

ŽELEZARSKI ZBORNIK

VSEBINA	Stran
Paulin Andrej, I. Lamut — Metalurški inštitut Ljubljana D. Dretnik — Rudnik Mežica REAKTIVNOST KOKSA IN NJEN VPLIV NA DELO PLAVŽA	65
Gnamuš Janko, G. Rihar — Železarna Ravne REPARATURNO VARJENJE ORODNIH JEKEL	73
Grešovnik Ferdo — Železarna Ravne RAČUNANJE TEMPERATURNIH NAPETOSTI V ELASTIČNEM PODROČJU	77
Brudar Božidar — Železarna Jesenice OHLAJANJE JEKLENEGA VALJA NA VOZIČKU	85
TEHNIČNE NOVICE	
Vodopivec Franc — Metalurški inštitut Ljubljana, O. Kürner in A. Lagonja — Železarna Jesenice, F. Grešovnik in A. Rodič — Železarna Ravne, S. Senčič in F. Vizjak — Železarna Štore O RAZVOJNIH MOŽNOSTIH JEKEL IN NEKATERIH POSEBNIH ZLITIN TER POSTOPKOV ZA NJHOVO IZDELAVO, PREDELAVO, ULIVANJE IN PLEMENITENJE.	93
OSEBNE VESTI	99
DIPLOMSKA DELA	100

LETO 21 ŠT. 2 — 1987

ŽEZB BQ 21 (2) 65—102 (1987)

ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 21

LJUBLJANA

JUNIJ 1987

Vsebina	Inhalt	Contents	Содержание
Stran	Seite	Page	Страница
A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik Reaktivnost koksa in njen vpliv na delo plavža 65 UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462 ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb	A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik Reaktionsfähigkeit von Koks und deren Einfluss auf die Arbeit des Hochofens 65 UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462 ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb	A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik Coke reactivity and its influence on the blast furnace operation 65 UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462 ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb	A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik Реакционная способность кокса и её влияние на работу доменной печи 65 UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462 ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb
I. Gnamuš, G. Rihar Reparaturno varjenje orodnih jekel 73 UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25 ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18-72	I. Gnamuš, G. Rihar Reparaturschweissen von Werkzeugstählen 73 UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25 ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18-72	I. Gnamuš, G. Rihar Repair welding of tool steel 73 UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25 ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18-72	I. Gnamuš, G. Rihar Ремонтная сварка инструментальных сталей. 73 UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25 ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18-72
F. Grešovnik Računanje temperaturnih napetosti v elastičnem področju 77 UDK: 531:536.4:517.2 ASM/SLA: U10, Q25p, U4e	F. Grešovnik Berechnung der Temperaturspannungen im elastischen Bereich 77 UDK: 531:536.4:517.2 ASM/SLA: U10, Q25p, U4e	F. Grešovnik Calculation of temperature stresses in the elastic region 77 UDK: 531:536.4:517.2 ASM/SLA: U10, Q25p, U4e	F. Grešovnik Вычисление температурных напряжений в области упругости. 77 UDK: 531:536.4:517.2 ASM/SLA: U10, Q25p, U4e
B. Brudar Ohlajanje jeklenega valja na vozičku 85 UDK: 536.2:621.771.07 ASM/SLA: I2, W23k, P11j	B. Brudar Die Kühlung eines stähler- nen Zylinders auf einem Wagen 85 UDK: 536.2:621.771.07 ASM/SLA: I2, W23k, P11j	B. Brudar Cooling of a steel cylinder on a chariot 85 UDK: 536.2:621.771.07 ASM/SLA: I2, W23k, P11j	B. Brudar Охлаждение стального валка на тележке. 85 UDK: 536.2 621.771.07 ASM/SLA: I2, W23k, P11j
Tehnične novice 93	Technische Nachrichten 93	Technical News 93	Технические новости 93



MEMORANDUM FOR THE RECORD

DATE: 11/15/50

SUBJECT: [Illegible]

TO: [Illegible]

FROM: [Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]

[Illegible]



Reaktivnost koksa in njen vpliv na delo plavža

UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462
ASM-SLA: C21a, RMj 43, P13b, Pb

Andrej PAULIN*, Jakob LAMUT*, Drago DRETNIK**

Z lastno metodo merjenja reaktivnosti, ki se bolj približuje pogojem v praksi, smo preiskali 30 koksni vzorcev, izdelali primerjalni diagram med lastno in Koppersovo metodo ter analizirali odvisnosti med reaktivnostjo koksa, specifično porabo koksa v svinčevem plavžu ter sestavo plinov, ki nastajajo z zgorevanjem koksa.

UVOD

Na hod jaškovne peči z reakcijami trdno-plin, kot je npr. potek metalurških reakcij v plavžu, ima odločilen pomen izoblikovanje zgorevnega prostora pred pihalnicami. Na njegovo obliko pa vpliva razporeditev vsipa, njegove lastnosti glede mehčanja in taljenja ter ne nazadnje tudi zgorevnost koksa. Pri obratovanju plavža kažejo praktične izkušnje, da prihaja pri enaki sestavi vsipa do neenakomernosti obratovanja takrat, ko zamenjamo koks. To velja za plavže v črni in v barvni metalurgiji. Obnašanje koksa pa je možno do določene meje zasledovati z ugotavljanjem njegove reaktivnosti.

REAKTIVNOST KOKSA

Za dogajanja v plavžu je poleg standardnih značilnosti za kakovost koksa, kot so zrnatost, sestava, kurilna vrednost ipd., ena najbolj bistvenih značilnosti njegova reaktivnost. Koks, ki pred pihalnicami zgori s prisotnim kisikom iz vpihanega zraka v CO_2 , reagira s tem CO_2 v okoliških plasteh koksa do CO. Hitrost te reakcije oz. stopnja reakcije na enoto časa predstavlja merilo za reaktivnost. Pri tem poznamo dve vrsti reaktivnosti: karboksireaktivnost za zgorevanje ogljika s CO_2 , in oksireaktivnost za reagiranje ogljika s kisikom.⁵

Železarji v ZDA, na Japonskem in v zahodni Evropi so v svojih raziskavah o vplivu reaktivnosti koksa na

porabo v plavžu ugotovili, da dodajanje manj reaktivnih koksov k običajnim koksom pomeni poleg zmanjšanja porabe koksa tudi višje temperature v območju nad pihalnicami ter v talilniku¹. Nadalje so raziskave tudi pokazale, da je reaktivnost koksa neposredno odvisna od premoga za koksanje, predvsem od deleža hlapnih snovi v premogu, kar pa je posredno povezano tudi s trdnostjo premoga. Premogi z večjim deležem hlapnih snovi so manj trdni in koks iz njih bolj reaktivni. Tudi manjše zrnatosti koksa imajo večjo reaktivnost zaradi večje reakcijske površine.

