

ŽELEZARSKI ZBORNIK

20 LET ŽELEZARSKEGA ZBORNIKA

VSEBINA	Stran
Vehovar Leopold, V. Kuhar — Metalurški inštitut Ljubljana OCENA ODPORNOSTI JEKEL PROTI VODIKOVI KRHKOSTI NA OSNOVI ZASLEDOVANJA PERMEABILNOSTI	73
Uranc Franc — Železarna Ravne IZBIRA KONSTRUKCIJSKIH JEKEL IN NJIHOVIH TOPLOTNIH OBDELAV ZA NAJUSTREZNEJŠO ŽILAVOST	83
Kroušič Blaženko, T. Kolenko, M. Kranjc — Metalurški inštitut Ljubljana J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko — Železarna Ravne J. Miko, F. Novak, B. Brudar — Železarna Jesenice OCENA STANJA IN ANALIZA RAZVOJA UPORABE PROCESNEGA RAČUNALNIŠTVA V SLOVENSКИH ŽELEZARNAH	89
Tehnične novice Stocca Bogdan — Železarna Jesenice UPORABNOST IN LASTNOSTI JEKLA ACRO-NI 11 Si	93
Marinšek Filip — Železarna Jesenice ELMAG — NOVA VRSTA NELEGIRANE POLGOTOVE ELEKTRO PLOČEVINE	95
Pšeničnik Jože — Železarna Ravne NOVO ORODNO JEKLO Č 7450 — UTOP 33 ZA DELO V VROČEM	97

LETO 20 ŠT. 4 — 1986

ŽEZB BQ 20 (4) 73–108 (1986)

ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 20

LJUBLJANA

DECEMBER 1986

Vsebina	Inhalt	Contents	Содержание
Stran	Seite	Page	Страница
L. Vehovar, V. Kuhar Ocena odpornosti jekel proti vodikovi krhkosti na osnovi zasledovanja permeabilnosti 73 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26S, EGn, R1d, P10m, U7d	L. Vehovar, V. Kuhar Bewertung der Wieder- standsfähigkeit der Stähle gegen Wasserstoffsprödig- keit auf Grund der Verfol- gung der Permeabilität 73 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26S, EGn, R1d, P10m, U7d	L. Vehovar, V. Kuhar Estimation of the steel resi- stivity to hydrogen embrittle- ment by analyzing the per- meability 73 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26S, EGn, R1d, P10m, U7d	L. Vehovar, V. Kuhar Оценка сопротивляемо- сти сталей на водородную хрупкость на основании прослеживания проницае- мости. 73 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26S, EGn, R1d, P10m, U7d
F. Uranc Izbira konstrukcijskih jekel in njihovih toplotnih obdelav za najustreznejšo žilavost 83 UDK: 620.187.746.22:669.15-194.2 ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64	F. Uranc Auswahl der Konstruktions- stähle und deren Wärmebe- handlungsverfahren zur Er- zielung bestgeeigneter Zä- higkeit 83 UDK: 620.187.746.22:669.15-194.2 ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64	F. Uranc Selection of structural steel and its heat treatment for the most suitable toughness 83 UDK: 620.187.746.22:669.15-194.2 ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64	F. Uranc Выбор конструкционных сталей и их термических обработок для наиболее соответствующую вязко- сть. 83 UDK: 620.187.746.22:669.15-194.2 ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64
B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Brudar, T. Kolenko, M. Kranjc Ocena stanja in analiza raz- voja uporabe procesnega ra- čunalništva v slovenskih že- lezarnah 89 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26s, EQn, R1d, P10m, U7d	B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Brudar, T. Kolenko, M. Kranjc Bewertung des Zustandes und die Analyse der Entwi- cklung der Datenbearbeitung in Slowenischen Stahlwer- ken 89 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26s, EQn, R1d, P10m, U7d	B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Brudar, T. Kolenko, M. Kranjc The review of state and ana- lysis of development in ap- plying process computers in slovene ironworks 89 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26s, EQn, R1d, P10m, U7d	B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Brudar, T. Kolenko, M. Kranjc Оценка положения и ана- лиз развития применения вычислительного устрой- ства в словенских метал- лургических заводах. 89 UDK: 620.194:693.564:669.788:5- 39.56:624.012.46 ASM/SLA: Q26s, EQn, R1d, P10m, U7d
Tehnične novice 93	Technische Nachrichten 93	Technical News 93	Технические новости 93





Ocena odpornosti jekel proti vodikovi krhkosti na osnovi ugotavljanja permeabilnosti

UDK: 620.194-2:693.564:669.788:539.56:56:624.012.46
ASM/SLA: Q26S, EGn, R1d, P10m, U7d

L. Vehovar*, V. Kuhar**

To delo obravnava problematiko vodikove krhkosti, ki je najpogosteje posledica korozijskih procesov, galvanizacije ali luženja, pri čemer se tvori atomarni vodik, ki v določenih pogojih lahko migrira v kristalno rešetko kovine in povzroča njeno navodčenje.

Prikazana je kinetika elektrokemičnega izločanja vodika na katodnih površinah oziroma njegova adsorbcija (H_{ads}) kot prvi stadij, kateremu sledi drugi, t.j. absorbcija H v notranjost kovine (po ruski šoli absorbcija protona vodika H^+).

Obdelana je metoda merjenja propustnosti kovin za vodik (določa se hitrost permeacije oziroma permeabilnost in difuzijska konstanta), opisane pa so tudi tovrstne raziskave na visokotrdnostnih jeklih, v patentirani ali poboljšani obliki, ki se uporabljajo v prednapetih konstrukcijah.

1. UVOD

Vpliv vodika so v začetku pripisovali delovanju napetostne korozije, vendar pa so kasneje dokazali, da obstaja sorodnost med vodikovo krhkostjo in nekaterimi tipi napetostne korozije. Vsekakor pa ne obstaja enovita teorija, s katero bi bilo možno razložiti vsa dogajanja v zvezi s tem fenomenom, ki variira v odvisnosti od materiala, njegove strukture, elektrolita temperature itd. Povezan je z vrsto različnih teorij oziroma mehanizmov, ki vsak po svoje poskuša interpretirati različna dogajanja v materialu pri vstopu atomarnega vodika. Danes so v svetu priznani naslednji mehanizmi vodikove krhkosti:

1. Zapfov mehanizem, ali mehanizem pritiska, ki je posledica rekombinacije atomarnega vodika v molekularnega (v materialu se tvorijo pritiski cca. 10^5 bar). V okolici plinskih mehurčkov je možno pričakovati precejšnje nakopičenje dislokacij, upadanje žilavosti materiala in pojav mikro ali makro razpok.

2. Petchev mehanizem ali adsorpcijski mehanizem po katerem adsorbirani vodik znižuje površinsko energijo kovine in s tem olajšuje formiranje razpoke. Znižanje se doseže z interakcijo vodika z elektroni iz »d« elektronske oble in na osnovi tega zaključujemo, da

topnost vodika narašča z naraščanjem gostote elektronov na Fermijevo površini.

3. Troianijev dekohezijski mehanizem, katerega je povzel Oriani, po katerem vodik znižuje kohezijsko silo med atomi kovine in sicer na mestih, kjer je koncentriran, to se pravi, v področjih triosnosti po Troianiju oziroma po Orianiu v konici razpoke, v kateri je prisotna maksimalna napetost. S takega gledišča na stanje v korenu razpoke se je porajal mehanizem plastične deformacije.

4. Mehanizem plastične deformacije, ki upošteva stanje v konici razpoke, z maksimalno koncentracijo dislokacij. Te omogočajo transport vodika v to cono, tako da je gonilna sila, potrebna za napredovanje razpoke, stalno prisotna.

5. Mehanizem izločanja hidridov je nastal na osnovi dejstva, da je v kovinskih sistemih, ki tvorijo z vodikom hidride, prisotna zelo močna vodikova krhkost zaradi ekstremne občutljivosti te faze do notranjih ali od zunaj vnešenih napetosti, predvsem pa zaradi povečanja njenega volumna, posledica česar so visoki pritiski in deformacija kristalne rešetke. Nizka reakcijska entalpija, potrebna za tvorbo hidridov, omogoča njihov nastanek tudi pri razmeroma nizkih temperaturah.

Številna raziskovalna dela so dokazala in tudi podprla dva mehanizma, ker najbolj kompleksno obravnava in omogočata razlago vodikove krhkosti. To sta:

- mehanizem Troiano-Oriani
- mehanizem plastične deformacije

Vsi ostali omenjeni mehanizmi oziroma pogoji so sicer potrebni, toda ne vedno zadostni.

Morfološke preiskave prelomnih površin omogočajo dodatna spoznanja o vodikovi krhkosti in še posebej o načinu njenega širjenja.

Ločimo tri vrste prelomov, ki so posledica vodikove krhkosti, in sicer:

- interkristalni krhki prelom
- transkristalni krhki prelom
- duktilni prelom

V sistemu Fe-H, kjer ni možna tvorba hidridov, običajno opazimo krhek interkristalen prelom, ki poteka vzdolž mej avstenitnega zrna. Transkristalen prelom se pojavlja pri Fe-Si zlitinah, in tudi Fe kot rezultat visoke stopnje navodčenja (katodna polarizacija). Čeprav železo ne tvori hidridov (izraziti tvorci hidridov so napr. Ti, Zr, V, Nb, Cr, Pd), pa je vendar poznano, da se ne-

* dr. Leopold Vehovar, dipl. ing. metal. — SŽ Metalurški inštitut Ljubljana

** Viljem Kuhar dipl. teh. — ZRMK Ljubljana



katere njegove zlitine obnašajo podobno kot legirni elementi. Krom in nikelj tvorita hidride, nerjavno jeklo pa ravno tako, čeprav ti hidridi niso stabilni pri normalnih atmosferskih pogojih.

Rentgenske raziskave so pokazale, da nastopa navodičenje Cr-Ni jekla le v površinskem pasu, kajti ta jekla imajo ploskovno centrirano kristalno mrežo, za katero pa je poznana slaba difuzivnost vodika (v kubično centrirani je difuzija vodika največja). V navodičenih conah se konkretno za 18 Cr-8 Ni jeklo avstenit pretvarja v tako imenovani »inducirani martenzit« kot posledica tvorbe hidridne faze, ki avstenitno matrico širi. To povzroča visoke notranje napetosti v zunanji coni, kar se tudi dokazuje s povišano trdoto in krhkostjo.

Novejše raziskave kažejo na znaten vpliv nekaterih oligo elementov, ki segregirajo po kristalnih mejah jekel, kjer delujejo kot pasti, ki pospešujejo rekombinacijo atomarnega vodika v molekularnega. Takšni so Sb, Te, Sn, S in As, katerih delovanje vodi do interkristalnih prelomov. Vpliv karbidov na absorbcijo vodika v jeklih, in s tem na naravo preloma, je poznan. V odvisnosti od kemične sestave jekla in njegove strukture lahko delujejo precipitacijski karbidi, tipa Cr₇C₃, kot pasti. Krom povečuje vsebnost absorbiranega vodika, ne le s povečanjem količine karbidov, temveč tudi s tem, da popači fizikalno in celo kemično naravo mejnih površin. Podobno kot karbidi, delujejo tudi vključki MnS.

Na naravo prelomnih površin izrazito vpliva tudi mikrostruktura. Visokotrdozna martenzitna jekla kažejo krhke prelome vzdolž mej avstenitnega zrna že pri zelo nizkih koncentracijah vodika. Perlitna jekla so podvržena enakim prelomom pri mnogo višjih koncentracijah, avstenitna pa so relativno neobčutljiva. Pri avstenitnih nerjavnih jeklih je zaradi navodičenja potrebna manjša lomna napetost, vendar pa je videz preloma pogosto duktilne narave.

Pri nerjavnih jeklih je stopnja navodičenja odvisna od stabilnosti γ faze. Pri jeklu tipa 304, ki ni stabilizirano, se pojavljajo zelo razvejani interkristalni prelomi, medtem ko pri stabilizirani kvaliteti 310 pokanje ni zaznavno.

Vodikovo krhkost kovin lahko povzroči tudi medij plinastega vodika. Navodičenje iz plinaste faze poteka preko mnogih stadijev, in sicer:

- fizikalne adsorbcije H₂ na površino kovine
- kemisorbcije molekule H₂
- disociacije molekule H₂ v atomarni vodik
- difuzija H v kristalno rešetko.

Mnogi od teh procesov niso najbolj razumljivi, ni pa še tudi jasno, katera od teh stopenj kontrolira hitrost migracije atomarnega vodika v notranjost kovine. 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 v tesni povezanosti z njihovo strukturo 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 Vander Waalsove vezne energije manj kot 0,1 eV/molekulo. Tudi proces kemisorbcije in tvorba atomarnega vodika se bosta prvenstveno odvijala na teh delih površine.

2. KINETIKA ELEKTROKEMIČNEGA IZLOČANJA VODIKA

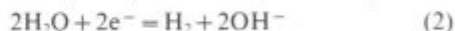
Kinetika elektrokemičnega izločanja vodika je važen moment pri reševanju problematike vodikove krh-

kosti. V odvisnosti od različnih dejavnikov se bo vodik zaradi reakcij na katodi bodisi izločal v obliki plina (H₂) bodisi tvoril vodikovo nadnapetost, ki je osnovni pogoj za pojav navodičenja kovine.

Elektrokemično izločanje vodika iz kislih in bazičnih raztopin je možno na različne načine (1). Vir za tvorbo vodika v kislih raztopinah so hidroksonijevi ioni H₃O⁺ (v nadaljnjem tekstu bodo ti zaradi enostavnosti označeni s H⁺, kar je običajno v literaturi), katerih razelektrenje na katodi vodi k tvorbi plinastega vodika:



V bazičnih raztopinah je ta reakcija naslednja:



Enačbe reakcij (1) in (2) predstavljajo le sumarne procese katodnega izločanja vodika, vendar pa so ti dejansko sestavljeni iz vrste različnih vmesnih stadijev. Prvi stadij je transport delcev k elektrodnim površinam za tem pa sledi stadij razelektrenja ionov vodika ali molekule vode s tvorbo adsorbiranih atomov vodika (H_{ads}):



Neodvisno od tega, ali gre za razelektrenje v kislih ali bazičnih raztopinah je neposredni produkt adsorbirani vodik na elektrodni površini.

Za nadaljnji stacionirani potek elektrokemičnega procesa je potrebno, da so elektrodne površine zasedene z vodikovimi atomi oziroma da je omogočeno stalno odvajanje teh s katodne površine. Atomi vodika se lahko odstranijo na 3 načine:

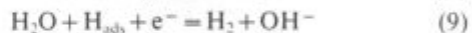
- s katalitično rekombinacijo
- z elektrokemično desorbcijo
- emisijsko

Pri mehanizmu s katalitično rekombinacijo (mehanizem Volmer-Tafel), nastopa izločanje vodika z njegovo rekombinacijo v molekulo in istočasno desorbcijo:



Pri tovrstnih procesih ima vlogo katalizatorja kovina kot elektrodni material. Ugotovilo se je, da se vodik adsorbira na tistih mestih katodnega dela materiala, kjer je potrebna majhna adsorpcijska energija.

Pri elektrokemični desorbciji (mehanizem Volmer-Heyrowski) je izločanje vodika z elektrodnih površin posledica razelektrenja ionov vodika ali molekule vode po naslednjih enačbah:



Pri emisijskem mehanizmu, ki pa ni predmet obravnave v tem sestavku, adsorbirani atomi vodika izpnevajo iz elektrodnih površin v obliki atomov:



temu pa sledi v končni fazi rekombinacija atomarnega vodika v molekularnega.

Kateri mehanizem od prvih dveh predstavlja dejanski mehanizem izločanja vodika na določeni kovini, pri določenih pogojih, je težko predvideti brez raziskav. Velika verjetnost pa je, da se bo prvi odvijal takrat, ko je prisotna majhna stopnja prekritja elektrode z adsorbiranimi H atomi, in drugi, ko je stopnja prekritja velika.

2.1. Vodikova nadnapetost na elektroadni površini katode

Kot je bilo že omenjeno, je vodikova nadnapetost odločujoč dejavnik pri tvorbi vodikove krhkosti, ki se lahko pojavi, če zaradi specifičnosti elektrokemičnega procesa ni povsem izvedljiva depolarizacija z vodikom na katodi ob tvorbi H₂, temveč nastali H_{ads}, ki ne reagira z elektroni, difundira v notranjost kristalne mreže kovine.

Literatura (3) navaja, da obstaja precej teorij o nadnapetosti vodika, na osnovi katerih je bilo možno najti empirične odvisnosti (linearne ali logaritmične) med nadnapetostjo vodika in gostoto katodnega toka.

Vsekakor pa sta najbolj priznani dve, in sicer:

— teorija »zadrževanja razelektrenja H⁺ iona«, ki predpostavlja, da je najpočasnejša stopnja pri katodnem izločanju vodika Volmerjeva reakcija:



na osnovi česar tudi ruska šola trdi, da je vodikova krhkost posledica vstopa H⁺ ionov (vodikovih protonov) v kovino;

— teorija »zadrževanja rekombinacije« dveh adsorbiranih H atomov v molekulo vodika (Taflova reakcija):



Nadnapetost η_H je:

$$\eta_H = E_i - E_H \quad (11)$$

E_i = stacionarni elektroadni potencial pri določeni gostoti toka, ki se poraja z izločanjem vodika

E_H = potencial reverzibilne elektrode

$$E_H = \frac{RT}{F} \ln a_{H^+} = -b^* pH \quad (12)$$

$$b^* = 2,303 \frac{RT}{F} \quad (13)$$

R = plinska konstanta

T = absolutna temperatura

F = Faradayeva konstanta

a_{H^+} = aktivnost H⁺ ionov

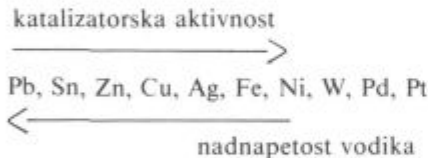
Tafel je ugotovil, da obstaja med nadnapetostjo in gostoto toka logaritmični odnos, ki se lahko izrazi:

$$\eta = a + b \log i, \quad (14)$$

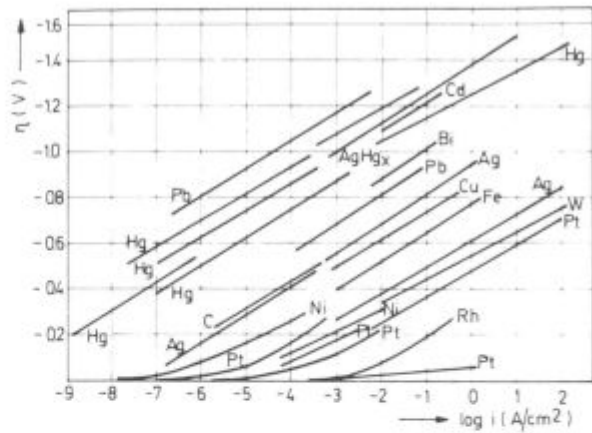
pri čemer sta a in b specifični konstanti, ki sta odvisni od vrste kovine oziroma zlitine, njene sestave, strukture itd., i pa je gostota toka.

Odvisnost nadnapetosti izločanja vodika η od gostote toka — $\log i$, je prikazana na sl. 1.

Podobno kot zgoraj je Bongroffer leta 1924 ugotovil, da z naraščanjem aktivnosti kovine kot katalizatorja v smislu reakcije rekombinacije atomarnega vodika v molekularnega pada njena zmožnost tvorbe nadnapetosti:



Tako imata napr. Pd in Pt visoko katalitično aktivnost (potencirata izločanje H₂) in najmanjšo možnost tvorbe nadnapetosti vodika, Pb in Sn pa najmanjšo aktivnost in možnost tvorbe največje nadnapetosti izločanja vodika na katodi, kar pomeni, da ostaja H adsorbiran na elektrodnih površinah, s tem pa je dana možnost njihove difuzije v notranjost kovine in njeno navo-



Slika 1

Odvisnost nadnapetosti izločanja vodika od gostote toka za različne kovine

Fig. 1

Relationship between the overvoltage of hydrogen precipitation and the current density for various metals.

dičenje. Na osnovi tega je tudi možno sklepati, zakaj novejšje kemične analize visokotrnostnih jekel vsebujejo rezultate za vsebnost Pb, Sn, Sb, Zn, Cu, itd., kajti te nečistoče med drugim zvišujejo nadnapetost izločanja vodika za tisto jeklo, kar potencira možnost nastanka vodikove krhkosti.

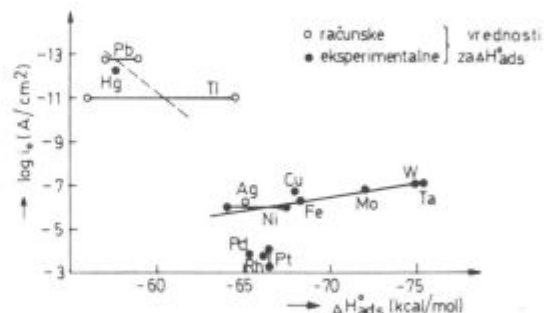
Leta 1951 je Bockris ugotovil odvisnost nadnapetosti od medatomarne razdalje. Najmanjša nadnapetost se dobi pri kovinah z medatomarno razdaljo, ki je blizu 0,27 nm, medtem ko s povečanjem ali zmanjšanjem te razdalje od navedene vrednosti, nadnapetost raste in s tem možnost navođenja.

Pri izločanju vodika razlikujemo nekaj vrst nečistoč, ki so lahko v korozijskem mediju ali elektrolitu in lahko močno vplivajo na realno hitrost izločanja molekularnega vodika:

— kovinski ioni, ki se lahko reducirajo na elektrodnih površinah, kjer znižujejo nadnapetost vodika;

— različni inhibitorji ali organske snovi, ki se adsorbirajo na elektrodi in s tem zmanjšujejo njeno površino, ki je sicer potrebna za odvijanje neke elektrokemične reakcije;

— substance, ki se adsorbirajo na elektrodi in tudi vstopajo v reakcijo ter jo potencirajo, npr. H₂S, ki sam reagira z elektroni na katodi in s tem onemogoča depo-



Slika 2

Odvisnost gostote katodnega toka od entalpije adsorpcije H atomov za različne kovine

Fig. 2

Relationship between the cathode-current density and the enthalpy adsorption of H atoms for various metals.

larizacijo z vodikom (4), ki ima tako možnost difuzije v notranjost kovine.

V smislu klasifikacije kovin, ki so lahko bolj ali manj podvržene vodikovi krhkosti, je potrebno poudariti še entalpijo adsorbcije ΔH_{ads}^0 in stopnjo prekritja elektrodnih površin θ H z adsorbiranim vodikom (H_{ads}). Če katodna reakcija poteka po Volmerju (enačba 6), bo hitrost te reakcije večja na elektrodnih površinah kovin, pri katerih je entalpija adsorbcije H atomov večja.

Če pa reakcija izločanja vodika poteka po Heyrowskem (enačba 8), bo hitrost izločanja molekularnega vodika manjša na kovinah z večjo entalpijo adsorbcije H atomov. Na sl. 2 je prikazan vpliv entalpije adsorbcije za različne kovine.

2.2 Kinetika transporta vodika v kovino

Posamezni mehanizmi transporta atomarnega vodika oziroma H^+ iona v kristalno rešetko 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 rešetke itd.

