

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

VSEBINA	Stran
Kmetič Mitja, F. Vodopivec — Metalurški inštitut Ljubljana F. Vizjak, S. Senčič — Zelezarna Store	
NEKATERE ZNAČILNOSTI JEKEL IZVA- LJANIH IZ KONTINUIRNO ULITIH GREDEC	85
Prešern Vasilij, F. Kandare — Me- talurški inštitut Ljubljana G. Manojlovič, P. Tomažin — Zele- zarna Store Ravnik K., T. Mlakar — Zelezarna Jesenice	
RAFINACIJA JEKLA Z VPIHOVANJEM CaSi V PONEV	95
Kveder Aleksander — Metalurški in- stitut Ljubljana	
PRELOMI KOVIN	105
Arh Joža, K. Hribar, F. Pukl — Zelezarna Jesenice T. Razinger — T.P. Merkur, TOZD Uni- verzal Jesenice B. Koroušič — Metalurški inštitut Ljubljana	
NEKATERI PROBLEMI IZDELAVE AVTO- MATNIH JEKEL V ELEKTRICNIH OBLOČNIH IN SIEMENS-MARTINOVIIH PEČEH	123
TEHNIČNE NOVICE	
Koroušič Blaženko — Metalurški in- stitut Ljubljana J. Rodič — Zelezarna Ravne	
SESTA INTERNACIONALNA KONFERENCA O VAKUUMSKI IN SPECIALNI METALURGIJI	129

LETO 13 ŠT. 3-1979  
ŽEZBBQ 13(3) 85—132(1979)



# ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ZELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 13

LJUBLJANA

SEPTEMBER 1979

Vsebina	Inhalt	Contents	Содержание
Stran	Seite	Page	
Kmetič Mitja, F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič	Kmetič Mitja, F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič	Kmetič Mitja, F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič	Kmetič Mitja, F. Vodopivec, F. Vizjak, S. Senčič
Nekatere značilnosti jekel, izvaljanih iz kontinuirno ulitih gredic 85	Elnige Eigenheiten der Stähle ausgewalzt aus stranggegossenen Knüppeln 85	Some characteristics of steel rolled from continuous cast billets 85	Некоторые характерные особенности сталей, прокатанных из непрерывно отлитых заготовок. 85
UDK: 669.147 ASM/SLA: D9q	UDK: 669.147 ASM/SLA: D9q	UDK: 669.147 ASM/SLA: D9q	UDK: 669.147 ASM/SLA: D9q
Prešern Vasilij, F. Kandare, G. Manojlovič, P. Tomažin, K. Ravnik, T. Mlakar	Prešern Vasilij, F. Kandare, G. Manojlovič, P. Tomažin, K. Ravnik, T. Mlakar	Prešern Vasilij, F. Kandare, G. Manojlovič, P. Tomažin, K. Ravnik, T. Mlakar	Prešern Vasilij, F. Kandare, G. Manojlovič, P. Domažin, K. Ravnik, T. Mlakar
Rafinacija jekla z vpihovanjem CaSi v ponev 95	Raffination von Stahl durch Einblasen von CaSi in die Pfanne 95	Steel refining by CaSi injection into ladle 95	Рафинирование стали при продувании CaSi в ковш. 95
UDK: 669.182.71:669.891 ASM/SLA: D8n	UDK: 669.182.71:669.891 ASM/SLA: D8n	UDK: 669.182.71:669.891 ASM/SLA: D8n	UDK: 669.182.71:669.891 ASM/SLA: D8n
Kveder Aleksander	Kveder Aleksander	Kveder Aleksander	Kveder Aleksander
Prelomi kovin 105	Brüche an Metallen 105	Fractures of metals 105	Изоомы металлов. 105
UDK: 620.178 ASM/SLA: Q26, S13b	UDK: 620.178 ASM/SLA: Q26, S13b	UDK: 620.178 ASM/SLA: Q26, S13b	UDK: 620.178 ASM/SLA: Q26, S13b
Arh Joža, T. Razinger, B. Koroušič, K. Hribar, F. Pukl	Arh Joža, T. Razinger, B. Koroušič, K. Hribar, F. Pukl	Arh Joža, T. Razinger, B. Koroušič, K. Hribar, F. Pukl	Arh Joža, T. Razinger, B. Koroušič, K. Hribar, F. Pukl
Nekateri problemi izdelave avtomatnih jekel v električnih obločnih in Siemens-Martinovih pečeh 123	Einige Probleme der Erzeugung von Automatenstählen in Lichtbogen- und Siemens-Martin Öfen 123	Some problems in producing free-cutting steel in electric arc and open-heart furnaces 123	Некоторые проблемы в производстве автоматных сталей в электродуговых печах. 123
UDK: 669.14.018.23 ASM-SLA: SQA-k	UDK: 669.14.018.23 ASM-SLA: SQA-k	UDK: 669.14.018.23 ASM-SLA: SQA-k	UDK: 669.14.018.23 ASM/SLA: SQA-k
Tehnične novice 129	Technische Nachrichten 129	Technical News 129	Технические новости 129



SLOVENSKE ŽELEZARNE  
**ŽELEZARNA RAVNE**  
n. sol. o.  
RAVNE NA KOROŠKEM

**PROIZVAJAMO:**

- EPŽ JEKLA
- JEKLENE ULITKE
- ODKOVKE
- KOVANO PALIČASTO JEKLO
- VALJANE PROFILE
- GRELNO ŽICO
- VLEČENO, LUŠČENO IN BRUŠENO JEKLO
- LISTNATE VZMETI
- STROJNE NOŽE
- BRZOREZNO ORODJE IN KROŽNE ŽAGE
- PILE IN RASPE
- VALJE ZA HLADNO VALJANJE
- PILGER VALJE IN TRNE
- STROJE IN ORODJA NA PNEVMATSKI POGON
- KOLESNE DVOJICE
- SESTAVLJENE DELE IN ELEMENTE STROJEV IN NAPRAV
- STROJE ZA MEHANSKO PREOBLIKOVANJE (RAZLIČNE STISKALNICE ZA PREOBLIKOVANJE KOVIN V HLADNEM IN VROČEM STANJU ITD.)

**S KVALITETO IN SOLIDNO PROIZVODNJO GARANTIRAMO DOBRO  
SODELOVANJE IN SE PRIPOROČAMO!**



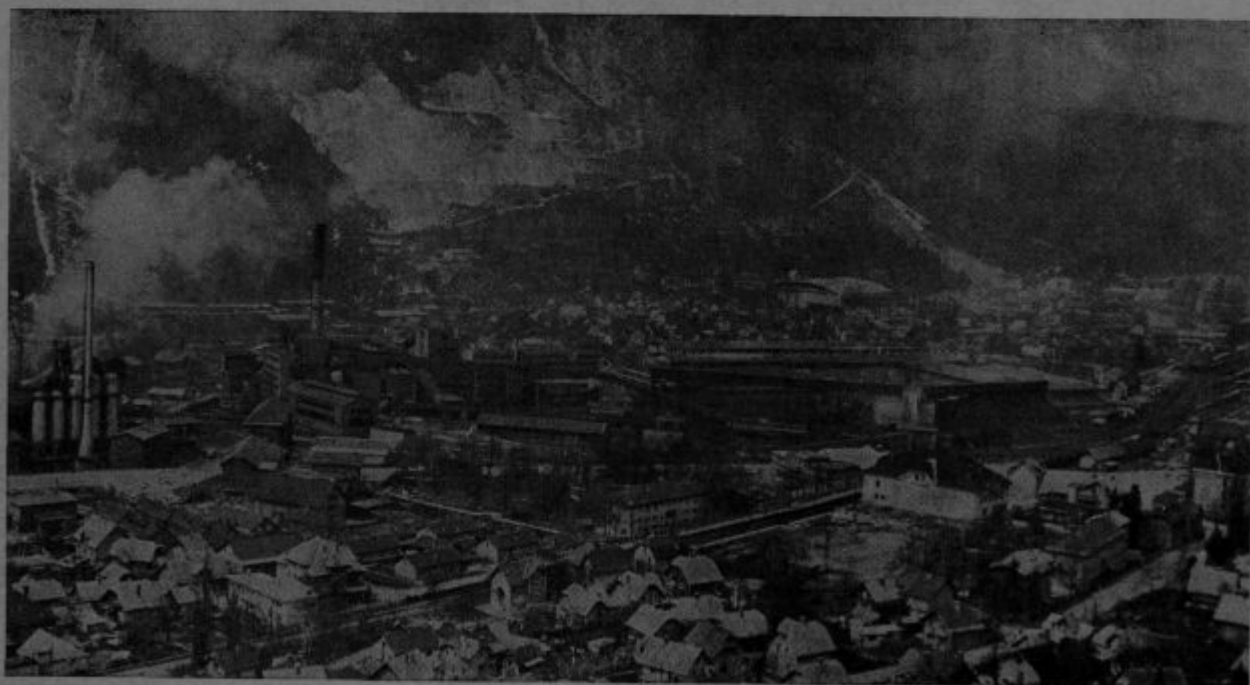
# ŽELEZARNA JESENICE

## Proizvaja:

debelo, srednjo in tanko pločevino  
dinamo trakove  
hladno valjane trakove  
vlečeno, brušeno in luščeno jeklo  
vlečeno žico  
vlečeno žico — patentirano  
pleteno patentirano žico za  
prednapeti beton

hladno oblikovane profile  
cestne varnostne ograje  
jeklene podboje za vrata

dodajni material za varjenje:  
— tehnični plin ARGON  
žičnike  
jekleni sekanec



Panorama Železarna Jesenice

---

---

**For Automation and Process  
Technology from conceptual  
design to turn key system**

Control systems for material,  
materials management  
Analyses laboratories  
Electric arc furnaces  
Basic oxygen furnaces  
(BOF) SIP Converter,  
AOD Converter

Energy dispatch and control

Pollution monitoring

Heat treating optimization

Tailor-made software and systems  
for your specific requirements

**Za avtomacijo in procesno  
tehnologijo od idejnih zasnov  
do sistemov na ključ**

Kontrolni sistemi za  
materialno gospodarstvo

Analitski laboratorij

Elektro obločne peči

Bazične kisikove peči

LD — konverter in kisikovi  
žilavilni postopki s pihanjem  
od spodaj

AOD — konverter

Kontinuirno litje

Sistemi razdelitve in kontrole  
porabe energije

Krmiljenje čistilnih naprav

Optimizacija toplotne obdelave

Software in sistemi prilagojeni  
vašim posebnim zahtevam

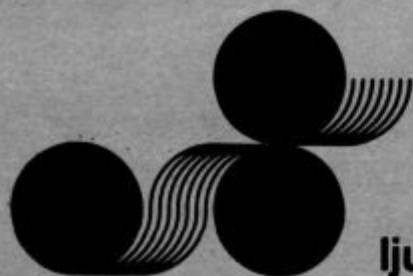
**PROCESS CORPORATION  
P. O. Box 11528  
PITTSBURGH, PA 15238  
U S A**

For more detailed information please  
contact the European representative:

Za podrobnejše informacije se, prosimo,  
povežite z zastopstvom za Evropo:

**I N T E C O — Internationale  
Technische Beratung Ges. m. b. H.  
Bahnhofstrasse 9  
8600 Bruck/Mur, Austria  
Telephone: (038 62) 53 1 10  
Telex: 36 720**

---



## slovenske železarne ljubljana

**ŽELEZARNA JESENICE:** proizvaja debelo in srednjo pločevino ter hladnovaljane trakove različnih kvalitet. Vlečeno, luščeno in brušeno jeklo. Valjano in vlečeno žico v različnih kvalitetah in površinskih obdelavah. Hladno oblikovane profile, ograje za avtoceste in vratne podboje. Žične proizvode: žeblice, bodečo žico, žico, elektrode in praške za varjenje, vrvi in patentirane žice, jeklen pesek, tehnične pline: kisik in argon.

**ŽELEZARNA RAVNE:** proizvaja toplovaljane in kovane profile ter vlečene, brušene in luščene palice, v vseh vrstah kvalitetnih in plemenitih jekel, jeklene odlitke, industrijske nože, brzorezna orodja in krožne žage za obdelavo jekla, kovin in lesa; pile, vzmeti, pnevmatske stroje in orodja, valje za hladno valjanje kovin, univerzalne in kovaške ekscentrične stiskalnice, sestavne dele za vagončke, diske za poljedelske stroje...

**ŽELEZARNA ŠTORE:** proizvaja toplovaljane ter vlečene in brušene palice, v vzmetnih in ostalih kvalitetnih vrstah jekla, specialno surovo železo za livarne, ulitke iz sive in nodularne litne, litoželezne valje, ki jih lahko obdelajo in obrusijo, kontilite profile...

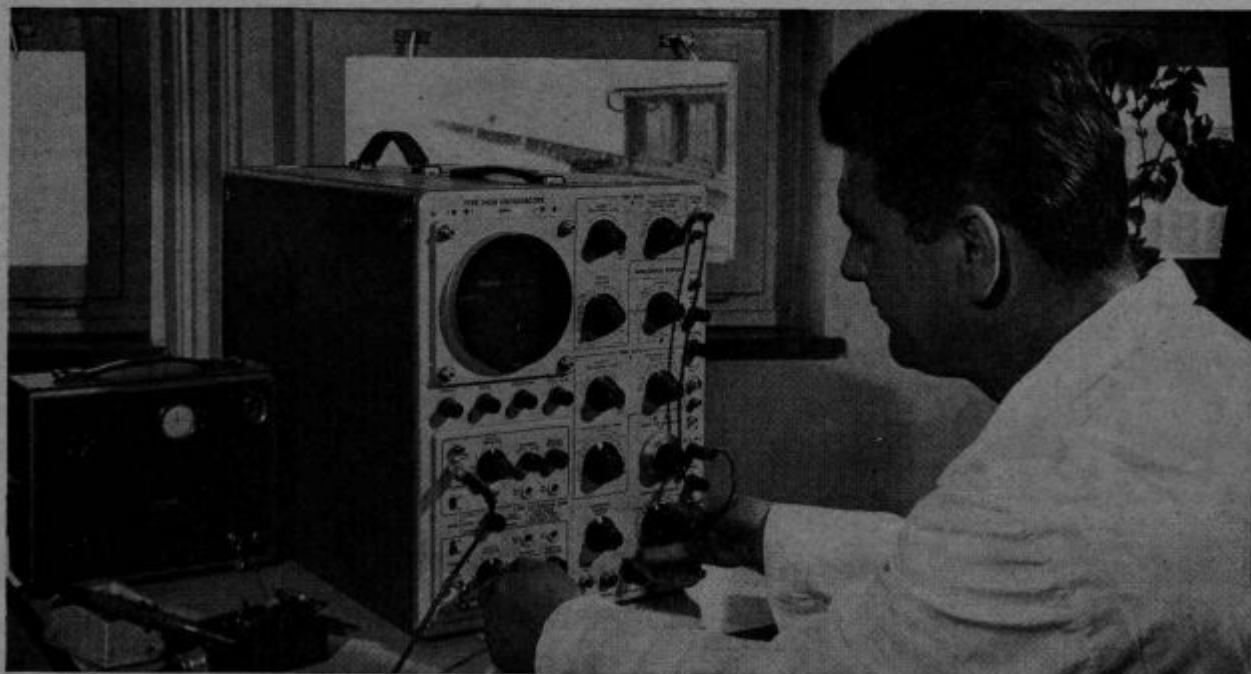
**TOVARNA VERIG LESCE:** proizvaja verige za široko potrošnjo, tehnične in siderne verige, opremo za verige, snežne in zaščitne verige za vozila, kovinske in lesne vijake, hangervijake, razcepke, kovice, odkovke in stiskance...

**PLAMEN KROPA:** proizvaja matične, nastavne in sponške vijake za splošne namene, matične in nastavne vijake srednje klase, matice in kovice.

**TOVIL LJUBLJANA:** proizvaja vijake za kovine in za pločevino z ravnim in križnim utorom, samorezne vijake, vijake za les in kovice....

**ŽIČNA CELJE:** proizvaja iz žice razna pletiva, tkanine, mrežaste armature in predfabrikate, gabione, vibracijska sita in mreže za rudarstvo, žične transportne trakove, vzmeti, žične vložke in drugo žično konfekcijo.

**METALURŠKI INŠTITUT LJUBLJANA:** raziskuje na področjih: priprava mineralnih surovin, surovega železa, proizvodnje jekla, barvne metalurgije, livarstva, termične obdelave in plastične predelave jekla in kovin. Vršni kemijske, metalografske in fizikalne analize.

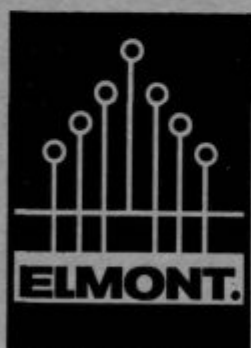


Pri številnih »instrumentiranih preiskavah« jekel v Železarni Ravne je osciloskop zelo pomemben aparat

---

**GP MEGRAD LJUBLJANA**

**TOZD**



**ELMONT**

**ELEKTROMONTAŽNO  
PODJETJE**

**BLED**

**n. sol. o.**

elektromontažno podjetje, BLED, Cankarjeva 1

telefon (064) 77-928 z enoto v Kopru,

Puntarska 1, telefon (066) 21-739.

elektroinstalacije, strelovodi, kabelski razvodi, elektromehanika, ključavničarstvo, hladilna tehnika, izdelava in montaža industrijske avtomatike in grelnih teles, svetlobne reklame, neon transformatorji, vžigalni transformatorji, elektro razdelilne omare — servisna služba.

---

---

Anlagen für

Vakuumm Metallurgie

- Pfannenstandentgassung
- Gießstahlentgassung
- Portionsweise Behandlung in der Pfanne

Pfannenmetallurgie

- Pfannenaufheizen
- Blaslanzenverfahren
- Vakuumfrischen

Roheisen- und Stahlentschwefelung

- Rührverfahren
- Blaslanzenverfahren
- Tauchverfahren

Vollautomatisches Dosieren und Legieren

- für Öfen
- für Pfannen

Planung • Engineering  
Lieferung • Montage  
Schulung

**VACMETAL**  
GESELLSCHAFT  
FÜR VAKUUM-  
METALLURGIE MBH

Heiliger Weg 44,  
D-4600 Dortmund 1  
Telefon: (02 31) 52 8818  
Telex: 8 227 306 vmet d

---





**Slovenske železarne  
TOVARNA VERIG  
LESCE – JUGOSLAVIJA**

**S. P. O.**

Iz našega širokega proizvodnega programa vam nudimo vse vrste verig za industrijo, ladjedelništvo, transport in široko potrošnjo, vijake za lesno predelovalno industrijo ter proizvode in projekte fluidne tehnike.



"Savske elektrarne Ljubljana,  
TOZD Elektrarna Moste – Žirovnica  
proizvaja, transformira  
in razdeljuje električno energijo".

---



## Nekatere značilnosti jekel izvaljanih iz kontinuirno ulitih gredic

UDK: 669-147  
ASM/SLA: D9qM. Kmetič<sup>1</sup>, F. Vodopivec<sup>1</sup>, F. Vizjak<sup>2</sup>, S. Senčič<sup>2</sup>

*Kontinuirno ulivanje jekla se zaradi velike ekonomske prednosti pred konvencionalnim litjem vedno bolj uveljavlja. V članku so opisane fizikalno metalurške značilnosti kontinuirno litega jekla, ki so odvisne od tehnologije litja. Ugotovljeno je, da mehanske lastnosti ustrezajo vrednostim, ki jih predpisujejo standardi.*

mikrostrukture in mehanskih lastnosti ugotovi, ali obstajajo in kakšne so razlike med klasično in konti ulitimi gredicami in profilnim jeklom, ki je bilo iz njih izvaljano. Istočasno pa je zamišljena kot sistematična raziskava konti litega jekla zaradi spoznanja njegovih fizikalno metalurških značilnosti.

### 1. UVOD

Kontinuirno litje ima pred klasičnim litjem prednost zaradi prihranka energije in manjših investicij v valjarne. Tudi izkoristek jekla je boljši zaradi manjšega odreza in manjših izgub zaradi škajanja pri ogrevanju.

S fizikalno-metalurškega vidika ima kontinuirno ulito jeklo kvalitetne prednosti, ki so posledica hitrejšje kristalizacije jekla v primerjavi s strjevanjem ingotov. Blokovno in dendritsko izcejanje legirnih elementov in nečistoč je zato pri enaki sestavi v konti jeklu manjše.

Te prednosti pridejo do izraza le, če je tehnologija litja na zadostnem kvalitetnem nivoju, tako, da je v gredicah čim manj napak, značilnih za konti litje, kot so porozna sredina, notranje in površinske razpoke, mikrolunkerji in makrovključki.

V Železarni Store kontinuirno ulivajo gredice iz kvalitetnih jekel, ki se nato valjajo v različne profile za predelovalno in strojno industrijo. To jeklo je torej neke vrste nov proizvod in treba je dokazati, da je popolnoma enakovredno konvencionalnemu jeklu.

Raziskava ima zato primerjalni značaj in njen namen je, da se na osnovi sistematičnih primerjav

### 2. PROGRAM DELA

Glede na mehanske značilnosti in proizvodni program smo za preiskave izbrali jekla naslednjih kvalitet:

- cementacijska jekla Č.1220, oz. Č.1221 in Č.4320
- jeklo za poboljšanje Č.1431 in Č.1530, oz. Č.1531
- vzmetno jeklo Č.2133

Kemična sestava talin je podana v tabeli 1.

Lastnosti vzmetnega jekla nismo mogli primerjati s klasično izdelanim jeklom, ker smo imeli na razpolago le konti lito jeklo.

Dimenzija brušenih gredic je bila 100 × 100 in 120 × 120 mm. Odrezke gredic smo izvaljali v palice Ø 28 mm.

V literaturi navajajo avtorji podatke, da je pri konti litih gredicah, ki nimajo večjih blokovnih segregacij in notranjih razpok, potrebna za optimalne lastnosti minimalna redukcija 5:1<sup>1</sup>. Pri valjanju gredic v palice smo to minimalno stopnjo redukcije preseglji, saj znaša 16:1.

Raziskave so obsegale:

- makrostrukturo, kristalizacijo in porazdelitev žvepla po preseku gredic in valjancev;
- vrsto, velikost in porazdelitev mikrovključkov ob površini in v notranjosti preseka gredic in valjancev;

<sup>1</sup> SZ Metalurški inštitut v Ljubljani

<sup>2</sup> SZ Železarna Store

Tabela 1: Kemična sestava jekel v %

Talina	Kvaliteta	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu	Sn	As
1	Č.1220	0.17	0.16	0.53	0.017	0.021	0.06	0.03	0.06	—	0.24	—	—
2	Č.1220	0.16	0.22	0.51	0.009	0.021	0.09	—	0.07	—	0.26	0.013	0.015
3	Č.1221	0.17	0.20	0.51	0.013	0.025	0.21	0.05	0.13	0.01	0.20	0.012	0.028
4	Č.4320	0.17	0.28	1.03	0.017	0.015	1.04	0.02	0.04	—	0.11	—	—
5	Č.4320	0.14	0.28	1.05	0.014	0.007	0.84	—	—	0.009	0.20	0.019	0.026
6	Č.4320	0.15	0.33	1.19	0.027	0.016	0.97	0.03	0.14	0.02	0.23	0.015	0.030
7	Č.1431	0.37	0.32	0.70	0.010	0.011	0.15	—	0.07	—	0.28	—	—
8	Č.1531	0.43	0.40	0.68	0.011	0.013	0.008	—	—	—	0.16	—	—
9	Č.1530	0.48	0.23	0.64	0.014	0.006	0.13	—	0.08	—	0.20	0.015	0.028
10	Č.1531	0.44	0.28	0.63	0.009	0.026	0.29	0.01	0.11	0.01	0.25	0.037	0.031
11	Č.2133	0.54	1.53	0.86	0.015	0.018	—	—	—	—	0.22	—	—

Kontinuirno ulite gredice: taline 1, 4, 7, 8 in 11

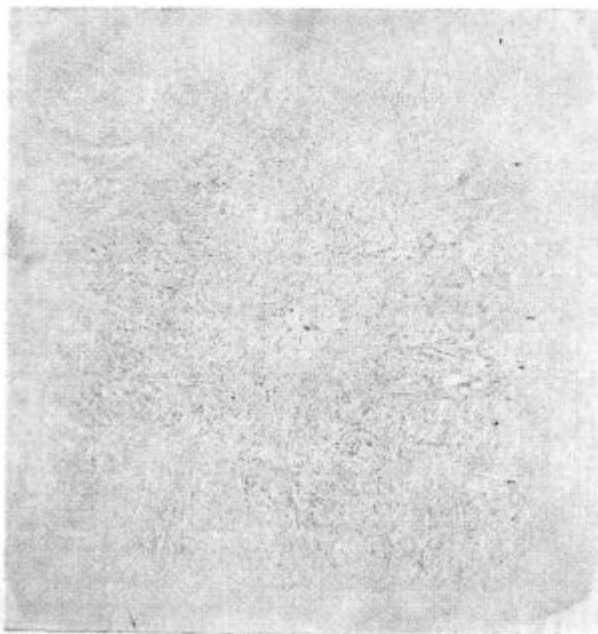
Klasično izdelane gredice: taline 2, 3, 5, 6, 9 in 10

- mikrostrukturo gredic in valjancev;
- intenziteto izcejanja legirnih elementov v obrobni coni in sredini preseka gredic, oz. valjancev in
- mehanske lastnosti valjancev.

### 3. REZULTATI

#### 3.1. Porazdelitev žvepla in makrostruktura gredic

Na Baumannovih odtisih, narejenih na ploščah prečno izrezanih iz konti litih gredic, se dobro razloči obrobna cona po videzu čistejšega jekla,



Slika 1

Baumannov odtis konti ulite gredice (Č.2133, talina 11)

Fig. 1

A sulphur print of continuous cast billet (Č. 2133, Melt 11)

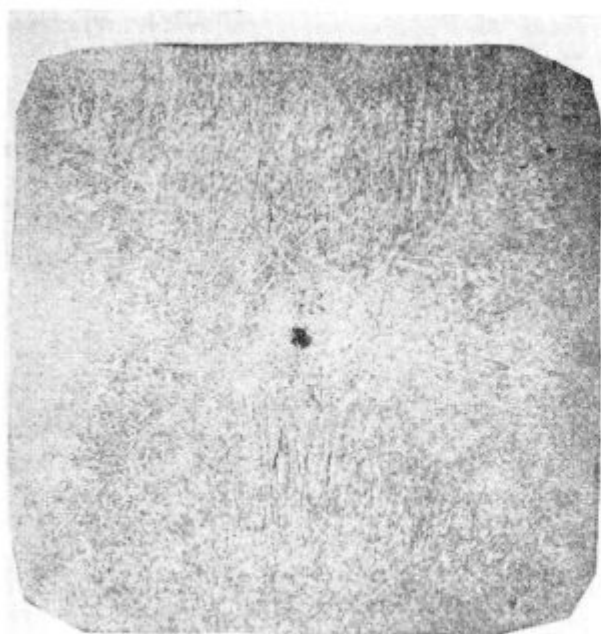
ki je široka do 10 mm. Po videzu je v sredini gredic več sulfidnih vključkov. Različno močna potemnitev odtisov in mikroskopske preiskave kažejo, da se je večina sulfidnih vključkov pri kristalizaciji izločila v meddendritskih prostorih (sl. 1).

Odtisi so pokazali, da so na meji med obrobno cono in cono transkristalov pogosto večji vključki ponovčne žindre, oksisulfidne narave. Radialne razpoke, ki nastanejo pri strjevanju zaradi termičnih in mehanskih napetosti, so delno zapolnjene z žlindro, katere glavna sestavina so oksidi železa, v nekaterih primerih pa so se na teh mestih nabrali tudi večji sulfidni vključki.

Tudi na Baumannovih odtisih klasično izdelanih gredic se vidi razlika med obrobno cono in likvacijskim kvadratom. Razlika pride bolj do izraza pri jeklu, ki ima večjo vsebnost žvepla. Po videzu čistejša obrobna cona izvira iz hitro strjene skorje ingotov in je ekvivalentna zunanji coni konti ulitih gredic.

Odtisi palic, izvaljanih iz konti ulitih in konvencionalnih gredic, so skoraj enaki. Do nekaj milimetrov debela plast jekla ob robu, ki je po videzu čistejša, ni enakomerno debela. Na nekaterih mestih je tok materiala pri deformaciji privedel na površino jekla iz likvacijskega kvadrata, kjer so sulfidni vključki večji.

Makrostrukturne značilnosti smo odkrili z makrojedkanjem plošč, ki smo jih uporabili za Baumannove odtise. Ob robu je približno 10 mm široka cona, komaj opazno pravokotno na površino usmerjenih kristalov. Sledi ji transkristalna cona stebrastih dendritov, ki so usmerjeni pravokotno na površino gredice. Skorja gredice se strdi zelo hitro in kristali so v tej coni zelo drobni. Gredica se zaradi krčenja odlepi od kobile, temperaturni gradient se bistveno zmanjša in posledica počasnejše kristalizacije so veliki stebrasti kristali. V sredini, kjer se talina strdi

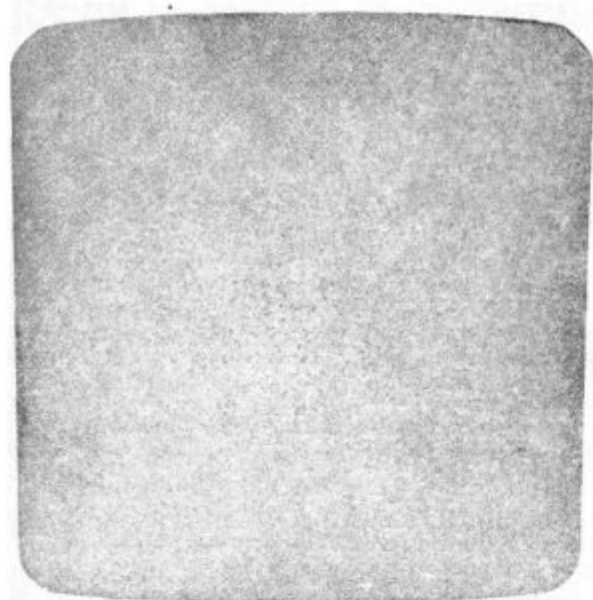


Slika 2

Pov. 0,8 ×. Makrostruktura konti ulite gredice (Č.1431, talina 7)

Fig. 2

Mag. 0,8 ×. Macrostructure of continuous cast billet (C. 1431, Melt 7)



Slika 3

Pov. 0,8 ×. Makrostruktura konvencionalne gredice (Č.1531, talina 10)

Fig. 3

Mag. 0,8 ×. Macrostructure of conventional billet (Č. 1531, Melt 10)

nazadnje, so kristali poligonalni in neorientirani. Pri makrojedkanju so se napake, značilne za konti lite gredice, ki se vidijo že na Baumannovih odtisih, še močneje odkrile, posebno porozna sredina in radialne razpoke (sl. 2).

V konvencionalnih gredicah nismo odkrili nobenih napak, le močneje se je jedkala z oligo-elementi in z večjimi nekovinskimi vključki bogatejša sredina gredic (sl. 3).

### 3.2. Porazdelitev in velikost nekovinskih vključkov v gredicah in valjanih palicah

V konti ulitih gredicah smo našli silikatne, sulfidne in tudi posamezne oksidne vključke. Večje silikatne vključke, ki so globularni, smo opazili predvsem v sredini preseka gredic in na meji drobnorzmate robne cone in stebrastih kristalov (sl. 4). Vključki manganovega sulfida v obrobni coni so globularni, zelo fini in enakomerno porazdeljeni po preseku. V sredini preseka gredic opazimo enak tip sulfidov, v meddendritskih prostorih pa sulfide evtektičnega tipa (sl. 5).



Slika 4

Pov. 100 ×. Silikatni vključki v sredini preseka konti ulite gredice (Č.1220, talina 1)

Fig. 4

Mag. 100 ×. Silicate inclusions in the centre of the billet cross section (C. 1220, Melt 1)



Slika 5

Pov. 200 ×. Evtetični vključki manganovega sulfida (Č.1120, talina 1)

Fig. 5

Mag. 200 ×. Eutectic sulphide inclusions (C. 1220, Melt 1)

Tabela 2: Povprečna dolžina in gostota sulfidnih vključkov in vsebnost žvepla v gredicah

Talina	Kvaliteta	Obrobna cona			Sredina gredice		
		$L_r$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_r$ ( $\text{mm}^{-2}$ )	% $S_r$	$L_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_s$ ( $\text{mm}^{-2}$ )	% $S_s$
1	Č.1220	—	—	0.016	—	—	0.0165
2	Č.1220	17.8	43.4	0.025	23.6	20.6	0.024
3	Č.1221	16.1	41.4	0.026	21.5	25.5	0.024
4	Č.4320	—	—	0.019	—	—	0.019
5	Č.4320	22.0	9.3	0.010	21.2	8.6	0.010
6	Č.4320	24.5	24.7	0.017	25.4	14.1	0.014
7	Č.1431	—	—	0.011	—	—	0.010
8	Č.1531	—	—	0.013	—	—	0.012
9	Č.1530	20.5	11.1	0.010	22.6	7.2	0.008
10	Č.1531	20.0	55.0	0.030	24.1	29.3	0.029
11	Č.21333	—	—	0.019	—	—	0.019

Tabela 3: Povprečna dolžina in gostota sulfidnih in silikatnih vključkov v valjanih palicah

Talina	Kvaliteta	Obrobna cona		Sredina valjanca		
		$L_r$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_r$ ( $\text{mm}^{-2}$ )	$L_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_s$ ( $\text{mm}^{-2}$ )	
1	Č.1220	14.1	5.8	15.4	11.4	silikati
		20.2	17.7	27.0	20.3	
2	Č.1220	18.3	37.9	17.3	46.7	
3	Č.1221	15.8	70.1	17.1	49.7	
4	Č.4320	14.7	38.3	18.2	39.2	
5	Č.4320	13.0	5.1	15.4	16.0	
6	Č.4320	16.3	32.6	21.5	42.0	
7	Č.1431	13.8	16.1	12.9	18.1	silikati
		38.4	14.0	25.7	18.3	
8	Č.1531	17.3	14.1	20.4	27.2	silikati
		26.6	3.3	25.1	6.6	
9	Č.1530	14.5	12.9	17.5	17.6	
10	Č.1531	18.8	76.9	22.4	68.7	
11	Č.2133	18.2	66.7	23.1	37.5	silikati
		—	—	31.9	2.8	

Jeklo klasično izdelanih gredic ima poleg sulfidnih in posamičnih oksidnih tudi nize aluminatnih vključkov.

