanskega laboratorija, smo uspeli zaokrožiti tovrstne raziskave, ki že uspešno preusmerjajo domačo metalurško dejavnost iz kvantitete v kvaliteto.

### 2.3. Atmosferske korozijske raziskave in drugi standardni ter nestandardni testi

Študij vpliva atmosferij na korozijske procese protikorozijsko zaščitene in nezaščitene kovinske materiale, omogočata slana in vlažna korozijska komora, ki sta bralcu tega članka gotovo že poznani in ju posebej ne predstavljamo.

Laboratorij je usposobljen tudi za številne standardne ali nestandardne preiskave, npr. nerjavnih jekel, superzlitin in različnih barvnih kovin.

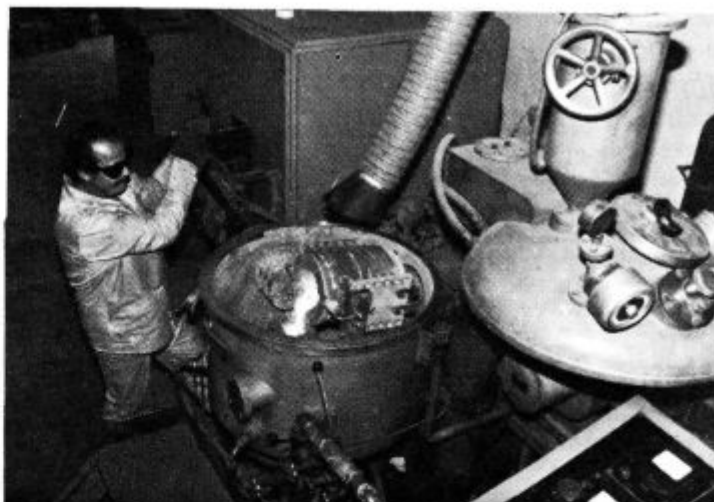
V fazi vpeljave je korozijsko utrujanje, pa tudi lomna mehanika, ki z določanjem faktorja intenzitete napetosti ( $K_{ISCC}$ ,  $K_{IHE}$ ) omogoča boljše vrednotenje materialov in njihovo selekcijo.

#### Slika 8:

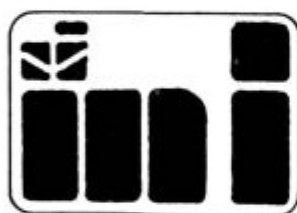
Opazovanje življenjske dobe pri napetostno korozijskem testu v korozijskem mediju, nasičenem s  $H_2S$ .



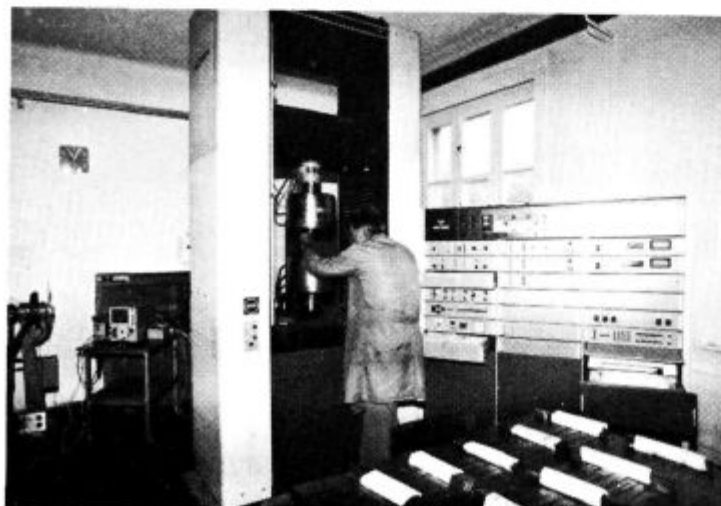
Električno pretaljevanje pod žlindro



Vakuumska talilna peč



SLOVENSKE ŽELEZARNE  
**METALURŠKI INŠTITUT**  
LJUBLJANA, LEPI POT 6



Stroj Instron za mehansko preizkušanje kovin



Vakuumska taliilna peč

## ***Povzetki predavanj XLI. Posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih***



## **Program XLI. Posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih (oktober, 1990)\***

### **Četrtek, 4. oktober 1990:**

**8.30** Otvoritev in pozdrav udeležencem

**9.00—11.00** Obravnava splošne tematike

1. D. Vodeb, Železarna Ravne  
ALI LAHKO POSTANEMO USPEŠNI?
2. S. Ažman, SŽ-Železarna Jesenice  
KVALITETA NI VSE, VSE PA JE NIČ BREZ KVALITETE
3. Z. Erjavec, D. Vodeb, M. Švajger, Železarna Ravne  
VARČEVALNI UKREPI IN SPREMEMBA TEHNOLOGIJE V PROIZVODNJI JEKLA
4. B. Marolt, SŽ-Železarna Štore  
PROFILNI PROIZVODNI PROGRAM
5. M. Švajger, E. Pandev, Železarna Ravne  
VPLIV DELEŽA ENERGIJE NA KONKURENČNOST METALURŠKIH IZDELKOV
6. J. Lamut, FNT-VTOZD Montanistika Ljubljana,  
ENERGIJA V ŽELEZARNAH V SLOVENIJI
7. C. Pohar, S. Dežman, S. Mihečič, R. Pavlin, M. Pribošič,  
SŽ-Železarna Jesenice  
IZRAČUN LASTNIH CEN PO DIREKTNIH STROŠKIH V ŽJ

RAZPRAVO VODI J. RODIČ

**11.15—13.00** Predstavitev del novih raziskovalcev

8. M. Švajger<sup>1</sup>, B. Koroušič<sup>2</sup>, Železarna Ravne, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
TERMODINAMIČNI IN KINETIČNI MODEL EPŽ PROCESA
9. J. Triplat, SŽ-Železarna Jesenice  
IZDELAVA NERJAVNIH JEKEL PO VOD POSTOPKU Z UPORABO KOMBINACIJE TRDNIH IN PLINASTIH OKSIDANTOV V J2
10. T. Drglin, T. Lavrič, SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
DOLOČANJE SLEDOV ANTIMONA V JEKLIH IN NIKLJEVIH ZLITINAH S HIDRIDNO TEHNIKO-AAS
11. D. Oblak<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Železarna Ravne, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
KONTROLA VELIKOSTI AVSTENITNIH ZRN V CEMENTAČIJSKIH JEKLIH LEGIRANIH Z NIKLJEM
12. T. Rodič<sup>1</sup>, J. Rodič<sup>2</sup>, S. Baksa<sup>3</sup>, A. Rodič<sup>2</sup>, <sup>1</sup>FNT-VTOZD Montanistika Ljubljana, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Lj., <sup>3</sup>Unior Zreče  
MODELIRANJE PREOBLIKOVALNIH PROCESOV PRI KOVANJU V UTOPIH
13. H. Kaker, Železarna Ravne  
IDENTIFIKACIJA IN MERITEV FAZ V JEKLIH S SIGNALOM POVRATNO SIPANIH ELEKTRONOV V RASTER ELEKTRONSKEM MIKROSKOPU
14. V. Perovnik, Železarna Ravne  
DIMENZIJSKE SPREMEMBE PRI TOPLOTNI OBDELAVI V VAKUUMSKI PEČI
15. D. Mikec<sup>1</sup>, A. Mandeljč<sup>1</sup>, T. Kolenko<sup>2</sup>, B. Glogovac<sup>3</sup>, <sup>1</sup>SŽ-Železarna Jesenice, <sup>2</sup>FNT-VTOZD Montanistika, <sup>3</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
REKONSTRUKCIJA POTISNE PEČI V VALJARNI BLUMING-ŠTEKEL ŽELEZARNE JESENICE

RAZPRAVO VODI A. KRIŽMAN

**15.00—16.30** Ekologija

16. J. Lamut, FNT, VTOZD Montanistika  
EKOLOŠKI INŽENIRING
17. F. Pavlin, FNT, VTOZD Montanistika  
VPLIV ENERGETIKE V METALURGIJI NA EKOLOGIJO
18. J. Kert, Železarna Ravne  
VZGOJA ZA OSVEŠČANJE EKOLOŠKEGA NIVOJA
19. J. Kunstelj, SŽ-Železarna Jesenice  
VARSTVO OKOLJA V ŽELEZARNI JESENICE

20. M. Podgornik, SŽ-Železarna Štore  
EKOLOGIJA V ŽELEZARNI ŠTORE
21. J. Kert, Železarna Ravne  
EKOLOGIJA V ŽELEZARNI RAVNE
22. A. Osojnik<sup>1</sup>, F. Pavlin<sup>2</sup>, I. Kranjc<sup>1</sup>, D. Bezljaj<sup>3</sup>, M. Zalokar<sup>4</sup>, <sup>1</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, <sup>2</sup>FNT, VTOZD Montanistika, <sup>3</sup>Izolirka Radovljica, <sup>4</sup>SŽ-Železarna Jesenice  
VPLIV MODERNIZACIJE JEKLARNE NA EKOLOŠKE RAZMERE V JESENŠKI DOLINI
23. A. Ravnik, SŽ-Železarna Jesenice  
SEŽIG OLJNIH GOŠČ V ŽELEZARNI JESENICE

RAZPRAVO VODI L. PUKLAVEC

**16.45—18.30** Novi materiali

24. B. Breže, A. Križman, Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru  
MARTENZIT V POLIKRISTALNIH Cu-Zn-Al ZLITINAH
25. F. Legat, SŽ-Veriga Lesce  
OBNAŠANJE Cu ZLITIN ZA ELEKTRODE
26. M. Kunšič, SŽ-Železarna Jesenice  
NOVO KONSTRUKCIJSKO JEKLO TIVANIT 500 S POVIŠANO VSEBNOSTJO DUŠIKA
27. D. Gregorič, SŽ-Železarna Jesenice  
NOVA SPOZNANJA NA PODROČJU SUPERFERITNIH NERJAVNIH JEKEL IZDELANIH V ŽELEZARNI JESENICE
28. G. Manojlovič<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>2</sup>, <sup>1</sup>SŽ-Železarna Štore, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
OSVAJANJE JEKLA ZA PERLITNO KOVANJE V UTOPIH (jeklo za ojnice)
29. J. Žvokelj, SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
VPLIV MALIH SPREMEMB V SESTAVI NA STRUKTURNE IN MEHANSKE LASTNOSTI JEKLA ZA PERLITNO KOVANJE
30. R. Kejžar, ZRMK, IM Ljubljana  
SINTETIČNI MINERALI — IDEALNE SESTAVINE AGLOMERIRANIH VARILNIH PRAŠKOV

RAZPRAVO VODI M. ŠVAJGER

**18.30—19.30** Novi postopki in tehnologije

31. D. Križman, A. Križman, L. Škerget, Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru  
TEMPERATURNI POLJE PRI KONTINUIRNM LITJU Z IZOTERMNIM STRJEVANJEM
32. B. Jelen, V. Mirkac, Železarna Ravne  
MODELIRANJE STRJEVANJA PILGER VALJEV
33. V. Leskovšek<sup>1</sup>, V. Hrnčič<sup>2</sup>, A. Pavlin<sup>3</sup>, T. Kolenko<sup>3</sup>, <sup>1</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, <sup>2</sup>Železarna Ravne, <sup>3</sup>FNT, VTOZD Montanistika  
RAZVOJ INDUKCIJSKO SEGREVANJE LABORATORIJSKE PEČI ZA TOPLOTNO OBDELAVO V ZVRTINČENI PLASTI
34. F. Grobelšek<sup>1</sup>, M. Torkar<sup>2</sup>, <sup>1</sup>ZRMK Ljubljana, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana  
SODOBNI POSTOPKI PLEMENITENJA POVRŠIN

RAZPRAVO VODI S. AŽMAN

### **Petek, 5. oktober 1990**

**8.00—9.30** Pregled dosežkov v posterjih

Poročajo: F. Vodopivec, V. Prešeren, M. Torkar, R. Kejžar, V. Uršič, F. Pavlin, L. Vehovar, B. Breskvar, R. Turk in R. Ilič  
RAZPRAVO VODI M. GABROVŠEK

**9.45—12.00** Obravnava programa raziskav za leto 1991

**12.00—13.00** Razprava in sklepi o aktualnih problemih stroke in zaključek posveta

\* — Organiziran 3.—5. oktobra, 1990 v Portorožu

— Povzetki Posvetovanja objavljeni v Železarskem zborniku 25, 1991, 1

— Raziskovalna dela so v celotni ali skrajšani obliki objavljena v Zborniku o XLI. Posvetu o metalurgiji in kovinskih gradivih, Ljubljana, Slovenske Železarne; Metalurški inštitut v Ljubljani, 1991



## Povzetki:

### 1. Ali lahko postanemo uspešni?

D. Vodeb

Železarna Ravne

V življenju se stalno soočamo pri delu, prostem času, osebnih problemih z dilemami, kako reagirati, da bom uspešen? Podobne dileme se kažejo tudi v podjetjih, kjer imamo sedaj fazo intenzivnega preobračanja kriterijev uspeha in postavljanje novih. Za nekatere se začenja vse znova, v metalurgiji pa smo vendar že naredili toliko škarta, da nam ni potrebno ponavljati osnov našega dela. Pa vendar dogajanja nam kažejo obratno sliko, nekaj teh nesmislov bom poizkusil ustrezno komentirati in usmeriti v konstruktiven tok uspeha panoge, ki je še kako potrebna naši družbi in predelovalni industriji. Meja realne kritike naj bo postavljena korektno in strokovno, primerno času, ki smo si ga vsi želeli in čakali.