Za nastanek vodikove krhkosti sta na razpolago dva vira atomarnega vodika, in sicer notranji ali raztopljeni vodik, in zunanji, ki izvira iz plinastega ali tekočega medija. Vendar pa je predmet te razprave le tekoči korozijski medij in mediji, potrebni za luženje, galvaniko itd., zato so dogajanja na elektrodnih površinah bistvenega pomena za tvorbo vodika in njegovo difuzijo v notranjost materiala. Na sl. 3 je prikazan osnovni korozijski proces železa, katerega posledica je v končni fazi adsorbcija atomarnega vodika v njegovo notranjost. Hitrost adsorbcije R je enostavno produkt med specifično konstanto hitrosti adsorbcije atomarnega vodika (k_{abs}) in ravnotežno koncentracijo na površini adsorbiranega vodika (H_{ads}), ki dejansko predstavlja stopnjo prekritja elektrodne površine θ — lit. (5).

k_{abs} se določi iz enačbe:

$$\frac{1}{P_{\infty}} = \frac{L}{D \cdot \theta} \frac{k_{des}}{k_{abs}} + \frac{1}{k_{abs} \cdot \theta} \quad (15)$$

pri čemer je:

P_{∞} = stacionarni fluks vodika

D = difuzijska konstanta vodika v jeklu

L = debelina kovinske membrane, ki služi za določanje permeabilnosti

k_{des} = specifična konstanta hitrosti desorbcije vodika s površine kovine

$$H_{ads} \xrightleftharpoons[k_{des}]{k_{abs}} H_{abs} \quad (16)$$

$$R = k_{abs} [H_{ads}] \quad (17)$$

$[H_{ads}]$ = koncentracija adsorbcije atomarnega vodika

Korozijski proces, ki vodi do adsorbcije vodika v železo, je prikazan na naslednji shemi:

Transport atomarnega vodika v kovino je možen na dva načina (6,7):

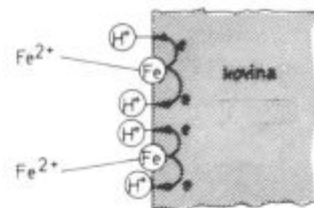
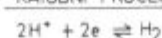
- z difuzijo
- s pomočjo dislokacij

Transport vodika z difuzijo so študirali v mnogih kovinskih sistemih in kaže, da je difuzija proces, ki omogoča razmeroma hitro penetracijo vodika, še posebej v kubičnih — prostorsko centriranih sistemih, za katere je značilna nizka entalpija aktivacije. V temperatur-

ANODNI PROCES

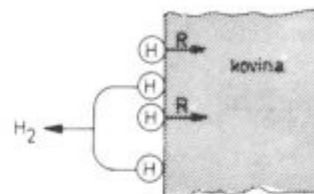
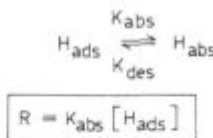


KATODNI PROCES



RAZELEKTRENJE VODIKA IN ADSORBCIJSKI PROCES

- 1) $H^+ \rightleftharpoons H_{ads}$
- 2) $H_{ads} + H_{ads} \rightleftharpoons H_2$
- 3) $H_{ads} + H^+ + e \rightleftharpoons H_2$



Slika 3

Shematski prikaz korozijskega procesa, ki vodi do adsorbcije atomarnega vodika v železo

Fig. 3

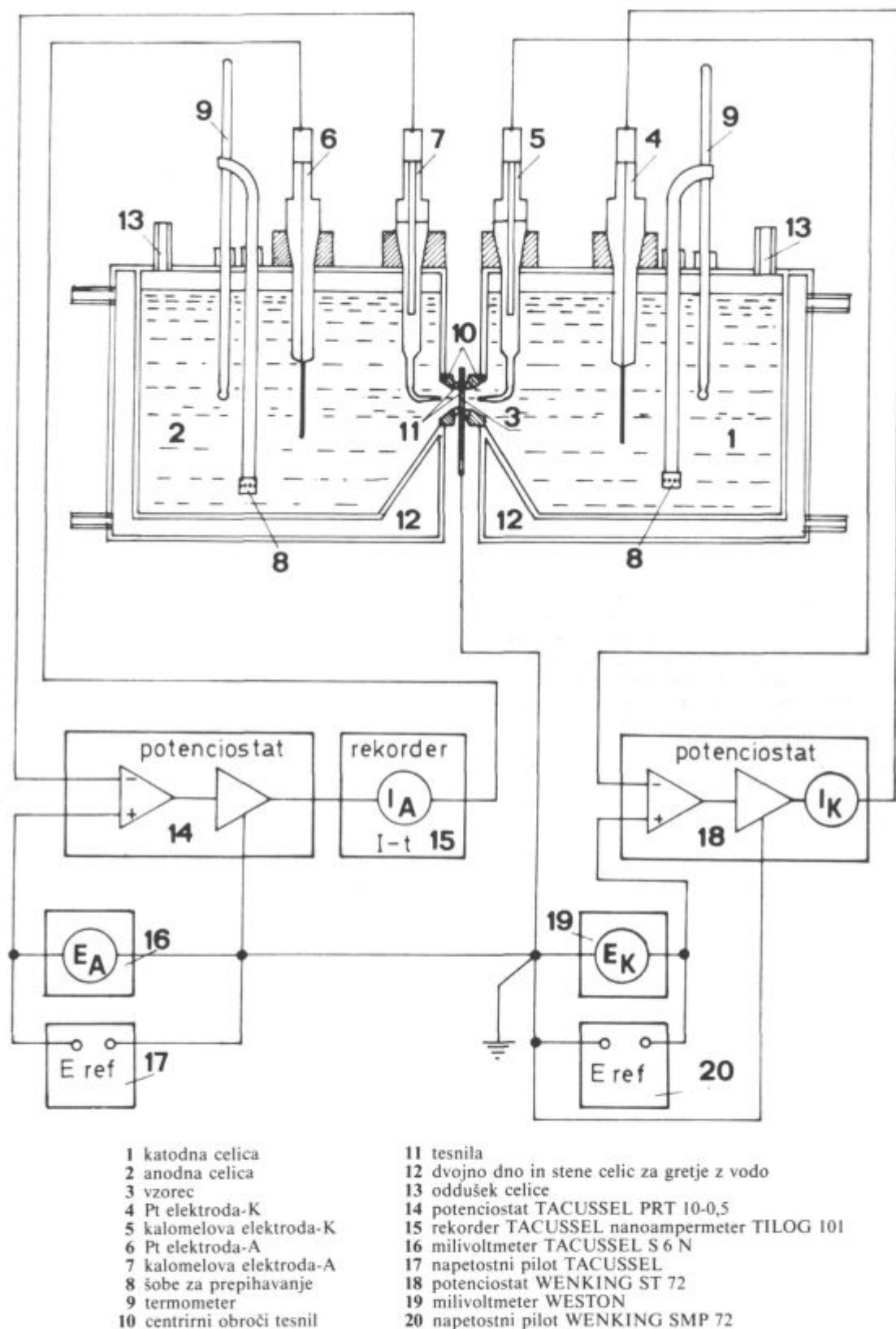
Schematical presentation of the corrosion process which leads to the absorption of atomic hydrogen into iron.

nem območju, kjer je vodikova krhkost zaznavna, je difuzija običajno reda velikosti $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Za difuzijo atomarnega vodika v kovino je na splošno značilna nizka aktivacijska energija, ki znaša 0,1 eV v kovinah s kubično — prostorsko centrirano kristalno rešetko (8). S tem je še omogočena difuzija pri razmeroma nizkih temperaturah. Vendar pa difuzija lahko močno upade, aktivacijska entalpija pa naraste, s tem da se vodik ujame v »pasti« (9, 10, 11), katere dejansko predstavljajo različni defekti oziroma nehomogenosti v kovini: poleg dislokacij so to še kristalne meje, poligonizacijske pregrade, intersticijsko raztopljeni tuji atomi, lokalne zgotovitve tujih atomov, različni vključki ali izločki tujih faz itd. S tem da se atomarni vodik ujame v pasti z nizko energijo, se povečuje možnost rekombinacije tega v molekularnega posledica česar pa je navodilčenje in vodikova krhkost. Tako moderna teorija vodikove krhkosti sloni na efektu pasti (trapping effect) in na osnovi tega se je tudi izoblikovala »Trap Theory of Hydrogen Embrittlement«. Po tej teoriji se bo pojavila razpoka takrat, ko količina ulovljenega vodika preseže kritično vrednost (12, 13). Potrebno je torej operirati z izrazom »ulovljeni vodik«, kajti v mnogih kovinah, napr. paladiju ali monokristalih, je difuzija atomarnega vodika zelo velika, nagnjenost k vodikovi krhkosti pa zelo majhna, ker ni možna rekombinacija v H_2 na lokacijah, kjer bi naj bile prisotne pasti. Očitno pa je, da takšni kovinski sistemi niso podvrženi navodilčenju niti na osnovi dekohezije med atomi kovine zaradi delovanja intersticijsko raztopljenega vodika, kar propagira mehanizem v teoriji Troiano-Oriani. Takšne kovine so torej odporne proti vodikovi krhkosti (razen če ni izvedena intenzivna in dolgotrajna katodna polarizacija).

Transport vodika skozi kovino pa je možen še z gibanjem dislokacij (7), kar je še posebej evidentno pri nizkih temperaturah, kjer je difuzija zanemarljiva. Ta prenos atomarnega vodika je hitrejši kot z difuzijo.

Hladna plastična deformacija kovin vedno vodi do »razrahljanja« strukture, to pa je vzrok za povečanje nagnjenosti materiala do navodilčenja (vstop vodika v



Slika 4

Korozivna celica s sklopom aparatur za merjenje permeabilnosti vodika

Fig. 4

Corrosion cell with the equipment for measuring the hydrogen permeability.

vakance, interakcija vodika z dislokacijami itd.). Dodatno pa lahko plastična deformacija povzroči znatne spremembe v mehanizmu površinske adsorpcije.

3. PERMEABILNOST KOVIN ZA ATOMARNI VODIK

Iz dosedanjih razprav je možno soditi, da študij difuzije vodika v kovinah oziroma ugotavljanje permeabilnosti (propustnosti za atomarni vodik) ni le akademskega značaja. Permeabilnost določenih kovin in njihovih zlitin bi lahko predstavljala merilo za stopnjo navdičenja, kajti povsem poenostavljeno gledanje lahko vodi do takega zaključka: več ko bo vodika difundiralo v kovino ali več ko ga bo ta propuščala, večja je možnost za njegovo rekombinacijo v pasteh, za dekohezivsko delovanje med atomi železa, tvorbo hidridov itd. Toda če je za določene kovinske sisteme odločilna za vodikovo krhkost rekombinacija atomarnega vodika v molekularni (za to so potrebne pasti), ali pa napr. tvorba hidridov, potem permeabilnost ne more biti merilo za navdičenje, kot je v primeru paladija, ki sicer izkazuje visoko permeabilnost, vendar pa ima premalo pasti (ali pa je struktura tako ugodna, da »amortizira« visoke pritiske molekularnega vodika), da bi se porajala vodikova krhkost. Vsekakor pa je v določenih sistemih ta metoda zaradi svoje natančnosti in velike senzibilnosti izvrstno merilo za vodikovo krhkost. S to metodo je možno dokazovati produkcijo atomarnega vodika v različnih medijih, za katere pogosto le domnevamo, da so tvorci vodika, napr. visoko bazične raztopine z določenimi primesmi organskega ali anorganskega karakterja, ki delujejo kot akceleratorji vodikove krhkosti na elektrodnih površinah (pogosto imenovane »strupi«), kjer slabijo vez med kovino in H_{ads} , pa tudi možnost razelektrjenja H^+ ionov, kar omogoča njihovo penetracijo v notranjost kovine.

Metodo merjenja permeabilnosti sta razvila Devanathan in Stachurski (14). S to metodo je možno ugotavljanje difuzije atomarnega vodika s hitrostjo permeacije $0,003 \mu A/mm$, oziroma hitrost pronicanja $3 \cdot 10^{-4} g/atom/s$, ali $3 \cdot 10^{-9} ml H_2/s$.

4. REZULTATI PREISKAV

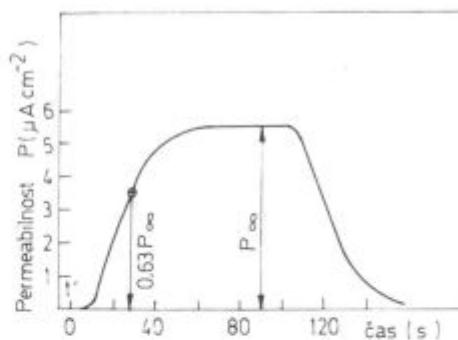
V eksperimentalne namene je bila izdelana specialna dvojna korozivna celica, ki je z ostalim sklopom aparaturno shematsko prikazana na sl. 4.

Levi del celice je katodni predel, ki služi za produkcijo atomarnega vodika, v desni pa se odvijajo anodne reakcije. Atomarni vodik, ki se tvori, struji skozi jekleno membrano, katera je na anodni strani galvanjsko zaščitena s paladijem. Vodik se na anodno polarizirani površini paladija oksidira v proton vodika H^+ , kar povzroči spremembo potenciala na anodni strani oziroma anodni tok, ki se direktno meri. Stacionarni tok vodikovega protona, izražen v $\mu A/cm^2$, pa predstavlja permeabilnost P_{∞} .

Tipičen zapis transporta vodika skozi kovinsko membrano je prikazan na sliki 5.

Po gornjem grafičnem zapisu transporta vodika sta Devanathan in Stachurski določila difuzijsko konstantno (D) na več načinov (metoda časovnega zaostanka, konstanta časa naraščanja ali upadanja, prebojni čas), s pripombo, da je metoda časovnega zaostanka t_{lag} , katero sta utemeljila Daymes in Barrer, sicer enostavna, toda še vedno dovolj natančna.

Z integriranjem prikazane krivulje lahko določimo količino difundiranega vodika za vsako časovno obdobje



Slika 5
Ovisnost permeabilnosti P od časa katodne polarizacije

Fig. 5
Dependance of the permeability P on the time of cathodic polarization.

je katodne polarizacije. Če torej ekstrapoliramo zapis količine vodika s časom, dobimo časovni zaostanek t_{lag} , ki je povezan z difuzijsko konstanto in membrano debelino L preko naslednje enačbe:

$$t_{lag} = \frac{L^2}{6D} \quad (18)$$

Devanathan je potrdil, da se metoda » t_{lag} « najlažje uporablja tako, da se določi čas, v katerem je delež permeacije dosegel vrednost, ki znaša 0,6299-krat vrednost za stacionarno stanje fluksa vodika skozi membrano. Iz tega sledi, da je:

$$t_{lag} = 0,63 P = \frac{L^2}{6D} \quad (19)$$

Na osnovi te enačbe so bile tudi v prezentiranem delu določene difuzijske konstante, hitrost difuzije vodika skozi membrano pa iz Faradayevega zakona, ki trdi, da $1 \mu A$ ioniziranega vodika ustreza hitrosti difuzije $1,16 \cdot 10^{-7} cm^3/s$.

Permeabilnost za vodik je bila določena na treh visokotrnostnih jeklih, in sicer:

Material	Napetost tečenja Rp 0,2, N/mm ²	Natezna trdnost Rm, N/mm ²	Raztezek A ₁₀ , %	Kontrakcija Z, %
Stabilizirana patentirana žica F. Guilleaume Ø 7 mm	1529	1700	7,5	46,9
Stabilizirana patentirana žica RMK Zenica Ø 7 mm	1520	1727	6,0	26,5
Poboljšano jeklo vrste Dywidag	1430	1550	7,7	—

Preiskave so bile izvedene iz dveh namenov:

— ali se v visoko bazičnem mediju s pH 12,6 ob prisotnosti sulfidnega žvepla lahko tvorijo na elektrodni površini H^+ ioni in s tem vodikova krhkost;

— ali je permeabilnost lahko merilo oziroma realna osnova za ugotavljanje odpornosti določenih skupin jekel proti vodikovi krhkosti.

Dokaz o obstoju vodika v bazičnem področju, v prisotnosti sulfidnega žvepla CaS, ki se nahaja v žilindri, ki je dodana cementnemu klinkerju, ta pa v beton ali injekcijsko maso, kjer povzroča vodikovo krhkost jekel v prednapetih konstrukcijah, je bil izveden pri naslednjih pogojih:

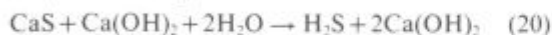
- raztopina Ca(OH)₂ s pH = 10 in T = 25^oC
- dodatek 0,472 g S⁻²/l
- prepihovanje raztopine z argonom 8 minut s 400 l/h, s čimer se odstrani kisik kot depolarizator na katodi

- katodna polarizacija 6 mA/cm²
- anodna polarizacija + 1000 mV
- debelina jeklene membrane 0,51 mm
- membrana ni bila obremenjena osnovega

Na anodni strani je bila membrana galvanjsko paladizirana z debelino Pd sloja 8μm.

Tvorba atomarnega vodika v prisotnosti sulfidnega žvepla poteka po zakonitostih, ki so že bile dokazane z nekaterimi elektrokemičnimi meritvami in rentgensko kvalitativno analizo mineraloške sestave produktov reakcij (lit. 15).

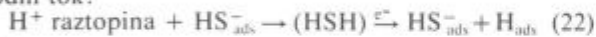
Osnovne reakcije v raztopni Ca(OH)₂, ki je prezentirala beton, so naslednje:



Ker H₂S nad pH 9 ni obstojen, razpada:



Tako se producira vodik, ki je izvor kislosti, in HS⁻ anion z izrazito adsorpcijsko sposobnostjo na elektrodnih površinah, kjer pospešuje tvorbo H_{ads} in s tem katodni tok:



ali pa:



Tvorba atomarnega vodika in njegova penetracija v material, ki je pogojena z vodikovo nadnapetostjo in prekritjem elektrodnih površin s H_{ads}, pa je osnova za vodikovo krhkost. Nadnapetost vodika je dosežena s tem, da na katodi z elektroni reagirajo HS⁻ ioni, ki ima-

jo večjo aktivnost kot H⁺ ioni, ki se adsorbirajo na površini jekla oziroma na ugodnih lokacijah tudi migrirajo v njegovo notranjost.

Rezultati raziskav permeabilnosti za vsa tri jekla so prikazani na diagramih sl. 6. Iz začetnih delov krivulj, ki so prikazani v večjem merilu, so bile določene difuzijske konstante oziroma hitrost difuzije vodika.

Difuzijske konstante so bile izračunane po metodi časovnega zaostanka na osnovi enačbe 19, hitrost difuzije vodika v jeklo pa iz že omenjenega Faradayevega zakona.

V naslednji tabeli so rezultati prikazani tudi numerično.

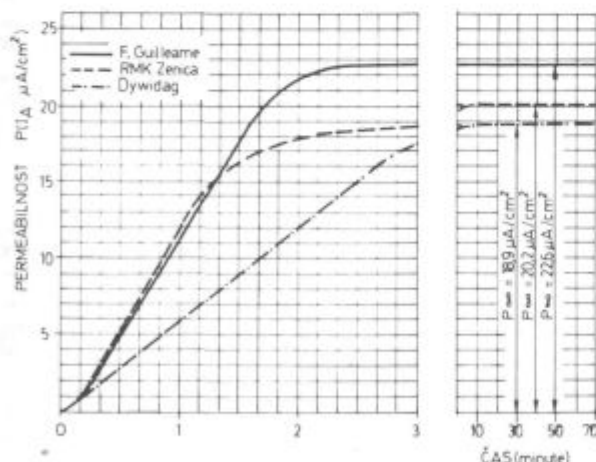
Material	Permeabilnost — stacionarno stanje P _∞ (l _A μA/cm ²)	Difuzijska konstanta D 25 ^o C (cm ² s ⁻¹)	Hitrost difuzije vodika (cm ³ s ⁻¹)
Stabilizirana patentirana žica F. Guilleaume	18,9	1,60 · 10 ⁻⁶	2,19 · 10 ⁻⁶
Stabilizirana patentirana žica RMK Zenica	20,2	2,81 · 10 ⁻⁶	2,34 · 10 ⁻⁶
Poboljšano jeklo vrste Dywidag	22,6	3,21 · 10 ⁻⁶	2,62 · 10 ⁻⁶

Očitno je, da izkazuje poboljšano jeklo vrste Dywidag največjo propustnost oziroma topnost vodika, nekoliko manjšo žica iz RMK — Zenica in najmanjšo F. Guilleaume.

Na osnovi teh meritev in z upoštevanjem danes priznanih teorij je tudi možno sklepati, da ima tisto jeklo, ki je najbolj podvrženo vodikovi krhkosti, tudi največjo permeabilnost, čeprav tovrstni parametri niso vedno pravo merilo za odpornost materiala proti vodikovi krhkosti (že navedeni primer paladija, monokristalov in nekaterih drugih kovinskih sistemov). Obstaja pa velika verjetnost, da je ta metoda ustrezna za določevanje odpornosti istega ali podobnega kovinskega sistema, z različno termično ali kakšno drugo obdelavo, katerih posledica so napr. strukturne spremembe, koncentracijske razlike različnih elementov, pojavi dislokacij itd.

Rezultati meritev permeabilnosti in v zvezi s tem navedena možnost selekcije so bili potrjeni tudi z nekaterimi našimi meritvami življenjske dobe istih materialov, v 20 % raztopini NH₄CNS, pri 50^oC in obremenitvijo vzorcev do 80 % od natezne trdnosti (test za ugotavljanje odpornosti proti vodikovi krhkosti jekel za prednapeti beton). Tudi te vrste poskusi, pa tudi izkušnje iz prakse so pokazale, da je Dywidag jeklo najmanj odporno, precej bolje se obnaša patentirana žica RMK — Zenica, ki pa ni primerljiva z istim materialom F. Guilleaume.

Vzroke za takšne razlike smo našli v mnogih nečistočah, izločenih po kristalnih mejah, predvsem pa v različnih strukture in napr. medlamelarni razdalji med perlitnimi lamelami, ki znaša za F. Guilleaume žico 0,0645 μm, za RMK — Zenica pa 0,092 μm, kar je znatno več. Dejstvo je, da je medlamelarna razdalja pogojena s finisami termične obdelave in da ne vpliva le na trdnostne lastnosti in odpornost proti vodikovi krhkosti, temveč po tujih izkušnjah še na napetostno korozijo in relaksacijske izgube. Pogoji termične obdelave naj bodo

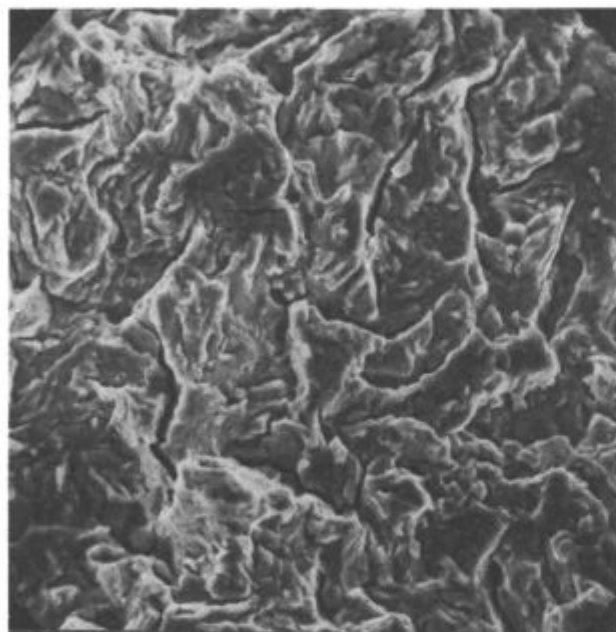


Slika 6
Krivulje permeacije za različne vrste jekel

Fig. 6
Permeation curves for various steel types.

torej takšni, da omogočajo čim manjšo razdaljo med lamelami perlita.

