

ŽELEZARSKI ZBORNIK

	Stran
VSEBINA	
Koroušič Blaženko — Metalurški inštitut Ljubljana	
KISIKOVA SONDA — NOVI KONCEPT PRI KONTROLI IN MERITVAH TOPLOTEHNIČNIH PROCESOV — I. DEL	29
Uranc Franc — Železarna Ravne	
VPLIV PRETALJEVANJA POD ŽLINDRO IN KALJENJA V SOLNI KOPELI NA LASTNOSTI VISOKOTRDNEGA JEKLA Č 5432-VCNM ₀ 200	37
Uranc Franc — Železarna Ravne	
ZBOLJSANJE ŽILAVOSTI JEKEL S KALJE- NJEM V VROČI KOPELI	45
Šević Dragica, D. Čurčija — Metalurška fakulteta Sisak	
O TOPNOSTI OGLJIKA V ŽLINDRAH	53

LETO 16 ŠT. 2 - 1982
ŽEZB BQ 16 (2) 29-56 (1982)

ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTONE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 16

LJUBLJANA

JUNIJ 1982

Vsebina	Inhalt	Contents	Содержание
stran	Seite	Page	
Blaženko Koroušič	Blaženko Koroušič	Blaženko Koroušič	Blaženko Koroušič
Kisikova sonda — novi koncept pri kontroli in meritvah toplotnotehničnih procesov — I. del 29	Sauerstoffmesssonde — Ein neues Konzept bei der Kontrolle und Messung der Wärmetechnischen Prozesse — I. Teil 29	Oxygen Probe — New Concept in Controlling and Measurements in Heat-engineering Processes — 1st Part 29	Кислородный зонд — Новая концепция при контроле и измерениях теплотехнических процессов — I. часть. 29
UDK: 669.18:621.785.53 ASM/SLA: S11r, E9q	UDK: 669.18:621.785.53 ASM/SLA: S11r, E9q	UDK: 669.18:621.785.53 ASM/SLA: S11r, E9q	UDK: 669.18:621.785.53 ASM/SLA: S11r, E9q
Franc Uranc	Franc Uranc	Franc Uranc	Franc Uranc
Vpliv pretaljevanja pod žilindro in kaljenja v solni kopeži na lastnosti visokotrdnega jekla Č 5432-VCNMo 200 37	Einfluss der Elektro-schlackeumschmelzung (ESU) und der Härtung im Salzbad auf die Eigenschaften des hochfesten Stahles Č 5432-VCNMo 200 37	Influence of the Electro-slag Remelting and Hardening in Salt Bath on the Properties of High-strength Č 5432-VCNMo 200 steel 37	Влияние переплава под шлаком и закалки в соляной ванне на свойства стали высокой твердости марки 37
UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2 ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p	UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2 ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p	UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2 ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p	UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2 ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p
Franc Uranc	Franc Uranc	Franc Uranc	Franc Uranc
Zboljšanje žilavosti jekla s kaljenjem v vroči kopeži 45	Verbesserung der Zähigkeit durch Warmbadhärten 45	Improved Toughness of Martempered / Austempered Steel 45	Улучшение вязкости сталей при закалке в горячих средах 45
UDK: 620.178.746.22:621.785 ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, T9b, AY	UDK: 620.178.746.22:621.785 ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, T9b, AY	UDK: 620.178.746.22:621.785 ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, T9b, AY	UDK: 620.178.746.22:621.785 ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, T9b, AY
Dragica Sević, D. Čurčija	Dragica Sević, D. Čurčija	Dragica Sević, D. Čurčija	Dragica Sević, D. Čurčija
O topnosti ogljika v žilindrah 53	Über die Löslichkeit von Kohlenstoff in Schlacken 53	On Carbon Solubility in Slags 53	О растворимости углерода в шлаках 53
UDK: 669.189:669.587.6 ASM/SLA: D5a, D11n	UDK: 669.189:669.587.6 ASM/SLA: D5a, D11n	UDK: 669.189:669.587.6 ASM/SLA: D5a, D11n	UDK: 669.189:669.587.6 ASM/SLA: D5a, D11n

Kisikova sonda – novi koncept pri kontroli in meritvah toplotno-tehničnih procesov – I. del

UDK: 669.18:621.785.53

ASM/SLA: S11r, E9q

1. UVOD

V domači literaturi zasledimo le nekaj skopih informacij o aplikacijah kisikove sonde na področju kontrole kisikovega in ogljikovega potenciala.^{1–10} Osnovni principi, na katerih sloni delovanje kisikovih sond, so sicer znani že več kot 20 let, toda praktična uporaba te merilne tehnike se je začela intenzivno širiti šele leta 1973.

Osnovne prednosti kisikove sonde v primerjavi z ostalimi znanimi analitičnimi ali fizikalno-kemičnimi metodami, ki se uporabljajo pri kontroli kisikovega in ogljikovega potenciala, so:

1. kisikova sonda deluje na elektrokemičnem principu in je zato njen signal pogojen s termodinamičnimi zakonitostmi, kar se kaže v tem, da je njena merilna velikost absolutna in zanesljiva;

2. sondo je mogoče instalirati direktno v reakcijski prostor (direktna meritev) ali z jemanjem vzorca meriti zunaj reakcijskega prostora (npr. v dimniku, zunaj peči, itd.);

3. kisikova sonda reagira enako hitro na prosti (molekularni) kisik ali na zelo nizke parcialne tlake, ki so pogojeni z reakcijami med aktivnimi plinskimi komponentami (CO , CO_2 , H , H_2O , C_nH_m itd.);

4. občutljivost kisikove sonde in njen odziv na hitre spremembe parcialnega tlaka je skoraj nepojmljiva (nekaj milisekund), kar daje tej metodi ogromne praktične možnosti, predvsem v kombinaciji z mikroprocesno tehniko.

Iz navedenih razlogov je razumljivo, zakaj je kisikova sonda našla tako široko področje aplikacij: od kontrole in optimizacije zgorevanja plinskih, tekočih in trdnih goriv do zelo kompleksnih metod kontrole ogljikovega potenciala, npr. pri plinski cementaciji jekel s klasičnimi endo-atmosferami ali novejšimi atmosferami na osnovi dušika itd.⁹

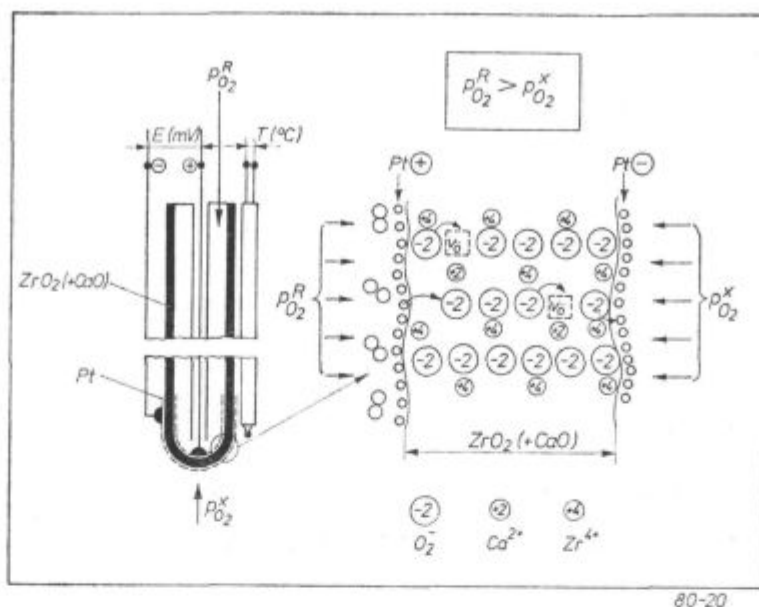
Namen tega članka je, da na nekaterih konkretnih primerih pokaže pomen te nove merilne metode in poudari njene aplikativne možnosti, ki so enako pomembne za metalurge, strojnike in tudi za vse tiste strokovnjake, ki se ukvarjajo s toplotnotehničnimi problemi v različnih industrijskih panogah.

2. TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Princip kisikove sonde

Kisikova sonda predstavlja koncentracijsko, elektrokemijsko celico, ki je po svoji funkciji podobna metodi merjenja pH-vrednosti. Njena osnovna značilnost je uporaba trdnega elektrolita na osnovi stabiliziranega cirkonovega oksida s kovinskimi elektrodami (ki omogočajo sklenitev električnega tokokroga).

Posebnost visokotemperaturne kisikove koncentracijske celice je v tem, da pri temperaturah



80-20

Fig. 1

Slika 1

Shematska ponazoritev delovanja kisikove sonde ($p_{O_2}^R$ — referenčni kisik, $p_{O_2}^X$ — kisik v merilnem plinu z neznano vsebnostjo)

Schematic presentation of the working of oxygen probe with solid electrolyte of stabilized ZrO_2 -oxide ($P_{O_2}^R$ = reference oxygen, $P_{O_2}^X$ = oxygen in measured gas with unknown content)

nad 600 °C nastopa električna prevodnost, ki je posledica prevodnosti kisikovih ionov in delno tudi elektronov:

$$k = k_{O_2^-} + k_e \quad (1)$$

Temperaturna odvisnost električne prevodnosti je značilna za polprevodne snovi in je enaka:

$$k = k^0 \exp\left(-\frac{Q_K}{RT}\right),$$

kjer je Q_K — aktivacijska energija za transport kisikovih ionov, oziroma elektronov. Na sliki 2 je prikazana odvisnost električne upornosti trdnega elektrolita od temperature. Pri temperaturah nad 600 °C ima celotni tokokrog kisikove sonde ohmsko upornost manjšo od 1000 ohmov in pri višjih temperaturah doseže vrednosti nekaj ohmov.

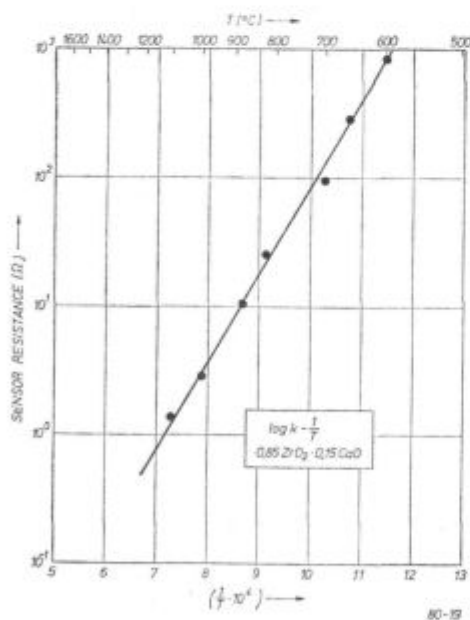
Zato se kisikove sonde za plinske medije uporabljajo pri temperaturah med 700 in 1600 °C.

Pri meritvah zelo nizkih parcialnih tlakov kisika obstaja še dodatna omejitev za uporabo sonde, ki je pogojena z delovanjem elektronske komponente prevodnosti (glej enačbo 1).

Njen vpliv se kaže v znižanju transportnega števila kisikovih ionov — $t_{O_2^-}$, ki je definirano z enačbo:

$$t_{O_2^-} = \frac{k_{O_2^-}}{k_{O_2^-} + k_e} \quad (2)$$

Pri čisti ionski prevodnosti trdnega elektrolita dobi transportno število kisika vrednost 1 ($t_{O_2^-} = 1$). To vrednost obdrži trdni elektrolit iz stabiliziranega ZrO_2 v zelo širokem področju parcialnih tlakov kisika pri temperaturah do 1000 °C (od 1 do 10–22 bar). Pri višjih temperaturah vrednost transportnega števila $t_{O_2^-}$ pada in je potrebno upoštevati vpliv elektronske prevodnosti v trdnem elektrolitu na vrednost elektromotorske napetosti kisikove elektrolitske celice.



80-19

Slika 2

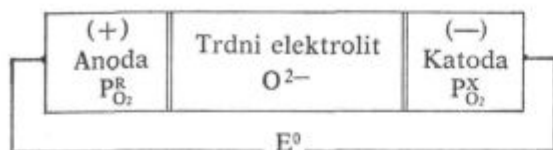
Električna upornost trdnega elektrolita z Pt-elektrodami kot funkcija temperature (trdni elektrolit: ZrO_2 (+ CaO)).

Fig. 2

Electric resistivity of solid electrolyte with Pt electrodes as the function of temperature (solid electrolyte: ZrO_2 (+ CaO)).

2.2 Povezava med parametri kisikove sonde in parcialnim tlakom, oziroma koncentracijo kisika

V kisikovi elektrokemijski celici tipa:



v ravnotežnih pogojih z reverzibilnim transportom kisikovih ionov od anode (+) h katodi (-) (tj. od $P^R_{O_2} \rightarrow P^X_{O_2}$) in zanemarljivo elektronsko prevodnostjo v trdnem elektrolitu velja naslednja relacija med električno napetostjo (E^0) in parcialnim tlakom kisika:

$$E^0 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P^R_{O_2}}{P^X_{O_2}}, \quad (3)$$

kjer pomeni:

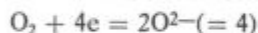
E^0 = EMN (mV)

R = plinska konstanta (J/mol.K)

T = absolutna temperatura (K)

F = Faradayeva konstanta (J/V, mol)

n = število elektronov, ko sodeluje v reakciji:



$P^R_{O_2}$, $P^X_{O_2}$ = parcialni tlak kisika na anodi, oziroma katodi (bar).

Kot je razvidno iz slike 1 se v notranjosti cevi trdnega elektrolita ponavadi uporablja zrak kot referenčen parcialni tlak z $P^R_{O_2} = 0,209$ bar.

Z uporabo znanih vrednosti za konstante R in F lahko izpeljemo enačbo:

$$\log P^X_{O_2} = \log P^R_{O_2} - 20.17 \frac{E \text{ (mV)}}{T \text{ (K)}}, \quad \dots (4)$$

oziroma pri $P^R_{O_2} = 0,209$ bar

$$\log P^X_{O_2} = -0.680 - 20.17 \frac{E \text{ (mV)}}{T \text{ (K)}} \quad \dots (5)$$

Na *sliki 3* je prikazan nomogram za hitro odčitavanje vsebnosti kisika v plinu (v % in ppm) na osnovi znanih parametrov kisikove sonde E in T.*

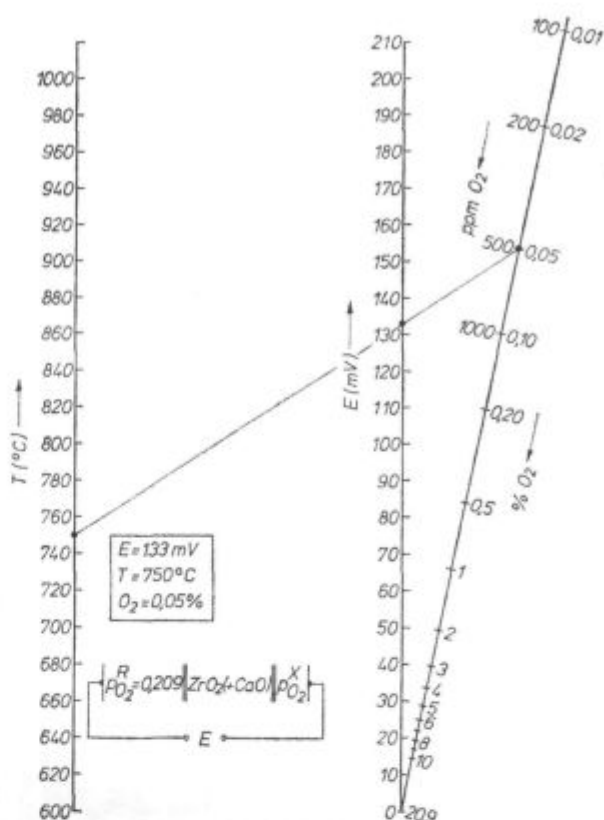
V sodobnih merilnih napravah obdela vrednosti analognih signalov v skladu z enačbo ugrajeni mikroprocesor tako, da je končna vrednost $-\log P_{O_2}$ ali % O_2 v analogni ali digitalni obliki.

* Nomogram je izdelan na osnovi enačbe (5): $\log \% O_2 = -0.680 - 20.17 \cdot \frac{E}{T}$

Primer: E = 133 mV, T = 750 °C. Teoretična vsebnost kisika v plinu:

$$\log P_{O_2} = -0.680 - 20.17/133/(750 + 273) = -3.3023$$

$P_{O_2} = 0,0005$ bar, oziroma 0,5 % O_2 (= 500 ppm)



Slika 3

Nomogram za odčitavanje vsebnosti kisika iz znanih vrednosti parametrov kisikove sonde (področje uporabnosti 600 do 1000 °C in E = 0 do 20 mV)

Fig. 3

Nomogram for reading oxygen contents from the known values of the oxygen probe parameters (range of applicability 600 to 1000 °C and E = 0 to 200 mV).

3. NEKATERE ZNAČILNOSTI KISIKOVIH SOND

V tabeli 1 je prikazan pregled najpomembnejših svetovnih proizvajalcev kisikovih sond, ki se uporabljajo bodisi pri kontroli zgorevanja v industrijskih obratih (vsebnost prostega kisika v dimnih plinih) ali pri kontroli ogljikovega potenciala v metalurških in strojnih obratih mehko žarjenje, normalizacija, plinsko naogljčenje jekla itd.). Slika 4 in 5 kažeta zunanji videz kisikovih sond dveh priznanih proizvajalcev: Programmelektronik (Zürich) in Corning (USA).

Na *sliki 4* sta prikazana dva tipa t. i. ENDO-SAND, pri katerih se vzorec merilnega plina jemlje iz atmosfere. To pomeni, da je kisikova celica z lastnim ogrevalnim sistemom zunaj peči, oziroma prostora, v katerem kontroliramo atmosfero.

Slaba stran te merilne metode je, da se med jemanjem plinskega vzorca kondenzira prisotna vlaga, kar spreminja sestavo plina (»suha analiza«).