### 2. Kvaliteta ni vse, vse pa je nič brez kvalitete

S. Ažman

SŽ-Železarna Jesenice

Kakovost in njene komponente predstavljajo še posebno ob našem vključevanju v EVROPO izredno in vse pomembnejšo dimenzijo, ki pogojuje uspešnost gospodarjenja. Zahteve, ki jih ob naglem razvoju proizvodnje in potrošnje ter konkurence postavlja v pogledu kakovosti tržišče, eksponentialno naraščajo. Prav zaradi tega moramo s poboljšanjem kakovosti zamenjati tisto, kar smo v preteklosti načrtovali predvsem z ekstenzivnim razvijanjem količine in neracionalnim investiranjem in razvijati kakovost v najširšem pomenu »kakovosti dela«.

Sodobna filozofija in politika kakovosti (način razmišljanja, zakaj kakovost, razvoj kakovosti — perspektiva, politika kakovosti, vloga kakovosti v sodobni družbi, ekonomika kakovosti).

Sistem kakovosti (organizacija spremljanja kakovosti, integralno upravljanje kakovosti kot sistem jamstva — zavarovanja kakovosti, principi organiziranja).

### 3. Varčevalni ukrepi in sprememba tehnologije v proizvodnji jekla

Z. Erjavec, D. Vodeb, M. Švajger  
Železarna Ravne

Osnovni namen prispevka je ovrednotiti znižanje porabljene energije in deleža stroškov v zvezi z njo v strukturi metalurškega proizvoda Železarne Ravne na osnovi predpostavljenega scenarija. Ta scenarij predvideva znižanje obsega proizvodnje nizko kvaliteten jekel, zamenjavo dveh 40 t EOP z eno pečo visoke produktivnosti UHP, uvedbo kontinuirnega litja gredic in rekonstrukcijo nekaterih obstoječih metalurških peči. Izhodišča za taka razmišljanja so visok delež (skoraj 12 %) energije v strukturi odhodkov metalurških izdelkov in visoka specifična ter absolutna poraba energije. Po zaključenih investicijah, v ocenjeni višini 370 milijard din, bi se delež energije v odhodkih znižal na 9,7 %, metalurgija bi prihranila letno 875 TO energije in 77 milijonov din (glede na cene maj 1990).

Ob teh efektnih predvidenih naložb sta ekvivalentna efekta še boljši izplen in preproveri in sanacija nekaterih ekoloških problemov. Naložbe se, gledano samo z naslova prihrankov energije, povrnejo v petih letih.

### 4. Profilni proizvodni program

B. Marolt

SŽ-Železarna Štore

Program proizvodnje in predelave jekla je v Železarni Štore doslej baziral na klasičnih tehnologijah za asortiman ogljikovih in nizko legiranih jekel. Tržišče in razvoj sta narekovala potrebne spremembe, pri katerih pa smo v veliki časovni zamudi zaradi preteklih razmer. Te in pa trenutno stanje črne metalurgije nasploh so povzročile tudi izrazito odklonilno stališče do naše panoge.

Za lastne usmeritve in razvojne programe smo v zadnjem času priskrbeli tudi mnenja tujih institucij in potrebno podporo širše skupnosti. Usmeritev je jasna: v Železarni Štore bomo proizvajali vedno več legiranih jekel in še jekla za kovanje s poudarkom na jeklih za poboljšanje.

Nove valjarske kapacitete nam omogočajo širjenje dimenzijskega asortimana navzgor tako za ploščate, kvadratne in okrogle profile ter za profile posebnih oblik, ki jih je možno naprej tudi hladno predelovati.

Končni cilj je postati mala in elastična železarna, prilagodljiva tržnim razmeram in biti sposobna hitrega prilagajanja tehnoloških postopkov novim zahtevam. Pogoj je uresničitev nekaterih nujnih modernizacij in strukturne spremembe v sami proizvodnji ob nujni organizacijski preobrazbi samega sistema Slovenskih železarn.

### 5. Vpliv deleža energije na konkurenčnost metalurških izdelkov

M. Švajger, E. Pandev

Železarna Ravne

V prispevku so prikazani deleži posameznih stroškov, ki vplivajo na oblikovanje lastne cene metalurških izdelkov s težiščem na stroških energije. Analiza stroškov je narejena za serijo metalurških izdelkov, ki se med seboj razlikujejo po tehnološki zahtevnosti, deležu vložene znanja, dela, materiala in energije ter vrednosti, ki jo trg prizna. Obdelana so medsebojna razmerja stroškov izdelave v odvisnosti od tržne vrednosti. Nenazadnje je na osnovi tržno priznanih stroškovnih postavk v lastni ceni nakazana ena izmed možnih smeri prestrukturiranja metalurgije v Železarni Ravne.

### 6. Energija v železarnah v Sloveniji

J. Lamut

FNT-VTOZD Montanistika

Jeklo kot najpomembnejše in nenadomestljivo gradivo proizvajamo pod specifičnimi pogoji, saj ga večino pridobimo po tehnološki poti — ruda, grodelj, jeklo in pri tem uporabljamo različna gradiva oziroma vrste energij.

Za jeklo, pridobljeno po tej tehnologiji, porabimo v povprečju okrog 20 GJ/t.

V Železarnah Slovenije so bile v zadnjih letih izvedene velike tehnološke spremembe, predvsem v izdelavi jekla. Od SM postopka so vse tri železarne prešle na izdelavo vsega jekla v EOP pečeh, vključno s ponovno metalurgijo. Z ukinitvijo proizvodnje grodlja v plavžih in elektroplavžih se je specifična poraba primarne energije v Železarni Jesenice znižala iz 21 GJ/t na 13,5 GJ/t surovega jekla, v Železarni Štore pa iz 15 na 8,5 GJ/t. Skupna poraba primarne energije je tudi močno odvisna od asortimana in toplotne obdelave jekla v nadaljni finalizaciji. To je posebej značilno za Železarno Ravne, ki ima relativno nizko specifično porabo v proizvodnji jekla, ki pa narašča z vse večjo finalizacijo v toku tehnološkega postopka.

V predavanju bo prikazana tudi primerjava porabe energije med različnimi postopki izdelave jekla doma in v svetu.

### 7. Izračun lastnih cen po direktnih stroških v Železarni Jesenice

C. Pohar, S. Dežman, S. Mihelčič, R. Pavlin, M. Pribošič  
SŽ-Železarna Jesenice

Osnovni namen kalkulacije lastnih cen po direktnih stroških je, da tekoče vrednostno kontroliramo proizvodnjo in se na osnovi teh rezultatov odločamo, kdaj se dani izdelek izplača izdelovati in kdaj ne.

Za kalkulacije uporabljamo 4 velike razrede podatkov in sicer: o izdelkih in njihovem vložku, tehnologiji, potroških pri izdelavi ter cene inputa.

Pri izračunu lastne cene (pol)izdelkov upoštevamo le direktne stroške, to je stroške porabljenih materialov in vložka ter stroškov predelave na posameznih strojih, ki prehajajo na izdelke na njihovi tehnološki poti. Rezultati o potroških in stroških na enoto izdelka na danem stroju v različnih časovnih obdobjih naj bi si bili podobni, zato določimo najbolj ustreznega ter ga

standardiziramo. Taki nam rabijo kot normativ za kontrolo doseženih stroškov proizvodnje. Zaradi obilice podatkov, ki jih rabimo pri kalkulaciji moramo uvesti kontrole posameznih razredov podatkov kot so: izkoristki, tehnologija, kumulativa in lastnih cen iz podatkov o asortimanu končnih izdelkov in skupno časovno obremenitev agregatov pri taki proizvodnji.

### 8. Termodinamični in kinetični model EPŽ procesa

M. Švajger<sup>1</sup>, B. Koroušič<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Železarna Ravne, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

Z aplikacijo statistične termodinamike, metode interakcijskih parametrov in termodinamičnega ravnotežja nekaterih enačb smo želeli pojasniti kinetiko oksidacije in redukcije elementov v jeklu in izdelati dinamični model porazdelitve kisika med pretaljevanjem EPŽ ingotov do dolžine 6 m. Končni cilj naloge je bil napovedovanje sestave nekaterih ključnih elementov v EPŽ ingotu in odvisnosti od sestave elektrode in pogojev pretaljevanja.

Razviti model je verificiran v industrijskih pogojih v EPŽ obratu Železarne Ravne in je upravičil pričakovanja.

### 9. Izdelava nerjavnih jekel po VOD postopku z uporabo kombinacije trdnih in plinastih oksidantov v J2

J. Triplat

SŽ-Železarna Jesenice

Železarna Jesenice ima že dolgoletno tradicijo v proizvodnji nerjavnih jekel, posebno po VOD postopku. Z izgradnjo jeklarne smo prenesli proizvodnjo navedenih kvalitet jekel v nove agregate. Pri tem smo se pojavile določene specifičnosti, kot so:

- povečana produktivnost elektro obločne peči v primerjavi s starimi agregati in s tem povezana koherentnost dela EOP in VOD
- bistveno spremenjeni toplotno tehnični pogoji v ponovci
- vodenje oksidacijske stopnje taline v peči in VOD s ciljem doseči boljši izkoristek Cr in porabo dragih surovin zmanjšati na minimalno možno mero.

S ciljem doseči navedene cilje smo v ŽJ razvili tehnologijo izdelave nerjavnih jekel z uporabo kombinacije trdnih in plinastih oksidantov v fazi oksidacije nerjavnega jekla v VOD. Rezultati in dosežki v prvem obdobju uporabe te tehnologije bodo tema našega prispevka.

### 10. Določanje sledov antimona v jeklih in nikljevih zlitinah s hidridno tehniko AAS

T. Drglin, T. Lavrič

SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

Cilj predstavljenega dela je določanje nizkih koncentracij Sb v jeklih in zlitinah na osnovi Ni. Sposobnost Sb, da tvori s »nascentnim«<sup>1</sup> vodikom hidrid, nam omogoča uporabo hidridne tehnike v kombinaciji z atomsko absorpcijsko spektrometrijo.

Prednost te metode je v skoncentriranju in loči Sb od osnovne. Raziskovali smo vplive elementov, ki so prisotni v Ni zlitinah na višino signala. Nekateri preodni elementi (Ni, Co . . .) in nekateri metaloidi (Se, Sn, As . . .) močno zmanjšajo signal za antimon že v relativno nizkih koncentracijah. Interference, ki jih povzročajo ti elementi smo delno zmanjšali z uporabo EDTA, nismo jih pa popolnoma eliminirali. Zato je za vrednotenje rezultatov potrebno uporabljati umeritveno krivuljo, izdelano z metodo standardnega dodatka.

Študirali smo tudi vpliv koncentracije uporabljenih kislin in vpliv oksidacijskega stanja Sb na višino signala. Občutljivost metode smo povečali z redukcijo Sb(V) v Sb(III), kot reducent smo uporabili raztopino kalijevega jodida.

Izdelano metodo smo preizkusili na certificiranih referenčnih materialih nikljevih zlitin, ki so vsebovali od 0,5 do 200 µg g<sup>-1</sup> Sb. Relativni standardni odkim v tem območju ±20 µg do ±8 %.

Metoda je enostavna, hitra in občutljiva ter uporabna za vse vrste jekel in nikljevih zlitin, ki so topne v zlatotopki in ne vsebujejo večjih vsebnosti W in Nb.

### 11. Kontrola velikosti avstenitnih zrn v cementacijskih jeklih legiranih z nikljem

D. Oblak<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Železarna Ravne, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

Velikost avstenitnih zrn je eden izmed osnovnih pokazateljev kakovosti jekel za cementacijo. V Železarni Ravne imamo precej problemov, ker pogosto ne dosežemo finega avstenitnega zrna pri krom-nikljevih cementacijskih jeklih, pri vsebnostih aluminija in dušika, ki drugim cementacijskim jeklom zagotavljajo fino avstenitno zrno. Zato smo s pričujočo raziskavo ugotavljali vpliv aluminija na rast zrna, v eno izmed poskusnih talin pa smo kot afinator zrna dodali tudi niob. Raziskovali smo vpliv temperature in časa žarjenja na velikost avstenitnega zrna in vpliv predhodne termične in deformacijske zgodovine.

### 12. Modeliranje preoblikovalnih procesov pri kovanju v utopih

T. Rodič<sup>1</sup>, J. Rodič<sup>2</sup>, S. Baksa<sup>3</sup>, A. Rodič<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FNT, VTOZD Montanistika, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut

Ljubljana,

<sup>3</sup>UNIOR Zreče

Cilj tematskega sklopa Modeliranje preoblikovalnih procesov pri kovanju v utopih je razvoj numeričnega modela za računalniško simulacijo plastičnega toka materiala in porazdelitve temperature med preoblikovanjem v utopih. V okviru tega tematskega sklopa je bil v letu 1989 opravljen prvi del raziskav z naslovom »Osnovni koncept matematične simulacije preoblikovalnega procesa pri utopnem kovanju tipičnega osno simetričnega odkovka«. Teoretične raziskave so potekale na naslednjih področjih: teorija elastoviskoplastičnosti, teorija nestacionarnega prenosa toplote, napovedovanje mikrostrukturnih sprememb in kriteriji preoblikovalne sposobnosti.