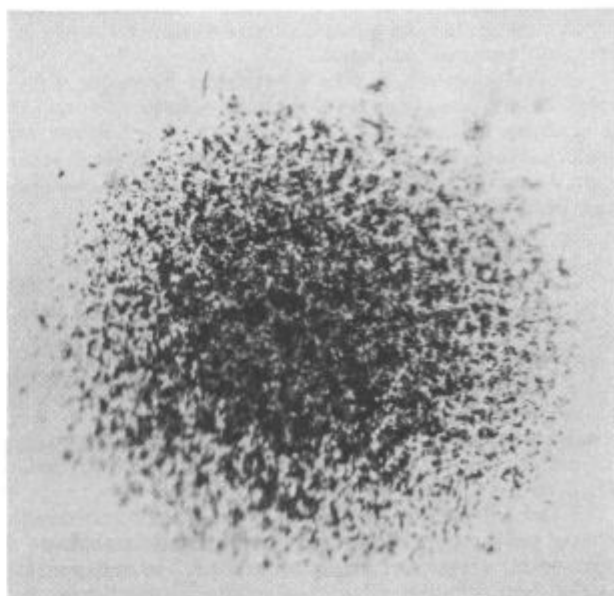
Vsekakor pa meritve permeabilnosti (predvsem začetni del krivulje) ne predstavljajo noben kriterij, ki bi omogočal razlago teorije pasti, kar pomeni, da bi se zaradi rekombinacije absorbiranega atomarnega vodika v molekularnega to moralo manifestirati z znižanjem gostote anodnega toka v anodnem predelu membrane, in sicer za tisti delež, ki ustreza rekombinaciji. Ti deleži pa so tako majhni, da jih ni možno zaslediti na krivulji permeacije, in vendar zadostni, da v visokotrnostnih jeklih in mnogih drugih kovinskih sistemih povzročajo izrazito krhkost, ki je posledica deformacije kristalne rešetke, kopičenja dislokacij v conah, kjer se tvorijo visoki pritiski (nastajanje H_2) in zaradi tvorbe mikro razpok. Te pojave smo zasledili na membranah, ki so bile uporabljene za merjenje permeabilnosti (60-minutna katodna polarizacija), in sicer z rentgenskim merjenjem roba osnovne celice ter z ugotavljanjem mikro razpok (sl. 7) ali celo mehurčkov rekombiniranega vodika (sl. 8).



Slika 7
Mikro razpoke v navodičeni coni

Fig. 7
Microcracks in the hydrogen-pick-up zone.

Manipulacije z naklonskim kotom prezentiranih krivulj tudi ne kažejo nobene zakonitosti v zvezi s teorijo pasti. Začetni del krivulje, v katerem bi se lahko manifestirala rekombinacija na pasteh, kaže v primeru F. Guillaume materiala celo manjšo permeabilnost in manj strm nagib tega dela krivulje, kar daje videz, da se v materialu morda nekaj dogaja (napr. poraba H s tvorbo H_2), vendar pa ne moremo mimo dejstva, da izkazuje ravno ta žica najboljšo odpornost proti vodikovi krhkosti. Iz tega dodatno sledi, da na diagramih permeabilnosti ni možna zaznavna rekombinacija, čeprav ta pojav ni možno izključiti (dokaz sl. 7 in 8 ter deformacija kristalne rešetke). Vprašanje je le, kakšen delež navodičenja se opravlja po enem ali drugem mehanizmu. Najbrž pa je možno trditi, da bo pri prehodu vodika



Slika 8
Plinski mehurčki vodika v navodičeni coni

Fig. 8
Hydrogen pin holes in the hydrogen-pick-up zone.

skozi kovino le-ta izkoristil vse možnosti, ki so mu dane, in deloval s tem, da se bo ujel v pasti in rekombiniral (če so te prisotne), tvoril hidride (če je sistem podvržen takšni tvorbi) ali pa tvoril dekohezijo med atomi kovine (če ga je sistem sploh sposoben absorbirati oz. raztapljati).

Večja odpornost proti vodikovi krhkosti se torej doseže z bolj urejeno strukturo, manj dislokacijami, izločki in nečistočami po kristalnih mejah ali z izbiro takšnih kovinskih sistemov, ki že po naravi kažejo manjšo absorpcijsko sposobnost atomarnega vodika, oziroma ki ne povzročajo pri korozijskem procesu nadnapetosti na elektrodnih površinah.

Končno pa lahko trdimo, da metoda merjenja permeabilnosti omogoča izvrsto detekcijo H^+ ionov tudi v takšnih medijih, ki so sicer bazičnega karakterja. Produkcija teh ionov je možna s specifičnimi, povsem lokalnimi reakcijami na elektrodnih površinah, prekritih z akceleratorji korozije in vodikove krhkosti (sulfidi, cianidi, kloridi, itd.), ki imajo visoko adsorpcijsko sposobnost.

5. ZAKLJUČEK

Rezultati meritev permeabilnosti in iz njih izračunane difuzijske konstante predstavljajo dovolj selektivno osnovo za ugotavljanje odpornosti določenih kovinskih sistemov (tudi visokotrnostnih jekel) proti določenim mehanizmom vodikove krhkosti. Diagrami predvsem dobro sledijo zakonitostim teorije Troiano-Oriani, ki je osnovana na dekohezijskem delovanju absorbiranega atomarnega vodika med atomi železa. Večja ko je torej permeabilnost kovine, večja je možnost navodičenja. Ta zakonitost pa ni uporabna v nekaterih kovinskih sistemih, ki izkazujejo visoko permeabilnost, in vendar so v bolj ali manj neobčutiljivi za pojav vodikove krhkosti.

Iz oblike in nagnjenosti začetnega dela krivulj ni možno dobiti informacije o rekombinaciji atomarnega vodika v molekularni. Dejstvo je, da v visokotrnostnih

jeklih že majhne količine nastalih molekul H_2 povzročajo kopičenje dislokacij (sistem postaja še manj žilav) in nastanek mikro ali makro razpok. Rekombinacija tako majhne količine atomarnega vodika pa ni zaznavna na krivuljah permeacije.

Merjenje permeabilnosti daje možnost zaznave H^+ ionov tudi v medijih bazičnega karakterja, kar je sicer na videz nelogično, pa vendar omogočeno z lokalnim delovanjem akceleratorjev korozije in vodikove krhkosti na elektrodnih površinah. Tako ta metoda dodatno nudi spoznavanje različnih vrst medijev in nagnjenost teh za tvorbo vodikove krhkosti.

Literatura

1. L. I. Antropov: Teoretiška elektrohemija — Moskva 1975, str. 428—449
2. A. Despič: Osnovi elektrohemije, Naučna knjiga — Beograd, 1970, 301—315
3. N. P. Žuk: Kurs teoriji koroziji i zaštiti metalov, Moskva 1976, str. 248—264
4. A. Kawashima: Corrosion V. 32, No 8, 1976, str. 321—331
5. B. E. Wilde in C. D. Kim: Corrosin Vol 37, No. 8, leto 1981, str. 449—455
6. M. R. Louthan, G. R. Caskey, J. A. Donovan: Mat Sci. And Eng. 10, leto 1972, str. 357—361
7. A. W. Thompson: Effect of Hydrogen on Behaviour of Materials, A. I. M. E., New York, Izdala A. W. Thompson in I. M. Bernstein, leto 1976, str. 309
8. J. Vokl, G. Alefeld: Difusion in Solids — Recent Developments, Academic Press, New York, izdala A. S. Nowick in J. J. Burton, leto 1975, str. 272
9. G. Matusiewicz: R. Booker, J. Keiser, H. K. Birnbaum: Scripta Met. 8, leto 1974, str. 1419
10. A. J. Kumnick, H. H. Johnson; Met. Trans. 5, leto 1974, str. 1199
11. A. J. Kumnick, H. H. Johnson; Met. Trans. 6 A, leto 1975, str. 1087
12. G. M. Pressouyre, I. M. Bernstein: Met. Trans. 12 A, leto 1981, str. 835—844
13. G. M. Pressouyre, I. M. Bernstein: Acta Met. 27, leto 1979, str. 89—100
14. M. A. V. Devanathan, Z. Stachurski: Proceedings of the Royal Soc., Ser. A., 1962, Vol. 270, No. 1340, str. 90—10
15. Vehovar Leopold: Študij napetostne korozije visokotrdnostne armature za prednapeti beton — IV. del, Ljubljana 1983, Raziskovalna skupnost Slovenije

ZUSAMMENFASSUNG

Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen und daraus errechnete Diffusionskonstanten stellen ein genügend selektives Grund für die Festlegung der Widerstandsfähigkeit bestimmter Metallsysteme (auch hochfester Stähle) gegen bestimmte Mechanismen der Wasserstoffsprödigkeit dar. Die Diagramme folgen sehr gut der Gesetzmässigkeit der Theorie Troiano-Oriani die auf der Dekohesionswirkung des absorbierten atomaren Wasserstoff zwischen den Eisenatomen basiert. Je grösser, die Permeabilität des Metalles ist desto grösser ist die Möglichkeit der Wasserstoffaufnahme. Diese Gesetzmässigkeit ist aber nicht anwendbar in einigen Metallsystemen die eine hohe Permeabilität aufweisen und sind doch in grösserem oder kleinerem Ausmass für die Wasserstoffsprödigkeit unempfindlich.

Aus der Form und der Neigung des Anfangsteiles der Kurven kann kein Schluss über die Rekombination des atomaren

Wasserstoffes in den molekularen gemacht werden. Die Tatsache ist es, dass in den Hochfesten Stählen schon kleine Mengen entstehender Molekülen H_2 , die Anhäufungen der Dislokationen verursachen (System wird weniger Zäh) und so die Entstehung der Mikro und Makrorisse. Die Rekombination solcher kleiner Mengen des atomaren Wasserstoffes wird an den Permeationskurven nicht wahrnehmbar.

Durch die Permeabilitätsmessungen ist es möglich H^+ Ionen auch in Medien basischen Charakters wahrzunehmen, was dem Scheine nach zwar nicht logisch ist jedoch aber durch die lokale Wirkung der Akzeleratoren der Korrosion und der Wasserstoffsprödigkeit an Elektrodenoberflächen möglich. So bietet diese Methode zusätzlich die Erkennung verschiedener Sorten der Medien und die Neigung dieser für die Bildung der Wasserstoffsprödigkeit dar.

SUMMARY

Permeability measurements and thus calculated diffusion constants represent an enough selective basis for determining the resistivity of single metallic systems (also high-strength steel) to certain mechanisms of hydrogen embrittlement. The diagrams quite well follow the laws of the Troiano-Oriani theory which is based on the decohesion effect of atomic hydrogen between the iron atoms. The higher is the permeability of metal the higher is the possibility of hydrogen pick-up. This law is not applicable in some metallic systems in which exists high permeability but they are more or less insensitive to the hydrogen embrittlement.

From the shape and the inclination of the initial section of curves the information on recombining the atomic hydrogen

into a molecular one cannot be obtained. The fact is that already a small amount of formed H_2 molecules causes the piling of dislocations in high-strength steel (the system becomes even less tough), and thus the formation of micro- and macro-cracks. The recombination of such a small amount of atomic hydrogen cannot be detected on the permeation curves.

Permeability measurements gives the possibility to detect H^+ ions also in basic media which apparently seems unlogic but occurs due to the local action of corrosion accelerators and hydrogen embrittlement on electrode surfaces. Thus this method additionally gives the knowledge on various media and their susceptibility to the hydrogen embrittlement.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерения проницаемости и из них вычисленные коэффициенты диффузий представляют собой достаточно селективное основание для определения сопротивления определенных металлических систем (также стали высокой прочности) на определенные механизмы водородной хрупкости. Диаграммы, главным образом, хорошо следят закономерностям теории Troiano-Oriani, которая основана на декогезийском действии абсорбированного водорода между атомами железа. Значит, чем больше проницаемость металла, тем больше водородная связь. Эта закономерность не применима при некоторых металлических системах, которые оказывают высокую проницаемость, хотя они в большей или меньшей части чувствительны на появления водородной хрупкости.

Из формы и наклона начальной части кривой нет возможности получить сведения о рекомбинации атомарного водорода в молекулярный водород. Факт в том, что в сталях высокой прочности уже незначительные количества образованных молекул водорода причина скопления дислокаций (система становится менее вязкая) и появления микро и макро трещин. Рекомбинация такого незначительного количества атомарного водорода не отмечается на кривых проницаемости.

Измерение проницаемости дает возможность наблюдению H^+ ионов также в средах основного характера, что правда на вид нелогично, но дает возможность с локальным действием ускорителей коррозии и водородной хрупкости на поверхностях электродов. Таким образом этот метод дает научный вывод разных видов сред и их наклонов для образования водородной хрупкости.

Izbira konstrukcijskih jekel in njihovih toplotnih obdelav za najustreznejšo žilavost

UDK: 620.178.746.22:669.15-194.2
ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64

Franc Uranc

Do zdaj smo poznali popuščne diagrame, ki kažejo trdoto ali žilavost jekel po popuščanju pri različnih temperaturah. Ker je žilavost vse pomembnejša konstrukcijska postavka, je dobro poznati njen odnos s trdoto.

UVOD

Pogosto zahtevajo obremenitve strojnih delov zelo žilava jekla, ki so tudi zadosti trdna in trda.

Na osnovi popuščnih diagramov moremo izdelati diagrame, s katerih se vidi, kakšno žilavost ima jeklo določene trdote po dani toplotni obdelavi.

Navadno sklepamo na žilavost jekla po vsebnosti ogljika v njem, zato skušamo odkriti, ali moramo pri takem sklepanju pričakovati kakšne, do zdaj neznane nerednosti.

Preiskovali smo poboljšana jekla, ki so bila izdelana po klasičnih talilnih postopkih.

1. ODNOS TRDOTE IN ŽILAVOSTI

Žilavost jekel je pomembna lastnost dinamično obremenjenih konstrukcijskih delov.

Jekla za poboljšanje delimo po njihovi uporabnosti v udarni uporabi. Najslabše se obnesejo nelegirana jekla, najboljše najvišje legirana konstrukcijska jekla.

Za izdelovanje tistih strojnih delov, ki so le šibko ali srednje močno, statično in dinamično obremenjeni, vzamemo jekla, ki so legirana le s kromom (Č 4130 — VC 130, Č 4731 — VC 140), ali jekla, legirana le z manganom (Č 3130 — VM 100, Č 3135 — 28 Mn6).

Če je potrebna malo večja žilavost izdelka, ga naredimo iz katerega od jekel, ki vsebujejo sicer malo manjši odstotek ogljika, toda oplemenitena so z dodatkom molibdena (Č 4730 — VCMO 125, Č 4731 — VCMO 135, Č 4732 — VCMO 140, Č 4733 — VCMO 150).

Ker so nižjeogljikna in ker molibden preprečuje popuščno krhkost, so ta jekla skoraj v vsem območju trdot bolj žilava od jekel, legiranih le s kromom. Jekla s kromom in molibdenom so primerna tudi za izdelavo konstrukcijskih delov, ki imajo večje prezeze.

Za posebno močno obremenjene dele so uporabna le jekla, ki so legirana dodatno še z nikljem (Č 5430 — VCMO 100, Č 5431 — VCNMO 150, Č 5432 — VCNMO 200) ali manganom in vanadijem (Č 4830 — VCV 150), ali nikljem in vanadijem (Č 5480, Č 5481), ali kar s povišano vsebnostjo kroma ter dodatkom molibdena in vanadija.

V razpredelnih priložnostih so napisane poleg trdnosti ali trdot tudi približne žilavosti posameznih jekel, tako da se lahko odločimo za najugodnejše. Vedno pa nimamo na voljo najustreznejšega jekla in tedaj bi nam

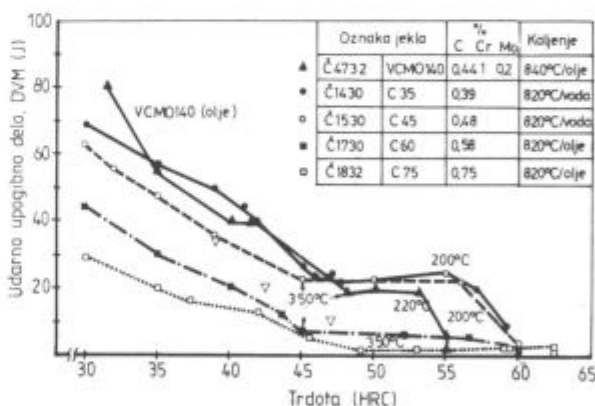
prav prišli primerjalni diagrame trdot in žilavosti različnih jekel.

Kot lahko vidimo po navedenih diagramih, so tudi nižje legirana jekla po določeni obdelavi tako glede trdote kot tudi žilavosti povsem enakopravna dražjim jeklom z večjo vsebnostjo legiranih elementov.

Te diagrame smo dobili tako, da smo popuščne diagrame predelali v diagrame trdota — žilavost. Podatke sorodnih jekel smo vrisali v skupen diagram in tako dobili nekaj diagramov, prikazanih na slikah 1—6.

Debelina vseh preizkušancev je bila med toplotno obdelavo 25—30 mm. Vsaka slika kaže trdoto in žilavost primerjanih jekel. V diagramih so podane vsebnosti legiranih elementov posameznih preizkušanih talin, enako pa tudi pogoji avstenitizacije in kaljenja.

Da bi mogli žilavosti teh posameznih jekel primerjati z žilavostmi drugih jekel in skupin jekel, prikazanih na drugih diagramih, je v vseh vnesena krivulja žilavosti jekla Č 4732 — VCMO 140. To jeklo je po žilavosti nekoliko povprečno dobro jeklo, zato se zdi dobro za primerjavo vseh jekel.



Slika 1
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah do 600° C oziroma 650° C (jeklo Č 1730 — C 60)

Fig. 1
Toughness and hardness of steel tempered up to 600° C or 650° C (steel Č 1730 — C 60).

Slika 1 podaja poleg primerjalne krivulje, t. j. žilavosti jekla Č 4732 — VCMO 140, žilavosti nelegiranih jekel. Primerjalni krivulji zelo blizu je krivulja žilavosti jekla Č 1430 — C 35. Jeklo Č 4732 — VCMO 140 vsebuje 0,44 % C, jeklo Č 1430 — C 35 pa 0,39 % C.

Žilavost jekla Č 4732 — VCMO 140 pa prikazujejo tudi točke v obliki obrnjenih trikotnikov.

Te točke pomenijo žilavost taline, ki je imela najmanjšo dopustno (za Č 4732 — VC MO 140) vsebnost ogljika (0,37 % C).

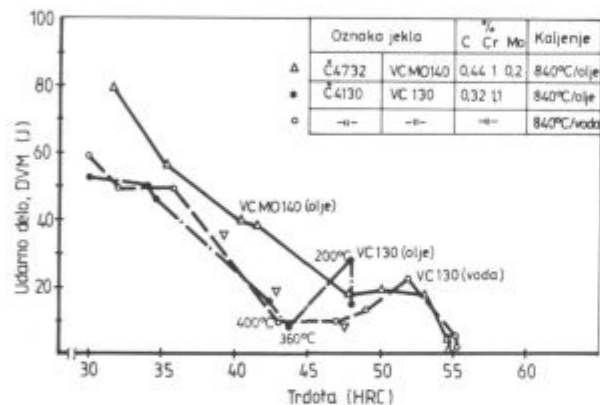
Vistem območju trdot, kjer ni vrisanih teh točk, je žilavost obeh talin jekla Č 4732 — VC MO 140 enaka.

Jeklo Č 4732 — VC MO 140 s trdoto nad 47 HRC je manj žilavo od enako trdih nelegiranih jekel Č 1430 — C 35 in Č 1530 — C 45. Ob trdotah pod 47 HRC (oziroma pod 39 HRC pri talini Č 4732 — VC MO 140 z najnižjo dopustno vsebnostjo ogljika) je legirano jeklo bolj žilavo kot Č 1530 — C 45.

To pomeni, da je tedaj, ko nimamo opraviti z zelo debelimi izdelki trdot nad 47 HRC (natezna trdnost 1500 N/mm²), bolj smiselno uporabiti Č 1530 — C 45 kot Č 4732 — VC MO 140.

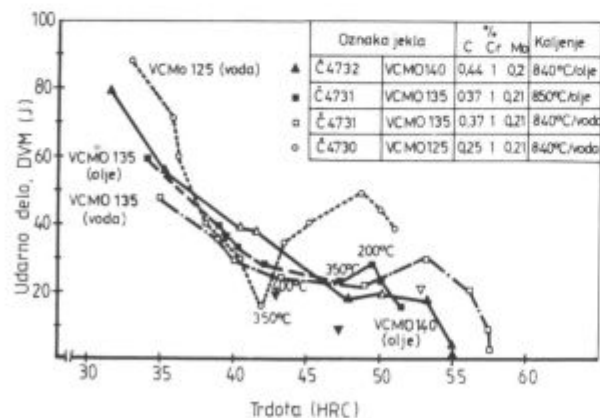
Spodnji krivulji kažeta žilavost jekel z višjo vsebnostjo ogljika. Trdoto 63,5 HRC doseže le jeklo Č 1832 — C 75.

Slika 2 kaže primerjavo žilavosti in trdot preizkušancev jekel Č 4130 — VC 130 in Č 4732 — VC MO 140. V olju kaljeni preizkušanci trdote 48 HRC so nekoliko bolj žilavi kot enako trdi preizkušanci, ki so bili kaljeni v vodi. Žilavost obojih je malo manjša kot



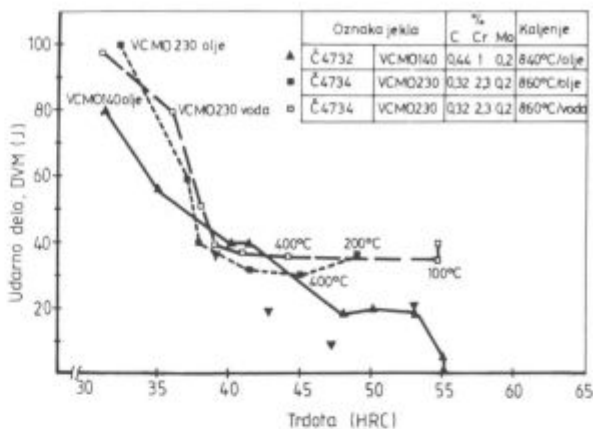
Slika 2
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah do 600° C

Fig. 2
Toughness and hardness of steel tempered up to 600° C.



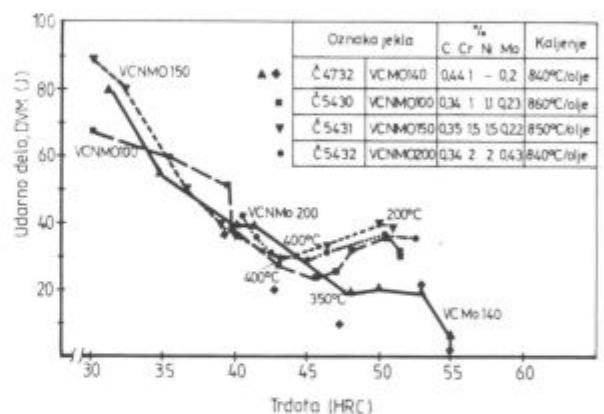
Slika 3
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah do 550° C oziroma 600° C (Č 4732 — VC MO 140)

Fig. 3
Toughness and hardness of steel tempered up to 550° C or 600° C (steel Č 4732 — VC MO 140).



Slika 4
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah do 600° C (Č 4732) ali do 650° C (Č 4734)

Fig. 4
Toughness and hardness of steel tempered up to 600° C or 650° C (Č 4734).



Slika 5
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah do 550° C (Č 5432), do 600° C (Č 5430, Č 4732) ali do 650° C (Č 5431)

Fig. 5
Toughness and hardness of steel tempered up to 550° C (Č 5432), 600° C (Č 5430, Č 4732), or 650° C (Č 5431).

žilavost nižjeogljicne taline (obrnjeni trikotniki) primerjalnega jekla Č 4732 — VC MO 140.

Žilavost obeh jekel, popušanih na trdoto nad 50 HRC, je približno enaka, pri trdotah pod 45 HRC pa je razlika zelo velika.

S slike 3 vidimo žilavost jekel Č 4731 — VC MO 135 in Č 4730 — VC MO 125 v primerjavi z žilavostjo primerjalnega jekla.