Tabela 1. Pregled kisikovih sond za merjenje kisikovega potenciala v plinskih atmosferah

Oznaka sonde*	Westinghaus-sonda	Programm-elektronik sonda	Corning sonda	Neotronic-OTOX sonda	Kent-sonde	Dynatron sonde
1. Proizvajalec	Computer & Instrum. Division, Westing. Elect. Corporation 200 Beta Drive Pittsb. Pa 15238	Programmelectronic AG, CH-8035 Zürich	Corning Glass Works Corning N. Y., (USA)	Neotronic Ltd. Blid. 102, FSTS Site Stansed, Essex	Brown Boveri, Kent	Dynatron Inc. Wallingford, Connecticut 06492 USA
2. Trdni elektrolit	ZrO ₂ (+Y ₂ O ₃)	ZrO ₂ (+Y ₂ O ₃)	ZrO ₂ (+Y ₂ O ₃)	ZrO ₂ (+ ?)	ZrO ₂ (+Y ₂ O ₃)	ZrO ₂ (+ ?)
3. Referenčni tlak	zrak (= 0,21 bar)	zrak (= 0,21 bar)	zrak (= 0,21 bar)	zrak (= 0,21 bar)	zrak (= 0,21 bar)	zrak (= 0,21 bar)
4. Termopar	Pt — Pt + Rh10 (850 °C)	Pt — Pt + Rh10 (850 °C)	Pt — Pt Rh 18 (650 — 1600 °C)	?	600—1200 °C	?
5. Uporaba	O ₂ v dim. plinih zaščit. atmosfere	O ₂ v dim. plinih znanstv. raziskave zaščitne atmosfere	O ₂ v dim. plinih C — potencial zaščitne atmosfere	O ₂ v dim. plinih C — potencial	O ₂ v dim. plinih C — potencial	O ₂ v dim. plinih
6. Merilna vrednost	E (mV), T (°C)	E (mV), — log P O ₂ , % O ₂ , T (°C)	% O ₂ , E (mV), T (°C)	% O ₂	% O ₂	% O ₂ , T (°C)
7. Merilno področje	0.1 do 10 % O ₂	0 — 10 — 22 % O ₂	0,01 do 21 % O ₂ 0,3 do 1,5 % C	0 — 35 % O ₂	0 — 21 % O ₂ 0,5 % C do nasičenja	0 — 21 % O ₂
8. Pripombe	Točnost: 0.1 % do 2 % O ₂ , porozna zaščitna cev	Točnost: ± 0,5 % od merilne vrednosti portabile, teža različna	Točnost: ± 0,1 % digitalna in portabile izvedba teža: cca 4 kg	Točnost: ± 0,1 % pri 2 % O ₂ , portabile Ni-Cad baterija BCD		Točnost: ± 0,1 pri 2 % O ₂ , portabile, teža 10—20 kg BCD

* Ostali proizvajalci:

Ipsen Industries P. O. B. 6266, Rockford USA

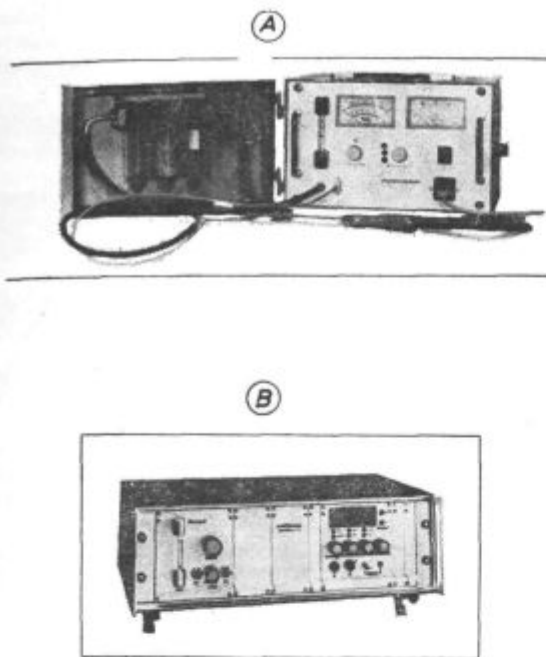
Thermox — Analyser, Sirius Instruments Ltd 27 Essex Road, Kent

Kontrol Technik GmbH, Eching (München)

UOP'S Wolverine Division

Edmont — Wilson Combustible Gas/Oxygen Monitor

Sunbeam Equipment Corp. Meadville, Pa. 16335 USA



Sl. 4

Analogna (A) in digitalna izvedba (B) prenosnih kisikovih sond firme Programm-Elektronik (Zürich)

Fig. 4

Analogue (A) and digital type (B) of portable oxygen probes by Programm-Elektronik Company, Zürich

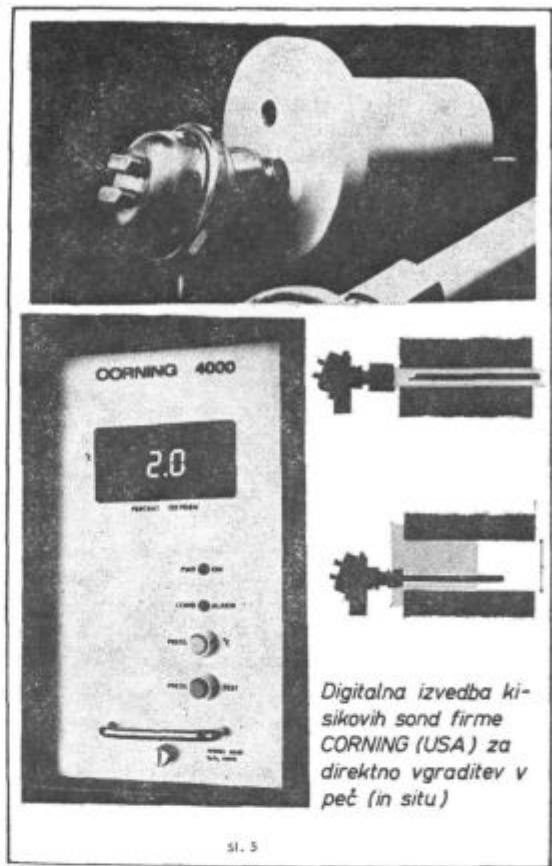
Prednost te metode je enostavna uporaba in zelo kratek čas, ki je potreben za pripravo meritev. Tudi temperaturne razmere v merilnem prostoru nimajo nobenega praktičnega vpliva na meritve.

Slika 5 kaže kisikovo sondo za direktno vgraditev v merilni prostor (tki. EXO-SONDO)

Bistvena prednost te izvedbe je tki. meritev »in situ«, tj. vrednosti kisikovega ali ogljikovega potenciala so izmerjene direktno v merilnem prostoru, kar daje realne vrednosti (»mokra analiza«). S tako izvedbo in določenimi ukrepi lahko merimo kontinuirano vsebnost kisika v dimnih plinih nad temperaturo rosišča.

Pomanjkljivosti sond za direktno vgraditev v merilni prostor je občutljivost sonde na temperaturne spremembe (zlasti pri vgraditvi, prekinitvi dela in pdb.), trdne delce, prah, saje. Vrsto teh pomanjkljivosti je mogoče odpraviti s primerno vgraditvijo in izbiro merilnega mesta. Pomembno je omeniti tudi dejstvo, da mora biti temperatura merilnega mesta nad 650 °C.

Znana je tudi tretja izvedba sond, ki je dejansko kombinacija omenjenih dveh metod: kisikova sonda je vgrajena v majhno pečico (temperatura se regulira z merilno napravo) in celotna izvedba se instalira v merilni prostor. V teh primerih je



Sl. 5

Fig. 5

Digital type of oxygen probes by Corning Company, USA for direct building into the furnace (in situ)

temperatura merilnega prostora ponavadi nižja od 650 °C (tipična aplikacija je vgraditev v dimni kanal, odvodne kanale in podobno).

ZAKLJUČKI

Na kratko je opisan princip delovanja kisikovih sond, ki se danes uporabljajo za kontrolo kisikovega in ogljikovega potenciala pri številnih toplototehničnih in metalurških agregatih.

Prikazane so teoretične osnove, ki omogočajo razumevanje povezave med električnim potencialom elektrokemične celice, temperaturo in parcialnim tlakom (ali koncentracijo) kisika v plinski atmosferi.

Zelo priročen nomogram omogoča direktno izračunavanje vsebnosti kisika iz znanih vrednosti E in T (parametri sonde).

Podrobno so opisane značilnosti kisikovih sond glede na njihovo uporabo: ENDO in EXO sonde. V posebni tabeli je prikazan pregled svetovnih proizvajalcev kisikovih sond z nekaterimi karakteristikami, predvsem glede na možnosti njihove uporabe.

V nadaljevanju tega članka bodo opisani konkretni primeri uporabe kisikovih sond, in sicer: pri kontroli in regulaciji zgorevanja fosilnih goriv (energetski in metalurški agregati), kontrola kisikovega in ogljikovega potenciala v nevtralnih (zaščitnih) in endo-atmosferah.

Literatura

- Schuh, B., B. Koroušič, B. Marinček: Elektrochemische Messung der Sauerstoffpartialdrücke in kohlenstoffgesättigtem Eisen in der Gasphase mit einem hauptsächlich aus Al_2O_3 und SiO_2 bestehenden Feststoffelektrolyten, Schweizer Archiv, Dezember (1968) 380—387.
- Koroušič, B.: Primjena čvrstih elektrolita pri proučavanjima metalurških reakcija, Rudarstvo i metalurgija, 12/1969/251—255.
- Koroušič, B.: Mjerenje kisikovega potenciala u plinovima kod visokih temperatura elektrokemijskom metodom, Metalurgija, 2/1970/3—9.
- Koroušič, B.: Določevanje permeabilnosti kisika nekaterih trdnih elektrolitov pri visokih temperaturah s potenciometrično metodo, Rudarsko-metalurški zbornik, št. 213 (1971) 275—289.
- Koroušič, B.: Messung der Sauerstoffpermeabilität einiger Feststoffelektrolyte, Stahl u. Eisen, 93, Nr. 10 (1973) 10 maj, 446—447.
- Koroušič, B.: Študij poteka oksidacije ogljika v atmosferi CO_2 z neposrednim merjenjem kisikovega potenciala v plinskih produktih, Rudarsko-metalurški zbornik, št. 3 (1973) 227—234.
- Sušnik, D., D. Kolar: Presintering of UO_2 Pellets in CO_2 — Atmosphere, Powder Metallurgy International Vol. 4, No. 1 (1972).
- Koroušič, B.: Dezoksidacija tekočih kovin s pomočjo trdnih elektrolitov, Dr. disertacija (1969), Univerza v Ljubljani, FNT.
- Koroušič, B., B. Glogovac: Kontrola plinske atmosfere z direktnim merjenjem parcialnega tlaka kisika s kisikovo sondo, Rudarsko-metalurški zbornik, Vol. 26, št. 1 (1979), 49—58.
- Smajić, N.: Elektrokemijska metoda odredjivanja redukcijskega potenciala železnih ruda i aglomerata, Metalurgija (Sisak) God. 18, br. 2 (1979), 11—17.

ZUSAMMENFASSUNG

Im kurzen wird der Funktionsprinzip der Sauerstoffmesssonden die heutzutage zu der Kontrolle des Sauerstoff und Kohlenstoffpotenziales bei den wärmetechnischen und metallurgischen Anlagen angewendet werden, beschrieben.

Die theoretischen Grundlagen, welche die Verbindung zwischen dem elektrischen Potenzial, der elektrolitischen Zelle, der Temperatur und dem Partialdruck (oder der Konzentration) des Sauerstoffes in der Gasatmosphäre erklären, werden angegeben.

Ein praktischer Nomogram zur Bestimmung des Sauerstoffgehaltes aus den gegebenen Werten für E und T wird angegeben.

Im einzelnen werden die Eigenheiten der Sauerstoffmesssonden hinsichtlich ihrer Anwendung ENDO und EXO-Sonden beschrieben. In einer Tabelle wird eine Übersicht der Sauerstoffmesssondenhersteller mit ihren Eigenheiten vor allem über die Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Im weiteren werden einige Beispiele der Anwendung der Sauerstoffmesssonden und zwar: bei der Kontrolle der Regelung, der Verbrennung der fossilen Brennstoffe (energieerzeugende und metallurgische Anlagen) und bei der Kontrolle des Sauerstoff und Kohlenstoffpotenziales in neutralen (Schutzgasen) und Endo Atmosphären gegeben.

SUMMARY

The principle of working of those oxygen probes which are today used in controlling oxygen and carbon potential in various heat engineering and metallurgical set-ups is shortly described.

Theoretical fundamentals are given which enable the understanding the connection between the electric potential of electrochemical cell, the temperature, and the partial pressure (or concentration) of oxygen in the gas.

A very handy nomogram enables direct evaluation of the oxygen content from the known values of E and T (probe parameters).

Detailedly are described ENDO and EXO probes, their characteristics and the applicability. A special table gives a review of oxygen probe manufacturers in the world with some characteristics based mainly on their applicability.

The continuation of the paper will present the concrete examples for the application of oxygen probes, i. e. in controlling and regulation of combustion of fossile fuels (energetic and metallurgical set-ups), in controlling the oxygen and carbon potentials in neutral (controlled) and endo-atmospheres.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сжатой форме дано описание принципа действия кислородных зондов, которые теперь применяются для контроля кислородного и углеродного потенциала при многочисленных теплотехнических и металлургических агрегатах.

Приведены теоретические основания, которые дают возможность выяснить связь между электрическим потенциалом и электрохимической ячейкой, температурой и парциальным давлением (или концентрацией) кислорода в газовой атмосфере.

Весьма пригодная номограмма дает возможность выполнить непосредственный отсчет содержания кислорода из известных значений E и T (параметры зонда).

Дано подробное описание характеристик кислородного зонда, что касается их употребления: ЭНДО и ЭКЗО зондов. В форме таблицы подан обзор всех производителей кислородных зондов в зарубежных странах с некоторыми характеристиками, в особенности возможности их употребления.

В другой части этой работы будет дано описание кислородных зондов а именно: при контроле и регулировки сгорания топлива (энергетические и металлургические агрегаты), контроль кислородного и углеродного потенциала в нейтральных (защитных) и эндогенных атмосферах.

Vpliv pretaljevanja pod žlindro in kaljenja v solni kopeli na lastnosti visoko trdnega jekla Č 5432-VCNMo 200

UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2
ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, SGBA, D8n, J26p

Franc Uranc

Postopka izotermne pretvorbe avstenitiziranega jekla v bainit ali upočasnjenega kaljenja v martenzit sta priljubljena tam, kjer želimo, da je izdelek zelo trden in obenem zelo žilav in da se mu med kaljenjem ne spreminjajo dimenzije bolj, kot je varno in gospodarno.

Ena od izpeljank prvega od teh postopkov je patentiranje. V slovenščini še nimamo imen za ta postopka. Austempering bi lahko imenovali izotermno kaljenje, pri martemperingu (upočasnjem kaljenju v martenzit) pa sicer poteka pretvorba skoraj istočasno in zato pri enaki temperaturi po vsem prerezu izdelka, toda ne pri temperaturi kopeli, temveč šele pozneje. Poskuse smo opravljali z jeklom, ki se je pokazalo primerno predvsem za kaljenje v martenzit. Opisano je, kako vplivajo čas, temperatura pretvorbe in delež bainita v strukturi na mehanske lastnosti jekla.

1. IZOTERMNO KALJENJE JEKLA

Jeklu Č 5432-VCNMo 200 smo želeli zvečati žilavost in duktilnost — delno srednje vrednosti, predvsem pa najnižje, ki so po poboljšanju pod dostupnimi. Ob trdnosti 1400 N/mm² ter meji plastičnosti nad 1300 N/mm² naj bi imelo to jeklo raztezek zaznavno nad 10 %, kontrakcijo nad 42 %, žilavost nad 35 J (preizkušane z zarezo DVM). S poboljšanjem more jeklo doseči takšne lastnosti le včasih, in še to, če je kovano na debelino manj kot 20 mm ali če je izdelano po posebnem postopku.

Zahtevano kontrakcijo in trdnost temu jeklu z lahkoto zagotovimo, težje pa je z žilavostjo in raztežkom. Podobno je z obstojnostjo jekla proti utrujanju.

Odločili smo se izboljšati jeklo z izotermnim kaljenjem, saj s tem lahko izboljšamo celo obstojnost proti utrujanju (1). V grobem delimo izotermno kaljenje na tisto v bainitnem in tisto v mar-

tenzitem temperaturnem območju, pri čemer temperaturo kaljenja izberemo po izotermnem TTT diagramu.

1.1 Izotermno kaljenje v bainit

Izotermno kaljenje v bainitnem temperaturnem območju se imenuje v tuji literaturi austempering, ki je po definiciji izotermna strukturna pretvorba železnih zlitin pod temperaturo tvorbe perlitna in nad temperaturo tvorbe martenzita.

To toplotno obdelavo uporabljamo, če je naš namen povečati zlitini predvsem žilavost in duktilnost, obenem pa doseči veliko trdoto izdelka.

V bainit moremo izotermno kaliti le določena jekla:

- z vsebnostjo ogljika pod 0,5 % in mangana nad 1 %,
- z vsebnostjo ogljika med 0,5 in 1 % ter mangana nad 0,6 %,
- z vsebnostjo ogljika nad 1 % in mangana pod 0,6 %,
- z več kot 0,3 % ogljika, legirana s kromom in manganom.

Od orodnih jekel so primerna za takšno kaljenje jekla za delo v hladnem, ledeburitnega tipa (2 % C, 12 % Cr) in jekla za delo v vročem s 5 % Cr in dodatkov molibdena in vanadija (2).

Jeklo je možno z uspehom izotermno kaliti v bainit, če je nos perlitne krivulje vsaj za dve sekundi odmaknjen od začetka ohlajanja. Omejitve uporabnosti tega postopka je prerez izdelkov, saj npr. ne moremo dobro kaliti predmetov iz jekla Č 1940-OC 80, debelejših od 5 mm, če želimo čisti bainit. Izdelki iz krommanganovih jekel so lahko debeli 25 mm.

Pomembnejše od doseganja 100 % bainitne strukture je doseganje dobrih mehanskih lastnosti, zato so v industriji zadovoljni tudi s 75 % bainita v ustrezno izotermno kaljeni strukturi. Različna jekla se dajo namreč do različne stopnje pretvoriti v bainit. Če doseže izdelek za bainit nadnormalno trdoto, je to znak, da se je poleg bainita tvoril tudi martenzit; če pa je izdelek premehak, je to znak tvorbe perlita pred tvorbo bainita.