V plavžu za svinec, kjer že manjše koncentracije CO v plinu zadoščajo, da začne pri ustreznih temperaturah potekati redukcija svinčevih spojin, pa pomeni čezmerno nastajanje CO nepotrebno porabo koksa.

UGOTAVLJANJE REAKTIVNOSTI KOKSA

Za ugotavljanje karboksireaktivnosti koksov je najbolj znana Koppersova metoda, pri kateri skozi 34 cm^3 goriva, zrnatosti 0,5 do 1 mm, ki je v kremenovi cevki s premerom 15 mm in ogreto na 950°C , vodimo 1,6 l osušenega CO_2 10 minut. Po petkratni ponovitvi poskusa izračunamo iz analiz izhajajočih plinov reaktivnost po obrazcu:

$$r_k = \frac{\% \text{ CO}}{\% \text{ CO}_2 + 1/2 \% \text{ CO}} \cdot 100$$

Zelo reaktivna goriva, kot so oglje in lignitni koks, imajo reaktivnosti 180 do 200, metalurški koks 60 do 100, najmanj reaktivni pa so livarski koks z reaktivnostjo po Koppersu pod 50².

Z namenom, da bi se čim bolj približali dejanskim pogojem v plavžu, smo na VTOZD Montanistika že prej razvili spremenjeno metodo za ugotavljanje reaktivnosti^{6,7}. V jekleno retorto, premera 65 mm, vložimo 300 g koksa, zrnatosti 30 do 40 mm (kar je bližje dejanski zrnatosti koksa v plavžu). V argonovi atmosferi segrejemo vložek na 950°C , nato spustimo skozi plast tok CO_2 . Med poskusom merimo s termotehtnico zmanjšanje mase vzorca zaradi reakcije med ogljikom in CO_2 .

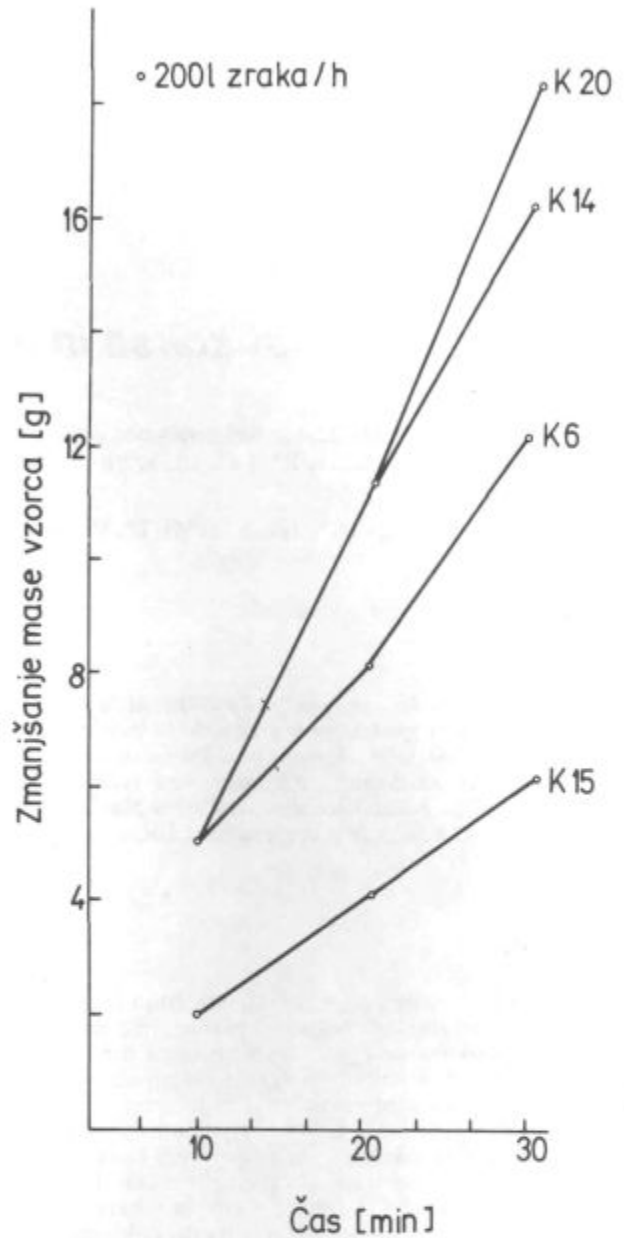
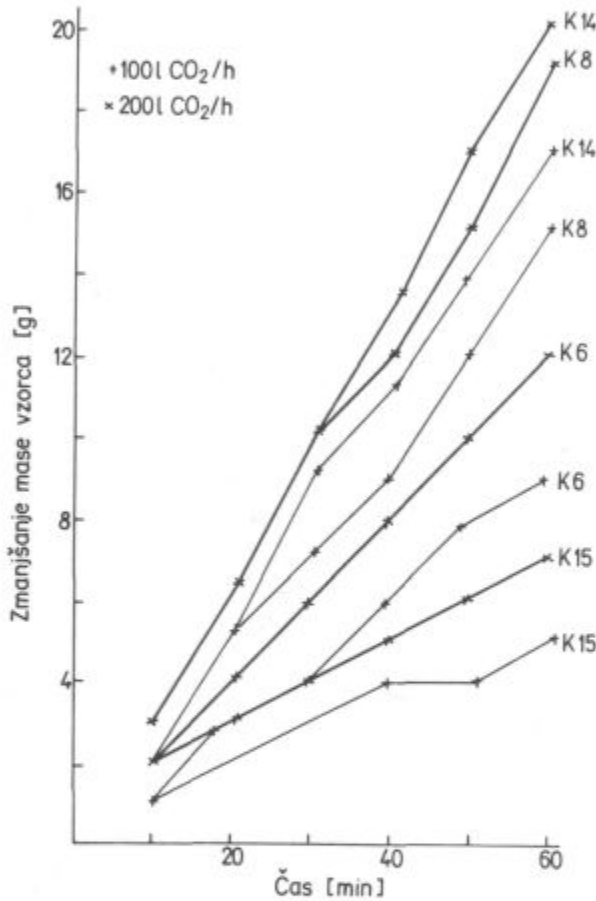
* FNT-VTOZD Montanistika

** Rudniki svinca in topilnica Mežica

Pretok CO₂ merimo z merilnikom pretoka. Pri meritvah smo uporabljali pretoka 100 in 200 l CO₂/h. Količina ogljika, ki reagira na časovno enoto, je po tej metodi merilo za reaktivnost. Če pa namesto CO₂ vodimo skozi plast zrak, je metoda primerna za ugotavljanje oksidativnosti ali zgorevanja koksa.