Povprečno dolžino ( $L$ ) in gostoto ( $A$ ) sulfidnih in silikatnih vključkov v obrobni coni in v sredini preseka gredic, oz. valjancev smo določili z optičnim mikroskopom. Kot obrobno cono smo pri gredicah predpostavili 20 mm, pri valjanih palicah pa 5 mm širok pas. Pri meritvah smo upoštevali le vključke daljše od 10  $\mu\text{m}$  in nize vključkov, če razdalja med njimi ni bila manjša od 5  $\mu\text{m}$ .

V tabeli 2 so poleg rezultatov meritev v jeklu gredic navedene še vsebnosti žvepla v obrobni coni in na sredini gredic. Za konti lite gredice so navedeni le podatki o vsebnosti žvepla, ker po tej metodi ni možno izmeriti gostote in velikosti globularnih vključkov v ulitem jeklu. Povprečna dolžina vključkov manganovega sulfida je v sre-

dini gredic nekoliko daljša, gostota pa manjša kot v obrobni coni. Pri enaki količini žvepla je v obrobni coni gostota vključkov do 100 % večja kot v sredini gredic. Dolžina vključkov se med talinami le malo razlikuje, večja je razlika pri gostoti, ki je odvisna od vsebnosti žvepla. Taline z več žvepla imajo sorazmerno večjo količino vključkov na enoto površine.

Kemijska analiza kaže, da je vsebnost žvepla v obrobni coni in na sredini preseka skoraj enaka. Razlika v potemnitvi Baumannovega odtisa med robno cono in sredino je posledica velikosti vključkov. Drobnejši vključki ob robu ne dajo izrazite potemnitve.

Rezultati meritev dolžine in gostote sulfidnih in silikatnih vključkov v palicah, izvaljanih iz konvencionalnih in konti ulitih gredic, so navedeni v tabeli 3.

Tabela 4: Velikost primarnih in sekundarnih kristalnih zrn gredic in valjancev

Talina	Kvaliteta	Gredice				Valjanci			
		Primarna zrna		Sekundarna zrna		Primarna zrna		Sekundarna zrna	
		I ( $\mu\text{m}$ )	ASTM	I ( $\mu\text{m}$ )	ASTM	I ( $\mu\text{m}$ )	ASTM	I ( $\mu\text{m}$ )	ASTM
1	Č.1220	17.9	8.2	11.7	9.5	13.7	9.0	12.0	9.4
2	Č.1220	19.2	8.0	10.1	9.9	12.4	9.3	9.7	10.0
3	Č.1221	13.4	9.0	9.8	10.0	12.1	9.4	9.6	10.0
4	Č.4320	20.0	7.9	16.3	8.5	14.9	8.8	15.7	8.6
5	Č.4320	14.5	8.8	8.5	10.3	9.3	10.1	6.9	10.9
6	Č.4320	11.2	9.6	8.9	10.2	8.7	10.3	7.3	10.8
7	Č.1431	18.8	8.1	11.2	9.6	11.6	9.5	10.0	9.9
8	Č.1531	17.8	8.3	10.5	9.8	10.6	9.7	9.8	9.9
9	Č.1530	12.5	9.3	7.6	10.7	11.2	9.6	7.4	10.7
10	Č.1531	10.2	9.8	6.9	10.9	10.0	9.9	6.8	10.9
11	Č.2133	14.9	8.8	12.1	9.4	11.4	9.5	11.8	9.4

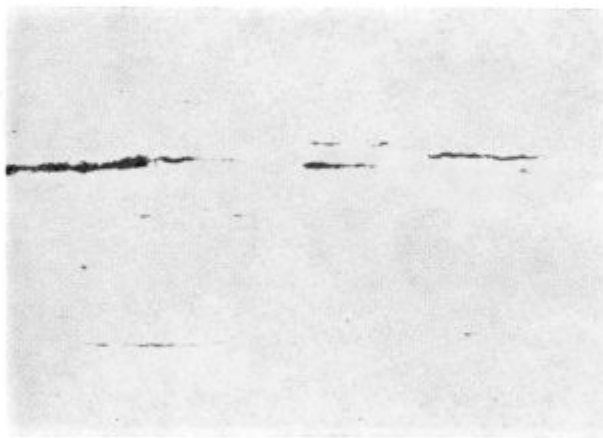
Odrezki gredic so bili kratki, valjanje je bilo izvršeno hitro in zaradi majhnega temperaturnega padca plastičnost jekla ni bistveno padla. Temperatura ogrevanja za valjanje je bila višja od 1200°C in v jeklu je prišlo do sferoidizacije sulfidnih vključkov. To in dejstvo, da je prišlo pri valjanju do podaljšanja manjših vključkov, ki jih pri gredicah nismo upoštevali in cepljenje večjih sulfidov, so verjetno vzroki, da se njihova dolžina pri valjanju ni bistveno spremenila. Tudi pri gostoti ni več take razlike med obrobno cono in sredino. V nekaterih primerih je v obeh področjih

vpliv na lastnosti jekla imajo zato silikatni vključki, ki so bistveno daljši (sl. 6). Zlasti so neugodni dolgi nizi teh vključkov.

### 3.3 Mikrostruktura gredic in valjancev

Rezultati meritev, navedeni v tabeli 4, predstavljajo povprečne intercepcijske dolžine, izmerjene pri povečavi 500 $\times$ , in razrede primarnih in sekundarnih kristalnih zrn jekla gredic in valjanj po ASTM klasifikaciji.

Avstenitna zrna konti ulitih gredic se po preseku med seboj dokaj razlikujejo. V transkristalni coni se dobro vidi dendriška struktura, posamezna zrna pa so zelo velika. V sredini so zrna poligonalna in enakomernejša. V normalizirani strukturi pri jeklih Č.4320 (sl. 7 in 8) in Č.2133 se še dobro opazi razlika med posameznimi conami, pri ostalih jeklih pa je razlika manj izrazita. Pri jeklih za poboljšanje so perlitna zrna različno velika in večja zrna imajo Widmannstätensko strukturo.



Slika 6

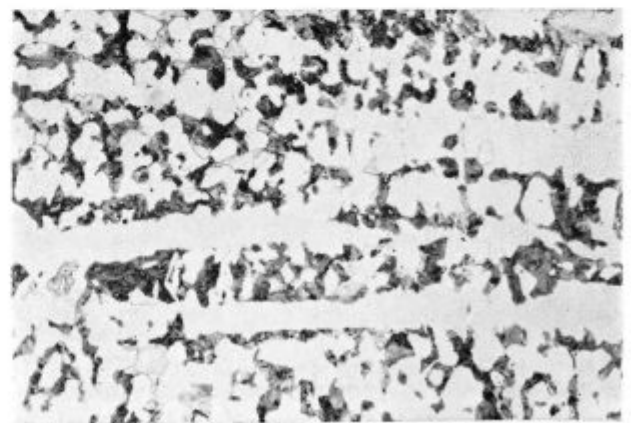
Pov. 100  $\times$ . Silikatni in drobni sulfidni vključki v palici izvaljani iz konti ulite gredice (C.1220, talina 1)

Fig. 6

Mag. 100  $\times$ . Silicate and small sulphide inclusions in a bar rolled from continuous cast billet (C.1220, Melt 1)

enaka ali je celo gostota večja v sredini. Tako porazdelitev povzroči pregnetenje materiala pri valjanju in so jo pokazali tudi Baumannovi odtisi.

Vključki manganovega sulfida v konti jeklih so krajši kot v konvencionalnem jeklu. Tudi število vključkov na enoto površine je majhno, saj vsebujejo te taline sorazmerno malo žvepla. Večji

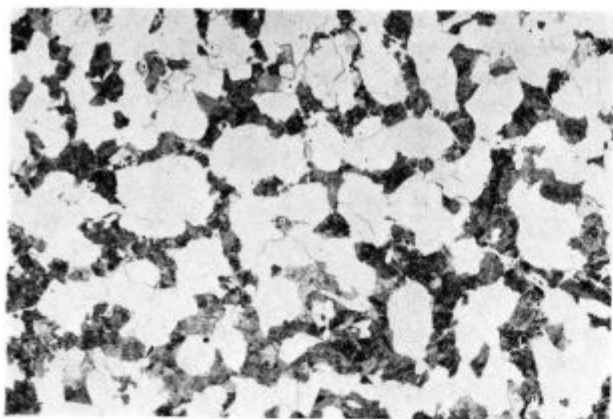


Slika 7

Pov. 100  $\times$ . Normalizirana mikrostruktura v transkristalni coni konti ulite gredice jekla C.4320 (talina 4)

Fig. 7

Mag. 100  $\times$ . Microstructure in columnar zone of continuous cast billet of Č.4320 steel (Melt 4), normalized

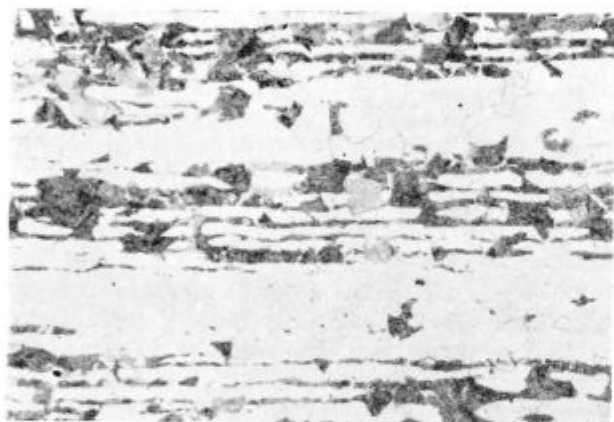


Slika 8

Pov. 100 ×. Normalizirana mikrostruktura v sredini konti ulite gredice jekla Č.4320 (talina 4)

Fig. 8

Mag. 100 ×. Microstructure in the centre of continuous cast billet of C. 4320 steel (Melt 4), normalized



Slika 9 in 10

Pov. 100 ×. Normalizirana mikrostruktura iz konti jekla iz valjane palice kvalitete Č.4320 (talina 4) in Č.1531 (talina 8)

Figs. 9 and 10

Mag. 100 ×. Microstructure of bars rolled from continuous cast C. 4320 (Melt 4) and C. 1531 (Melt 8) steel, normalized

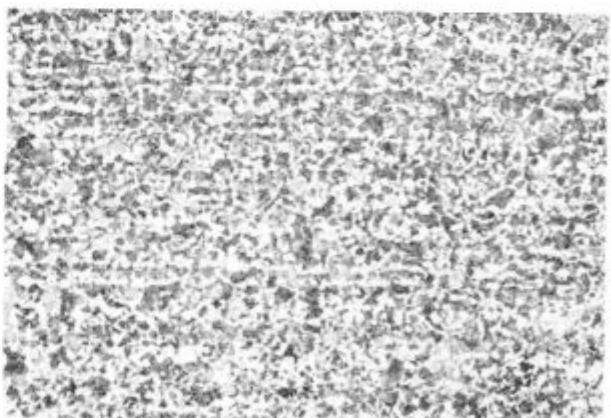
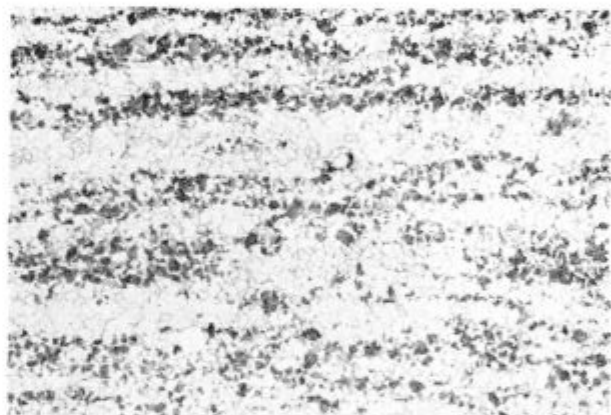
Po valjanju konti ulitih gredic so avstenitna zrna manjša za 0,7 do 1,4 razreda ASTM. Približno enako, oz. nekoliko manjše zmanjšanje opazimo tudi pri konvencionalnih talinah. Valjano jeklo ima bolj drobnnozrnato normalizirano feritno per-

litno mikrostrukturo v primerjavi z jeklom v gredicah pri kvalitetah Č.4320 in Č.1431. Pri ostalih kvalitetah so sekundarna zrna po normalizaciji skoraj enako velika v gredicah in končnih valjancih. Odstopanja so v mejah merilnih napak in so delno posledica različnih ohlajevalnih hitrosti.

Kristalna zrna v konti litih gredicah so večja kot v konvencionalnih gredicah, ker konti gredice niso predelane. Razlika v velikosti kristalnih zrn pri valjancih pa ni posledica različne stopnje celotne predelave jekla, saj je ta zadostna tudi pri konti jeklu, temveč izdelave jekla (sl. 9, 10, 11 in 12). Konti jeklo nima aluminija, ki vezan v nitrid zavira rast zrn. Največje so razlike pri jeklu Č.4320, pri katerem so sekundarna zrna konti jekla za več kot dva razreda ASTM večja kot pri konvencionalnem jeklu. Pri drugih kvalitetah so razlike manjše.

### 3.4. Homogenost jekla

Največji vpliv na velikost segregacij imajo: hitrost strjevanja skorje, temperaturni gradient in intenzivnost mešanja taline za strjevalno fron-



Slika 11 in 12

Pov. 100 ×. Mikrostruktura jekla palic iz valjanih in konvencionalnih gredic kvalitete C.4320 (talina 5) in Č.1530 (talina 9)

Figs. 11 and 12

Mag. 100 ×. Microstructure of bars rolled from conventional billets of C. 4320 (Melt 5) and C. 1530 (Melt 9) steel, normalized.



Tabela 5: Mehanske lastnosti jekla valjanih palic v normaliziranem stanju

Talina	Kvaliteta	Meja plastič. $\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	Natezna trdnost $\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Raztezek $\delta$ (%)	Kontrakcija $\psi$ (%)	Temp. normalizacije (°C)
1	Č.1220	311	454	37.9	64.8	900
2	Č.1220	314	463	37.6	64.0	900
3	Č.1221	360	471	42.4	64.0	900
4	Č.4320	312	495	35.8	60.6	900
5	Č.4320	398	524	36.2	69.1	900
6	Č.4320	376	519	38.4	70.4	900
7	Č.1431	383	638	31.8	52.7	890
8	Č.1531	370	643	27.6	47.4	870
9	Č.1530	456	700	27.8	44.7	870
10	Č.1531	445	654	33.0	52.7	870
11	Č.2133	536	870	22.6	34.6	860

Tabela 6: Mehanske lastnosti nekaterih jekel po kaljenju, oz. popuščanju

Talina	Kvaliteta	Meja plastič. $\sigma_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	Natezna trdnost $\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Raztezek $\delta$ (%)	Kontrakcija $\psi$ (%)	Žilavost $\rho_1$ (J)	Vrtilno up. trdn. $\sigma_{vu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{vu}/\sigma_m$	Temp. kalj. (°C)	Temp. popušč. (°C)
1	Č.1220	475	650	26.2	65.2	105	334	0.51	900	—
2	Č.1220	437	634	27.7	69.8	118	333	0.53	900	—
4	Č.4320	818	937	15.7	47.5	42	419	0.45	870	—
5	Č.4320	812	968	18.4	41.5	39	403	0.42	870	—
7	Č.1431	506	739	21.5	57.1	53	347	0.47	870	600
8	Č.1531	512	755	22.4	55.8	42	356	0.47	850	600
10	Č.1531	551	803	23.7	56.5	50	371	0.46	850	600
11	Č.2133	1255	1344	10.2	19.6	12	569	0.42	850	500

to. Ti dejavniki so najbolj odvisni od pregretja jekla in hitrosti sekundarnega ohlajanja, od njih pa je tudi odvisna kristalizacijska struktura gredic.

V konti in v klasično izdelanih gredicah so izceje večje v likvacijskem kvadratu kot ob robu gredic. Pri konti gredicah cementacijskih jekel znašajo maksimalne koncentracijske razlike 30 % pri Mn, 25 % pri Si in 20 % pri Cr. Izceje Mn in Cr so v konvencionalnih gredicah nekaj večje, izceje Si pa so manjše. Razlike med dendritskimi izcejami v obrobni coni in likvacijskem kvadratu so manjše pri konti gredicah.

Izceje v jeklih za popljšanje so v likvacijskem kvadratu konvencionalnih gredic nekaj večje kot v konti gredicah in znašajo pri Mn do 50 % in pri Si do 45%. V obrobni coni pa so izceje pri obeh vrstah gredic manjše, razlike med obema vrstama jekla pa niso sistematične. Pri vzmetnem jeklu je intenziteta izcejanja Mn enaka kot pri jeklih za popljšanje, izceje silicija pa so večje in znašajo v obrobni coni 40 %, v likvacijskem kvadratu pa 80 %.

Izceje v palicah, izvaljanih iz konti jekla, so do polovico manjše kot v gredicah, ker je prišlo pri ogrevanju za valjanje do homogenizacije

jekla. Pri konti jeklu Č.1220 so v absolutnem smislu zanemarljivo majhne. Pri jeklu Č.4320 znaša največja absolutna razlika v sredini palice pri Mn 0,25 %, pri Si 0,02 % in pri Cr 0,38 %. Nekaj manjše so koncentracijske razlike pri Mn v jeklih za popljšanje, izceje Si pa so nekaj večje. V vzmetnem jeklu Č.2133 so absolutne razlike pri Mn majhne (0,1 %), pri Si, ki močneje izceja, pa znašajo v obrobni coni 0,24 % in na sredini 0,52 %.

### 3.5. Mehanske lastnosti jekel

Mehanske lastnosti palic v smeri valjanja v normaliziranem stanju so navedene v tabeli 5.

Rezultati kažejo, da so lastnosti nelegiranih jekel skoraj enake pri obeh vrstah jekel. Pri legiranem cementacijskem jeklu Č.4320 imata konvencionalni jekli za približno 25 % večjo mejo plastičnosti in 15 % večjo kontrakcijo, pri natezni trdnosti in raztezkju pa so razlike precej manjše. Podobne razlike opazimo tudi pri jeklih za popljšanje. Konti jeklo ima zlasti nižjo mejo plastičnosti (20 %), pri ostalih lastnostih pa so razlike manjše.

Za vrednotenje mehanskih lastnosti teh jekel je zelo pomembna trajna dinamična trdnost, saj so elementi, ki se iz teh jekel izdelujejo za strojno industrijo, večinoma obremenjeni z izmeničnimi napetostmi. Dinamično trajno trdnost smo določili z vrtilno upogibnimi preizkusi po metodi stopnic. Hitrost vrtenja je znašala 3000 obr/min; preizkušanje pa smo prekinili, če je preizkušaneec zdržal  $4,5 \cdot 10^6$  obratov. Nelegirana cementacijska jekla smo za te preizkuse slepo kalili v vodi, legirana pa v olju in jih nismo popuščali. Ostala jekla smo po kaljenju v olju 60 minut popuščali. Poleg trajne trdnosti smo na tako toplotno obdelanih jeklih določili še mejo plastičnosti, natezno trdnost, raztezek, kontrakcijo in žilavost (tabela 6). Vrednosti mehanskih lastnosti konti jekla so enake ali nekaj nižje od konvencionalnega. Trajne dinamične trdnosti, zlasti razmerja med dinamično in statično trdnostjo, so praktično neodvisna od načina izdelave jekla.

Pri primerjavi lastnosti jekel moramo upoštevati tudi dejstvo, da kemijske sestave talin niso enake, kar ima vpliv na rezultate meritev. To se zlasti dobro vidi pri jeklu Č.4320, kjer razlika v velikosti zrn ne pride do izraza zaradi večje vsebnosti ogljika in kroma v konti jeklu. Vrednosti mehanskih lastnosti pa v nobenem primeru ne padejo iz območij, ki jih predpisujejo standardi.

### ZAKLJUČEK

Namen raziskav je bilo sistematično raziskati nekatere lastnosti in strukture cementacijskih jekel, jekel za popljšanje in vzmetnega jekla z namenom, da primerjamo konti ulite in konvencionalne gredice in palice, ki so bile iz njih izvaljane.

Makropreiskave so pokazale, da so v gredicah napake, značilne za konti litje. Pri valjanju so se zaradi redukcije preseka radialne razpoke in porozna sredina zavaljale, tako, da teh napak v predelanem jeklu nismo opazili. Med vsebnostjo žvepla v obrobni coni in v sredini gredic ni nobene razlike, pač pa so vključki manganovega sulfida v obrobni coni manjši, njihova gostota pa je večja. Zaradi tega pri Baumannovem odtisu

na teh mestih ne dobimo tako izrazite potemnitve, kot jo dajo večji sulfidni vključki v likvacijskem kvadratu. Te ugotovitve veljajo za konti in klasično izdelane gredice.

Konti jeklo vsebuje malo žvepla in sorazmerno temu je v jeklu malo vključkov manganovega sulfida. V valjanem jeklu so sulfidi kratki. Precej večja je povprečna dolžina silikatnih vključkov.

Segregacije so v konti ulitih gredicah manjše kot v konvencionalnih, kljub temu da so bili ingoti pred valjanjem homogenizacijsko žarjeni. Zato je tudi jeklo palic, izvaljanih iz konti jekla, homognejše.

Primarna in sekundarna kristalna zrna v valjanem konti jeklu so večja, ker jeklo ni pomirjeno z aluminijem in to je verjetno vzrok nekaj slabšim mehanskim lastnostim konti jekla. Iz rezultatov se vidi, da mehanske lastnosti ustrezajo vrednostim, ki jih predpisujejo standardi. Konti jeklo lahko zato v vseh ozirih enakovredno nadomesti konvencionalno jeklo.

### Literatura

1. Menter J.: Continuous casting moves into quality steels, *Metals and Materials*, julij/avgust 1977
2. Mills N.T., Joseph R.W.: A look inside strand-cast steel slabs, *Ironmaking and Steelmaking*, št. 3, 1977
3. Flüge J., Hagen K., Hammerschmid P.: Sulfidverteilung in der Randschicht von Stranggussbrammen, *Arch. Eisenhüttenwes.*, št. 2, 1977
4. Vodopivec F., B. Ralić: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, št. 543/1977
5. Kmetič M., F. Vodopivec: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, št. 609/1977
6. Irwing, W.R., Perkins A.: Basic parameters affecting the quality of continuously cast slabs, *Ironmaking and steelmaking*, 1977, št. 5
7. Sorimachi K., Brimacombe J. K.: Improvements in mathematical modelling of stresses in continuous casting of steel, *Ironmaking and Steelmaking*, št. 4, 1977
8. Hubble D.H., Wessel R.L.: Design and selection of refractories used in continuous casting, *Ironmaking and Steelmaking*, št. 5, 1977
9. Weigl C.P.: Strandcasting low-alloy steels, *Ironmaking and Steelmaking*, št. 2, 1977
10. Wolf M.: Product quality considerations in continuous slab casting, *Iron and Steel International*, febr. 1977

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Zweck der Untersuchungen war systematisch einige Eigenschaften und Gefüge an den konventionell ausgewalzten und an stranggegossenen Knüppeln und Stäben der Einsatz-, Vergütungs- und Federstählen zu untersuchen und zu vergleichen.

Die makroskopischen Untersuchungen zeigten, dass in Knüppeln Fehler eigenartig für Strangguss auftreten. Beim Walzen verschweissen wegen der Verformung Radialrisse und poröser Kern, so dass diese Fehler im verwalzten Stahl nicht beobachtet werden können. Im Schwefelgehalt zwischen Rand und Kern sind keine Unterschiede festzustellen, jedoch sind Mangansulfideinschlüsse in der Randzone kleiner und die Dichte der Verteilung grösser. Aus diesem Grunde erscheinen am Baumannabdruck diese Stellen nicht so ausgeprägt dunkel, wie das im Seigerungsquadrat wo die Sulfideinschlüsse grösser sind, der Fall ist. Diese Feststellungen gelten sowohl für die stranggegossenen wie auch für die konventionell erzeugten Knüppel.

Stahl für Strangguss enthält weniger Schwefel und dementsprechend weniger Mangansulfide sind im Stahl enthalten. Im verwalzten Stahl sind die Sulfide verhältnismässig kurz. Im Durchschnitt sind die silikatischen Einschlüsse viel länger.

Seigerungen sind in stranggegossenen Knüppeln kleiner wie in konventionell erzeugten trotzdem dass Blöcke vor dem Walzen ausgeglüht werden. Deswegen ist auch Stabstahl, ausgewalzt aus Stranggussknüppeln, homogener.

Primär und Sekundärkörner sind im verwalzten Stranggussstahl grösser, da der Stahl nicht mit Aluminium vollberuhigt vergossen wird, was auch der Grund für etwas schlechtere mechanische Eigenschaften sein kann. Aus den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die mechanischen Eigenschaften den in Normen vorgeschriebenen Werten entsprechen. Stranggussstahl kann den konventionell erzeugten Stahl in jeder Hinsicht ersetzen.

## SUMMARY

The investigation has intention to analyze systematically some properties and structures of carburising, tempering, and spring steel in order to compare the continuous cast and usual billets utilized for rolling.

Macro investigations showed that billets contain defects characteristic for continuous casting. In rolling, the radial cracks and central porosity are welded together due to the reduction of the cross section, thus these defects were not found in the worked steel. There was no difference in sulphur content in the edge or in the centre of the billet. Only manganese sulphide inclusions were finer in the edge and their density was greater. Thus the sulphur print does not give so pronounced darkening on the edge as it is in the liquation square due to bigger sulphide inclusions. These findings are valid for continuous cast and conventionally produced billets.

Continuous cast steel contains low sulphur, thus also the amount of manganese sulphide inclusions in steel is reduced. Sulphides in the rolled steel are short. Average length of silicate inclusions is greater.

Segregations in the continuous cast billets are lower than those in the conventional ones though the ingots were homogenized before rolling in the last case. Also rolled steel of continuous cast billets is more homogeneous.

Primary and secondary grains in the rolled continuous cast steel are greater since steel was not killed with aluminium. This probably gives slightly lower mechanical properties of the continuous cast steel. The results show that the obtained mechanical properties correspond to the requirements in standards. The conclusion is that continuous cast steel can adequately replace the conventional steel.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель исследований — систематическое изучение некоторых свойств и структуры цементированных, улучшенных и пружинных сталей с целью сравнения заготовок и сортовой стали непрерывного литья с классическим литьем в изложницы. Исследования макро структуры показали, что заготовки содержат дефекты характерные для непрерывного литья. При прокатки, вследствие редукации сечения, радиальные трещины и пористость сердечины закатаны, так что трещины в переработаном изделии не обнаружены. Что касается серы, то никакая разница в краевой зоне и сердечины заготовки не отмечена. Обнаружено, что в краевой зоне сульфиды марганца по величине немного меньше, по количеству же распределены более густо. Вследствии этого баумановские отпечатки в тех пределах, в сравнении с более крупными сульфидными включениями, недостаточно выразительны. Эти констатации действительны для обоих видов производства заготовок — непрерывным литьем и литьем классического способа одинаково.

Сталь непрерывного литья содержит незначительное количе-

ство серы. Соответственно этому в стали небольшое количество включений сульфидов марганца. В катаной стали длина этих включений сравнительно короткая. Значительно больше средняя длина спайчатых включений.

Хотя слитки до прокатки были подвергнуты гомогенизационному отжигу, количество сегрегаций в заготовках из непрерывного литья меньше. Поэтому и сортовая сталь, развальцованная из стали непрерывного литья более однородная.

Первичные и вторичные кристаллические зерна в катаной стали непрерывного литья по величине более крупные из-за того, что сталь не была успокоена с алюминием. Возможно, что это также причина более низким механическим свойствам стали непрерывного литья. Из полученных результатов очевидно, что механические свойства стали непрерывного литья отвечают требованиям, предписанными на основании действующих стандартов. На основании этого, сталь непрерывного литья является во всех отношениях эквивалентным возмещением стали, отантой классическим способом.



# Rafinacija jekla z vpihovanjem CaSi v ponev

V. Prešern, F. Kandare, G. Manojlović, D. Tomažin, K. Ravnik, T. Mlakar

Prikazane so fizikalno-kemične osnove postopka vpihovanja CaSi v ponev, pri čemer je podan vpliv na razžveplanje in dezoksidacijo. Opisane so prednosti postopka v pogledu doseganja zelo čistega jekla s primerno neplastično obliko nekovinskih vključkov.

V drugem delu so opisani industrijski poskusi vpihovanja CaSi v ponev v železarni Štore in železarni Jesenice, podana je analiza opravljenih poskusov in njihova ocena.

## 1. UVOD

Ponovčna metalurgija predstavlja danes eno od najvažnejših poti pri doseganju bolj ekonomične izdelave ter predvsem bolj kakovostnega jekla. Osnovne prednosti postopkov ponovčne metalurgije so povečanje produktivnosti ter možnost dobre kontrole poteka nekaterih reakcij — predvsem dezoksidacije in razžveplanja.

Postopek vpihovanja CaSi v ponev pomeni danes enega od najuspešnejših postopkov — tako v metalurškem kot v ekonomskem pogledu — ponovčne metalurgije. S tem postopkom se ob pravilni tehnologiji doseže velika zanesljivost postopka, velika izkoriščenost vpihanih surovin v primerjavi z običajnim dodajanjem, predvsem pa je pomembna možnost dobre kontrole procesa. Bistvene prednosti, ki jih omenjeni način izvenpečne rafinacije jekla omogoča, so<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup>:

- prestavitev reakcije razžveplanja iz talilnega agregata v ponev,

- dokončna dezoksidacija se izvede v ponvi, kar vodi do skrajšanja procesa rafinacije v peči,

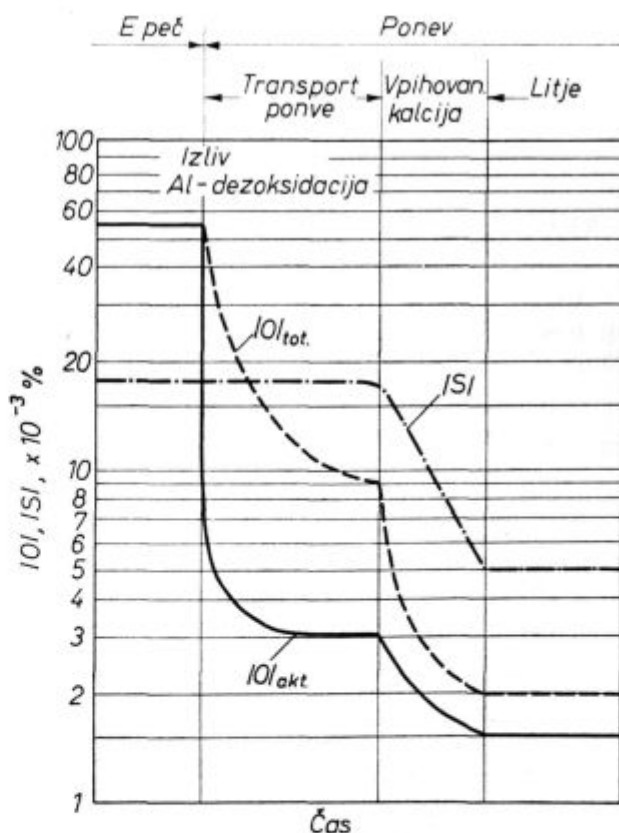
- dezoksidacija v ponvi z zlitinami na osnovi kalcija vodi k primernejši obliki nekovinskih vključkov in za veliko večino nizkoogljičnih jekel ni potrebna naknadna vakuumaska obdelava za doseganje potrebne čistosti,

- velika čistost jekla omogoča boljše livne lastnosti in zato tudi nižjo temperaturo ulivanja, kar je lahko zelo pomemben faktor pri uporabi konti načina litja,

— doseže se občutno povečanje in izboljšanje nekaterih mehanskih lastnosti jekla, kot npr. plastičnost, trdnost, udarna žilavost, raztezek.

Da bi tudi v naših železarnah lahko uvedli postopek vpihovanja kalcijevih spojin v jeklo in pri tem dosegli opisane prednosti ter izboljšave, smo v letu 1977 pričeli z raziskavami na tem področju.

Osnovni namen teh raziskav je bil, da ugotovimo možnost doseganja hitrega in učinkovitega razžveplanja jekla v ponvi z vpihovanjem primernih kalcijevih zlitin. Ena od najpomembnejših posledic postopka je, da se v jeklu bistveno zmanjša količina manganovih sulfidov. Tudi aluminatni in silikatni vključki, ki v običajno izdelanih jeklih pogosto nastopajo v izrazito ostrih in usmerjeni obliki, dobijo po obdelavi mnogo primernejšo okroglo obliko in so neplastični. Takšni



Slika 1  
Vpliv vpihovanja CaSi na spreminjanje vsebnosti kisika in žvepla v jeklu

Fig. 1  
Influence of the CaSi injection on the variation of oxygen and sulphur content in steel

dr. Vasilij Prešern, dipl. ing. — Metalurški inštitut Ljubljana

F. Kandare — Metalurški inštitut Ljubljana

Gojko Manojlović, dipl. ing. — Železarna Štore

Dominik Tomažin, ing. — Železarna Štore

Karol Ravnik, dipl. ing. — Železarna Jesenice

Tone Mlakar — Železarna Jesenice

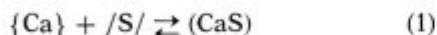
vklučki so v povprečju manjši od 15  $\mu\text{m}$  in zelo enakomerno razporejeni. Po sestavi so to kalcij-aluminij oksidi ( $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ) z majhno vsebnostjo žvepla na površini. Zato lahko trdimo, da je eden najpomembnejših učinkov obdelave jekla z vpihovanjem kalcija preprečevanje tvorbe  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in MnS ter pretvorba vključkov v jeklu v neplastične kalcijeve aluminatne.