Franc Uranc je diplomirani inženir metalurgije in raziskovalec na področju mehanskih raziskav v železarni Ravne.

Kaljenje na bainit je zelo priporočljivo, kadar želimo posebno majhne dimenzijske spremembe med kaljenjem. Kalimo v solni kopeli nekoliko nad temperaturo martenzitne tvorbe. Na tej temperaturi zadržujemo orodje toliko časa, da se avstenit ves pretvori v bainit, katerega trdota je odvisna od temperature tvorbe: višja temperatura pomeni nižjo trdoto.

Če bi hoteli doseči čisti bainit v visokolegiranih jeklih, bi potrebovali preveč časa, obdelava bi bila negospodarna.

Ta vrsta kaljenja je posebno ugodna zato, ker zveča malo legiranim jeklom žilavost, ne da bi jim zmanjšala trdoto pod tisto, ki jo dosega po navadnem kaljenju in popuščanju na 300 °C, to je temperaturo popuščne krhkosti.

Podobno obdelujemo vsa nelegirana jekla, ki naj bi imela trdoto 30 — 42 HRC. Majhne kose pred kaljenjem izotermno žarimo. Izdelke, ki so predebeli za navadno izotermno kaljenje, obdelamo po posebnem modificiranem postopku. Paziti moramo, da je masa kosov v določenih mejah, kajti ob večji masi, kot je dopustna, se sredina ne ohladi zadosti hitro, kopel se ogreje nad dovoljeno temperaturo in pojavi se mešana struktura, ki jo spremlja spreminjajoča se trdota.

Modificirani postopki so omejeni s številnimi dejavniki in je zato nujnih nekaj poskusov in napak, preden pridemo do najboljšega kalilnega cikla.

Velike izdelke pogosto kalimo tako, da jih najprej ohladimo v kopeli s temperaturo tik nad M_s točko in jih prestavimo v kopel s primerno temperaturo za kaljenje v bainit šele po izenačenju temperature po prerezu (3).

1.2 Izotermno kaljenje v martenzit

Če kalimo z avstenitizacijske temperature v kopeli, ki je ogreta na temperaturo gornjega dela martenzitnega področja (izotermnega TTT diagrama) ali pa malo višje, in če pustimo izdelek v kalilnem sredstvu toliko časa, da se temperatura izravna po prerezu, in če nato ohladimo izdelek na zraku — imamo opraviti z izotermnim kaljenjem v martenzitnem območju, po angleško: z martemperingom.

Martenzit se tvori lepo enakomerno med ohlajanjem na sobno temperaturo. Prednost tega počasnega ohlajanja v martenzitnem območju temperatur je ta, da se tvori martenzit skoraj istočasno po vsem prerezu, oz. po majhnih ali velikih prerezih.

Kaljenje na martenzit torej zmanjša ali izloči deformacije, pusti v izdelku manj napetosti kot navadno kaljenje v hladnem hladilnem sredstvu, ker nastopajo največje toplotne spremembe tedaj, ko je jeklo še v razmeroma plastičnem avstenitnem območju in ker nastopajo pretvorbe po celem prerezu skoraj istočasno.

Kadar imamo opravka z manj kaljivimi jekli, katera zahtevajo veliko ohlajevalno hitrost, da se prekalijo zadosti globoko, pogosto uporabljamo modificirano kaljenje na martenzit. Temperatura hladilne kopeli je v tem primeru nižja kot pri navadnem kaljenju na martenzit ter je lahko 100 °C ali pa tik do M_s točke. Prednost modificirane postopka pred navadnim je cenenost hladilnih priprav, saj lahko kalimo kar v olju.

Enakomerne in ponovljive lastnosti dosežejo izdelki z obema načinoma kaljenja na martenzit, vendar se občutljivi kosi bolj deformirajo pri modificiranem načinu, zaradi česar so potrebni večji brusni dodatki.

Kaljenje na martenzit imenujejo tudi martenzitno kaljenje, kar določeneje pove, da je treba po tovrstni obdelavi tudi še popuščati.

Načelno so primerna za ta postopek vsa jekla, katera lahko kalimo v olju, pa tudi nelegirana, če gre za tenke izdelke in če močno mešamo kalilno sredstvo. Tudi visokolegirana jekla (npr. Č 4171-Prokron 2) včasih tako obdelujejo.

Globina, do katere se tvori martenzit s tem procesom, je tretjina (pri nelegiranih) do dve tretjini (pri krom-nikljevih jeklih) od tiste globine, dosežene s kaljenjem v vodi (3).

Postopek ima tudi vsaj dve hibi. Čeprav naj bi bila ustvarjena struktura enaka kot po navadnem kaljenju, je vendar delež avstenita veliko večji. To je posebno izrazito v srednje legiranih jeklih. Če pa pustimo izdelek predolgo v kalilni kopeli, se tvori bainit, kar zmanjša trdoto! (4).

Kljub temu, da ni neposrednega povoda, se tudi z martemperingom občutno boljše žilavost orodnih in konstrukcijskih jekel, kar postavlja ta postopek po pomembnosti ob postopek izotermnega kaljenja v bainit.

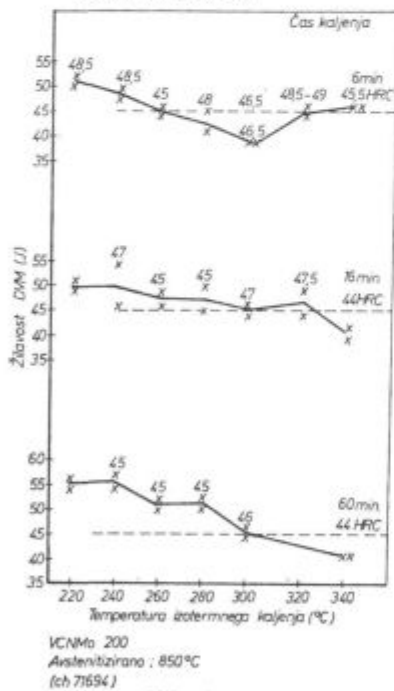
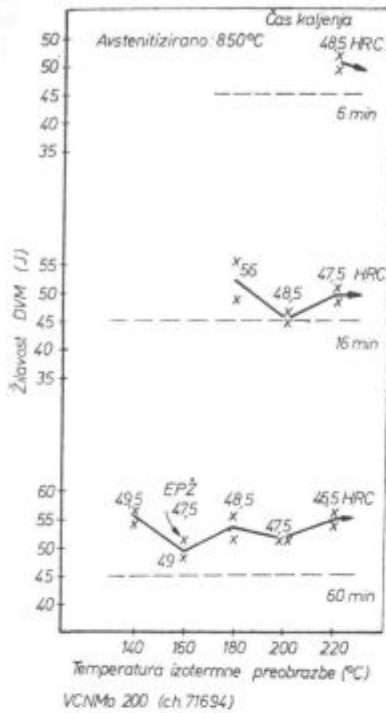
2. TRDNOSTNE LASTNOSTI, ŽILAVOST IN STRUKTURA JEKLA PO IZOTERMNEM KALJENJU

Poskuse izotermnega kaljenja za vpeljavo le-tega v industrijsko delo smo opravili z dvema talinama, ki sta bili različno izdelani. Tabela 1 kaže kemično sestavo obeh talin.

Tabela 1: Kemična sestava preizkušenih talin jekla Č 5432-VCNMo 200

Talina	C	S	Si	Cr	Ni	V	Cu	Mn	Mo	P
A	0,31	0,021	0,30	2,29	1,96	0,01	0,25	0,60	0,43	0,015
B	0,30	0,006	0,26	2,01	2,10	0,02	0,20	0,52	0,50	0,019

Jeklo obeh talin je bilo prekovano na kvadrat 14 mm, žarjeno in po izdelavi preizkušancev toplotno obdelano za ugotavljanje vpliva temperature ohlajevalne kopeli na trdoto in žilavost jekla.

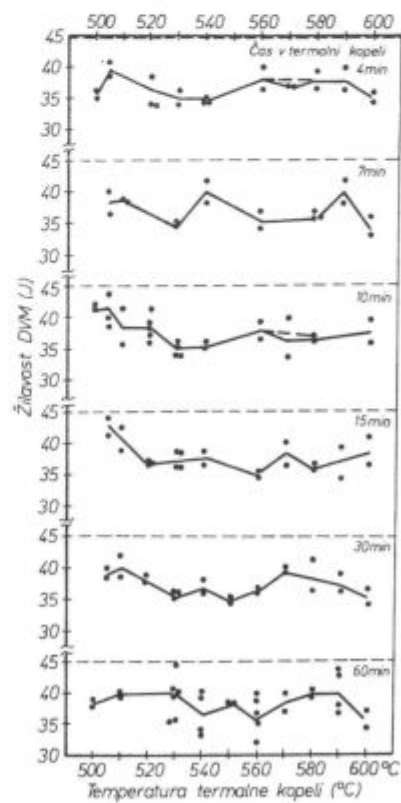
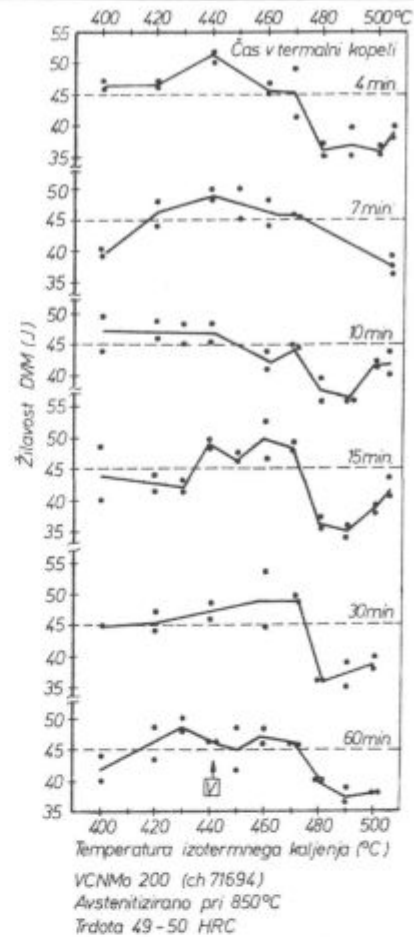


Slike 1a — d

Žilavost in trdota jekla Č 5432 VCNMo 200 po različno dolgem kaljenju z avstenitizacijske temperature 850 °C v kopeli z različno temperaturo. Ohlajanje pod temperaturo kopeli je na zraku.

Figs. 1a to d

Toughness and hardness of Č 5432-VCNMo 200 steel after various austempering/martempering times from the austenitization temperature 850 °C in the bath with various temperatures. Cooling below the bath temperature is in air



Obsežnejše preiskave trdote in žilavosti smo opravili s preizkušanci taline A, to je klasično izdelane taline, zato obravnavamo rezultate teh preizkav posebej.

Slike 1a—1d prikazujejo rezultate preizkusov jekla taline A. Vsaka točka pomeni srednjo vrednost dveh meritev. Številke nad krivuljami pomenijo trdoto posameznih preizkušancev. Črtkana vodoravna črta ob vsaki krivulji je zelena raven žilavosti (45 J, preizkušanci z zarezo DVM). Dopustna je le žilavost nad 35 J. Žilavostni preizkušanci so bili avstenitizirani 30 minut pri 850 °C in nato kaljeni v staljeni soli AS 135.

Po kaljenju v kopeli s temperaturo 220 °C so bili preizkušanci, glede na doseženo trdoto 46,5 HRC (po enournem držanju v kopeli) zelo žilavi (okoli 50 J). Če je bila temperatura kopeli 180 °C, so dobili preizkušanci trdoto 56 HRC.

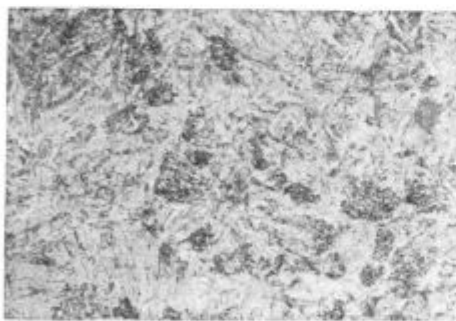
Če vzamemo kot še gospodaren čas držanja na temperaturi pretvorbe eno uro, vidimo, da je primerna temperatura izotermne pretvorbe (oz. začetka tvorbe martenzita ali bainita) do 300 °C ali med 420 in 470 °C.

Po kaljenju v vseh kopelih (temperatura od 160 do 600 °C) so bili preizkušanci zadosti trdi. Najmehkejši so bili preizkušanci, kaljeni v kopeli s temperaturo 340 °C.

To talino smo tudi metalografsko pregledali.

Dilatometrski preizkušance smo avstenitizirali 15 minut pri 850 °C. $M_s = 400$ °C, $M_f = 160$ °C.

Pri preizkusih v dilatometru je nastopila bainitna pretvorba, že ko smo z avstenitizacijske temperature 850 °C ohlajali na 350 °C, ne pa pri ohlajanju na temperaturo 280 °C. Znižanje M_s točke je posledica dejansko kontinuirnega ohlajanja preizkušanca.



Slika 2

Mikrostruktura žilavostne probe avstenitizirane pri 850 °C in nato ohlajane pri 400 °C eno uro in nadalje na zraku. Vsebnost 40 % bainita, 60 % martenzita. Trdota 50 HRC, žilavost 50 J (DVM). (500 ×)

Fig. 2

Microstructure of toughness probe austenitized at 850 °C and consequently cooled at 400 °C one hour, and after it in air. Content 40 % bainite, 60 % martensite. Hardness 50 HRC, toughness 50 J (DVM) 500 ×

Različni časi držanja dilatometrskih preizkušancev pri različnih temperaturah so dali take količine bainita v strukturi:

1. Ohlajanje z 850 °C na 400 °C je povzročilo nastanek bainita že po 100 sekundah in 16-urno držanje pri tej temperaturi je dalo 70 % bainita v strukturi.

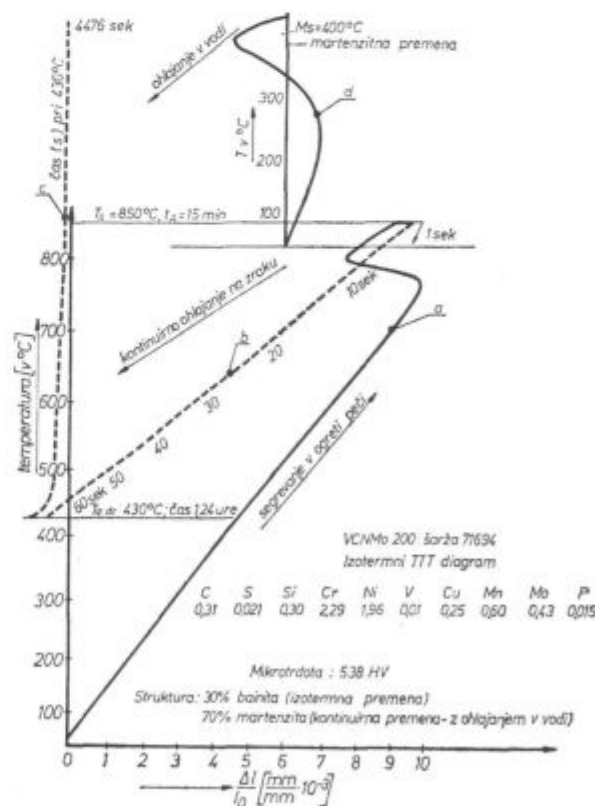
Mikrotrdota je 449 HV.

Slika 2 kaže videz strukture žilavostnega preizkušanca, ki ga zadržujemo 60 minut pri 400 °C. Struktura je 40 % bainit, 60 % martenzit. Žilavost je 50 J (DVM), trdota 50 HRC.

2. Ohlajanje avstenitiziranega preizkušanca na temperaturo 430 °C je sprožilo tvorbo bainita že po 130 sekundah. Po 1,24 ure je bilo v strukturi že 30 % bainita. Vidimo, da se pri tej temperaturi začena pretvorba v bainit nekoliko pozneje kot pri 400 °C, toda teče hitreje (difuzija) in se je zato v veliko krajšem času ustvarilo skoraj toliko bainita kot po 16 urah pri 400 °C.

Mikrotrdota je znašala 538 HV.

Slika 3 kaže potek snemanja temperaturnega cikla. Krivulja a ponazarja segrevanje preizkušanca v ogreti peči do avstenitizacijske temperature. Krivulja b ilustrira ohlajanje preizkušanca do temperature izotermnega držanja. Krivulja c kaže izotermno pretvorbo strukture v bainit. Krivulja



Slika 3

Temperaturni cikel izotermnega kaljenja v dilatometru

Fig. 3

Temperature cycle of isothermal quenching obtained by the dilatometer

d pa kaže nadaljnje kontinuirno ohlajanje preizkušanca v vodi, ko se ostanek avstenita pretvori v martenzit.

Kot za to temperaturo izotermne pretvorbe so bili posneti diagrami še za šest temperatur med 250 in 500 °C.

3. Z ohlajanjem avstenitiziranega dilatometriškega preizkušanca na 500 °C se je začel tvoriti bainit po 295 sekundah, toda po 2,7 urah je vsebovala struktura le 2 % bainita.

Mikrotrdota je 510 HV.

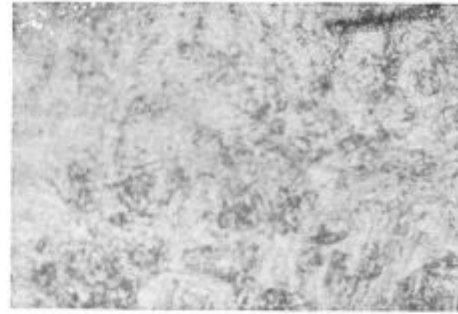
Žilavostni preizkušanci so pokazali take strukture:

1. Sliki 4 in 5 kažeta videz strukture, nastale z izotermnim 20 ali 60-minutnim držanjem žilavostnega preizkušanca pri 180 °C. Preizkušavec je bil seveda prej avstenitiziran.

Podoben videz imajo strukture, nastale s hlajenjem avstenitiziranih preizkušancev pri 220 ali 240 °C.

2. Nekoliko drugačna je videti struktura, kaljena v kopeli pri 260 ali 280 °C (sl. 6 in sl. 7). Žilavost in trdota pa sta kar obe manjši (za 3,5 enot

HRC oz. za 5 J), kot po kaljenju v kopeli s temperaturo 180 °C, dasiravno se je pojavilo že okoli 10 % bainita v strukturi.