MERITVE

Plavž za svinec zaradi nizkega jaška in zato, ker za redukcijo svinčevih spojin ne potrebujemo velikih koncentracij CO, obratuje optimalno z malo reaktivnimi koks. Glede na spreminjajočo se in v glavnem nezado-



Slika 1
Zmanjšanje mase koksovih vzorcev pri (a) toku 100 in 200 l CO₂ ter (b) 200 l zraka na uro.
Fig. 1

Reduction of mass of coke samples in flow of 100 and 200 l CO₂ (a), and 200 l air per hour (b).

voljivo kakovost domačih koksov potekajo z rudnikom svinca Mežica že od leta 1978 intenzivne raziskave koksov. Do sredine leta 1984 je bilo preiskanih 30 različnih vzorcev. Meritve reaktivnosti teh vzorcev za pretoke 100 in 200 l CO₂/h ter 200 l zraka/h kaže razpredelnica 1, grafični prikaz za nekatere močno in slabše reaktivne kokske pa slika 1.

ANALIZA VPLIVA KAKOVOSTI KOKSA NA OBRATOVANJE PLAVŽA

Analiza se nanaša izključno na svinčev plavž, ugotovitve pa v principu lahko veljajo za vsako jaškovno peč.

Analiza obratovanja plavža v Žerjavu je pokazala, da obstaja odvisnost med proizvodnjo plavža in specifično porabo koksa, ki je obratno sorazmerna, kot kaže slika 2. Podatek je za obdobje 1978—1984, ko se kakovost praženca ni bistveno spreminjala in lahko sklepamo, da je nihanje proizvodnje svinca v plavžu predvsem posledica nihanj v kakovosti koksa. Nadalje kaže analiza odvisnosti med reaktivnostjo koksa, izražena v zmanjšanju mase pri ustreznem pretoku CO₂ oz. zraka, ter specifično porabo koksa v svinčevem plavžu na precejšnjo medsebojno odvisnost (slika 3). Na prvi pogled se zdi, da se konice in doline pri specifični porabi in reaktivnosti lepo ujemajo. Diagram na sliki 4, kjer je narisana odvisnost med specifično porabo koksa in reaktiv-

Razpredelnica 1: Meritve reaktivnosti koksov v g C pri pretokih 100 in 200 l CO₂ ter 200 l zraka na uro, pri različnih časih

Vzorec	Čas min.					
	10	20	30	40	50	60
Pretok 100 l CO₂/h						
K-1	3	4	5	7	9	11
K-2	3	3,5	5	5,5	6,5	6,5
K-3	2	5	5,5	7	8,5	10
K-4	2	4	4	5	6	6
K-6	1	3	4	6	8	9
K-7	3	5	6	7	9	9
K-8	2	4	7	10	12	15
K-9	1	2	4	5	6	7
K-10	1	2	4	6	7	9
K-11	2	4	6	8	10	12
K-12	2	5	8	11	14	16
K-14	2	5	9	11	14	17
K-15	1	2	3	4	4	5
K-16	1	2	3	4	4	5
K-17	2	4	5	7	7	8
K-18	2	2	3	3	4	6
K-19	1	2	3	5	6	9
K-20	1	3	5	7	8	10
K-21	1	2	4	6	7	9
K-22			3			6
K-23			4			9
K-24			5			9
K-26			6			11
K-27			4			8
K-28			5			12
K-29			6			15
K-30			6			13

Vzorec	Pretok 200 l CO ₂ /h					
	10	20	30	40	50	60
K-1	1,5	3	6	8	10	13
K-2	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	12,5
K-3	3	5	7	9	12	14
K-4	1	2	3	4	5	7
K-6	2	4	6	8	10	12
K-7	2	4	6	8	10	11
K-8	3	6	10	12	15	19
K-9	2	4	6	8	10	12
K-10	3	5	8	11	14	17
K-11	3	6	9	12	16	19
K-12	3	6	9	12	15	18
K-14	3	6	10	13	17	20
K-15	2	3	4	5	6	7
K-16	1	2	3	5	6	6
K-17	2	5	8	10	12	15
K-18	2	4	6	8	10	12
K-19	2	5	7	9	12	14
K-20	2	4	6	8	10	13
K-21	2	4	7	9	11	13
K-22			6			12
K-23			7			13
K-24			7			13
K-26			7			14
K-27			5			10
K-28			8			18
K-29			9			21
K-30			10			22

Vzorec	Pretok 200 l zraka/h		
	4	12	17
K-1	4	12	17
K-2	2,5	5,5	9
K-3	4	7	11

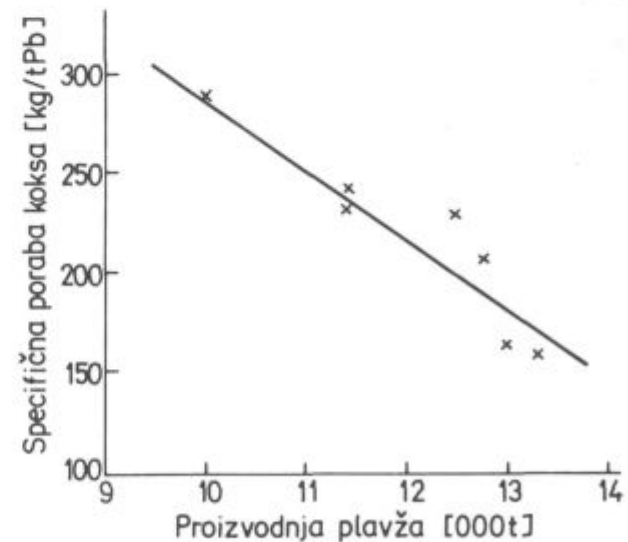
Vzorec	Čas min.					
	40	20	30	40	50	60
K-4	2	5	8			
K-6	5	8	12			
K-9	1	2	4			
K-10	2	4	6			
K-11	5	10	14			
K-12	5	9	16			
K-14	5	11	16			
K-15	2	4	6			
K-16	1	3	5			
K-17	2	4	7			
K-18	2	4	6			
K-19	4	8	12			
K-20	5	11	18			
K-21	6	11	17			
K-22	6	11	17			
K-23	5	8	12			
K-24	5	8	12			
K-26	4	7	12			
K-28	4	9	14			
K-29	5	8	13			
K-30	5	10	15			