## 2. OPIS POSTOPKA

### 2.1. Fizikalno-kemične osnove

Ena od osnovnih prednosti postopka vpihavanja CaSi v ponev je odstranitev in modifikacija sulfidnih in oksidnih vključkov. Brez uporabe tega postopka je zmanjšanje vsebnosti žvepla in kisika najbolj vezano na primarni agregat, kar pa je lahko dolgotrajna in dokaj draga praksa. Na sliki 1 je shematsko prikazano spreminjanje vsebnosti kisika in žvepla v jeklu zaradi vpihavanja CaSi.

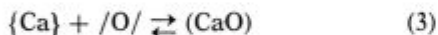
Kalcij nastopa v tekočem jeklu kot plin in ima pri 1873 K parcialni tlak 1,86 bar<sup>8</sup>, zato sta najpomembnejši reakciji pri vpihovanju CaSi v jeklu naslednji:



in:

$$\text{RT ln } p_{\text{Ca}} = -138180 + 42,14 - \text{RT ln } a_{\text{S}} \quad (\text{lit. 9}) \quad (2)$$

ter reakcija:



in:

$$\text{RT ln } p_{\text{Ca}} = -162170 + 47,19 - \text{RT ln } a_{\text{O}} \quad (\text{lit. 9}) \quad (4)$$

Upoštevati moramo tudi reakcijo med žlindro in plinsko fazo ter ravnotežno reakcijo razžveplanja v tem primeru zapišemo v naslednji obliki:



in

$$K = \frac{a_{\text{CaS}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{a_{\text{CaO}} \cdot P_{\text{S}_2}^{1/2}} \quad (6)$$

Iz enačbe (5) dobimo, da je:

$$(\% \text{ S}) = K \cdot a_{\text{CaO}} \cdot \left( \frac{P_{\text{S}_2}}{P_{\text{O}_2}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Razvidno je, da kisik iz zraka (oksidativna atmosfera) zavira reakcijo razžveplanja. Zato je razumljivo, da potekajo reakcije razžveplanja uspešneje v redukcijski atmosferi (rafinacijska perioda izdelave jekla v el. peči) ali pa, da moramo npr. postopek vpihovanja CaSi v ponev voditi ali v pokriti ponvi ali pa pod dovolj debelo plastjo zaščitne (navadno sintetične) žlindre. Minimalno količino te potrebne žlindre lahko izračunamo s pomočjo masne bilance žvepla:

$$M_{\text{jeklo}} \cdot \Delta S + M_{\text{sint}} \cdot S + M_{\text{P žlin}} \cdot S = M_{\text{K žlin}} \cdot \left( \frac{S}{S/} \right) \cdot S_{\text{želj}} \quad (8)$$

$$\frac{S}{S/} = K \cdot \text{Baz} \quad (9)$$

$$\text{Baz} = \frac{M_{\text{CaO}} + M_{\text{sint}} \cdot \text{CaO}_{\text{sint}}}{M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{sint}} \cdot \text{SiO}_{2\text{sint}}} \quad (10)$$

$$M_{\text{K žlin}} = M_{\text{sint}} + M_{\text{obzid}} + M_{\text{P žlin}} - M_{\text{reakc}} \quad (11)$$

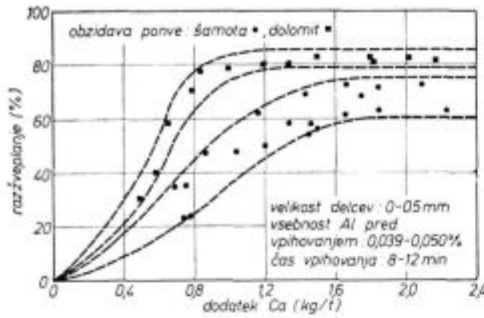
kjer pomeni:

$M_{\text{jeklo}}$	= količina jekla (kg)
$M_{\text{sint}}$	= količina sintetične žlindre (kg)
$M_{\text{P žlin}}$	= količina žlindre, ki pride iz peči (kg)
$M_{\text{K žlin}}$	= količina žlindre po končanem procesu vpihovanja (kg)
$M_{\text{CaO}}$	= količina apna iz pečne žlindre in obzidave (kg)
$M_{\text{SiO}_2}$	= količina $\text{SiO}_2$ iz pečne žlindre in obzidave (kg)
$M_{\text{obzid}}$	= poraba obzidave ponve (kg)
$M_{\text{reakc}}$	= zmanjšanje količine žlindre na račun reakcij med jeklom in žlindro ( $\text{FeO}$ in $\text{MnO}$ redukcija)
$\Delta S$	= zmanjšanje vsebnosti žvepla v jeklu (absolutno)
$S$	= vsebnost žvepla v sintetični žlindri, upoštevajoč pečno žlindro
$\frac{S}{S/}$	= razdelitev žvepla med žlindro in jeklom
$S_{\text{želj}}$	= željena vsebnost žvepla po obdelavi
$K$	= inklinacijski koeficient
$\text{Baz}$	= bazičnost žlindre
$\text{CaO}_{\text{sint}}$	= vsebnost apna v sintetični žlindri
$\text{SiO}_{2\text{sint}}$	= vsebnost $\text{SiO}_2$ v sintetični žlindri

S pomočjo enačb od (8) do (11) lahko določimo potrebno količino sintetične žlindre. Kot spremenljivke običajno uporabimo  $M_{\text{K žlin}}$ ,  $\frac{S}{S/}$ , bazičnost in seveda  $M_{\text{sint}}$ .

Vse ostale faktorje v enačbah pa vzamemo za konstante. Inklinacijski koeficient  $K$  določimo iz diagrama<sup>10</sup>, ki upošteva predvsem močan vpliv bazičnosti in vsebnosti  $\text{FeO}$  na končno razdelitev žvepla med žlindro in jeklom.

Premešavanje je brez dvoma eden bistvenih delov ponovčne metalurgije. Močno mešanje tekoče kovine omogoča hitro in uspešno reakcijo med žlindro in kovino, homogenizacijo in odstranjevanje nekovinskih vključkov. Premešavanje pri procesu vpihovanja CaSi je omogočeno zaradi argona kot nosilnega plina in zaradi dvigovanja Ca-mehurčkov, ki nastanejo ob vplinjenju vpihane kalcija. Trdijo<sup>10</sup>, da je izračunana specifična moč mešanja za argon ca. 800 W/m<sup>3</sup>, moč mešanja Ca-mehurčkov se sicer zelo težko računa,



Slika 2

Doseženo razžveplanje v odvisnosti od količine vpihanega kalcija in obzidave ponve

Fig. 2

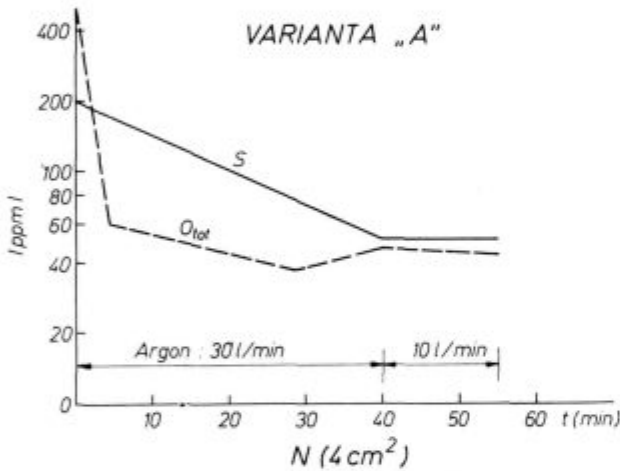
Achieved desulphurisation depending on the amount of the injected calcium, and on the ladle lining

lahko pa jo ocenimo<sup>10</sup> na max. ca. 1200 W/m<sup>3</sup>. Tako veliko premešavanje ima velike prednosti, npr. za uspešno razžveplanje — so pa tudi pomanjkljivosti, predvsem v pogledu povečanih vsebnosti vodika in dušika iz zraka.

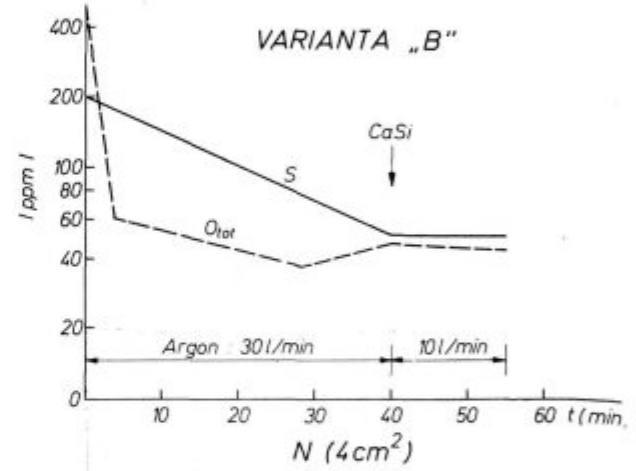
Velik vpliv na proces ima obzidava ponve in slika 2 prikazuje stopnjo razžveplanja v odvisnosti od obzidave ponve.

Za doseganje željenih rezultatov mora biti ponev obzidana z dolomitno oblogo. Nad žilindrično cono je običajno aluminatna opeka. Med obema plastema pa je plast krom-magnezitne opeke, ki preprečuje, da bi dolomitna opeka lahko reagirala z visokoaluminatno opeko. Trdijo<sup>10</sup>, da je takšna obzidava najekonomičnejša in seveda uspešna v pogledu zahtev postopka in cene ognjevarnih opek. Vsekakor pa morajo biti te dolomitne ponve dobro predgrete in se med posameznimi obdelavami ne smejo ohladiti pod 800 °C, da se prepreči penetracija jekla v rege, kar seveda močno zmanjšuje vzdržnost obzidave ponve.

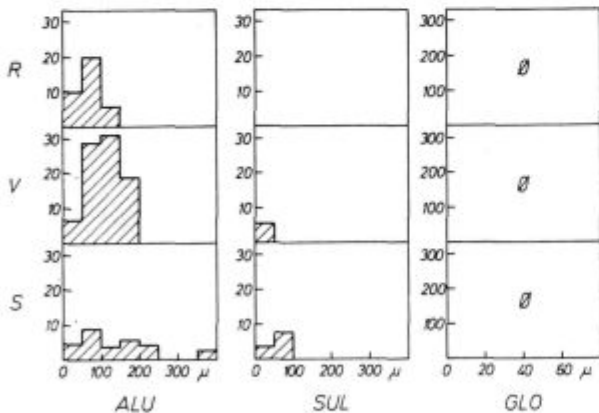
Računajmo<sup>10</sup>, da je cena obzidave ponve za proces vpihavanja CaSi ca. 2,13 \$/tono in da so dodatno še stroški za kopje 0,69 \$/tono jekla. Jekleno kopje za vpihovanje CaSi je zaščiteno z ognjevarnim materialom, da zdrži eno obde-



N (4 cm<sup>2</sup>)



N (4 cm<sup>2</sup>)

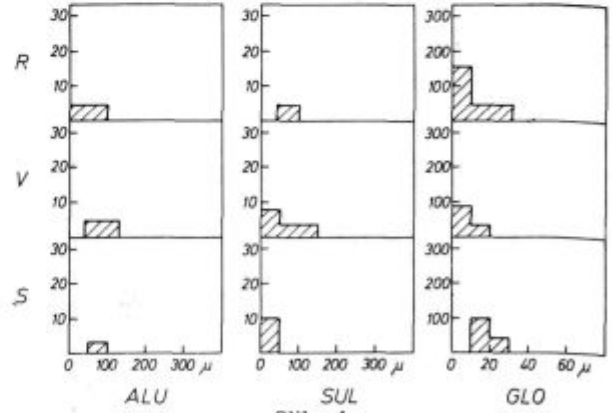


Slika 3

Število vključkov na 4 cm<sup>2</sup> po obdelavi jekla z varianto »A« (brez vpihanega CaSi). Oznake pomenijo: N-število vključkov, R-rob, V-vmesna cona, S-sredina, ALU-aluminati, SUL-sulfidi, GLO-globularni kalcij aluminati

Fig. 3

Number of inclusions per 4 cm<sup>2</sup> after the steel treatment by the A method (without injected CaSi). Explanations: N — number of inclusions, R — edge, V — intermediate zone, S — centre, ALU — aluminates, SUL — sulphides, GLO — spheroidized calcium aluminates



Slika 4

Število vključkov na 4 cm<sup>2</sup> po obdelavi jekla z varianto »B« (z vpihovanjem CaSi). Oznake pomenijo: N-število vključkov, R-rob, V-vmesna cona, S-sredina, ALU-aluminati, SUL-sulfidi, GLO-globularni kalcij aluminati

Fig. 4

Number of inclusion per 4 cm<sup>2</sup> after the steel treatment by the B method (with injected CaSi). Explanations: N — number of inclusions, R — edge, V — intermediate zone, S — centre, ALU — aluminates, SUL — sulphides, GLO — spheroidized calcium aluminates

lavo. Obzidava običajno sestoji iz šamotnih opek, na žilindrini coni pa je lahko tudi visokoaluminatna opeka.

## 2.2. Vpliv oblike vključkov na mehanske lastnosti

V jeklu, ki ni bilo obdelano s CaSi, je večina sulfidov v obliki MnS, ki so v plastični (mehki) in se preoblikujejo med valjanjem, oziroma kovanjem. Če pa vpihavamo v jeklo kalcij, ki ima veliko afiniteto do žvepla, mangan ne bo več tvoril sulfidov. Namesto teh vključkov bodo nastali kompleksni vključki, ki so neplastični in se med predelavo ne deformirajo. Razvlečeni MnS vključki imajo velik vpliv na razliko mehanskih lastnosti v vzdolžni in prečni smeri, npr. izvaljanega materiala. V varjenih ploščah pa lahko zaradi MnS vključkov nastanejo razpoke. Če uspemo z vpihovanjem CaSi odstraniti MnS vključke, se lastnosti v prečnih smereh močno izboljšajo.

Jasno razviden je vpliv transformacije vključkov zaradi vpihovanja CaSi iz naslednjega primera<sup>11</sup>, ko so primerjali število vključkov v jeklu s sestavo 0,2 % C; 0,5 % Mn; 0,25 % Si in 0,03 do 0,05 % Al. Enkrat je bilo jeklo obdelano v ponvi s sintetično žilindro iz CaO, CaF<sub>2</sub> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v količini 25 kg/t, jeklo so 45 minut premešavali z argonom z močjo mešanja 400 W/m<sup>3</sup> — varianta A, po varianti B pa so dodali enako količino sintetične žilindre, jeklo premešavali z argonom, nato pa vpihali 1 kg CaSi/t jekla (29 % Ca v CaSi), pri čemer je bila hitrost vpihavanja CaSi 10 kg/min,

količina argona pa 10 l/sekundo. Na slikah 3 in 4 sta shematsko prikazani obe varianti ter število vključkov (aluminati, sulfidi in globularni kalcij-aluminati) pri obeh variantah.

Iz slik je razvidno, da dobimo pri skoraj enakih vsebnostih žvepla in kisika v jeklu po obeh variantah zelo različno vsebnost posameznih tipov vključkov — pri varianti »B« imamo vključke le kot neplastične globularne kalcij-aluminat, kar smatramo za zelo ugodno.

Slika 5 prikazuje vpliv globularnih in raztegnjenih sulfidov pri isti vsebnosti žvepla na duktilnost v prečni smeri. Na sliki 6 pa je prikazana primerjava žilavosti in struktura jekel z oznako U in GU (ti jekli imata enako količino žvepla — 0,025 %). Razvidno je, da imamo v primeru vpihovanja CaSi opraviti z globularnimi sulfidi in bistveno večjo žilavostjo kot pri jeklu z enako vsebnostjo žvepla, vendar z značilnimi razpotegnjenimi manganovimi sulfidi.

## 3. POSKUSI VPIHOVANJA CaSi

Osnova postopka temelji na vpihovanju CaSi v ponev z argonom (kot nosilni plin). Da dosežemo željene rezultate, moramo ustvariti predvsem enakomerno dodajanje CaSi. Za pravičen potek procesa je važna tudi granulacija CaSi.

S posebno polindustrijsko napravo za vpihovanje smo izdelali vrsto poskusov v železarni Štore in železarni Jesenice.

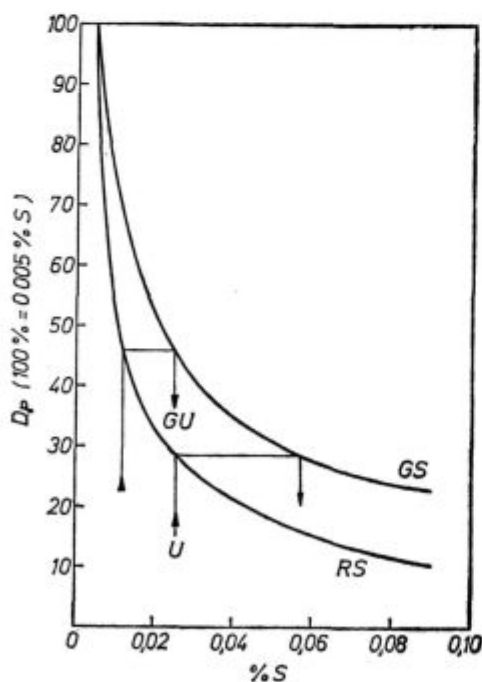
Namen poskusov je bil:

- ugotoviti tehnologijo postopka
- zasledovati ustrezne metalurške procese (razžveplanje, dezoksidacija, vključki).

Lahko trdimo, da smo ugotovili primerno tehnologijo vpihovanja. Pri tem je najvažnejše točno nastavljanje pritiskov argona: P<sub>1</sub> — nosilni plin, P<sub>2</sub> — mešalni plin, P<sub>3</sub> — plin v kotlu. Zelo pomembno za uspešen potek procesa je kopje za vpihovanje — njegova konstrukcija, obzidava, teža, globina potopitve... Vpliv pa ima tudi količina in sestava žilindre na jeklu v ponvi. Prvi predpogoj, da postopek sploh lahko da kake rezultate, pa je, da je jeklo predhodno dovolj pomirjeno.

Primerjava nekaterih naših rezultatov in literarnih podatkov je prikazana na sliki 7. Razvidno je, da se dobljene vrednosti ujemajo z literarnimi za globino potopitve kopja ca. 120 cm. Vidimo pa, da je za doseganje boljših efektov potrebno vpihati večjo količino CaSi. Zaradi posebnih problemov v zvezi s kopjem za vpihovanje pa nismo mogli vpihati večje količine od 1 kg CaSi/t jekla.

Vpliv procesa vpihovanja CaSi na spremembo temperature jekla prikazuje slika 8. Poleg lastnih rezultatov so na sliki tudi podatki iz literature in razvidno je, da se naši in literarni podatki zelo ujemajo.



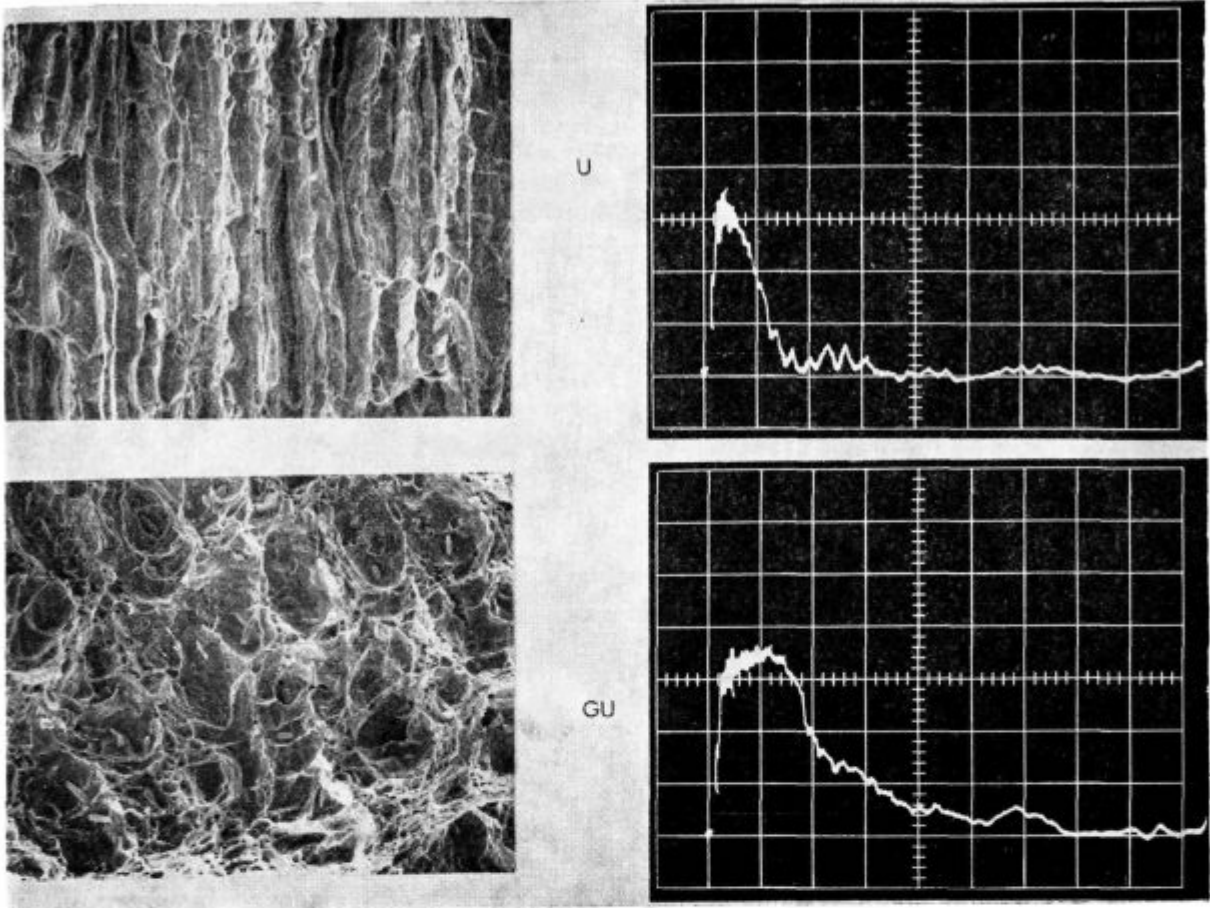
Slika 5

Vpliv globularnih (GS) in raztegnjenih (RS) sulfidov na duktilnost v prečni smeri (D<sub>p</sub>)

Fig. 5

Influence of spheroidal (GS) and stretched (RS) sulphides on the ductility in the transversal direction (D<sub>p</sub>)

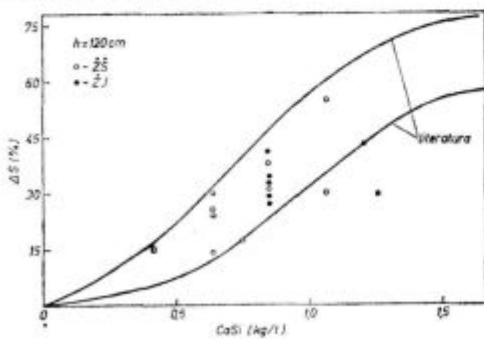




Slika 6  
Primerjava žilavosti in strukture jekel z oznako U in GU  
Fig. 6  
Comparison of toughness and of the structure for U and GU steel

3.1. Poskusi v železarni Štore

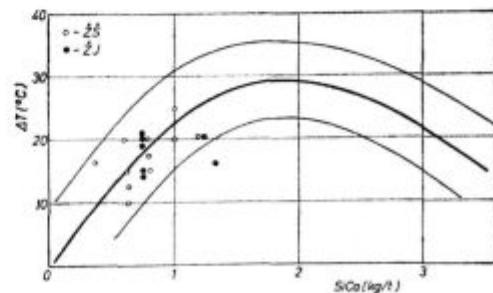
Na 40-tonski električni obločni peči v jeklarni železarne Štore smo izdelali ca. 30 poskusov vpihovanja CaSi v ponev. Ker nismo imeli nobenih praktičnih izkušenj in smo lahko uporabili le splošne literaturne podatke, smo morali sistematično pričeti uvajati proces, na sliki 9 pa se vidi, kakšen je potek poskusa.



Slika 7  
Primerjavi nekaterih naših poskusov z literaturnimi podatki (lit. 2, 5, 7, 10, 11)  
Fig. 7  
Comparison of some our tests with the reference data (2, 5, 7, 10, 11)

Izračunali smo, da je minimalni potrebni pritisk argona kot nosilnega plina ca. 3 bare in da je pri tem pritisku in prerezu cevi za vpihovanje Ø 18 mm poraba argona okoli 1,5 Nm<sup>3</sup>/min, kar se ujema tudi z literaturnimi podatki<sup>2,3</sup>.

Poskuse smo morali podrediti obstoječemu stanju v jeklarni, kjer imajo urejeno prepilovanje jekla v ponvi z argonom. V ta namen je na livno ploščad naprave za kontinuirano ulivanje



Slika 8  
Primerjava padca temperature pri vplivanju CaSi med rezultati naših poskusov in literaturni podatki (2, 5, 7, 10)  
Fig. 8  
Comparison of temperature drop during the CaSi injection between our tests and the reference data (2, 5, 7, 10)



Slika 9  
Prikaz procesa vpihovanja CaSi  
Fig. 9  
View of the CaSi injection process

jekla pritrjeno posebno kopje za preprihovanje z argonom in to kopje je ca. 6 m nad nivojem električne obločne peči. Z žerjavom dvignejo ponev z jeklom in jo nabodejo na fiksno kopje ter pričnejo s preprihovanjem. Kopje je v bistvu jeklena cev ( $\varnothing$  18 mm), ki je zaščitena s šamotno opeko (SR 1 ali SR 2). Tak sistem odlično služi svojemu namenu — to je preprihovanje z argonom.

Pri naših poskusih smo priključili napravo na argonski vod, konstrukcije kopja in njegove nastavitve pa nismo mogli spreminjati. Pri procesu vpihovanja CaSi pa so se pokazale naslednje pomanjkljivosti take konstrukcije:

— sama konstrukcija je bila premalo stabilna in je kopje med vpihovanjem CaSi dobesedno opletalo v jeklu. To je seveda povzročilo, da je

tanka šamotna obloga kmalu popustila, tekoče jeklo je raztalilo jeklen drog in proces vpihovanja se je prekinil. Tega problema pri poskusih v Storah praktično nismo uspešno rešili in je bil zato najdaljši čas vpihovanja ca. 3,5 minute — to pa v najboljšem primeru ustreza maksimalni količini vpihanega CaSi, ca. 50 kg. Ugotovili smo namreč, da je hitrost vpihovanja CaSi med 10 do 15 kg/minuto.

— drug problem v zvezi s kopjem je bila sorazmerno zelo tanka zaščitna šamotna opeka. Ker je bila površina jekla pokrita s pečno žlindro (jeklo mora biti pokrito, da se prepreči dostop atmosferskega kisika), je prihajalo do intenzivne reakcije med žlindro in šamotno opeko in pri nekaterih poskusih je ta reakcija potekala tako intenzivno, da je dobesedno »požrlo« šamot in kasneje še drog, kar je zopet povzročilo prekinitev procesa. Konstrukcija kopja pa ni dovoljevala uporabe debelejših, vendar zato tudi bistveno težjih zaščitnih opek. Da bi ta proces med žlindro in oblogo kopja natančneje definirali, smo analizirali sestave nekaterih žlinder iz ponev, kar prikazuje tabela 1.

Iz tabele 1 je razvidno, da je bazičnost žlinder manjša od 2. Že samo ta podatek pove, da sestava žlindre za proces vpihovanja CaSi ni primerna. Znano je, da pride pri tem procesu do burnega mešanja žlindre in jekla. Zato si želimo čimbolj bazično žlindro z nizko vsebnostjo  $\text{SiO}_2$  in čimmanjšo vsebnostjo FeO ter MnO.

V tabeli 2 smo prikazali kemične analize vzorcev jekla iz nekaterih poskusov — vzorce jekla in temperaturo smo jemali, oziroma določevali pred procesom vpihovanja CaSi v ponev in po njem.

Tabela 1: Kemična analiza nekaterih žlinder

Talina	$\text{SiO}_2$ %	FeO %	CaO %	MgO %	MnO %	$\Sigma$ %
6504	28,80	0,93	49,07	13,41	0,79	93,00
6505	26,40	2,86	52,43	9,58	2,76	94,03
6509	22,90	0,86	55,51	66,95	1,06	87,28
6528	25,35	1,43	52,85	10,05	1,80	91,48
6529	29,16	0,57	51,80	10,30	0,63	92,46
6584	22,57	5,89	47,24	7,91	5,26	88,87

Tabela 2: Kemična analiza jekla

Sarža	% S (pred vpihovanjem)	% S (po vpihovanju)	% O (pred vpihovanjem)	% O (po vpihovanju)	CaSi (kg/t)	Čas vpihovanja (min)
6444	0,020	0,014	0,0059	0,0049	1,15	1'15"
6445	0,023	0,018	0,0044	0,0044	0,7	1'
6446	0,020	0,014	0,0061	0,0049	1,10	1'20"
6505	0,022	0,019	0,0078	0,0075	0,7	1'20"
6509	0,017	0,013	0,0058	0,0042	0,7	3'30"
6528	0,021	0,018	0,0075	0,0064	0,4	3'
6584	0,028	0,024	0,0074	0,0074	0,8	3'50"

Tabela 3: Rezultati nekaterih poskusov vpihavanja CaSi v Železarni Jesenice

Št. taline	% S (pred prebodom)	% S (pred pihanjem)	% S (končna)	Temp. (°C)		CaSi (kg)	CaSi (kg/t)	Čas vpihavanja
				pred	po			
3767	0,028	0,020	0,015	1630	1610	60	0,85	5'30"
4203	0,027	0,019	0,014	1685	1570	90	1,25	4'30"
4207	0,018	0,014	0,009	1660	1640	60	0,85	4'
7114	0,019	0,015	0,011	1590	1575	50	0,85	3'30"
7127	0,016	0,013	0,008	1590	1570	50	0,85	4'
7182	0,020	0,015	0,011	1585	1570	50	0,85	4'
7185	—	0,010	0,006	1590	1570	70	1,20	5'

Glede rešitve problema kopja za vpihovanje obstajajo različni predlogi in možnosti. Zaključek pa je, da naj bo kopje iz jeklene cevi s približno  $\varnothing$  18 mm, da naj bo zaščiten z debelejšo opeko, npr. SR 3, SR 4 ali SR 5, vrh kopja pa je v bistvu lahko »stopper« iz konti naprave, lahko pa je poseben izdelek.

Kaj lahko rečemo o doseženih rezultatih v pogledu vsebnosti kisika in žvepla?

Ker zaradi že omenjenih težav nismo mogli vpihati v ponev več kot ca. 1 kg CaSi/t jekla, so temu primerni tudi doseženi rezultati v pogledu zmanjšanja vsebnosti žvepla in kisika. Smatramo pa, da so končne vsebnosti kisika pri večini talin dokaj nizke — ne smemo namreč pozabiti, da v železarni Štore jekla ne pomirjajo z aluminijem.

Ponovimo naj, da je bil naš glavni namen, da s poskusi ugotovimo primerno tehnologijo, ki bi omogočala vpihanje do ca. 2 kg CaSi/t jekla. V tem primeru bi bili doseženi tudi pričakovani rezultati v pogledu zmanjšanja vsebnosti žvepla in kisika — to pa bi se predvsem odrazilo pri zmanjšanju in modifikaciji preostalih nekovinskih vključkov.

### 3.2. Poskusi v železarni Jesenice

Namen poskusov v železarni Jesenice je bil, da demonstriramo aplikacije postopka vpihavanja CaSi zaradi:

— doseganja majhnih vsebnosti žvepla v nekaterih kvalitetah jekla (npr. jekla za dinamno pločevino),

— doseganja primernejše oblike in sestave nekovinskih vključkov pri nekaterih kvalitetah jekel (npr. jekla za debele pločevine).

Tudi pri poskusih v železarni Jesenice smo se morali prilagoditi obstoječemu stanju. Imajo poseben sistem za prepihanje jekla z argonom. Konstrukcija tega sistema je zelo primerna in dovolj stabilna — zato imajo lahko jeklena kopja za vpihovanje zaščiten z debelo šamotno opeko (SR 5 ali SR 6).

Poskuse smo delali na talinah iz obeh električnih obločnih peči:

- ASEA
- LECTOMELT

Pri tem pa smo imeli naslednje težave, oziroma pomanjkljivosti:

a) Tehnologija izdelave nekaterih vrst jekel zahteva prelivanje iz ene livne ponve v drugo. Zaradi tega v drugi ponvi ni bilo na površini žlindre in iz že uvodoma povedanih razlogov je bil efekt razžveplanja nezadosten.

b) Pri poskusih na talinah iz ASEA peči, ko je bilo jeklo pokrito s primerno pečno žlindro, pa je bila višina jekla v ponvi tolikšna, da je že pri najmanjšem burkanju površine jeklo močno pljuskalo preko ponve; — ker ponve niso opremljene z drsnimi zapirali, ampak z drogom, je pri tem nastala nevarnost, da ne bi mogli v redu odliti jekla. Pri teh poskusih smo morali zato delati z minimalnim pritiskom nosilnega plina — to pa je pri precej poskusih povzročilo, da nam je jeklo zamašilo kopje za vpihovanje.

Čeprav smo izdelali več poskusov, smo jemali vzorce le pri nekaterih talinah in doseženi rezultati so prikazani v tabeli 3.

Iz tabele 3 je razvidno, da doseženi rezultati lepo sovpadajo z rezultati iz železarne Štore, da pa bi bilo potrebno za večje stopnje razžveplanja vpihati več CaSi pod primerno žlindro na jeklu v ponvi.

Pri nekaterih poskusih v železarni Jesenice smo zasledovali tudi spreminjanje vsebnosti kisika v jeklu pred vpihovanjem CaSi in po njem. Povprečna vsebnost kisika v jeklu pred vpihovanjem je bila ca. 0,0058, povprečna vsebnost po pihanju pa ca. 0,0046 % — dosegli smo torej povprečno zmanjšanje za 22 %.