Če so trdote preizkušancev nad 48 HRC, so tisti iz jekla Č 4731 — VC MO 135 precej bolj žilavi kot tisti iz primerjalnega jekla. Preizkušanci jekla Č 4731 — VC MO 135 trdote 53 HRC so za 50 % bolj žilavi kot enako trdi preizkušanci iz primerjalnega jekla, če pa so oboji 55 HRC, je razlika v dobro Č 4731 — VC MO 135 celo štirikratna.

Trši kot 55 HRC so lahko le preizkušanci jekla Č 4731 — VC MO 135, ker so kaljeni v vodi, medtem ko so preizkušanci primerjalnega jekla kaljeni v olju.

Jeklo Č 4730 — VC MO 125 je še veliko bolj žilavo kot jeklo Č 4731 — VC MO 135, in sicer za okoli 80—90 %, če so preizkušanci mehkejši od 35 HRC. To

jeklo pa je tudi najbolj krhko, če je toplotno obdelano na trdoto 42 HRC (popuščeno na 350°C). Podatki veljajo za preizkušance, ki so bili kaljeni v vodi. Razlika med žilavostma preizkušancev, kaljenih v vodi ali v olju, ni videti velika — pri jeklih Č 4731 — VCMO 135. Od jekla Č 4732 — VCMO 140 (kaljen v vodi) je jeklo Č 4730 — VCMO 125 za 100 % (ob trdoti obeh jekel nad 45 HRC) oz. za 40 % (ob trdotah pod 35 HRC) bolj žilavo.

Slika 4 kaže žilavost preizkušancev jekla Č 4734 — VCMO 230, kaljenih bodisi v olju bodisi v vodi.

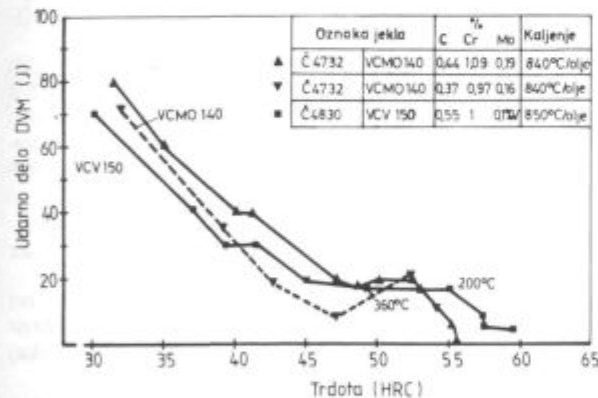
Ob trdotah pod 47 HRC so preizkušanci tega jekla za 80 % bolj žilavi kot preizkušanci iz primerjalnega jekla. Preizkušanci trdot pod 35 HRC so celo bolj žilavi kot jeklo Č 4730 — VCMO 125. Posebna prednost tega jekla pred manj legiranimi je doseganje velike žilavosti (35 do 40 J) ob trdoti 55 HRC.

Jeklo Č 4731 — VCMO 135 dosega ob taki trdoti komaj 25 J žilavosti, jeklo Č 4732 — VCMO 140 pa le 5 J!

Slika 5: Žilavost Cr-Ni jekel Č 5430 — VCNMO 100, Č 5431 — VCNMO 150, Č 5432 — VCNMO 200 je pri majhnih trdotah pod 40 HRC le malenkost večja kot žilavost primerjalnega jekla (razlika nasproti Č 4734 — VCMO 230). Druga razlika med obema je v tem, da Cr-Ni jekla ne dosegajo trdote nad 51—52,5 HRC (odvisno od stopnje legiranja). Podobni pa sta žilavost te skupine grupe jekel in žilavost jekla Č 4734 — VCMO 230 pri trdotah nad 47 HRC.

Primerjava diagramov žilavost — trdota tudi pokaže, da se z zviševanjem legirne vsebnosti ne povečuje le žilavost najbolj krhkih preizkušancev.

Nobeno jeklo pa ne doseže žilavosti tiste, bolj žilave, taline Č 4732 — VCMO 140, kadar sta obe jekli popuščeni v območju popuščne krhkosti.



Slika 6

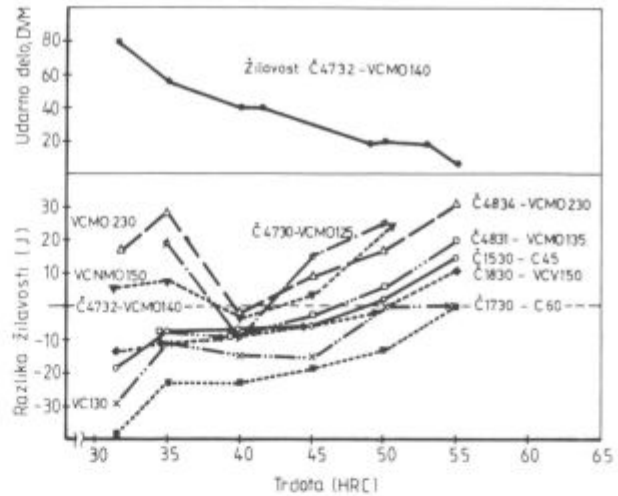
Žilavost in trdota jekel po popuščanju pri temperaturah 600°C (Č 4732 — VCMO 140) ali 650°C (Č 4830 — VCV 150)

Fig. 6

Toughness and hardness of steel tempered up to 600°C (Č 4732 — VCMO 140) or 650°C (Č 4830 — VCV 150).

Slika 6 prikazuje žilavost primerjalnega jekla in jekla Č 4830 — VCV 150. Šele pri trdotah nad 53 HRC je Č 4830 — VCV 150 bolj žilavo — to pa tudi ni težko, ker je primerjalno mehkejšo od 56 HRC.

S slike 7 se vidi odnos med žilavostmi različnih jekel kot razlika žilavosti teh jekel ter žilavosti jekla Č 4732 — VCMO 140. Preizkušanci trdote pod 40 HRC so najbolj žilavi, če so iz jekla Č 4734 — VCMO 230. Med tršimi so najbolj žilavi iz jekel Č 4730 — VCMO 125, Č 5431 — VCNMO 150 in Č 4734 — VCMO 230.



Slika 7

Žilavost jekla Č 4732 — VCMO 140 ter razlike med žilavostmi drugih jekel in jekla Č 4732 — VCMO 140, kadar sta trdoti obeh enaki

Fig. 7

Toughness of Č 4732—VCMO 140 steel and comparison with the toughness of other steel when hardnesses are the same.

2. NEVARNOST POPUŠČNE KRHKOSTI

Žilavost nelegiranih jekel se po popuščanju na srednje visoko trdoto močno razlikuje.

Jeklo Č 1430 — C 35 je desetkrat bolj žilavo kot enako trdo (55 HRC) jeklo Č 1830 — OC 70. Če pa popuščamo jekli na trdoto 35 HRC ali 59 HRC, je razlika le še trikratna. Takšni odnosi nam navadno ne hasnejo, toda včasih se le obnese tudi jeklo Č 1430 — C 35 obdelati na najvišje dosegljivo trdoto ali pa visokoogljično jeklo na majhno trdoto. Tak premislek je dobro upoštevati, kadar potrebujemo obrabno obstojne dele, obstojne tudi proti udarcem.

Jeklo, legirano le s kromom, je nekoliko bolj ali približno tako žilavo kot primerjalno jeklo Č 4732 — VCMO 140, če je popuščeno pri temperaturi pod 200°C (trdote 48 HRC). Višje popuščeno kromovo jeklo je močno popuščno krhko. Preizkušanci, ki so bili kaljeni v vodi, so krhki do višje popuščne temperature (400°C) kot tisti, kaljeni v olju (360°C). Ker pa so po kaljenju trdote ustrezno različne, je trdota obojih preizkušancev pri temperaturi, ki že malo zmanjša krhkost, enaka. Prav tako imata pri tej temperaturi obe vrsti preizkušancev tudi enako žilavost.

Ko imamo jeklo legirano s kromom in molibdenom, se popuščna krhkost izgublja že s popuščanjem nad 250°C (po kaljenju v vodi). Žilavost tudi v kratkem območju krhkosti ne pade pod 20 J (DVM), razen pri jeklu Č 4730 — VCMO 125 in nizkoogljični talini jekla Č 4732 — VCMO 140.

Tako lahko domnevamo, da so nižjeogljična jekla z vsebnostjo 1 % Cr in 0,2 % Mo bolj podvržena popuščni krhkosti kot višjeogljična. Jeklo z 2,3 % Cr (Č 4734 — VCMO 230) je navkljub razmeroma majhni vsebnosti ogljika (0,32 %) tudi v območju popuščne krhkosti zelo žilavo, saj po kaljenju v vodi (ko je bolj žilavo kot po kaljenju v olju) žilavost sploh ne pade pod 35 J. Poprava žilavosti pa se vendar ne začne, preden ne popuščamo na 400°C. To je razumljivo, saj je zadelj precejšnje vsebnosti kroma zadržani avstenit popuščno obstojnejši kot v jeklih z 1 % Cr. Jekla z 0,35 % C, 1 % Cr, 1 % Ni in

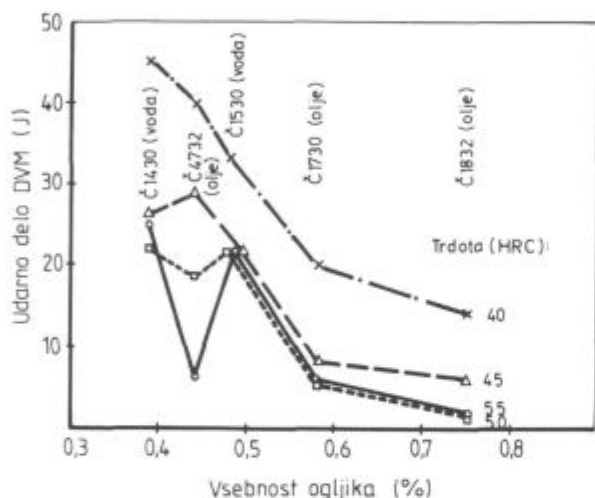
0,2 % Mo so popuščno krhkejša, toda odpravljati se ta krhkost začne že s popuščanjem pri 350°C.

Jekli z višjo vsebnostjo (1,5—2 %) kroma in niklja (1,5—2 %) sta podobni jeklu z 2,3 % Cr in 0,2 % Mo. Žilavost jima ne pade pod 30 J. Pri 55 HRC je žilavost 40 J.

3. VPLIV LEGIRANJA NA ŽILAVOST

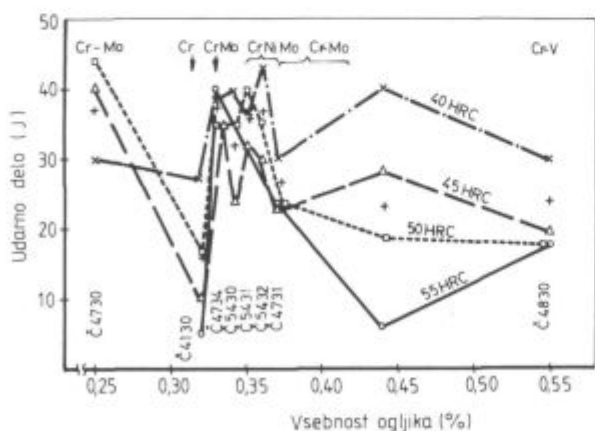
Radi bi poznali žilavost najtrdnejših jekel.

Sliki 8 in 9 omogočata primerjavo širin žilavostnih območij in porazdelitve žilavostnih vrednosti znotraj teh območij za vsa preizkušena jekla. Na abscisi je nanesena vsebnost ogljika. Takšna osnova razvrstitve je utemeljena z dejstvom, kot je prevladujoči vpliv vsebnosti ogljika na trdoto in opredelitvijo preizkušane območja žilavosti z opredelitvijo območja trdote.



Slika 8
Primerjava žilavosti nelegiranih jekel, razvrščenih po vsebnosti ogljika

Fig. 8
Comparison of toughnesses of unalloyed steel, arranged according to the carbon content.



Slika 9
Primerjava žilavosti legiranih jekel, razvrščenih po vsebnosti ogljika

Fig. 9
Comparison of toughnesses of alloyed steel, arranged according to the carbon content.

Iz prejšnjih diagramov smo prebrali žilavostne vrednosti, ustrezajoče trdotam 40, 45, 50 in 55 HRC, ter tako dobili žilavost preizkušanih jekel z natezno trdnostjo med 1250 in 2000 N/mm².

Slika 8 prodaja za posamezna nelegirana jekla in primerjalno jeklo Č 4732 — VCMO 140 (0,44 % C) območje in višino območja žilavosti preizkušancev, ki so toplotno obdelani na trdoto med 40 in 55 HRC. Če pogledamo najprej le višino žilavosti nelegiranih jekel, vidimo, da se z zmanjševanjem vsebnosti ogljika od 0,77 do 0,58 % C žilavost le počasi povečuje pri vzorcih vseh upoštevanih trdot. Če pa jemljemo jekla z manjšo vsebnostjo ogljika, se strmo povečuje žilavost tistih preizkušancev, ki imajo trdoto 40 HRC, oz. preizkušancev trdot 45 in 55 HRC ter vsebnostjo ogljika pod 0,58% in nad 0,48%. Manjša je zahtevana trdota, nižji je %C, do katerega se s popuščanjem dviga žilavost nelegiranih jekel. Preizkušanci trdot 50—55 HRC so po žilavosti precej podobni, če vsebuje jeklo nad 0,58 % C.

Zelo dobro žilavi sta ob veliki trdoti 55 HRC jekli, ki vsebujeta 0,39 ali 0,48 % C. Preizkušanci jekla Č 1832 — C 75 so veliko bolj žilavi, če so popuščeni na trdoto 45 HRC, kot če so na 50 ali 55 HRC. Razlika je 300 %.

Z zmanjševanjem trdote se žilavost nelegiranih jekel nesorazmerno močno povečuje. Če smo zadovoljni s trdoto (površinsko) 40 HRC, je jeklo Č 1430 veliko uporabnejše kot vsa druga višjeogljikna jekla, ker je bolj žilavo. Med žilavostjo izdelkov iz Č 1430 — C 35 in izdelkov iz Č 1530 — C 45 pa ni več kot 10—20 % razlike, če je trdota teh izdelkov med 45 in 55 HRC.

Točke, ki podajajo žilavost jekla z vsebnostjo ogljika 0,44%, predstavljajo jeklo Č 4732 — VCMO 140. Zelo izrazita je enakomernost poteka žilavosti v vsem območju trdot. V diagramu žilavost — trdota dobimo premico. Strmina krivulje žilavost — trdota je konstantna pri tem jeklu v tem območju trdot, doseženih s kaljenjem v olju in s popuščanjem do 480° C. Koefficient strmine je —2 J/HRC.

Seveda je tak količnik nasilje nad resnično krivuljo — podano kot primerjalno krivuljo na slikah 1—6. Ne upošteva posebno izrazitega dviga žilavosti po odpravi notranjih napetosti. Ne zajame izrazitega padca žilavosti po popuščanju v območju, ki povzroča močno škodljivo učinkovanje fosforja in dušika na žilavost.

Slika 9 daje precej bolj zapleteno podobo odnosa žilavost — trdota. Le jeklo Č 4732 — VCMO 140 kaže premo soodvisnost.

Jekla, legirana z nikljem, so prikazana na abscisi od 0,34—0,36 % C, čeprav imata kar dve enaki vsebnosti ogljika. Za preglednost si je bilo treba izbojevati nekaj prostora navzgor ob abscisi.

Primerjava jekel, legiranih s Cr in Mo pokaže jeklo Č 4731 — VCMO 135 v ugodnejši luči kot jeklo Č 4732 — VCMO 140, če sta obe trdi 55 HRC ali 50 HRC. Razmerje med žilavostma preizkušancev trdote 55 HRC je celo trikratno.

Jeklo Č 4734 — VCMO 230 je veliko bolj žilavo kot Č 4731 — VCMO 135 in s trdoto 55 HRC do 40 HRC enako žilavo kot jeklo Č 4732 — VCMO 140, ki je popuščeno na trdoto 40 HRC. Če je trdota 45 ali 50 HRC, je žilavost 35 J, kar je še zmerom za 10 J več, kot premore enako trdo jeklo Č 4731 — VCMO 135.

Posebno lepo žilavost ob visoki trdoti pokaže jeklo z najmanjšo možno vsebnostjo ogljika, če je popuščeno na trdoto 45 ali 50 HRC. Žilavost dosega celo 44 J. Omejena pa je uporabnost tega jekla Č 4730 — VCMO 125 s trdoto 50 HRC (največ 1700 N/mm²).

Jeklo, legirano samo s kromom, je zelo krhko, navkljub majhni vsebnosti ogljika. Po žilavosti je podobno

jeklu Č 1730 — C 60, razen kadar je popuščeno na najmanjšo od preiskovanih trdot ali na 50 HRC, ko dosega žilavost 17 J.

Žilavost jekla Č 4830 — VCV 150, legiranega s kromom in vanadijem, je po popuščanju na 40 HRC enaka žilavosti enako trdega Č 4731 — VCMO 135.

Trši preizkušanci (45–55 HRC) jekla Č 4830 — VCV 150 pa so malo manj žilavi od tega primerjalnega jekla. Prvi imajo 18 J, drugi 24 J.

Jekla, legirana s Cr, Ni, Mo, so po žilavosti enaka jeklu Č 4732 — VCMO 230, ne dosegajo pa trdote 55 HRC.

Jekli Č 5430 — VCNMO 100 in Č 5432 — VCNMO 200, trdote 50 HRC, sta enako žilavi kot enako trdo Č 4734 — VCMO 230 (35 J).

4. SKLEP

Za osnovo primerjave žilavosti jekel smo vzeli žilavost jekla Č 4732 — VCMO 140 (0,44 % C, 1 % Cr, 0,2 % Mo).

Nelegirano jeklo Č 1430 — C 35 je za 10–15 J bolj žilavo od jekla Č 1530 — C 45, če imata trdoto pod 45 HRC. S trdotami 45–55 HRC sta enako žilavi, t.j. za 20 % (do 53 HRC) bolj žilavi od Č 4730 — VCMO 140.

Pod 47 HRC sta Č 1430 — C 35 in primerjalno jeklo enako žilavi.

Jeklo Č 4731 — VCMO 135 je podobne žilavosti kot Č 1430 — C 35. Medtem, ko je za izdelke trdot do 45 HRC zelo primerno jeklo Č 1430 — C 35, je za trdote 45 do 50 HRC najboljše jeklo Č 4730 — VCMO 125, saj je ob trdoti 46 HRC dvainpolkrat bolj žilavo od primerjalnega jekla.

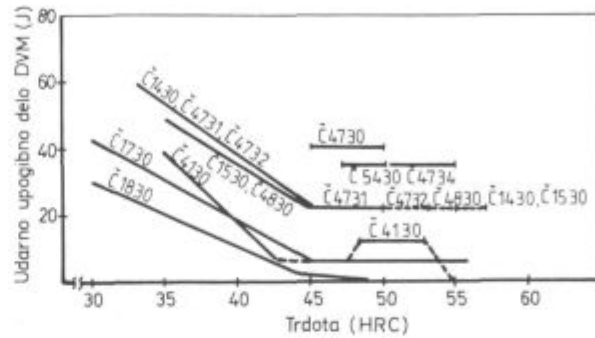
Če želimo veliko žilavost ob trdoti nad 50 HRC, vzamemo jeklo Č 4734 — VCMO 230. Cr-Ni-Mo jekla so najprimernejša za izdelke trdot 47–50 HRC, seveda pa jih uporabljamo predvsem za izdelke velikih prerezov.

Jeklo Č 4830 — VCV 150 je le do trdote 40 HRC enako žilavo kot Č 4731 — VCMO 135 ali Č 1430 — C 35.

Nelegiranemu jeklu Č 1730 — C 60 je podobno Č 4130 — VC 130, ki je šele nad 51 HRC bolj žilavo od primerjalnega jekla.

Za kalilca je pomembno, da se izogne popuščanju pri temperaturi popuščne krhkosti, zato naj popušča pod 260° C za trdoto nad 45 HRC in nad 400° C za trdoto pod 45 HRC.

Če želimo, da bo jeklo Č 1830 C 70 žilavo, ga ne popuščamo pod 400° C.



Slika 10
Zgornje območje žilavosti jekel, ki so izdelana v elektroobločni peči, kovana in nato poboljšana na različne trdote

Fig. 10
Upper region of steel toughness made in electric arc furnace, forged and after it quenched and tempered to various hardnesses.

Sl. 10 kaže največje trdote in žilavosti, ki jih dosega jo klasično izdelana jekla. Vpliv vsebnosti ogljika na žilavost je velik. V splošnem velja, da ima jeklo z manj kot 0,55 % C žilavost nad 20 J tudi ob trdoti 55 HRC. Izjema so le jekla, ki vsebujejo 0,4–0,45 % C, in jekla, ki so legirana le s kromom in ogljkom. Takšna jekla imajo ob trdoti 55 HRC le 5 J žilavosti.

Zahvala: Za podatke o žilavosti in trdoti gre zahvala Ivanu Krančanu in drugim sodelavcem v Metalurškem laboratoriju Železarne Ravne.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Vergleich der Stähle nach deren Härte und Zähigkeit zeigt, dass für die Erzielung der Härte bis 40 HRC Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,35–0,40 % bestgeeignet sind. Bei der Härte von 45–50 HRC zeichnet sich der Stahl Č 4730 mit der besten Zähigkeit aus, um einen Teil weniger Zähigkeit die Cr-Ni-Mo Stähle die eine gleiche Zähigkeit aufweisen als der Stahl Č 4734. Dieser Stahl erreicht neben der Zähigkeit von 35 J eine Härte von 50–55 HRC. Im Bereich der Härte 45–57 HRC sind von der niedrigsten bis zu der höchsten Här-

te der Reihe nach am besten anzuwenden Č 4731, Č 4732, Č 4830, Č 1430 und Č 1530.

Der Chromstahl erreicht bei 47–53 HRC eine Zähigkeit von kaum 12 J, hochkohlenstoffhaltige Stähle noch weniger.

Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0,55 % erreichen allgemein eine Zähigkeit über 20 J bei einer Härte von 55 HRC. Ausnahmen sind nur Chromstähle und alle Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,40–0,45 % C.

SUMMARY

Comparing steel according to its hardness and toughness shows that products which demand hardnesses up to 40 HRC are the most suitably made of steel with 0.35 to 0.4 % carbon.

The most tough steel having the hardness 45 to 50 HRC is Č 4730, followed by Cr-Ni-Mo steel having the same hardness as Č 4734. The hardness of this steel is 50 to 55 HRC at the toughness 35 J. In the hardness region 45 to 57 HRC the most

aplicable steel — given here from lower to higher hardnesses — are Č 4731, Č 4732, Č 1430, and Č 1530.

Chromium steel reaches the toughness of only 12 J at 47 to 53 HRC, and high-carbon steel even less.

Steel with less than 0.55 % C can normally and generally reach toughness over 20 J at the hardness of 55 HRC. Exceptions are only chromium steel and the steel with 0.40 to 0.45 % C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение сталей на основании их твёрдости и вязкости показывает, что изделия твёрдости до 40 единиц по Роквеллу (HR) более всего отвечают стали с содержанием 0,35—0,4 % углерода. При твёрдости 45—50 HR самая вязкая сталь марки Č. 4730, немного меньше чем стали марок Cr-Ni-Mo, которых вязкость одинакова стали марки Č. 4734. Эта сталь достигает при вязкости 35 дж твёрдость 50—55 HR. В области твёрдостей 45—57 HR находятся в употреблении последовательный твёрдости от меньшей до более высокой — стали Č4731, Č4732, Č4830, Č1430 и Č1530.

Хромистая сталь достигает при твёрдости 47—53 HR вязкость едва 12 дж, а высокоуглеродистые стали даже ещё меньше.