nostjo koksa, pa kaže, da medsebojna odvisnost sicer obstaja vendar z ne zelo veliko stopnjo soodvisnosti. Kasnejše analize podatkov so pokazale, da nekateri kokсни vzorci močno odstopajo po obnašanju od večine oz. je tudi možno pri nekaterih soodvisnostih, da podatkov za specifično porabo koksov ne moremo v celoti med seboj primerjati, če je bila med posameznimi posiljkami koksa npr. prevelika razlika v zrnatosti. Zato smo kot prvo oceno potegnili grafično odvisnost, tako da upošteva najbolj zanesljive soodvisnosti. Narisani grafični odvisnosti za meritve reaktivnosti pri pretokih 100 in 200 l CO₂/h imata izhodišče v približno isti točki. Enačbi njunih premic pa sta:

$$y = 85 + 6,45 x \quad \text{pri } 100 \text{ l CO}_2/\text{h}$$

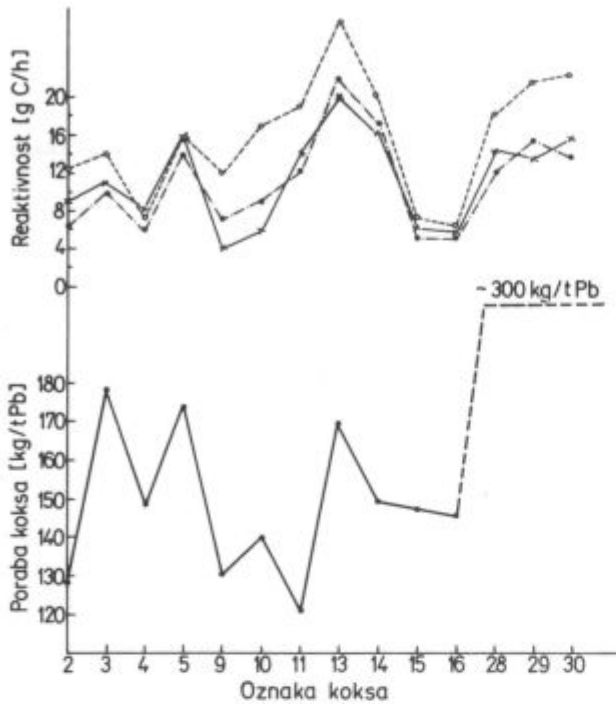
in

$$y = 88 + 3,70 x \quad \text{pri } 200 \text{ l CO}_2/\text{h,}$$



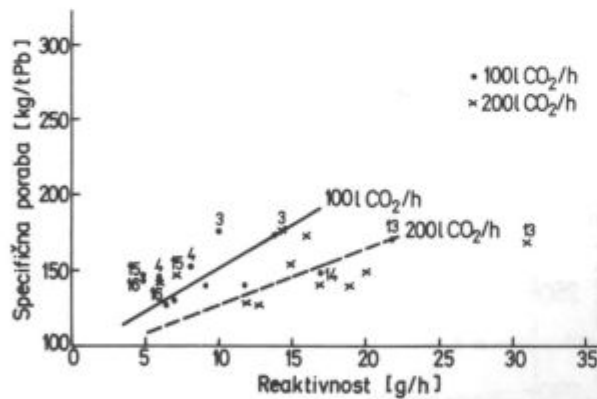
Slika 2
Odnosnost med specifično porabo koksa in proizvodnjo svinčevega plavža v Žerjavu za obdobje 1978—1984.

Fig. 2
Relationship between the specific consumption of coke and the output of lead blast furnaces in Žerjav for period 1978—1984.



Slika 3
Odpisnost porabe koksa od njegove reaktivnosti. ● in ○ — karboksireaktivnosti v g C/h pri tokih 100 in 200 l CO₂/h, x — oksireaktivnost v g C/h pri toku 200 l zraka/h.

Fig. 3
Relationship between the coke consumption and its reactivity. ● and ○ — carboxyreactivities in g C/h in flows of 100 and 200 l CO₂/h, x — oxyreactivities in g C/h in flow of 200 l air/h.



Slika 4
Odpisnost med specifično porabo koksa in njegovo reaktivnostjo pri tokih 100 in 200 l CO₂/h.

Fig. 4
Relationship between the specific coke consumption and its reactivity for flows 100 and 200 l CO₂/h.

kjer y predstavlja specifično porabo in x reaktivnost koksa.

Analiza energijskega modela svinčevega plavža³ kaže, da na učinkovitost plavža najbolj vpliva sestava žrelnega plina, t. j. razmerje p_{CO_2}/p_{CO} , kar pa je tesno povezano z reaktivnostjo koksa.

Pri minimalni reaktivnosti koksa (le-ta se približuje vrednosti 0), ko se po reakciji $C + CO_2$ razvije le toliko

CO, kolikor ga je potrebno za redukcijo kovinskih oksidov in ga ni v prebitku v plavžnem plinu ($p_{CO_2}/p_{CO} \rightarrow \infty$), imamo minimalno specifično porabo koksa. Po termodinamičnem modelu plavža smo za teoretično porabo koksa z 80 % ogljika⁴ pri žrelni temperaturi plina 523 K in ne upoštevaje toplotnih izgub plavža ter v odvisnosti od sestave vsipa dobili 67 do 82 kg koksa/t Pb, kar kaže na zadovoljivo ujemanje z ugotovitvami po sliki 4.