## 4. ZAKLJUČKI

Ugotovili smo, da po celem svetu uvajajo procese vpihovanja drobnozrnatih materialov. V večini primerov predstavlja ta material drobnozrnati CaSi (v granulaciji od 0 do 0,4 mm). Zato smo tudi pri nas pričeli s širšimi raziskavami na tem področju. V prvem delu raziskav smo opisali bistvo procesa vpihovanja CaSi, termodinamične osnove postopka in navedli nekatere prednosti, oziroma rezultate take obdelave jekla v ponvi.

Osnovni namen drugega dela raziskav pa je bilo določiti primerno tehnologijo za vpihovanje CaSi v ponev z argonom kot nosilnim plinom.

Izdelali smo vrsto poskusov v železarni Store in železarni Jesenice in na podlagi rezultatov teh poskusov postavili željeno tehnologijo in s tem pravzaprav dosegli bistvo naloge.

Faktorji za ocenjevanje tehnologije pa so bili ustrezni metalurški rezultati v pogledu zmanjšanja vsebnosti žvepla in kisika, določitev padca temperature in končno podatki o čistosti jekla.

Najvažnejši rezultati v tem pogledu so:

— dosežemo zmanjšanje vsebnosti žvepla v jeklu in to razžveplanje je najbolj odvisno od količine vpihanega CaSi (za doseganje 50 % razžveplanja potrebujemo ca. 1,2 kg CaSi/t, za doseganje 80 % razžveplanja pa ca. 2 kg CaSi/t jekla);

— pri vpihovanju do 1,5 kg CaSi/t jekla lahko pričakujemo padec temperature jekla do maksimalno 25 °C;

— dosežemo zelo primerno obliko nekovinskih vključkov (praktično popolnoma odpravimo značilne plastične MnS — sulfidne vključke in  $Al_2O_3$  vključke, namesto njih pa nastopajo neplastični kompleksni vključki  $Al_2O_3$ -CaO-CaS);

— primernejša vsebnost, oblika in sestava nekovinskih vključkov povzroča bistveno povečanje nekaterih mehanskih lastnosti jekla (predvsem žilavost), močno pa se zmanjša tudi anizotropnost lastnosti jekla med prečno in vzdolžno smerjo ter po debelini.

Zaključimo naj z ugotovitvijo, da so dosedanja poskusi vsekakor upravičili pričakovanja in da bomo zato nadaljevali s preiskavami na tem področju.

## Literatura

- Oeberg K. E., F. J. Weiss: »Secondary Steelmaking by Powder Injection into the Ladle — A Survey of Today's Results and Future Applications«, Jernkontoret — The Metals Society Joint Conference, Stockholm, 21—25 August, 1978
- Nürnberg K., E. Spetzler, W. Klapdar: »Der TN-Prozess und sein Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften und die Betriebs-praxis«, Pfannenmetallurgie: Internationale Konferenz London, Mai 1977
- Spetzler E., J. Wendoff: »Das Einblasen von Erdalkalien in Stahlschmelzen und ihre Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften von Stahl«, Radex-Rundschau (1976), 1, S. 595—608
- Bečvar J.: »Mimopecni rafinace oceli pevnými prisadami v pávni a její význam pro martinarské ocelárny v ČSSR«, Hutnické listy (1975), 12, S. 854—862
- Olette M.: »Les opérations métallurgiques hors du four«, Revue de Métallurgie (1977), 4, S. 217—234
- Gatellier C., M. Olette: »Complex Deoxidation: A Tool to Modify Composition and the Rate of Removal of Inclusions«, SCANINJECT, International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 9—10, 1977
- Eketorp S., S. Gustafsson: »Removal and Modifications of Oxide Inclusions using Complex Agents including Ca-bearing Materials«, Physical Chemistry and Steelmaking, Versailles (France); 23, 24, 25 Oct. 1978
- Schürmann E., R. Schmid: »Dampfdruckgleichungen und thermodynamische Daten des reinen flüssigen und festen (β)-Calciums«, Arch. Eisenhüttenwes. 46 (1975), 12, S. 773—775
- Kubatschewsky O., E. L. Evans, C. B. Alcock: Metallurgical Thermochemistry, Pergamon Press, 1967
- Tivolius B., T. Sohlgran: »Secondary Steelmaking by ASEA-SKF and TN-Process — a Comparison«, Report from Dept. of Process Metallurgy, SVENSK STAL, Oxelösund
- Dixmier J. M.: »Resultats métallurgiques du traitement des aciers par injection d'éléments alcalino-terreux«, FOPERFIC 1977

## ZUSAMMENFASSUNG

Am Hütteninstitut in Ljubljana haben wir im Jahre 1977 mit umfangreichen Untersuchungen der Einblas-technologie von CaSi in die Pflanne begonnen. Zunächst haben wir theoretisch das Wesentliche dieses Verfahrens, für die thermodynamischen Grundlagen und die zuerwartenden Vorteile der CaSi Behandlung von Stahl bearbeitet.

Im zweiten Teil der Untersuchungen haben wir versucht eine geeignete Technologie der Einblasteknik von CaSi mit Argon als Trägergas in die Pflanne zu finden.

Eine Reihe von Versuchen sind in Hüttenwerken Store und Jesenice durchgeführt worden und auf Grund der Ergebnisse ist die Technologie definiert, worden was eigentlich auch das Ziel der Aufgabe war.

Die Technologie ist nach den metallurgischen Ergebnissen bewertet worden und zwar dem Entschwefelungsgrad, der Sauerstoffabnahme, dem Temperaturabfall und zuletzt nach dem Reinheitsgrad.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

— eine beträchtliche Entschwefelung wird erzielt. Der Entschwefelungsgrad ist von der eingeblasenen CaSi

Menge abhängig. Für eine 50 prozentige Entschwefelung wird ca 1,2 kg CaSi/t, für eine 80 prozentige Entschwefelung ca 2 kg CaSi/t Stahl benötigt.

— beim Einblasen bis zu 1,5 kg CaSi/t Stahl kann mit einem Temperaturverlust bis max. 25 °C gerechnet werden.

— es wird eine sehr geeignete Form und Zusammensetzung der nichtmetallischen Einschlüsse erzielt (die plastischen Mn Sulfide werden praktisch vollkommen beseitigt, die Tonerde haltigen Einschlüsse werden zu Kalziumaluminaten die des Types  $Al_2O_3$ -CaO-CaS umgewandelt).

— eine besser geeignete Form und Zusammensetzung wie auch die Reduzierung des Volumens der nichtmetallischen Einschlüsse begünstigen die Verbesserung einiger mechanischen Eigenschaften (Zähigkeit vor allem), die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften in der Längen, Quer und Dickenrichtung wird stark vermindert.

Es kann der Schluss gefasst werden, dass die durchgeführten Versuche unsere Erwartungen übertroffen haben und dass weitere Versuche auf diesem Gebiet fortgeführt werden können.

## SUMMARY

Extensive investigations on the CaSi injection into ladle started in Metallurgical Institute in 1977. In the first stage, the description of the process nature, thermodynamic calculations, and the exact determination of the advantage of such a steel treatment in the ladle were made.

Basic intention of the second stage of the investigations was to develop a suitable technology for the CaSi injection into the ladle by argon as a carrier gas.

A number of experiments was made in Ironworks Štore and Jesenice. The results were the basis for proposing the best techniques, and thus the aim of the investigation was fulfilled.

The parameters utilized in estimating the suitability of the technology were the reduction of sulphur and oxygen content, temperature drop, and the steel purity.

The most important obtained results were:

— reduction of sulphur content in the steel was obtained. It depends mainly on the amount of injected CaSi (50% desulphurisation is achieved with 1.2 kg CaSi/t, and 80% desulphurisation with 2 kg CaSi/t),

— in injecting up to 1.5 kg CaSi/t steel, the maximal temperature drop of the steel melt will be 25°C,

— shape of non-metallic inclusions is very suitable (characteristic deformable MnS inclusions, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions were completely removed. Instead, undeformable complex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-CaS inclusions appear),

— more convenient content, shape, and composition of non-metallic inclusions essentially increases some mechanical properties of steel (mainly toughness) and highly reduces the anisotropy of steel properties between the longitudinal, transversal, and cross-sectional directions.

The conclusion can be made that the investigations fulfilled the expectations and thus they will be continued.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Металлургическом институте в г. Любляна 1977 года начались более обширные исследования процесса вдувания CaSi в ковш. Начала исследований охватывают описание сущности процесса и его термодинамические основы. До подробностей рассмотрены преимущества этого процесса и поданы полученные результаты применения такой обработки расплава стали в ковше. Основная цель последующих исследований состояла в определении соответствующей технологии для вдувания CaSi в ковш при помощи аргона. Необходимая технология была поставлена на основании результатов, полученных выполнением целого ряда опытных исследований, которые велись в металлургических заводах Железарна Шторе и Железарна Есенице; существенная цель исследований этим выполнена.

Элементы, на основании которых подана оценка технологии составляли металлургические результаты что касается уменьшения содержания серы и кислорода, определение снижения температуры и, наконец, данные о чистоте стали.

Положительные, более существенные результаты опытных исследований были следующие:

— уменьшение содержания серы более всего зависит от количества вдутого CaSi (для достижения 50-ти % десульфурации необходимо прибл. 1,2 кг CaSi/т, а для 80 % десульфурации — прибл. 2 кг CaSi/т стали);

— при вдувании до 1,5 кг CaSi/т стали можно ожидать снижение т-ры более 25-ти °C;

— образование неметаллических включений соответствующей формы (практически характерные пластичные включения MnS сульфидов и включения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полностью отстранены, взамен их образовались непластичные комплексные включения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-CaS).

— более соответствующее содержание, форма и состав неметаллических включение существенно улучшают некоторые механические свойства стали, в особенности вязкость стали. Значительно уменьшена также анизотропия свойств стали между поперечном и продольном направлениях, а также и по толщине.

В заключении можно подтвердить, что опыты оправдали намеченные цели и, поэтому, работы по исследованию в этой области будут продолжаться.



# Prelomi kovin

Aleksander Kveder

*Pregled stanja na področju raziskovanja prelomov kovinskih materialov. Teoretične osnove o trdnosti kovin, krhkem in žilavem prelomu in mehaniki prelomov. Opis preizkušanja lomnih značilnosti kovin z načini določanja lomne žilavosti ( $K_{Ic}$ ), COD, J-integrala in z instrumentiranim Charpyjevim kladivom.*

## A. UVOD

S prelomom označujemo razdelitev ali zdrobljenje trdnega materiala na dva ali več delov zaradi vpliva napetosti. Prelom se začne z nastankom razpoke in nadaljuje z njenim širjenjem. Izvor razpoke je lahko v submikroskopskih spremembah v kovinskih strukturah ali pa v mikro in makro nehomogenostih, kot so vključki in druge notranje in površinske napake. Prelom je lahko krhek ali žilav. Značilnost krhkega preloma je hitro širjenje razpoke brez večje deformacije.

Znani so primeri iz druge svetovne vojne, ko so se lomile ali prelomile transportne ladje Liberty in tankerji T-2. Največ teh lomov je nastajalo v zimskem času, toda neodvisno od tega, ali so bile ladje na odprtem morju ali zasidrane v pristanišču. Znale so tudi druge nezgode in porušitve na kotlih, cevovodih in mostovih. Posebno hude poškodbe so nastajale na varjenih konstrukcijah. Nastajalo je vprašanje, kje so vzroki teh nenadnih in krhkih prelomov, čeprav so bile konstrukcije iz mehkih jekel, ki so po tradicionalnih načinih preizkušanja kazala zadovoljivo trdnost in žilavost. Vse to je izredno povečalo raziskovalni interes za probleme občutljivosti materialov in mehanizma krhkih prelomov, čeprav tudi do takrat znanje o tem ni bilo ravno majhno. Prve teoretične poglede o prelomih materialov sta dala C. Inglis in A. Griffith že v letih 1912, oziroma 1920, in te njune osnove linearno elastične in elastično plastične lomne mehanike so veljavne še danes. Iz teh osnov se je razvijala vsa nadaljnja veda o prelomih, katere zadnji dosežek so sodobni načini preizkušanja in ugotavljanja prelomnih značilnosti materialov, kot so na primer lomna žilavost ( $K_{Ic}$ ) za linearno elastične razmere in COD ter J-integral za materiale, ki se lomijo v elastično plastičnih razmerah.

Ta dejavnost pri nas še ni dosegla nivoja, ki ga zahteva današnje stanje v proizvodnji materialov, konstrukcij in spajanju kovinskih delov. Naj-

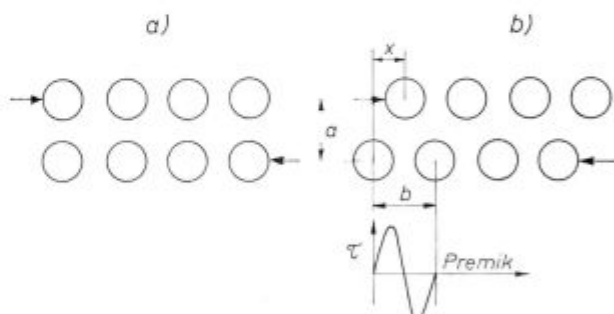
dlje je v tem pogledu RO železarne Ravne, kjer so nedavno uspešno uvedli metodo instrumentiranega Charpyjevega preizkusa in metodo določanja lomne žilavosti  $K_{Ic}$  (M. Pikalo, V. Strahovnik).

Pregled stanja o mehaniki lomov in načinih preizkušanja, ki sledi, je sorazmerno kratek iz- vleček informativnega pomena, ki naj prispeva k večjemu zanimanju za to področje fizikalne metalurgije.

## B. PORUŠITVE KOVIN

### 1. Teoretična in realna trdnost kovin

Teoretično trdnost kovin si predstavljamo kot trdnost kovin z idealno kristalno mrežo brez notranjih napak in jo zato izračunamo iz velikosti medatomske vezi. Drsenje v taki popolni mreži je prikazano na sliki 1. V simetričnih položajih



Slika 1  
Dršenje v popolni mreži  
Fig. 1  
Slipping in ideal lattice

je strižna napetost nič (a, b), med temi položaji pa na vsak atom deluje privlačna sila najbližjega atoma v sosednjem redu. Strižna napetost je torej periodična (približno sinusna) funkcija premika:

$$\tau = \tau_m \sin \frac{2\pi x}{b} \quad /1/$$

$\tau_m$  je amplituda, b pa perioda. Pri majhnih vrednostih  $x/b$  lahko pišemo:

$$\tau \approx \tau_m \frac{2\pi x}{b} \quad /2/$$

Pri malih premikih lahko uporabimo Hookov zakon:

$$\tau = G\gamma = \frac{Gx}{a} \quad /3/$$

G je strižni modul. Kombinacija enačb /2/ in /3/ da maksimalno strižno napetost, pri kateri prične drsenje:

$$\tau_m = \frac{G b}{2 \pi a} \quad /4/$$

Za kubične kristale je  $b = a$  in

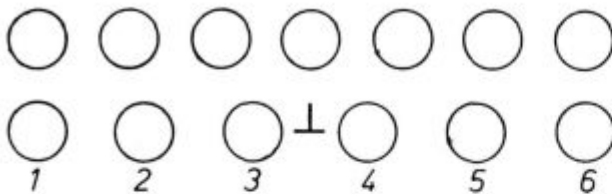
$$\tau_m \approx \frac{G}{2 \pi} \quad /5/$$

oziroma za natezno napetost

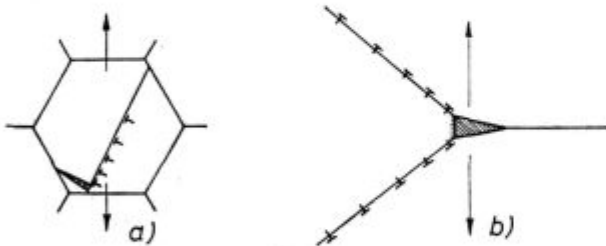
$$\sigma_m \approx \frac{E}{2 \pi} \quad /6/$$

Strižna napetost za začetek drsenja je za železo med 14.000 in 20.000 N/mm<sup>2</sup> v odvisnosti od ploskve drsenja. To pa je okoli stokrat več, kot je realna trdnost železa. Za drsenje je torej odgovoren drugačen mehanizem. Teoretično trdnost imajo le whiskerji (kovinska vlakna).

Prav zaradi te razlike med teoretično in stvarno trdnostjo kovin je bil uveden koncept dislokacij in premika dislokacij, ki vodi do drsenja. Slika 2 prikazuje robno dislokacijo, vključeno v mrežo. Atomi, ki so oddaljeni od dislokacije, so blizu energijskega minimuma. Atomi 2, 3, 4 in 5, ki so bližje dislokaciji, pa so blizu energijskega maksimuma in rezultirajoča napetost za premik takega atoma bo zelo majhna. V splošnem je pri kovinah potrebna zelo majhna, t. i. Peierls-Nabarrova sila za premik dislokacije skozi mrežo. Napetost, ki je posledica obremenjevanja, povzroči drsenje dislokacij in s tem vse mikro in makroskopske oblike deformacije kovine.

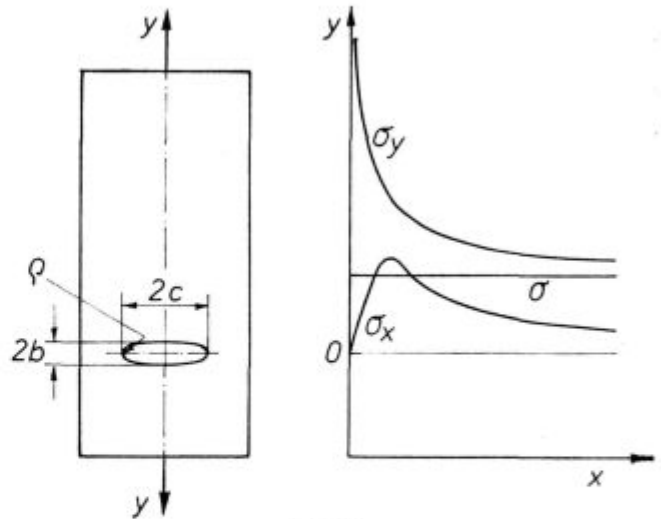


Slika 2  
Dislokacija v mreži  
Fig. 2  
Dislocation in the lattice



Slika 3  
Nastanek mikrorazpok z nizanjem dislokacij na kristalni meji (a) in s stekanjem dislokacij iz dveh drsniških ploskvi v cepilni ploskvi (b) (Cottrell)

Fig. 3  
Formation of microcracks by piling of dislocations against a grain boundary (a), and through the coalescence of dislocations on intersecting slip planes (b) (Cottrell)



Slika 4  
Napetosti okoli eliptične razpoke (1)  
Fig. 4  
Stresses around an elliptic crack (1)

Mikro razpoke lahko nastanejo v kovini z nizanjem dislokacij proti kristalni meji (slika 3 a) ali s stekanjem dislokacij po dveh ploskvah ali drsniških pasovih v cepilni ploskvi (slika 3 b) (Cottrell).

## 2. Krhki in žilavi prelom

Krhki prelom je nenadna porušitev napetega materiala brez večje predhodne plastične deformacije. Inicialna razpoka kritične dolžine se hitro daljša vzdolž kristalografskih ravnin z majhno površinsko energijo. Žilavi prelom pa spremlja znatna plastična deformacija. Daljšanje razpoke je odvisno od hitrosti naraščanja napetosti in je pogosto posledica zlivanja drobnih razpok in praznin (1) (2).

a) **Krhki prelom:** Prve teoretične predstave o prelomih kovin so dali C. Inglis, A. Griffith in E. Orowan. Že leta 1912 je Inglis prikazal, da v ustju razpoke eliptične oblike nastaja koncentracija napetosti in da pri zunanji napetosti  $\sigma$  nastane naslednja maksimalna lokalna natezna napetost  $\sigma_y$  (slika 4):

$$\sigma_y = \sigma \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{r}} \right) \approx 2 \sigma \sqrt{\frac{c}{r}} \quad /7/$$

c je večja polos elipse, r pa polmer ustja razpoke.

A. Griffith je l. 1920 obravnaval termodinamiko krhkega preloma kovin. Predpostavil je, da za napetost krhkega preloma, ki naj bi bila enaka teoretični trdnosti, ni potrebno, da ta nastopa po celem preseku materiala. Dovolj je, če je ta napetost dosežena v ustju ozke in ostre razpoke. Pogoj krhkega preloma je enakost nakopičene elastične energije U v področju razpoke in energije nastajanja novih površin Q:

$$\frac{\partial}{\partial c} (U + Q) = 0 \quad /8/$$



Energija elastične deformacije na enoto debeline plasti z eliptično razpoko dolžine  $2c$  je po Griffithu:

$$U = - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \quad /9/$$

energija nastajanja dveh novih površin pa:

$$Q = 4 c \gamma \quad /10/$$

$\gamma$  je površinska energija na enoto površine razpoke. Rešitev enačbe /8/ s pomočjo enačb /9/ in /10/ je

$$\frac{\partial}{\partial c} \left( - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} + 4 c \gamma \right) = - \frac{2 \pi c \sigma^2}{E} + 4 \gamma = 0 \quad /11/$$

(energija  $U$  je negativna, ker se izgublja,  $Q$  pa pozitivna, ker se ohranja).

Iz tega dobimo kritično velikost razpoke:

$$c_{kr} = \frac{2 \gamma E}{\pi \sigma^2} \quad /12/$$

in napetost, ki povzroči rast razpoke kritične velikosti:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \gamma E}{\pi c_{kr}}} \quad /13/$$

Razpoka se torej daljša, če je povečanje površinske energije manjše kot zmanjšanje energije deformacije. Račun kritičnih velikosti razpok po enačbi /11/ in po popravljeni enačbi A. P. Guljaeva (3) pokaže, da je kritična velikost razpok v mejah 0,01 do 0,1 mm. To pove, da so kovine v mnogih primerih v takem termodinamičnem stanju, ki lahko povzroči krhki prelom.

Vprašanje je še, kako se spreminja elastična energija pri rasti razpoke. V členu v oklepaju v enačbi /11/ vstavimo vrednost za  $c_{kr}$  iz enačbe /12/ in dobimo:

$$\Delta U = - \frac{4 \gamma^2 E}{\pi \sigma^2} + \frac{8 \gamma^2 E}{\pi \sigma^2} = \frac{4 \gamma^2 E}{\pi \sigma^2} \quad /14/$$

To pomeni, da je pri razpoki kritične velikosti poraba energije za nastanek površin razpoke dvakrat večja kot poraba elastične energije za nastanek same razpoke. Sprememba elastične energije pri rasti razpoke pa je prikazana na sliki 5. Do kritične velikosti razpoke se elastična energija povečuje, nato pa močno zmanjšuje; proces rasti razpoke, oziroma loma se pospešuje. Povečanje razpoke do kritične velikosti je energijsko sicer neugodno, vendar razpoka lahko doseže to velikost pri večjih napetostih, zaradi vibracij, difuzije vrzeli ali zaradi vpliva dislokacij.

b) **Žilavi prelom:** E. Orowan (3) (1) je leta 1948 prikazal pogoje žilavega preloma s plastično deformacijo pred porušitvijo. Z natezanjem ostro zarezanih preizkušancev iz maloogljivega jekla je ugotovil, da je poraba energije za plastično

deformacijo v površinskem sloju zarezze za nekaj redov velikosti večja od površinske energije jekla  $\gamma$ . Zato je v Griffithovi enačbi /13/ zamenjal delo za nastanek enote površine razpoke  $\gamma$  z efektivno površinsko energijo  $\gamma_{ef}$ , ki je vsota  $\gamma$  in dela za plastično deformacijo površinske cone razpoke ( $\gamma_{ef} = \gamma + p$ ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 E (\gamma + p)}{\pi c_{kr}}} \approx \sqrt{\frac{E (\gamma + p)}{c_{kr}}} \quad /15/$$

Pri krhkem prelomu je  $p < \gamma$  in  $p$  lahko zanemarimo, pri žilavem prelomu pa je  $p > \gamma$

Naslednja Orowanova izpopolnitev Griffithove enačbe /13/

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 E \gamma_{ef}}{\pi c_{kr}}} \cdot \frac{r}{a} \quad /16/$$

( $a$  = medatomska razdalja)

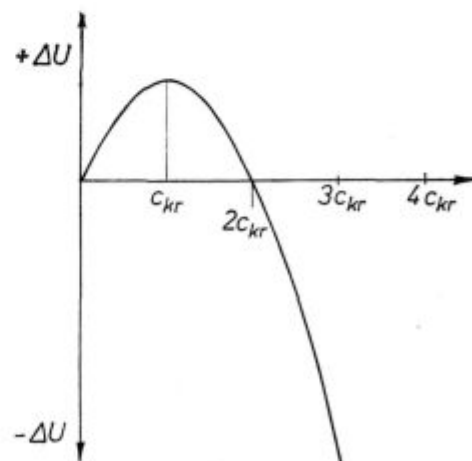
upoštevata, da se s povečevanjem radija ustja zarezze  $r$  povečuje potrebna napetost za daljšanje razpoke.

A. P. Guljaev je leta 1977 v kratkem članku (4) prikazal sodoben pogled na problem žilavega in krhkega preloma kovin, zato ga navajamo v daljšem izvlečku.

Splošna shema porušitve kovinskih materialov je naslednja:

**Prva stopnja** je majhna plastična deformacija, premik dislokacij, njihovo nizanje, stekanje in nastajanje mikro razpok. V različnih kovinah in zlitinah te stopnje ni, ker so kali razpok že nehomogenosti v kovini (vključki). V izjemno čistih kovinah ni ovir za gibanje dislokacij in deformacija je lahko 100 odstotna (kontrakcija) — kovina se ne poruši (fracture), temveč razdeli (rupture).

**Druga stopnja** je rast kali razpok. Značaj daljšanja razpoke opredeljujejo njena dolžina  $c$ , polmer  $r$  v ustju razpoke in razmerje  $c/r$ . Če postaja ustje razpoke med daljšanjem vedno bolj topo



Slika 5  
Sprememba elastične energije pri rasti razpoke (1)  
Fig. 5  
Change of elasticity energy in the crack propagation (1)

( $r$  se veča) in se razmerje  $c/r$  ne povečuje, pomeni, da je za daljšanje razpoke potrebno lokalno plastično deformiranje. Kovina se poruši pogosto z združevanjem več majhnih razpok in praznin. To je žilava porušitev kovine. Če pa pri daljšanju razpoke njena dolžina raste hitreje kot polmer ustja — razmerje  $c/r$  se povečuje — naraste v določenem trenutku napetost v ustju razpoke na vrednost teoretične trdnosti. Porušitev poteče brezdislokacijsko po kristalnih ravninah, zelo hitro in brez plastične deformacije v ustju razpoke. Ta proces imenujemo **krhka porušitev**.

Iz tega sledi, da je osnovni pogoj za krhki prelom doseženje take napetosti v ustju razpoke, kot je teoretična trdnost. To se dogodi, ko dolžina razpoke doseže tako imenovano »drugo kritično dolžino«  $c_2$ :

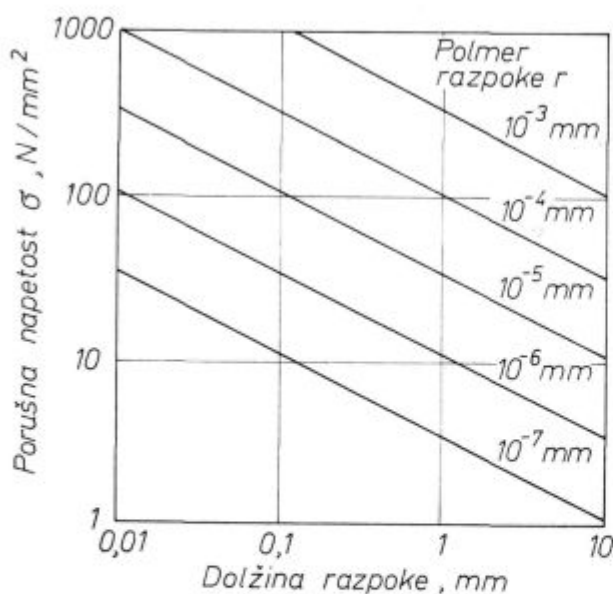
$$c_2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \left( \frac{E}{\sigma} \right)^2 \cdot r \quad /17/$$

(Prvo, Griffithovo kritično dolžino razpoke  $c_1$  imenujemo tisto dolžino, pri kateri je nakopičena elastična energija enaka porabi energije za nastanek novih površin)

$$c_1 = \frac{2\gamma}{\sigma} \quad /18/$$

$\gamma$  je specifična površinska energija,  $\sigma$  napetost.)  $c_2$  je večja od  $c_1$ , enaki sta pri ostrini razpoke  $r = 1 \text{ \AA}$ , kar pa se ne opaža.

Po enačbi /17/ ali iz diagrama na sliki 6 lahko dobimo napetost v odvisnosti od dolžine in ostrosti defekta, pri kateri se bo kovina porušila krhko (diagram velja za jeklo).

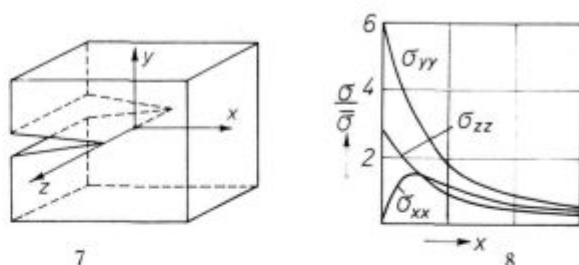


Slika 6

Porušna napetost krhkega loma v odvisnosti od dolžine in ostrine razpoke (4)

Fig. 6

Ultimate strength of brittle crack related to the length and the sharpness of the crack (4)



Slika 7

Obremenjeni vzorec z ostro zarezo (5)

Fig. 7

Loaded sample with a sharp notch (5)

Slika 8

Potek glavnih napetosti v preseku razpoke ( $y = 0$ ) v odvisnosti od vzdolžne koordinate  $x$  (5)

Fig. 8

Principal stresses in the crack section ( $y = 0$ ) related to the longitudinal axis  $x$  (5)

### 3. Mehanika loma

a) **Napetostno stanje ob zarezi (razpoki)** lahko razložimo na pravokotnem vzorcu z ostro zarezo (5) (slika 7). Potek napetosti v ploskvi  $xz$  ( $y = 0$ ) kot funkcije  $x$  je odvisen od mnogih vplivnih faktorjev, kot so ostrina zareze, druge mere zareze in vzorca, vrste obremenitve (natezna, upogibna) in tudi od tega, ali je deformacija elastična, delno plastična ali popolnoma plastična. Za elastično obremenitev so napetosti prikazane na sliki 8. V primerjavi s srednjo napetostjo  $\bar{\sigma}$  se v ustju razpoke najbolj poveča napetost  $\sigma_{yy}$ , in sicer tem bolj, čim ostrejša je zareza, medtem ko je napetost  $\sigma_{xx} = 0$ , ker je površina zareze brez sil.

V prečni smeri zareze ( $z$ ) je vedno določena napetost  $\sigma_{zz}$ , ki je različna od nič. Osnova te napetosti je taka: Velika napetost  $\sigma_{yy}$  v bližini ustja razpoke stremi povzročiti določeno velikost prečne kontrakcije. Ker pa na površini ustja zareze ni sile in napetosti v smeri  $x$ , nastopi protisila tej kontrakciji. Pri veliki ostrini zareze in velikem vzorcu se kontrakcija v splošnem ne pojavi in  $\epsilon_{zz} = 0$ . Iz napetostno-razteznostnih in ravnotežnih pogojev za napetosti sledi, da ima prečna napetost velikost

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{yy} + \sigma_{xx}) \quad /19/$$

$\nu$  je prečno kontrakcijsko (Poissonovo) število. Za kovine je  $\nu = 0,33$ . Zaradi manjkajoče prečne kontrakcije imenujemo to stanje **ploskovno deformacijsko stanje PDS** (Ebener Formänderungs... Deformations... Dämpfungszustand, Plane strain state). Temu stanju je nasprotno **ploskovno napetostno stanje PNS** (Ebener Spannungszustand, Plane stress state), pri katerem lahko prosto nastaja prečna kontrakcija. To se dogaja pri drobnih vzorcih in zelo žilavih materialih.

V vzorcih končnih mer ne more nastajati čisto PDS, kajti zaradi površin, ki so pravokotne  $z$ -osi in so brez sil, obstoji na njih ploskovno napetostno stanje (PNS) s  $\sigma_{zz} = 0$ . Pri velikih (debelih) preizkušancih lahko to zanemarimo in stanje

obravnavamo kot PDS. Pri majhnih vzorcih se v smeri z-osi te cone prekrivajo in stanje je PNS. Zato določamo lomno žilavost pri PDS z velikimi vzorci, pri PNS pa z majhnimi.

b) **Linearno elastična teorija mehanike loma.** Začetnik te teorije mehanike loma je G. R. Irwin, ki jo je leta 1948 objavil v ZDA (6). Izhodišče je analiza razpok v obremenjenih linearno elastičnih telesih. Razpoke v smislu te teorije so omejene ločitve materiala, katerih površine so si neskončno malo oddaljene in se končujejo v neskončno ostrem ustju razpoke. Linearno elastično obnašanje pa pomeni, da se material plastično ne deformira neodvisno od velikosti obremenitve. S tem in z različnostjo realnih razmer je dana tudi omejitev te teorije. Posebna prednost te teorije pa je, da se je nadaljevala v danes zelo uporabljanim načinu preizkušanja lomne žilavosti.

Razpoka, na katero vpliva zunanja sila, je prikazana na sliki 9 (7, 8). Nahaja se pravokotno na površino neskončno velike plošče končne debeline. Enoosno natezno napetostno polje deluje navpično na površino razpoke. V polarnih koordinatah, položenih v ustje razpoke, se tu pojavijo naslednje napetostne komponente:

Pri PDS:

$$\sigma_x = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2 \pi r}} \cdot f_x(\theta) \quad /20/$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2 \pi r}} \cdot f_y(\theta) \quad /21/$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad /22/$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2 \pi r}} \cdot f_{xy}(\theta) \quad /23/$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad /24/$$

Pri PNS je razlika le v tem, da je  $\sigma_z = 0$   
 $2a =$  dolžina razpoke,

$f_x(\theta) \dots =$  funkcije, odvisne samo od koordinate  $\theta$ .