Стали с содержанием менее чем 0,55 % C могут нормально и в общем достигнуть вязкость свыше 20 дж при твёрдости 55 HR. Исключение представляют только хромистые стали и все прочие стали с содержанием 0,40—0,45 % углерода.

Ocena stanja in analiza razvoja uporabe procesnega računalništva v Slovenskih železarnah

UDK: 519.68:681.3.06:669.187
ASM/SLA: U4k, D5, D8, D9, X14k, 1-52

Koroušič, B., J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Brudar, T. Kolenko, M. Kranjc

Podana je ocena stanja in analiza dosedanjega razvoja uporabe procesnega računalništva na področju krmiljenja proizvodnje, procesov in raziskav v Slovenskih železarnah.

Opisan je potek razvoja uporabe računalnika v posameznih organizacijah ter podane osnovne značilnosti opreme in uporabne aplikacije na področju kontrole kakovosti, krmiljenja, proizvodnje, aplikativnih raziskav in v izobraževalnem procesu.

UVOD

Komisija za računalniško podprto vodenje procesov in proizvodnje pri Slovenskih železarnah je sklenila, da na osnovi razpoložljivih informacij pripravi skupno poročilo o sedanjem stanju in aktivnostih skupin, ki delujejo na področju krmiljenja proizvodnje, procesov in raziskav v Slovenskih železarnah.

V nadaljevanju bo podan oris dosedanjega razvoja, današnje stanje in nadaljnje usmeritve uporabe procesnih računalnikov pri vodenju proizvodnje, krmiljenju tehnoloških procesov, pri razvoju in raziskovalni dejavnosti ter v izobraževalnem procesu.

Čeprav vsa omenjena področja niso enakomerno zastopana, komisija meni, da je potrebno vztrajati na širšem konceptu zaradi vidnih ekonomskih in kakovostnih učinkov, ki jih prinaša uporaba procesnih in operativnih računalnikov, in zaradi boljše obveščenosti širšega kroga uporabnikov v Slovenskih železarnah.

KRATEK ORIS DOSEDANJEGA RAZVOJA

V posamezni železarni je tekkel razvoj uporabe računalnika pri krmiljenju proizvodnje vzporedno z drugimi področji uporabe računalnika in je časovno povezan z nabavo računalniške opreme v posamezni železarni.

V železarni Ravne je bil poudarek na izdaji delovne dokumentacije ter AOP tehnične kontrole in raziskav. Prve aktivnosti so bile že pred 1970. letom. Procesno področje pa se je pričelo leta 1976 z nabavo opreme za jeklarno. V zadnjih letih so uvedli okoli 50 NC strojev in pridobili prve izkušnje pri CAD-CAM sistemu.

Železarna Jesenice je nabavila med slovenskimi železarnami prva poslovni računalnik, ki so ga uporabljali tudi za področje kontrole kakovosti in raziskav. Pro-

cesni računalnik je pričela uvajati za jeklarno leta 1985 skupaj z ameriško firmo Process Corporation in železarno Ravne.

Železarna Štore je pričela uporabljati računalnik in procesnem področju leta 1981, ko se je po telefonu priključila na procesni računalnik Železarne Ravne. Za razvojne namene si je nabavila tudi mikroročunalnik Aple.

Metallurški inštitut se je razmeroma pozno vključil v uporabo računalnika pri svojem delu, vendar skuša nadoknaditi zamujeno.

Ena od pomembnih značilnosti dosedanjega razvoja je poenoten in usklajen razvoj na procesnem področju. Vse tri železarne so se odločile tudi za enako izhodiščno aplikacijsko programsko opremo, kar bistveno poceni razvojne stroške na tem področju.

Omogočen je enostaven prenos znanja in izkušenj med železarnami.

Na področju krmiljenja proizvodnje je enotna računalniška oprema ter v dveh železarnah (Ravne in Štore) obdelava tehnologije in izdaja delovne dokumentacije. Ostale aplikacije se v vsaki železarni samostojno razvijajo.

Oglejmo si današnje stanje, ločeno za posamezne delovne organizacije.

ŽELEZARNA RAVNE:

Dinamični razvoj procesnega računalništva in avtomatizacije proizvodnih procesov v železarni Ravne služi kot vzor za vse druge delovne organizacije.

Danes se procesni računalniki uporabljajo na tako širokem področju, da je težko dati kratek oris in zajeti vse faze razvoja.

— aplikacije procesnega računalnika v jeklarni so pri pripravi dela jeklarnice, vodenju dnevne knjige naročil šarž za vse talilniške agregate, izračunu optimalnega vložka za visoka in nekatera srednje legirana jekla, avtomatskem izračunu dodatkov ferrolegur, sprotne vodenju ferrolegur ter legiranega odpadka pri pečeh in na skladiščih, uporabi programov za prikaz predpisane tehnologije izdelave jekla, kompletnem nadzoru nad informacijami iz kemijskega laboratorija, računalniškem vodenju električne konice ter vrsti drugih zanimivih aktivnosti, kot je interaktivna uporaba matematično-statističnih analiz, avtomatsko zbiranje in shranjevanje podatkov procesov, napovedovanje kaljivosti jekel iz kemične sestave, itd.

— razvoj, uvajanje in uporaba mikroprocesorjev na področju avtomatizacije delovnih postopkov. Na tem področju je zaslediti zlasti zadnjih nekaj let vidne rezultate: npr. pri avtomatizaciji zalaganja in razlaganja ogrevancev pri krožni peči za posluževanje kovaškega

dr. B. Koroušič, SŽ-Metalurški inštitut — YU 61000 Ljubljana
dr. J. Rodič, Slovenske železarne — YU 61000 Ljubljana
J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus — Železarna Ravne
J. Miko, F. Novak, dr. B. Brudar — Železarna Jesenice
dr. T. Kolenko — FNT Montanistika — YU 61000 Ljubljana
M. Kranjc — Železarna Štore

stroja, pri avtomatizaciji doziranja legur pri EOP in vakuumskih napravah, pri avtomatizaciji zalaganja in razlaganja krožne peči za termično obdelavo ulitkov, numerično krmiljenje obdelovalnih strojev. V teku so tudi številne druge aplikacije v kovačnici, valjarni in jeklar- ni.

Še nekaj podatkov o strojni opremljenosti v železar- ni Ravne:

— procesni računalnik za vodenje procesov v elek- trojeklarni:

PDP 11/40-JE 256 kB CPU z 32 MB diskom, 14 vi- deo terminalov, 5 × TT*, diskete, 3 × asinhronne linije,

— procesni računalnik za nadzor električne konice v jeklarni:

PDP 11/40 EL s 64 kB CPU, 5 MB diskom, 2 × TT in 2 × asinhronne linije,

— procesni računalnik za krmiljenje EPŽ peči:

PDP 11/23-EPŽ, 64 kB CPU,

— procesni računalnik za potrebe valjarne, obratov industrijskih nožev, strojev in delov, kalilnice, PD je- klarne in oddelka avtomatizacije proizvodnih procesov:

DELTA 644/80 s 786 kB CPU, 160 MB diskom, ma- gnetni trak, diskete, 9 video terminalov, 2 × TT in 1 asinhrono linijo,

— računalnik za številne aplikacije (EXAPT pro- gramiranje NC trakov, ročno programiranje NC trakov, grafična kontrola NC trakov, vzdrževanje programov in dr.):

PDP 11/44-NC s 512 kB CPU, 40 MB diska, magne- tni trak, sedem video terminalov, 6 × TT, 4 × puncher, 2 × asinhronne linije, 1 × asinhrona linija, Calcomp plot,

— TEKTRONIX 4054 za risanje načrtov, grafično kontrolo NC trakov, digitalizacija načrtov, poslovna grafika, z 32 kB CPU, grafičnim terminalom, Ploter A2, digital, 3 × diskete,

— računalnik za pripravo in izdajo standardov v že- lezarni Ravne:

KOPA 1500 s 64 kB CPU, diskete, 1 × video termi- nal in 1 × printer,

— računalnik za razvoj novih programov, tehnične izračune in urejanje dokumentacije:

PDP 11/23-APP z 256 kB CPU, 20 MB diskom, 4 vi- deo terminale, 2 × TT, eno asinhrono linijo in 1 sinhro- no linijo,

— računalnik za operativno vodenje skladišč vlož- nega materiala in terminiranje proizvodnje, naročanje materiala, rezervacije materiala:

DELTA 400-SID z 1 MB CPU, 1 magnetni trak, 160 MB diskom, 10 video terminalov, 2 printerja in 1 sin- hrona linija.

METALURŠKI INŠTITUT:

Spoznanje, da si učinkovitega izvajanja raziskoval- nega in razvojnega dela in avtomatizacije v procesni tehniki danes ni mogoče niti zamisliti brez uvajanja računalniške opreme, je privedlo do nabave procesnega računalnika s sodobnim operacijskim sistemom in ustrezno programsko opremo.

Danes je jasno, da je bila odločitev Metalurškega in- štituta in izbira opreme pravilna.

Klasično znanje na področju metalurških procesov se danes umika pred sodobnim programskim znanjem, ki ima znatno večje možnosti in je bolj primerno za in- formacijske in komunikacijske sisteme moderne proce- sne tehnike.

Matematično modeliranje metalurških in toplotno- tehničnih procesov ima pri tem pomembno vlogo.

Na Metalurškem inštitutu dajejo največji poudarek matematičnemu modeliranju z vgrajevanjem širšega in poglobljenega znanja s področja termodinamike in ki- netike metalurških procesov, kakor tudi teorije prenosa toplote.

Na tem področju so možnosti pravega sodelovanja in neposrednega vključevanja sodelavcev Metalurškega inštituta v obstoječe in razvijajoče se računalniške siste- me znotraj Slovenskih železarn in na področju barvne metalurgije, proizvodnje ferrolegur ter livarstva.

Osnovna področja in naloge računalniškega sistema na Metalurškem inštitutu so:

— vključevanje matematičnega modeliranja v razi- skovalno delo na področju metalurških in toplotnih procesov,

— razvoj prototipnih modelov krmiljenja proizvo- dnih procesov,

— uporaba sodobnih merilnih naprav za avtomat- sko zajemanje podatkov, kot so DATA LOGGER-ji pri izvajanju meritev na laboratorijskih in industrijskih na- pravah ter njihova povezava z računalniškimi sistemi,

— izdelava kompletnih programskih paketov za po- trebe sodobnih jeklarskih procesov, kot so: VOD-pro- ces za izdelavo nerjavnih jekel, zlitin na osnovi niklja, dinamo jekla in sl.,

— izdelava tehnološke banke podatkov za posame- zne tehnološke faze (npr. za jeklarske ponovce),

— vključevanje računalnika v splošni obseg infor- macijskega sistema (spremljanje in nadzor projektov in raziskovalnih nalog, INDOK center, JUPAK-omrežje in podobno).

Kratek opis računalniškega sistema:

Procesni računalnik PDP 11/23 PLUS z 256 kB CPU, Floppy diskom, 1 MB, 30 MB diskom, 3 × VT ter- minali, 2 × asinhroni liniji, aplikacijski program SCA- DA za nadzor EPŽ-naprave.

SISTEM PROCESNEGA RAČUNALNIKA V ŽELEZARNI JESENICE

V sklopu gradnje nove jeklarne v železarni Jesenice poteka projekt, katerega cilj je uvajanje procesnega računalništva tako na novi kakor tudi v obstoječi elektro- jeklarni.

Istočasno gre za poenoten nastop pri organizaciji in povezovanju ter unifikaciji strojne in programske opre- me na celotnem področju proizvodnje jekla.

Mikroprocesorje, instalirane na posameznih napra- vah, naj bi na osnovi ustreznega spoznavanja upora- bljali širše v praksi.

Nadaljnji cilj je neposredna povezava med proiz- vodnjo in raziskavami, kar mora postati osnova za ute- meljevanje tehnoloških regulativov in kakovostnih nor- mativov.

Strokovne in matematično statistične analize naj bi postale osnova pri odločanju in naj bi zamenjale ne- osnovane avtoritativne »ad hoc« odločitve.

Razvoj na področju procesnega računalništva v že- lezarni Jesenice definirajo naslednja štiri tipična po- dročja nalog:

— spremljanje razvoja na tem področju, pri čemer bo treba posebej skrbeti za povezovanje z bazami poda- tkov doma in svetu,

— vplivanje na usmeritve razvijanja ustreznih me- rilnih sistemov in merilnikov, k čemur spada tudi sode- lovanje pri izbiri in nadzor opreme v okviru investicij,

* — tiskalni terminal

— organizacija optimalne delitve dela in povezovanja, pri čemer je pomembna vsebina programske dokumentacije,

— enoten nastop na trgu znanja, tako pri nabavi kot pri prodaji znanja.

Načrtovana organiziranost zelo upošteva izkušnje železarne Ravne in ji je precej podobna.

Kratek pregled stanja projekta procesnega vodenja:

PDP 11/44 (main) s 1 MB + 8 kB hitre memorije, dvojni Winchester disk 121 MB, magnetno tračna enota, tiskalnik, ura

PDP 11/44 (backup), Winchester disk 121 MB, tiskalnik, ura, logični programatorji PLC-3 ter 4 barvni video terminali VT 241-AA, 4 črno-beli video terminali VT 102-AB in PAKA 3000, 3 industrijski terminali in več tiskalnikov tipa LA 100-AA LA 120-DA, mikro računalnik PDP-11 s tiskalnikom LA-120 kot sistemsko konzolo.

V železarni Jesenice bo že v letu 1986 instalirana in testirana programska oprema za nadzor in krmiljenje proizvodnje jekla v novi jeklarni 2 in stari elektro-jeklarni, kemičnem oddelku, VOD-napravi.

Od pomembnejših programskih paketov naj omenimo:

— programski paket za nadzor porabe in konice električne energije (Q-VAR),

— programski paket AVTO-JEK za jeklarske aplikacije in

— programski paket KEM 101 za področje kemijske analitike.

Železarna Jesenice ustanavlja oddelek za procesno računalništvo, ki naj bo organiziran že v začetku 1986. leta po enotnem konceptu za vsa področja: jeklarna, energetika (npr. računalniško vodenje ogrevanja globinskih peči) in druga področja.

Na omenimo še dejavnosti na področju uporabe IBM 3031 za potrebe proizvodnje.

Gre za pomembno področje aplikacije linearnega programiranja in uporabe matematičnih modelov pri raziskavah optimalne izbire asortimenta za določene proizvodne agregate. Začete raziskave imajo lahko velik pomen, ker omogočajo lociranje šibkih točk in usmerjajo marketing službo pri odločanju, katere izdelke in v katerih količinah se jih splača pospeševati, da bi bili ekonomski učinki največji.

SISTEM PROCESNEGA RAČUNALNIKA V ŽELEZARNI ŠTORE

Jeklarna v železarni Štore je že od leta 1981 z direktno linijo povezana s procesnim računalnikom jeklarne v železarni Ravne.

V okviru investicije, ki je v teku, je železarna Štore nabavila lastni računalniški sistem z ustrežno perifernirno opremo, kar bo omogočilo pospešitev nadaljnjega razvoja na tem področju.

V letu 1986 je načrtovana uvedba programskih paketov za potrebe elektrojeklarne. Gre predvsem za že

omenjene programe žel. Ravne, kot so AVTO-JEK, KEM-101 ter paket za matematično statistične analize.

Zelo pomembna je tudi akcija, da se na podoben način, kot v železarni Jesenice, instalira programski paket za nadzor in vodenje porabe in konice električne energije na elektro-obločni peči (Q-VAR).

Kratek opis procesnega računalniškega sistema:

PDP 11/44 z 1 MB CPU, 160 MB Winchester disk, magnetna tračna enota, 8 × video terminali tipa PAKA 3000, 5 × TT tipa TRS 836.

V pripravi so idejni projekti avtomatskega vodenja proizvodnih procesov za TH peč in livarno metalurške litine ter uvedba strojnega programiranja NC-strojov in CAD-oddela za konstrukcijo.

Pomembno je omeniti tudi dosedanje napore, da bi z manjšimi računalniškimi sistemi razvili lastno programsko opremo. Tako so se izkazale uspešne aplikacije na področju energetike (izračuni energetskih bilanc toplotnih agregatov), terminiranje proizvodnje v TOZD livarna strojne litine in vrsta drugih programskih aplikacij.

STANJE IN RAZVOJ UPORABE RAČUNALNIKA NA METALURŠKEM ODSEKU — VTOZD MONTANISTIKA

Glavne usmeritve pri razvoju uporabe računalnika na Metalurškem odseku predstavlja razvoj procesnih modelov za vodenje tehnoloških postopkov.

Pomembni uspehi so doseženi pri:

— strjevanju, ohlajanju in termični obdelavi valjev v Železarni Štore,

— simulacija prenosa toplote v pečeh,

— razvoj izmenjevalnikov toplote (rekuperatorjev).

Omeniti je vredno tudi delo z računalnikom pri reševanju raziskovalnih nalog, pri katerih sicer matematični model ni glavni cilj. Pri tem gre za programe, ki obdelujejo rezultate meritev v obliki masnih in toplotnih bilanc za potrebe energetike.

Naslednje zelo pomembno področje je uporaba računalnika pri reševanju kompleksnih problemov pri vroči in hladni predelavi:

— ekrinizacija valjanja, ki naj natančno določi plan odvzemov na duo in kvarto valjalnem stroju,

— razširitev uporabe klinastega preizkusa za določanje preoblikovalnega odpora,

— uvajanje ekspertnih sistemov v plastično predelavo.

Še nekaj podatkov o opremljenosti:

Razpoložljiva oprema je računalnik KOPA 1500 s tiskalnikom LA 120, ki omogoča izvajanje omenjenih aplikacij, je pa za resno in učinkovito delo prepočasen, ter manjši računalnik KONTRON PC-80 s tiskalnikom in plotterjem.

Obstaja tudi povezava z velikim računalnikom univerzitetnega sistema, ki pa skoraj ni uporabna zaradi prezasedenosti.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellte Analyse der gegenwärtigen und künftigen Entwicklung der Datenbearbeitung in Slowenischen Hüttenwerken ist keine abgerundete Gesamtheit, da auch wichtige Gebiete wie zum Beispiel mechanische Bearbeitung der Metalle und anderes nicht miteingefasst sind.

Aus dem gesammelten Material geht hervor, dass man in den Slowenischen Stahlwerken der Bedeutung dieses Gebietes bewusst ist, so wird dem in den Entwicklungsprogrammen besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Einige wichtigen Richtungen und die erzielten Erfolge auf dem Gebiet der Gütekontrolle wie auch auf dem Gebiet der applikativen Forschungen werden gezeigt.

Der heutige Stand der Einrichtungen wird beschrieben, die Grundcharakteristiken der Apparateeinrichtungen, Speicher, Peripherien, Typen der Rechenanlagen u. s. w. werden angegeben.

Trotz unzähliger objektiver Schwierigkeiten vor allem mit der Anschaffung der Apparateeinrichtungen, qualitativer Programmeinrichtungen, kann die bisherige Entwicklung als gut bezeichnet werden. Wir sehen optimistisch der künftigen Entwicklung entgegen, da diese besonders auf dem Niveau der Prozesssteuerung sichtbare wirtschaftliche Effekte beiträgt. Auch bei der mathematischen Modellierung bestimmter metallurgischer Prozesse können sichtbare Erfolge registriert werden, die das Selbstvertrauen in eigene Kräfte erregen.

In dem nächsten fünfjährigen Zeitabschnitt muss mehr getan werden, dass die Übermittlung praktischer Erfahrungen auf dem Gebiet der Prozessrechnung zwischen den einzelnen slowenischen Hüttenwerken organisiert verlaufen wird so wie auch die Zusammenarbeit bei der Entwicklung neuer Programmeinrichtungen und die Übertragung des Wissens.

SUMMARY

The analysis of present state and future development of application of process computers in Slovene Ironworks which is presented is not complete since some other important regions like machining of metals, and the like, are not included.

Nevertheless, the gathered informations show that the Slovene Ironworks are aware of the importance of this field, thus a special attention is given to it in the development programs.

Significant orientations and the achieved successes in quality control and in applied investigations are presented.

The present state of equipment is described, basic characteristics of hard-ware, memory, periphery, computer models, etc. are given.

In spite of numerous objective troubles mainly with purchasing hard-ware and also quality soft-ware the development till now is satisfactory. Further development seems optimistic since it brings evident economical effects especially on the level of mastering the computer techniques and its application in the industrial practice. Also in developing mathematical models of single metallurgical processes the achievement is evident which gives confidence in own strengths.

In the next medium-term period the effort must be made for an organized exchange of practical experiences in applying process computers between the partners in Slovene Ironworks, and for cooperation in developing new soft-ware and know-how.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный анализ теперешнего и будущего развития вычислительного устройства в словенских металлургических заводах не представляет заокруженную цельность, так как не обхватил другие существенные области, как нпр. машинную обработку металлов и прочее.

Но несмотря на это можно из собранного материала вывести, что деятели словенских металлургических заводов сознают значение этой области, которой предназначено в программах развития должное внимание.

Приведены значительные направления и полученные достижения в области контроля качества и также в области применяемых исследований.

Описано настоящее положение оборудования и приведены основные характеристики оборудования приборами, памяти, типы счётчиков и прочее.

Несмотря на многочисленные объективные затруднения, главным образом для приобретения приборов, также качественного программного оборудования, мы можем быть вполне довольны с до сих достигнутыми результатами этого развития. Мы с оптимизмом смотрим на дальнейшее развитие, которое в оперативном производственном процессе при помощи вычислительного устройства даёт на этом уровне очевидные экономические эффекты. Очевидные успехи получены также в предельно математического моделирования определенных металлургических процессов, что даёт уверенность в собственных силах. В следующий среднесрочный период времени надо выполнить больше, чтобы посредничество практических достижений в области вычислительного устройства выполнялось между партнёрами словенских металлургических заводов выполнялось организованно, а также сотрудничество при развитии программного оборудования и переноса знания.

Uporabnost in lastnosti jekla ACRONI 11 Si

Bogdan Stocca

Novo jeklo naj bi obogatilo izbiro v ognju obstojnih jekel in v določenih primerih nadomestilo dražje jeklo ACRONI 19.

Jeklo spada k nerjavnim austenitnim v ognju obstojnim jeklom. Pri kontinuirnem obratovanju je v oksidativnih atmosferah uporabno vse do 950° C.

Nagnjenost k nastanku sigma faze je zelo majhna. V temperaturnem področju 500–800° C pa pride do izločevalnih pojavov, ki plastičnost in žilavost jekla le malo poslabšajo.

Po svoji sestavi spada k jeklom, tipa CrNi 18/9 z dodatkom silicija. Ta element tvori tanek, gost, močno oprijet oksidni sloj, ki je do visokih temperatur nepropusten za difuzijo elementov. Lomljivost in pokanje škaje, do katere pride zaradi krčenja jekla pri ohlajanju, je zelo majhna.

Sestava jekla je naslednja:

C	≤ 0,12 %
Si	2,0–3,0 %
Mn	≤ 2,0 %
Cr	17,0–19,0 %
Ni	8,0–10,0 %
P	≤ 0,045 %
S	≤ 0,030 %

Jeklo se uporablja za izdelavo žarilnih zvonov, delov peči, gorilnikov, sevalnih cevi itd.

Mehanske lastnosti pri 20° C

Jeklo ima v gašenem stanju naslednje mehanske lastnosti:

Meja plastičnosti R_{pe} (N/mm ²) min	Trdnost R_m N/mm ²	Raztezek A_5 % min	Kontrakcija Z % min	Trdota HB maks.	Žilavost A_v J min
250	600–750	55	65	180	140

Mehanske lastnosti pri povišanih temperaturah

Časovni trajni raztezek po 1000 in 10.000 urah obremenitve

Temperatura ° C	1 % časovni trajni raztezek N/mm ²	
	1000 ^h	10.000 ^h
600	110	80
700	45	20
800	20	10
900	8,0	5

Časovna statična trdnost po 1000, 10.000 in 100.000 urah

Temperatura ° C	Časovna statična trdnost N/mm ²		
	1000 ^h	10.000 ^h	100.000 ^h
600	185	115	65
700	70	35	15
800	32	18	7,5
900	15	8	3

Lahko izdelujemo tudi varianto z Niobom z višjo časovno trdnostjo.