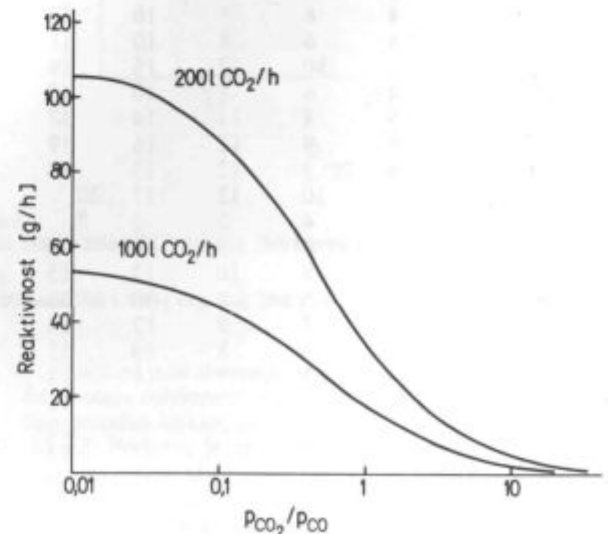
Na osnovi znanega toka CO₂ skozi vzorec koksa in zmanjševanja mase vzorca s časom lahko izračunamo povprečno sestavo izhajajočih plinov, t. j. tudi p_{CO_2}/p_{CO} , kar kaže slika 5. Sedaj pa lahko primerjamo standardno Koppersovo metodo z našo metodo, toda primerjava je lahko le groba, ker smo zanemarili vpliv zrnatosti vzorca na reaktivnost. Odvisnost med reaktivnostjo po Koppersu, r_k , in sestavo plinov, ki izhajajo iz merilne naprave, kaže slika 6. Če skušamo na osnovi p_{CO_2}/p_{CO} pri Koppersovi napravi s slike 5 odčitati ustrezne reaktivnosti po naši metodi, dobimo, da naj bi imeli livarski koks reaktivnosti 14 oz. 28 g C/h pri pretoku 100 oz. 200 l CO₂/h, metalurški koks 18 do 27 oz. 36 do 54 g C/h, najbolj reaktivna goriva pa nad 45 oz. 90 g C/h. Praktične izkušnje pa kažejo, da takšna primerjava daje pri naši metodi vsaj dvakrat prenizke vrednosti za reaktivnost. To pomeni, da pri naši metodi vzorec reagira vsaj dvakrat počasneje kot v Koppersovi napravi. Če privzamemo, da reakcijo $C + CO_2$ vodi kemična kinetika, je možna naslednja semikvantitativna razlaga:

hitrost kemične reakcije lahko zapišemo:

$$-dm_c/dt = k_r \cdot A \cdot \bar{p}_{CO_2}$$

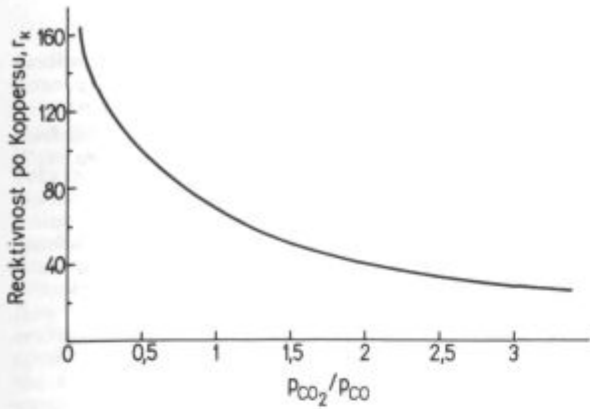
kjer je m_c masa ogljika, ki reagira s CO₂, k_r reakcijska konstanta, A površina vzorca, kjer poteka reakcija, in \bar{p}_{CO_2} srednji parcialni tlak CO₂ med potekom reakcije.

Ocena površin Koppersovega in našega vzorca daje razmerje okoli 3:1. Ker Koppersov vzorec hitreje reagi-



Slika 5
Teoretična odvisnost med reaktivnostjo koksa, v g C/h, in povprečno sestavo izhajajočih plinov za 100 in 200 l CO₂/h.

Fig. 5
Theoretical relationship between the coke reactivity in g C/h and the average composition of exit gases from the apparatus, for flows 100 and 200 l CO₂/h.

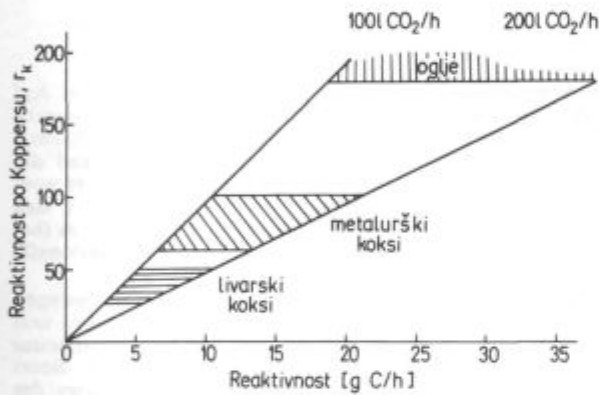


Slika 6

Odnosnost med reaktivnostjo po Koppersu, r_k , in povprečno sestavo izhajajočih plinov iz Koppersove naprave.

Fig. 6

Relationship between the Koppers-reactivity r_k and the average composition of exit gases from the Koppers apparatus.



Slika 7

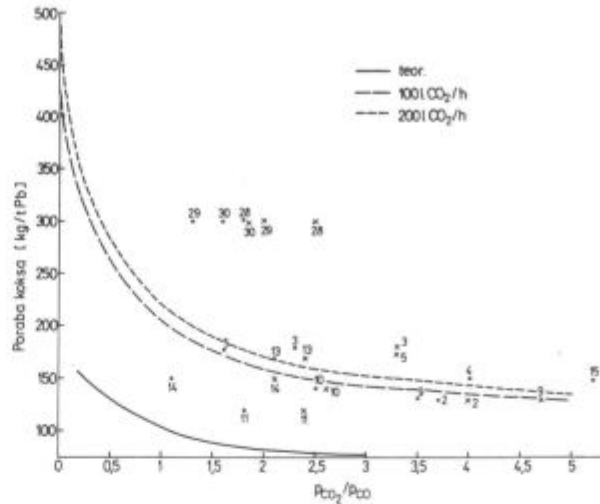
Primerjalni diagram za absolutne vrednosti reaktivnosti med Koppersovo in našo merilno metodo.