Iznos napetostnih komponent je določen z velikostjo, ki je neodvisna od  $r$  in  $\theta$ :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{N mm}^{-3/2}) \quad /25/$$

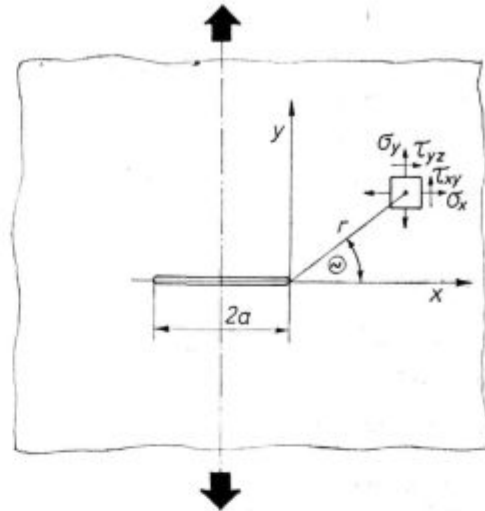
**K je faktor intenzivnosti napetosti ali kratko napetostna intenziteta (Spannungsintensitätsfaktor, Stress intensity factor, Koeffizient intensivnosti naprjaženija).** Za preizkušance realnih mer računamo z modificiranim faktorjem intenzivnosti napetosti

$$K = \sigma \sqrt{a} Y \quad /26/$$

$Y$  je funkcija, odvisna od položaja razpoke in geometrije preizkušanca. Zanj lahko uporabimo »tangensovo enačbo«:

$$\frac{Y}{\sqrt{\pi}} = \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2W}} \quad /27/$$

$W =$  širina preizkušanca



Slika 9  
 Napetosti v ustju razpoke (8)  
 Fig. 9  
 Stresses in the crack front (8)

Pod vplivom napetosti se razpoka v bližini ustja razširi za:

$$\text{pri PDS: } v = \text{COD} = \frac{K}{E} (1 - \nu^2) \sqrt{\frac{8r}{\pi}} \quad /28/$$

$$\text{pri PNS: } v = \text{COD} = \frac{K}{E} \sqrt{\frac{8r}{\pi}} \quad /29/$$

$r < a, \quad \theta = \pi$

$E =$  modul elastičnosti

$\text{COD} =$  Crack Opening Displacement = razširitev razpoke (razmaknitev obeh ploskev razpoke) =  $2v$

Elastična energija telesa, ki nima razpoke, se bo z nastankom razpoke dolžine  $2a$  zmanjšala za:

$$\text{pri PDS } U_{el} = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} (1 - \nu^2) B \quad /30/$$

$$\text{pri PNS } U_{el} = \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} B \quad /31/$$

$B$  je debelina telesa (plošče).

**Stabilnost in podaljšanje razpok:** V primeru, da se zaradi napetosti razpoka podaljša, se del elastične energije telesa sprosti in spremeni v delo  $U_d$  za premaganje upora, ki ga povzroča telo, in v kinetično energijo  $U_{kin}$  za premaknitev delov telesa. Če je  $U$  elastična energija telesa z razpoko pred podaljšanjem razpoke,  $U_z$  od zunaj dovedena energija med podaljšanjem razpoke in  $U_{el}$  med podaljšanjem razpoke sproščena energija, bo skupna energija sistema  $U_{sk}$  v vsakem trenutku:

$$U_{sk} = U + U_z - U_{el} \quad /32/$$

Skupna energija  $U_{sk}$  se razlikuje od energije pred širitvijo razpoke za iznos

$$U - U_{sk} = U_{el} - U_z, \quad /33/$$

ki se je porabil za delo za premagovanje upora  $U_d$  in kinetično energijo  $U_{kin}$

$$U_{el} - U_z = U_d + U_{kin}, \quad /34/$$

pri čemer ostane za kinetično energijo

$$U_{kin} = U_{el} - U_z - U_d \quad /35/$$

Razpoka bo torej

- stabilna, če je  $U_{kin}$  negativna,
- v ravnotežju, če je  $U_{kin}$  enaka nič,
- se bo podaljšala, če je  $U_{kin}$  pozitivna.

Z diferenciranjem enačbe /35/ po  $2a$  in s predpostavko, da je daljšanje razpoke tako hitro, da nanj zunanja energija ne vpliva ( $dU_z/d(2a) = 0$ ), bo nestabilnostni pogoj za daljšanje razpoke tak:

$$\frac{dU_{el}}{d(2a)} \geq \frac{dU_d}{d(2a)} \quad /36/$$

ali

$$\frac{dU_{el}}{d(2a)} - \frac{dU_d}{d(2a)} = \frac{d(U_{el} - U_d)}{d(2a)} \geq 0 \quad /37/$$

Ta energijski pogoj, ki je neodvisen od geometrije telesa in razpoke, je splošne vrednosti in pove, da se lahko prične razpoka daljšati (postane nestabilna), ko se bo sprostil več elastične energije  $U_{el}$ , kot pa porabilo energije za podaljšanje razpoke. Rešitev enačbe /37/ da:

$$G = \frac{1}{B} \cdot \frac{dU_{el}}{d(2a)} \quad \text{mm N/mm}^2 \quad /38/$$

in

$$R = \frac{1}{B} \cdot \frac{dU_d}{d(2a)} \quad \text{N/mm} \quad /39/$$

Enačbi /36/ in /37/ lahko pišemo tudi:

$$G > R \quad /40/$$

$G$  imenujemo **sila za daljšanje razpoke** ali **faktor sproščanja (elastične) energije** (spez. Rissverlängerungskraft, Energiefreisetzungsrates, Crack-extension force, Strain-energy release rate),  $R$  pa **sila proti daljšanju razpoke** ali **upornost za daljšanje razpoke** (Risswiderstandskraft, Rissverlängerungswiderstand).

Nestabilno podaljšanje razpoke je torej možno, ko postane faktor sproščanja energije  $G$  večji od upornosti za podaljšanje razpoke.  $G$  in  $R$  sta energiji na enoto ploskve ali sili na enoto razdalje z dimenzijo  $\text{mm N/mm}^2 = \text{N/mm}$ .

Pri linearno elastičnem obnašanju materiala lahko delo  $U_d$  izenačimo z energijo  $U_p$ , ki je potrebna za nastanek novih površin pri daljšanju razpoke. Če je specifična površinska energija  $\gamma$  znana, bo

$$U_d = U_p = 2 \cdot 2a \gamma B \quad /41/$$

To vrednost za  $U_d$  in vrednost za  $U_{el}$  iz enačb /30/ in /31/ vstavimo v enačbo /37/ in dobimo:

$$\begin{aligned} \text{pri PDS: } \frac{d}{d(2a)} \left[ \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} (1 - \nu) B - 4a \gamma B \right] \frac{1}{B} = \\ = G - R \geq 0 \quad /42/ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{pri PNS: } \frac{d}{d(2a)} \left[ \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E} B - 4a \gamma B \right] \frac{1}{B} = \\ = G - R \geq 0 \quad /43/ \end{aligned}$$

Dobimo, da je  $G$ :

$$\text{pri PDS: } G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} (1 - \nu^2) = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) \quad /44/$$

$$\text{pri PNS: } G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} = \frac{K^2}{E} \quad /45/$$

Iz teh enačb ponovno sledi znani Griffithov napetostni kriterij za nestabilno podaljšanje razpoke v linearno elastičnem telesu /13/:

$$\text{pri PDS: } \sigma \geq \sqrt{\frac{2 \gamma E}{\pi a (1 - \nu^2)}} \quad /46/$$

$$\text{pri PNS: } \sigma \geq \sqrt{\frac{2 \gamma E}{\pi a}} \quad /47/$$

Po enačbi /25/ je  $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ , čemur sledi

$$\text{pri PDS: } K \geq \sqrt{\frac{2 \gamma E}{(1 - \nu^2)}} \quad /48/$$

$$\text{pri PNS: } K \geq \sqrt{2 \gamma E} \quad /49/$$

S kombinacijo enačb /28/ in /29/ z enačbama /46/ in /47/ ali /48/ in /49/ dobimo tudi razširitevni kriterij za nestabilno podaljšanje razpoke:

$$\text{pri PDS: } \nu \geq 4 \sqrt{\frac{\gamma \gamma (1 - \nu^2)}{\pi E}} \quad /50/$$

$$\text{pri PNS: } \nu \geq 4 \sqrt{\frac{\gamma \gamma}{\pi E}} \quad /51/$$

**Kritične vrednosti za nestabilno podaljšanje razpok:** Enačaj v enačbah /42/, /43/ in /46/ do /51/ pomeni ravnotežno stanje razpoke, medtem ko večje vrednosti pomenijo, da je možno nestabilno podaljšanje razpoke. Kritične vrednosti teh meril označujemo z indeksom  $c$ , pri PDS pa še z indeksom  $I$ , torej

PDS	PNS	
$\sigma_{Ic}$	$\sigma_c$	kritična napetost
$K_{Ic}$	$K_c$	kritična napetostna intenzivnost
$\nu_{Ic}$	$\nu_c$	kritično razširjenje
$G_{Ic}$	$G_c$	kritična sila za podaljšanje

$K_{Ic}$  imenujemo tudi kratko **lomna žilavost**,  $G_{Ic}$  pa **lomna energija**.

**Elastična popustnost (voljnost):** V vzorcu z razpoko dolžine  $2a$ , ki je obremenjen s silo  $F$ , je odvisnost med podaljškom  $\Delta l$  in silo:

$$F = \alpha \Delta l = \frac{\Delta l}{C} \quad /52/$$

$\alpha$  je elastična konstanta ali elastična togost vzorca,  $C = 1/\alpha$  pa je **elastična popustnost (voljnost)** (Compliance, Nachgiebigkeit). Če gre  $2a \rightarrow 0$ , gre  $\alpha \rightarrow EA_0/l_0$ .  $E$  je modul elastičnosti,  $A_0$  je presek,  $l_0$  pa dolžina vzorca. Elastična popustnost je torej proporcionalna recipročni vrednosti modula elastičnosti.

Na tej osnovi sta bili izvedeni naslednji enačbi za  $K$ , ki vsebujeta tudi člena za funkcijo  $Y$ :

$$\begin{aligned} \text{Za PDS: } K &= \sigma \sqrt{a} \sqrt{\frac{E B W}{2(1-\nu^2)a} \cdot \frac{d(\Delta l/F)}{d(2a/W)}} = \\ &= \sigma \sqrt{a} Y \quad /53/ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Za PNS: } K &= \sigma \sqrt{a} \sqrt{\frac{E B W}{2a} \cdot \frac{d(\Delta l/F)}{d(2a/W)}} = \\ &= \sigma \sqrt{a} Y \quad /54/ \end{aligned}$$

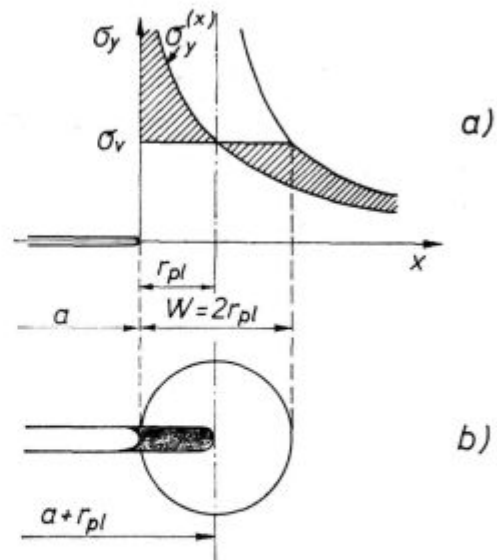
Pri znanih merah preizkušanca ( $B, W$ ) in z merjenjem elastične popustnosti (dolžina razpoke  $2a$  v odvisnosti od  $F$  in  $\Delta l$ ) lahko torej določimo tudi vrednost funkcije  $Y$ .

**c) Elastično plastična mehanika loma.** Linearne elastične teorije obnašanja materiala predpostavljajo, da se v okolici ustja zareze ne pojavlja plastična deformacija. V realnih razmerah pa se pojavljajo in je z njimi potrebno v določenih razmerah tudi računati. Pri zelo majhnih polmerih ustja zarez se tudi pri majhnih nazivnih napetostih pojavijo v okolici ustja napetosti, ki so večje od meje plastičnosti  $\sigma_v$ . Nastane področje v okolici ustja, ki mu pravimo **plastična cona**. Ta lahko precej vpliva na napetostno stanje v okolici ustja, kar je treba upoštevati pri obravnavanju stabilnosti zareze. V splošnem skušajo vse teorije upoštevati plastično cono tako, da še naprej ostanejo v veljavi osnovne linearne elastične enačbe. To dosežejo z uvajanjem tako imenovane »efektivne dolžine razpoke«, izza katere je samo še elastično obremenjeno področje.

**Plastična cona po Irwinu** je prikazana na sliki 10. Polmer te cone je določen z razdaljo  $r_{pl}$  v ligamentu vzorca ( $\Theta = 0^\circ$ ), v kateri je napetostna komponenta  $\sigma_y$  enaka  $\sigma_v$ . Iz enačb /21/ in /25/ sledi

$$r_{pl} = \frac{1}{2} a \left( \frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^2 = \frac{K^2}{2\pi\sigma_v^2} \quad /55/$$

Linearna elastičnost materiala predpostavlja, da v območju  $0 < x < r_{pl}$  ni presežena meja plastičnosti. Zato je treba sproščeno napetost v tem območju kompenzirati s premaknitvijo krivu-



Slika 10  
Plastična cona po Irwinu  
Fig. 10  
Plastic region by Irwin

lje  $\sigma_y$  v smeri  $x$  (slika 10 a), da gre skozi točko  $\sigma_v$ ,  $x = 2 r_{pl}$ . Plastična cona se razširi na:

$$w = 2 r_{pl} \quad /56/$$

in je cilindrične oblike (slika 10 b). Pravo razporeditev napetosti dobimo tako, da upoštevamo namesto  $a$  (pol dolžine razpoke) efektivno dolžino  $a_{ef}$

$$a_{ef} = a + r_{pl} \quad /57/$$

Iz tega sledi faktor intenzivnosti napetosti  $K$ :

$$K = \sigma \sqrt{\pi(a + r_{pl})} \quad /58/$$

Tudi druge obravnavane plastične cone (po McClintocku in Irwinu in po Dugdaleju) pridejo do istih ali podobnih rezultatov.

Preizkusi so pokazali, da se plastične cone v tankih in debelih preizkušancih občutno razlikujejo. V tankih ni mogoče doseči PDS, plastična cona s strižnimi napetostmi je razširjena skozi vso debelino in prelom je klinast. V debelih preizkušancih pa so linije drsenja na površini manjše in se ne širijo po celi debelini in prelom je ploščat. Po Irwinu in McClintocku prevladuje PDS, če je debelina preizkušanca:

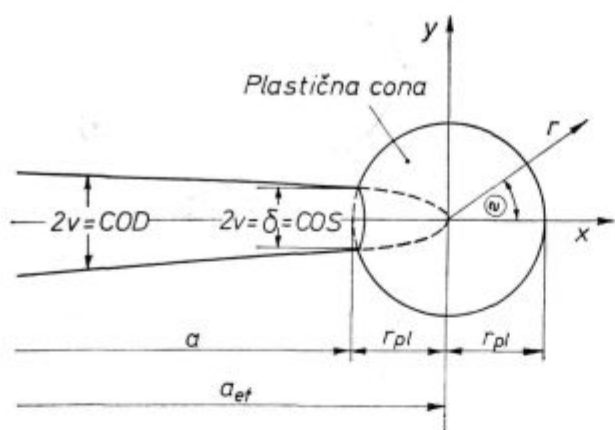
$$B \geq 2,5 \left( \frac{K}{\sigma} \right)^2 \quad \text{ali} \quad /59/$$

$$B \geq \frac{5\pi}{(1-2\nu)^2} \cdot r_{pl} \quad /60/$$

**Razširitev razpoke** (COD = Crack Opening Displacement, Rissuferverschiebung) je neposredna posledica plastične cone, pri čemer se prava dolžina razpoke  $2a$  ne poveča:

$$2v = \text{COD} \quad /61/$$

(v koordinati  $r$ , dočim je  $\Theta = \pi$ )



Slika 11

Sirjenje razpoke in plastična cona ob ustju razpoke (7)

Fig. 11

Crack displacement and plastic region at the crack front (7)

**Razširitev ustja razpoke** (COS = Crack Opening Stretch, Rissspitzenaufweitung) pa označujemo z  $\delta$ , ki je v ustju razpoke

$$\delta = 2v = \text{COS} \quad /62/$$

$$r = r_{pl} \quad \theta = \pi$$

Razlaga je prikazana na sliki 11 (7).

Po Dugdalejevem modelu razpoke dobimo, da je:

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_v} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{24} \left( \frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^2 \right] \quad /63/$$

Na drugi strani dobimo iz enačbe /45/ za PNS pri realnem obnašanju materiala z majhno plastično cono ( $r_{pl} < a$ ) in zamenjavo  $a$  z  $a_{ef}$  (enačbi 57 in 55) razmerje:

$$\frac{G}{G_v} \approx \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_v} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma}{\sigma_v} \right)^2 \right] \quad /64/$$

Enačbi /63/ in /64/ kažeta, da je pri  $\sigma/\sigma_v < 1$  odnos med  $\delta$ ,  $\sigma_v$  in  $G$  naslednji:

$$\delta = \frac{G}{\sigma_v} \quad /65/$$

**Energijske razmere** in pogoji iz enačb (32) do (40) veljajo tudi za preizkušance s plastično cono pri ustju razpoke, če je ta dovolj majhna v primerjavi z dolžino razpoke. Kriterij nestabilnosti razpoke potem pišemo:

$$G \geq R^* \quad /66/$$

in

$$R^* = 2 \gamma^* \quad /67/$$

$\gamma^*$  ima pomen efektivne površinske energije, ki vključuje tudi energijo plastične deformacije pri širjenju razpoke. Če upoštevamo še  $a_{ef} = a + r_{pl}$  namesto  $a$ , lahko tudi pri realnih materialih z majhno plastično cono (small scale yielding) določimo  $\sigma_{lc}$  ( $\sigma_c$ ),  $K_{lc}$  ( $K_c$ ),  $\delta_{lc}$  ( $\delta_c$ ) in  $G_{lc}$  ( $G_c$ ).

COD/COS koncept je precej v uporabi za določitev kritičnih vrednosti za daljšanje razpoke v elastično plastičnih materialih. V literaturi večinoma ne razlikujejo COD in COS, temveč uporabljajo za razširitev ustja razpoke le oznako  $COD = \delta$  in  $COD_c$  ( $COD_{lc}$ ) ter  $\delta_c$  ( $\delta_{lc}$ ).

**J-integral (11 do 23):** Naslednja metoda za opis stanja in žilavosti razpokanega materiala, ki se lomi elastično (nelinearno) plastično je J-integral. Temelji na energijskem izrazu, ki pomeni spremembo potencialne (elastične in plastične) energije, če se razpoka podaljša za infinitezimalni del razdalje da. J-integral je torej analogen faktorju sproščanja energije  $G$  v linearno elastičnem stanju, oziroma mu je v tem stanju enak:

$$J_{lin el} = G \quad /68/$$

Teorijo J-integrala je utemeljil J. R. Rice (11) leta 1968.

V splošni obliki je definiran energijski linijski po poti neodvisen integral  $J$  kot vsaka krivulja, ki obkroža ustje razpoke od spodnje do zgornje površine (slika 12):

$$J = \int_{\Gamma} \left( U_i dy - \bar{T} \frac{du}{dx} ds \right) \quad /69/$$

$\Gamma$  = Integracijska pot ustja razpoke od spodnje do zgornje površine

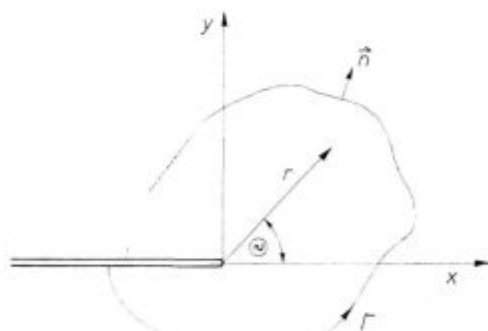
$\bar{u}$  = Vektor razširitve (displacement) v določeni točki  $\Gamma$

$\bar{T}$  = Natežno napetostni vektor

$U_i$  = Gostota deformacijske energije

$ds$  = Element poti na  $\Gamma$

$x, y$  = Kartezijske koordinate



Slika 12

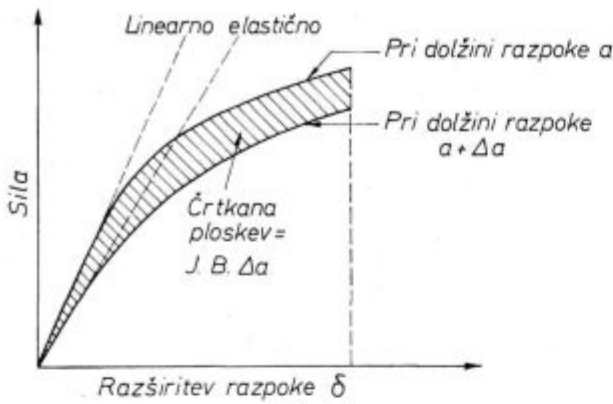
K razlagi J-integrala

Fig. 12

To the explanation of J-Integral

J-integral je v najenostavnejši obliki definiran kot energijska razlika dveh enakih in na enak način obremenjenih vzorcev z različno dolgima razpokama:

$$J = \left( - \frac{dU}{da} \right) \delta = \text{konst.} \quad /70/$$



Slika 13  
J-integral  
Fig. 13  
J-Integral

U je deformacijska (potencialna) energija, a je dolžina razpoke, δ pa razširjenje razpoke pri uporabljeni sili. Grafično je to prikazano na sliki 13. Krivulji natezanja dveh vzorcev z razpokama a in Δa sta nelinearni, senčeni del pa ustreza vrednosti JBΔa.

Prav iz teh krivulj na sliki 13 lahko dobimo eksperimentalne vrednosti J-integrala. Pri določeni razširitvi razpoke δ dobimo deformacijsko energijo U s planimetriranjem površine pod krivuljo za različne dolžine razpoka.

$$B \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_v} \right)^2 \quad /71/$$

V tem primeru je treba najprej napraviti predhodni preizkus z debelejším preizkušancem. Za določitev debeline preizkušanca in skupne dolžine razpoke lahko uporabimo tudi razmerje med  $\sigma_v$  in E:

$\sigma_v/E \cdot 10^3$	B, a (mm) (min)
5,0 — 5,7	75
5,7 — 6,2	63
6,2 — 6,5	50
6,5 — 6,8	44
6,8 — 7,1	38
7,1 — 7,5	32
7,5 — 8,0	25
8,0 — 8,5	20
8,5 — 10	12,5
nad 10	6,5

**C. DOLOČEVANJE LOMNIH ZNAČILNOSTI MATERIALOV**

**1. Določevanje ploskovno deformacijske (PDS) lomne žilavosti  $K_{Ic}$**

Preizkušanje lomne žilavosti  $K_{Ic}$  je bilo najprej standardizirano v ZDA leta 1969 s standardom ASTM E 399 (24), nato pa leta 1977 v Veliki Britaniji s standardom BS 5447, ki pa se od prej omenjenega bistveno ne razlikuje. Opis, ki sledi, je krajši povzetek ASTM standarda.

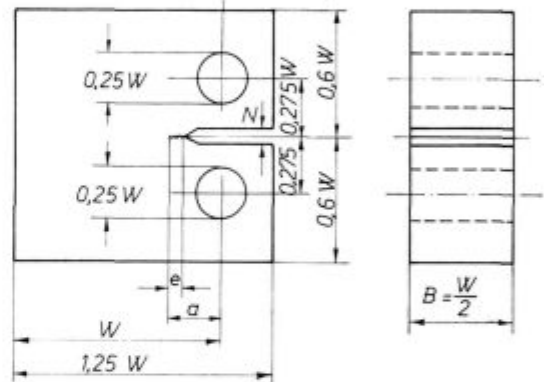
**a) Definicije:**

— Faktor intenzivnosti napetosti (stress-intensity factor)  $K_I$  ( $N\ mm^{-3/2}$ ) je merilo za intenzivnost napetostnega polja v bližini ustja idealne razpoke, ki se nahaja v linearno elastični snovi in je deformirana tako, da se površini razpoke razmakneta vsaksebi pravokotno na ravnino razpoke.  $K_I$  je direktno sorprocionalen uporabljeni sili in je odvisen od geometrije preizkušanca.

— Ploskovno deformacijska lomna žilavost  $K_{Ic}$  ( $N\ mm^{-3/2}$ ) je žilavostna lastnost materiala, določena v stanjih, veljavnih za  $K_I$  in z merjenjem najmanjše sile, pri kateri se razpoka podaljša.

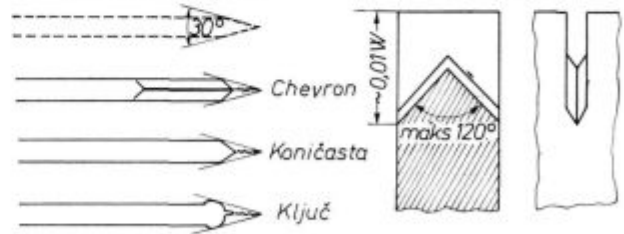
b) **Preizkušance** standardnih mer in zarez kaže slika 14. Pravilo pa je, da uporabimo takšne preizkušance, v katerih med preizkusom prevladuje PDS. Zato velja, da mora biti:

CT (Compact Tension) preizkušavec

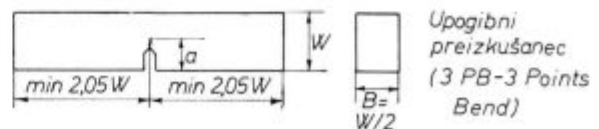


a = Skupna dolžina zarez in utrujenostne razpoke, ki naj bo  $a \approx B = 0,45$  do  $0,55 \times B$   
 e = Utrujenostna razpoka, min 5% a in min 1,3 mm  
 N = Širina zarez, min 15 mm, maks W/10

Zaraze in razpoke



Palmer ustja zarez maks 0,1mm



Upogibni preizkušavec (3 PB-3 Points Bend)

Slika 14  
Preizkušanci za določanje  $K_{Ic}$

Fig. 14  
Test specimens for  $K_{Ic}$  determination

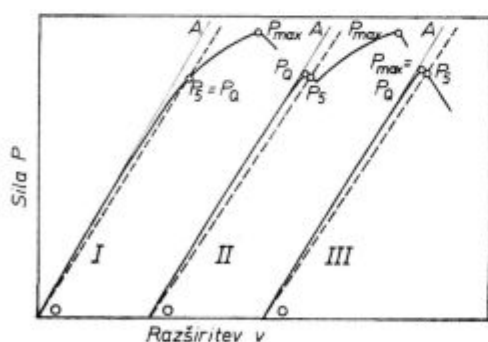
Utrujenostno razpoko je treba narediti z utrujenostnimi nihajnimi preizkusi v nateznem področju. V zadnjem stadiju daljšanje razpoke, to je za zadnjih 2,5 % celotne dolžine (zareze + razpoke) naj kvocijent maksimalne napetostne intenzivnosti napetostnega cikla  $K_f$  (max) in modula elastičnosti  $E$  ne preseže  $0,00032 \text{ m}^{1/2}$  ( $0,01 \text{ mm}^{1/2}$ )

$$\frac{K_f(\text{max})}{E} \geq 0,00032 \text{ m}^{1/2} (0,01 \text{ mm}^{1/2}) \quad /72/$$

$K_f$  (max) ne sme preseči 60 % vrednosti  $K_0$  (s  $K_0$  standard označuje predhodno določeno pogojno vrednost lomne žilavosti, ki jo po ugotovitvi pravih razmer preizkusa, predvsem PDS, lahko pišemo kot  $K_{lc}$ ). Območje napetostne intenzivnosti (med zgornjo in spodnjo silo) pa ne sme biti manjše kot  $0,9 K_f$  (max).  $K_f$  računamo po enačbi (26) z upoštevanjem funkcije  $Y$  za izbrano vrsto preizkušanca.

Utrujenostna razpoka mora biti dovolj enakomerno globoka po celi širini preizkušanca, kar pa lahko ugotovimo šele po prelomu. Merimo v sredini in na polovicah med sredino in roboma preizkušanca in izračunamo povprečno vrednost. Če katerakoli vrednost odstopa za več kot 5 % od povprečne vrednosti, je preizkus neveljaven.

c) **Potek preizkusa:** Vpenjanje preizkušancev zahteva posebne priprave, ki zagotavljajo dobro centričnost in majhno trenje pri obremenjevanju. Na začetku zarez se pritrdi merilec razširitve (Displacement Gage) v obliki dveh peres, od katerih ima vsako na notranji in zunanji strani merilni trak, ki so vezani preko Wheatstonovega mostu na rekorder. Hitrost obremenjevanja pri standardnih preizkušancih ( $B = 0,5 W$ ) naj bo v območju 30 do 150 N/s. Med preizkusom registriamo silo v odvisnosti od širjenja razpoke.



Slika 15  
Vrste krivulj »sila — razširitev«  
Fig. 15  
»Load—Displacement« curves

d) **Računi in razlage rezultatov:** Krivulje  $P/v$  (sila/razširitev) so lahko treh vrst, kot so prikazane na sliki 15. Najprej potegnemo tangento  $OA$ , nato pa sekanto  $OP_5$  z nagibom:

$$(P/v)_5 = 0,95 (P/v)_0 \quad /73/$$

$(P/v)_0$  je tangenta  $OA$  na linearni spodnji del krivulje. Silo  $P_0$  nato določimo takole:

— Če je sila v vsaki točki do  $P_5$  nižja kot  $P_5$ , je  $P_0 = P_5$  (krivulja I)

— Če je v določeni točki pred  $P_5$  sila večja kot  $P_5$ , je ta točka  $P_0$  (krivulji II in III)

Nato izračunamo kvocijent  $P_{max}/P_0$  ( $P_{max}$  je največja sila na zapisu). Če znaša več kot 1,10, je preizkus neveljaven, ker je možno, da  $K_0$  v tem primeru ni v pravilnem odnosu z  $K_{lc}$ . Izračunamo pa lahko  $R_{sb}$  ali  $R_{sc}$  (opis v nadaljnjem tekstu).

Če je prej omenjeni kvocijent manjši od 1,10, izračunamo  $K_0$  po enačbah:

Za upogibni preizkušane (3PB):

$$K_0 = 1,5 \frac{P_0 S}{B W^2} \sqrt{a} \cdot Y_{3PB} \quad /74/$$

Za natezni preizkušane (CT):

$$K_0 = \frac{P_0}{B W} \sqrt{a} \cdot Y_{CT} \quad /75/$$

Oblikovni funkciji  $Y_{3PB}$  in  $Y_{CT}$  sta:

$$Y_{3PB} = 1,93 - 3,07 \left(\frac{a}{W}\right) + 14,3 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25,1 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25,8 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad /76/$$

$$Y_{CT} = 29,6 - 185,5 \left(\frac{a}{W}\right) + 655,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1017 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 638,9 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad /77/$$

Nato izračunamo

$$2,5 \left(\frac{K_0}{\sigma_v}\right) \quad /78/$$

( $\sigma_v$  je meja plastičnosti, tudi  $\sigma_{0,2}$ )

in če je ta vrednost manjša od  $B$  in  $a$  je

$$K_0 = K_{lc} \quad /79/$$

V nasprotnem primeru moramo preizkus ponoviti z vsaj 1,5 krat debelejším preizkušancem.

Če preizkus ni uspel ( $P_{max}/P_0 > 1,10$  ali  $K_0 \neq K_{lc}$  ali material, ki je na razpolago, ne dopušča izdelave večjega preizkušanca, lahko izračunamo trdnostni kvocijent preizkušanca (Specimen strength ratio) po enačbah):

— Za 3PB:

$$R_{sb} = \frac{6 P_{max} W}{B (W - a)^2 \sigma_v} \quad /80/$$

— Za CT:

$$R_{sc} = \frac{2 P_{max} (2 W + a)}{B (W - a)^2 \sigma_v} \quad /81/$$



Kvocienta  $R_{sb}$  in  $R_{sc}$  nista v skladu s konceptom linearno elastične lomne mehanike, vendar sta lahko uporabni primerjavi žilavosti materialov. Preizkušanci morajo biti enakih oblik in mer.

Določevanje  $K_{Ic}$  da torej realne rezultate le v primerih, ko je plastična cona pri daljšanju razpoke majhna v primerjavi z velikostjo preizkušanca. Temu pogoju se najbolj približujejo materiali z visoko mejo plastičnosti, visokim kvociantom  $\sigma_v/\sigma_M$  in velikim modulom elastičnosti  $E$ . Dosedanje izkušnje (8) kažejo, da je uporabljen kriterij za predvidevanje realnosti preizkušanja  $K_{Ic}$  kvocient  $E/\sigma_v$ :

- če je ta približno 150 ali manjši, se da z gotovostjo določati  $K_{Ic}$  tudi z manjšimi preizkušanci,
- če je  $E/\sigma_v$  med 150 in 300, lahko dobimo  $K_{Ic}$  z ustreznimi večjimi preizkušanci, medtem ko je
- pri materialih z  $E/\sigma_v$ , večjim od 300, preizkušanje  $K_{Ic}$  nerealno.

**2. Določanje COD**

COD je merilo odpornosti proti prelomu za materiale, ki se pred prelomom močno plastično deformirajo in jih ne preizkušamo z načini linearno elastične lomne mehanike. Metode merjenja COD še niso standardizirane, so pa v osnutku pri BSJ že od leta 1972 (25). Iz tega vira je tudi v nadaljnjem tekstu opisana metoda, ki velja za upogibne 3PB preizkušance. Model za COD je na sliki 17.