Slika 6

Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 260 °C in nadalje na zraku. 10 % bainita, 45 HRC, 50 J (500 ×)

Fig. 6

Microstructure of toughness probe, austempered 60 minutes in the bath at 260 °C, and consequently in air. 10 % bainite, 45 HRC, 50 J, 500 ×

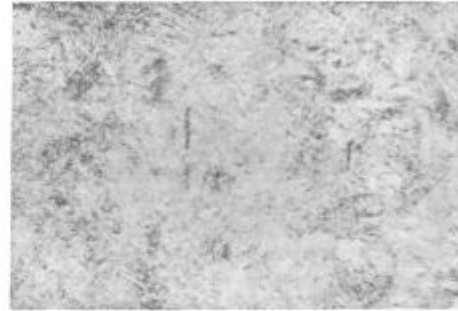


Slika 4

Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 20 minut v kopeli pri 180 °C in nato na zraku. 50 HRC, 50 J. (500 ×)

Fig. 4

Microstructure of toughness probe, martempered 20 minutes in the bath at 180 °C, and consequently in air. 50 HRC, 50 J, 500 ×

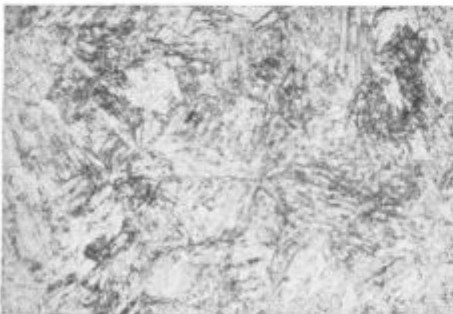


Slika 7

Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 280 °C, nadalje na zraku. 10 % bainita, 45 HRC, 51 J (500 ×)

Fig. 7

Microstructure of toughness probe, austempered 60 minutes in the bath at 280 °C, and consequently in air. 10 % bainite, 45 HRC, 51 J, 500 ×

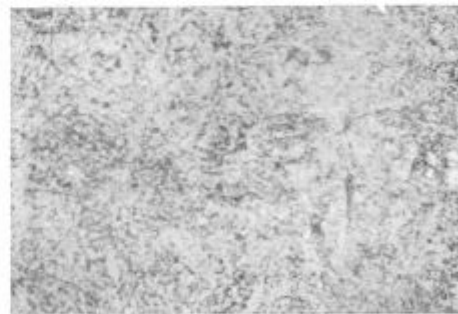


Slika 5

Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 180 °C in nato na zraku. 48,5 HRC, 56 J (500 ×)

Fig. 5

Microstructure of toughness probe, martempered 60 minutes in the bath at 180 °C, and consequently in air. 48.5 HRC, 56 J, 500 ×

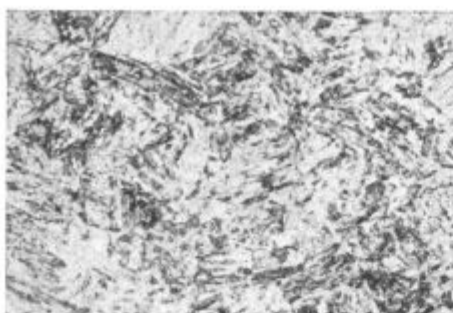


Slika 8

Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 340 °C in nadalje na zraku. 40 % bainita, 45 HRC, 40 J (500 ×)

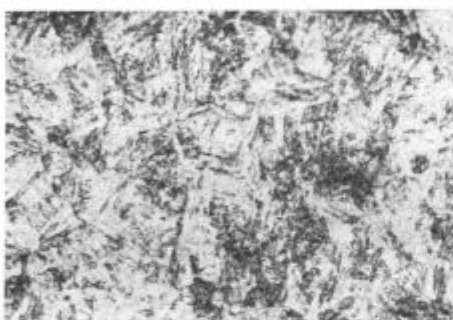
Fig. 8

Microstructure of toughness probe, austempered 60 minutes in the bath at 340 °C, and consequently in air. 40 % bainite, 45 HRC, 40 J, 500 ×



Slika 9
Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 460 °C nato na zraku. Ni bainita. 49 HRC, 47 J (500 ×)

Fig. 9
Microstructure of toughness probe, austempered 15 min. in the bath at 460 °C, and consequently in air. No bainite, 49 HRC, 47 J, 500 ×



Slika 10
Mikrostruktura žilavostne probe, kaljene 60 minut v kopeli pri 580 °C, nadalje na zraku. Ni bainita. 50 HRC, 30 J (500 ×)

Fig. 10
Microstructure of toughness probe, austempered 60 minutes in the bath at 580 °C, and consequently in air. No bainite, 50 HRC, 30 J, 500 ×

3. Še drobnejšo, manj urejeno martenzitno-bainitno strukturo kaže preizkušanelec, kaljen pri 340 °C (sl. 8), z žilavostjo 40 J in trdoto 45 HRC. Slika 9 kaže stanje strukture po 15-minutnem kaljenju pri 460 °C.

4. Slika 10 kaže, da pri 580 °C ne nastopi po 60 minutah še nič bainita. Žilavost preizkušancev, ki so bili po avstenitizaciji tako ohlajeni (nadalje na zraku), je bila 30 J, trdota 50 HRC.

3. VPLIV NAČINA IZDELAVE IN VRSTE TOPLLOTNE OBDELAVE TALIN NA LASTNOSTI JEKLA

Kot kažejo žilavosti in trdote izotermno kaljenih preizkušancev jekla Č 5432-VCNMo 200, sta ugodni temperaturni območji izotermnega držanja pod 300 °C ali med 400 in 470 °C.

Za osnovo primerjave vpliva toplotnih obdelav smo izdelali iz taline A nekaj preizkušancev, katere smo po avstenitizaciji izotermno držali eno uro v kopeli s temperaturo 180 °C. Rezultate preizkusov teh vzorcev kaže tabela 2.

Tabela 2: Mehanske lastnosti jekla Č 5432-VCNMo 200 po kaljenju v kopeli pri 180 °C

Re	Rm	A	Z	σ_{tr}	$\left(\frac{\sigma_{tr}}{Rm}\right)$
N/mm ²	N/mm ²	%	%	N/mm ²	
1600	1770	12,4	48,0	727;692	0,40

Vsak podatek v tabeli je srednja vrednost dveh izmerjenih rezultatov. Za to visoko trdnost sta duktilnost in trajna nihanja trdnost odlični.

Trajno nihajno trdnost smo izračunali iz zlomne napetosti (5). Žilavost je znašala 56 J.

Nekaj preizkušancev taline A in taline B smo izotermno kalili pri 470 °C in nekaj smo jih popeljali (850 °C/olje + popušcanje pri 480 °C), tako da smo jih popustili na temperaturo, podobno tisti pri kopeli za izotermno ohlajanje. Kot najugodnejši čas držanja (Ø 8 mm) v hladilni kopeli smo izbrali 9 minut. Označimo izotermno kaljenje z I in popoljšanje z II! Rezultati so v tabeli 3.

Izotermno kaljenje daje veliko enakomernejše lastnosti kot popoljšanje, po katerem je nekaj lastnosti pod zelenimi, npr. talina A nima zadostne trdnosti in meje plastičnosti, talina B pa kontrakcije.

Na trajno nihajno trdnost delujeta obe vrsti toplotne obdelave podobno, ne pa na trdnost, ki se jeklu taline B (pretaljene po EPŽ postopku) s popoljšanjem nenavadno lepo dvigne, talina A pa je precej mehkejša, kot bi pričakovali po rezultatu preizkusa trajne nihajne trdnosti.

Tabela 3: Mehanske lastnosti jekla Č 5432-VCNMo 200 po kaljenju v vroči (470 °C) solni kopeli (I) ali po popoljšanju (II)

Obdelava	Talina	Re	Rm	A	Z	Trdota	Žilavost (DVM)	σ_{tr}	$\left(\frac{\sigma_{tr}}{Rm}\right)$
		N/mm ²	N/mm ²	%	%				
I	A	1490	1570	13,2	47	—	48	575	0,37
	B	1500	1540	11,0	46	400	42—57	615	0,40
II	A	1225	1330	12,5	52	—	35	555	0,417
	B	1545	1773	11,7	36	440	37	616	0,35

Razmerje trajne natezno-tlačne trdnosti proti natezni trdnosti kaže, da je izotermno tvorjena struktura obstojnejša od poboljšane. To še posebno velja, če je dosežena struktura homogena, sam martenzit. Pri tem jeklu nastane taka struktura pri nizki temperaturi izotermne pretvorbe (180 °C). Razmerje 0,4 pri trdnosti 1770 N/mm² po izotermnem kaljenju pomeni veliko proti skoraj enakemu razmerju pri poboljšanem jeklu s trdnostjo 1330 N/mm². Jeklo taline B (EPŽ pretaljene) je bilo po poboljšanju veliko trdnije od jekla taline A, toda kontrakcija je bila pod dopustno.

4. SKLEPI

1. Struktura dilatometriških preizkušancev je delno bainitna že po ohlajanju avstenitiziranega preizkušanca v kopeli pri 350 °C. Po dolgem času držanja avstenitiziranega preizkušanca v kopeli pri 400 °C nastane 70 % bainita, skoraj preneha pa tvorba pri temperaturi 500 °C. Žilavostni preizkušanci so delno bainitni že po kaljenju v kopeli s temperaturo 260 °C. Če je kalilna kopel pri 340 do 400 °C, dosežejo v eni uri 40 % bainita. Pri višjih temperaturah se ne tvorijo znatne količine bainita.

2. Žilavost lahko temu jeklu najbolj povečamo, če ga kalimo po avstenitizaciji v kopeli s temperaturo med 150 in 300 °C. Tako dosega to jeklo Č 5432-VCNMo 200 žilavost do 56 J. Držanje v hladilni kopeli s temperaturo pod 300 °C naj traja vsaj eno uro. Če je temperatura kopeli nad 250 °C, se pojavi v strukturi do 10 % bainita (do 300 °C v eni uri).

Drugo območje primerne temperature kalilne kopeli je okoli M_s točke vse do temperature 470 °C, pri čemer naj bo čas zadrževanja v kopeli

le okoli 10 minut. Preizkušanci dosežejo žilavost okoli 48 do 50 J (DVM zarez) ter trdoto 49 HRC, kar je podobno, kot po kaljenju v kopeli z nižjo temperaturo (pod 180 °C). S popuščanjem se žilavost ne spremeni veliko.

3. Trajno nihajno trdnost moremo temu jeklu močno dvigniti le s kaljenjem v kopeli pri nizki temperaturi (180 °C). Razmerje trajne trdnosti k natezni trdnosti pa je enako (0,40) kot po postopku izotermnega zadrževanja pri 470 °C.

Preizkušanci, poboljšani na enako trdnost, kot jo ima jeklo po kaljenju v kopeli pri 180 °C (in nadalje na zraku), vzdržijo za 15 % manjše napestne amplitude pri utrujanju.

4. Postopek izdelave jekla odločilno vpliva na obstojnost proti utrujanju. Če so preizkušanci obeh talin kaljeni (zadrževani) pri 470 °C, je trajna nihajna trdnost jekla, izdelanega po EPŽ postopku, za 7 % večja kot pri enako trdnem jeklu, izdelanem po klasičnem talilnem postopku. S poboljšanjem pa se pojavijo med obema talinama dodatno še zelo velike razlike trdnosti, kar povzdiguje vrednost jekla, izdelanega po EPŽ postopku.

Literatura

1. Clayton V. V., R. Taylor: Metallurgical Factors Influencing the Fatigue Properties of High-Strength Steels. British and Iron Steel Association. ID 75/6, Železarna Ravne.
2. K-E Thelning: Steel and its Heat Treatment, Butterworths, London 1975, str. 217–219.
3. Metals Handbook Vol. 2, Ed. 8, str. 36–39.
4. K-E Thelning: Steel and its Heat Treatment, Butterworths, London 1975, str. 214–217.
5. Enomoto N.: A method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increase test. Proc. ASTM, 1959, vol. 59, str. 711–720.

ZUSAMMENFASSUNG

Dem hochfesten Konstruktionsstahl Č 5432-VCNMo 200 kann die Zähigkeit durch das Härten im Salzbad bei 160 bis 300 °C erheblich verbessert werden (von 37 auf 56 J oder 48 J) oder so, dass es beim Härten von der Austenitisierungstemperatur bei 400—470 °C um 10 bis 30 Minuten angehalten wird.

Das ESU Verfahren verbessert dem Stahl die Wechselfestigkeit um 10 % wenn der Stahl vergütet wird, oder um 7 % wenn der Stahl warmbadgehärtet wird.

Die Art der Stahlherstellung ändert den Einfluss der Wärmebehandlungsart auf die Ermüdungsbeständigkeit nicht.

SUMMARY

The toughness of VCNMo 200 — Č 5432 high-strength structural steel can be essentially improved (from 37 J to 56 J or 48 J) by hardening in the salt bath at 160 to 300 °C, or if it is kept for 10 to 30 minutes at 400 to 470 °C when quenched from the austenitizing temperature. ESR process

improves the fatigue limit for 10 % (if steel is hardened and tempered) or for 7 % (if it is martempered). The manufacturing process of steel does not change the influence of the heat-treatment process on the fatigue resistance.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкционной стали высокой твердости марки С. 5432 — VCNMo 200 можно значительно улучшить вязкость (с 37 на 56 ед. по Ж), если эту сталь подвергнем закалке в соляной ванне при 160—300 °C, или же с закалкой при аустенитной температуре задержим при темп-ре 400—470 °C в течении 9—30 минут. Способ

ЭШП улучшит этой стали усталостную прочность на 10 % (если сталь была улучшена), или на 7 % (если выплавлена изотермическая закалка).

Способ изготовления стали не изменит влияние вида термической обработки на стойкость против старения.

Zboljšanje žilavosti jekel s kaljenjem v vroči kopeli

UDK 620.178.746.22:621.785

ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, TSb, Ay

Franc Uranc

Kaljenje avstenitiziranih jeklenih izdelkov v vroči kopeli imenujemo tudi austempering ali martempering glede na temperaturo kopeli, oz. pretvorbe. Če pretvorimo avstenit v bainit, govorimo o austemperingu, če pa poteka izotermna pretvorba v martenzitnem območju temperatur, imamo opravka z martemperingom. Temperatura kopeli naj bo med kaljenjem stalna, izdelki naj bodo zadosti tenki, da se pretvorba čimbolj približa izotermni. K postopku martemperinga spada tudi popuščanje.

Precej jekel dobi z martemperingom ali austemperingom — katera tu zaradi preprostosti imenujemo kar izotermno kaljenje — veliko boljše lastnosti kot s poboljšanjem. Tu predstavljamo nekaj jekel, katerim se more s takšno obdelavo bistveno izboljšati žilavost, obenem pa opišemo tudi jekla, katerim se že z razmeroma majhnim povečanjem žilavosti zelo poveča uporabnost.

Franc Uranc, raziskovalec za konstrukcijska jekla in mehanske preiskave v železarni Ravne

UVOD

Z izotermnim kaljenjem v območju bainitne premene izboljšamo jeklenim izdelkom žilavost, ne da bi bila trdnost manjša kot po navadnem kaljenju in popuščanju. Ni vsako jeklo primerno za izotermno kaljenje v bainit: bodisi da nastopi premena prekmalu (in ne more biti izotermna), bodisi da je prepočasna (ne steče do konca).

Nekatera jekla za vzmeti dobijo po izotermnem kaljenju prav dobre lastnosti; podobno jekla za rudarska, gradbeniška in lesnopredelovalna orodja. Celo turbinske lopatice se splača izotermno kaliti, svetujejo pa takšno kaljenje tudi pri valjčnih ležajih.

Podobne ugodne efekte daje tudi izotermno kaljenje v martenzit.

Naši poskusi

Od naših jekel za vzmeti smo izotermno kalili Č 4830-VCV 150 in Č 2332-65 Si 7. Prvo jeklo smo

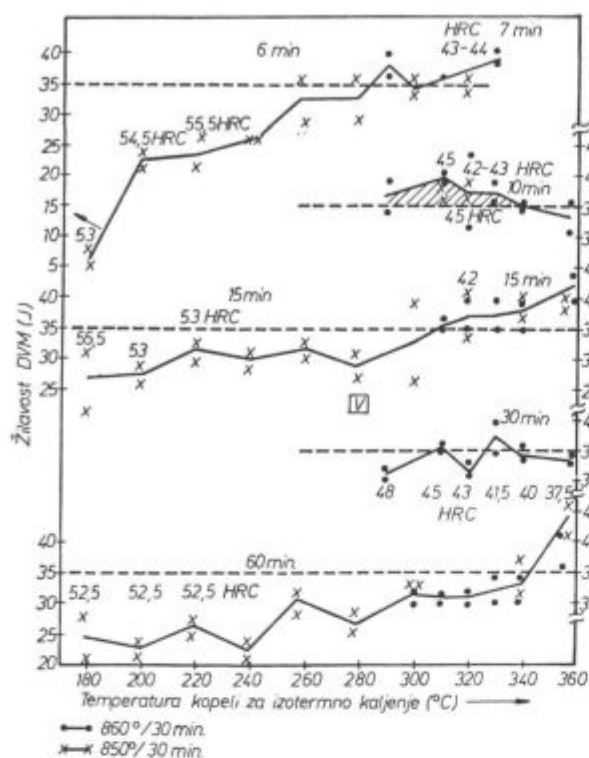
Tabela 1: Smerna kemična sestava in premenske točke preizkušanih jekel

Jeklo	Smerna kemijska sestava (%)						W	A _{s3} °C	T _A °C	T _B °C	t _B s	M _L °C
	C	Si	Mn	Cr	V							
Č 4830 VCV 150	0,5	0,3	1	1	0,1	—	770	880	470	500	290	
								1050	480	700	300	
Č 23332 65 Si 7	0,65	1,7	0,85	—	—	—	790				255	
Č 6444 Osikro 4	0,6	0,6	0,3	1	0,1	2	830	880	430	∞	300	
							830	880	380	130	300	
							830	950	400	∞	270	
Č 4150 OCR 12	2	0,3	0,3	12	—	—	825	950	320	>10 ⁵	205	
Č 4650 OCR 12 sp.	2,1	0,3	0,3	12	—	0,7	825	950	300	>10 ⁵	180	
Č 4172 Prokron 3	0,2	0,4	0,4	13	—	—	830	—	—	—	300	
Č 4146 OCR 4 ex.	1	0,2	0,3	1,5	—	—	790	860	470	400	250	
							790	1050	450	4000	140	

T_A — avstenitizacijska temperatura, °C

T_B — temperatura ob nosu krivulje izotermne premene v bainit, °C

t_B — čas 100 % pretvorbe pri temperaturi T_B po ohladitvi z navedene avstenitizacijske temperature, s



Slika 1

Žilavost in trdota jekla Č.4830-VCV 150, kaljenega po avstenitizaciji na 850 °C v solni kopeli. Ob krivuljah sta zapisana čas držanja v hladilni kopeli in dosežena trdota v enotah HRC.