Fig. 7

Comparison plot for the absolute values of reactivities determined by the Koppers and by our method.

ra, se relativno hitreje porablja CO_2 , toda to ima precej manjši vpliv na hitrost reakcije. Ocenjujemo, da je razmerje p_{CO_2} pri Koppersovi in pri naši metodi v povprečju 1:1,2. Iz te ocene sledi, da je hitrost reagiranja vzorca v Koppersovi napravi okoli 2,5-krat večja kot po naši metodi. To nadalje pomeni, da bi po naši metodi imeli livarski koks reaktivnosti pod 5,5 oz. 11 g C/h pri pretoku 100 oz. 200 l CO_2 /h, metalurški koks 7 do 11 oz. 14,5 do 21,5 g C/h, najbolj reaktivna goriva pa nad 18 oz. 36 g C/h. Približno odvisnost med reaktivnostjo po Koppersu in reaktivnostjo po naši metodi kaže slika 7.

Ker obstaja ugotovljena odvisnost med specifično porabo koksa in njegovo reaktivnostjo ter odvisnost med reaktivnostjo koksa in povprečno sestavo plinov, nastalih z reakcijo med CO_2 in C, obstaja tudi odvisnost med specifično porabo koksa in sestavo »plavžnega plina«, vendar brez upoštevanja vpliva reakcij redukcije ($MeO + C$ oz. CO). To odvisnost kaže slika 8, kjer smo narisali tudi krivuljo, ki prikazuje teoretično porabo koksa po termodinamičnem modelu plavža³, ne upoštevajoč pa toplotnih izgub plavža. Razen pri koksih K-11



Slika 8

Odnosnost med specifično porabo koksa ter sestavo plavžnega plina svinčevega plavža, ne upoštevajoč reduksijskih reakcij. Iz meritev reaktivnosti pri 100 l CO_2 /h (●) oz. 200 l CO_2 /h (×), v primerjavi s teoretično porabo po energijskem modelu (temperatura žrelnih plinov 523 K, brez upoštevanja toplotnih izgub plavža). Številke se nanašajo na vzorce.

Fig. 8

Relationship between the specific coke consumption and the composition of blast-furnace top gas, not taking into account the reduction reactions. From reactivity measurements at 100 l CO_2 /h (●) and 200 l CO_2 /h (×), compared with the theoretical consumption according to the energy model (top-gas temperature 523 K, neglecting thermal losses of the furnace). Numbers refer to the samples.

in K-28 do 30 obstaja zadovoljiva korelacija med porabo koksa in sestavo žrelnih plinov.

ZAKLJUČKI

Ena najbolj bistvenih značilnosti koksov, ki vpliva na dogajanja v plavžu, je njegova reaktivnost. Poleg najbolj znane t. i. Koppersove metode za merjenje reaktivnosti smo že pred tem razvili na VTOZD Montanistika spremenjeno metodo, kjer uporabljamo zrnatosti, ki se bolj približujejo dejanskim pogojem v praksi, merilo reaktivnosti pa je količina zgorelega ogljika na enoto časa, kar zasledujemo s termotehtnico. Primerjalna ocena obeh metod je pokazala, da je možno absolutne vrednosti za reaktivnosti po obeh metodah med seboj primerjati in izdelali smo primerjalni diagram.

Vpliv kakovosti koksa na obratovanje plavža smo analizirali na primeru svinčevega plavža. Preučili smo odvisnosti med proizvodnjo plavža, specifično porabo koksa in njegovo reaktivnostjo. Odvisnost med proizvodnjo plavža in specifično porabo koksa je dala obratovna analiza za obratovanje plavža v Mežici (Žerjavu). Ugotovljena je bila odvisnost med specifično porabo koksa in njegovo reaktivnostjo, vendar z ne zelo veliko stopnjo soodvisnosti. Toda na osnovi te odvisnosti izračunana specifična poraba malo reaktivnih koksov se zadovoljivo ujema s teoretično izračunano porabo koksa po energijskem modelu svinčevega plavža. Obstaja tudi odvisnost med specifično porabo koksa in sestavo zgorjenih plinov (p_{CO_2}/p_{CO}). Ta zadnja odvisnost lahko predstavlja tudi enega izmed parametrov za računalniško vodenje plavža.

Literatura

1. A. Paulin, D. Dretnik, J. Lamut, A. Šegel, S. Štern: Procesi v plavžu za svinec, Poročilo katedre za ekstraktivno metalurgijo, VTOZD Montanistika, Ljubljana 1982.
2. Metalurški priročnik, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1972, str. 505.
3. A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik, M. Jug: Vodenje procesa v plavžu — I. del, Zbornik XXXV. jesenskega posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih v Sloveniji, Ljubljana 1985, str. 55; A. Paulin: Energijski model plavža, RMZ, 33, 3/1986, 177—83.
4. A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik, M. Jug: Vodenje procesa v plavžu — I. del, Poročilo katedre za ekstraktivno metalurgijo, VTOZD Montanistika, Ljubljana 1984.
5. B. Dobovišek: Vpliv temperature karbonizacije na oksireaktivnost trdnih goriv, izdelanih iz kosovskega lignita. Aplikacije DTA, Železarski zbornik, 1976, št. 1, 7—11.
6. J. Lamut: Neobjavljeno poročilo.
7. J. Lamut: Fizikalno-kemične lastnosti livarskih koksov, Poročilo VTOZD Montanistika, Ljubljana 1986.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf den Gang des Hochofens hat einen entscheidenden Einfluss die Ausbildung des Verbrennungsraumes vor den Blasformen. Die Form dieses Raumes wird in grossem Ausmass von der Brennbarkeit von Koks bestimmt. Das Betragen von Koks ist es möglich bis zu einem bestimmten Ausmass durch die Bestimmung der Reaktionsfähigkeit zu verfolgen. Die Reaktionsfähigkeit ist aber eng mit dem Koksverbrauch verbunden. Im Hochofen für die Gewinnung von Blei, wo schon kleine CO Gehalte im Gas genügen bei entsprechenden Temperaturen die Reduktion von Bleiverbindungen zu erzeugen, bedeutet eine übermässige CO Bildung einen unnötigen Koksverbrauch. Zur Bestimmung der Reaktionsfähigkeit von Koks ist die Methode nach Koppers am besten bekannt. Mit dem Ziel den tatsächlichen Bedingungen im Hochofen näher zu kommen hat man an der VTOZD Montanistik (Montanistische Fakultät) schon vor einiger Zeit eine abgeänderte Methode für die Bestimmung der Reaktionsfähigkeit entwickelt, wo in einer Retorte aus Stahl auf der Termowage die Verringerung der Koksmaße bei der Reaktion mit CO₂ oder Luft gemessen wird. Im Zeitabschnitt 1978—1984 hat man 30 Proben von Koks, das in der Bleihütte Mežica angewendet wird untersucht. Eine Abhängigkeit zwischen der Reaktionsfähigkeit und