Preoblikovalnost v hladnem

V gašenem stanju ima jeklo ACRONI 11 Si zelo dobro sposobnost za preoblikovanje.

Prosto upogibanje

Jeklo se da upogibati pri 20° C za kot $\alpha = 180^\circ$ pri trnu $d = a$ pri debelini gašenega materiala pod 5 mm.

Upogibanje v V matrici

Jeklo se da upogibati v V matrici pri radiusu $r = 0,5 a$ za kot 135° pri debelini do 3 mm.

Toplotna obdelava

Za doseganje optimalnih mehanskih lastnosti jeklo gasimo s temperature 1080° C. Strukturo v gašenem stanju prikazuje slika 1.



Slika 1:
Avstinitna struktura s trakovi ferita — 100 ×

Varjenje

Jeklo se da enako variti kot nerjavna austenitna jekla. Mogoče ga je variti z vsemi elektro postopki. Priporočamo elektrode INOX B 20/24; INOX B 25/4 in žico TIG 25/20 ter TIG 25/4. Če zahteve obstojnosti v ognju niso velike, ga je mogoče variti tudi z vsemi austenitnimi nerjavnimi jekli. Zaradi večje vsebnosti silicija

vsebuje zvar 2—5 % ferita, kar preprečuje nastanek razpok.

Proizvodni program

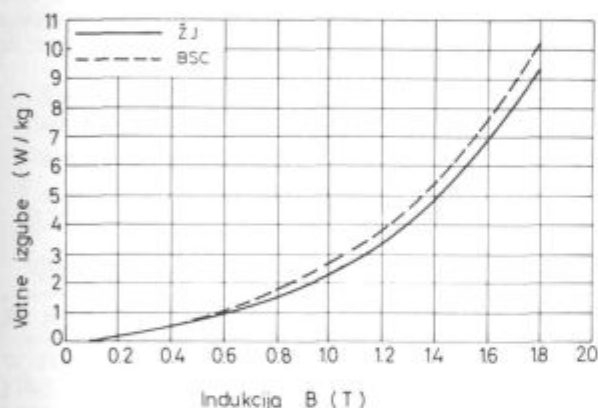
Železarna Jesenice izdeluje to jeklo v obliki vroče valjane pločevine, vroče ali hladno valjanih trakov, plošč ali lamel.

ELMAG — nova vrsta nelegirane polgotove elektro pločevine

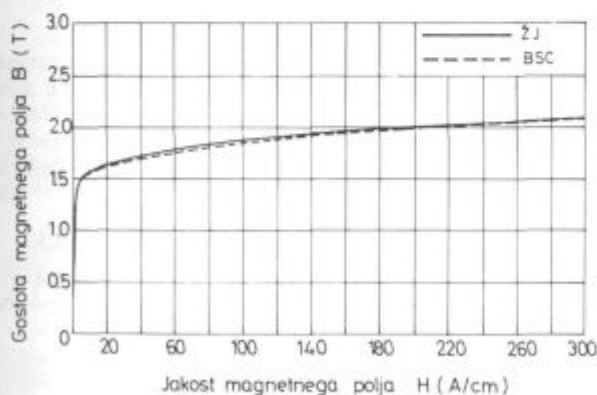
Filip Marinšek

Nesilicirane elektro pločevine, ki jih izdeluje Železarna Jesenice, so izdelane po postopku SEMI-FINISHED. Postopek nam med drugim zagotavlja predvsem takšne lastnosti, ki jih zahtevajo porabniki, to je sposobnost za štančanje. Sposobnost za štančanje teh pločevin je izboljšana še z dodatkom fosforja v jeklo. Zahtevane elektromagnetne lastnosti na pločevinah dosežemo s končnim žarjenjem štancanih lamel pri 800° C v razogljivevalnih atmosferah (rekristalizacija + razogljivenje). Končno žarjenje z zadostnim razogljivenjem pa zagotavlja tudi odpornost proti magnetnemu staranju. V postopek končnega žarjenja je običajno vključeno plavičenje štancanih lamel. Fina oksidna plast na lamelah predstavlja zadostno izolacijo za področje uporabnosti, kateremu so namenjene te nelegirane elektro pločevine.

Železarna Jesenice je doslej izdelovala nelegirane polgotove pločevine v dveh kvalitetah in dveh debelinah s hrupavo površino ($R_a = 1,5 - 3 \mu\text{m}$), in sicer:



Slika 1:
Vodne izgube v odvisnosti od indukcije

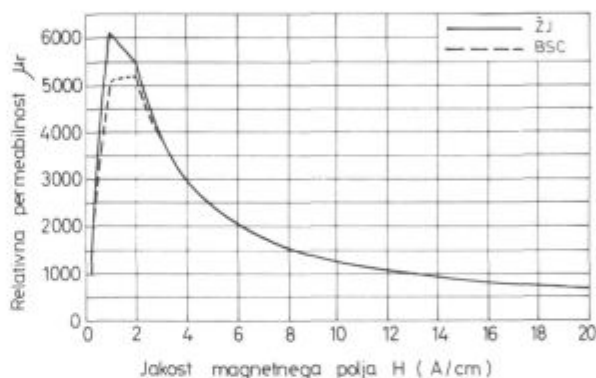


Slika 2:
Krivulja magnetenja za Elmag

ELMAG 280 — 50, ELMAG 370 — 50, ELMAG 330 — 65 in ELMAG 420 — 65, to je z vatnimi izgubami od 2,8 do 4,2 W/kg pri gostoti magnetnega polja 1 Tesla, odvisno od debeline.

Razvoj na področju vrtečih se električnih strojev je narekoval izboljšanje kvalitete ELMAG pločevine tudi v železarni Jesenice. Porabniki teh pločevin, ki izdelujejo kompresorske motorje z visokim izkoristkom za izvoz, pločevino uvažajo. To so pločevine, ki pri debelini 0,65 mm dosegajo vatne izgube < 2,8 W/kg pri gostoti mag. polja 1 Tesla, z izredno visoko magnetno indukcijo v nasičenju in tudi v kolenu krivulje magnetenja.

V železarni smo rešitev problema videli le v izdelavi bolj čistega jekla s spremenjeno kemično analizo. To nam je omogočila VOD (vacuum oxygen decarburization) naprava.



Slika 3:
Relativna permeabilnost v odvisnosti od magnetnega polja.

Jekla te vrste, ki niso pomirjena z aluminijem (ni prisoten AlN), pričnejo rekristalizirati že pri 500—550° C. Škodljiv vpliv izločenega AlN na hitrost rekristalizacije in tvorbo ravnin (001), (011) in (002) v smeri lažje magnetizacije za železo [100] je znan. Iz tega lahko povzamemo, da boljše elektromagnetne lastnosti izhajajo iz vrste uporabljenega jekla in tehnologije.

Vakuuirano jeklo vrste ELMAG pa se med drugimi odlikuje tudi po nizki vsebnosti ogljika (< 0,01 %), kar je predvsem ugodno za porabnike, ki razogljčujejo štancane lamele.

Vsebnost žvepla v VOD jeklu je nizka. Čistoča jekla je dobra in odločilna za elektromagnetne lastnosti.

Na pločevini v dobavnem stanju (kritično deformirano), debeline 0,65 mm, smo dosegli po žarjenju ugodne rezultate, ki so povsem enakovredni tistim na uvoženih pločevinah.

Diagrami na slikah 1, 2 in 3 prikazujejo pomembnejše elektromagnetne karakteristike tega jekla v primerjavi z uvoženim (BSC) jeklom.

Novo orodno jeklo Č 7450 — UTOP 33 za delo v vročem

Jože Pšeničnik

UVOD

Od jekel za delo v vročem potrošniki zahtevajo vedno večjo vzdržljivost pri predelavi kovin in zlitin. Če hočemo ugoditi tej zahtevi, bi morali razvijati vedno nove vrste jekel za posamezna področja uporabe. Vse specialne izvedbe so prepuščene temu povezovanju, standardni proizvodni program za splošno uporabo pa je lahko zelo ozek. Ravno v tem ozkem programu pa nam je v železarni Ravne manjkala vrsta Cr-Mo-V jekla, ki smo ga sedaj razvili.

Jeklo Č 7450 se v glavnem uporablja za vložke utopov, za orodja v industriji vijakov, za orodja na raznih kovaških strojih, kakor tudi za visoko obremenjena orodja stiskalnic. Nekatera orodja v večjih količinah smo z vzornim sodelovanjem z Mariborsko livarno iz Maribora, UNITAS-om iz Ljubljane in IMPOL-om iz Slovenske Bistrice že preizkusili.

Na osnovi sedaj proizvedene količine jekla Č 7450 za redno proizvodnjo lahko trdimo, da smo to jeklo toliko spoznali in preizkusili, da ga lahko predstavimo našim proizvajalcem orodij za delo v vročem, kar je tudi namen tega sestavka.

Standardne karakteristike in osnovni podatki za uporabo jekla Č 7450

Smerna kemična sestava v %:

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,32	0,3	0,3	3,0	3,0	0,5

Primerjava s tujimi standardi

ZR NEMČIJA		EURONORM 96—79
W. No	DIN	
17007	17350	
1.2365	X32CrMoV33	30CrMoV12 11

Tip jekla

Jeklo Č 7450 je plemenito visokolegirano Cr-Mo-V orodno jeklo, namenjeno za delo v vročem. Kaljivo je v olju ali v toplih kopelih. Ima odlično meroobstojnost v kombinaciji z odpornostjo proti obrabi in odlično žilavost. Zelo uspešno ga lahko nitriramo po vseh znanih metodah in s tem orodjem zvečamo produktivnost. Orodje lahko hladimo tudi z vodo.

Značilnosti in osnovne lastnosti

Jeklo Č 7450 (UTOP 33) se odlikuje predvsem z naslednjimi lastnostmi:

- odlična odpornost proti obrabi v vročem
- odlična žilavost v vročem
- dobra obdelovalnost v žarjenem stanju
- dobra sposobnost za poliranje
- dobra kaljivost
- zelo dobra meroobstojnost
- odlična popuščna obstojnost

Jeklo Č 7450 izdelujemo v glavnem po EPŽ postopku, zato ima zagotovljeno izredno čistost ter homogenost makro- in mikrostrukture.

Primerjava lastnosti

Če primerjamo glavne lastnosti jekla Č 7450 z lastnostmi drugih poznanih vrst jekel, bomo prav lahko ugotovili, kdaj se bomo odločili za izbiro tega jekla.

Jeklo Č 7450 ima na primer prednost pri izbiri pred jeklom Č 4751 ali Č 4753 predvsem takrat, kadar zahtevamo večjo žilavost in obstojnost v vročem.

Področje uporabe

Naštete lastnosti jekla Č 7450 kažejo, da je jeklo namenjeno zahtevnim orodjem za delo v vročem, in to predvsem tam, kjer se zahteva odpornost proti obrabi v kombinaciji z dobro žilavostjo in odpornostjo proti škanju.

Če k temu dodamo še dobro meroobstojnost, je pomen tega jekla za izdelavo orodij kompliciranih oblik jasen.

Iz tega jekla izdelujemo visoko zahtevna orodja stiskalnic, vložke utopov, orodja na modernih kovaških strojih in preoblikovana orodja v industriji vijakov, kakor tudi pri predelavi barvnih kovin.

Orodja, izdelana iz jekla Č 7450, lahko hladimo z vodo, kar njihovo uporabnost še poveča.

Tipizacija

Jeklo Č 7450 je novo in se na domačem tržišču šele uveljavlja, zato je seveda še »netipizirano«. Zaradi doseženih lastnosti pa mu lahko pripisujemo dobre perspektive pri uveljavljanju za izdelavo orodij za uporabo v vročem.

Vročna predelava

Normalno področje vroče predelave je 1100 do 800° C. Pri ogrevanju in zadrževanju na temperaturi pred končno predelavo je potrebno upoštevati nagnjenost tega jekla k razogljčenju in zagotoviti ustrezno zaščito.

Kljub temu, da ne kali na zraku, je občutljivost tega jekla pri ohlajanju po končani plastični predelavi velika, zato moramo zagotoviti primerno počasno ohlajanje.

Zaradi legirne sestave sposobnost tega jekla za plastično predelavo ni najboljša. Pretaljevanje tega jekla po EPŽ postopku in plastična predelava na moderni kovaški liniji omili predelovalno problematiko.

Za doseganje dobrih osnovnih lastnosti ima končna temperatura vroče predelave velik pomen in naj bo čim bližje spodnji temperaturi predpisanega območja, vendar pa ne nižja od 800° C. Normalno pa je, da mora biti tudi začetna temperatura za plastično predelavo pravilna.

Po končani vroči predelavi je potrebno to jeklo čimprej žariti.

Mehko žarjenje

Po vroči predelavi se priporoča pred mehkim žarjenjem normalizacija, ki sicer ni obvezna, pač pa s prekristalizacijo prispeva pomemben delež pri zagotavljanju homogene mikrostrukture in doseganje boljših lastnosti jekla.

Ogrevanje mora biti tako pri normalizaciji, kakor pri mehkiem žarjenju počasno in po možnosti stopenjsko.

Temperatura normalizacije za prekristalizacijo je 1000° C z zadrževanjem 1^h na temperaturi.

Temperatura mehkega žarjenja je 770—820° C.

Čas zadrževanja na temperaturi je 4—6 ur.

Pri normalizaciji in žarjenju je treba ustrezno zagotoviti varovanje pred razogljčenjem površine.

Hitrost ohlajanja po končanem zadrževanju na temperaturi mehkega žarjenja, predvsem v območju 750—650° C, ne sme presegati 20° C/h, od temperature 650° C pa je nadaljnje ohlajanje lahko hitrejše.

Trdota po žarjenju

Trdota po mehkiem žarjenju je max. 240 HB.

Obdelovalnost

V žarjenem stanju se to jeklo dobro obdeluje.

Žarjenje za odpravo napetosti

Žarjenje za odpravo napetosti izvajamo v temperaturnem območju 550—700° C z zadrževanjem na temperaturi najmanj 1 uro. Ohlajanje izvajamo počasi v peči do 500° C, dalje pa lahko tudi na mirnem zraku.

Žarjenje za odpravo napetosti se izvaja po grobi mehanski obdelavi. Nujno potrebno je pri vseh orodjih, ki se po toplotni obdelavi ne brusijo več, posebno še, če so preseki na raznih delih orodja zelo različni. Velik pomen ima to žarjenje pri orodjih, ki se pred končno toplotno obdelavo močneje ravnaajo.

Pri žarjenju za odpravo napetosti ni potrebna posebna zaščita proti razogljčenju.

Kaljenje

Normalno območje temperatur kaljenja je 1010 do 1050° C. Pri večini orodij za delo v vročem se zaradi boljše popuščne obstojnosti držimo maksimalnih temperatur kaljenja, okrog 1050° C.

Orodja v večini primerov kalimo v olju, če le dopušča oblika orodja. Za bolj komplicirana orodja uporabljamo izenačevanje po avstenitizaciji na 1060° C v termalni kopeli na 450—550° C, nakar sledi ohlajanje v olju.

Trdota po kaljenju v olju je 48—52 HRC.

Trdota po kaljenju z zadrževanjem v termalni kopeli na 520° C pa je 44—46 HRC, vendar zaradi zaostalega avstenita sekundarna trdota po popuščanju naraste in je višja za okrog 2 HRC, kot po kaljenju.

Pri ogrevanju na temperaturo avstenitizacije priporočamo dobro predgrevanje v območju 600—850° C, kjer s tem dosežemo boljšo enakomernost temperature po preseku na temperaturi kaljenja. To precej zmanjša nevarnost deformacij orodij pri kaljenju. Na temperaturi predgrevanja zadržujemo orodje približno 1 uro na vsakih 25 mm debeline največjega preseka. Že na temperaturi pregrevanja je potrebno poskrbeti za ustrezno zaščito proti razogljčenju, še bolj pomembno pa je to pri nadaljnjem ogrevanju, in zadrževanje na temperaturi kaljenja. Priporočljiva je varovalna atmosfera v peči z najmanj 10 % CO ali pa varovalno pakiranje orodij.

Pri kaljenju večjih kosov priporočamo izbiro kalilne temperature bližje spodnji meji navedenega intervala, ker s tem povečamo orodju žilavost.

Za manjše ali tanjše orodje priporočamo ogrevanje na kalilno temperaturo v solni kopeli na bazi 70 — 90 % BaCl₂ in 30 — 10 % NaCl.

Popuščanje

Popuščanje izvedemo takoj po kaljenju, še preden doseže orodje sobno temperaturo. Najprimerneje je prenesti orodje v popuščno peč s temperaturo 50—80° C. Orodja popuščamo običajno med 550 in 700° C, odvisno od zahtevane trdote.

Priporočamo vedno dvakratno popuščanje, ki za orodje zadošča, če je pravilno izvedeno. Čas popuščanja na temperaturi naj bo okrog 1 uro za vsakih 25 mm debeline, vendar tudi pri manjših orodjih nikoli manj kot 1 uro.

Tudi med delom je priporočljivo orodje občasno popuščati za razbremenitev notranjih napetosti. To izvedemo tako, da n. pr. po 3000-kratnem stiskanju ali kovanju orodje popuščamo okrog 30° C nižje od temperature popuščanja orodja. S tem orodju pomembno povečamo življenjsko dobo.

Vzdržnost orodja močno povečamo tudi s primerno pripravo orodja za delo. Orodje pred začetkom dela tudi po več ur različno predgrevanja na temperaturah od 250—300° C. S tem se izognemo pojavu razpok, ki močno skrajšajo vzdržljivost orodju.

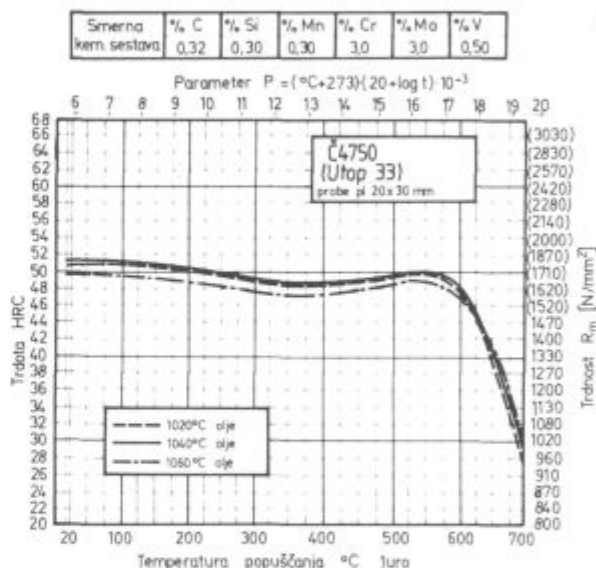
Diagrama na slikah 1 in 2 prikazujeta odvisnost trdote od temperature kaljenja in temperature popuščanja za kaljenje v olju in v termalni kopeli.

Delovne trdote orodij

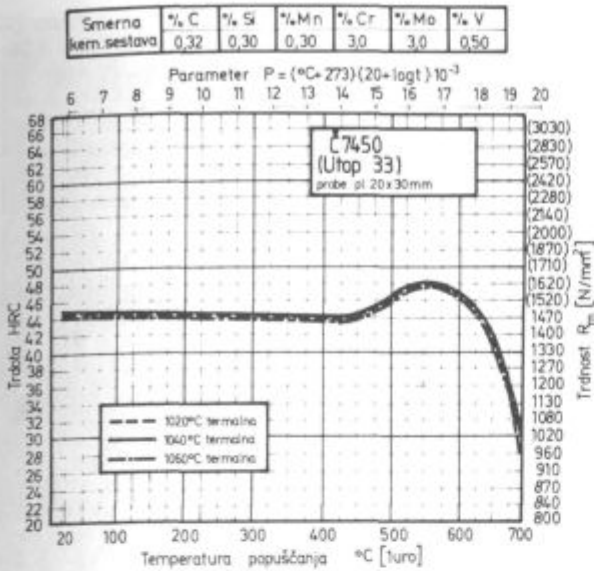
Delovna trdota orodij naj bo v mejah 40 do 50 HRC, kar je seveda odvisno od področja uporabe, od oblike orodja in od pogojev dela. Za najvišje delovne temperature je lahko trdota orodij tudi nižja.

Orodja za stiskanje lahkih kovin naj imajo trdoto 40—45 HRC.

Utopna orodja za kovanje medenine pod stiskalnico naj imajo trdoto 46—50 HRC.



Slika 1: Popuščni diagram za jeklo Č 7450 — UTOP 33 za kaljenje v olju



Slika 2:
Popuščni diagram za jeklo Č 7450 — UTOP 33 za kaljenje v termalno kopal

Č 7450 (UTOP33)

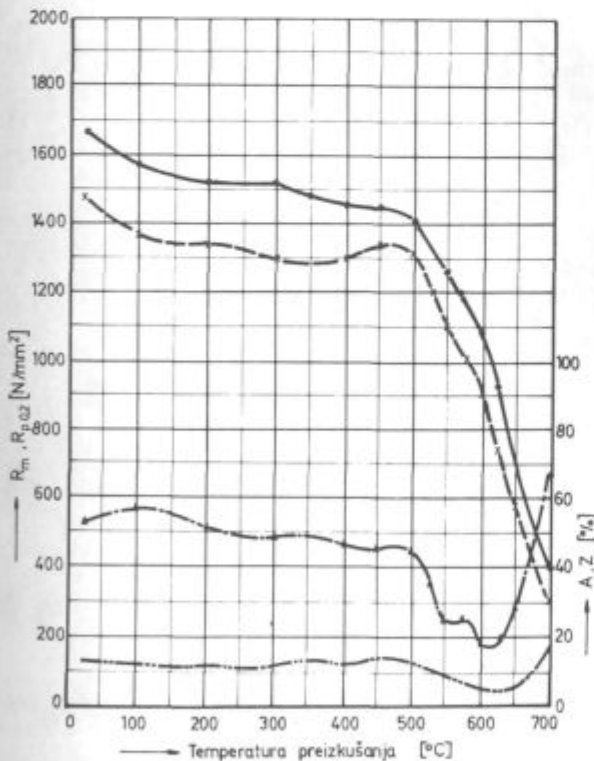
Poboljšano 1650 N/mm²

Kaljeno 1040°C v olju

Popuščano 550+540°C 1h

Legenda:

- Trdnost R_m [N/mm²]
- - - Meja plastičnosti R_{p02} [N/mm²]
- Kontraktija Z [%]
- Raztezek A [%]



Slika 3:
Mehanske lastnosti v vročem stanju za jeklo Č 7450 UTOP 33

Vložki gravur za stiskanje pod stiskalnico naj imajo trdoto 46–50 HRC, enako trdoto naj imajo tudi trni na horizontalnem kovaškem stroju.

Orodja, ki so izpostavljena dinamičnim udarnim obremenitvam, naj imajo nižjo delovno trdoto.

Nitriranje

Jeklo Č 7450 UTOP 33 je zelo primerno za nitriranje. S tem orodjem močno povišamo trdoto na površini in maksimalno povečamo odpornost proti obrabi.

Primernejše je plinsko nitriranje, ker dobimo pri 15-urnem nitriranju na temperaturi 520° C trdo nitridno plast, debeline 0,12 mm s trdoto od 900–1100 HV.

Vedno bolj pa se uveljavlja ionsko nitriranje, ki ga imenujejo tudi nitriranje v plazmi pri 400–570° C, kjer dosežemo globine nitriranja od 0,1 do 0,3 mm s trdoto 900 do 1150 HV.