Na osnovi izdelanega koncepta se je pričel razvoj računalniškega programa in opravljene so bile prve preizkusne simulacije toka materiala med kovanjem avtomobilske polosi iz proizvodnega programa Kovaške Industrije UNIOR Zreče. Med računanjem lahko ob koncu vsakega časovnega koraka (inkrementa) na ustrezno spominsko enoto računalnika zapišemo vozlišče vrednosti sil in pomikov ter drugih termomehanskih parametrov. Dobljeno množico numeričnih rezultatov, lahko kasneje predstavimo v grafični obliki s pomočjo 3-D barvnih postprosedov, ki nam omogočajo nazoren vpogled v časovno in prostorsko porazdelitev napetosti, deformacij, hitrosti deformacij in temperature v preoblikovalni coni.

S spreminjanjem robnih pogojev lahko opazujemo vpliv tehnoloških parametrov, kot so na primer oblika in gibanje orodja, začetna temperatura preoblikovana ter trenjske razmere, na dogajanje v preoblikovalni coni.

Prednosti pri uporabi numeričnih modelov za računalniško simulacijo preoblikovalnih postopkov se kažejo predvsem pri načrtovanju novih procesov, kjer simulacije lahko opravimo že v fazi snovanja, ter tako proces »optimiramo že na risalni deski«. S tem se lahko izognemo mnogim napakam in slabostim katerih odpravljanje v proizvodnji je izredno drago.

Kljub intenzivnemu razvoju numeričnih modelov in računalniške opreme v zadnjih desetih letih, pa je obseg uporabe numeričnih modelov v praksi še vedno relativno skromen tudi v razvitem svetu.

### 13. Identifikacija in meritev faz v jeklih s signalom povratno sipanih elektronov v raster elektronskem mikroskopu

H. Kaker

Železarna Ravne

Poznavanje srednjega koeficienta povratnega sipanja elektronov od večkomponentnih vzorcev in njihov izračun iz koeficientov povratnega sipanja elektronov čistih elementov je interes kvantitativne raster elektronske mikroskopije. Interpretacija materialnega kontrasta zahteva točno meritev in izračun koeficien-

tov povratnega sipanja elektronov. Meritve v raster elektronskem mikroskopu smo opravili z detektorjem odbitih elektronov (solidstate detector), teoretične izračune pa z Monte Carlo simulacijo. Metoda je primerna za hitro identifikacijo predvsem binarnih faz v jeklih in kot dopolnilna metoda h klasični energijsko disperzijski rentgenski mikroanalizi.

#### 14. Dimenzijske spremembe pri toplotni obdelavi v vakuumski peči

V. Perovnik  
Železarna Ravne

Med težko tešljive probleme toplotne obdelave spadajo dimenzijske spremembe. Različne strukture, ki se tvorijo med toplotno obdelavo, imajo različne specifične volumne. Posledica tega so makro dimenzijske spremembe.

Predvideti, kako velik bodo te spremembe, kjer se bodo pojavili skrčki in kje raztezki je zelo težko in nezanesljivo.

V našem delu želimo prikazati nekaj praktičnih izkušenj pri toplotni obdelavi orodij iz različnih jekel v vakuumski peči.

Dimenzijske spremembe smo določali na koordinatnem merilnem stroju, ki ima natančnost 1 µm.

Rezultati kažejo, da vplivajo na dimenzijske spremembe predhodno mehanska obdelava, plastična predelava, ter temperaturni režimi toplotne obdelave, predvsem popuščanje.

#### 15. Rekonstrukcija potisne peči v valjarni Bluming-Štekel Železarne Jesenice

D. Mikec<sup>1</sup>, A. Mandeljc<sup>1</sup>, T. Kolenko<sup>2</sup>, B. Glogovac<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>SŽ-Železarna Jesenice, <sup>2</sup>FNT, VTOZD Montanistika Ljubljana,  
<sup>3</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

Celotna proizvodnja jekla za ploščati program se je vlivala pred izgradnjo nove jeklarne klasično v kokile. Bloki so se v vroči valjarni ogrevali v treh globinskih pečeh. Potisna peč je služila le za ogrevanje zahtevnejših kvalitete jekel, katere ni bilo možno direktno valjati iz blokov v trakovke. Z izgradnjo nove jeklarne se je v valjarni Bluming-Štekel spremenil pretok materiala. Z ukinitvijo SM jeklarne se je zmanjšala proizvodnja klasično vlitih blokov in pričela proizvodnja kontinuirno litih slabov, ki se direktno zalagajo v potisno peč. Po spremembi tehnološke poti je postala potisna peč ključni ogrevalni agregat vroče valjarne.

Zaradi pomembnosti potisne peči v tehnološkem procesu po izgradnji nove jeklarne je bila v letu 1986 dogovorjena rekonstrukcija peči. Rekonstrukcijo potisne peči je izvedla RO «Vatrostalna» — OOUR Inženiring Zenica v sodelovanju s strokovnjaki oddelka regulacijske tehnike in avtomatike Železarne Jesenice.

Tudi po rekonstrukciji peči se je v začetni fazi pojavljalo veliko problemov glede kvalitete ogrevanja. Zaradi tega smo v sodelovanju z MI in VTOZD Montanistika pristopili k obsežnim meritvam, s katerimi smo ugotovili dejanske pogoje ogrevanja. Na podlagi toplotno tehničnih meritev in računalniške simulacije ogrevanja smo optimizirali ritem valjanja in temperaturni režim ogrevanja.

V drugi polovici leta 1987 se je pretok materiala v vroči valjarni pričel postopoma preusmerjati iz direktnega valjanja blok-trak, na valjanje slab-trak iz nove jeklarne preko potisne peči. Ustrezno z naraščanjem količine kontinuirno litih slabov in povečanim deležem vroče založenih slabov se je zmanjšala tudi specifična poraba energije.

#### 16. Ekološki inženiring

J. Lamut  
FNT, VTOZD Montanistika

V skrbi za čisto delovno in širše okolje so v slovenskih železarnah sami, ali s skupno pomočjo razvili in postavili številne postopke, s katerimi čistijo dimne pline, vodo, oljne emulzije, iz žilindre pridobivajo granulirane kovine itd. V predavanju bodo na kratko predstavljene posamezni postopki, ki so narejeni z lastnim znanjem. Predstavljene bodo možnosti skupnega nastopa pri nujenju tehnoloških rešitev in opreme za zaščito okolja.

#### 17. Vpliv energetike v metalurgiji na ekologijo

F. Pavlin<sup>1</sup>, A. Osojnik<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>FNT, VTOZD Montanistika, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut

Okolje se v splošnem onesnažuje z dimnimi plini, odpadkami in trdnimi odpadki. V prispevku je podan pregled onesnaževanja z dimnimi plini, ki onesnažujejo okolje predvsem zaradi uporabe različnih vrst energije. V dimnih plinih, ki izhajajo iz kurilšč so poleg trdnih delcev še plini, kot so SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> in CO<sub>2</sub>.

V preteklosti je bil poudarek predvsem na porabi premoga in kasneje mazuta, ki sta se do današnjih dni zmanjšali na najmanjšo možno mero. Premog je ostal pri nekaterih proizvodnih procesih le še kot tehnološka surovina — reductent.

Po prenehanju izdelave surovega železa v Sloveniji pa se je zmanjšala tudi poraba koksa na veličino, ki je še potrebna za izdelavo sive litine.

Ne glede na uporabo čistilnih naprav, ki izločijo pretežni delež trdnih delcev iz dimnih plinov so se spremenile tudi razmere zaradi količine nezaželenih plinskih komponent v dimnih plinih, saj bo v devedesetih letih prevladovala uporaba zemeljskega plina in električne energije. V osemdesetih letih je bilo pridobljeno 54 % energije iz goriv, ki so vsebovala žveplo, v prihodnosti pa je pričakovati le še okoli 20 % porabe energije iz takšnih goriv.

#### 18. Vzgoja in osveščanje ekološkega nivoja

J. Kert, A. Pavše  
Železarna Ravne

##### 1. IZHODIŠČNA TEZA

Sistematičen spopad z neznanjem in ignoriranjem znanja o varstvu okolja je pogoj za doseganje višje stopnje zaščite človekovega okolja v ŽR.

##### 2. CILJI EKOLOŠKE VZGOJE IN IZOBRAŽEVANJA V ŽELEZARNI RAVNE

— ekološko osveščanje in dviganje ekološke zavesti zaposlenih ter poučitev o «ekoloških predpisih za delo»,

— razvijanje iniciativnosti in sposobnosti odgovornega odločanja v odnosu do okolja,

— posredovanje oziroma omogočanje pridobivanja najnovejših znanj o dosežkih in pristopih varstva okolja razvojnim inženirjem.

##### 3. NEKAJ USMERITEV ZA PROGRAMIRANJE IN IZVEDBO NAČRTA

— varstvo okolja obravnava na podoben način kot varstvo pri delu (izdelava ekoloških predpisov, začetno in periodično posredovanje in preverjanje znanja teh predpisov) s poudarjanjem kratkoročnih in dolgoročnih posledic kršenja predpisov in s spodbujanjem iniciative za varstvo okolja,

— razvojnim inženirjem omogočiti redno in sprotno seznanjanje z dosežki in pristopi reševanja ekoloških problemov v svetu (ekološko varna tehnologija, ekološko varna predelava in uporaba industrijskih odpadkov itd.),

— vsebino varstva okolja vnesti v pripravniške programe ŽR in si prizadevati za uvedbo teh vsebin v redne šolske programe,

— učinkovitost programov, pristopov in sredstev sproti ugotovljati, da ne postanejo dolgočasne rutine itd.

##### 4. PRISTOPI IN SREDSTVA

###### 4.1. Ob sprejemu delavca

4.1.1. Seznanitev z »ZELENO KNJIŽICO« podjetja

4.1.2. Poučitev o ekoloških predpisih v konkretnem delovnem okolju

###### 4.2. Tekom zaposlitve v Železarni Ravne

4.2.1. Splošne oblike in pristopi (za vse zaposlene)

— »zelena stran« v tovarniškem glasilu, na kateri obravnava ekol. problematiko,

— zbori delavcev vsaj 2-krat letno obravnavajo delovanje na področju varstva okolja,

— ekološki timi v OE,

— »zeleni telefon«, na katerem se dobe ekološki nasveti in oddajajo opozorila, zapažanja, iniciative . . .

— uvedba različnih tekmovanj v zvezi z varstvom okolja, uvedba ekološkega tedna,

— itd.

4.2.2. Posebne oblike pristopov (predavanja, okrogle mize, posveti), namenjeni:

- a) načrtovalcem razvoja, investicij in modernizacij, poslovalni strukturi,
- b) zaposlenim, ki upravljajo z napravami oziroma uporabljajo okolju škodljive snovi,
- c) vodjem poslovnih proizvodnih procesov.

## 19. Varstvo okolja v Železarni Jesenice

### J. Kunstelj SŽ-Železarna Jesenice

Pred štirimi leti smo v Portorožu o ekoloških dosežkih in načrtih že govorili. Zagnanost pri izvajanju varovanja okolja iz sredine osemdesetih let se je umirila, vse bolj pa se krepi zavest o potrebnosti zdravega delovnega in bivalnega okolja.

Kot pri vseh projektih, torej tudi pri ekoloških je trenutno osnovni problem financiranje. Pogoj je seveda vsem železarjem dobro znan — tekoče pozitivno poslovanje podjetja.

V Železarni je ostalo neizvršenih še nekaj že pripravljenih projektov, nekaterim problemom pa šele iščemo ustrezno praktično rešitev.

Projekta »Dograditev nevtralizacije v Hladni valjarni Bela« in »Sanacija Regeneracije HCl« sta nujno potrebni izvedbe zaradi prekomerne emisije prahu in prekoračitve MDK v vodah.

Projekt »Sežig oljnih gošč« bo predstavljen na tem posvetu. Projekt »Cepitev oljnih emulzij« pa je pripravljen že tako daleč, da čaka samo še zeleno luč za pričetek izgradnje.

Vsi štirje projekti konkurirajo za sredstva iz posojila mednarodne banke za obnovo in razvoj (ekološki program). Vrednost vseh štirih projektov je okrog 10 (deset) milijonov dinarjev.

Nerešen pa ostaja zelo aktualen problem na Jesenicah — to je sekundarna bela jeklarska žilindra. Projektna skupina pripravlja predlog tehnološke rešitve.

Težave povzročata tudi sanacija hrupa stiskalnice DEE 1250 na Javorniku.

Nadaljujemo tudi začeto delo pri saniranju pogojev luženja nerjavne žice in hladno valjanih trakov, da bomo dokončno lahko ustavili stare bobnaste lužilne naprave.

Po vseh dosedanjih izkušnjah in pripravljenih projektih lahko trdimo, da so ekološki problemi v Železarni obvladljivi — znane so tehnične rešitve: učinkovito odpraševanje, protihrupna zaščita, nevtralizacijske in filtrirne naprave, regeneriranja odpadkov itd. Vsi ekološki ukrepi in objekti pa zahtevajo določena sredstva, ki jih moramo enakovredno vgrajevati v letne, srednjeročne in dolgoročne plane.

Resnični uspeh pa bomo dosegli šele z doslednejšo realizacijo, rednim vzdrževanjem in zavestjo, da so ČISTILNE NAPRAVE DEL PROIZVODNIH NAPRAV in jih tako tudi obravnavali.