Fig. 1

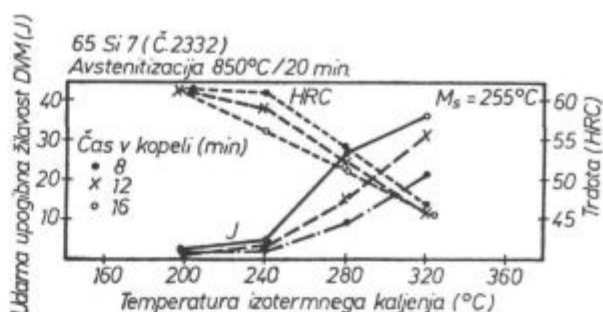
Toughness and hardness of Č.4830-VCV 150 steel austempered in salt bath after the austenitization at 850 °C. Figures with curves represent holding times (in the bath) and achieved hardness values in HRC.

izotermno kalili v solnih kopelih s temperaturo od 180 °C do 360 °C. Časi zadrževanja na temperaturi kaljenja so bili 4, 7, 10, 15, 30 ali 60 minut. Slika 1 kaže dosežene trdote in žilavosti. Če želimo trdoto nad 51 HRC, se nam splača izotermno kaliti (po avstenitizaciji na 850 °C) pri temperaturah med 200 °C in 260 °C. Žilavost (DVM zarez) jekla Č 4830-VCV 150 bo po takem kaljenju med 26 in 33 J, če jeklo zadržujemo 15 minut v kopeli. Če kalimo dlje časa (60 minut), so možne žilavosti komaj 21 J.

Z enako trdoto (nad 51 HRC) je žilavost poboljšanih preizkušancev manj kot 16 J.

Drugo jeklo (Č 2332-65 Si 6) smo enako avstenitizirali, prenesli v kopel za kaljenje in zadrževali v njej 8, 12 ali 16 minut pri stalni temperaturi, ki je avtomatsko nadzorovana s termoelementom. Kopel smo stalno mešali.

Slika 2 kaže, da dosežemo pri trdoti nad 51 HRC žilavost (DVM) od 10 do 26 J. Očitno so časi pod 16 minut prekratki za doseganje dobre žilavosti. Ugodna temperatura je strožje omejena kot pri jeklu Č 4830-VCV 150. Primerna je le temperatura 280 °C (od teh preizkusnih), nikakor pa ne pod 250 °C, saj s kaljenjem pri teh nižjih tem-



Slika 2

Žilavost in trdota jekla Č.2332-65 Si 7 po izotermnem kaljenju v kopeli s temperaturo blizu M_s točke.

Fig. 2

Toughness and hardness of Č.2332-65 Si 7 steel after austempering in the bath with the temperature close to the M_s point

peraturah doseže jeklo manj kot 5 J, čeprav ni trše od 56 HRC.

Žilavost jekla Č 4830-VCV 150 se s pravilno izbiro pogojev izotermnega kaljenja za doseganje prave trdote dvigne za najmanj 60 % glede na žilavost poboljšane jekla. Ker jeklo Č 2332-65 Si 7 dosega podobne žilavosti — z ožje omejeno temperaturo izotermnega držanja — je verjetno tudi dvig žilavosti lahko podoben (z daljšimi časi držanja v kopeli).

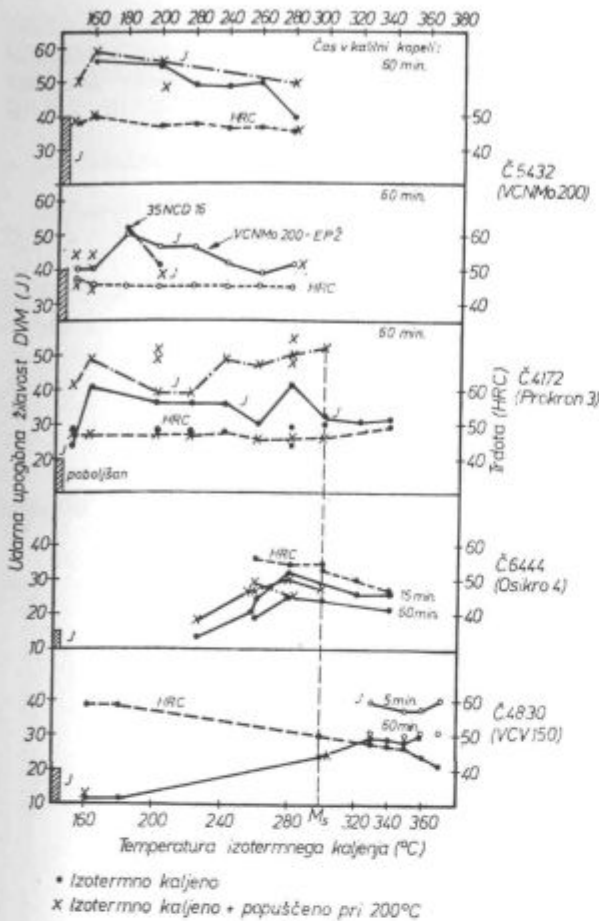
Jeklo Č 4830-VCV 150 pa uporabljamo tudi za izdelavo krmilnih delov pnevmatskih kladiv. Ti deli naj bodo trši od 43,5 HRC ali trši od 47 HRC. Če jih poboljšamo na ustrezno trdoto, pokažejo žilavost 20 J ali manj. Če pa te izdelke izotermno kalimo, imamo veliko manj neenakomernosti trdote, žilavost je celo 35 J (po 15 do 30-minutnem zadrževanju pri temperaturi 310 °C), kar je skoraj 100 % zvišanje proti poboljšanemu jeklu z enako trdoto.

Tudi orodja iz jekel za hladno delo moremo znatno izboljšati, če jih izotermno kalimo. Navajajo 100 % zvečanje žilavosti jekel, podobnih našemu Č 6444-Osikro 4, to je, jeklu orodij, obremenjenih z udarci (1).

Ugotovili smo, da 15-minutno izotermno kaljenje pri 250—300 °C dvigne žilavost na 25—32 J in trdoto nad 55 HRC, medtem ko z navadnim kaljenjem in sledečim popuščanjem dobimo žilavost preizkušancev 15 J. Torej z izotermno obdelavo izboljšamo žilavost za okoli 100 % (sl. 3).

Izotermno kaljenje jekel Č 4150-OCR 12 in Č 4650-OCR 12 special je dalo manj spodbudne rezultate. Žilavost se je znatno dvignila šele, če smo kalili v kopeli pri 300 °C (sl. 4, 5).

Ob trdoti 61 HRC sta bili žilavosti (preizkušancev z radialno zarezo $r = 10$ mm globine 1 mm) 15 J, oz. 12 J, kar je le malo nad 12 J, oz. 8 J, kolikor znaša žilavost navadno kaljenih preizkušancev, popuščenih na 200 °C. Kvečjemu jeklo Č 4650-OCR 12 special bi se splačalo, zavoljo 40 % dviga žilavosti, kaliti izotermno. Seveda pa se lahko splača izotermno kaljenje orodij tudi tedaj, ko



Slika 3

Žilavost in trdota jekel po kaljenju v vroči kopeli in po dvakratnem popuščanju na 200 °C.

Fig. 3

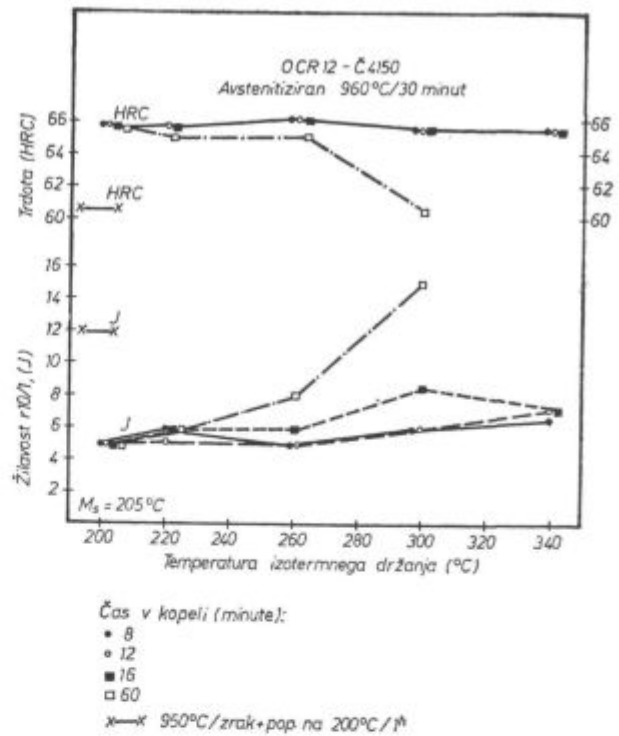
Toughness and hardness of steel after austempering and double tempering at 200 °C

želimo več varnosti pri kaljenju ali doseganje bolj enakomernih trdot, kot je možno pri navadnem kaljenju v olju.

V lesni industriji rabijo med drugim tudi strojne dele iz jekla Č 4172-Prokron 3. Nekaj vzorcev tega jekla smo izotermno kalili z avstenitizacijske temperature 1030 °C.

Žilavostni preizkusi kažejo, da moramo zadrževati preizkušance iz tega jekla več kot pol ure pri izbrani temperaturi izotermnega kaljenja, da bodo čim bolj žilavi. Le pri temperaturah 220 in 340 °C je dosežena največja žilavost preizkušancev po 30-minutnem zadržanju pri kalilni temperaturi. Pri drugih temperaturah se žilavost z daljšanjem časa zadržanja preizkušancev v kopeli povečuje. Enourno držanje preizkušancev v kopeli s temperaturo 160 ali 280 °C dvigne žilavost na 40, oz. 45 J (sl. 3).

Posebno se zboljša žilavost z dodatnim popuščanjem, npr. na 200 °C. Le preizkušancem, ki so bili izotermno kaljeni pri 200–220 °C, se s popuščanjem ni bistveno zboljšala žilavost (od 36 na 38 J), drugim pa se je dvignila na 49–50 J (preiz-

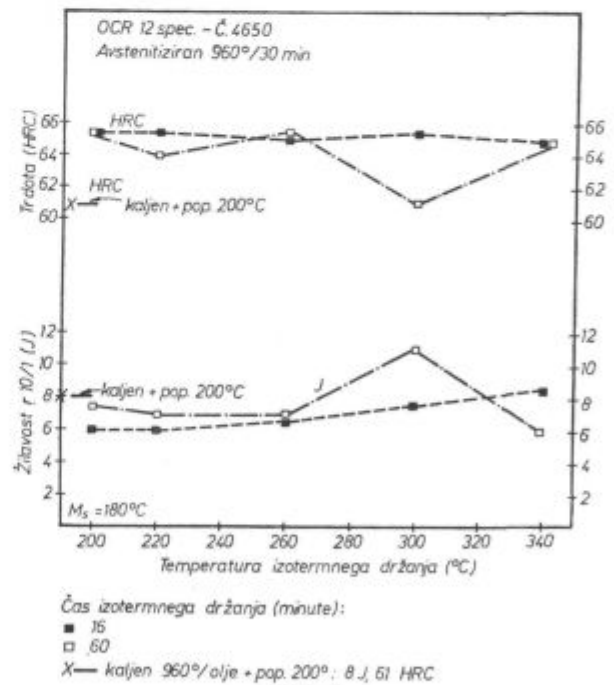


Slika 4

Žilavost in trdota jekla Č.4150-OCR 12 po kaljenju v vroči kopeli in po kaljenju v olju in popuščanju.

Fig. 4

Toughness and hardness of Č.4150-OCR 12 steel after austempering, and quenching in oil and consequent tempering



Slika 5

Žilavost in trdota jekla Č.4146-OCR 4 ex. sp. po kaljenju v vroči kopeli in po kaljenju v olju ter sledečem popuščanju.

Fig. 5

Toughness and hardness of Č. 4650-OCR 4 ex special steel after austempering, and quenching in oil and consequent tempering

kušanci z zarezo DVM), čeprav je znašala trdota nad 46 HRC. Tako ugodne kombinacije trdote in žilavosti ne moremo doseči z nobeno drugo toplotno obdelavo. Preizkušanci iz tega jekla so po izotermnem kaljenju pri 240 °C (eno uro) pokazali žilavost 35 J in trdoto 48 HRC, enako kaljeni preizkušanci, ki so bili dodatno popuščeni pri 200 °C, pa so bili žilavi za 48 J in trdi za 48 enot HRC.

Drugače pa je s preizkušanci, ki so zadržani v kopeli s temperaturo 240 °C kar 11 ur (namesto ene ure, kot prej opisani). Ti preizkušanci so sicer enako žilavi kot tisti, ki so zadrževani samo eno uro pri 240 °C, vendar so mehkejši. Ti preizkušanci imajo 44 HRC.

S poboljšanjem (1030 °C/olje + popuščanje pri 300 °C) dosežejo preizkušanci iz tega jekla 18—27 J (DVM) ter trdoto 45 HRC.

Naslednja tabela na kratko prikazuje rezultate poskusov z jeklom Č 4172-Prokron 3.

Tabela 2: Vpliv kalilnih pogojev in popuščanja na lastnosti jekla Č 4172-Prokron 3

Avstenitizacija (°C)	Kaljenje			Popušča-nje (°C)	Žilavost DVM (J)	Trdota (HRC)
	Snov	Ohlajanje Temp. (°C)	Čas (h)			
1020	olje	20	—	300	18—27	45
1030	t. k.	180	11	—	50	47
1030	t. k.	240	11	—	35	44
1030	t. k.	240	1	—	35	48
1030	t. k.	240	1	200	48	48

t. k. — staljena sol AS 135.

Pri tem jeklu vidimo nenavadno močan učinek popuščanja po izotermnem kaljenju: dvig žilavosti za več kot 30 %, ne da bi padla trdota (sl. 3).

Podoben učinek ima tudi skrajšanje časa zadrževanja pri temperaturi izotermne pretvorbe 240 °C: ko smo skrajšali čas od 11 ur na 1 uro, smo dvignili trdoto žilavostnih preizkušancev od 44 na 48 HRC.

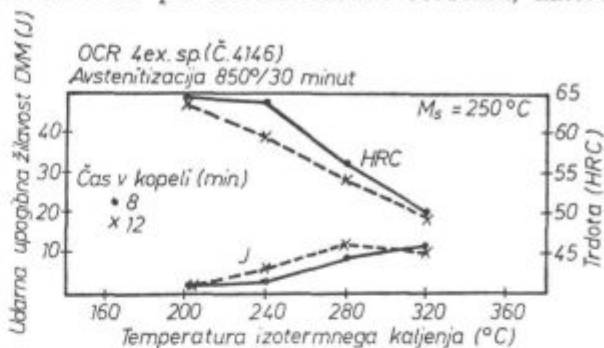
Kot kaže, je najprimernejša temperatura izotermnega držanja nekje med 200 in 250 °C, kot govorijo viri (2), ali 240 ° s popuščanjem.

Tudi valjčne ležaje (jeklo Č 4146-OCR 4 ex. sp.) velikih serij že dve desetletji izotermno kalijo (3). Kot najprimernejšo temperaturo so odkrili 240 °C (nad M_s točko), da so dosegali ležaji trdoto nad 58 HRC in da se ne pojavi avstenit. Pri tej temperaturi so zadrževali jeklo 4 ure.

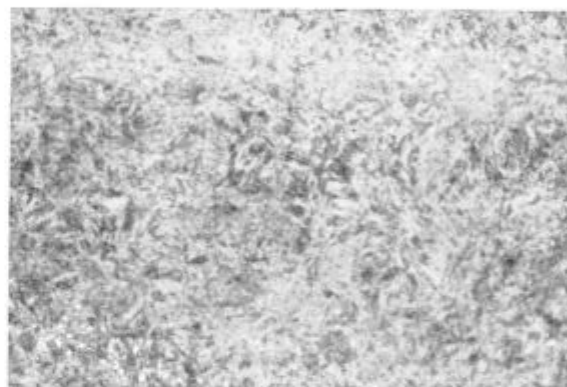
To jeklo ni ustrezno za izotermno kaljenje obročkov, debeline nad 15 mm; za takšne je primerno jeklo 100 CrMo 7. Z manganom legirano ležajno jeklo pa je sploh prepočasno v izotermni spremeni.

Z izotermnim kaljenjem ne dosežejo obročki večje trdnosti ali trajne vrtilno upogibne trdnosti, kot jo dobijo z navadno toplotno obdelavo (kaljenjem v olju in popuščanjem), toda so veliko bolj žilavi in imajo višjo mejo plastičnosti. Med ugod-

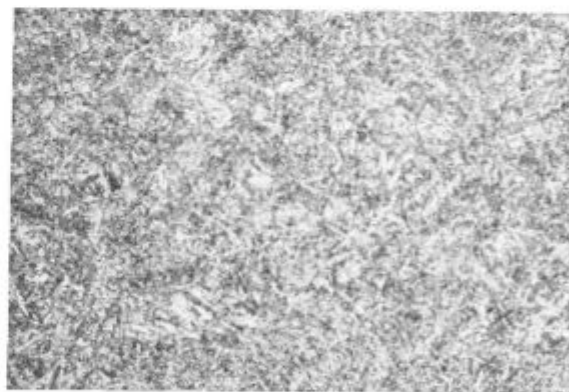
nostmi izotermnega kaljenja naj bi še bile: zelo majhne kalilne deformacije in tlačne lastne napetosti na površini (do 500 N/mm²). Takšne lastnosti so zaželene pri debelostenskih obročkih, katere



Slika 6
Žilavost in trdota jekla Č.4146-OCR 4 ex. sp. po kaljenju v vroči kopeli.
Fig. 6
Toughness and hardness of Č.4146-OCR 4 ex. sp. steel after austempering



Slika 7a



Slika 7b

Slika 7
Mikrostruktura jekla Č.4830-VCV 150
a) po kaljenju z 860 °C v olju in popuščanju na 250 °C,
b) po kaljenju z 860 °C v solni kopeli pri 300 °C, čas držanja v kopeli 30 minut. (500 x).