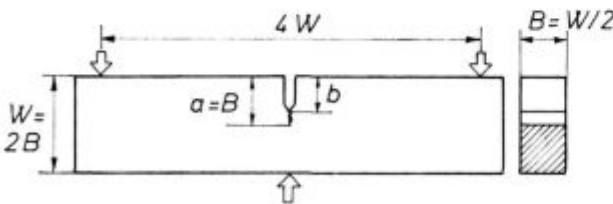
a) **Preizkušanci:** Oblike in mere so prikazane na sliki 16. Utrujenostno razpoko je treba izdelati z napetostno intenzivnostjo:

$$K_I < 0,63 \sigma_v \sqrt{B} \quad /82/$$

in z amplitudo sile:

$$P_a = \frac{K_I B \sqrt{W}}{C^* (a/W)} \quad /83/$$

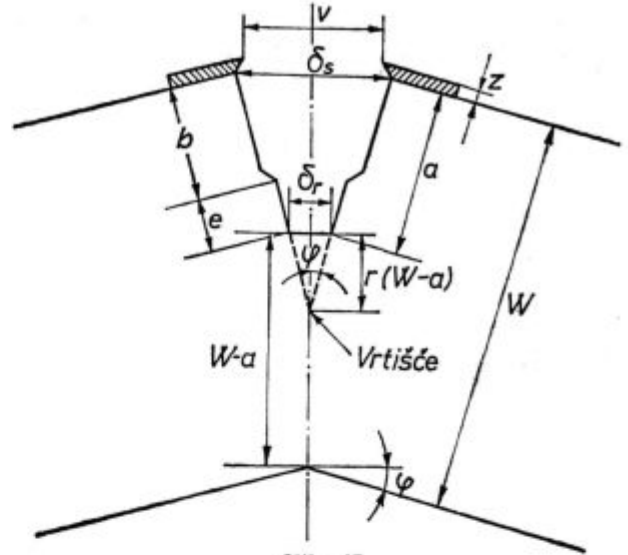
Kalibrirno konstanto  $C^*$  odčitamo v diagramu na sliki 18. Razširitev razpoke merimo z merilcem, kot je bilo opisano pri meritvah  $K_{Ic}$ .



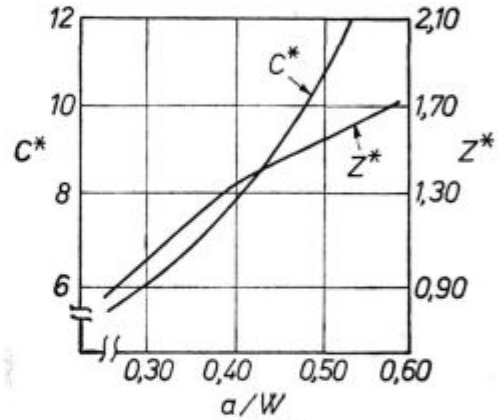
- $b = \text{maks}(a - 2,5)$  za  $B \geq 13 \text{ mm}$
- $b = \text{maks}(a - 1,75)$  za  $B \leq 13 \text{ mm}$
- Polmer ustja zarezke maks 0,1 mm
- Širina zarezke min 1,5 mm, maks 1/16 W
- $a = (0,45 \text{ do } 0,55) W$
- Razlika med  $a$  na eni in drugi strani maks. 0,05 W.

Slika 16  
Preizkušavec 3PB za meritve COD  
Fig. 16

3PB test specimen for COD measurements

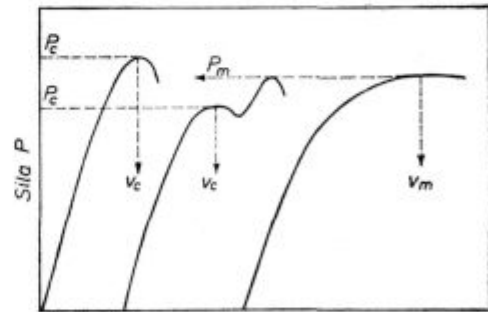


Slika 17  
Model za COD  
Fig. 17  
Model of COD



Slika 18  
Konstanti  $C^*$  in  $Z^*$  v odvisnosti od  $a/W$   
Fig. 18

$C^*$  and  $Z^*$  constants related to the  $a/W$  ratio



Slika 19  
Vrste P-v krivulj pri merjenju COD  
Fig. 19  
P-v curves in COD measurements

b) **Pri preizkusu** merimo odvisnost sile od razširitve in dobimo P — v diagram. Preizkus naj traja 30 do 300 s. Značilni diagrami so prikazani na sliki 19:

— Tip I: Razširitev narašča nepretrgoma z rastočo silo do nestabilne razširitve  $v_c$  pri kritični sili  $P_c$ .

— Tip II: Razširitev narašča v določenem območju pri konstantni ali pojemajoči sili, ki ji sledi povečanje sile.  $P_c$  in  $v_c$  odredimo pri tej prvi nenakomernosti krivulje.

— Tip III: Razširitev stabilno narašča s silo, kritičnih vrednosti ni mogoče določiti, zato določimo le  $P_m$  in  $v_m$ . Te vrednosti so le primerjalnega pomena.

c) **Kritične razširitve**  $\delta_c$  (ali  $COD_c$ ) določimo po dveh metodah:

**1. metoda:**

ali 
$$\delta_c = M (v_c - v_{el}) \dots v_c \geq 2 v_{el} \quad /84/$$

$$\delta_c = M \frac{v_c^2}{4v_{el}} \dots v_c \leq 2 v_{el} \quad /85/$$

$$M = \frac{0,45 (1 - a/W)}{0,45 + 0,55 a/W + z/W} \quad /86/$$

$v_{el}$  je elastična razširitev razpoke,  $z$  pa razdalja med vpenjalnim mestom merilca in površino preizkušanca (slika 17).

$$v_{el} = Z^* \frac{\sigma_v (W - v^2)}{E} \quad /87/$$

Konstanto  $Z^*$  odčitamo v diagramu na sliki 18.

**2. metoda:**  $\delta_c$  izračunamo po enačbi:

$$\delta_c = \frac{(1 - a/W)}{2a/W + 3z/W + 1} \cdot v_c \quad /88/$$

Po izkušnjah je enačba /88/ zelo ustrezna za debeline  $B$  do 50 mm in za področje  $\delta_c$  od 0,062 do 0,625 mm.

A. H. Priest (22) navaja, da je v pripravi BS standard, ki bo predpisoval ene vrste preizkus za  $K_{Ic}$  in COD, v enakih razmerah in z isto laboratorijsko opremo. Dosedanje enačbe za COD naj bi zamenjala naslednja:

$$\delta = \frac{K^2}{2 \sigma_v E} \cdot \frac{0,4 (W - a) v_{pl}}{0,4 + 0,6a + z} \quad /89/$$

$K$  je identičen s  $K_0$  v enačbah /74/ in /75/,  $v_{pl}$  (plastična razširitev razpoke) pa je skupna razširitev minus elastična razširitev  $v_{el}$  ( $v_{pl} = v - v_{el}$ ).

Avtorja T. Hollstein in J. G. Blauel (7) navajata poseben model določanja  $\delta$  (njuna oznaka  $COS^{lin}$ ) s CT preizkušanci po ASTM, in sicer na osnovi določenega rotacijskega mehanizma:

$$\delta = \frac{r (W - a_s)}{r (W - a_s) + a_s + z} \cdot v \quad /90/$$

$a_s$  je dolžina razpoke, vidna na površini,  $r$  pa rotacijski faktor, ki je

$$r = 11,6 \frac{v}{W} + 0,1 \quad /91/$$

**3. Določanje J-integrala**

Metoda za enotno določevanje J-integrala še ni standardizirana, vendar je po nekaterih podatkih (15, 16) znano, da se delovna skupina v okviru ASTM intenzivno ukvarja s standardiziranjem te metode. Sedaj pa še obstoji več metod, ki jih je potrebno na krato opisati (7, 10, 11, 15, 16, 22):

a) **Preizkušanci** so vrste 3PB in CT, torej upogibni in natezni, kot pri merjenju  $K_{Ic}$  in COD. Verjetno bodo s standardi izenačene tudi mere preizkušancev za vse te vrste določevanj. Podatki iz literature kažejo, da so do sedaj vendarle največ uporabljali 3PB preizkušance.

b) **Določitev** J-integrala temelji na merjenju sile  $P$ , razširitev  $v$  v liniji delovanja sile in podaljšanju razpoke  $\Delta a$ . Vrednost J-integrala izračunamo po enačbah:

— Za 3PB preizkušance (J. R. Rice, P. C. Paris, J. G. Merkle):

$$J = \frac{2 A}{B b} \quad /92/$$

— Za CT preizkušance (J. G. Merkle, H. T. Corten):

$$J = \alpha_1 \frac{2 A}{B b} + \alpha_2 \frac{2 P v}{B b} \quad /93/$$

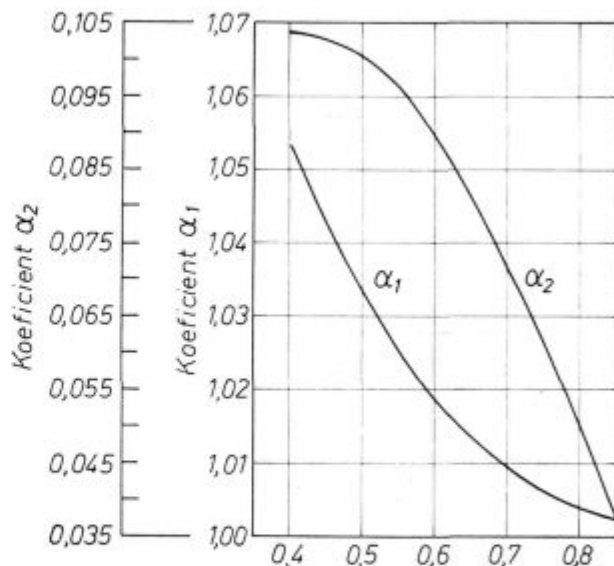
V enačbah pomeni:

A — površino pod  $P$  — v krivuljo

B — debelino preizkušanca

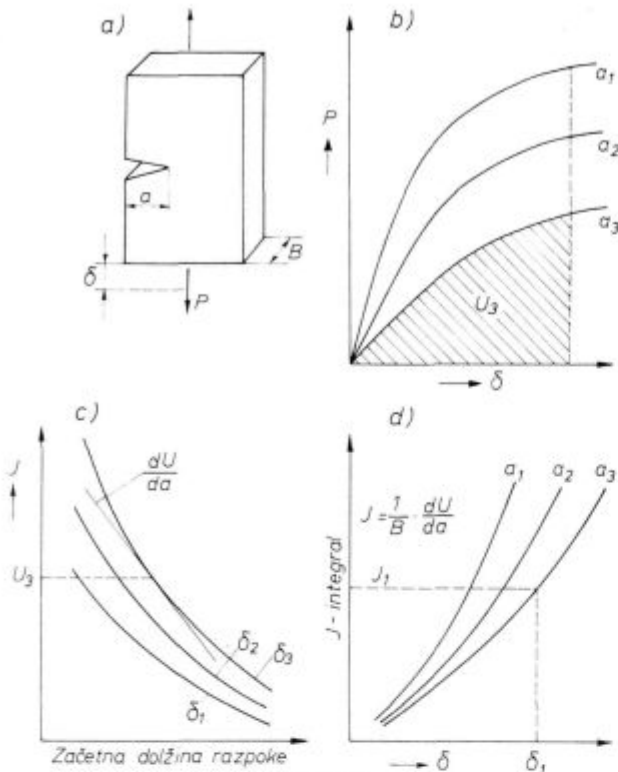
b — ligament preizkušanca ( $b = W - a$ )

$\alpha_1, \alpha_2$  — brezdimenzijska koeficienta, ki ju v odvisnosti od  $a/W$  odčitamo v diagramu na sliki 20.



Slika 20  
Vrednosti koeficientov  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  v odvisnosti od razmerja  $a/W$

Fig. 20  
Values of  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  coefficients related to the  $a/W$  ratio



Slika 21

Shema za določanje J-integrala z več preizkušanci z različno dolžimi razpokami

Fig. 21

Scheme of determining J-Integral with test specimens having cracks of various lengths

c) **Metoda z več preizkušanci in različnimi dolžinami razpoke:** Pri vsakem preizkusu s preizkušanci z različnimi dolžinami razpoke  $a$  merimo odvisnost sile  $P$  od razširitve  $\delta$  v točki prijemališča sile (slika 21a, b). Površina pod  $P$ - $\delta$  krivuljami je deformacijsko delo  $U$ . Nato za določene konstantne vrednosti razširitve narišemo odvisnosti pripadajočih vrednosti deformacijskega dela  $U$  od začetne dolžine razpok (slika 21c). Iz naklonskih vrednosti teh krivulj in debeline  $B$  lahko izračunamo vrednosti J-integralov glede na enačbo:

$$J = - \frac{1}{B} \cdot \frac{dU}{da} \quad /94/$$

J-integrali so torej negativni nakloni  $U/B - a$  krivulj, za določene  $\delta$ . S tem lahko določimo odvisnost  $J$ - $\delta$  za različne dolžine razpok  $a$  (slika 21 d). Ne moremo pa točno določiti tiste vrednosti  $\delta$  ( $\delta_c$ ), pri kateri se začne podaljševati razpoka.

d) **Metoda z več enakimi preizkušanci** (vključno z enako dolžimi razpokami): Postopek je takle:

— Več preizkušancev različno obremenimo, tako da dobimo različno dolge podaljške razpoke  $\Delta a$  (slika 22 a).

— Po razbremenitvah markiramo podaljšanja razpok (npr. z gretjem 10 min na 350°) in preizkušance do konca prelomimo pri temperaturi tekočega dušika. Izmerimo  $\Delta a$  (slika 22 b).

— Izračunamo J-integrale po enačbi /92/ (slika 22 c) in narišemo odvisnost  $J - \Delta a$  (slika 22 c).

— Presečišče  $J - \Delta a$  premice s premico

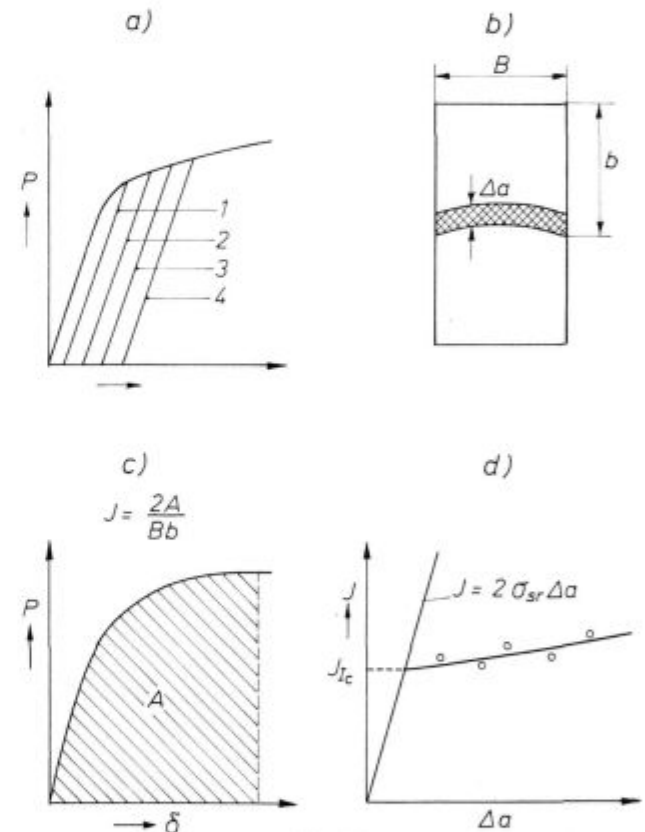
$$J = 2 \sigma_{sr} \cdot \Delta a \quad /95/$$

da kritično vrednost  $J_{lc} \cdot \sigma_{sr}$  je srednja vrednost med mejo plastičnosti in natezno trdnostjo:

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_v + \sigma_M}{2} \quad /96/$$

Po nekaterih podatkih (npr. 15, 16) bodo v ZDA to metodo standardizirali, zato navajamo še nekaj dognanj, ki so jih dobili s tem načinom določanja  $J_{lc}$ .

Prvi strmi del krivulje  $J - \Delta a$  pomeni tečenje materiala v ustju razpoke in s tem otopitev ustja, naslednji položnejši del pa je faza stabilnega šir-



Slika 22

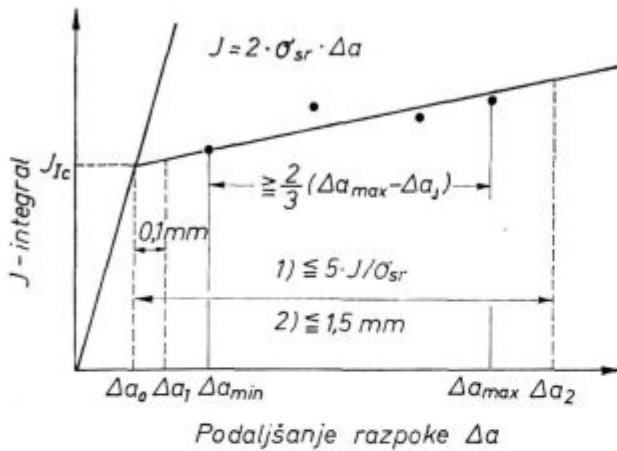
Shema za določanje J-integrala z več enakimi preizkušanci

Fig. 22

Scheme of determining J-Integral with equal test specimens

jenja razpoke. Oba dela krivulje rišemo kot premici, ki v presečišču dasta na ordinati  $J_{lc}$ . Razen poenostavljene enačbe /95/ so se uveljavila še takale pravila za določitev položnega dela krivulje (slika 23) (15): Merilne točke morajo biti v omenjenem področju daljšanja razpoke in sicer do:

$$\Delta a_2 = \Delta a_0 + 5 \frac{J_{lc}}{\sigma_{sr}} \quad /97/$$



Slika 23  
Merilne vrednosti pri določevanju  $J_{IC}$  (15)  
Fig. 23  
Measuring values for the  $J_{IC}$  determination (15)

Druga omejitev je, da to področje lahko znaša največ 1,5 mm:

$$\Delta a_2 \leq 1,5 \text{ mm} \quad /98/$$

Za najmanjše dopustno podaljšanje razpoke pa velja:

$$\Delta a_1 \geq \Delta a_0 + 0,1 \text{ mm} \quad /99/$$

Naslednji pogoj je širina področja, v katerem sta največji in najmanjši  $\Delta a$  ( $\Delta a_{max}$ ,  $\Delta a_{min}$ ):

$$\Delta a_{max} - \Delta a_{min} \geq \frac{2}{3} (\Delta a_{max} - \Delta a_0) \quad /100/$$

V tem področju morajo ležati najmanj štiri veljavne točke, kar pomeni, da mora biti za vsako točko izpolnjen pogoj:

$$B, b \geq 25 \frac{J}{\sigma_{sr}} \quad /101/$$

e) **Metoda z enim preizkušancem:** Pri tej metodi je potrebno razen merjenja sile in razširitve razpoke tekoče meriti še podaljšanje razpoke. Eden od načinov je postopek »elastične popustnosti«. Med snemanjem krivulje  $P-\delta$  je treba večkrat popustiti silo za okoli 10 %, tako da krivulja linearno poteče nazaj. Iz naklonov teh vej krivulje je mogoče sklepati o napredovanju razpoke. S posebno tehniko vezave elektronske naprave lahko dosežemo, da se elastični del krivulje sproti odšteva, tako da so veje krivulje pri popuščanju sile navpične, dokler se razpoka še ni začela daljšati, nato pa so bolj ali manj nagnjene.

Za tekoče merjenje daljšanja razpoke uporabljajo tudi postopek s potencialno sondo, ki temelji na povečanju električne upornosti med daljšanjem razpoke.

Metoda z enim preizkušancem je precej zahtevna, potrebne so naprave, ki niso dosegljive v vsakem laboratoriju (16).

#### 4. Instrumentirani udarni preizkus

Znani udarni preizkus žilavosti (Charpy) z zarezanim preizkušancem nam da žilavost ob zarezih, izraženo z delom, ki ga je nihajno kladivo porabilo za prelom preizkušanca. Žilavost izrazimo v  $J$  ali  $J/cm^2$ . Prelomno površino lahko še ocenimo glede na vrsto preloma, žilav ali krhek (kristaliničen) ali v odstotkih enega in drugega. Krhek prelom je s prostim očesom zlasti dobro viden pri gradbenih jeklih, medtem ko je pri visokotrdnih poboljšanih jeklih zelo težko ločiti obe vrsti preloma.

Napredek pri tej vrsti preizkušanja (26 do 34) je tako imenovano instrumentiranje kladiva: sekirico, to je tisti del kladiva, ki pri udarcu prelomi preizkušane, je potrebno opremiti z merilnimi trakovi in povezati s spominskim osciloskopom, ki pri prelomu pokaže časovno razporeditev sile med lomljenem preizkušancem.

Primeri krivulj, ki jih dobimo na osciloskopu, so shematsko prikazani na sliki 24: Krivulja a) je žilav prelom s počasnim zmanjševanjem sile loma in veliko površino pod krivuljo, ki je merilo za delo, oziroma žilavost, b) je žilavo krhek prelom, ko se lom prične žilavo, nato se del preseka, navadno v sredini, prelomi krhko (strm padec sile), konec loma pa je ponovno žilav, in c) krhek prelom.

Maksimum energije  $E_0$ , ki jo ima kladivo pred udarcem v preizkušane, je:

$$E_0 = \frac{1}{2} I \cdot v_0^2 \quad /102/$$

$v_0$  je hitrost kladiva neposredno pred trkom,  $I$  pa vztrajnostni moment.

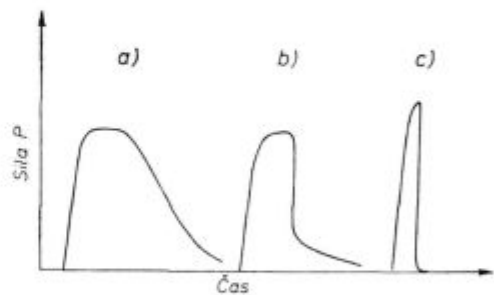
Ko kladivo prelomi preizkušane, se njegova energija zmanjša za  $\Delta E_0$  (26):

$$\Delta E_0 = E_J + E_{SD} + E_B + E_{MV} + E_{ME} \quad /103/$$

$E_J$  = energija za pospešenje preizkušanca do hitrosti kladiva,

$E_{SD}$  = skupna energija za upognenje preizkušanca,

$E_B$  = energija za deformacijo na mestu dotika (Brinell-type deformation),



Slika 24  
Vrste krivulj »sila — čas« pri instrumentiranem preizkušanju žilavosti po načinu Charpy  
Fig. 24  
»Load—Time« curves in instrumented toughness testing by the Charpy method

$E_{MV}$  = energija, ki jo absorbira stroj z vibracijami po začetnem kontaktu,

$E_{ME}$  = elastična energija, ki jo absorbira stroj kot rezultat interakcije na dotikalnih točkah (na podpori).

Iz enačbe /102/ sledi:

$$\Delta E_o = \frac{1}{2} I (v_o^2 - v_k^2) \quad \text{/104/}$$

$$\Delta E_o = \frac{G}{2g} (v_o^2 - v_k^2) \quad \text{/105/}$$

$G$  je efektivna teža kladiva,  $g$  zemeljski pospešek,  $v_k$  pa hitrost kladiva na koncu loma.

Površina pod krivuljo »sila-čas« je

$$\int_0^{\tau} P dt = I (v_o - v_k) \quad \text{/106/}$$

$P$  je sila,  $t$  je čas,  $\tau$  je čas od začetka do konca loma.

S kombinacijo zadnjih dveh enačb dobimo enačbi, ki sta osnovi za določitev žilavosti iz krivulje P-t:

$$\Delta E_o = E_a \left( 1 - \frac{E_a}{4 E_o} \right) \quad \text{/107/}$$

$$E_a = v_o \int_0^{\tau} P dt \quad \text{/108/}$$

Pravilneje je, da namesto  $v_o$  vzamemo srednjo vrednost hitrosti  $\bar{v}$  na začetku in koncu loma:

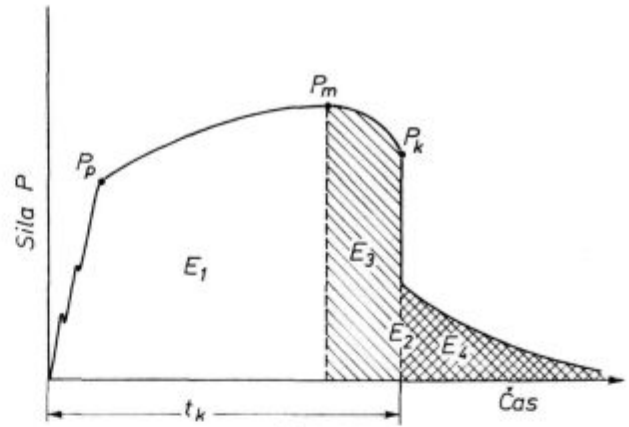
$$\bar{v} = 1/2 (v_o + v_k).$$

Instrumentacijo sekirice je potrebno najprej kalibrirati. Časovno vrednost razdelka na abscisi ekrana nastavimo na osciloskopu, silo na ordinati pa kalibriramo statično tako, da sekirico stiskamo med vzorednima ploščama. Geometrijske razmere morajo biti enake kot pri preizkusu s kladivom, med sekirico in stiskalno ploščo mora biti torej žilavostni preizkušanelec. Površino pod krivuljo izmerimo s planimetrom, medtem ko je  $v_o$  karakteristika stroja. Na ta način izračunamo  $\Delta E_o$ . To izračunano energijo moramo večkrat kontrolirati, oziroma primerjati z vrednostjo dela, ki ga pokaže stroj. Obe vrednosti se ne smeta preveč razlikovati.

Če računamo s srednjo hitrostjo kladiva  $\bar{v}$ , le-to izračunamo iz enačbe /105/, pri čemer je  $\Delta E_o$  žilavost, ki jo pokaže stroj.

Seveda pa ni namen instrumentiranja kladiva v tem, da bi računali žilavosti, saj te bolj natančno pokaže stroj. Iz krivulj P-t so pa vidne določene značilnosti lomov, ki lahko služijo praktičnim, raziskovalnim ali primerjalnim namenom.

Strm padec sile pomeni krhek lom; z odnosom višine tega strmega padca sile proti maksimalni sili lahko izrazimo delež krhkega loma. Večina raziskovalcev še vedno smatra, da je najbolj realen



Slika 25  
Sile in energije v idealiziranem P-t oscilogramu (legenda v tekstu)

Fig. 25  
Forces and energy in an idealized P-t oscilogramme (explanation in the text)

kriterij določanja prehodne temperature žilavosti 50 % krhkega loma. Pri poboljšanih jeklih pa je mogoče odstotke krhkega loma z gotovostjo določati le iz P-t krivulj.

Iz oscilogramov je mogoče dobiti še druge podatke, ki so prikazani v idealiziranem diagramu na sliki 25: silo splošne plastičnosti  $P_o$ , maksimalno silo  $P_m$ , silo krhkega loma  $P_k$ , čas do krhkega loma  $t_k$ , energijo do maksimalne sile (energija iniciranja razpoke)  $E_1$ , energijo po maksimalni sili  $E_2 = E_3 + E_4$  in energijo po krhkem lomu  $E_4$ . Če posebno zanimive podatke lahko dobimo, če damo te parametre v odvisnost od temperature preizkušanja.

#### Literatura

1. M. A. Krištal, L. E. Epštein: Mehaničeskie i fizičeskie osobnosti razrušenija metallov. Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov, 1978/4, 2-13
2. N. M. Fonštein: O kriterii  $K_{IC}$ , MITOM, 1976/8, 66-78
3. E. Orowan: Rep. Progr. Phys., 1948/12, 185
4. A. P. Guljaev: Vjazkoe i hrupkoe razrušenje stali. MITOM, 1977/7, 63-64
5. A. Kochendörfer: Grundlagen des Festigkeits- und Bruchverhaltens-Spannungen, mehrachsige Spannungszustände, Fließkriterien, 1974, 121-127
6. G. Irwin: Fracturing of Metals, ASM 1948, str. 147
7. T. Hollstein, J. G. Blauel: Zur Beurteilung von Rissen bei elasto-plastischem Werkstoffverhalten, BHM, 1978/5 146-153
8. E. Macherauch: Grundlagen des Festigkeits- und Bruchverhaltens-Bruchmechanik, 1974, 143-161
9. G. E. Dieter: Mechanical Metallurgy, II izdaja 1976
10. J. F. Knott: Fundamentals of Fracture Mechanics, 1973
11. J. R. Rice: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, J. Appl. Mech., 35, 379, 1968
12. J. A. Begley, J. D. Landes: The J Integral as a Fracture Criterion, ASTM STP 514, 1971, str. 1-20
13. J. D. Landes, J. A. Begley: The Effect of Specimen Geometri on  $J_{IC}$ , ASTM STP 514, 1971, str. 24-39
14. J. R. Bucci, P. C. Paris, J. D. Landes, J. R. Rice: J Integral Estimation Procedures, ASTM STP 514, 1971, str. 40-69

15. R. Stahlberg: Neuere Empfehlungen zum Vorgehen bei der Ermittlung kritischer Werte des J-Integral, Stahl u. Eisen 97, 1977, 24, str. 1224 in 1224
16. R. Stahlberg: Schritte zur Vereinheitlichung der Prüfverfahren zur Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte mit dem J-Integral
17. D. J. Hayes: Origins of the stress intensity factor approach to fracture, A general introduction to fracture mechanics, 1978, str. 9—16
18. J. F. Knott: The fracture toughness of metals, isto kot 13., str. 17—31
19. C. E. Turner: Yielding fracture mechanics, isto kot 13., str. 32—53
20. D. J. Cartwright, D. P. Rooke: Evaluation of stress intensity factors, isto kot 13., str. 54—73
21. R. R. Barr, P. Terry: Application of fracture mechanics to the brittle fracture of structural steels, isto kot 13., str. 93—113
22. A. H. Priest: Experimental methods for fracture toughness measurement, isto kot 13., str. 74—92
23. B. R. Lawn, T. R. Wilshaw: Fracture of Brittle Solids, Cambridge Solid State Science Series, 1975
24. 1977 Annual Book of ASTM Standards, Part 10, ASTM E 399, str. 505—524
25. Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, BSI Draft for Development, DD 19 (1972)
26. D. R. Ireland: Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test, ASTM STP 563, 1974, Instrumented Impact Testing, str. 3—29
27. H. J. Saxton, D. R. Ireland, W. L. Server: Analysis and Control of Inertial Effects During Instrumented Impact Testing, isto kot 26., str. 50—73
28. C. E. Turner: Measurement of Fracture Toughness by Instrumented Impact Test, ASTM STP 466, Impact Testing of Metals, 1970, str. 93—114
29. R. A. Wullaert: Applications of the Instrumented Charpy Impact Test, isto kot 28., str. 148—164
30. G. Tomberger: Wirkungsweise und Anwendungsbeispiele des instrumentierten Schlagversuches, BHM, 123, 5, 1977, str. 171—176
31. E. Bauerfeind: Datenerfassung und Datenauswertung beim instrumentierten Schlagversuch, BHM, 123, 5, 1977, str. 154—159
32. K. Seifert, L. W. Mayer: Möglichkeiten zum Vermindern des Aufschlagimpulses bei Bruchzähigkeitsprüfungen unter schlagartiger Beanspruchung, Materialprüfung 19, 1977, 6, Juni, 196—201
33. G. D. Fearnough, C. J. Hoy: Mechanism of Deformation and Fracture in the Charpy Test as revealed by Dynamic Recording of Impact Test, Journal of The ISI, Nov. 1964, 912—920
34. Impact Testing of Metals, ASTM STP 466

## ZUSAMMENFASSUNG

Unter den mechanischen Eigenschaften ist der Bruchwiderstand eine der wichtigsten Eigenschaften. Eine Reihe von katastrophalen Brüchen an Schiffen, Brücken und anderen Konstruktionen vor dem und während des zweiten Weltkrieges waren der Anlass, dass die Forschungen über die Brucherscheinungen an Metallen einen grossen Aufschwung angenommen haben. Diese Bemühungen äussern sich auch in einer Reihe neuer Prüfungsverfahren.

In diesem Artikel wird der heutige Stand auf dem Gebiet der Bruchforschung der metallischen Stoffe gegeben. Im ersten Teil werden theoretische Grundlagen über die Festigkeit, den spröden und zähen Bruch, und die Bruchmechanik behandelt. Im zweiten Teil werden dann die Verfahren für die Prüfung der Brucheigenschaften der Metalle beschrieben.

## SUMMARY

Resistance to brittle fracture is one of the most important mechanical properties of metals. A number of catastrophic collapses of bridges, ships, and other constructions before and during the Second World War stimulated the extensive investigation of the fracture phenomena which introduced numerous new methods for testing metals.

The paper presents the present state in the field of fracture investigations in metallic materials. The first part gives theoretical fundamentals on the strength of metals, on brittle and tough fractures, on fracture mechanics, while testing the fracture characteristics of metals is described in the second part of the paper.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одно из более всего значительных механических свойств металлов представляет сопротивление хрупкому излому. Целый ряд катастрофических аварий судов, обрушение мостов и других сооружений до и во время второй мировой войны стало причиной широкого размаха исследования явлений изломов металлов. Вместе с этим возник целый ряд новых способов испытания металлов.

В статье рассмотрено настоящее положение в области исследования изломов металлических материалов. В первой главе изложены теоретические основы о вязкости металлов, о хрупком и вязком изломе и о механике изломов. Во второй главе описаны способы определения характерных свойств изломов металлов.