## 20. Ekologija v Železarni Štore

### M. Podgornik SŽ-Železarna Štore

Železarna Štore je že razmeroma zgodaj pričela v razvojne in investicijske načrte vnašati tudi rešitve ekoloških vprašanj.

Začetki organiziranega razreševanja vprašanj negativnih vplivov na okolje segajo v leto 1963, ko je bil narejen program za čiščenje odpadnih vod. Vzporedno z investicijsko izgradnjo na lokaciji Štore II je bila postavljena čistilna naprava za vodo. Pozneje, leta 1981, je bila podobna naprava zgrajena tudi za industrijsko vodo za obrate na lokaciji Štore I. Povsod po železarni so se zgradili ločilniki — separatorji, da se prepreči event. izpust olj, masti in mazuta v javne vodotoke oz. v Voglajno.

Prve meritve emisij na izvorišnih dimnih plinov v ozračje smo izvršili leta 1971. Te so se nanašale na izvore  $SO_2$  in prahu, dušikove okside ( $NO_x$ ) na saje in ostale sestavne elemente plinov po zgorevalnih procesih. V novi elektrojeklarni je že leta 1974 pričela delovati čistilna naprava za dimne pline. Ob zagonu druge el. obločne peči smo takoj aktivirali tudi drugo polovico čistilne naprave. Leta 1977 smo v livarni namestili lovilne prhe na kupolkah. Različne tipe filtrov smo aktivirali tudi na ostale izvore emisij: peskalni stroji v livarnah, stroji za čiščenje gredic v valjarni, čiščenje profilov v jeklovleku itd.

Dodatno se je stanje stalno izboljševalo z uporabo ustrežnejših energijskih medijev, ki so postopoma zamenjevali premog in mazut in reševali energetske primanjkljaje. Zaradi uvedbe propan-butana smo že leta 1974 ukinili kotlarno na premog,

leta 1979 smo zaprli staro jeklarno s Siemens Martinovo pečjo, izločili smo parno vleko na tirih in konec leta 1987 prenehali s proizvodnjo na elektroplavžu, kar je bistveno prispevalo k zmanjšanju emisij v ozračje.

Tudi ostala področja, kjer se je vključevalo predvsem varstvo pri delu, smo postopno razreševali; lokalizirani so bili izvori hrupa, narejene meritve. Z različnimi ukrepi smo vrsto izvorov sanirali: protizvočne zaščite, drugačne tehnične rešitve itd.

## 21. Ekologija v Železarni Ravne

### J. Kert Železarna Ravne

Več kot trideset let se v ŽR že zavedamo odgovornosti do varstva okolja, zavedamo se, da nismo le proizvajalci kvalitetnih jekel, temveč tudi onesnaževalci okolja. S svojimi prizadevanji in uspehi zagotovo sodimo v vrsto tistih, ki se povsem resno lotevamo vseh problemov varstva okolja na podlagi lastnega aktivnega odnosa do tovrstnih vprašanj, ne le zgolj na pritisk vsiljenih ukrepov in zakonodaje upravnih organov.

Sadove dosedanjih prizadevanj lahko strnemo v naslednjem:

#### — Varstvo zraka:

emisijo  $SO_2$  smo zmanjšali od 7000 na 500 kg/dan, emisijo prahu smo zmanjšali za 50 % (dnevno ulovimo 2,5—3 tone oksidnega prahu iz EOP) emisijo plinastih fluoridov smo zmanjšali za 75 % — saj smo v zadnjih petih letih zmanjšali porabo jedavca  $CaF_2$  od 2000 ton na 500 ton letno.

V ŽR trenutno obratuje okrog 50 večjih čistilnih naprav za čiščenje zraka (prahu). V letošnjem letu smo bogatejši za dve napravi: pri plamenskem čiščenju ingotov v kovačnici in pri brušenju odkovkov. Trenutno pa je v fazi izgradnje velika ČN Flakt II v jeklarni II. Uradna potrditev naših prizadevanj pa je razvrstitev mesta RAVNE na 39. mesto po onesnaženosti z  $SO_2$  in na 31. mesto po onesnaženosti z dimom med 44 kraji v Sloveniji.

#### — Varstvo voda:

problem zaoljenosti naših odpadnih voda smo pričeli reševati z rekonstrukcijskimi izboljšavami škapne jame valjarne, z doslednejšim vzdrževanjem vseh potencialnih onesnaževalcev (agregatorov), predvsem pa s postavitvijo obrata za cepljenje odpadnih oljnih emulzij, ki smo ga postavili v tem letu. Od maja do konca avgusta smo že očistili nad 300 m<sup>3</sup> odpadnih oljnih emulzij, tovrstne usluge pa ponudili tudi zunanjim podjetjem.

Uspešno obvladujemo tudi problematiko odpadnih voda drugih obratov, problem odpadnih kislin iz lužilnice pa rešujemo s projektom nadomestitve luženja žice s peskanjem, ki je v teku.

Z urejanjem skladišč in poslovanja z materiali so bili dani tudi pogoji za doslednejše vodenje evidenc nad vsemi materiali, ki v Železarno Štore vstopajo in na koncu procesov izstopajo. Vzporedno s tem se je urejala tudi problematika odlagališč odpadkov.

Železarna Štore se vse bolj zaveda, da so za nadaljno perspektivo našega podjetja vse bolj pomembni: ekonomika, ekologija in energetika. Tem smo v zadnjih dveh letih posvetili še dodatne napore tudi zaradi težav, ki smo jih v Štorah v tem obdobju imeli poleg ostalih, ki tudi sicer tarejo gospodarstvo in črno metalurgijo. To nas je vodilo tudi v novo organiziranost, uvedbo drugačnih metod dela in predvsem v vse večjo javnost dela.

## 22. Vpliv modernizacije jeklarne na ekološke razmere v jeseniški dolini

A. Osojnik<sup>1</sup>, F. Pavlin<sup>2</sup>, I. Kranjc<sup>1</sup>, D. Bezlaj<sup>3</sup>, M. Zalokar<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, <sup>2</sup>FNT, VTOZD  
 Montanistika,  
<sup>3</sup>Izolirka, Požarni inženiring, Radovljica, <sup>4</sup>SŽ-Železarna Jesenice

Namen raziskave je bil kvantitativno ovrednotiti vpliv ekoloških sprememb v Železarni na bližnje in širše okolje v primerjavi s predhodnim obdobjem glede na spremenjeno tehnologijo, energetske medije, surovine in nove naložbe.

V ta namen je bila izdelana sistematična ekološka študija, ki obsega meritve emisije prahu in plinov na karakterističnih mestih ter onesnaženosti zraka in prašnih usedlin v bližnji in daljni okolici železarne.

Izbrana in preverjena je uporabljena metodologija in merilna oprema, prikazani so rezultati meritev, podane ocene obstoječih virov onesnaževanja zraka ter nakazana prioriteta nadaljnjih sanacij v Železarni Jesenice.

#### — Problematika odpadkov:

Priljubljen projekt izgradnje nove deponije se zaradi težkih finančnih razmer žal ne bo mogel realizirati, smo pa pristopili k izdelavi projekta predelave in uporabe vseh odpadkov, ki je s stališča ekologije in ekonomije zagotovo interesantnejši. Drobljenje in magnetna separacija vseh vrst trdnih odpadkov (teh je letno v ŽR nad 100.000 ton) bo nudila metalurgom del vročica, ekološko neoporečen odpadni material pa bodo uporabili gradbinci, cestarji idr. Odpadne peske, ki vsebujejo ostanke fenolnih ali furanskih smol, bomo sežigali, preostali pesek pa koristno uporabili. Pod drobnogled smo postavili vse nevarne snovi, ki jih v ŽR uporabljamo (teh je okrog 50).

#### — Ostale aktivnosti:

Letos smo v ŽR imenovali strokovni team za ekologijo, člani tega teama strokovno pokrivajo vsa področja, načrt oziroma program dela obeta aktivno reševanje preostalih problemov. Izdelali smo tudi načrt ekološke vzgoje in izobraževanja za delavce v ŽR — tudi od tega si obetamo vsebinski premik, posebej v odnosu delavcev do ekoloških vprašanj, saj dobro vemo, da za uspešno obvladovanje teh vprašanj niso dovolj le drage čistilne naprave — potrebujemo tudi ekološko osveščene delavce. — Številne raziskovalne naloge iz preteklosti, razpoložljivi kadri in njihov znanje ter delovne izkušnje nakazujejo tudi možnost nove dejavnosti-ekološkega inženiringa.

## 23. Sežig oljnih gošč v Železarni Jesenice

### A. Ravnik

#### SŽ-Železarna Jesenice

V Železarni Jesenice se nabere letno 150 do 200 ton oljnih gošč, ki jih je potrebno odstraniti.

Odstranjevanje teh gošč je v preteklosti potekalo s sežigom gošč pomešanih z žagovino v SM pečeh. S prenehanjem delovanja teh peči se je Železarna prizadevala, da bi gošče sežigali v INI Reka, kar pa zaradi bojazni, da bi trdni delci iz gošč poškodovali sežigno (LURGI) napravo ni bilo realizirano. Trenutno v Železarni Jesenice sežigamo gošče v globinskih pečeh z uporabo gravitacijskega gorilnika. V pripravi pa je projekt za napravo, ki bo omogočila popolnejši sežig gošč v globinskih pečeh, s čimer po eni strani reši ekološki problem, po drugi strani pa bo kalorična vrednost gošč koristno izrabljena, saj se bo po predvidevanjih zmanjšala poraba energije v odvisnosti od pogojev delovanja peči od 40 do 70 %.

## 24. Martenzit v polikristalnih Cu-Zn-Al zlitinah

### B. Breže, A. Križman

#### Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru

Sposobnost pomnjenja oblike kovinskih gradiv je pogojena z deležem termoeastičnega martenzita v strukturi, kar zagotavlja visoko stopnjo elastične deformacijske energije.

Pri zlitinah Cu-Zn-Al dosegamo povratno deformacijo do 4 %, ki izgine pri segrevanju nad temperaturo  $A_1$ , ko se povrne prvotna orientacija izhodne faze. Imamo torej izrazit primer enosmerne oblikovne spomina.

Martenzit nastaja v sistemu Cu-Zn-Al le iz beta izhodne faze. Med ohlajevanjem prehaja izhodna faza iz konfiguracije B2 v  $DO_3$  in nadalje predvsem v martenzita 9R in 18R. Z deformacijo v hladnem nastaja z dvojčenjem martenzit 2H. Za martenzite v tem sistemu je značilna V-oblika skupkov s po štirimi lamelami, ki se razrašajo v šestih smereh (110). Tako dobimo 24 orientacijskih možnosti.

Pri zlitini z 21 % Zn in 6 % Al smo z dilatometričnimi raziskavami ugotovili dokajšnje odstopanje temperature  $M_s$  v primerjavi z literaturnimi viri. Znatno nižje vrednosti  $M_s$  od pričakovanih, so bile potrjene tudi z uporabo empiričnega izraza:

$$M_s = a - b \cdot \% \text{Zn} - c \cdot \% \text{Al}$$

Martenzit v strukturi lahko nastaja tudi že z hladno deformacijo, kar smo opazili pri merjenju trdote in poliranju vzorcev. Ta martenzit sicer ima določeno oblikovno podobnost s kalilnim martenzitom, vendar je ločljivost možna že z optično mikroskopijo.

## 25. Obnašanje Cu zlitin za elektrode

### F. Legat

#### SŽ-Veriga Lesce

Postopek elektroporovnega varjenja je po svetu precej razširjen. Uporablja se predvsem v kovinsko predelovalni industriji pri varjenju pločevine, žic in raznih profilov. Naš namen pa ni obravnavati točkasto, bradavičasto, šivno ali kolutno varjenje pločevine, pač pa obnašanje bakrovih zlitin kot elektrod pri elektroporovnem varjenju ali varjenju z obžiganjem pri varigah.

V praksi uporabljamo oba načina varjenja:

a) Klasični elektroporovni način, kjer se jeklo na spoju koncev upogibanega člena zaradi povečane upornosti segreje in nato s stiskanjem spoji. Nastali deformirani greben pa se avtomatsko obreže s posebnimi noži.

Na ta način lahko varimo navadna, nizkoogljčna in nepomirjena jekla. Pri tem procesu nastajajo v zvaru oksidi. Ti se sicer pri stiskanju iztisnejo iz samega zvara in nato obrežejo. Če je člen na spoju že pri upogibanju pravilno oblikovan, dobimo po varjenju čisti zvar. Na ta način se uporaba jekel razširi na celo mikrolegirano vrsto jekel, ki jih obravnava DIN 17115. Sam sistem stiskanja in sile, ki so za to potrebne pa omejujejo ta način varjenja do  $\varnothing 26$  mm premera verige.

b) Drugi način pa ustvarja pri prvem stiku obeh koncev člena tokovni lok. Zaradi visoke temperature C izgoreva tako burno, da meče kapljice jekla v curku iz zvara. Ko je določena dolžina koncev odgorela, stroj avtomatsko zvar stisne in nato obreže zvarni venec. Zvar je 100 % in sistem varjenja uporaben za vse vrste jekel.

Za oba sistema varjenja pa rabimo za dovod električne energije ustrezne bakrene elektrode. Te elektrode so montirane v posebnih podlogah ali glavah, ki so izdelane iz medenine in imajo tudi svoj vodni hladilni sistem.