Fig. 7
Microstructure of Č.4830-VCV 150 steel
a. after quenching from 860 °C in oil and tempering at 250 °C
b. after austempering from 860 °C in salt bath at 300 °C, holding time in bath 30 minutes. 500 x.

vgrajujemo s tesnim prileganjem, in pri ležajih, obremenjenih z udarci. Slika 6 kaže trdoto in žilavost jekla Č 4146-OCR 4 ex. sp. po izotermnem kaljenju pri temperaturah od 200 do 320 °C.

Metalografski pregled

Na slikah 7—12 so prikazane mikrostrukture žilavostnih preizkušancev.

Sliki 7a in 7b kažeta precej različni strukturi jekla Č 4830-VCV 150. Na sliki 7a je poboljšana struktura, nizko popuščni martenzitet. Na sliki 7b je prikazana izotermno (ob M_s točki: 300 °C/30 minut) kaljena struktura: ferit, bainit, nizko popuščni martenzitet; ta struktura je drobnozrnata. Ferit se je izločil, ker je bila hitrost ohlajanja premajhna za ohranitev čistega avstenita do 300 °C.

Trdota poboljšane strukture je 53 HRC, žilavost (DVM zarez) je 17 J, trdota izotermno kaljenega preizkušanca je 50,5 HRC, žilavost 24 J.



Slika 8

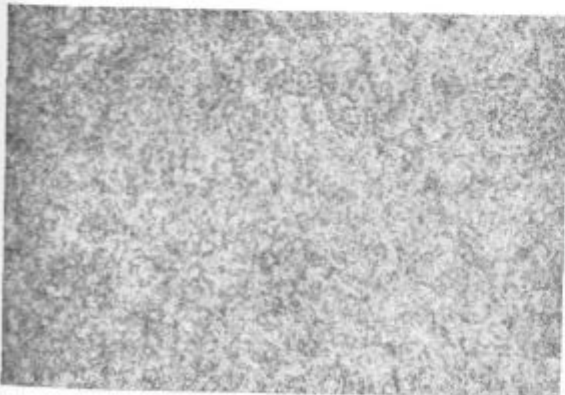
Mikrostruktura jekla Č.2332-65 Si 7 po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 320 °C/16 minut. (500 x).

Fig. 8

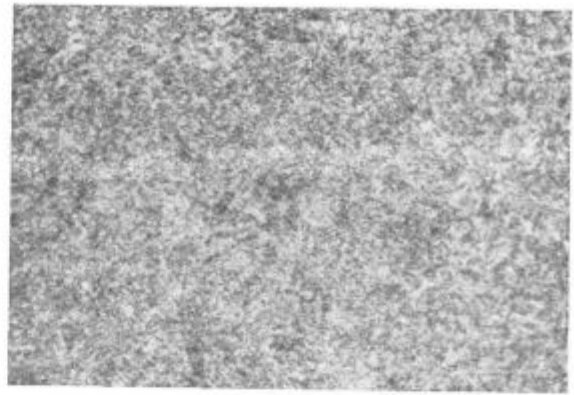
Microstructure of Č.2332-65 Si 7 steel after austempering from 850 °C in the bath at 320 °C/16 minutes. 500 x.

Slika 8: Z izotermnim kaljenjem jekla Č 2332-65 Si 7 pri 320 °C/16 minut (kar je 70 °C nad M_s točko) se je pretvorilo 80 % avstenita v bainit.

Trdota tako obdelanega jekla je 45,5 HRC, žilavost (DVM zarez) 34 J.



Slika 9a



Slika 9b

Slika 9

Mikrostruktura jekla Č.6444-Osikro 4

- a) po kaljenju z 900 °C v olju in popuščenju na 400 °C,
b) po kaljenju z 880 °C v kopeli pri 320 °C/15 minut. (500 x).

Fig. 9

Microstructure of Č.6444-Osikro 4 steel

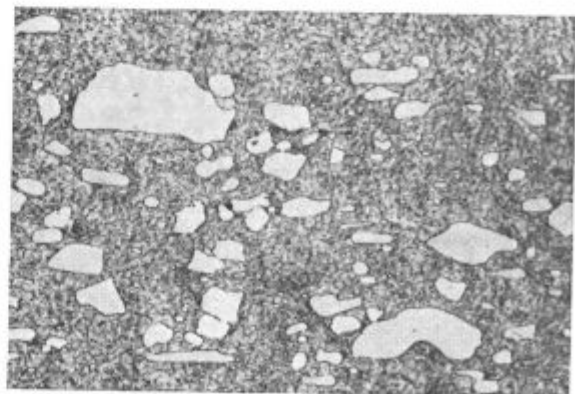
- a. after quenching from 900 °C in oil and tempering at 400 °C
b. after austempering from 880 °C in the bath at 320 °C/15 minutes. 500 x

Sliki 9a in 9b kažeta videz struktur poboljšane ali izotermnega kaljenega jekla Č 6444-Osikro 4. Po poboljšanju je struktura popuščeni martenzitet, po izotermnem kaljenju pa 80 %-martenzitet in 20 %-bainit. Izotermno smo zadrževali preizkušane pri 320 °C/15 minut (t. j. za 20 °C nad M_s točko).

Trdota poboljšane preizkušance je bila 52,5 HRC, žilavost (DVM) 17 J, trdota izotermno kaljenega pa 50,5 HRC in žilavost 28 J.

Sliki 10a in 10b: Struktura jekla Č 4650-OCR 12 special, kaljenega v olju in popuščenega, je precej drugačna kot struktura enakega jekla, kaljenega izotermno 300 °C/60 minut.

V prvem primeru je struktura iz popuščenega martenzita, karbidov in zaostalega avstenita, v drugem bainitno martenzitetna s karbidi. Izotermno kaljeno ima 62 HRC in 10 J (r10/1), medtem ko je navadno toplotno obdelano le malo slabše 61 HRC, 8 J.



Slika 10a



Slika 10b

Slika 10

Mikrostruktura jekla Č.4650-OCR 12 special
 a) po kaljenju z 960 °C v olju in popuščanju na 200 °C,
 b) po kaljenju z 960 °C v kopeli s temperaturo 300 °C/60
 minut. (500 x).

Fig. 10

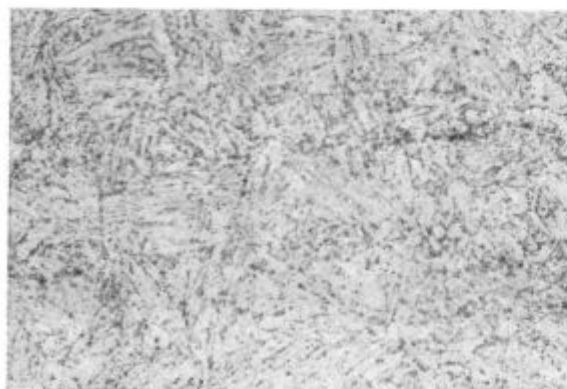
Microstructure of Č.4650-OCR 12 special steel
 a. after quenching from 960 °C in oil and tempering at
 200 °C
 b. after austempering from 960 °C in bath with tempera-
 ture 300 °C/60 minutes. 500 x

Sliki 11a in 11b kažeta strukturi poboljšane-
 ga ter izotermno kaljenega jekla Č 4140-Prokron 3.
 Poboljšana struktura (sl. 11a) je visokopopuščni
 martenzit s karbidi v feritu. Karbidi so izločeni iz
 martenzitnih igel.

Poboljšani preizkušanelec je pokazal trdoto pod
 20 HRC in žilavost 60 J, izotermno kaljen pa 45
 HRC in 46 J.

Sliki 12a in 12b kažeta precejšnjo razliko struk-
 tur izotermno kaljenega in izotermno kaljenega +
 + popuščenega jekla Č 5432-VCNMo 200. Struktu-
 ra, popuščena na 200 °C, je videti kot višjepopušč-
 na struktura po kaljenju v olju.

Trdota in žilavost obeh preizkušancev sta sko-
 raj enaki (45—47 HRC, 48 J). To je razumljivo, ker
 je izotermno kaljenje potekalo (pri 200 °C/60 mi-
 nut) precej pod M_s točko (400 °C).



Slika 11a



Slika 11b

Slika 11

Mikrostruktura jekla Č.4172-Prokron 3
 a) po kaljenju z 1020 °C v olju in popuščanju na 740 °C.
 b) po kaljenju z 1020 °C v kopeli s temperaturo 280 °C, čas
 60 min. (500 x).

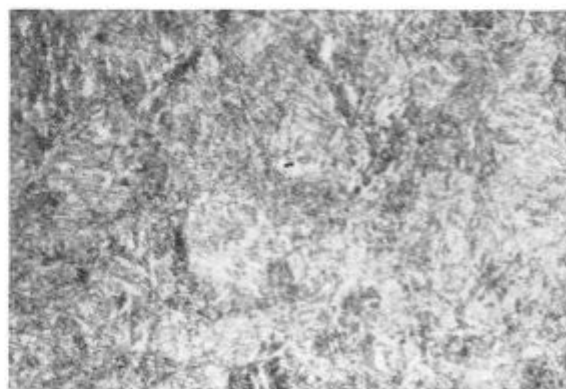
Fig. 11

Microstructure of Č.4172-Prokron 3 steel
 a. after quenching from 1020 °C in oil and tempering at
 740 °C
 b. after austempering from 1020 °C in the bath with tem-
 perature 280 °C, time 60 minutes. 500 x

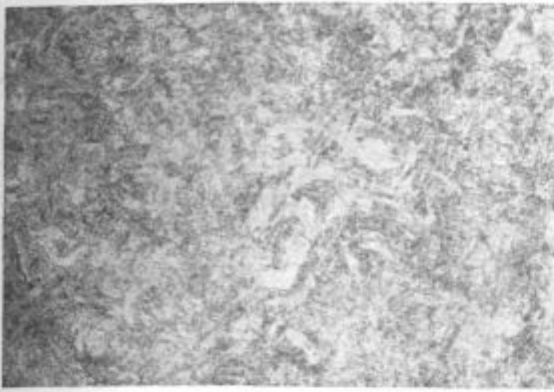
Pretnes rezultatov

1. Izotermno kaljeno jeklo Č 4830-VCV 150 je
 ob trdoti nad 51 HRC pokazalo žilavost 26—33 J
 (DVM), kar je zelo ugodno proti 16 J (preizkušanci
 istega tipa zarez), kolikor doseže to jeklo s po-
 boljšanjem na enako trdoto (to je s kaljenjem
 z 850 °C v olju in popuščanjem na temperaturi pod
 300 °C). Z izotermnim kaljenjem izboljšamo žila-
 vost za več kot 60 %, s kaljenjem (15 do 30 minut)
 v kopeli pri 260 °C znaša zvišanje glede na pobolj-
 šano stanje kar 100 %.

Če želimo, da bi imelo jeklo Č 4830-VCV 150 tr-
 doto 43,5 HRC, kakršno naj imajo krmilni deli
 pnevmatskih kladiv, pomeni izotermno kaljenje
 velik prirastek žilavosti glede na poboljšane izdel-
 ke. Po 30-minutnem zadrževanju avstentiziranega
 izdelka v kopeli s temperaturo 290 do 310 °C dose-
 že izdelek žilavost 30—35 J, kar je 50—60 % zbolj-



Slika 12a



Slika 12b

Slika 12

Mikrostruktura jekla Č.5432-VCNMo 200

- a) po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 200 °C/60 minut,
 b) po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 260 °C/60 minut in
 sledečem popuščanju na 200 °C. (500 x).

Fig. 12

Microstructure of Č.5432-VCNMo 200 steel

- a. after martempering from 850 °C in the bath at 200 °C/60
 minutes
 b. after austempering from 850 °C in the bath at 260 °C/60
 minutes and consequent tempering at 200 °C. 500 x

šanje proti poboljššanemu strojnemu delu, ki ima pri trdoti 44 HRC žilavost 22 J.

Iz tega vidimo:

a) Zmanjševanje prednosti izotermnega kaljenja pred poboljšanjem, če želimo manj trde izdelke. S trdoto pod 37 HRC se žilavost poboljšane in izotermno kaljenega jekla Č 4830-VCV 150 izenačita.

b) Najugodnejša temperatura izotermnega kaljenja (zadrževanja preizkušancev v solni kopeli) je tesno ob M_s točki, ki je pri tem jeklu 300 °C.

2. Jeklo Č 2332-65 Si 7 je po 16-minutnem kaljenju v kopeli pri 280 °C doseglo žilavost 26 J, kar je primerljivo z žilavostjo enako ohlajenega jekla Č 4830-VCV 150, katerega povprečna žilavost je 28 J, spodnja vrednost pa 26 J. Tudi trdoti obeh jekel sta podobni (51 HRC). Če ohlajamo avstenitizirana preizkušanca obeh jekel v kopeli pri 320 °C, bosta tudi enako žilavi in bo preizkušanec jekla Č 4830-VCV 150 imel 43 HRC, iz Č 2332-65 Si 7 pa 45 HRC.

Velika razlika med jekloma se pokaže po ohlajanju v kopeli z nižjo temperaturo. Pri 240 °C bo žilavost Č 2332-65 Si 7 komaj 5 J, medtem ko bo imelo Č 4830-VCV 150 kar 22—30 J. Za obe jekli torej velja skoraj enako območje ohlajevalnih temperatur in časov, s tem da je to območje pri Č 2332-65 Si 7 strogo omejeno k nižjim temperaturam (zaradi strmega padca žilavosti) in odprto k višjim (ker je trdota tega jekla po enaki toplotni obdelavi za 2 enoti HRC večja kot pri jeklu Č 4730-VCV 150).

3. Jeklo Č 6444-Osikro 4 pridobi najugodnejšo žilavost po kaljenju v istem temperaturnem ob-

močju 280—320 °C in 15 minut, s tem da je trdota za tri enote HRC višja kot pri Č 4830-VCV 150 in Č 2332-65 Si 7. Pravi čas zadrževanja v hladilni kopeli je pri tem jeklu tesneje določen, pri 300 do 320 °C je 12 minut; pri 280, 340, 400 °C pa je ugotovljen kot najboljši čas 15 minut.

4. Visokolegirani ledeburitni orodni jekli Č 4150-OCR 12 in Č 4650-OCR 12 special se ne odzivata enako močno na izotermno kaljenje. Z enournim kaljenjem pri 300 °C dobita 30—40 % boljšo žilavost kot z navadno toplotno obdelavo. Trdota po izotermnem kaljenju je 61 HRC.

5. Jeklo Č 4172-Prokron 3 je najboljše kaliti v solni kopeli s temperaturo nad 240 °C, če po kaljenju popuščamo (pri 200 °C). Torej je območje izotermnega kaljenja lahko enako kot za jekla Č 4830-VCV 150, Č 6444-Osikro 4, Č 2332-65 Si 7. Pomembno pa je pri tem jeklu popuščanje, saj dvigne žilavost za 150 % proti poboljššanemu jeklu z enako trdoto (45—46 HRC). Ugodna pri tem jeklu je širina primernih temperatur izotermnega držanja, saj moremo kaliti v območju 240—300 °C (in verjetno še višje), če potem popuščamo na 200 °C.

Hiba izotermnega kaljenja tega jekla je nujnost daljšega ohranjanja na temperaturi (vsaj eno uro).

Izračun vsebnosti zadržanega avstenita na osnovi rentgenskih preiskav je pokazal le majhne razlike med vsebnostmi gama faze v sredini preizkušancev, kaljenih pri temperaturi 200, 240 ali 260 °C. Vsebnost avstenitne faze je 5—6 %.

Tik pod površino (t.j. 0,5 mm) pa je videti vpliv temperature: preizkušanci, ki so bili 6 ur izotermno kaljeni pri 200 °C, so vsebovali v strukturi 3 % avstenita; kaljeni pri 260 °C eno uro pa so vsebovali 5 % avstenita. To moremo razložiti s stabilizacijo avstenita pri ohlajanju na 260 °C.

6. Jeklo Č 4146-OCR 4 ex. sp. moremo izotermno kaliti takrat, kadar želimo doseči pri ležajnih obročkih posebno dobro obstojnost mer ali površinske tlačne napetosti. Žilavost se temu jeklu poveča le, če ga zadržujemo v hladilni kopeli več kot 12 minut. Temperatura izotermnega zadrževanja je v istem območju kot za ostala preiskovana jekla.

7. Kot kaže sl. 3, moremo z izotermnim kaljenjem dvigniti žilavost celo jeklom z visoko M_s točko (npr. Č 5432-VCNMo 200), tako, da jih pri kaljenju ohlajamo v kopeli z razmeroma nizko temperaturo precej pod M_s točko.

SKLEPI

1. Največji efekt ima izotermno kaljenje na jeklo Č 4172-Prokron 3, saj mu dvigne žilavost nasproti poboljššanemu stanju za 150 %. Pri tem jeklu je zelo važno popuščanje.

2. Jekla Č 4830-VCV 150, Č 2332-65 Si 7, Č 6444-Osikro 4 pridobijo 50—100 % žilavosti, je jih izotermno kalimo pri 280—310 °C, namesto poboljša-

mo. Ugoden čas zadrževanja na temperaturi izotermne pretvorbe avstenita je za prvi dve jekli 15 minut, za Č 6444-Osikro 4 pa 12 minut.

3. Jeklo Č 5432-VCNMo 200 ni preveč dovzetno za ugodnosti izotermnega kaljenja, vendar pa jih uporabimo, če je zelo pomembno, da doseže jeklo največjo možno žilavost. Dobro žilavost in trdnost ima to jeklo, če ga po avstenitizaciji ohlajamo v kopeli s temperaturo 180 °C eno uro ali več.