Mehanske lastnosti

Pri kaljenju s temperature 1040° C, t. j. na sredini normalnega kalilnega intervala, in popuščanju na 550+540° C ali 700+680° C dobimo naslednje vrednosti:

	Kaljeno 1040° C olje	
	popuščano 550+540° C	popuščano 700+680° C
R_m N/mm ²	1660	900
R_{e} N/mm ²	1470	680
A %	13	18
Z %	52	64

Ker se to jeklo uporablja za delo v vročem stanju, navajamo mehanske lastnosti v vročem stanju pri različnih trdnostih (slika 3 in 4).

Č 7450 (UTOP 33)

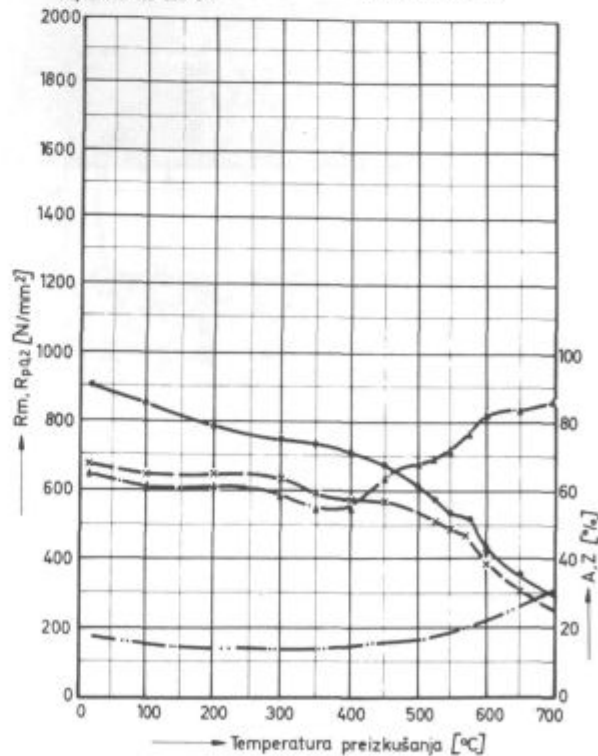
Poboljšano 900 N/mm²

Kaljeno 1040°C v olju

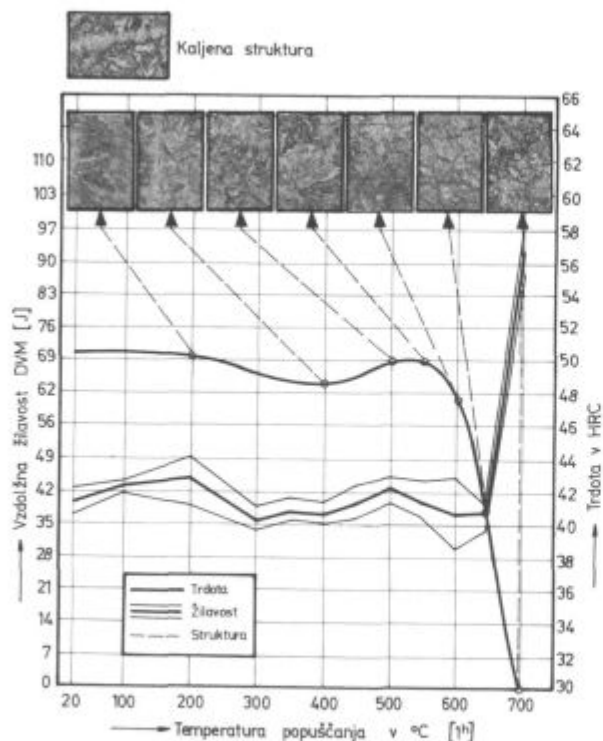
Popuščano 700+680°C 1h

Legenda:

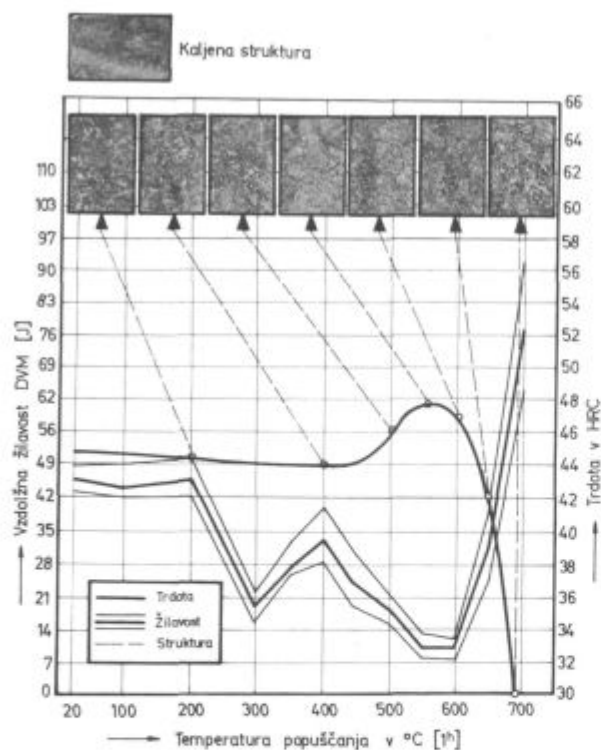
- Trdnost R_m [N/mm²]
- - - Meja plastičnosti R_{p02} [N/mm²]
- Kontraktija Z [%]
- Raztezek A [%]



Slika 4:
Mehanske lastnosti v vročem stanju za jeklo Č 7450 —

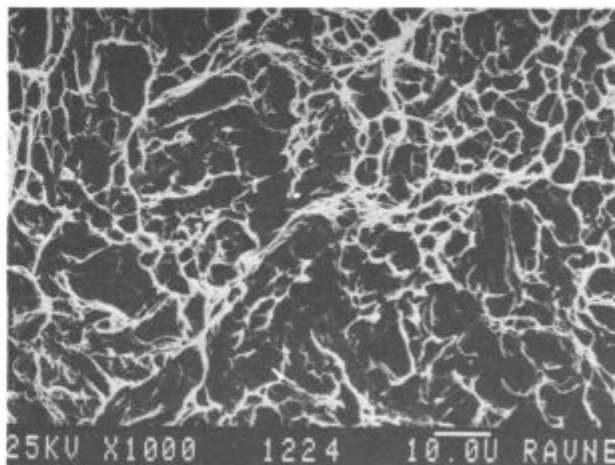


Slika 5:
Vpliv temperature popuščenja na trdoto in žilavost ter videz mikrostrukture jekla Č 7450 — UTOP 33, kaljenega v olju na 1040° C

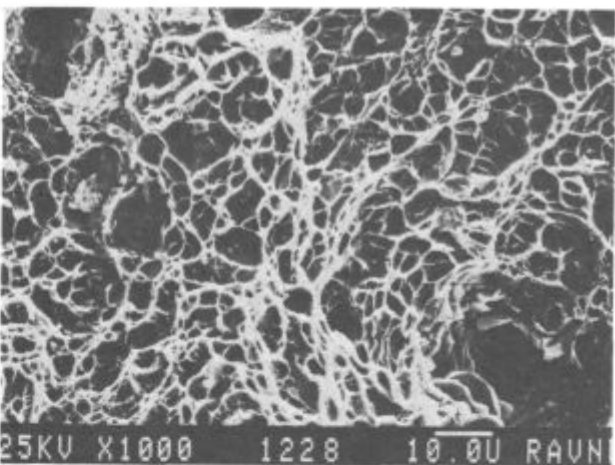


Slika 6:
Vpliv temperature popuščenja na trdoto in žilavost ter videz mikrostrukture jekla Č 7450 — UTOP 33, kaljenega iz 1040° C v termalno na 520° C

Ker je pri nekaterih orodjih odločilnega pomena žilavost, prikazujemo na slikah 5 in 6 nekaj preiskav žilavosti v odvisnosti od kalilnega sredstva in temperature popuščenja. Na diagramih so podane tudi pripadajoče mikrostrukture jekla. Značilen padec žilavosti pri naraščanju sekundarne trdote je razumljiv že zaradi sprememb trdote, razlagamo pa si ga še zaradi izločevalnih efektov po mejah zrn in rasti karbidne faze, posebno pri kaljenju v termalni kopeli.



Slika 7:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje

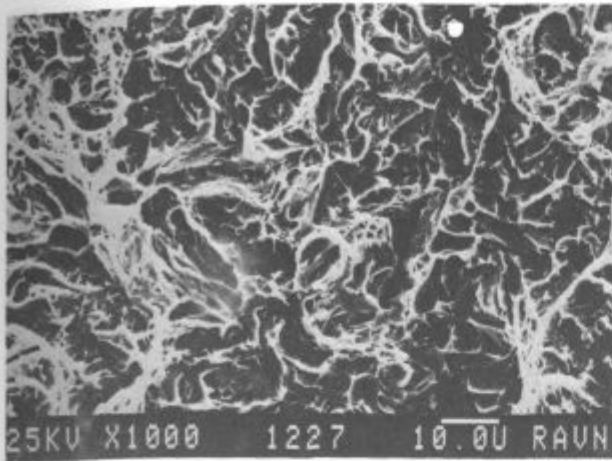


Slika 8:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano na 200° C

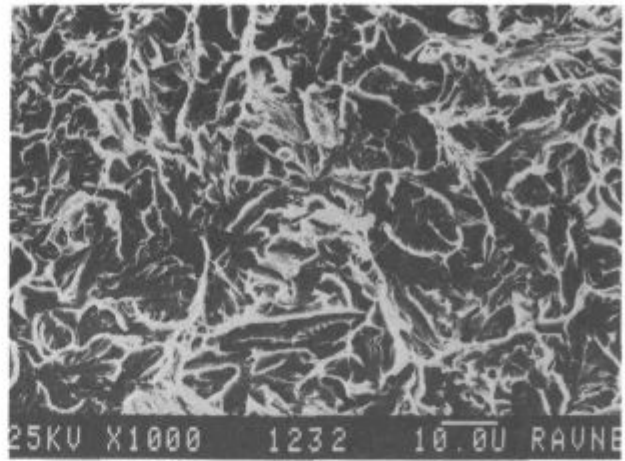
Metalografske preiskave jekla Č 7450 — Utop 33

Pojav nihanja žilavosti v celotnem območju smo preiskovali tudi s preiskavo frakturnih površin na vzorcih žilavostnih preizkušancev z raster elektronskim mikroskopom, kjer ni bilo poznanih interkristalnih področij, vzrok padca žilavosti je potrjen z rastjo karbidne faze. Posnetke REM fraktografije vidimo na slikah 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 in 15 za vzorce, kaljene v olju, in na slikah 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 in 24 za vzorce, kaljene v termalno kopel (glej prilogo).

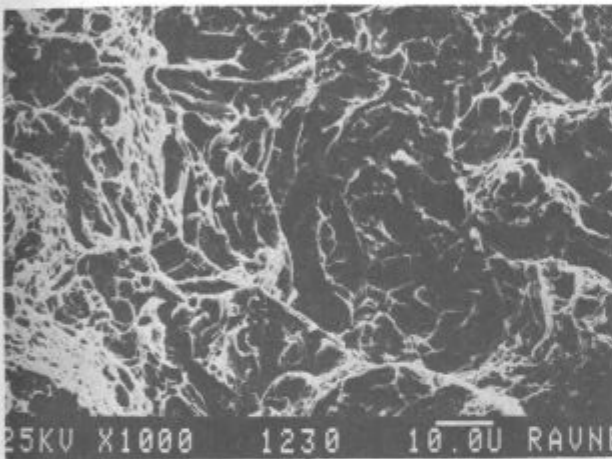
Po kaljenju so v mikrostrukturi tega jekla martenzit in zaostali avstenit.



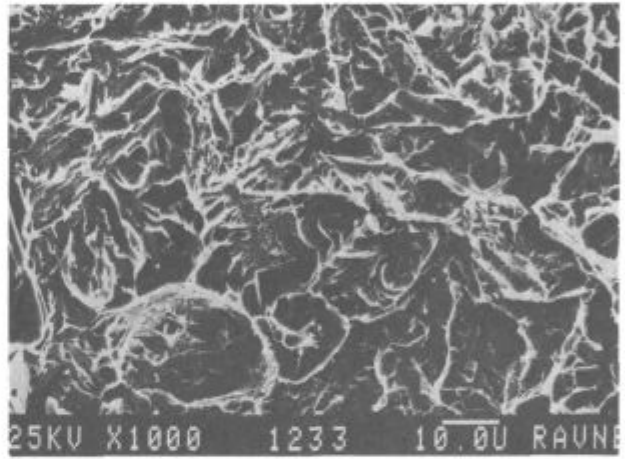
Slika 9:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano na 400° C



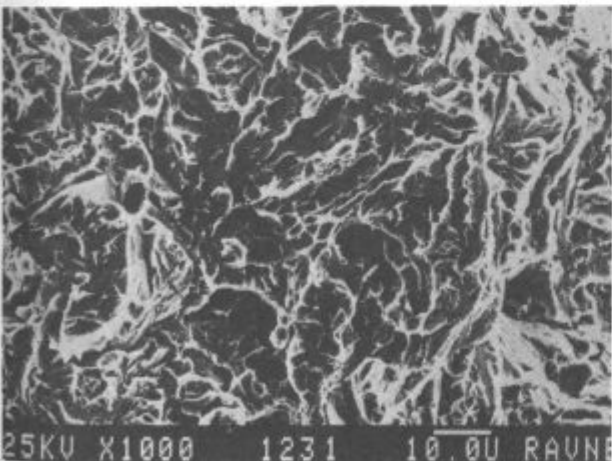
Slika 12:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano 550° C



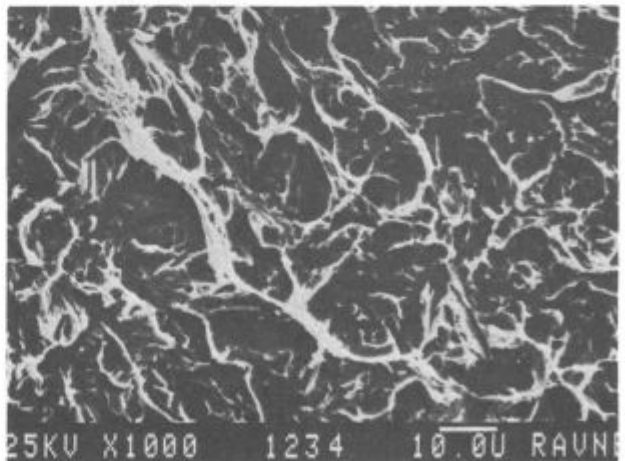
Slika 10:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano 450



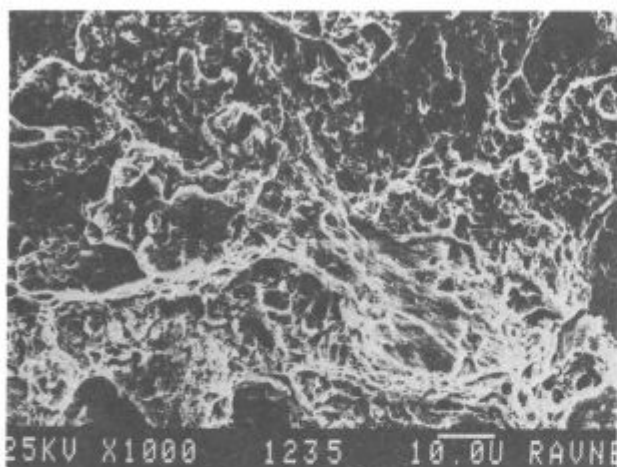
Slika 13:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano 600° C



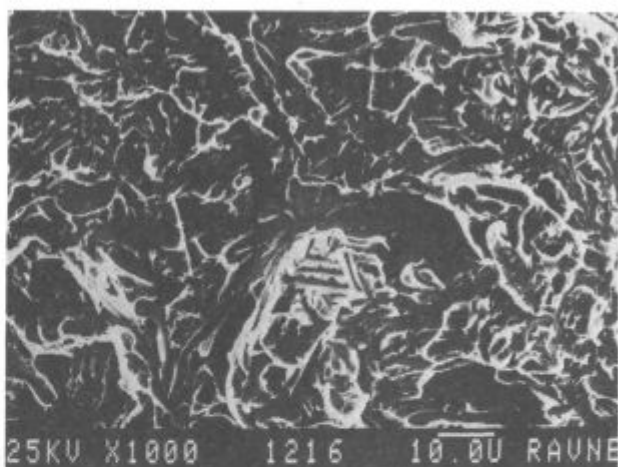
Slika 11:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano 500° C



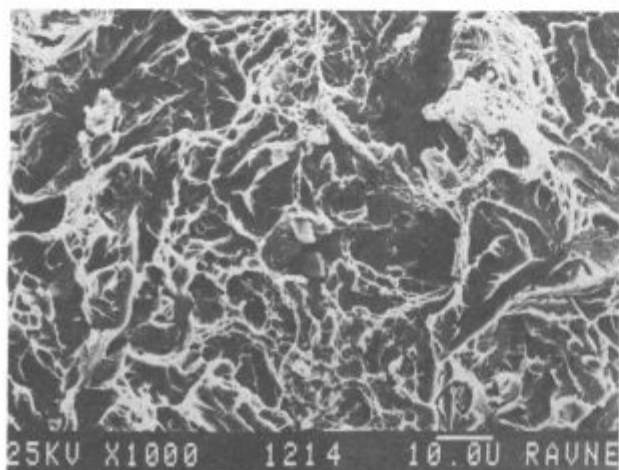
Slika 14:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C olje, popuščano 650° C



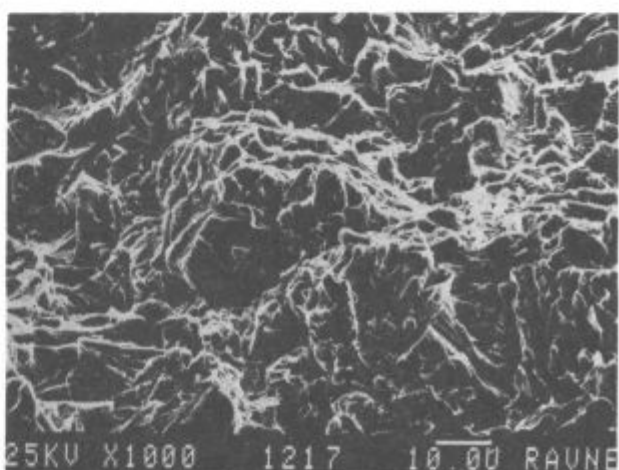
Slika 15:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C olje, popuščano 700° C



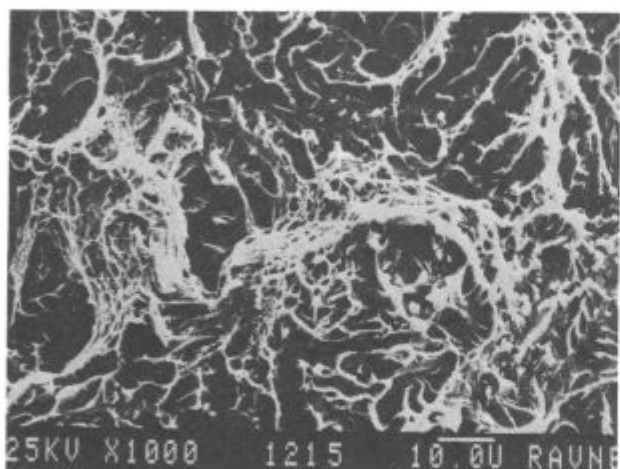
Slika 18:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 400° C



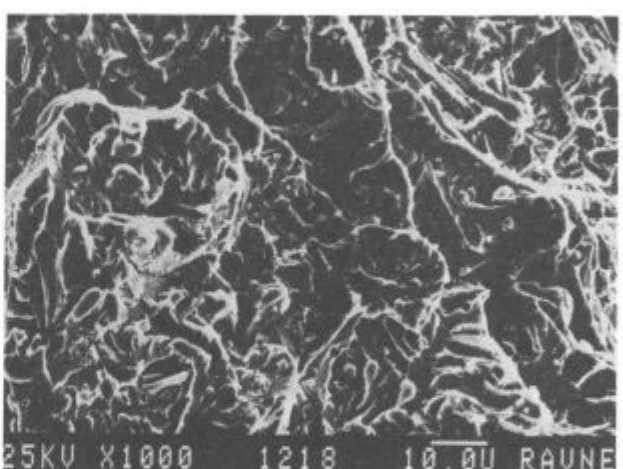
Slika 16:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C v termalno kopel na 520° C



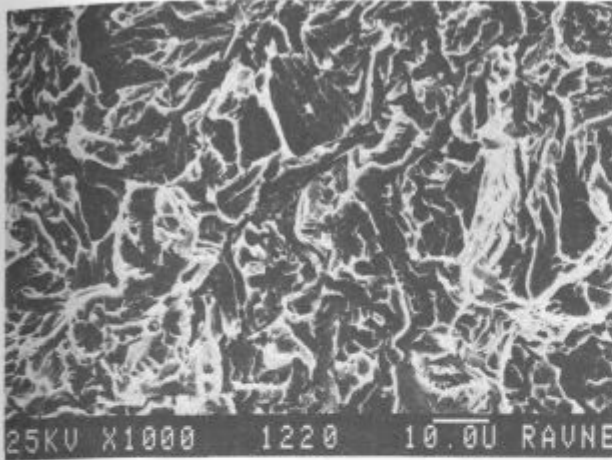
Slika 19:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 450° C



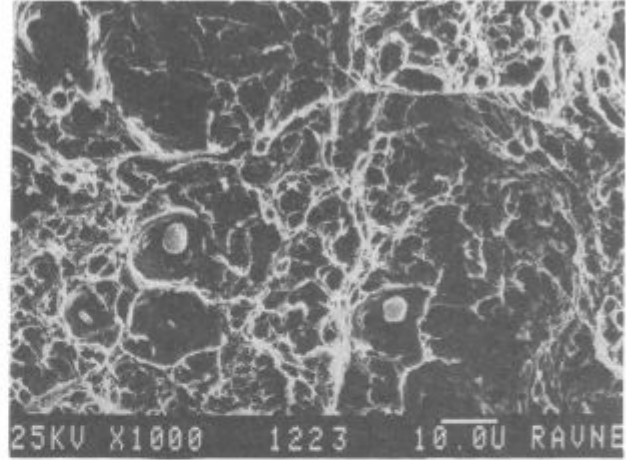
Slika 17:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 200° C



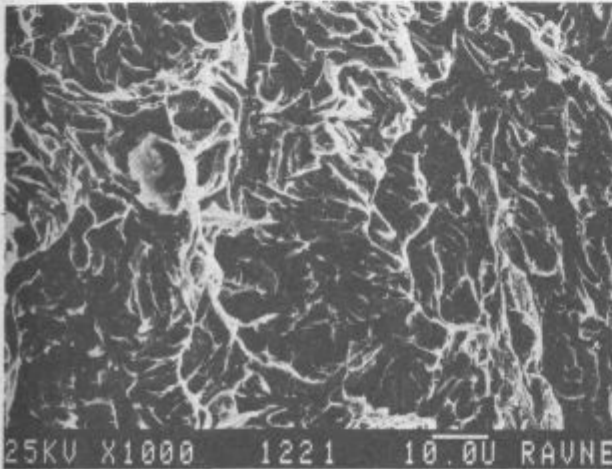
Slika 20:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno
1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 500° C



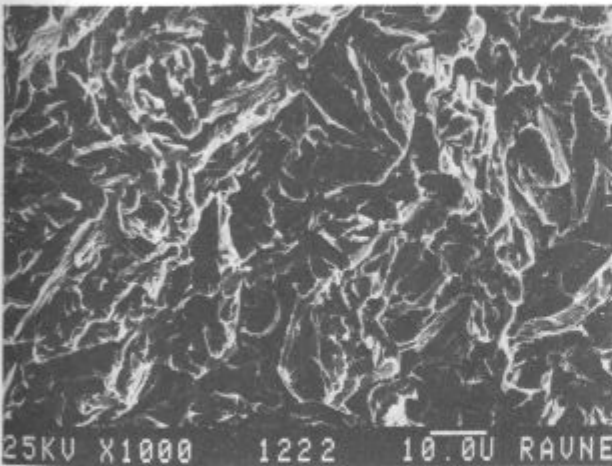
Slika 21:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 550° C



Slika 24:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 700° C



Slika 22:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 600° C



Slika 23:
REM fraktografski posnetek prelomne površine. Kaljeno 1040° C v termalno na 520° C, popuščano na 650° C

Kalilno območje tega jekla je 1010—1050° C v olju ali termalni kopeli. Nad 1060° C nam močno naraste zrno, ki poslabša žilavost, hkrati pa višje kalilne temperature omogočajo boljšo popuščno obstojnost in odpornost proti termičnemu utrujanju, kar pa je zelo važno pri orodjih z večjimi obremenitvami.