dem Koksverbrauch im Hochofen ist festgestellt worden. Auf Grund des Energiemodelles des Hochofens ist ein theoretischer Koksverbrauch in Abhängigkeit von der Möllerszusammensetzung bei einer Abgastemperatur von 523 K und der Nichtberücksichtigung der Wärmeverluste ausgerechnet worden. Der erhaltene Wert stimmt zufriedenstellend mit den praktischen Ergebnissen des minimalen Koksverbrauches (bei der Anwendung von Koksen sehr geringhaltiger Reaktionsfähigkeit) überein.

Aus den Ergebnissen der Reaktionsfähigkeitsmessungen kann die Abhängigkeit zwischen der Reaktionsfähigkeit und der durchschnittlichen Zusammensetzung aus der Messapparatur herauskommender Gase ausgerechnet werden. Auf dieser Grundlage und bei der Wertbestimmung des Einflusses der Probenreaktionsflächen bei der Methode nach Koppers und unserer Methode ist ein Vergleichsdiagramm zwischen den Absolutwerten, erhalten nach beiden Methoden, ausgearbeitet worden. Aus diesen Feststellungen ist weiters noch die Abhängigkeit zwischen dem spezifischen Koksverbrauch und der Zusammensetzung der beim Verbrennungsprozess entstehenden Gase festgestellt worden. Diese Abhängigkeit stellt einen der Parameter für die rechnerische Führung des Hochofens dar.

SUMMARY

The blast-furnace running is to a great extent influenced by the formation of the combustion zones in front of tuyeres. Their shape depend essentially on the coke combustibility. And the coke behaviour can be to a certain degree defined by its reactivity. The reactivity is closely related to the coke consumption. In the lead blast furnace where already low CO concentrations in the gas are sufficient that reduction reactions of lead compounds commence at suitable temperatures, the excess formation of CO means unnecessary consumption of coke. The most common method for determining the coke reactivity is the Koppers method. In order to approach closer to real conditions in the blast furnace, a modified method was developed some time ago at the School of Mines in Ljubljana. Reduction of coke mass during the reaction with CO₂ in a steel retort is measured by thermobalance. In the period 1978—1984 thirty coke samples were investigated, being used in the Mežica Lead Smelter. Relationship between the coke

reactivity and its specific consumption in the blast furnace was determined. Based on the blast-furnace energy model the coke consumption was calculated as a function of burden composition at the top-gas temperature of 523 K and neglecting the thermal losses of the furnace. The obtained value is in fair agreement with the practical findings of the minimal coke consumption (using very low-reactivity cokes).

From the results of the reactivity measurements the relationship between the reactivity and the average exhaust gases from the measuring apparatus can be calculated. Thus, and by estimating the influence of the reaction surfaces of samples used in Koppers of in our method respectively a comparison plot between the absolute reactivity values obtained by the both methods was constructed. Further, still the relationship between the specific coke consumption and the composition of the combustion gases was determined. And this can be applied in a computer control of the blast furnace operation.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ход шахтной печи имеет существенное влияние формирование топочного пространства перед раздувными трубами. На его форму в большой мере влияет сгорание кокса. Поведение кокса возможно до определённой меры проследить с определением его реактивности. Реактивность же в тесной связи с расходом кокса. В доменной печи для плавления свинца, где уже небольшая концентрация СО в газе достаточна, чтобы при соответственных температур протекала реакция восстановления соединений свинца. Это указывает также, что чрезмерное образование СО газа вызывает ненужный расход кокса. Для определения реактивности кокса более всего известный метод по Копперс-у. С целью, чтобы чем больше приблизиться к фактическим условиям в доменной печи, мы в нашем цехе Монтанистика уже несколько времени тому назад развили измененный метод для определения реактивности, при чём в стальной реторте на термических весах измеряется уменьшение массы кокса при реакции с воздухом или с СО₂ газом. В течении 1978—1984 г. мы исследовали 30 образцов кокса, которого мы употребляли в плавильном заводе Межица (Н. Р. Словения).

Определили связь между реактивностью и удельным расходом кокса в доменной печи. На основании энергетической модели объёма доменной печи в м³ мы высчитали теоретический расход кокса в зависимости от состава шихты при температуре газа 523 градусов в колошнике без взятия во внимание потери теплоты в доменной печи. Полученное значение положительно согласуется с практическими определениями минимального расхода кокса (при употреблении сортов кокса плохой реактивности).

Из результатов измерения реактивности можно без затруднения высчитать зависимость между реактивностью и среднего состава газов, которые выходят из измерительного прибора. На этом основании, а также на основании оценки влияния реактивных поверхностей образца при методу по Копперс-у и при методу авторов этой работы изготовлена диаграмма сравнения между абсолютными значениями, которые дают оба метода. В продолжении мы из этих определений определили зависимость между удельным расходом кокса и составом полученного при сгорании газа, что представляет собой один из параметров для расчётного управления доменной печи.

Reparaturno varjenje orodnih jekel

UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25
ASM/SLA: K 9p, K1, K2, TSb, 17—72

J. Gnamuš, G. Rihar

Prispevek obravnava probleme pri reparaturnem varjenju, ki zadnje desetletje dobiva vedno večji pomen v industriji. Uvajanje tehnologije reparaturnega varjenja v proizvodnjo orodij prinaša nove tehnične možnosti in ekonomske prednosti. Pri tehnologiji navarjanja orodnih jekel je zelo važna pravilna izbira dodatnih materialov, prav tako pa tudi predhodna in končna toplotna obdelava.

UVOD

Reparaturno varjenje je zelo pomembno za sodobno industrijo. Daje izredne možnosti tehničnih rešitev. Poškodovani deli se v sorazmerno kratkem času ponovno usposobijo. V visoko razvitih industrijskih državah je reparaturno varjenje močno razvito in že lahko rečemo, da je sestavni del redne proizvodnje. Pri nas reparaturno varjenje premalo uporabljamo. Razloge za to je pripisati predvsem pomanjkanju znanja in motiviranosti za popravila, delno pa tudi pomanjkanju ustreznih dodatnih materialov.