4. Ležaje in visokoogljčna visoko kromova jekla se spleča izotermno kaliti le za doseganje posebnih lastnosti (obstojnost mer, tlačne napetosti na površini, zelo enakomerne trdote in žilavosti pri vseh izdelkih).

5. Pri orodnem jeklu Č 6444-Osikro 4 že 20 % bainita v strukturi znatno zboljša žilavost (od 17 na 24 J) ob le majhnem padcu trdote (od 52,5 na 50,5 HRC).

Pri konstrukcijskem jeklu je viden vpliv popuščanja na videz izotermno tvorjenega martenzita, ne pa na njegove mehanske lastnosti.

Literatura

1. Birjukova V. N.: Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov, 1965, No. 9, str. 53—57.
2. Koutsky J., L. Baračkova: Archiv für das Eisenhüttenwesen 48 (1977), No. 8, str. 427—429.
3. Hengerer F.: DRAHT-Fachzeitschrift, 1976, No. 3, str. 108—109.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch das isothermische Härten im Bereich der bainitischen oder martensitischen Umwandlung kann die Zähigkeit der Konstruktionsstähle Č 4830-VCN 150 und Č 4172-Prokron 3, dem zähen Werkzeugstahl Č 6444-Osikro 4 und dem Federstahl Č 2332—65 Si 7 verbessert werden. Die günstigste Temperatur liegt um den M_s Punkt.

Wälzlagerstahl erreicht durch das Warmbadhärten nicht die nötige Härte. Hochchrom und hochkohlenstoffhaltige Werkzeugstähle für die Kaltarbeit sind nach dem

isothermischen Härten in Bainit nur um einen kleinen Anteil zäher als nach dem gewöhnlichen Härten im Öl und Anlassen.

Dem hochfesten Konstruktionsstahl kann die Zähigkeit durch das isothermische Härten bei der Temperatur um 200 °C um etwa 50 % verbessert werden. Die Härte ist nach der so erzielten höheren Zähigkeit gleich gross wie nach der amgünstigsten gewöhnlichen Wärmebehandlung (Härten im Öl und Anlassen).

SUMMARY

Isothermal quenching in the range of bainitic or martensitic transformation improves the toughness of structural Č.4830-VCV 150 and Č.4172-Prokron 3 steel, the toughness of the Č.6444-Osikro 4 shock-resistant tool steel, and the toughness of the Č.2332-65 Si 7 spring steel. The convenient temperature of the coolant is around the M_s temperature. The ball-bearing steel does not attain the necessary hardness when austempered.

High-chromium high-carbon tool steel for cold working obtains only slightly higher toughness by austempering instead of hardening and tempering.

The toughness of high-strength structural steel can be improved for about 50 % by martempering at 200 °C.

The hardness of these austempered or martempered steels remains equal to that obtained with the most suitable ordinary heat treatment (quenching in oil and tempering).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С изотермической закалкой в области бейнитного и мартенситного преобразования можно улучшить вязкость конструкционных сталей Č.4830-VCV 150 и Č.4172-Prokron 3, вязкость инструментальной стали Č.6444-Osikro и пружинной стали марки Č.2332-65 Si 7. Благоприятные температуры для закалки находятся около M_s точки.

Сталь для изготовления подшипников с мартенситной закалкой не достигает необходимую твердость. Высокоуглеродистые инструментальные хромистые стали для применения в холодном

состоянии показали после изотермической закалки в бейнит значительное повышение вязкости при сравнении с обыкновенной закалкой и отпуском. При конструкционной стали высокой твердости можно улучшить вязкость приблизительно на 50 % при применении изотермической закалки при температуре около 200 °C. При всех способах увеличения вязкости твердость стали не отстает от наиболее благоприятной обыкновенной термической обработки (закалка в масле и отпуск).

O rastvorljivosti ugljika u troskama

UDK: 669.189 : 669.587.6

ASM/SLA: D 5 a, D 11 n

Dragica Šević
Dušan Čurčija

UVOD

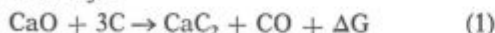
U redukcijском periodu topljenja čelika pri dezoksidaciji troske ugljikom, dolazi do vraćanja (1) u početno stanje oksida Fe, Si, Ca i drugih. Poznato je da redukcijска sposobnost C raste sa porastom temperature. Pri visokom bazicitetu troske kada je sadržaj SiO₂ malen, zbog malog značenja aktiviteta SiO₂ (na T = 1873 K i 42 % SiO₂, a_{SiO₂} < 0,1 u sistemu CaO-SiO₂) ne teče proces redukcije Si sa C, već teče proces stvaranja karbida Ca, Mg i drugih.

Na ovu mogućnost upozorio je Oelsen sa suradnicima (2, 3, 4) kada je korištenjem grafitne mješalice stvorio nakupine disperzne faze C u troski. Takva pojava promatrana je u radu (5) pa uslove visokopećne troske. Proučavajući rastvaranje N u troskama autori (6) izvode zaključak da postoji neposredna veza između fizičko-kemijskih svojstava troske i stupnja oksidacijsko-redukcijskog potencijala sredine čak i u tome slučaju kada se sastav troske praktično i ne mijenja.

U radu (7) eksperimentalno je proučavan utjecaj sastava troske i temperature na rastvaranje C u oksidacijskim i redukcijским uvjetima. Izveden je zaključak da u redukcijским uvjetima (p_{O₂} < 10⁻¹⁰ atm) rastvorljivost C u troski ne zavisi od p_{O₂} a u oksidacijskim raste proporcionalno sa p_{O₂}. U redukcijским uvjetima rastvorljivost se povećava sa temperaturom a u oksidacijskim, praktično ne ovisi o temperaturi. Nadalje se rastvorljivost C povećava sa porastom baziciteta troske B.

RASTVORLJIVOST C U REDUKCIJSKIM USLOVIMA I TERMODINAMIČKI POTENCIJAL STVARANJA CaC₂

Rastvorljivost C u redukcijским uslovima vezana je sa stvaranjem karbida, prvenstveno karbida Ca po reakciji:



Posebnu teškoću predstavlja određivanje termodinamičkog potencijala reakcije (1). Po radu (8) termodinamički potencijal je:

$$\Delta G = \Delta G_{\text{CaC}_2} + \Delta G_{\text{CO}} - \Delta G_{\text{CaO}} \quad (2)$$

Sumirajući vrijednosti za ΔG po (8) se dobiva:
$$\Delta G = 108\,800 - 51,28 T \quad (3)$$

Eksperimentalni rezultat za reakciju (1) prema 9) iznosi:

$$\Delta G = 93\,000 - 52,0 T \quad (4)$$

U radu (1) navodi se slijedeća vrijednost:

$$\Delta G = 103\,000 - 48,9 T \quad (5)$$

Uvrštavajući T = 1873 K u formule (3), (4) i (5) dobiva se:

$$\Delta G = 12\,753 \text{ cal} = 53\,384 \text{ J}$$

$$\Delta G = -4\,396 \text{ cal} = -18\,402 \text{ J} \quad (6)$$

$$\Delta G = 11\,410 \text{ cal} = 47\,762 \text{ J} \quad (6)$$

Vidljivo je neslaganje između pojedinih autora za T = 1873 K. Za računanje rastvorljivosti C po jednađbi (5) u radu (1) predložen je metod, od kojega iznosimo najbitnije karakteristike. Da bi znali prelaz C u troske različitog sastava neophodno je znati konstantu ravnoteže reakcije (1).

Pri tome se polazi od pretpostavke da su aktivne koncentracije a_{CaO} i a_{CaC₂} u troski proporcionalne molarnim udjelima n_{CaO} i n_{CaC₂}, pa je tada:

$$K_p = \frac{a_{\text{CaO}}}{a_{\text{CaC}_2}} \cdot \frac{a_{\text{C}}^3}{p_{\text{CO}}} = \frac{n_{\text{CaO}}}{n_{\text{CaC}_2}} \quad (7)$$

Pri tome je uzeto da je a_C = 1 i p_{CO} = latm. Proračun n_{CaO} izvodi se na bazi dijagrama aktiviteta u sistemu CaO—Al₂O₃ po (10):

$$n_{\text{CaO}} = n_{\text{CaO}}^* a_{\text{CaO}}$$

Na temperaturi T = 1873 K zasićenje CaO iznosi 61 % pa je:

$$n_{\text{CaO}}^* = 61/56 = 1,089$$

odatle je:

$$n_{\text{CaO}} = 1,089 a_{\text{CaO}} \quad (8)$$

$$n_{\text{CaC}_2} = n_{\text{CaO}} / (K_p + 1)$$

$$\log K_p = \Delta G / 4,575 T$$

$$[\%C] = 24 n_{\text{CaC}_2} = 24 n_{\text{CaO}} / (K_p + 1) \quad (9)$$

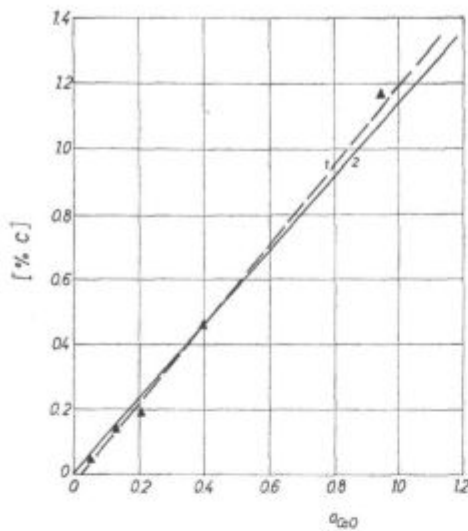
Po jednađbama (5), (8) i (9) izračunata je rastvorljivost C na T = 1873 K za troske različitog sastava prema tablici 1. i data je usporedba u odnosu na eksperiment na slici 1. Pri tome su dobivene dvije jednađbe pravca:

$$[\%C]_{\text{reg}} = 1,275 a_{\text{CaO}} - 0,04 \quad (10)$$

$$[\%C]_{\text{teor}} = 1,164 a_{\text{CaO}} \quad (11)$$

Jednađba (10) dobivena je regresionom analizom na osnovu tablice 1. uz koeficijent korelacije r = 0,995 a jednađba (11) po iznešenom metodu autora (1).

Dragica Šević, dipl. inž. i Dušan Čurčija, absolvent — Metalurški fakultet Sisak



Slika 1

Rastvorljivost ugljika u ovisnosti o aktivitetu CaO na T = 1873 K po tablici 1

1. $[\%C]_{reg} = 1,275 a_{CaO} - 0,04$
2. $[\%C] = 1,164 a_{CaO}$
3. Δ = eksperimentalni rezultati po (7)

Fig. 1

Carbon solubility as the function of CaO activity at 1873 K, according to Table 1

1. $[\%C]_{reg} = 1,275 a_{CaO} - 0,04$
2. $[\%C] = 1,164 a_{CaO}$
3. Δ = experimental results by (7)

Tablica 1.: Utjecaj sastava troske na rastvorljivost ugljika (7) na T = 1873 K i p_{CO} = 1 atm

Broj troske	Sastav troske			C tež. %	a _{CaO}
	% CaO	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃		
1	33,32	28,00	38,68	0,045	0,050
12	39,65	0,12	60,23	0,140	0,125
4	44,70	4,86	50,44	0,180	0,210
6	49,46	0,24	50,30	0,450	0,400
9	59,08	0,10	40,82	1,170	0,942

Jednađba pravca koja bi uskladila teoriju i eksperiment išla bi između ovih pravaca kroz točku njihovog presjecišta. Iz uvjeta $[\%C]_{reg} = [\%C]_{teor}$ slijedi točka presjecišta T (0,36 : 0,419). Koeficijent smijera korigiranog pravca bio bi:

$$k_{kor} = \text{tg} \left[\text{Arctg}(k_{teor}) + \text{Arctg} \left(\frac{k_{reg} - k_{teor}}{2(1 + k_{reg} k_{teor})} \right) \right] \quad (12)$$

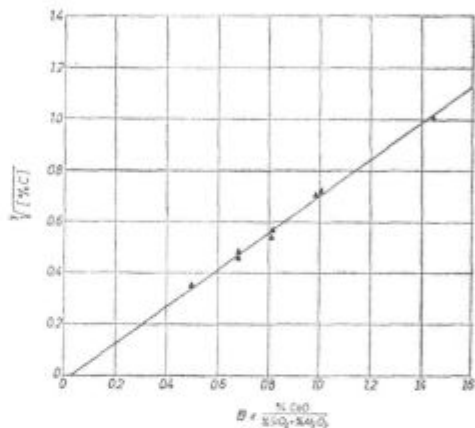
Jednađba korigiranog pravca glasi:

$$[\%C]_{kor} = 1,218 a_{CaO} - 0,02 \quad (13)$$

U radu (7) je na osnovu eksperimenta izveden zaključak da rastvorljivost C ovisi o bazicitetu troske. U tablici 2. navode se baziciteti troski u ovisnosti o rastvorenom C na T = 1873 K. Na slici 2. prikazana je linearna ovisnost između $\sqrt{[\%C]}$ i baziciteta troske B.

Tablica 2.: Utjecaj baziciteta troske na rastvorljivost ugljika (7) na T = 1873 K i p_{CO} = 1 atm

Broj troske	$B = \frac{\% CaO}{\% SiO_2 + \% Al_2O_3}$	C u tež. %
1	0,500	0,045
2	0,684	0,100
3	0,811	0,160
4	0,808	0,180
5	0,985	0,350
7	0,998	0,370
9	1,444	1,170
11	0,684	0,110



Slika 2

Rastvorljivost ugljika u ovisnosti o bazicitetu troske po tablici 2

1. $\sqrt{[\%C]_{reg}} = 0,755 B - 0,04$
2. Δ = eksperimentalni rezultati po (7)

Fig. 2

Carbon solubility as the function of slag basicity according to Table 2

1. $\sqrt{[\%C]_{reg}} = 0,755 B - 0,04$
2. Δ = experimental results by (7)

Jednađba dobivena regresionom analizom glasi:

$$\sqrt{[\%C]_{reg}} = 0,755 B - 0,04 \quad (14)$$

uz koeficijent korelacije r = 0,999. Iz (14) rastvoreni C može se izraziti eksplicitno:

$$[\%C]_{reg} = 1,275 a_{CaO} - 0,04$$

$$[\%C]_{reg} = (0,755 B - 0,04)^2 \quad (15)$$

Uz jednađbu (15) koja slijedi iz (14) napisana je i jednađba (10) koja daje rastvorljivost C u ovisnosti o aktivitetu CaO u troski.

Sa druge strane je prema teoriji koeficijent smijera pravca jednak:

$$k = \frac{24 n_{CaO}^*}{(K_p + 1)} = \frac{26,136}{\left(10 \frac{\Delta G}{4,575 T} + 1 \right)} \quad (16)$$

Uvrstavajući koeficijent smijera pravca (16) u regresionu jednačbu (10) i izjednačavajući je sa (15) dobiva se:

$$(0,755 B - 0,04)^3 = \frac{26,136 a_{\text{CaO}}}{\left(10 \frac{\Delta G}{4,575 T} + 1\right)} - 0,04 \quad (17)$$

Iz jednačbe (17) moguće je izvući vrijednost za termodinamički potencijal reakcije (1) i temperaturu $T = 1873 \text{ K}$. Cilj ovoga rada je i bio pokušaj da se na osnovu eksperimentalnih rezultata odredi promijena termodinamičkog potencijala.

Prema (17) vrijednost termodinamičkog potencijala može se izraziti eksplicitno i iznosi:

$$\Delta G = 4,575 T \cdot \log \left(\frac{26,136 a_{\text{CaO}}}{(0,755 B - 0,04)^3} - 0,96 \right) \quad (18)$$

Dobivena jednačba (18) koja je regresionom analizom izvedena na bazi eksperimentalnih podataka ukazuje da termodinamički potencijal reakcije (1) ovisi o aktivitetu CaO u sistemu $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, bazicitetu troske i temperaturi. Odatle slijedi da se termodinamički potencijal reakcije (1) može mijenjati u širem intervalu, ovisno o parametrima jednačbe (18) te otuda i nesuglasice u pogledu njegovog određivanja između autora (1), (8) i (9).

ZAKLJUČAK

Na osnovu matematičke obrade eksperimentalnih rezultata (7) mogu se izvesti slijedeći zaključci:

1. Prelaz ugljika u trosku na $T = 1873 \text{ K}$ i $p_{\text{CO}} = 1 \text{ atm}$, zavisi o bazicitetu troske prema relaciji:

$$[\%C] = (0,755 B - 0,04)^3$$

2. Termodinamički potencijal reakcije stvaranja CaC_2 na temperaturi 1873 K i $p_{\text{CO}} = 1 \text{ atm}$ iznosi:

$$\Delta G = 8568,975 \log \left(\frac{26,136 a_{\text{CaO}}}{(0,755 B - 0,04)^3} - 0,96 \right) \cdot 4,186 \text{ [J]}$$

3. Prelaz ugljika u trosku ovisi o aktivitetu CaO u sistemu $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, $T = 1873 \text{ K}$ i $p_{\text{CO}} = 1 \text{ atm}$:

$$[\%C] = 1,275 a_{\text{CaO}} - 0,04$$

Ova jednačba dobro se slaže sa jednačbom dobivenom u radu (1):

$$[\%C] = 1,24 a_{\text{CaO}}$$

Uzimajući u obzir da se u čitavom razmatranju promatrao dvokomponentni sistem $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, i nije se uključivala komponenta SiO_2 dobiveni rezultati moraju se promatrati aproksimativno. Međutim i kao takvi pokazali su se pouzdanim što potvrđuju visoke vrijednosti koeficijenta korelacije. Sadržaj SiO_2 u ispitivanim troskama nije prelazio 28 %.