Pri kaljenju je izbira kalilnega sredstva odvisna od oblike in kompliciranosti orodja. Za bolj komplicirane oblike izberemo kaljenje v termalni kopeli, kjer zadržujemo orodje določen čas v območju stabilnega avstenita do 430° C; pri tem dobimo več zaostalega avstenita, premene pa potekajo v spodnji bainitni stopnji! Zaradi tega dobimo bistveno manjšo napetost v orodju, manjše deformacije orodij, dobimo pa slabšo žilavost.

Tako kot pri večini jekel, tudi pri jeklu Č 7450 z večjo ohlajevalno hitrostjo dosežemo boljšo žilavost in trdoto, pri tem pa nagnjenost k razpokam in deformacijam raste zaradi večjih napetosti.

Pri popuščanju s padcem tetragonalnosti martenzita raste količina karbidov, vendar so ti tako drobni, da jih z optičnim mikroskopom opazimo šele pri večjih povečavah.

V odvisnosti od temperature kaljenja in hladilnega sredstva je tudi količina zaostalega avstenita, ki razpada po popuščanju pri višjih temperaturah. Pri tem povzroča krhkost, istočasno pa tudi izločanje faz, ki je na mejah zrn očitnejše in povzroča reverzibilno krhkost.

V tabeli 1 je navedena vsebnost zaostalega avstenita $c\gamma$ v % odvisnosti od kalilnega sredstva in temperature popuščanja.

Tabela 1:

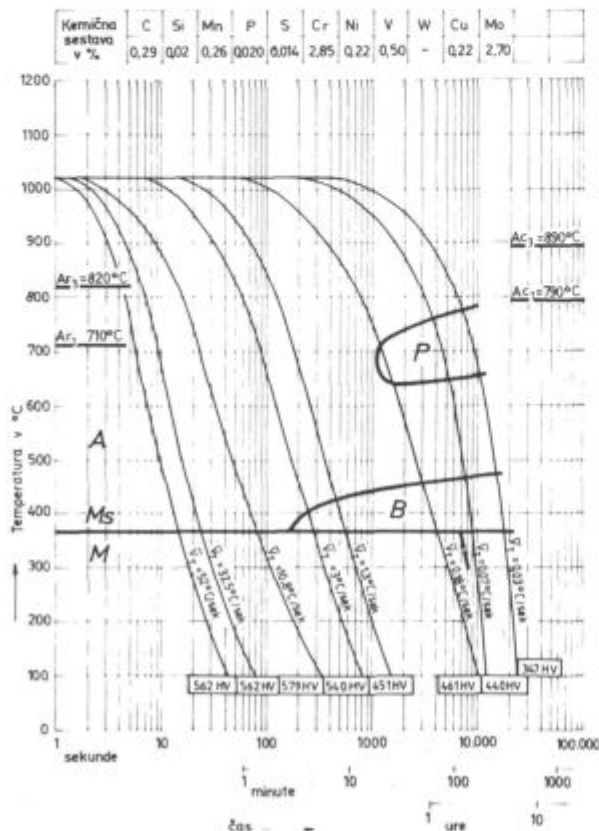
Kaljeno s 1040° C — olje			Kaljeno s 1040° C — termalna		
vzorec	popuščano ° C	$c\gamma$ v %	vzorec	popuščano ° C	$c\gamma$ v %
K	—	4,3	K	—	8,9
1	200	2,7	1	200	6,7
2	400	2,0	2	400	6,7
3	450	1,5	3	450	7,0
4	500	0	4	500	1,4
5	550	0	5	550	0
6	600	0	6	600	0
7	650	0	7	650	0
8	700	0	8	700	0

Premenske točke

Ogrevanje 2,5° C/min. Ohlajevanje 2,5° C/min.
 Ac začetek 790° C Ar začetek 820° C
 Ac konec 890° C Ar konec 710° C
 Ms 360° C

Izdelava TTT diagramov

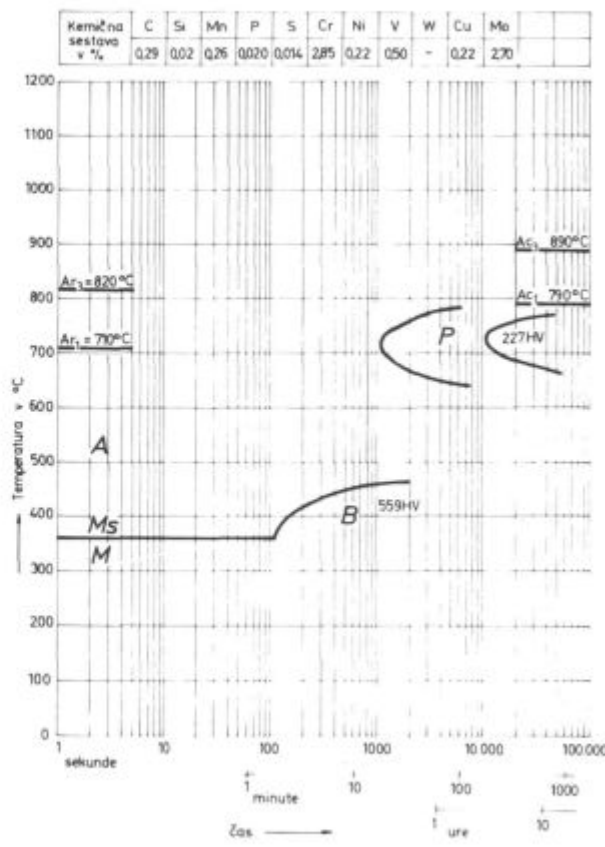
Na sliki 25 je prikazan kontinuirni, na sliki 26 pa izotermni TTT diagram.



Slika 25: Kontinuirni TTT diagram za jeklo Č 7450 — UTOP 33

Zaključek

Namen te publikacije je, da podamo informacijo o dosedanjih raziskavah novega orodnega jekla za delo v vročem Č 7450 — UTOP 33, ki je manjkalo v skupini naših Cr-Mo-V jekel. Priporočamo ga za izdelavo gra-



Slika 26: Izotermni TTT diagram za jeklo Č 7450 — UTOP 33

vurnih vložkov za kovanje pod kladivi in stiskanje pod stiskalnicami, kakor tudi za matrice in trne na horizontalnih kovaških strojih, za kalupe za litje pod pritiskom in utope, za predelavo črnih in barvnih kovin.

Preiskave še niso povsem zaključene, dovoljujejo pa presojo kakovostnih lastnosti tega jekla in področje uporabnosti.

Literatura

1. Pšeničnik J.: Osvajanje jekla UTOPCO2, interna raziskovalna naloga Železarne Ravne O-7405
2. Rodič A., J. Pšeničnik, J. Gradišnik: Lastnosti orodnih jekel za delo v vročem, izdelanih po različnih postopkih, interna raziskovalna naloga Železarne Ravne R-7306
3. Pšeničnik J., Dobič Đ.: Orodna jekla za delo v vročem, namenjena za izdelavo orodij za kovaške preoblikovalne stroje

Vsebina XX. letnika Železarskega zbornika

Šteblaj Anton, A. Ažman — Železarna Jesenice		
Razplinjanje jekla po dupleks postopku EO peč — VOD naprava		
Šegel Jože — Železarna Ravne		
Računalniško podprto krmiljenje proizvodnje in procesov		
Za boljši jezik		
Arh Joža, J. Triplat — Železarna Jesenice		
B. Koroušič — Metalurški inštitut Ljubljana		
Izdelava dinamo jekla po VOD postopku v Železarni Jesenice		
Vodopovec Franc, J. Žvokelj — Metalurški inštitut Ljubljana		
M. Gabrovšek — Železarna Jesenice		
Evolucije mikrostrukture med valjanjem mehkih jekel		
Vodopovec Franc, D. Gnidovec, J. Žvokelj, M. Grašič — Metalurški inštitut Ljubljana		
O vroči deformabilnosti AlMnC zlitin		
Smajič Nijaz — Metalurški inštitut Ljubljana		
Verifikacija matematičnega modela za računalniško vodenje EOP — VOD tehnologije izdelave nerjavnih jekel		
Todorović Gojko, J. Lamut, B. Dobovišek, Metalurški inštitut Ljubljana		
L. Šketa, M. Tolar — Železarna Jesenice		
Izdelava sintra z dodatkom ljubijskega siderita in njegov razpad pri nizkih temperaturah		
Ristecki Ice B. — Železarna Smederevo		
Odstranjevanje žvepla s konvertiranjem grodlja pri LD postopku		
Rodič Jože, M. Švajger, J. Šegel — Železarna Ravne		
W. Holzgruber — Inteco		
1 Današnja stopnja razvoja električnega pretaljevanja pod žilindro, nove proizvodne možnosti in tehnološki razvoj		29
7 Tehnične novice		
13 Prešern Alojz — Metalurški inštitut Ljubljana		
Triletno sodelovanje med metalurškimi inštituti EGS in SFRJ		39
45 Vehovar Leopold, V. Kuhar — Metalurški inštitut Ljubljana		
Ocena odpornosti jekel proti vodikovi krhkosti na osnovi zasledovanja permeabilnosti		73
Uranc Franc — Železarna Ravne		
51 Izbira konstrukcijskih jekel in njihovih toplotnih obdelav za najustreznejšo žilavost		83
61 Koroušič Blaženko, T. Kolenko, M. Kranjc — Metalurški inštitut Ljubljana		
J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko — Železarna Ravne		
J. Miko, F. Novak, B. Brudar — Železarna Jesenice		
Ocena stanja in analiza razvoja uporabe procesnega računalništva v slovenskih železarnah		89
69 Tehnične novice		
Stocca Bogdan — Železarna Jesenice		
Uporabnost in lastnosti jekla Acroni 11 Si		93
Marinšek Filip — Železarna Jesenice		
19 Elmag — nova vrsta nelegirane polgotove elektro pločevine		95
Pšeničnik Jože — Železarna Ravne		
23 Novo orodno jeklo Č 7450 — Utop 33 za delo v vročem		97

Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Člani: dr. Jože Rodič, dipl. inž., Franc
Mlakar, dipl. inž., dr. Aleksander Kveder, dipl. inž., dr. Ferdo Grešovnik,
Darko Bradaškja, tehnični urednik, prof. Regina Razinger, lektor

Oproščeno plačila prometnega davka na podlagi mnenja Izvršnega sveta SRS
— sekretariat za informacije št. 421-1/172 od 23. 1. 1974

Naslov uredništva: SŽ Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, C. železarjev 8,
tel. št. 064/81-341, int. 2619 — Tisk: TK Gorenjski tisk, Kranj

VSEBINA

UDK: 620.194.693.564.669.788.539.56.624.012.46

ASM/SLA: Q26s, EGN, R1d, P10m, U7d

Metalurgija — visokotrdnostna jekla za prednapeti beton — korozijska — vodikova krhkost — permeabilnost

L. Vehovar, V. Kuhar

Ocena odpornosti jekel proti vodikovi krhkosti na osnovi zasledovanja permeabilnosti

Železarski zbornik 20 (1986) 4 s 73—82

To delo obravnava kinetiko elektrokemičnega izločanja vodika na katodnih površinah kovin in s tem v zvezi absorpcijo atomarnega vodika v njihovo notranjost ter vodikovo krhkost. Obdelana je metoda merjenja propustnosti kovin za vodik (permeabilnost), podane pa so tudi tovrstne raziskave permeabilnosti in difuzijske konstante za žico v patentirani in poboljšani obliki.

Avtorski izvleček

UDK: 620.178.746.22.669.15-194.2

ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64

Metalurgija — Žilavost — Trdota — Popučanje

F. Uranc

Izbira konstrukcijskih jekel in njihovih toplotnih obdelav za najustreznejšo žilavost

Železarski zbornik 20 (1986) 4 s 83—88

Primerjava jekel po njihovi trdoti in žilavosti pokaže, da so za izdelke trdot do 40 HRC najustreznejša jekla z vsebnostjo ogljika 0,35—0,4 %.

Ob trdoti 45—50 HRC je najbolj žilavo jeklo Č4730, malo manj Cr-Ni-Mo jekla, ki so enako žilava kot Č4734. To jeklo dosega ob žilavosti 35 J trdoto 50—55 HRC.

V območju trdot 45—57 HRC so — od manjših do večjih trdot — zapored najbolj uporabna jekla Č4731, Č4732, Č4830 in Č1530.

Kromovo jeklo doseže pri 47—53 HRC komaj 12 J žilavosti, visokoogljčna jekla pa še manj.

Jekla z manj kot 0,55 % C normalno in v splošnem lahko dose-gajo žilavost nad 20 J ob trdoti 55 HRC, izjeme so le Cr jekla in vsa tista jekla z 0,40—0,45 % C.

Avtorski izvleček

UDK: 519.68.681.3.06.669.187

ASM/SLA: U4K, D5, D8, D9, X14k, 1-52

Metalurgija — Računalništvo

B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Šegel, F. Rus, J. Mi-ko, F. Novak, B. Bruder, T. Kolenko, M. Kranjc

Ocena stanja in analiza razvoja uporabe procesnega računalništva v Slovenskih železarnah

Železarski zbornik 20 (1986) 4 s 89—92

V članku je podano skupno poročilo o sedanjem stanju na po-dročju računalniško podprtega krmiljenja proizvodnje, procesov in razvoja v Slovenskih železarnah.

Ločeno je opisan potek razvoja uporabe računalnika v posa-meznih organizacijah ter podane osnovne značilnosti opreme in uporabne aplikacije v jeklarnah.

Podan je poudarek povezovanju računalniške in programske opreme v celovit sistem, kar je pogoj za enostaven prenos znanja in izkušenj med uporabniki

Avtorski izvleček

INHALT

UDK: 620.178.746.22:669.15-194.2

ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64

Metallurgie — Zähigkeit — Härte — Anlasshärtung

F. Uranc

Auswahl der Konstruktionsstähle und deren Wärmebehandlungsverfahren zur Erzielung bestgeeigneter Zähigkeit

Zelezarski zbornik 20 (1986) 4 S 83—88

Ein Vergleich der Stähle nach deren Härte und Zähigkeit zeigt, dass für die Erzielung der Härte bis 40 HRC Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,35—0,40% bestgeeignet sind. Bei der Härte von 45—50 HRC zeichnet sich der Stahl Č4730 mit der besten Zähigkeit aus, um einem Teil weniger Zähigkeit sind die Cr-Ni-Mo Stähle die eine gleiche Zähigkeit aufweisen als der Stahl Č4734. Dieser Stahl erreicht neben der Zähigkeit von 35 J eine Härte von 50—55 HRC. Im Bereich der Härte 45—57 HRC sind von der niedrigsten bis zu der höchsten Härte der Reihe nach am besten anzuwendenden Č4731, Č4732, Č4830, Č1430 und Č1530.

Der Chromstahl erreicht bei 47—53 HRC eine Zähigkeit von kaum 12 J, hochkohlenstoffhaltige Stähle noch weniger.

Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0,55% erreichen allgemein eine Zähigkeit über 20 J bei einer Härte von 55 HRC, Ausnahmen sind nur Chromstähle und alle Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,40—0,45% C.

Auszug des Autors.

UDK: 620.194.693.564:669.788:539.56:624.012.46

ASM/SLA: Q26S, Egn, Rld, P10m, U7d

Metallurgie — Hochfeste Stähle für vorgespannten Beton — Korrosion — Wasserstoffsprödigkeit — Permeabilität

L. Vehovar, V. Kuhar

Bewertung der Widerstandsfähigkeit der Stähle gegen Wasserstoffsprödigkeit auf Grund der Verfolgung der Permeabilität

Zelezarski zbornik 20 (1986) 4 S 73—82

Im Artikel wird die Kinetik der elektrochemischen Ausscheidung von Wasserstoff an Katodenoberflächen der Metalle und die damit verbundene Absorption des atomaren Wasserstoffes in das Innere und die Wasserstoffsprödigkeit behandelt. Die Methode für die Messung der Wasserstoffdurchlässigkeit an Metallen (Permeabilität) wird bearbeitet, die disbezüglichen Untersuchungen der Permeabilität und die Diffusionskonstanten für Draht in patentierter und vergüteter Form werden angegeben.

Auszug des Autors

UDK: 519.68:681.3.06:669.187

ASM/SLA: U4k, D5, D8, D9, X14k, 1-52

Metallurgie — Datenbearbeitung

B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Verčko, J. Segel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Bruder, T. Kolenko, M. Kranjc

Bewertung des Zustandes und die Analyse der Entwicklung der Datenbearbeitung in Slowenischen Stahlwerken

Zelezarski zbornik 20 (1986) 4 S 89—92

Im Artikel wird ein gemeinschaftliches Bericht über den heutigen Stand auf dem Gebiet der Rechnerunterstützten Steuerung der Produktion, der Prozesse und der Entwicklung in Slowenischen Hüttenwerken gegeben.

Der Verlauf der Entwicklung der Anwendung von Rechner in den einzelnen Hüttenwerken wird separat beschrieben. Die Grundcharakteristiken der Einrichtungen und die Anwendbarkeit in den Stahlwerken werden beschrieben.

Der Gebundenheit der Rechner und der Programmeinrichtungen in ein einheitliches System wird besonderer Wert gelegt, was auch die Bedingung für eine einfache Übertragung des Wissens und der Erfahrungen zwischen den Anwendern ist.

Auszug des Autors

CONTENTS

UDK: 620.194.693.564.669.788.539.56:624.012.46
ASM/SLA: Q26s, EGr, Rld, P10m, U7d

Metallurgy — High-strength Steel for Prestressed Concrete — Corrosion — Hydrogen Embrittlement — Permeability

L. Vehovar, V. Kuhar

Estimation of the Steel Resistivity to Hydrogen Embrittlement by Analyzing the Permeability

Železarski zbornik 20 (1986) 4 P 73—82

Kinetics of electrochemical precipitation of hydrogen on the cathode surfaces, and in connection with it the absorption of atomic hydrogen into their interior and the hydrogen embrittlement are presented. The method of measuring the hydrogen permeability of metals is treated, and such investigations on the permeability and on the diffusion constants for the as patented and as recovered wire are cited.

Author's Abstract

UDK: 620.178.746.22:669.15-194.2
ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64

Metallurgy — Toughness — Hardness — Tempering

F. Uranč

Selection of Structural Steel and Its Heat Treatment for the Most Suitable Toughness

Železarski vestnik 20 (1986) 4 P 89—92

Comparing steel according to its hardness and toughness shows that products which demand hardnesses up to 40 HRC are the most suitably made of steel with 0.35 to 0.4% carbon.

The most tough steel having the hardness 45 to 50 HRC is Č4730, followed by Cr-Ni-Mo steel having the same hardness as Č4734. The hardness of this steel is 50 to 55 HRC at the toughness 35 J. In the hardness region 45 to 57 HRC the most applicable steel — given here from lower to higher hardnesses — are Č4731, Č4732, Č1430, Č1530.

Chromium steel reaches the toughness of only 12 J at 47 to 53 HRC, and high-carbon steel even less.

Steel with less than 0.55% C can normally and generally reach toughness over 20 J at the hardness of 55 HRC. Exceptions are only chromium steel and the steel with 0.40 to 0.45% C.

Author's Abstract

UDK: 519.68.681.3.06:669.187
ASM/SLA: U4k, D5, D8, D9, X14k, 1-52

Metallurgy — Computer Science

B. Koroušič, J. Rodič, J. Žnidar, A. Veržko, J. Šegel, F. Rus, J. Miko, F. Novak, B. Bruder, T. Kolenko, M. Kranjc

The Review of State and Analysis of Development in Applying Process Computers in Slovene Ironworks

Železarski zbornik 20 (1986) 4 P 83—88

The paper present a joint report on the present state in the computer supported process control and development in Slovene Ironworks.

Separately the development of applying computers in single working organizations with basic characteristics of hardware is described, and successful applications in steel works are given.

The emphasis is given to joining the hardware and software into an integral system which is the basic demand for a simple transfer of knowledge and experiences among the consumers.

Author's Abstract

СОДЕРЖАНИЕ

UDK: 620.178.746.22:669.15-194.2
ASM/SLA: Q6n, Q29, CN, AY, 2-64

Металлургия — вязкость — твердость — снятие напряжения.
F. Uranec

Выбор конструкционных сталей и их термических обработок для наиболее соответствующую вязкость.

Železarski zbornik 20 (1986) 4 С 83—88

Сравнение сталей на основании их твердости и вязкости показывает, что для изделия твердости до 40 HR более всего соответствуют стали с содержанием углерода между 0,35—0,4 %. При твердости 45—50 HR самая вязкая сталь марки Č4730, немного меньше чем стали марок C₇-Ni-Mo, которых вязкость одинакова стали марки Č4734. Эта сталь достигает при вязкости 35 дж твердость 50—55 HR. В области твердостей 45—57 HR находятся в употреблении — последовательно от меньшей до более высокой — стали Č4731, Č4732, Č4830 и Č1530.

Хромистая сталь достигает при твердости 47—53 HR едва 12 дж, а высокоуглеродистые стали даже ещё меньше. Стали с содержанием менее чем 0,55 % С могут нормально и в общем достигнуть вязкость свыше 20 дж при твердости 55 HR. Исключение представляют только хромистые и все прочие стали с содержанием 0,40—0,45 % углерода.

Автореф.

UDK: 620.194:693.564:669.788:539.56:624.012.46
ASM/SLA: Q26s, EGn, R1d, P10m, U7d

Металлургия — стали высокой прочности для перенапряженный бетон — коррозия — водородная хрупкость — проницаемость.

L. Vehovar, V. Kuhar

Оценка сопротивляемости сталей на водородную хрупкость на основании прослеживания проницаемости.

Železarski zbornik 20 (1986) 4 С 73—82

В работе рассмотрена кинетика электрохимического выделения водорода на катодных поверхностях металлов и, в связи с этим, абсорбция атомарного водорода в их внутренность, а также и водородная хрупкость. Обработан метод измерения пропускной способности металлов на водород (проницаемость), также даны отвечающие исследования проницаемости и коэффициента диффузии для проволоки в патентованной и улучшенной форме.

Автореф.

UDK: 519.68:681.3.06:669.187
ASM/SLA: U4k, D5, D8, D9, X14k, 1-52

Металлургия — вычисление

B. Koroušič, J. Rodič in sodelavci

Оценка положения и анализ развития применения вычислительного устройства в словенских металлургических заводах.

Železarski zbornik 20 (1986) 4 С 89—92

В статье подан общий доклад о теперешнем состоянии в области управления производственного процесса в словенских металлургических заводах посредством применения вычислительного устройства. Отдельно дано описание хода развития применения счётчика в отдельных организаций, также приведены основные характеристики оборудования и его применения в сталеплавильных заводах.

Отмечено также значение связанности вычислительного и программного устройства, что представляет собой условие для передачи знания и опытности между потребителями.

Автореф.