# Nekateri problemi izdelave avtomatnih jekel v električnih obločnih in Siemens-Martinovih pečeh

UDK: 669.14.018.23  
ASM/SLA: SQA—k

J. Arh, T. Razinger, B. Koroušič, K. Hribar, F. Pukl

## 1. UVOD

Železarna Jesenice je največji proizvajalec avtomatnih jekel in edini proizvajalec s svincem legiranih avtomatnih jekel v Jugoslaviji. Največji del teh jekel zavzemajo polpomirjena avtomatna jekla z visokim indeksom obdelovalnosti z dodatkom svinca ali brez njega. Osnovno jeklo ima sestavo: 0,1 % C, 1,0 % Mn in 0,30 % S. Znano je, da je obdelovalnost odvisna od kemične sestave jekla in od vrste, količine, porazdelitve in oblike nekovinskih vključkov. Najbolj ugodna za dobro obdelovalnost je globulitična oblika sulfidnih in oksisulfidnih vključkov. Na mehanizem tvorbe oksisulfidnih vključkov vpliva cela vrsta parametrov, med katerimi je vsebnost kisika najpomembnejša. Regulacija vsebnosti kisika je zato najbolj pomembna faza proizvodnje avtomatnega jekla.

Pri regulaciji vsebnosti kisika v jeklu so nam lahko v veliko pomoč najnovejše metode direktnega določanja kisika v tekočem jeklu s kisikovo sondo.

Pomembna faza proizvodnje avtomatnih jekel je kontrola obdelovalnosti in kontrola oblike sulfidnih nekovinskih vključkov.

Polpomirjena avtomatna jekla, ki jih obravnava ta članek, izdelujemo v električnih obločnih kakor tudi Siemens-Martinovih pečeh.

## 2. IZDELAVA POLPOMIRJENIH AVTOMATNIH JEKEL V ELEKTRIČNIH OBLOČNIH PEČEH

Električne obločne peči so zelo dober talilni agregat za proizvodnjo avtomatnih jekel, saj je v njih možna izdelava najboljših avtomatnih jekel po hitrem in enostavnem tehnološkem postopku.

Shema postopka izdelave kaže slika 1.

### 2.1 Glavni problemi izdelave jekla

#### 2.1.1 Regulacija vsebnosti kisika v jeklu

Osnovni problem izdelave polpomirjenih avtomatnih jekel je, kako regulirati vsebnost kisika v izdelanem jeklu v takih mejah, da bo obdeloval-

nost izdelanega jekla dobra, oziroma da bo indeks sulfidnih vključkov v izdelanem jeklu čim višji. Vsebnost kisika v izdelanem jeklu je odvisna:

1. od vsebnosti kisika po oksidaciji, oz. pred prebodom

2. od načina preddezoksidacije jekla

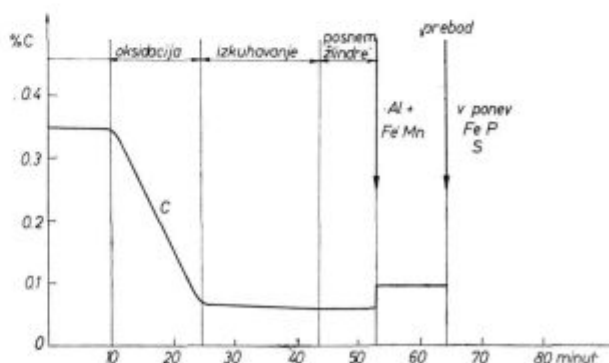
3. od reakcij jekla s kisikom iz zraka, ko jeklo teče iz peči v ponev, in pri vlivanju.

Regulacija vsebnosti kisika v izdelanem jeklu ni niti malo enostavna, če vsebnosti kisika ne moremo izmeriti in ker na reakcije jekla s kisikom iz zraka med izlitjem jekla iz peči v ponev nimamo zadostnega vpliva. Obseg te reakcije je močno odvisen od oblike curka in trajanja preboda. Pogoji oksidacije curka jekla pri vlivanju so v glavnem konstantni. Le pri jeklih, legiranih s svincem, je curek jekla izpostavljen močnejši oksidaciji, ker pač svinec dodajamo s pomočjo zraka.

Ugotavljamo, da ima največji vpliv na morfologijo vključkov v izdelanem jeklu vsebnost kisika v jeklu po oksidaciji, oziroma posredno vsebnost ogljika v tej fazi izdelave jekla. Stroga kontrola vsebnosti ogljika po oksidaciji je za enakomerno in stabilno kvaliteto polpomirjenih avtomatnih jekel nujno potrebna.<sup>1</sup>

Praksa kaže, da je najbolj ugodna vsebnost ogljika od 0,05—0,07 % C. Nižja vsebnost ogljika lahko povzroči napake zaradi preoksidacije jekla. Izkoristek pri čiščenju gredic je potem slabši.

Shema izdelave avtomatnega jekla Č 3990



Slika 1

Shema postopka izdelave jekla v električni obločni peči  
Fig. 1

Flowsheet for steel production in electric arc furnace

\* Predavanje na posvetovanju jeklarjev držav SEV ob stoti obletnici obratovanja konverterjev v železarni VEB MAXHÜTTE Unterwellenborn v NDR 5. in 6. 4. 1979

2.2 Vsebnost kisika v jeklu pri oksidaciji pred prebodom in v ponvi

2.2.1 Kisikove sonde

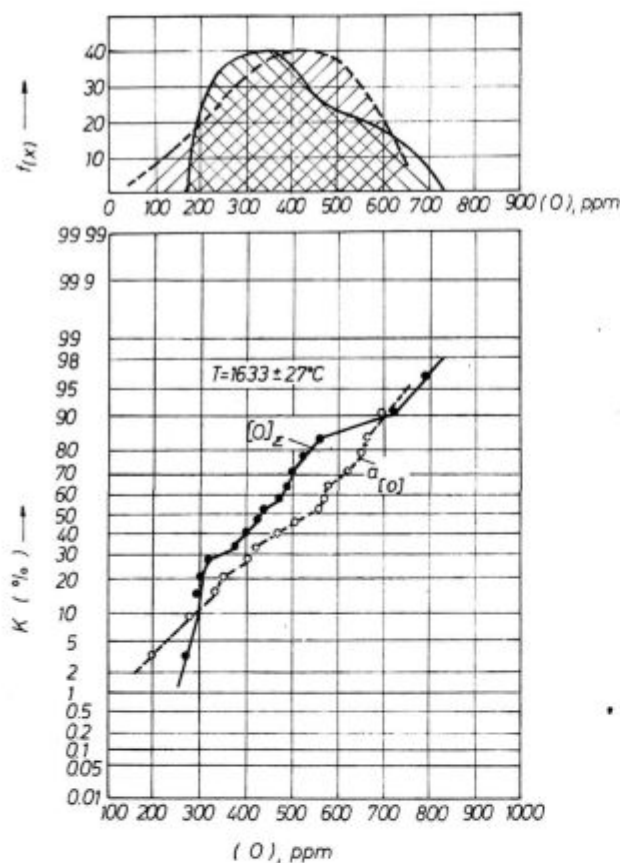
Ko smo izbirali primerno kisikovo sondo, smo se med različnimi tipi odločili za sondo tipa Fox (licenca Ferrotrom ZRN), ki uporablja kot referenčno elektrodo mešanico Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, predvsem zaradi tega, ker se od do sedaj znanih komercialnih sond razlikuje po tem, da merne vrednosti elektronsko obdela (EMNiT). Končni rezultat meritev so digitalne vrednosti za temperaturo (°C), elektro motorsko napetost EMN (mV) in aktivnost kisika (ppm).

2.2.2 Rezultati meritev vsebnosti kisika v jeklu

Pri polpomirjenih avtomatnih jeklih smo dovolj časa opravljali obsežne preiskave gibanja kisika v jeklu v času izdelave.<sup>2</sup>

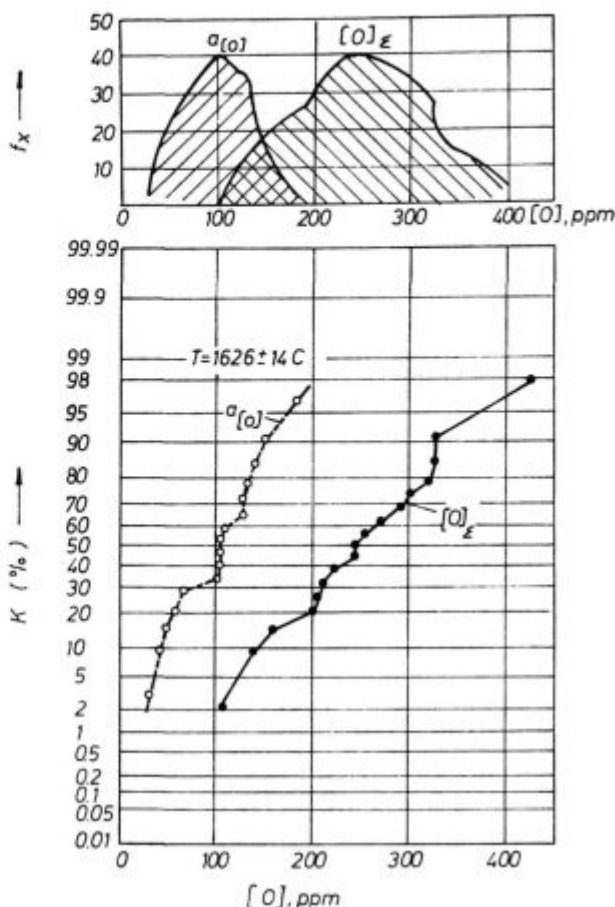
Določali smo aktivni in celokupni kisik.

Meritve s kisikovo sondo dajo kot rezultat aktivni kisik, ki edini vpliva na morfologijo vključkov.



Slika 2  
Porazdelitev kisika v talini po končani oksidaciji  
a(O) aktivnost kisika, merjena s sondo  
(O)Σ celokupni kisik

Fig. 2  
Oxygen distribution in the melt after the completed refining  
a(O) oxygen activity measured with the probe  
(O)Σ total oxygen



Slika 3  
Porazdelitev kisika v talini tik pred prebodom  
a(O) aktivnost kisika, merjena s sondo  
(O)Σ celokupni kisik

Fig. 3  
Oxygen distribution in the melt just before tapping  
a(O) oxygen activity measured with the probe  
(O)Σ total oxygen

Vsebnost kisika po oksidaciji ogljika

Na sliki 2 je prikazana porazdelitev kisika v talini po končani oksidaciji.

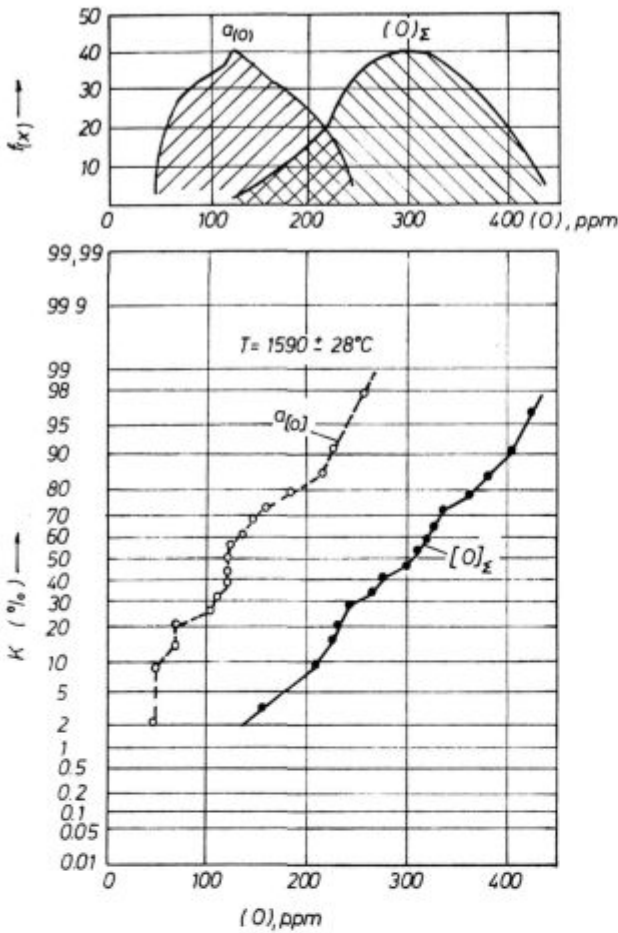
Kakor je razvidno s slike 2, po končani oksidaciji ni bistvene razlike med aktivnim in celokupnim kisikom. Vsebnost oksidnih vključkov po končanem pihanju kisika je dokaj nizka. Koeficient aktivnosti kisika se približuje vrednosti 1.

Vsebnost kisika pred prebodom

Na sliki 3 je prikazana porazdelitev kisika v talini tik pred prebodom iz peči, ki nazorno pokaže tvorbo oksidnih vključkov po dodatku FeMn in Al v peč.

Vsebnost kisika v talini pred prebodom je kritični parameter za kontrolo narave in količine oksisulfidov pri izdelavi avtomatnega jekla. Zato je poznavanje te veličine pomembno.



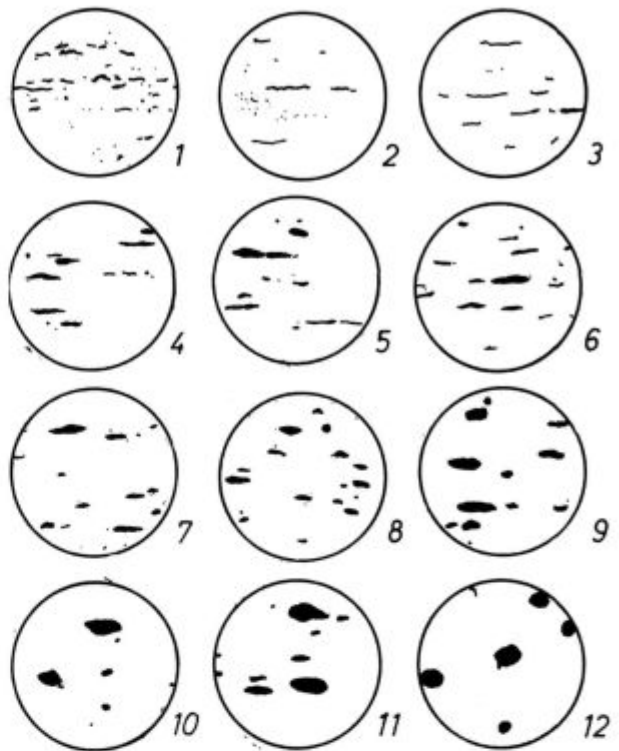


Slika 4

Porazdelitev kisika v jeklu v ponvi  
 $a(O)$  aktivnost kisika, merjena s sondo  
 $(O)\Sigma$  celokupni kisik

Fig. 4

Oxygen distribution in steel in the ladle  
 $a(O)$  oxygen activity measured with the probe  
 $(O)\Sigma$  total oxygen



Slika 6

Skala za oceno indeksa sulfidov

Fig. 6

Scale for estimating sulphide index

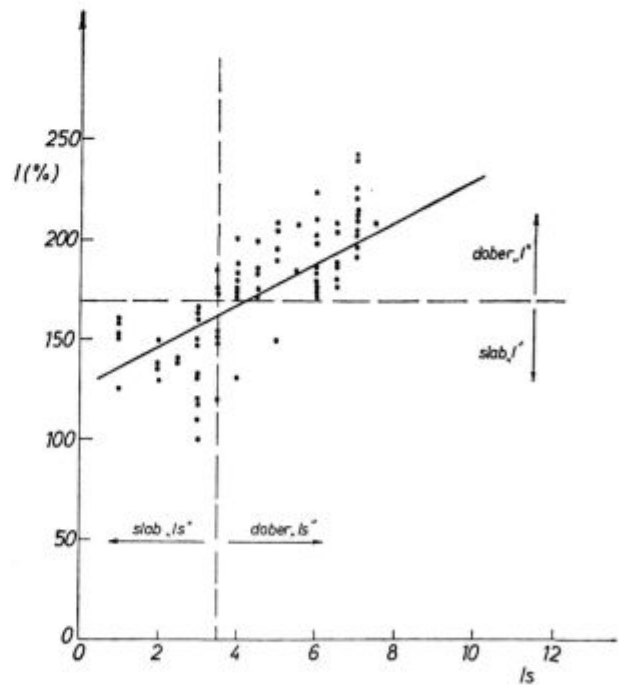
Oznaka jekla Števil. vrstice	Srečna analiza (%)	Obdelovalni indeks (%)	Primerjavo z AUS in ligne strožari				
			AUS-DB 525/985	DN 1851 1961	ISO-DR	AISI-US	Alpine
Jeklo z visokim indeksom obdelovalnosti							
ATJ 100 Pb	0,05C, 0,04Mn, 0,02Pb	170	—	9,5 Mn / Pb 26	2 Pb	12 L 14	2 S Pb
Č 3590	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	135	Č 3590	9,5 Mn 26	2	12 13	2 S
ATJ 70	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	140	—	9,5 Mn 26	3	—	—
Jeklo za cementacijo							
ATJ 80 C	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	110	—	—	—	12 L 17	—
Č 3190	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	100	Č 3190	—	—	11 15	M 2
Č 1190	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	100	Č 1190	10 S 20	4	11 W	2 E 10
Jeklo za podeljorje							
ATJ 40 G	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	80	—	—	—	11 L 37	L 28 0
Č 1490	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	70	Č 1490	35 S 20	7	11 38	2 V 35
Č 1590	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	65	Č 1590	45 S 20	10	11 46	2 V 45
Merjena jekla							
Č 4590	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	70	v prilozi	120 W 15/15	—	303	4s 22
Č 4900	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	90	v prilozi	—	—	416	NW 152
Č 4790	0,05C, 0,04Mn, 0,02S	95	v prilozi	120 W 15/17	—	430 F	NW 24

Slika 5

Kvalitetni asortiment avtomatnih jekel železarnice Jesenice

Fig. 5

Quality assortment of free-cutting steel in Jesenice Iron-works

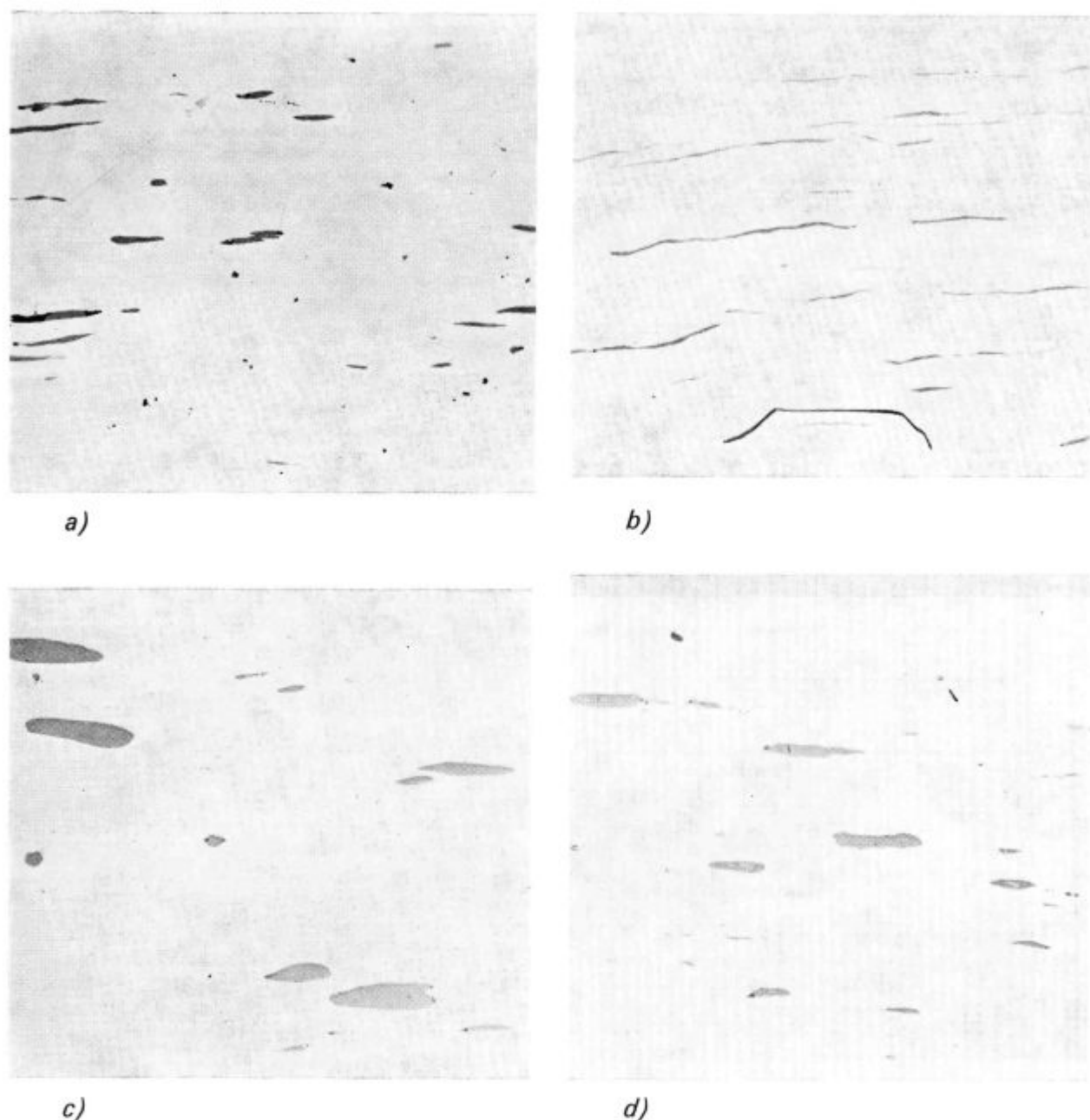


Slika 7

Odvisnost indeksa obdelovalnosti I od indeksa sulfidnih vključkov  $I_s$

Fig. 7

Relationship between the machinability index, I, and the sulphide inclusions index,  $I_s$ .



Slika 8

Oblika sulfidnih vključkov pri različnem indeksu sulfidnih vključkov

a,b Is = 1 do 3  
c,d Is = 4 do 12

a,c = kovano stanje  
b,d = hladno vlečeno stanje

Fig. 8

Shape of sulphide inclusions with various sulphide inclusions indices

a,b Is = 1 to 3  
c,d Is = 4 to 12

a,c — cold forged  
b,d — cold drawn

### Vsebnost kisika v jeklu v ponvi

Na sliki 4 je prikazana porazdelitev kisika v jeklu v ponvi. Pri preobodu jekla iz peči se talina legira z žveplom in po potrebi, če je bila vsebnost kisika pred preobodom previsoka, tudi korigira vsebnost kisika z dodatkom aluminija. Če smo uspeli obdržati ogljik po oksidaciji v predpisanih

mejah, potem to navadno ni potrebno. Iz primerjave slik 3 in 4 vidimo, da je prišlo do delnega znižanja vsebnosti aktivnega in skupnega kisika v jeklu. Pri tem so vzorci za določevanje celokupnega kisika vzeti iz curka jekla pri vlišanju. Povedati je treba, da smo žlindro pred dodatkom FeMn in Al v peč odstranili iz jekla, tako da ta med preobodom ne vpliva na preoksidacijo taline.

Vsebnost aktivnega kisika od 100 do 150 ppm, merjeno v ponvi, daje najboljši rezultat v pogledu obdelovalnosti. Indeks sulfidnih vključkov se giblje pri tem kisiku od 4 do 7.

### 3. IZDELAVA POLPOMIRJENIH AVTOMATNIH JEKEL V SM PEČEH

Polpomirjena avtomatna jekla izdelujemo tudi v SM pečeh. Proizvodnja teh jekel v SM pečeh je bila dolgo zvezana s precejšnjimi težavami, zato smo vedno dajali prednost električni obločni peči. Pokazalo se je, da je regulacija vsebnosti kisika v izdelanem jeklu, predvsem pa regulacija pravilne globulitične oblike oksisulfidnih vključkov težja kakor v električni obločni peči. Zaradi načina preddezoksidacije, ki jo v SM pečeh opravljamo s silikomanganom, nismo mogli doseči pravilne kemične sestave. Zaradi debelega sloja žilindre tudi meritve vsebnosti kisika s sondo niso bile možne. Raziskave so pokazale, da je predvsem škodljiva vsebnost majhnih količin silicija v končni sestavi. Vse fero zlitine, ki imajo v svoji sestavi silicij, za proizvodnjo teh jekel niso uporabne. Silikomangan smo nadomestili z majhno količino feroaluminija, ki ga dajemo v peč skupaj s potrebno količino feromangana. V ponvco dodajamo ferofosfor, žveplo in preostali feromangan.

### 4. KONTROLA KVALITETE AVTOMATNIH JEKEL

Raziskovalno delo razvijanja kvalitete in proizvodnje avtomatnih jekel je trajalo s presledki 10 let. V tem času smo razvili tak kvalitetni asortiment, ki popolnoma zadovoljuje potrebe naše predelovalne industrije.

Odločilno vlogo pri razvoju avtomatnih jekel je imela konstrukcija lastne naprave za ocenjevanje obdelovalnosti. Naprava dela na principu konstantnega podajnega pritiska. Vzporedno z obdelovalnostjo smo določali tudi celokupni kisik v jeklu. Kmalu smo ugotovili, da med celokupnim kisikom in obdelovalnostjo ni zanesljive medsebojne zveze.

Z razvojem metod direktnega določevanja aktivnega kisika so bile dane široke možnosti za intenzivno raziskovalno delo, predvsem na področju polpomirjenih avstenitnih jekel.

Danes kontroliramo pri avtomantih jeklih obdelovalnost, ki jo izražamo z indeksom obdelovalnosti, in obliko oksisulfidnih vključkov, ki jo izražamo z indeksom sulfidnih vključkov.

4.1 Ocenjevanje obdelovalnosti z metodo struženja s konstantnim pritiskom

Ta metoda ocenjevanja obdelovalnosti je primerjalna. Dobljene rezultate primerjamo s podatki standardnega vzorca s sestavo 0,2 % C, 1,3 % Mn, 0,20 % S in jih izrazimo v % kot indeks obdelovalnosti (I).

Vzorci dobimo s kovanjem iz gredic 135 mm kv. ali 120 mm kv. in imajo premer  $\varnothing$  40 mm. Spodnja meja obdelovalnosti, določena na kovanih vzorcih, je 170 %, na vlečenem avtomatnem jeklu pa se mora gibati od 135 % navzgor.

4.2 Klasifikacija oksisulfidnih vključkov s pomočjo indeksa sulfidov

Indeks sulfidov (Is) določamo s primerjalno metodo po posebej za avtomatna jekla izdelani skali, ki jo kaže slika 6.

Vključki so razvrščeni v dvanajst razredov od 1 do 12. Ker je bila skala izdelana namensko za oceno indeksa sulfidov, ne upošteva gostote vključkov, pač pa samo njihovo obliko. Tako so s številko 12 ocenjeni sulfidi globularne oblike, z 1 pa sulfidi razpotegnjene oblike.

4.3 Medsebojna odvisnost indeksa obdelovalnosti I in indeksa sulfidov Is

Med indeksom obdelovalnosti in indeksom sulfidov obstoji očitna medsebojna zveza. To se lepo vidi s slike 7. Koeficient korelacije je 0,67.

Na osnovi celotnega zasledovanja rezultatov smo prišli do podatka, da jeklo z vključki, ocenjenimi z indeksom sulfidov 1 do 3 (glej sliko 7), ne doseže predpisane spodnje meje obdelovalnosti 170 % na kovanih vzorcih. Pri nadaljnji hladni predelavi se ti vključki še dalje razpotegneno in minimalno sodelujejo pri obdelovalnosti jekla (glej sliko 8 b).

Nasprotno pa vključki, ocenjeni z indeksom sulfidov od 4 do 12, ohranijo ovalno obliko tudi po hladni predelavi, kar je pogoj za dobro obdelovalnost (sliki 8 c in d).

Zanesljiva odvisnost med indeksom obdelovalnosti in indeksom sulfidnih vključkov, določenim z metalografsko analizo, nam daje možnost, da ugotavljamo obdelovalnost polpomirjenih avtomatnih jekel z visokim indeksom obdelovalnosti samo z metalografsko metodo.

#### Literatura

1. Nippon steel Technical Report overseas N°3 June 1973
2. Koroušič, Arh, Zakrajšek: Poročilo metalurškega inštituta v Ljubljani, Nal. 566/1978
3. E. Di Gianfrancesco, P. Filippi: La Metallurgia Italiana, 1976/9, str. 434

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Hüttenwerk Jesenice werden die halbberuhigten Automatenstähle mit hohem Zerspanbarkeitsindex mit oder ohne Bleizusatz in grossen Mengen erzeugt.

Es ist bekannt, dass die gute Zerspanbarkeit von Automatenstählen durch die globulitische Form oxysulfidischer Einschlüsse bedingt ist. Der Sauerstoff im Stahl ist einer der wichtigsten Einflussparameter die die Form der sulfidischen Einschlüsse beeinflussen. Die Regulierung des Sauerstoffgehaltes im fertigen Stahl ist demnach die wichtigste Aufgabe der Stahlherstellung. Hier kann die Sauerstoffaktivitätsmessung sehr behilflich sein. Mit Hilfe der Sauerstoffaktivitätsmessung ist festgestellt worden, dass die beste Zerspanbarkeit bei einem Sauerstoffgehalt von 100 bis 150 ppm im Stahl vor dem Abstich erzielt wird.

Es hat sich gezeigt, dass der Lichtbogenofen ein guter

Schmelzagregat für die Erzeugung von besten Automatenstählen ist.

Die Einführung der Erzeugung von Automatenstählen in Siemens-Martin Öfen war schwerer als in Lichtbogenöfen. Vor allem die Einstellung des richtigen Sauerstoffgehaltes im Stahl hat uns anfangs viel Mühe gekostet. Das Problem war gelöst nach dem wir SiMn durch andere Desoxydationsmittel ersetzt haben.

Bei der Qualitätsüberwachung der Automatenstähle ist eine ständige Kontrolle der Bearbeitbarkeit nötig. Die Untersuchungen über die Beziehungen zwischen dem Sulfideinschlussexponenten und dem Zerspanbarkeitsindex ergaben eine sehr übereinstimmende Korrelation. Die Qualitätskontrolle der halbberuhigten Automatenstähle umfasst zur Zeit nur die Kontrolle des Sulfideinschlussexponenten.

## SUMMARY

Jesenice Ironworks produce great quantities of semi-killed free-cutting steel having good machinability. They are with or without lead.

As it is known, good machinability requires spheroidal shape of oxysulphide inclusions. The oxygen content in steel is the most important parameter which influences the shape of the non-metallic sulphide inclusions. The control of the oxygen content in the manufactured steel is thus the most important task in the production process. Measurements of the active oxygen are very helpful. These measurements in single production stages showed that the best results are obtained if steel before tapping contains 100 to 150 ppm of active oxygen.

Production results indicate that electric arc furnace is a very good melting set-up for the production of the

best free-cutting steel. Advantageous is a higher oxygen content than obtained in the electric furnace steel.

Production of free-cutting steel in the open-hearth furnace is a more difficult task than production in electric arc furnaces. The control of the correct oxygen content and thus of the spheroidal shape of sulphide inclusions in steel is much more difficult. The problem was solved by replacing the conventional SiMn predeoxidizing agent with ferroaluminium.

Production of free-cutting steel demands a constant control of machinability. Investigations on the mutual relationship between the machinability index and the sulphide inclusions index confirmed a high degree of correlation which is 67%. Thus the machinability can be estimated only by the shape or by the index of sulphide inclusions.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургический завод Железарна Есенице является крупным производителем полупрокатных автоматных сталей с высоким индексом способности к обработке без или с добавкой свинца в больших количествах. Известно, что условие для хорошей обрабатываемости стали представляет глобулярная форма окисьюсульфидных включений.

Самый важный фактор, который оказывает влияние на образование формы неметаллических сульфидных включений представляет содержание кислорода. Поэтому, самое большое значение при изготовлении полупрокатных автоматных сталей представляет регулирование содержания кислорода в расплаве. С измерением содержания активного кислорода в отдельных фазах производства установлено, что самые хорошие результаты получены при содержании кислорода в пределах от 0,01 до 0,015% в расплавленной стали до выпуска.

Хорошие результаты, полученные при переработки стали доказывают, что электродуговая печь представляет собой очень

хороший плавильный агрегат для производства автоматных сталей самого лучшего качества. При этом положительное влияние оказывает более высокое содержание кислорода в расплаве этой стали при сравнении с электросталью.

Усвоение производства автоматной стали в мартеновских печах было более затруднительно вследствие затруднений при регулировании содержания кислорода и получения глобулярной структуры сульфидных включений в стали. Вопрос был решен тем, что сплав SiMn, служащий за предварительное раскисление расплава стали заменили с FeAl.

При производстве автоматных сталей необходим постоянный контроль над обрабатываемостью полуфабриката. Исследования взаимоотношения между показателем обрабатываемости и показателем сульфидных включений подтвердили высокую степень корреляции, которая составляет 67%. На основании этого оценку способности стали на обработку можно надежно определить на основании формы, соотв. показателя сульфидных включений.

## Šesta mednarodna konferenca o vakuumski in specialni metalurgiji

San Diego, California, 23—27. april 1979

B. Koroušič, J. Rodič

### 1. UVOD

Tradicionalnim internacionalnim konferencam o vakuumski metalurgiji, ki imajo svoj začetek v letu 1950, se je po letu 1970 priključilo tudi področje specialne metalurgije z znanimi sekundarnimi postopki:

- električno pretaljevanje pod žlindro (EPZ)
- plazma
- elektronski curek

Paralelno z omenjeno konferenco je potekalo tudi internacionalno srečanje strokovnjakov s področja vakuumskega nanašanja tankih plasti (coatings).

Šeste internacionalne konference v San Diegu se je udeležilo rekordno število udeležencev (okoli 660) iz več kot 15 dežel Amerike, Evrope, Azije in Avstralije.

Simpozij je bil v velikem kompleksu hotelov Town and Country Hotel v San Diegu v organizaciji ameriškega vakuumskega združenja (ASM) in ameriškega združenja kovinarjev.

Bilo je skupaj 70 predavanj, ki so bila organizirana v 8 sekcijah, s čimer je bila dana možnost, da se udeležimo praktično vseh predavanj.