Literatura

1. M. Čujko, *Izvestija Černaja metallurgija*, 1977, No. 7.
2. W. Oelsen, K. Sauer, H. Keller, *Eisenhüttenwesen*, 1969, 40, No. 11.
3. W. Oelsen, H. Keller, H. Schubert, *Eisenhüttenwesen*, 1969, No. 11.
4. W. Oelsen, *Černie Metallij*, 1969, No. 23.
5. B. I. Žerebin, B. P. Gorbačev, M. S. Kudojarov, *Izvestija Černaja metallurgija*, 1972, No. 6.
6. A. N. Morzov, A. G. Ponomarenko, Ju. E. Kozlov, *Izvestija ANSSSR Metalli*, 1971, No. 6.
7. A. G. Ponomarenko, Ju. E. Kozlov, *Izvestija ANSSSR Metalli*, 1974, No. 5.
8. Čipman, *Proizvodstvo stali v elektropečah*, Moskva, Metallurgija, 1965.
9. Edmunds, I. Taylor, *Iron and Steel Inst.* 1972, april, s. 280.
10. Elliot, Glejzer, Ramakrišina, *Termohimija staleplavilnih procesov*, Moskva, Metallurgija, 1969, s. 194.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund der Literaturangaben ist die Änderung des thermodynamischen Potentials und der Gleichgewichtskonstante der CaC_2 Bildungsreaktion in Schlacken verschiedener Zusammensetzung unter reduzierenden Bedingungen analysiert worden. Auf Grund der mathematischen Bearbeitung der experimentellen Ergebnisse können folgende Beschlüsse gemacht werden:

— der Übergang von Kohlenstoff in die Schlacke ist in linearer Abhängigkeit von der CaO Aktivität im System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$.

— der Übergang von Kohlenstoff in die Schlacke verläuft sehr schnell mit der zuwachsenden Schlackenbasis-

zität, genauer mit der dritten Potenz der Basizität

— der thermodynamische Potenzial der Bildungsreaktion von CaC_2 wird definiert als die Funktion von: der Temperatur, der CaO Aktivität, und der Schlackenbasizität und variiert abhängig von diesen Parametern in einem breiten Intervall.

Die erhaltenen Ergebnisse, dargestellt durch die Regressionsgleichung, gelten als die erste Approximation der realen, da die SiO_2 Aktivität in der Schlacke nicht mitberücksichtigt wird. Kennzeichnend für diese Ergebnisse sind hohe Korrelationskoeffiziente.

SUMMARY

Based on reference data the variation of thermodynamic potential and the equilibrium constant for the reaction of CaC_2 formation in slags with various compositions for reducing conditions was analyzed. The following conclusions according to the mathematical treatment of experimental results were obtained:

— carbon transfer into slag is linearly dependant on the CaO activity in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ system,

— carbon transfer into slag is highly increased by the increased basicity of slag, precisely as the cubic function of the basicity,

— the thermodynamic potential for the reaction of CaC_2 formation is expressed as the function of temperature, CaO activity, and slag basicity, and depending on these parameters it varies in a broader interval.

The obtained results are presented by the regression equations and they must be taken as the first approximations to the real values since SiO_2 activities in slags are not taken into account. Nevertheless, they are reliable since they were obtained with high coefficients of correlation.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных из отраслевой литературы проанализировано изменение термодинамического потенциала и константы равновесия реакции образования CaC_2 в шлаках различного состава для условий восстановления.

На основании математической разработки экспериментальных результатов выведены следующие заключения:

— переход углерода в шлак находится в линейной зависимости от активности CaO в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$;

— переход углерода в шлак очень быстро ускоряется с повышением основности шлака, точнее это представляет кубическую функцию основности;

— термодинамический потенциал реакции образования CaC_2 выражен как функция температуры и активности CaO и основности шлака в зависимости от изменений их параметров в широком интервале.

Полученные результаты, выраженные регрессионными уравнениями надо считать как первые аппроксимативные значения на реальные значения, так как не берут во внимание и активность SiO_2 в шлаке. Несмотря на это эти результаты очень надёжны потому, что получены при высоких корреляционных коэффициентах.

Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Člani dr. Jože Rodič, dipl. inž., Franc Mlakar, dipl. inž., dr. Aleksander Kveder, dipl. inž., Darko Bradaškja, tehnični urednik

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

Naslov uredništva: ZPSŽ — Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, tel. št. 81-341 int. 800 — Tisk: TK »Gorenjski tisk«, Kranj

VSEBINA

UDK: 669.18:621.785.53

ASM/SLA: S11r, E9q

Metalurgija — kisikova sonda — določanje kisikovega potenciala

B. Koroušič

Kisikova sonda — novi koncept pri kontroli in meritvah toplotno-tehničnih procesov — I. del

Železarski zbornik 16 (1982) 2 S 29—35

Pregled literature iz področja merjenja kisikovega potenciala. Princip sonde in njeno delovanje pri povečanih temperaturah. Fizikalno-kemične lastnosti trdnega elektrolita s poudarkom na omejitve pri merjenju s sondo. Teoretična povezava med parametri sonde in kisikovim potencialom. Diagram za direktno odčitavanje parcialnega tlaka kisika iz znanih vrednosti T in E. Nekatere značilnosti kisikovih sond glede na njihovo vgraditv v inustrijske peči. Pregled proizvajalcev kisikovih sond v svetu z naslovi in kratkim opisom značilnosti sond.

Avtorski izvleček

UDK: 669.189:669.587.6

ASM/SLA: D5a, D11n

Metalurgija — topljenje čelika — stvaranje kalcijeva karbida

D. Sevič, D. Čurčija

O rastvorljivosti ugljika u troskama

Železarski zbornik 16 (1982) 2 s 53—56

Na osnovu literaturnih podatkov analizirana je promijena termodinamičnog potencijala i konstanta ravnoteže reakcije stvaranja CaC_2 u troskama različitog sastava za redukcijske uvjete. Regresionom analizom izražena je ovisnost rastvaranja ugljika u funkciji baziciteta troske i aktiviteta CaO u sistemu $CaO-Al_2O_3$. To je omogućilo da se i termodinamički potencijal reakcije stvaranja CaC_2 izrazi kao funkcija baziciteta troske i aktiviteta CaO na $T = 1873 K$. Regresione jednačbe dobivene su uz visoke koeficijente korelacije i u usporedbi sa teorijom dale su podudarna rješenja.

Avtorski izvleček

UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2

ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p

Metalurgija — mehanske lastnosti — žilavost — izotermno kaljenje — EPZ — visokotrdno jeklo

F. Uranc

Vpliv pretaljevanja pod žilindro in kaljenja v solni kopeli na lastnosti visokotrdnega jekla Č 5432-VCNMo 200

Železarski zbornik 16 (1982) 2 s 37—44

Visokotrdnemu konstrukcijskemu jeklu VCNMo 200 - Č 5432 precej zboljšamo žilavost (od 37 na 56 J) z izotermnim kaljenjem, ne moremo pa je z austempranjem, ker se bainit tvori pri tem jeklu prepočasi. Ugodne temperature izotermnega kaljenja so med 180 do 300 °C ali 400—470 °C, časi držanja naj bodo v prvem primeru eno uro, v drugem pod 15 minut za prerez $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Jeklo, izdelano po EPZ postopku, je obstojnejše proti utrujanju, bodisi po poboljšanju (za 10 %), bodisi po izotermnem kaljenju (za 7 %) kot klasično izdelano jeklo. Način izdelave jekla pa ne spremeni vpliva vrste toplotne obdelave na obstojnost proti utrujanju.

Avtorski izvleček

UDK: 620.178.746.22:621.785

ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, TSb, AY

Metalurgija — mehanske lastnosti — žilavost — izotermno kaljenje — orodno jeklo — konstrukcijska jekla

F. Uranc

Zboljšanje žilavosti jekel s kaljenjem v vroči kopeli

Železarski zbornik 16 (1982) 2 s 45—52

Žilavost orodnih in konstrukcijskih jekel moremo zvišati, ne da bi jim zmanjšali trdoto, s postopkoma austempering in martempering.

Najprimernejša temperatura hladilne kopeli avstenitiziranih jekel je blizu M_s točke, razen pri jeklih z visoko M_s .

Avtorski izvleček

INHALT

UDK: 669.189:669.587.6
ASM/SLA: D5a, D11n

Metallurgie — Erschmelzung von Stahl — Kalziumkarbidbildung

D. Sević, D. Čurđija

Über die Löslichkeit von Kohlenstoff in Schlacken

Železarski zbornik 16 (1982) 2 S 53—56

Auf Grund der Literaturangaben ist die Änderung des thermodynamischen Potentials und der Gleichgewichtskonstante der CaC_2 Bildungsreaktion in Schlacken verschiedener Zusammensetzung unter reduzierenden Bedingungen analysiert worden.

Die Abhängigkeit der Kohlenstofflösung von der Schlackenbasizität und der CaO Aktivität im System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ wird mit der Regressionsanalyse ausgedrückt. Dadurch war es möglich auch das thermodynamische Potenzial der CaC_2 Bildungsreaktion als eine Funktion der Schlackenbasizität und CaO Aktivität bei $T = 1873^\circ\text{C}$ auszudrücken.

Die Regressionsgleichungen sind mit hohen Korrelationskoeffizienten gekennzeichnet und ergaben im Vergleich zu der Theorie sehr gute Lösungen.

Auszug des Autors

UDK: 669.18:621.785.53
ASM/SLA: S11r, E9q

Metallurgie — Sauerstoffmesssonde — Sauerstoffpotentialbestimmung

B. Koroušić

Sauerstoffmesssonde ein neues Konzept bei der Kontrolle und Messung der Wärmetechnischen Prozesse— I. Teil

Železarski zbornik 16 (1982) 2 S 29—35

Literaturübersicht aus dem Gebiet der Messung des Sauerstoffpotentials, Funktionsprinzip der Sonde und die Wirkungsweise bei höheren Temperaturen. Physikalisch chemische Eigenschaften des festen Elektrolyten mit der Betonung der Begrenzungen beim Messen mit der Sonde. Theoretische Verbindung zwischen den Sondenparametern und dem Sauerstoffpotential. Diagramm für die direkte Bestimmung des Sauerstoffpartialdruckes aus bekannten für T und E. Einige charakteristischen der Sauerstoffmesssonden bezüglich des Einbaues in die Industrieöfen. Übersicht der Erzeuger der Sauerstoffmesssonden in der Welt mit den Adressen und kurzer Beschreibung der Sondencharakteristiken.

Auszug des Autors

UDK: 620.178.746.22:621.785
ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, T5b, AY

Metallurgie — mechanische Eigenschaften — Zähigkeit — Isothermisches Härten — Werkzeugstahl — Konstruktionsstähle

F. Uranc

Verbesserung der Zähigkeit durch Warmbadhärten

Železarski zbornik 16 (1982) 2 S 45—52

Die Zähigkeit der Werkzeug- und Konstruktionsstähle kann durch die Zwischenstufenvergütung- und das Warmbadhärten erhöht werden um dabei nicht die Härte zu vermindern.

Die günstigste Temperatur des Kühlbades der Austenitisierten Stähle ist nahe des M_s Punktes, ausgenommen bei Stählen mit hohem M_s Punkt.

Auszug des Autors

UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2
ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p

Metallurgie — mechanische Eigenschaften — Zähigkeit — Isothermisches Härten — ESU — hochfester Stahl

F. Uranc

Einfluss der Elektroschlackeumschmelzung und der Härtung im Salzbad auf die Eigenschaften des hochfesten Stahles C 5432 VCNMo 200

Železarski zbornik 16 (1982) 2 S 37—44

Dem hochfesten Konstruktionsstahl C 5432-VCNMo 200 kann durch das isothermische Härten die Zähigkeit erheblich (von 37 auf 56 J) verbessert werden, nicht aber mit Zwischenstufenvergütung da die Bildung von Bainit bei diesem Stahl zu langsam ist. Die günstigsten Temperaturen, für das isothermische Härten sind zwischen 180 und 300 °C oder 400 und 470 °C, die Haltdauer soll im ersten Fall eine Stunde betragen und im zweiten unter 15 Minuten für den Querschnitt $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Der Stahl erzeugt nach dem ESU Verfahren ist beständiger gegen Ermüdung, sowohl nach der Vergütung (um 10 %), wie auch nach dem isothermischen Härten (um 7 %) im Vergleich zu dem klassischerzeugten Stahl.

Die Erzeugungsart selbst ändert nicht den Einfluss der Wärmebehandlungsweise auf die Beständigkeit gegen Ermüdung.

Auszug des Autors

CONTENTS

UDK: 669.18:621.785.53

ASM/SLA: S11r, E9q

Metallurgy — Oxygen Probe — Determination of Oxygen Potential

B. Koroušić

Oxygen Probe — New Concept in Controlling and Measurements in Heat-Engineering Processes — 1st Part

Zelezarski zbornik 16 (1982) 2 P 29—35

Review of references on measuring oxygen potential. Principle of probe and its working at increased temperatures. Physico-chemical properties of solid electrolytes with emphasis on the limitations in measurements with the probe. Theoretical connection between the probe parameters and the oxygen potential. Diagram for direct reading the oxygen partial pressure from the known values of T and E. Some characteristics of oxygen probes according to the possibility of their building into industrial furnaces. Review of oxygen probe manufacturers in the world with addresses and short descriptions of the probe characteristics.

Author's Abstract

UDK: 669.189:669.587.6

ASM/SLA: D5a, D11n

Metallurgy — Steel Manufacturing — Calcium Carbide Formation

D. Sević, D. Curčija

On Carbon Solubility in Slags

Zelezarski zbornik 16 (1982) 2 P 53—56

Based on reference data the variation of thermodynamic potential and the equilibrium constant for the reaction of CaC_2 formation in slags with various compositions for reducing conditions was analyzed. The regression analysis was applied to determine the relationship between the carbon dissolution, slag basicity, and CaO activity in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ system. This enables that thermodynamic potential for the reaction of CaC_2 formation can be expressed as the function of slag basicity and CaO activity at 1873 K.

The regression equations exhibit high correlation coefficients and the obtained solutions are in agreement with the theory.

Author's Abstract

UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2

ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p

Metallurgy — Mechanical Properties — Toughness — Isothermal Hardening — ESR — High-strength Steel

F. Uranc

Influence of the Electroslag Remelting and Quenching in Salt Bath on the Properties of High-strength C 5432-VCNMo 200 Steel

Zelezarski zbornik 16 (1982) 2 P 37—44

Toughness of VCNMo 200 — C 5432 high-strength structural steel can be essentially improved (from 37 to 56 J) by isothermal hardening. Suitable temperatures for isothermal hardening are in the intervals 180 to 300 °C, and 400 to 470 °C. Holding times in the first case should be 1 hour, in the second case below 15 minutes for a 10×10 mm section. Steel manufactured by the ESR process has higher fatigue strength either by hardening and tempering (for 10 %) or by isothermal hardening (for 7 %) compared with the ordinary manufactured steel. The manufacturing process does not change the influence of the heat-treatment process on the fatigue limit.

Author's Abstract

UDK: 620.178.746.22:621.785

ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, TSb, AY

Metallurgy — Mechanical Properties — Toughness — Isothermal Quenching — Tool Steel — Structural Steel

F. Uranc

Improved Toughness of Martempered/Austempered Steel

Zelezarski zbornik 16 (1982) 2 P 45—52

Martempering and austempering can improve the toughness of tool and structural steel without reducing the hardness.

The most convenient temperature of the cooling bath for the austenitized steel is around the M_s point with the exception of steel with high M_s temperature.

Author's Abstract

СОДЕРЖАНИЕ

UDK: 669.189:669.587.6
ASM/SLA: D5a, D11n

Металлургия — плавящиеся стали — образование карида кальция.

D. Šević, D. Čurčija

О растворимости углерода в шлаках.

Železarski zbornik 16 (1982) 2 С 53—56

На основании данных из отраслевой литературы сделан анализ изменения термодинамического потенциала и константы равновесия реакции образования CaC_2 в шлаках различного состава для условий восстановления.

Регрессивным анализом выражена зависимость растворения углерода в функции основности шлака и активности CaO в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$. Это дало возможность, чтобы и термодинамический потенциал реакции образования CaC_2 был выражен как функция основности шлака и активности CaO на $T = 1873 \text{ K}$.

Регрессивные уравнения, полученные при высоких коэффициентах корреляции при сравнении с теорией показали совпадающие решения.

Автореф.

UDK: 669.18:621.785.53
ASM/SLA: S11r, E9q

Металлургия — кислородный зонд — определение кислородного потенциала

V. Korošić

Кислородный зонд — Новая концепция при контроле и измерениях металлургических процессов — I часть

Železarski zbornik 16 (1982) 2 С 29—35

Обзор литературы из области измерения кислородного потенциала. Принцип зонда и его действие при повышенных температурах. Физико-химические свойства твердого электролита взяты во внимание ограничения при измерении с зондом. Теоретическая связь между параметрами зонда и кислородным потенциалом. Диаграмма на непосредственное считывание парциального давления кислорода и измеренных величин T и E . Рассмотрены некоторые характеристики кислородных зондов, что касается их вмонтирования в промышленные печи. Подан также обзор изготовителей кислородных зондов в отдельных зарубежных странах с коротким описанием характеристик зондов.

Автореф.

UDK: 620.178.746.22:621.785
ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, TSb, AY

Металлургия — механические свойства — вязкость — изотермическая закалка — инструментальная сталь — конструкционные стали.

F. Urauc

Улучшение вязкости сталей при закалке в горячих средах.

Železarski zbornik 16 (1982) 2 С 45—52

Вязкость инструментальных и конструкционных сталей можно повысить без снижения твердости при применении способов аустенитной и мартенситной закалки с последующим отпускком.

Самая подходящая температура охлаждающей среды аустенитных сталей держится около M_s точки, с исключением сталей с высокой M_s .

Автореф.

UDK: 620.178:621.785.616.22:669.187.2
ASM/SLA: Q6, Q7, 2-64, D8n, SGBA, J26p

Металлургия — механические свойства — вязкость — изотермическая закалка — ЭПП — сталь высокой твердости

F. Urauc

Влияние переплава под шлаком и закалка в соляной ванне на свойства стали высокой твердости марки С 5432-VCNMo 200

Železarski zbornik 16 (1982) 2 С 37—44

Конструкционная сталь высокой твердости марки VCNMo 200 - С 5432 значительно улучшилась вязкостью (с 37 на 56 ед. J) с изотермической прокаткой. Благоприятные температуры изотермической прокатки находятся между 180—300 °C или же между 400—470 °C. Время ожидания в первом случае пусть будет один час, а в другом случае не больше 15 мин для образцов сечения $10 \times 10 \text{ мм}^2$.

Сталь, изготовленная способом ЭПП более стойкая к старению после улучшения (на 10%), также после изотермической прокатки (на 7%) с сравнением с сталью, которая изготовлена классическим способом.

Способ изготовления стали не изменил влияние вида термической обработки на стойкость против старения.

Автореф.