Pri teh elektrodah pa rabimo naslednje lastnosti:

- Dobro električno in toplotno prevodnost
- Solidno trdoto pri povišanih temperaturah
- Višjo temperaturo padanja trdote, mehčanja
- Čim manjšo možnost difuzije v osnovni material, verigo
- Dobro možnost oblikovanja in obdelave.

Pri sami uporabi pa moramo upoštevati še nekaj zahtev in sicer:

- oblika elektrod,
- velikost, volumen elektrode,
- način in učinkovitost hlajenja,
- pritiske, sile stiskanja na elektrodah,
- varilne pogoje in še
- material, ki ga varimo, njegove lastnosti v hladnem in vročem stanju.

Pri nas imamo v uporabi domače elektrode iz Mariborske lvarne in sicer: Varmat 3 — Cu Cr Zr ter Varmat 5 — Cu Co Be.

Poleg mariborskih pa stalno uporabljamo tudi elektrode iz uvoza in sicer največ »Le Bronze Industriel« v istih analzičnih sestavah.

Poleg zgoraj omenjenih dveh Varmat-ov pa smo preizkusili veliko količino elektrod Varmat 4. Ta legura — Cu Ni 2 ima pa precej višje trdote in precej slabše prevodnosti. Celoletne primerjave in analize domačih, tujih in nove Varmat 4, smo spremljali, merili potrošnje, prevodnost, trdote in opazovali mikrostrukture.

## 26. Novo konstrukcijsko jeklo Tivanit 500 s povišano vsebnostjo dušika

### M. Kunšič

#### SŽ-Železarna Jesenice

Železarna Jesenice je v letu 1990 v svoj proizvodni program uvrstila novo konstrukcijsko jeklo Tivanit 500. Jeklo se uvršča v skupino V-Ti-N jekel s povišano mejo plastičnosti in dobro sposobnostjo varjenja.

Prednost Tivanita 500 pred ostalimi jekli enakega trdnostnega razreda je v tem, da z ustrežno tehnologijo izdelave jekla, kontinuiranim litjem in rekristalizacijskim kontroliranim valjanjem dosežemo na pločevini ustrezne mehanske lastnosti brez naknadne toplotne obdelave. Žilavost preko 34 J pri temp. — 40° C, meja plastičnosti min. 500 MPa, odlične upogibne lastnosti jekla so posledica finostrnate strukture in izločevalnega utrjanja jekla.

Jeklo je namenjeno za srednjo in debelo pločevino, posebnost primerno pa je za izdelavo hladnooblikovanih profilov.

## 27. Nova spoznanja na področju superferitnih nerjavnih jekel izdelanih v Železarni Jesenice

D. Gregorič  
SŽ-Železarna Jesenice

Pred približno dvema leti je bila v Železarni Jesenice izdelana prva šarža superferitnega jekla. V tem obdobju smo na tem področju naredili precejšen korak in osvojili izdelavo superferitnih jekel, predvsem tipa X 1 CrTi 15 in 18 Cr 2 Mo.

V svojem delu bom prikazal dosedanja spoznanja na tem področju. Izdelana je primerjava v mehanskih lastnostih z navadnim feritnim nerjavim jeklom tipa Č 4174 in avstenitnim jeklom Č 4580. V delu bodo obravnavana tudi spoznanja s področja korozije, ki se raziskujejo v sodelovanju z Metalurškim inštitutom.

## 28. Osvajanje jekla za perlitno kovanje v utopih (jeklo za ojnice)

G. Manojlovič<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>SŽ-Železarna Štore, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

Na podlagi rezultatov preiskav materiala, proizvedenega v industrijskih pogojih, smo izvršili korekcije prvotne tehnologije za izdelavo omenjene vrste jekla. Po dopolnjeni tehnologiji smo izdelali drugo 50-tonsko talino in jeklo raziskali v odlitem in v valjanem stanju v Železarni Štore ter odkovane ojnice v Uniorju v Zrečah. Poročilo obravnava rezultate teh preiskav in jih primerja z rezultati prve industrijske probe in zahtevam kupca.

Ojnice so na preiskavah pri firmi VW v Zahodni Nemčiji. Namen testiranja je ugotoviti uporabno vrednost jekla in potrditev Železarne Štore kot možnega proizvajalca in dobavitelja. Tudi rezultati teh preiskav bodo vključeni v poročilo, če jih bomo prejeli pravočasno.

Vse dosedanje preiskave v Železarni Štore, na Metalurškem inštitutu in v Uniorju so potrdile, da smo pravilno zastavili tehnologijo izdelave in valjanja jekla. Da bi se pričela redna proizvodnja, bi morali nabaviti in vgraditi pod kokile elektromagnetne mešalce tudi na ostali dve liniji naprave za kontinuirano odlivanje jekla.

## 29. Vpliv malih sprememb v sestavi na strukturne in mehanske lastnosti jekla za perlitno kovanje

J. Žvokelj<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>1</sup>, N. Žvokelj<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, <sup>2</sup>Litostroj Ljubljana

Poskusi izdelave ojnice za avtomobilске motorje po postopku perlitnega kovanja iz jekla 27 MnSiVS 6, izdelanega v Železarni Štore, so dali zelo ugodne rezultate. Za nadaljnji razvoj te vrste jekla smo na Metalurškem inštitutu izdelali eksperimentalne taline, da bi ugotovili, v koliki meri lahko vplivajo mali dodatki še nekaterih drugih legirnih in mikrolegirnih elementov na kaljivost in s tem na uporabne lastnosti jekla vrste 27 MnSiVS 6.

Na trdoto in trdnostne lastnosti ima največji vpliv ogljik, drugi elementi (Ni, Cr in Cu v količinah do 0,4 %) pa že vplivajo na kaljivost s tem, da zmanjšujejo kritično hitrost za pojavljanje bainita. Po predpisih za perlitno kovanje ojnice pa je prisotnost bainita v mikrostrukturi nezaželena.

## 30. Sintetični minerali — idealne sestavine aglomeriranih varilnih praškov

R. Kežar  
ZRMK, Inštitut za materiale Ljubljana

Sintetični minerali so idealne surovine za izdelavo dodatnih materialov. Ne vsebujejo komponent, ki bi pri segrevanju do taljenja razvijale pline ter so nehigroskopični. S sestavo sintetičnih materialov se lahko skoraj poljubno prilagodimo zahtevam dodatnih materialov glede varilno tehničnih lastnosti, ki jih v veliki meri določa sestava varilne žilinde.

Z razvojem novih sintetičnih mineralov: Na-volastonita, Na-monticelita, Na-melilita in Na-enstatita smo uporabnost teh reagentov pri proizvodnji dodatnih materialov še povečali.

V okviru dosedanjih raziskav smo razvili kombinacijo praškov za enostavno enostransko visokoproduktivno zvarjanje

pločevin. Praška sta razvita na osnovi sintetičnega volastonita ter sta v Ladjedelnici Split že pripravljena za atestiranje.

Z razvojem legiranih aglomeriranih praškov, ki omogočajo enostojno navarjanje obrabo odpornih jekel in litin najrazličnejših sestav na konstrukcijsko jeklo, pa je postalo navarjanje pod praškom zanimiva in perspektivna tehnologija tudi za orodjarstvo. Razredčenje navara, ki ga povzroči taljenje osnovnega materiala, ter odgorevanje legiranih elementov, nadomestimo z legiranjem navara preko legiranega aglomeriranega praška.

## 31. Temperaturno polje pri kontinuirnem litju z izotermnim strjevanjem

D. Križman, A. Križman, L. Škerget  
Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru

Prikazan je postopek izračuna temperaturnega polja pri kontinuirnem litju z izotermno strjujočimi snovmi z metodo robnih elementov — od izhodiščnih enačb, testiranja metode, vpljanih poenostavitvev do izračuna praktičnih primerov. Zanj so uporabljeni podatki, ki so najbolj podobni dejanskim na pilotni napravi TF Maribor.

Izhajajoč iz Fourier-Kirchoffove diferencialne enačbe in Stefanovega robnega pogoja na medfaznem robu, pridemo s transformacijo iz problema gibajočega v problem prostega roba do enostavnejše rešljivega problema. Z metodo robnih elementov in posebno osnovno rešitvijo je bilo potrebno izvesti diskretizacijo le na robu računskega območja. Le-to je razdeljeno na dva dela — tekočega in trdnega s praviloma različnimi snovnimi lastnostmi. Za povezavo obeh je uporabljen postopek priključenih območij. To je omogočilo izdelavo računalniškega programa v relativno kratkem času.

Testiranje rezultatov na konvektivno-difuzijskih analitičnih rezultatih je pokazalo za različni številni Pe (10 in 99) izredno natančnost za temperaturo in toplotne tokove. Primerjava s programskim paketom ANSYS (metoda končnih elementov) je potrdila znane prednosti uporabljene metode pred metodo končnih elementov za tovrstne analize.

Zaradi načina priključitve lahko enako natančnost rezultatov predvidevamo tudi za probleme s strjevanjem. Kontrolo spojitve izvajamo enostavno s kontrolo konvergenčnega kriterija, saj je Stefanov robni pogoj na medfaznem robu določen.

Prikazani so rezultati izračunov za ravninske primere, za katere so bili uporabljeni podatki, ki so najbolj podobni tistim v pilotni napravi TF Maribor.

## 32. Razvoj indukcijsko segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtničeni plasti

V. Leskovšek<sup>1</sup>, V. Hrnčič<sup>2</sup>, A. Paulin<sup>3</sup>, T. Kolenko<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, <sup>2</sup>Železarna Ravne,  
<sup>3</sup>FNT, VTOZD Montanistika

V zadnjem desetletju močno narašča tudi pri nas zanimanje za različne postopke toplotne obdelave kovin, med katerimi zavzema vidno vlogo toplotna obdelava v zvrtničeni plasti in sicer zato:

- ker proces ne onesnažuje okolja,
- ker je proces ekonomičen in varčen v energijskem smislu, kot tudi v smislu porabe materialov,
- ker je proces mogoče mikroprocesorsko krmiliti, kar povečuje njegovo fleksibilnost in omogoča visoko stopnjo ponovljivosti rezultatov.

Na MI smo razvili indukcijsko segrevano laboratorijsko peč za toplotno obdelavo v zvrtničeni plasti z delovno prostornino 1247 cm<sup>3</sup>. Delovna temperatura je 1000° C, vrtničenje pa je izvedeno z N<sub>2</sub>, ki deluje do 800° C kot varovalna atmosfera.

Osnovna lastnost zvrtničene plasti je, da se plast zvrtničenih trdnih delcev obnaša tako kot tekočina, pri čemer sistem lahko obravnavamo kot kvazitekočinsko stanje. Plinsko zvrtničene plasti smatramo kot homogene zvrtničene plasti, dokler izstopajoči delci jasno definirajo zgornjo mejo ali površinsko plast.

Izstopajoča lastnost zvrtničene plasti je možnost doseganja enakomernih temperatur ( $\pm 1^\circ$  C), kar je izrednega pomena za sodobno toplotno obdelavo jekel.

Izkušnje, ki smo jih dobili med funkcionalnim preiskusom kažejo, da je indukcijsko segrevanje zvrtničene plasti možno,

predvsem pa je važna ugotovitev, da izmenično magnetno polje ne sega v samo plast, kar pomeni, da ne vpliva na segrevanje delov v plasti, prav tako pa tudi nismo zaznali njegovega vpliva na termoelemente s katerimi smo merili temperaturo zvrtničene plasti. Vse to pa pomeni, da je pri konstantni anodni napetosti in anodnem toku možno natančno krmiliti temperaturo zvrtničene plasti. Velike hitrosti segrevanja zvrtničene plasti 25° C/min. in več, pa omogočajo zelo prožno delovanje naprave, saj je možno hitro segreti zvrtničeno plast na delovno temperaturo v primerjavi z ostalimi načini segrevanja.

Dosedaj zbrani rezultati kažejo, da se izračunane vrednosti in eksperimentalno dobljene vrednosti zadovoljivo ujemajo, zato smatramo, da lahko naše ugotovitve prenesemo tudi na razvoj avtomatizirane celice za toplotno obdelavo in termokemijsko obdelavo v zvrtničeni plasti.

### **33. Sodobni postopki plemenitenja površin**

**F. Grobelšek<sup>1</sup>, M. Torkar<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ZRMK Ljubljana, <sup>2</sup>SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana

V predavanju bomo skušali prikazati pregled sodobnih postopkov plemenitenja površin ter pregled njihove možnosti uporabe v kovinsko predelovalni industriji.

Glede na to, da imamo sedaj na MI realne možnosti za proizvodnjo najrazličnejših kovinskih prahov, bo poudarek predvsem na postopku plazemskega nanašanja kovin in keramike.

Predavanje bomo skušali popestriti tudi z ustreznimi videokaseto, ki jo bomo skušali dobiti od proizvajalca opreme za varjenje, plamensko in plazemsko nanašanje.



SLOVENSKE ŽELEZARNE  
**METALURŠKI INŠTITUT**  
LJUBLJANA, LEPI POT 6

### KAJ JE METALURŠKI INŠTITUT

Metalurški inštitut je delovna organizacija v okviru SOZD Slovenske Železarne, po statutu pa je osrednja raziskovalna organizacija vse slovenske metalurgije in livarstva. Inštitut razvija vse aktivnosti, ki so potrebne za raziskovalno delo, torej raziskave osnovnega, razvojnega in uporabnega značaja, pilotno proizvodnjo posebnih materialov, je soizdajatelj strokovnega časopisa, prireja strokovna srečanja in seminarje, dela različne strokovne ad hoc usluge za industrijo s področja kakovosti in uporabe kovinskih materialov, goji stike z raziskovalnimi organizacijami pri nas in v inozemstvu, sodeluje v programih in projektih Raziskovalne skupnosti Slovenije, v projektih usmerjenih v tehnološki razvoj Jugoslavije ter v projektih mednarodnega sodelovanja z zapadno in vzhodno Evropo in ZDA.