Na kongresu so bile obdelane naslednje teme:

- pregled in kritična ocena različnih tehnologij na področju specialne metalurgije,
- rafinacija tekoče kovine,
- vakuumska metalurgija,
- primarni talilni agregati,
- osnove procesa pretaljevanja kovin in zlitin pod žlindro,
- tehnologija izdelave EPZ-ingotov,
- uporaba, oprema in kontrola EPZ-postopka,
- specialna talilna oprema in novi postopki,
- interdisciplinarnе tehnologije (elektrolitje pod žlindro), termo-mehanska obdelava kovin v zaščitni atmosferi.

Pred pričetkom simpozija so vsi udeleženci dobili kratke izvlečke vseh predavanj, kar je služilo kot vodilo pri spremljanju referatov in pripravi vprašanj za diskusijo.

Vsa predavanja bodo publicirana v posebni izdaji »proceedings«, tako da se bova v tem poročilu omejila na tiste teme, ki so za bralce v Jugoslaviji posebnega pomena.

### 2. DOSEŽKI NA PODROČJU SPECIALNE METALURGIJE

V svojem plenarnem predavanju je **W. Holzgruber** (INTECO, Avstrija) podal pregled najnovejšega razvoja procesov s področja specialne metalurgije. Orisal je tendence na področju izdelave kvalitetnih jekel v elektro-obločnih pečeh s posebnim poudarkom čedalje večje uporabe ponovne metalurgije in posebnih postopkov (AOD, CLU itd.). Izredno hitro narašča v svetu uporaba postopkov za vpihovanje sintetičnih žlinder, Ca-zlitin, posebnih modifikatorjev, ki omogočajo odpravo žvepla, nekovinskih vključkov, ki direktno vplivajo na strukturo strjenega jekla.

Zelo ilustrativno in zanimivo je bilo predavanje **G. Hoyle** (British Steel Corp., Sheffield Laboratories, Anglija), ki je v seriji barvnih slik prikazal praktično celotni pregled danes znanih postopkov za sekundarno rafinacijo jekla.

Izhajajoč iz kompleksne slike, ki zajame vpliv številnih parametrov: žindra-atmosfera-temperatura-vpihavanje-mešanje razvrsti vse znane postopke v skupine. Analiza značilnosti posameznih postopkov je pokazala, da ima vsak postopek nekaj pozitivnih, toda tudi nekaj negativnih lastnosti. Na splošno je ugotovljeno, da je izboljšanje kvalitete obdelane ali pretaljene kovine odvisno predvsem od vsebnosti nekovinskih vključkov, plinov ter mehanizma strjevanja kovine.

**Inonye, M. z Nagoja univerze** (Japonska) je podal pregled novejšega razvoja in raziskav na področju električnega pretaljevanja pod žlindro na Japonskem. Omenjene so raziskave in aktivnosti s področja fizikalne kemije procesov, termične karakteristike EPZ, fizikalne lastnosti žlinder, fenomeni pri strjevanju EPZ-ingotov ter študij napak na površini EPZ-ingotov.

Vsekakor zasluži posebno pozornost predavanje **Spetzler, E. in H. F. Haastert** (Standard Messo, Thyssen, Zahodna Nemčija), v katerem so podani novejši rezultati s področja vakuumske obdelave tekočega jekla z znanimi postopki: VOD, VAD, RH, TN. Poudarjen je vpliv vakuumske obdelave jekla na vsebnost nekovinskih vključkov, izkoristek v nadaljnji termo-mehanski predelavi ipd. Omenjeni so tudi rezultati, dobljeni s kombinacijo vakuumskih postopkov in z vpihavanjem Ca-zlitin. O podobnih rezultatih so poročali tudi strokovnjaki iz firme Lectromelt, Pittsburg (ZDA). Ti avtorji so poudarili pomen kombinacije različnih postopkov, kar je pri današnji zelo veliki raznolikosti postopkov velikega pomena.

Opisan je blok-koncept s praktičnimi rezultati, ki so bili dobljeni pri izdelavi nerjavnih jekel po AOD-postopku.

Zelo veliko zanimanje je izzvalo predavanje skupine japonskih avtorjev: **K. Suzuki, K. Janiguchi, S. Watanabe** (Japan Steel Works, Tokyo).

Pri izdelavi velikih ingotov predstavljajo velik problem makro-segregacije. Z uvedbo procesa ogljikove vakuumske dezoksidacije (VCD) so znatno izboljšali kvaliteto velikih kovaških ingotov, teže do 35 ton, in sicer pri nizko legiranih jeklih, posebej NiCrMoV jeklih. Brez uspeha so ostali poskusi pri ogljikovih jeklih.

Enako zanimiva je tudi razlaga mehanizma tvorbe »A« segregacij pri velikih ingotih v povezavi s kemično sestavo jekla. Ugotovljena je kritična vrednost, ki uravnava količino strjene frakcije pred S-fronto ter vpliv silicija na tvorbo A — segregacij.

**Narita, K. in sodelavci** (Kobe Steel, Ltd, Japonska) so poročali o industrijskih poskusih modifikacije oblike sulfidnih vključkov s t. i. TN-postopkom. Gre za vpihovanje kalcija v tekoče jeklo ter kontrolo žvepla in reakcij, ki spremljajo ta proces. Uporaba matematičnega modela je omogočila optimizacijo procesa (pomen globine koplja, diameter pihalice, pretok Ar itd.).

Aplikacija TN-postopka omogoča doseganje izredno nizkih vsebnosti žvepla (celo 0,0030 % S), in kar je še bolj pomembno, kontrola oblike vključkov je skoraj popolna. Omenjen je vpliv žlindre, ki pokriva tekoče jeklo med obdelavo. Primerjava mehanskih lastnosti (anizotropija vlečenega jekla) je pokazala, da se lastnosti pločevine za velike plinovode podaljšalo tudi 70—80 %.

Železarna Ravne (**J. Rodič, J. Segel**) se je predstavila s pomembnim predavanjem o uporabi procesnega računalnika v jeklarni in njegovi vlogi pri zagotavljanju kako-

vosti jekel. Predavanje je vzbudilo precej zanimanja, kar je dokaz, da je tema bila zelo aktualna in na nadpovprečno visokem nivoju. Obdelani so konkretni primeri iz prakse, med katerimi izstopa kontrola delta-ferita v avstenitnih, nerjavnih jeklih ter problemi kaljivosti kvalitetnih jekel iz proizvodnega programa Železarne Ravne.

Iz četrte sekcije predavanj bi omenili prve rezultate (**H. Jäger** iz Vereinigte Edelmetallewerke, Kapfenberg, Avstrija), dobljene z vakuumskim taljenjem superzlitin in titana z neporabno (Schlienger) elektrodo. Pri tem postopku gre za specialni postopek pretaljevanja odpadkov z rotirajočo, vodnohlajeno elektrodo. Postopek je zelo fleksibilen in se uporablja za različne namene od taljenja, pretaljevanja, izdelave prahu s plazma gorilniki, izdelave elektrod do legiranja tekoče kovine in podobno.

Vsa predavanja v 5. sekciji so izbrana s področja izdelave velikih ingotov s konvencionalnim EPZ-postopkom, pa tudi s posebnimi EPZ-tehnikami:

**Thomas, F. W. in O. Stencel** (Leybold-Heraeus, Hanau, Zahodna Nemčija) sta poročala o vplivu različnih procesnih parametrov na fenomene gibanja žilindre in tekoče kovine. Ze delno publicirane rezultate so razširili z nekaterimi konkretnimi primeri, ki so povezani s prenosom mase in toplote, metalurškimi napakami in podobno.

O podobnih rezultatih so poročali tudi **A. Choudhury, R. Jauch, F. Tince** (Stahlwerke Röchling — Burbach, Zahodna Nemčija), ki so opisali že dokaj znano EPZ-peč za izdelavo zelo velikih EPZ-ingotov, teže do 220 ton.

Težišče raziskav se nanaša na vpliv nizke frekvence na stopnjo odžveplanja, odpravo silicija, obnašanje aluminija ter kontrolo teh elementov med procesom taljenja.

Naslednja tri predavanja se nanašajo na izdelavo velikih kovaških ingotov, pri katerih se uporablja specialna EPZ-tehnika:

**Basevi S., R. Scepi** (Terni Societa per l'industria el' Electricita, Italija) sta poročala o t. im. TREST-postopku za izdelavo velikih ingotov za odkovke rotorjev za turbine konvencionalnih in nuklearnih central.

Proces sestoji iz litja v konvencionalno kokilo (v zaščitni atmosferi), ki ima podaljšek iz ognjevzdržnega materiala, ki ščiti kokilo pred delovanjem kemično aktivne žilindre. Drugi del procesa predstavlja odtaljevanje elektrode, dokler ingot ni kompletno strjen. Maksimalna teža ingota je 9 ton.

**Machner, P.** (Vereinigte Edelmetallewerke, Kapfenberg, Avstrija) je poročal o znanem BEST-postopku, ki je v principu identičen že opisanemu TREST-postopku z določenimi modifikacijami:

- zaščitna glava (kovinska) — pri hot toppingu
- uporaba dveh porabnih elektrod
- litje zaključnega dela velikih vlitkov (Caplan turbine lopatice, super zlitin na osnovi Ni in Ti itd.).

O že znanem MHKW-postopku so poročali strokovnjaki Klöcknerwerke AG, (Osnabrick, Zahodna Nemčija): **Austel, W., H. Heymann, Ch. Maldorn.** Po tem postopku so izdelali že ingot, teže 200 ton (kvaliteta: SA 508), za potrebe tlačne posode nekega reaktorja. Izkoristek po kovanju je znašal 80%. Mehanske lastnosti jekla, izdelanega po MHKW-postopku, ustrezajo vsem tehnično-varnostnim pogojem, ki jih zahteva naročnik.

V šesti sekciji so bili predstavljeni rezultati temeljnih, osnovnih raziskav s področja električnega pretaljevanja pod žilindro:

**Mitchell, A.** (University of British Columbia, Vancouver, Canada): Optimalna hitrost taljenja pri VOP in EPZ-procesu;

**Morlet, J., J. F. Wadier** (Creusot Loire, Acieries d'Imphy, Francija): Izračunavanje in merjenje lokalno-strjevalnega časa pri pretaljevanju superzlitin;

**Szekely, J., M. Coudhary** (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, ZDA): Modeliranje profila kopeli ter temperaturnega polja in toka mase pri EPZ-sistemih;

**Takahama, K., T. El. Gammal** (Institut für Eisenhüttenkunde, Aachen, Zahodna Nemčija): Matematični model za študij strjevalnih karakteristik EPZ-ingotov;

**Kawakami, M., K. S. Goto** (Tokyo Kogyo, Tokyo, Japonska): Profil temperaturnega in električnega potencialnega polja v žilindri in kovinski kopeli med EPZ-procesom;

**Medovar, B. I. in sodelavci** (Paton electric institute, Kiev, SSSR): EPZ-proces z uvajanjem kovinskih delcev;

**Hoyle, G.** (BSC, Sheffield Laboratories, Anglija): Površinski fenomeni pri EPZ-ingotih;

**Mellberg, P. O.** (Royal Institute of Technology, Stockholm, Švedska): Temperaturne meritve v žilindri in kovinski kopeli pri EPZ-procesu;

Podobno predavanje so imeli tudi **Jeanfils, C. L.** in sodelavci.

Od predavanj iz 7. skupine naj omenim zelo zanimivo predavanje **Pocklington, D. N. in sodelavci**: Izdelava slabov visoke kvalitete s trofazno EPZ-pečjo, moči 9 MVA v jeklarni Dalzell (Škotska). Avtorjeva izvajanja so bila zanimiva predvsem zaradi številnih eksperimentalnih podatkov: avtomatsko vodenje procesa, kontrola nivoja žilindre, računalniška obdelava podatkov, vzdrževanje kokil, kontrola aluminija in številne druge tehnološke novosti.

V drugem delu 7. sekcije smo slišali dva tehtna prispevka s področja računalniškega vodenja EPZ-procesa:

**Thomas, F. W., H. Birck** (Leybold-Heraeus GMBH, Hanau, Zahodna Nemčija): Digitalna kontrola EPZ-peči ter

**Chen, J. H. in sodelavci** (Stellite Division, Cabot Co., Kokomo, ZDA): Računalniška kontrola EPZ-procesa.

Čedalje večje zahteve po kvaliteti EPZ-procesa narekujejo visoko-reproduktivnost tehnoloških parametrov in minimalne ekonomske stroške. Tehnični nivo sodobnih EPZ-naprav dovoljuje postavitev matematičnega modela, ki omogoča optimizacijo vseh procesnih parametrov, (moč taljenja, talilni tok, napetost, hitrost taljenja itd.) in nato njihova kontrola s procesnim računalnikom. Na osnovi danega materiala in diskusije smo prišli do zaključka, da je današnji trend v svetu v celoti v nakazani smeri in da računalniško vodenje procesa omogoča doseganje večje kvalitete jekla pri minimalnih obratovalnih stroških.

Zadnja, osma sekcija je bila posvečena problematiki v zvezi z izdelavo opreme za tehnologijo s področja vakuumskega indukcijskega taljenja, taljenja temperaturno obstojnih materialov, vakuumskega litja, specialnega konti-litja in podobno.

Od ostalih predavanj je potrebno, da omenimo dve tehtni predavanji sovjetskih strokovnjakov iz inštituta za varilno tehniko:

**Elektro-litje specialnih kontejnerjev visokega pritiska za nuklearne centrale in Elektro-litje velikih ojníc za ladijske diesel motorje.**

Obe predavanji sta izzvali precejšnje zanimanje zaradi specifičnosti proizvodnje ter relativno visoke stopnje mehaniziranosti tehnološkega procesa.

Zadnji dve predavanji predstavljata današnji trend iskanja novih žilindrinih sistemov za potrebe EPZ-procesa, s čimer bi se delno izognili problemu dobave deficitarnih surovin (predvsem CaF<sub>2</sub>), izboljšali ekološke probleme (emisija F-spojnin) in dosegli večjo kvaliteto EPZ-jekla:

**Rawson, J. D. W. in sodelavci** (BSC, Sheffield, Anglija): Uporaba EPZ-žilindri brez CaF<sub>2</sub>, oziroma z nizko vsebnostjo CaF<sub>2</sub> ter

**Tokumitsu, N. in sodelavci** (Nippon Steel Corporation, Kawasaki, Japonska): Izdelava nerjavnih jekel ultra visoke čistote z uporabo žilindre CaF<sub>2</sub>-Ca.

Pri teh poskusih gre za laboratorijske poskuse, ki so v strogo kontroliranih pogojih dali zelo zadovoljive rezultate. Lahko pričakujemo njihovo skorajšnje uvajanje v industriji.

Šesta konferenca o vakuumski in specialni metalurgiji v San Diegu, ZDA je ponovno pokazala, da je na internacionalnem prostoru prišlo do novega razvoja na področju procesne tehnike in tehnologije specialnih metalurških postopkov. Večina priznanih strokovnjakov je v javnih in osebnih diskusijah poudarila veliko odgovornost investitorjev v opremo z omenjenega področja zaradi izredno hitrega razvoja novih postopkov. Prav gotovo, da je kritična ocena tehnoloških značilnosti vseh teh postopkov možna le z direktnim vključevanjem v internacionalno strokovno sfero. Ta način sodelave je danes v celoti izpodrinil klasično miselnost, da za dobro informiranost zadošča študiranje strokovne literature in kritična ocena prospektov proizvajalcev ustrezne opreme.

## Tehnična navodila avtorjem

### Rokopis

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Glavna poglavja in podpoglavja pišite po primeru:

### REZULTATI RAZISKAV

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

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

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

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

8) **Enote**: Uporabljajte izključno enote po SI (System International d'Unités). V nadaljnjem so navedene nekatere osnovne in izvedene enote, ki jih prednostno uporabljajte:

Aktivacijska energija	J/mol, kJ/mol
čas	s, min, h
delo, energija	J
termična	kW h
električna	N m
mehanična	m, mm, $\mu$ m, nmm
Dolžina	J
Entalpija	J/K
Entropija	kg/m <sup>3</sup> , g/cm <sup>3</sup>
Gostota	m/s
Hitrost	mol
Količina snovi	rad
Kot	W, kW
Moč	
Napetost, mehanska	
Natezna, tlačna,	N/mm <sup>2</sup>
upogibna, strižna trdnost	kN/mm <sup>2</sup>
Elastični in strižni modul	mN/m
Površinska napetost	bar
Pritisk	m/(m K)
Razteznostni koeficient	N /
Sila, obremenitev	K, °C
Temperatura	g, kg, t
Teža, masa	J
Toplota, količina toplote	J/K
Toplotna kapaciteta	W/(m K)
Toplotna prevodnost	W
Toplotni pretok	W/m <sup>2</sup>
gostota toplotnega pretoka	
Trdote	
Rockwell	HRB, HRC
Brinell	HB
Vickers	HV
Viskoznost	
dinamična	Pa s
kinematična	cm <sup>2</sup> /s
Žilavost, lomna (K <sub>IC</sub> )	MN/m <sup>3/2</sup>
Žilavost, udarna ob zarezi	J

Pazite: kratice predpon pišemo skupaj z enoto, na primer kg, kW, MN, mbar. Sestavljene enote pa pišemo narazen, na primer N m, kW h, W s.

Količine (vsebnosti) in sestave večfaznih snovi izražamo:

$$\frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot 100 \text{ Volumska količina v \%}$$

(prej volumski %)

$$\frac{n_1}{n_1 + n_2} \cdot 100 \text{ Količina snovi v \%}$$

(prej molski ali atomski %)

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot 100 \text{ Količina mase v \%}$$

(prej utežni %)

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

#### Fotografije

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

#### Diagrami in risane slike

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

Prosimo avtorje, da dosledno upoštevajo še naslednja navodila:

1. **Širina:** Diagrami morajo biti narisani na formatu A4. Širina diagrama naj bo 150 mm, plus ali minus 10 mm. Širina ni le okvir diagrama, temveč tudi številke in napis na ordinatni osi. V tisku so ti

diagrami pomanjšani približno  $2\times$ , na širino enega stolpca. Odstopanja od teh širin narisanih in tiskanih diagramov bodo upoštevana le v primerih, ko morajo biti zaradi gostote podatkov, krivulj ali preglednosti tiskani v širini obeh stolpcev, to je okoli 160 mm. V teh primerih naj bo širina narisane diagrama 300 mm, plus ali minus 20 mm.

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

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

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

V tisku bodo te črte polovico tanjše.

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

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

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

#### Izvleček

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

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

2. Povzetek za prevode v 4 izvodih

3. Avtorski izvleček za kartice v 4 izvodih

4. Podpisi k slikam v 2 izvodih

5. Oštevilčene fotografije, diagrami in druge slike.





Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Člani Jože Rodič, dipl. inž., Mirko  
Doberšek, dipl. inž., dr. Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik

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

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

# VSEBINA

UDK: 669.147  
ASM/SLA: D9q

Metalurgija — kontinuirno ulito jeklo

M. Kmetič in sodelavci

**Nekatere značilnosti jekel izvaljanih iz kontinuirno ulitih gredic**  
Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 s 85—93

Kontinuirno ulito jeklo ima nekatere prednosti pred konvencionalnim jeklom, ki pridejo do izraza, če je v gredicah malo napak značilnih za konti litje.

Raziskava obravnava makro in mikrostrukturne značilnosti, velikost in porazdelitev nekovinskih vključkov, segregacije in mehanske lastnosti nekaterih cementacijskih jekel, jekel za poboljšanje in vzmetnega jekla. Rezultati so pokazali, da lahko konti jekla enakovredno nadomestijo konvencionalna jekla.

Avtorski izveček

UDK: 669.182.71:669.891  
ASM/SLA: D8n

Metalurgija — Rafinacija jekla

V. Prešern in sodelavci

**Rafinacija jekla z vpihovanjem CaSi v ponev**  
Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 s 95—103

Opisali smo fizikalno-kemične osnove postopka vpihovanja CaSi v ponev in prikazali najvažnejše prednosti tega postopka moderne rafinacije jekla v ponvi. Osnovna pridobitev na kvaliteti jekla je sprememba plastičnih MnS sulfidov v neplastične vključke tipa CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaS.

Obravnavali in analizirali smo podatke o številnih industrijskih poskusih v Zelezarni Store in Zelezarni Jesenice. Ugotovili smo prednosti in pomanjkljivosti opravljenega dela in predložili tehnološko postopka vpihovanja CaSi v ponev.

Avtorski izveček

UDK: 620.178  
ASM/SLA: Q26, S13b

Metalurgija — Prelomi kovin — Mehanika lomov — Preizkušanje kovin

A. Kveder

**Prelomi kovin**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 s 105—122

Članek daje pregled stanja na področju raziskovanja prelomov in preizkušanja kovinskih materialov. Teoretične osnove o trdnosti kovin, o **krhkem in žilavem prelomu** in mehaniki prelomov. Opisana so preizkušanja lomnih značilnosti kovin z načinom določanja lomne žilavosti ( $K_{Ic}$ ), COD, J-Integrala in z instrumentiranim Charpyjevim kladivom.

Avtorski izveček

UDK: 669.14.018.23  
ASM/SLA: SQA — k

Metalurgija — izdelave jekla — avtomatna jekla

J. Arh in sodelavci

**Nekateri problemi izdelave avtomatnih jekel v električnih obločnih in Siemens-Martinovih pečeh**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 s 123—128

Zelezarna Jesenice je velik proizvajalec avtomatnih jekel z visokim indeksom obdelovalnosti z ali brez dodatka svineca.

Glavni problem izdelave polpomirjenega avtomatnega jekla je regulacija pravilne vsebnosti kisika v izdelanem jeklu oziroma regulacija pravilne globulitične oblike sulfidov. Za vzdrževanje stalne enakomerne kvalitete v pogledu obdelovalnosti je potrebna stroga kontrola vsebnosti kisika v jeklu, ki naj bo v optimalnih mejah od 100 do 150 ppm v talini pred prebodom merjeno z kisikovo sondo. Najboljši način za zagotovitev takšne vsebnosti kisika pa je stroga kontrola ogljika po oksidaciji, ki naj bo od 0,05 do 0,07 %. Električne obločne peči so zelo dobri talilni agregati za izdelavo avtomatnih jekel, ker je regulacija vseh vplivnih parametrov enostavnejša. Regulacija vsebnosti kisika oziroma globulitične oblike sulfidov je v SM pečeh težja. Vendar se z uporabo FeAl kot predzoksidanta da dosežati zelo dobro obdelovalnost jekla, ki ne zaostaja za elektro jeklom.

Kontrola avtomatnih jekel obsega kontrolo obdelovalnosti in oblike sulfidnih vključkov. Ker pa obstoji med obdelovalnostjo in obliko sulfidnih vključkov zanesljiva medsebojna zveza, zadostuje že sama metalografska kontrola oblike vključkov po posebni zato izdelani skali.

Avtorski izveček

# INHALT

UDK: 669.182.71:669.891  
ASM/SLA: D8n

Metallurgie — Stahlraffination

V. Prešern und Mitarbeiter

**Raffination von Stahl durch Einblasen von CaSi in die Pfanne**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 S 95—103

Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Einblastechnologie von CaSi in die Pfanne werden beschrieben und die wichtigsten Vorteile dieser Raffination von Stahl in der Pfanne werden gezeigt. Als wichtigste Änderung in der Stahlqualität ist die Umwandlung der plastischen MnS Sulfide in nichtverformbare Einschlüsse des Types  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaS}$  zu erwähnen.

Die Ergebnisse der Industrierversuche in Hüttenwerken Store und Jesenice werden bearbeitet und bewertet. Die Vor- und Nachteile der geleisteten Arbeit werden beurteilt und ein Vorschlag für die Technologie der CaB Behandlung wird gegeben.

Auszug des Autors

UDK: 669.147  
ASM/SLA: D9q

Metallurgie — Stranggegossener Stahl

M. Kmetič und Mitarbeiter

**Einige Eigenheiten der Stähle ausgewalzt aus stranggegossenen Knüppeln**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 S 85—93

Stranggegossener Stahl hat einige Vorteile vor dem konventionell erzeugten Stahl, die zum Ausdruck kommen, wenn in Knüppeln nur wenige für Stranggiessen eigenartige Fehler da sind. In dieser Forschungsarbeit werden die Eigenheiten des Makro und Mikrogefüges, die Grösse und Verteilung der nichtmetallischen Einschlüsse, Seigerungen und mechanische Eigenschaften einiger Einsatzstähle, Vergütungsstähle und Federstähle behandelt. Die Ergebnisse zeigen, dass konventionell erzeugte Stähle gleichwertig durch Stranggegossene Stähle ersetzt werden können.

Auszug des Autors

UDK: 669.14.018.23  
ASM/SLA: SQA — k

Metallurgie — Stahlerzeugung — Automatenstähle

J. Arh und Mitarbeiter

**Einige Probleme der Erzeugung der Automatenstähle im elektrischen Lichtbogen und SM Ofen**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 S 123—128

Das Hüttenwerk Jesenice ist ein grosser Erzeuger von Automatenstählen mit hohem Zerspanbarkeitsindex mit oder ohne Bleizusatz.

Das Hauptproblem bei der Erzeugung der halbberuhigten Automatenstähle ist die Regelung des richtigen Sauerstoffgehaltes im fertigen Stahl bzw. die Regelung der richtigen globulitischen Form der sulfidischen Einschlüsse. Um eine ständige und gleichmässige Güte in Hinsicht der Zerspanbarkeit zu sichern ist eine ständige Kontrolle des Sauerstoffgehaltes im Stahl nötig, welche in optimalen Grenzen zwischen 100 und 150 ppm in der Schmelze vor dem Abstich, gemessen mit der Sauerstoffmesssonde, sein sollte. Der beste Weg diesen Sauerstoffgehalt zu sichern ist eine strenge Kontrolle des Kohlenstoffgehaltes nach dem Frischen, welcher von 0.05 bis 0.07 % variieren sollte. Lichtbogenöfen sind gute Schmelzaggregate für die Erzeugung von Automatenstählen da die Regelung aller Einflussparameter einfach ist. Die Regelung des Sauerstoffgehaltes bzw. der globulitischen Einschlussform ist in SM Öfen schwieriger. Man kann jedoch mit der Anwendung von FeAl zur Vordesoxydation gute Bearbeitbarkeit erzielen die nicht schlechter ist als beim Elektrostaahl. Die Kontrolle der Automatenstähle umfasst die Kontrolle der Zerspanbarkeit und der Form der sulfidischen Einschlüsse. Da zwischen der Bearbeitbarkeit und der Sulfideinschlussform ein eindeutiger Zusammenhang besteht, genügt schon eine metallographische Kontrolle der Einschlussform nach einer Sonderskala.

Auszug des Autors

UDK: 620.178  
ASM/SLA: Q26, S13b

Metallurgie — Brüche an Metallen — Bruchmechanik

A. Kveder

**Brüche an Metallen**

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 S 105—122

Der Artikel gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Bruchforschung und die Verfahren für die Prüfung der metallischen Stoffe. Theoretische Grundlagen über die Festigkeit der Metalle, über den spröden und zähen Bruch und die Bruchmechanik werden angegeben. Die Untersuchungen der Brucheigenheiten der Metalle mit den Verfahren für die Bestimmung der Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ), COD, des I-Integrals und mit Messinstrumenten eingerichteten Charpyhammer werden beschrieben.

Auszug des Autors

# CONTENTS

UDK: 669.147  
ASM/SLA: D9q

Metallurgy — Continuously Cast Steel

M. Kmetič and coworkers

### Some Characteristics of Steel Rolled from Continuous Cast Billets

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 P 85—93

Continuous cast steel has some advantages over the conventional steel which are pronounced when only few defects characteristic for continuous casting are present in the billets.

Macro and microstructural characteristics, size and distribution of non-metallic inclusions, segregations, and mechanical properties of some carburising, tempering, and spring steel were investigated. The results show that continuous cast steel can equivalently replace the conventional steel.

Author's Abstract

UDK: 669.182.71:669.891  
ASM/SLA: D8n

Metallurgy — Steel refining

V. Prešeren and coworkers

### Steel Refining by CaSi Injection into Ladle

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 P 95—103

Physical-chemical fundamentals of the CaSi injection process into ladle were described, and the essential advantages of this modern steel refining method in the ladle were presented. The most important improvement in the steel quality is achieved by replacing plastic manganese sulphide inclusions with the undeformable CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaS inclusions.

Numerous data on the industrial tests in Ironworks Store and Jesenice were analyzed. Advantages and disadvantages were determined, and the injection techniques for the CaSi injection into ladle were proposed.

Author's Abstract

UDK: 620.178  
ASM/SLA: Q26, S13b

Metallurgy — Fractures of metals — Fracture mechanics — Metal testing

A. Kveder

### Fractures of Metals

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 P 105—122

The paper presents the review on the investigations of fractures and on the testing metallic materials. Theoretical fundamentals on strength of metals, brittle and tough fractures, and fracture mechanics. Testing the fracture characteristics by the methods for determining the fracture toughness ( $K_{Ic}$ ), COD, J-Integral, and instrumented Charpy apparatus are described.

Author's Abstract

UDK: 669.14.018.23  
ASM/SLA: SQA — k

Metallurgy — Steel Production — Free-cutting Steel

J. Arh and coworkers

### Some problems in producing free-cutting steel in electric arc and open-hearth furnaces

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 P 123—128

Jesenice ironworks produce great quantities of semi-killed free-cutting steel having good machinability. They are with or without lead.

The basic problem in producing the semi-killed free-cutting steel is the control of the correct oxygen content in the steel or the control of the correct spheroidal shape of sulphides. In order to keep uniform machinability, a strict control of the oxygen content is required. It should be between 100 and 150 ppm in the melt before tapping when measured with the oxygen probe. The best method for assuring such a content is a strict control of carbon content after the refining. It should be between 0.05 and 0.07%. Electric arc furnaces are a very good melting set-ups for free-cutting steel since the control of the influential parameters is simple. The control of the oxygen content or the spheroidal shape of sulphides in the open-hearth furnace is more difficult. But utilization of FeAl as a preoxidizing agent can enable good steel machinability which is not lower than that of the electric furnace steel.

The control of the free-cutting steel includes the machinability control and the control of the shape of sulphide inclusions. Since a reliable correlation exists between the machinability and the shape of sulphide inclusions, only a metallographic control of the shape of inclusions by a specially prepared scale is sufficient.

Author's Abstract

## СОДЕРЖАНИЕ

УДК: 669.182.71:669.891  
АСМ/САА: D8n

Металлургия — рафинирование стали.

V. Prešern и сотрудники

Рафинирование стали при дувании CaSi в ковше.

Zelezarski zbornik, 13 (1969) 3 с 95—103

Описаны физико-химические основы способа дувания CaSi в ковше и поданы самые существенные преимущества этого способа современного рафинирования стали в ковше. Основное достижение, что касается качества стали, представляет преобразование пластичных включений сульфидов MnS в непластичные включения вида CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaS.

Рассмотрены данные, полученные выполнением многочисленных исследований, которые велись в словенских металлургических заводах Железарна Шторе и Железара Есенице. Определены преимущества и недостатки выполненных работ и подано указание на выполнение технологии способа дувания CaSi в ковше.

Автореф.

УДК: 669.147  
АСМ/САА: D9q

Металлургия — непрерывно отлитая сталь.

M. Kmetič и сотрудники

Некоторые характерные особенности сталей, прокатанных из непрерывно отлитых заготовок.

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 с 85—93

Непрерывно отлитая сталь имеет в отношении на разливку обычным способом некоторые преимущества. В особенности это проявляется если в заготовках немного пороков характерных для литья этого вида.

В исследованиях рассмотрены макро- и микроструктурные особенности, размеры и распределение неметаллических включений, сегрегации и механические свойства некоторых цементированных, улучшенных и пружинных сталей.

Результаты исследования показали, что непрерывно отлитые стали могут вполне заместить стали отлитые традиционным способом.

Автореф.

УДК: 669.14.018.23  
АСМ/САА: SQA — к

Металлургия — выплавка стали — автоматные стали.

J. Arh

Некоторые проблемы в производстве автоматных сталей в электродуговых и мартеновских печах.

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 с 123—128

Металлургический завод Железарна Есенице является крупным производителем автоматных сталей с высоким индексом обрабатываемости без или с добавкой свинца.

Главный вопрос изготовления подзупокоенной автоматной стали представляет регулирование правильного содержания кислорода в расплаве, соотв. регулирование правильной глобулярной формы сульфидных включений. Для того, чтобы сохранить равномерность качества в отношении на обрабатываемость, необходим точный контроль содержания кислорода в стали, которое должно находиться в оптимальных границах 0,010—0,015 % в расплаве до выпуска, измерением с кислородным зондом.

Чтобы обеспечить такое содержание кислорода необходим точный контроль над содержанием углерода в расплаве стали после окисления. Углерод пусть будет в границах между 0,05—0,07 %. Опыты показали, что электродуговые печи очень хорошие плавильные агрегаты для изготовления автоматных сталей, потому что регулирование всех параметров, которые оказывают влияние на процесс менее сложно. В мартеновских печах регулирование содержания кислорода, соотв. глобулярной структуры сульфидов более затруднительно. Хотя с употреблением FeAl при предварительном раскислении можно получить сталь с хорошей способностью к обработке, которая не отстает от электростали. Контроль автоматных сталей охватывает наблюдение над формой сульфидных включений и проверку обрабатываемости изделия. Вследствии того, что между способностью к обработке и формой сульфидных включений надежное взаимоотношение вполне удовлетворяет металлографический контроль формы включений при помощи специально для этого приготовленных шкал.

Автореф.

УДК: 620.178  
АСМ/САА: Q26, S13b

Металлургия — изломы металлов — механика изломов — испытание металлов.

A. Kveder

Изломы металлов.

Zelezarski zbornik 13 (1979) 3 с 105—122

В статье подан обзор о ситуации в области исследований изломов и испытания металлов. Следуют теоретические основы о вязкости металлов, о хрупком и вязком изломе и механике изломов. Дано описание исследований характеристик изломных поверхностей металлов с способами определения прочности на разрыв ( $K_{IC}$ ),  $COA$ ,  $J$  - интеграла, а также ударную вязкость с образцами по Шарпи.

Автореф.