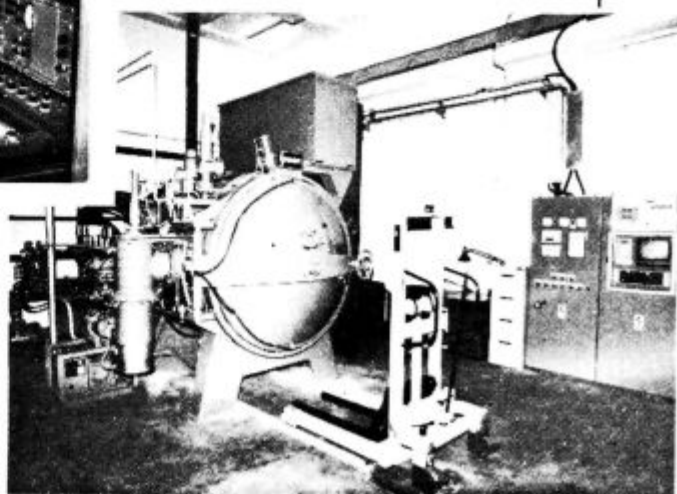
### PROGRAM DELA IN OPREMA

Program raziskovalnega dela posega v naslednja področja: razvoj sodobnih masovnih kovinskih materialov in tehnologije njihove izdelave in predelave, razvoj in pilotna proizvodnja posebnih materialov za elektroniko, fizikalno-metalurško in kemijsko-analitsko karakterizacijo materialov, matematično modeliranje in računalniško krmiljenje procesov ter racionalna uporaba energije in surovin v metalurški industriji. Skladno s programom dela ima laboratorije za mikrostrukturne, fizikalne, mehanske preiskave in za analitiko kovinskih materialov ter za pilotno proizvodnjo. Med raziskovalnimi aparaturnami najdemo peči za taljenje vseh vrst kovin na zraku in v vakuumu, naprave za predelavo teh kovin v trak, palice in žico, napravo za atomizacijo kovin, optične mikroskope in vrstični (scanning) elektronski mikroskop za mikrostrukturne raziskave, elektronski mikroanalizator, dilatometer, naprave za preizkušanje kovin s statično in dinamično obremenitvijo pri visokih temperaturah, naprave za termično obdelavo, med njimi najsodobnejšo vakuumsko visokotemperaturno kalilno žarilno peč ter različne sodobne analitske naprave, na primer aparature za atomsko absorpcijsko spektrometrijo in emisijski spektrometer.



*Pogled na vrstični elektronski mikroskop z napravo za elektronsko mikroanalizo in analizo slike*

V teku je dobava naprave za vlivanje amorfnih trakov, ki bo skupaj z napravo za atomizacijo in izostatsko stiskanje, ki jo je inštitut nabavil skupno z inštitutom J. Stefan omogočila laboratorijsko sintezo najsodobnejših kovinskih materialov. Prav v tem letu se bo začel tudi uresničevati projekt pilotne proizvodnje usmerjen v izdelavo palic in žic iz posebnih materialov po tehnologiji računalniško vakuumskega taljenja in kontinuirnega lita.



*Pogled na računalniško krmiljeno vakuumsko žarilno kalilno peč*



## OSEBNE VESTI

### Zamenjava v vodstvu Metalurškega inštituta v Ljubljani



V začetku leta 1991 je postal direktor Metalurškega inštituta v Ljubljani dr. Franc Vodopivec, diplomirani inženir metalurgije in habilitirani izredni profesor na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo v Ljubljani.

Dr. Franc Vodopivec je bil rojen 8. 10. 1931 v Rakitniku pri Postojni. Leta 1950 je vpisal študij metalurgije v Ljubljani in leta 1956 diplomiral kot inženir metalurgije. Zaposlil se je na Metalurškem inštitutu in mu ostal zvest do danes. V letih 1960 do 1962 je bil na strokovnem izpopolnjevanju na IRSID-u v Franciji in pripravil doktorsko disertacijo, ki jo je leta 1962 uspešno zagovarjal na Univerzi v Parizu.

Svoje delo na Metalurškem inštitutu je začel kot asistent v mehanskem laboratoriju in nato v metalografiji. Po vrnitvi iz Francije je postal vodja metalografskega laboratorija, ki ga je uspešno razvijal, tako, da je sčasoma postal jedro raziskovalnega oddelka s področja fizikalne metalurgije, ki je obsegala še toplotno obdelavo, hladno in vročo predelavo, metodologijo preiskav in razvoj posebnih zlitin. Z uvedbo elektronskega mikroskopa, mikroanalizatorja in elektronskega rastrskega mikroskopa je uspešno razvijal mikrostrukturne in mikroanalizne raziskave ter fraktografijo in postal vodilni strokovnjak na teh področjih. V zadnjem desetletju in pol je bil namestnik oziroma pomočnik prejšnjih direktorjev A. Prešerna in J. Rodiča, odgovoren za celotno raziskovalno področje MI, zveze z RSS in mednarodne povezave.

Skladno z njegovo strokovno prizadevnostjo in sposobnostjo je prejel številna družbena priznanja. Leta 1977 je skupaj z dr. M. Gabrovškom prejel nagrado Kidričevega sklada. Leta 1984 je prejel najvišje slovensko priznanje za znanstveno delo, Kidričevo nagrado. Prejel je še Zoissovo plaketo (1979) in častno plaketo Društva inženirjev in tehnikov Jugoslavije (1975).

Predolgo bi bilo naštevanje vseh znanstvenih in strokovnih področij metalurgije, na katerih je dr. Franc Vodopivec pustil jasne sledi svojega uspešnega delovanja. To je skoraj celotna fizikalna metalurgija — od nauka o kovinah, metalografije, toplotne obdelave in preiskovalnih metodologij, do tehnoloških raziskav ulivanj tekočih

kovin, predelav in lastnosti kovin in zlitin. Pomembno je njegovo delovanje na področju raziskav in osvajanja mehkomagnetnih in trdomagnetnih materialov ter posebnih ekspertnih področjih, kot na primer termoenergetika.

V letih 1980 in 1985 je bil glavni pobudnik in organizator mednarodnih konferenc o oligoelementih, ki jih je pripravil Metalniški inštitut v sodelovanju z IRSID-om iz Francije in Max Planck inštitutom iz Nemčije.

Bibliografija dr. F. Vodopivca obsega preko 100 objav, od tega skoraj polovica v tujih periodičnih publikacijah.

Dr. Franc Vodopivec prevzema vajeti Metalurškega inštituta v najtežjih časih za slovensko metalurgijo. Zaradi prepočasnega prestrukturiranja v preteklosti in psihozne negativnega odzivanja družbe in države — čeprav ima metalurgija na Slovenskem večstoletno tradicijo — je slovenska metalurgija in še posebej železarstvo danes v težki strukturalni, tehnološki in socialni krizi. Usodo svoje stroke deli tudi Metalurški inštitut. Prepričani smo, da je dr. Franc Vodopivec pravi človek za te težke čase, zato mu k imenovanju za direktorja Metalurškega inštituta iskreno čestitamo.

Čestitki se pridružuje tudi uredništvo Železarskega zbornika, saj je med avtorji člankov njegovo ime najpogostejše.

Dr. Aleksander Kveder

### Dušan Gnidovec, dipl. ing. metalurgije, upokojenec



Nič v pojavi in v obnašanju Dušana Gnidovca ne kaže, da je zrel za upokojitev, pa je vendar ta status dosegel po dolgih letih službe, ki ni bila vedno prijetna. Drža je pokončna, govor duhovit in odrezav, zanimanje za dogajanja v okolici je živo in kritično, duh pa vedno iščoč in ustvarjalen.

Dušan je bil rojen v decembru 1926 v Ljubljani, maturiral je na realni gimnaziji v Ljubljani; bil je partizan od leta 1944 in diplomiral je na univerzi v Ljubljani kot inženir metalurgije leta 1953. Nekaj časa je bil na podiplomskem študiju na Queens University v Kingstonu v Kanadi in raziskovalni svetnik je od leta 1986.

Prva služba ga je pripeljala v Železarno Skopje, ki so jo prav tedaj načrtovali in začeli graditi. Vendar ga že le-

ta 1956 srečamo na IEV v oddelku za ferite, kjer napreduje do položaja vodje. Po ustanovitvi ga srečamo v novem oddelku magnetni materiali z zelo zahtevno nalogo, razvojem domače teksturirane transformatorske pločevine. Ta razvoj je uspešno končal, vendar pa je projekt ostal na nivoju laboratorija, ker se je prav tedaj začela v Železarni Jesenice preorientacija iz vroče valjanih tankih pločevin na hladno valjanje trakov. To je zahtevalo popolnoma drugačen projektni pristop, za katerega pa tedaj ni bilo zanimanja. Naslednja naloga je bil razvoj tanke pločevine in masivnih delov iz zlitine Permalloy C. V letu 1961 so razvoj mehkomagnetnih materialov sporazumno prenesli iz Iskre na Metalurški inštitut, z njim pa se je preselil tudi Dušan. Razvoj Permalloy-a in še drugih mehkomagnetnih zlitin je bil končan na Inštitutu, kjer se še danes proizvajajo v različnih oblikah, palicah, trakovih in žicah. Tudi na Inštitutu je ostalo njegovo zanimanje naprej na materialih za elektroniko in elektrotehniko. Razvito je bilo precej novih zlitin, na primer Permalloy D za namensko proizvodnjo, Kovar za vtaljevanje v mehko steklo, Permil 50 za jedra in magnetne oklope, Permnorm za magnetna jedra, Termil za temperaturno kompenzacijo magnetenja, predelovalna trdomagnetna zlitina za vtaljevanje v steklo Remil 3, posebne elektrode za anodno zaščito podzemnih konstrukcij in drugo. Posegel pa je tudi na področje materialov za druge namene. Posebej velja izpostaviti različne stellite zlitine, odporne proti obrabi in koroziji in biokompatibilne zlitine za zobno protetiko in implantate. Vse razvite zlitine se proiz-

vajajo na Metalurškem inštitutu v pilotnem obsegu. Dušan je proizvodnjo uspešno vodil do upokojitve. To ni bila lahka naloga, saj Inštitut dolgo časa ni imel tehnoloških naprav, ki so za proizvodnjo potrebne. Dogajalo se je, da se je neka zlitina izdelala v enem podjetju, v drugem se je skovala, v tretjem se je izvaljala v trak oziroma izvlekla v žico, v četrtem je bila odžarjena, v petem pa so bile kontrolirane lastnosti. Za uspehe pri razvoju posebnih zlitih je leta 1988 dobil nagrado Kidričevega sklada za iznajdbe in inovacije.

Vsem problemom organizacije dela je bil Dušan vedno uspešno kos, včasih z nekoliko nervoze, večinoma pa nonšalantno in navidez brez napora. Bila bi zelo velika škoda, če bi tako veliko znanje in izkušnje ostale neizkoriščene. Zato se bo še naprej v zmanjšanem obsegu angažiral za pomoč mlajšim kolegom, ki so prevzeli njegovo mesto na Inštitutu. Njegovo zanimanje bodo še vedno posebni materiali, posebno pa tisti materiali, ki jih je mogoče neposredno uliti v žico.

Ob odhodu v pokoj mu vsi sodelavci, prijatelji in znanci čestitamo za uspehe pri delu in se mu zahvaljujemo za prijetne trenutke, ki smo jih z njim preživeli v službi in privatnem življenju. Želimo, da bi še naprej ostal zdrav, aktiven in uspešen pri delu in v privatnem življenju, da bi še vedno ohranil do sodelavcev odkrit, malce odrezav odnos ter pripravljenost za pomoč z delom in z nasvetom.

dr. Franc Vodopivec



## IZDELUJEMO

- debelo, srednjo in tanko pločevino
- hladno valjane trakove in pločevino
- dinamo trakove in pločevino
- nerjavne trakove in pločevino
- vlečeno, brušeno in luščeno jeklo
- valjano in vlečeno žico
- patentirano žico
- pleteno patentirano žico za prednapeti beton
- hladno oblikovane profile
- kovinske podboje za vrata
- dodatni material za varjenje
- žičnike
- jeklene odlitke
- tehnične pline

## NUDIMO TUDI USLUGE

- prevaljanja, vlečenja, iztiskanja  
in toplotne obdelave  
pločevin in žice

**120 let  
TRADICIJE  
ZNANJA**

**in  
KAKOVOSTI  
naših izdelkov**



**ŽELEZARNA JESENICE**

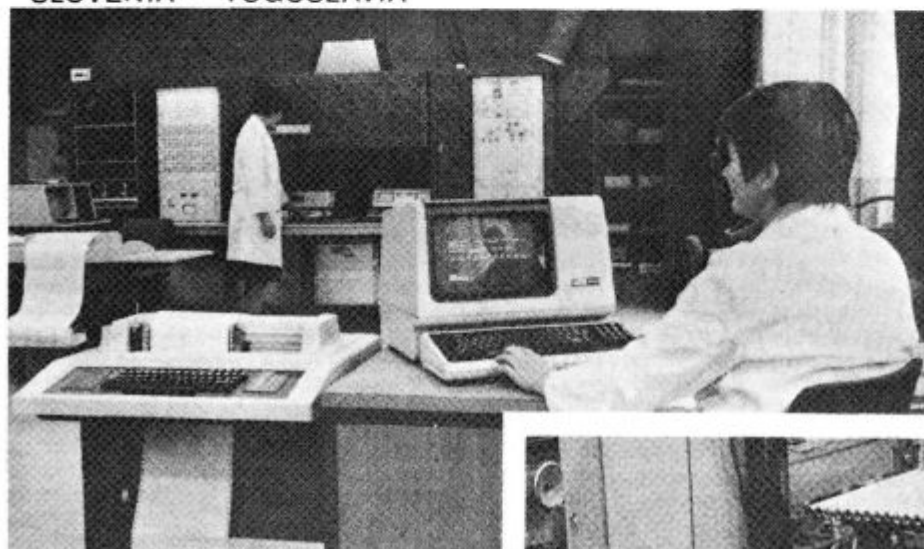
64270 Jesenice, Cesta železarjev 8  
telefon: (064) 81-231, 81-341, 81-441  
telex: 34526 ZELJSN, Jugoslavija  
telefax: 83 395



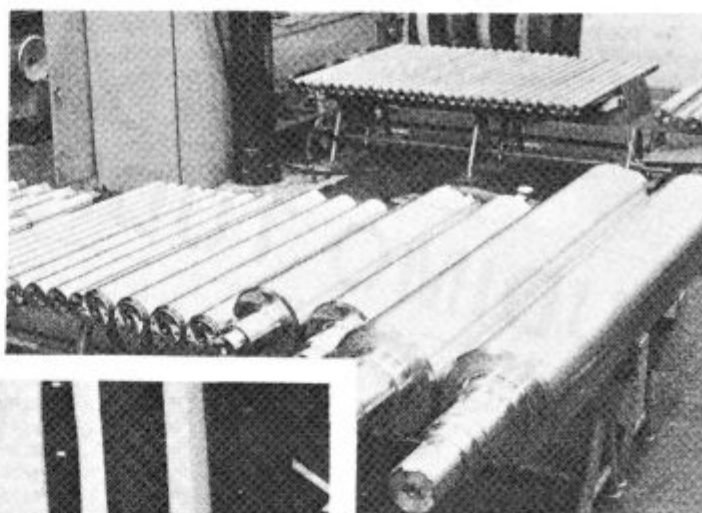
**SLOVENSKE ŽELEZARNE  
ŽELEZARNA RAVNE**

n. sol. o  
RAVNE NA KOROŠKEM  
SLOVENIA - YUGOSLAVIA

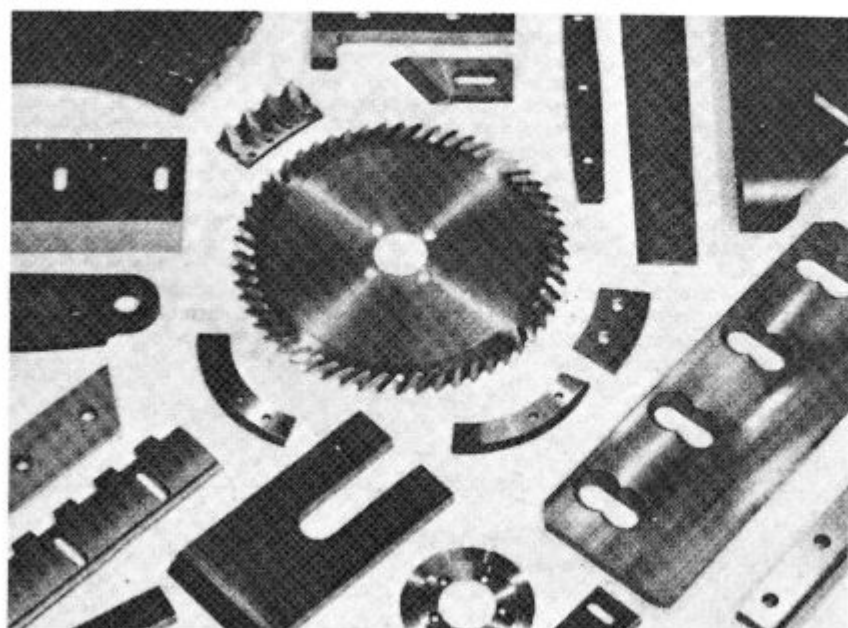
Železarna Ravne kot proizvajalec kvalitetnih in plemenitih jekel nenehno razvija in izpopolnjuje tehnološke postopke s ciljem povečevanja finalizacije, kvalitete, avtomatizacije in humanizacije dela. Izgradnjo novih tehnoloških naprav v jeklarni, kovačnici, termični obdelavi in širjenje proizvodnje finalnih izdelkov je spremljal intenziven tehnološki razvoj podprt z uvedbo procesnih računalnikov, numerično krmilnih enot ter avtomatizacije.



*Računalniško  
vodenje  
procesa*



*Jekleni  
valji  
za valjanje  
kovin*



*Različna  
industrijska  
rezila iz  
plemenitega  
jekla*

# VSEBINA

<p>UDK: 620.193.55.539.56:669.788 ASM/SLA: R2, Q26S, EGM</p> <p>Korozija — metalurgija — fizika kovin L. Vehovar</p> <p><b>Mehanizmi delovanja vodika v kovinah in vodikova krhkost</b> Železarski zbornik 25(1991)1, s 1—12</p> <p>To delo obravnava različne poškodbe, ki so posledica delovanja absorbiranega (notranjega) atomarnega vodika. Obdelane so različne teorije, ki razčlenjujejo bistvene mehanizme delovanja vodika v kristalni mreži. Še posebej je poudarjena teorija pasti in vpliv številnih metalurških faktorjev na pojav vodikove krhkosti, obdelani so transportni mehanizmi, s pomočjo katerih je omogočeno gibanje vodika v kovini, način formiranja razpok ter njihova propagacija in fraktografske značilnosti prelomnih površin.</p> <p style="text-align: right;">Avtorski izvleček</p>	<p>UDK: 536.241.669.046.621.78.012.5.681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k</p> <p>Toplotna tehnika — Prenos toplote — Metoda končnih elementov — Aplikacija na osebnih računalnikih M. Bolčina</p> <p><b>Reševanje stacionarnega in nestacionarnega temperaturnega polja po metodi končnih elementov na PC računalnikih</b> Železarski zbornik 25(1991)1, s 21—24</p> <p>Obdelali smo problem prenosa toplote, ki ga povzroča električni tok. Pri tem so koeficienti sistema lahko v funkciji kraja, časa, temperature itd. Uporabljena je bila metoda končnih elementov — Galerkinov postopek. Omenjeno problematiko smo realizirali na PC računalniku z interaktivnim grafičnim vmesnikom. Poseben povdarek je bil dan za aplikacije prenosa toplote v indukcijski peči.</p> <p style="text-align: right;">Avtorski izvleček</p>
<p>UDK: 621.785.374.620.186.82.669.15—194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, SI, 4—53</p> <p>Metalurgija — jeklo za neorientirano elektropljučevino — rekristalizacija in rast zrn — topologija rekristaliziranih zrn F. Vodopivec</p> <p><b>Topologija rasti rekristaliziranih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 C v razponu temperature 700 do 800 °C</b> Železarski zbornik 25(1991)1, s 13—20</p> <p>Topologija rasti rekristaliziranih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 C v razponu temperature med 700 in 800 °C.</p> <p>Določeni so bili izotermna kinetika rasti zrn, vpliv trajanj žarjenja in temperature na število stranic zrn, na število stičišč 3 ali 4 zrn, na povprečno število stranic sosednjih zrn in razmerje med številom stranic zrna in njegovo povprečno velikostjo.</p> <p style="text-align: right;">Avtorski izvleček</p>	<p>UDK: 519.21.539.219.3.669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr</p> <p>Kromiranje — difuzija — matematične rešitve I. B. Risteski</p> <p><b>Primena error funkcije u difuznom hromiranju</b> Železarski zbornik 25(1991)1, s 25—28</p> <p>U radu su dokazane analitičke jednačine za određivanje površinske koncentracije, pri difuzionom hromiranju kao funkcija vremena. Isto tako određeni su i parcijalni difuzijski koeficijenti. Proračun je izveden pomoću error funkcije.</p> <p style="text-align: right;">Avtorski izvleček</p>

# INHALT

UDK: 536.241.669.046.621.78.012.5.681.3.06  
ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k

Wärmetechnik- Wärmeübertragung — Methode der Endelemente — Applikation an Personenrechnern

M. Boičina

**Lösung von stationärem und nichtstationärem Temperaturfeld nach der Methode der Endelemente am PC Rechner**

Železarski zbornik 25 (1991) 1, S 21—24

Das Problem der Wärmeübertragung verursacht durch elektrischen Strom ist bearbeitet worden. Dabei können die Koeffiziente des Systemes als Funktion des Ortes, der Zeit, der Temperatur u. s. w. sein. Die Methode der Endelemente ist angewendet worden — das Verfahren von Galerkin. Die erwähnte Problematik ist am PC Rechner mit interaktiven graphischen Zwischenstück realisiert worden. Besonders betont ist die Applikation der Wärmeübertragung im Induktionsofen.

Auszug des Autors

UDK: 620.193.55.539.56.669.788  
ASM/SLA: R2, Q265, EGM

Korrosion — Metallurgie — Physik der Metalle

L. Vehovar

**Mechanismus der Wasserstoffwirkung in Metallen und die Wasserstoffprödigkeit**

Železarski zbornik 25 (1991) 1, S 1—12

Im Artikel werden verschiedene Schäden behandelt, die eine Folge der Wirkung vom absorbierten atomaren Wasserstoff sind. Bearbeitet werden verschiedene Theorien, die die wesentlichen Mechanismusse der Wasserstoffwirkung im Kristallgitter zergliedern. Besonders ist die Theorie der Falle betont und der Einfluss der Zahlreichen metallurgischen Faktoren auf die Erscheinung der Wasserstoffprödigkeit wird behandelt. Transportmechanismusse mit deren Hilfe die Bewegung von Wasserstoff im Metall möglich ist werden behandelt, so auch die Art der Rissbildung und deren Ausbreitung, wie auch die fraktographischen Eigenheiten der Bruchflächen.

Auszug des Autors

UDK: 519.21.539.219.3.669.268  
ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr

Chromieren — Diffusion — mathematische Lösungen

I. B. Risteski

**Anwendung der Error Funktion beim Diffusionschromieren**

Železarski zbornik 25 (1991) 1, S 25—28

In der Arbeit werden analytische Formeln für die Bestimmung der Oberflächenkonzentration beim Diffusionschromieren als Funktion der Zeit gegeben. Ebenso sind auch die partiellen Diffusionskoeffiziente bestimmt worden. Die Berechnung ist mit Hilfe der Error Funktion durchgeführt worden.

Auszug des Autors

UDK: 621.785.374.620.186.82.669.15-194.57  
ASM/SLA: J23C, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53

Metallurgie — Stahl für nichtorientierte Elektrobleche — Rekristallisation und Kornwachstumstopologie der rekristallisierten Körner

F. Vodopivec

**Wachstumstopologie der rekristallisierten Körner im Stahl mit 1,8 % Si, 0,3 % Al und 0,02 % C im Temperaturbereich zwischen 700 und 800 °C.**

Železarski zbornik 25 (1991) 1, S 13—20

Wachstumstopologie der rekristallisierten Körner im Stahl mit 1,78 Si, 0,3 % Al und 0,02 % C im Temperaturbereich zwischen 700 und 800 °C

Isotherme Kornwachstumkinetik, Einfluss der Glühzeit und der Temperatur auf die Zahl der Kornseiten, auf die Zahl der Kontaktpunkte von 3 oder 4 Körnern, auf die durchschnittliche Zahl der Seiten der Nachbarkörner und das Verhältniss zwischen der Kornseitenzahl und dessen durchschnittlicher Korngröße sind bestimmt worden.

Auszug des Autors

# CONTENTS

<p>UDK: 620.193.55.539.56.669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm</p> <p>Corrosion — Metallurgy — Materials science L. Vehovar</p> <p><b>Mechanisms of hydrogen action and hydrogen embrittlement</b> Železarski zbornik 25 (1991) 1, P 1—12</p> <p>The paper analyzes various damages as the consequence of absorbed (internally) atomic hydrogen. Various theories are presented which analyze essential mechanisms of hydrogen action in lattice. Especially emphasized is the theory of traps and the influence of numerous metallurgical parameters on the phenomenon of hydrogen embrittlement; transport mechanisms enabling hydrogen movements in metal, crack formation and their propagation, and fractographic characteristics of fracture areas are also treated.</p> <p style="text-align: right;">Author's Abstract</p>	<p>UDK: 536.241.669.046.621.78.012.5.681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k</p> <p>Heat transfer — Method of definite elements — Application on PC M. Bolčina</p> <p><b>Solving steady and unsteady temperature field by the method of definite elements on the PCs</b> Železarski zbornik 25 (1991) 1, P 21—24</p> <p>The problem of heat transfer caused by electric current was treated. The coefficients in the system can be functions of place, time, temperature, etc. Method of definite elements — Galerkin's method — was applied. The mentioned problem was solved by PC with interactive graphics interface. Especial emphasis was given to the application of heat transfer in induction furnace.</p> <p style="text-align: right;">Author's Abstract</p>
<p>UDK: 621.785.374.620.186.62.669.15—194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53</p> <p>Metallurgy — Steel for not oriented electrical sheet — Recrystallization — Grain growth — Topology of recrystallized grains F. Vodopivec</p> <p><b>Topology of recrystallized grain growth in steel with 1.8 % Si, 0.3 % Al, and 0.02 % C in the temperature range 700 to 800 °C</b> Železarski zbornik 25 (1991) 1, P 13—20</p> <p>Topology of recrystallized grain growth in steel with 1.8 % Si, 0.3 % Al, and 0.02 % C between 700 and 800 °C. Isothermal kinetics of grain growth, influence of annealing times and temperatures on the number of grain sides, on the number of three- or four-grain contact points, on the average number of neighbouring grains sides, and on the ratio between the number of grain sides and the average grain size were determined.</p> <p style="text-align: right;">Author's Abstract</p>	<p>UDK: 519.21.539.219.3.669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr</p> <p>Chrome-plating — Diffusion — Mathematical solutions B. Risteski</p> <p><b>Application of error function in diffusion chrome-plating</b> Železarski zbornik 25 (1991) 1, P 25—28</p> <p>The paper proves the analytical equations for determining the surface concentrations in diffusion chrome-plating as functions of time. Also partial diffusion coefficients were determined. Calculation was done by using error function.</p> <p style="text-align: right;">Author's Abstract</p>

# СОДЕРЖАНИЕ

<p>UDK: 536.241.669.046.621.78.012.5.681.3.06 ASM/SLA: P11k, J2g, D6, U4g, U4k</p> <p>Тепловая техника — Перенос теплоты — Метод концевых элементов — Аппликация на персональных вычислителях</p> <p>M. Bolčina</p> <p><b>Решение стационарного и нестационарного температурного поля по методу концевых элементов на „ПЦ“ вычислителях</b></p> <p>Železarski zbornik 25 (1991) 1, С 21—24</p> <p>Обработана нами была проблема переноса теплоты, являющегося вследствие электрического тока. При этом коэффициенты системы могут быть в функции места, времени, температуры и т.д. Применен был метод концевых элементов — Галеркинов метод. Указанную проблематику мы реализовали на „ПЦ“ вычислителе с интерактивным графическим промежуточком, а особенно рассматривали проблему аппликации переноса теплоты в индукционных печах.</p> <p style="text-align: right;">Автореф.</p>	<p>UDK: 620.193.55.539.56.669.788 ASM/SLA: R2, Q26s, EGm</p> <p>Коррозия — металлургия — физика металлов</p> <p>L. Vehovar</p> <p><b>Механизмы возденствия водорода в металлах и водородная ломкость</b></p> <p>Železarski zbornik 25 (1991) 1, С 1—12</p> <p>В статье рассмотрены различные повреждения, являющиеся вследствие воздействия абсорбированного (внутреннего) атомарного водорода. Обработаны различные теории, анализирующие основные механизмы воздействия водорода в кристалльной сети. Особенная важность придана теории „западни“ и влиянию численных металлургических факторов на появление ломкости водорода, обработаны транспортные механизмы, позволяющие движение водорода в металле. Также обработаны способ формовки трещин, их пропация и фрактографические характеристики поверхностей излома.</p> <p style="text-align: right;">Автореф.</p>
<p>UDK: 519.21.539.219.3.669.268 ASM/SLA: N1b, U4j, L15, Cr</p> <p>Хромирование — диффузия — математические решения</p> <p>I. B. Risteski</p> <p><b>Применение „эррор“ функции в диффузном хромировании</b></p> <p>Železarski zbornik 25 (1991) 1, С 25—28</p> <p>В ходе работы доказаны были аналитические уравнения для определения концентрации поверхности при диффузном хромировании как функция времени. Определены были также парциальные диффузные коэффициенты. Расчет произведен с помощью „эррор“ функции.</p> <p style="text-align: right;">Автореф.</p>	<p>UDK: 621.785.374.620.186.82.669.15-194.57 ASM/SLA: J23c, N5f, N3, M21c, AY, Si, 4—53</p> <p>Металлургия — сталь для неориентированного электротехнического листа рекристаллизация и рост зерн, топология рекристаллизованных зерн</p> <p>F. Vodopivec</p> <p><b>Топология роста рекристаллизованных зерн в стали С 1,8 % Si, 0,3 % Al и 0,02 % С в температурном интервале от 700° до 800 °С</b></p> <p>Železarski zbornik 25 (1991) 1, С 13—20</p> <p>Топология роста рекристаллизованных зерн в стали с 1,8 % Si, 0,3 % Al и 0,02 % С в температурном интервале от 700° до 800 °С.</p> <p>Определены были изотермическая кинетика роста зерн, влияние продолжительности отжига и температуры на число сторон зерн, на число точек соприкосновения 3 или 4 зерн, на среднее число сторон соседних зерн и на отношение между числом сторон зерна и его средней величиной.</p> <p style="text-align: right;">Автореф.</p>



## TEHNIČNA NAVODILA AVTORJEM

### Rokopis

Rokopis dostavite v originalu odgovornemu uredniku ali enemu od članov uredništva. Pisan mora biti z dvojnimi presledkom. Na levi strani je rob širine 4 cm. Na tem robu označite mesta, kjer naj bodo slike ali tabele.

Članki naj bodo kratki in jedrnat in ne prenatrpani z nepotrebnimi podatki. Izogibajte se tabel z veliko številkami, ki bralca ne zanimajo, posebno če so isti podatki prikazani kot odvisnosti v diagramih. Razlage naj bodo jasne, kratke in v neposredni zvezi z doseženimi rezultati, brez širših hipotetičnih dodatkov.

V primeru, da prvič objavljate v Železarskem zborniku, dostavite uredništvu naslednje podatke: ime in priimek z akademskim nazivom spredaj in poklicnim nazivom zadaj, katero delo opravljate, delovna organizacija, žiro račun in naslov stanovanja.

Uredništvo si pridržuje pravico jezikovne korekcije, strokovne recenzije in presoje o ustreznosti objave. Prosimo, da glede rokopisa upoštevate še naslednja navodila:

1) **Izvleček pod naslovom** naj obsega 4 do 10 tipkanih vrst. Vsebina naj pove, kateri problem obravnava članek.

2) **Povzetek za prevode** v angleški, nemški in ruski jezik pošljite v 4 izvodih. Obsega naj pol do največ dve tipkani strani. Glede vsebine naj pove tujemu bralcu, kakšen je bil problem in kateri so glavni rezultati vašega dela. Specifične strokovne izraze, ki jih prevajalci morda ne poznajo, navedite spodaj v angleškem, nemškem in ruskem jeziku. Vsebuje naj tudi naslov članka.

3) **Avtorski izvleček za kartice** (4 izvodi) naj obsega: glavno geslo in eno ali več stranskih gesel (npr. Metalurgija — Orodna jekla — Preizkušanje materiala), avtorja in soavtorje, naslov članka in kratko vsebino članka (največ 15 tipkanih vrst) s poudarkom na rezultatih raziskave.

4) **Podpisi k slikam** v 2 izvodih na posebnih listih. Podpis naj bo formuliran tako, da bo v angleškem prevodu tudi tuj bralec razumel vsebino slike.

5) **Literaturo**, ki jo citirate v tekstu, označite z zaporednimi številkami, zgoraj za besedo, kjer označbo želite, npr. ... Smith<sup>3</sup>... Na koncu članka navedite nato vse bibliografske podatke:

— Za knjige: začetnice imen in priimki avtorjev, naslov knjige, številka izdaje, založba, leto izdaje.

— Za članke: začetnice imen in priimki avtorjev, naslov članka, neskratljivi naslov revije, letnik, številka, leto, strani (prva in zadnja).

6) **Poglavja in razne vrste tiska**: Članek naj bo, kolikor je mogoče, razdeljen po naslednji shemi: uvod (nakazati problem, izhodišče in cilj raziskave in pregled literature), načini raziskovanja in materiali, rezultati raziskav, razlaga rezultatov in sklepi.

Glavna poglavja in podpoglavja pišite po primeru:

### REZULTATI RAZISKAV

1. **Preizkušanje jekla Ž 0147** (mastni tisk, tekst se prične v naslednji vrsti)

a) **Količina vključkov** (mastni tisk, tekst se nadaljuje v isti vrsti).

Zvezano podčrtane besede pomenijo mastni tisk, lahko pa uporabite še kurzivni tisk (prekinjeno podčrtane besede) in razprti tisk (tipkajte razprto).

7) **Tabele** pišite med tekstom ali jih priložite na koncu teksta. V drugem primeru napišite na levi rob, kjer je treba tabelo vstaviti.

8) **Enote**: Uporabljajte izključno enote po SI (System International d'Unités).

9) **Enačbe in simbole** napišite jasno in čitljivo, najbolje s prosto roko. V enačbah ne uporabljajte znakov za množenje ( $\times$  ali  $\cdot$ ). Izogibajte se zamotanih indeksov. Če ne morete jasno napisati grških črk, napišite pojasnilo na levi rob, npr. mala grška črka gama. Simbole v enačbah sproti tolmačite. Uporabljajte simbole, ki so v JUS standardih, če teh ni pa najbolj uveljavljene.

### Fotografije

Metalografski in drugi posnetki morajo biti izdelani na belem papirju z visokim leskom in naj bodo jasni in kontrastni. Preslikane fotografije ali iz tiska preslikane fotografije niso dovoljene, razen v izjemnih primerih. Računajte, da bo širina fotografije v tisku največ 80 mm. Več fotografij, ki spadajo skupaj, nalepite na papir in jih označite kot eno sliko. V tem primeru je lahko širina slike tudi 165 mm. Izjemno imajo fotografije lahko tudi ne-standardno širino. V tem primeru priložite fotografiji pojasnilo, kakšno velikost želite v tisku. Mikroskopska in makroskopska povečanja in pomanjšanja označite v podpisu k sliki (povečanje 100-krat), (pomanjšanja 1,5-krat), še bolje pa z vrisanjem ustrezne skale s črnim ali belim tušem na fotografiji.

### Diagrami in risane slike

Diagrami in risane slike morajo biti narisane s tušem na paus papirju. Ne pošiljajte prefotografiranih ali kopiranih risb. Diagrami morajo imeti popoln okvir in mrežo (raster) v notranjosti okvira. Zaporedno številko slike napišite s svinčnikom na vogalu formata.

Prosimo avtorje, da dosledno upoštevajo še naslednja navodila:

1. **Širina**: Diagrami morajo biti narisani na formatu A4. Širina diagrama naj bo 150 mm, plus ali minus 10 mm. Širina ni le okvir diagrama, temveč tudi številke in napis na ordinatni osi. V tisku so ti diagrami pomanjšani približno 2-krat, na širino enega stolpca. Odstopanja od teh širin narisanih in tiskanih diagramov bodo upoštevana le v primerih, ko morajo biti zaradi gostote podatkov, krivulj ali preglednosti tiskani v širini obeh stolpcev, to je okoli 160 mm. V teh primerih naj bo širina naranega diagrama 300 mm, plus ali minus 20 mm.

Pri drugih risanih slikah (izdelki, preseki, naprave, sheme, načrti in podobno) je lahko skupna narisana širina manjša od 150 mm. Pri tem upoštevajte estetski videz pomanjšane tiskane slike med tekstom in tudi, da bo slika v vsakem primeru v tisku pomanjšana 2-krat; uporabljajte torej enake velikosti črk in debeline črt kot pri diagramih.

2. **Črte**: V vseh diagramih in drugih risanih slikah uporabite izključno naslednje debeline črt:

— Okviri diagramov (koordinatne osi)	0,4 mm
— Mreža v diagramih	0,2 mm
— Krivulje v diagramih	0,6 mm
— Osnovne črte v risbah	0,2 mm
— Prerezi (obrisi) v risbah	0,4 mm
— Šrafure	0,2 mm

V tisku bodo te črte polovico tanjše.

3. **Črke in številke**: Uporabljajte pokončne črke in številke velikosti 4 mm, risane s šablono in peresom, ki ustreza tej velikosti. Izjema so le indeksi, ki naj bodo veliki 3 mm. V tisku bo velikost črk in številok okoli 2 mm, indeksov pa 1,5 mm.

4. **Opis koordinat**: Na abscisi in ordinati mora biti neskratljivi opis s simbolom in enoto, npr.: Natezna trdnost  $\sigma_m$  v N/mm<sup>2</sup>; Stopnja deformacije  $\epsilon$  v %; Količina mase Mn v %; ne pa le  $\sigma_m$  N/mm<sup>2</sup>;  $\epsilon$  %; % Mn.

5. **Oznake točk in krivulj**: Legende za različne vrste točk in krivulj morajo biti v sliki. Legende za simbole in druge črkovne oznake so lahko tudi v podpisih k slikam.

### Izvleček

Za hitro orientacijo po dokončanju članka navajamo na kratko, kaj je potrebno poslati uredništvu Železarskega zbornika:

1. Rokopis v enem izvodu (drugemu hranite za pregled krtačnega odtisa) z izvlečkom pod naslovom, oznakami za slike na levem robu in podatki o avtorjih.

2. Povzetek za prevode v 4 izvodih.

3. Avtorski izvleček za kartice v 4 izvodih.

4. Podpisi k slikam v 2 izvodih.

5. Oštevilčene fotografije, diagrami in druge slike.