Reparaturno varjenje je eno od najzahtevnejših varilskih opravil. Da uspemo pri delu, moramo imeti veliko kompleksnega znanja, predvsem o fizikalnokemičnih procesih pri segrevanju, pretaljevanju in ohlajanju, o tehnikah varjenja ter veliko praktičnih izkušenj.

Izredno pomembna je strokovna odločitev, variti ali ne variti in groba ocenitev, koliko se bodo spremenile mehanske in ostale lastnosti orodja ter kako bodo specifične lastnosti varnega spoja vplivale na funkcionalnost orodja. To je prva in najvažnejša odločitev, ki je povezana z izrednim poznavanjem materialov in obremenitev orodij, ki jih želimo reparaturno variti.

Da se lahko pravilno odločimo in izberemo ustrezno tehnologijo, moramo dobro poznati:

- funkcijo orodja,
- lastnosti osnovnega materiala, kot so mehanske lastnosti, toplotna prevodnost, razteznostni koeficient, prekaljivost,
- strukturo in stanje toplotne obdelave osnovnega materiala,
- lastnosti vara,
- strukturne spremembe, ki nastopajo v toplotno vplivani coni,
- možne napake, ki se lahko pojavijo pri varjenju.

VARIVOST ORODNIH JEKEL

Zavedati se moramo, da spadajo orodna jekla med najslabše varive kovinske materiale, zaradi česar je vsako varjenje rizično opravilo. Zaradi velike toplotne občutljivosti teh jekel se pri nenadnem lokalnem vnosu

energije lahko pojavijo razpoke, ki izničijo vloženo delo.

Razpoke so lahko take vrste, da jih opazimo s prostim očesom. Pozorni moramo biti tudi na mikro razpoke, ki jih na površini ne vidimo. Odkrijemo jih lahko z neporušnimi metodami ali z metalografskim pregledom.

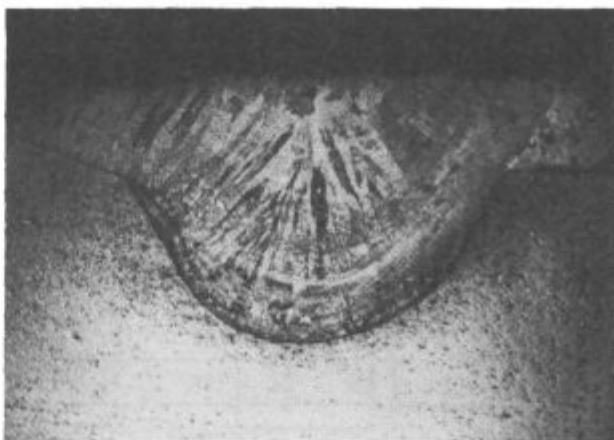
Večje razpoke na orodju nastanejo zaradi napetosti, ki jih povzročata lokalni vnos energije. Tako imenovano pokaljivost v hladnem, ki se pojavlja pri temperaturah okoli 200°C, povzročata martenzitna premena in izločanje vodika po mejah kristalnih zrn.

Pokaljivost v hladnem preprečujemo z izbiro ustreznega toplotnega režima pri varjenju. S predgrevanjem varjenca in kontrolo vnosa energije zmanjšujemo temperaturni gradient ter s tem hitrosti ohlajanja vara in toplotno vplivane cone. Paziti moramo, da je varjenec čist ter da uporabljamo take dodatne materiale in postopke, ki prinašajo čimmanj vodika.

Zaradi nagnjenosti orodnih jekel k izcejanju var sam običajno ni homogen. Ima tipično lito strukturo z usmerjenimi dendritskimi kristali (slika 1). Na mestu, kjer se kristalizacijski fronti združita, to je na sredini vara, se pri temperaturah okoli 1000°C rade pojavijo tako imenovane razpoke v toplem (slika 2).

Škodljiv pojav preprečujemo z izbiro take tehnike in načina varjenja, pri kateri je varilna kopel čimmanjša.

Take pogoje dosežemo, kadar varimo z večjim številom manjših varkov s čim nižjim varilnim tokom in na-



Slika 1
Tipična lita struktura vara
Fig. 1
Typical cast structure of a weld



Slika 2
Lita struktura vara z razpokami v toplem
Fig. 2
Cast structure of weld with hot cracks

petostjo. Izbiramo dodatne materiale (žice in elektrode) manjšega premera.

IZBIRA DODAJNEGA MATERIALA

Pri izboru dodatnega materiala se ravnamo po načelu, da naj ima navar ustrezne lastnosti. Pomembne so tudi dobre varilno-tehnične lastnosti. Pomembne so tudi dobre varilno-tehnične lastnosti dodatnega materiala.

Načelno jih lahko glede na kemično sestavo razdelimo v dve skupini:

- sestava vara je enaka kot pri osnovnem materialu,
- var je iz druge vrste jekla, ki je običajno močnejše legirano od osnove.

Če naj ima var enako kemično sestavo kot osnovni material, mora biti dodatni material bolj legiran zaradi odgora, ki se pojavlja pri varjenju. Legirni elementi so obenem tudi dezoksidanti, ki pri varjenju prehajajo iz kovine v žilindro in plinsko fazo. Odgor osnovnih legirnih elementov pri varjenju v zaščitnih plinih in pod praškom smo v okviru skupnih raziskav železarne Ravne in Instituta za varilstvo Ljubljana zasledovali pri treh vrstah jekel: Č.4146, Č.4751 in Č.7680. Poprečne vrednosti odgora za omenjene vrste jekel in postopke varjenja so navedene v tabeli I.

Tabela I: Odgor legirnih elementov

Postopek varjenja	Povprečen odgor %					
	C	Cr	Mo	V	W	Me
TIG	11	4	19	6	—	8
MIG	23	1	20	27	5	15
MAG	42	26	29	27	8	26
EPP	45	41	29	57	13	37
Povprečno	30	18	24	28	7	

V varilni praksi se često uporabljajo za navarjanje žice enake sestave, kot je osnovni material, v prepričanju, da bo kemična sestava navara enaka osnovi. Toda zavedati se moramo, da zaradi kemičnih reakcij, ki potekajo pri varilnem procesu, navar praktično ne more

imeti enake kemične sestave kot dodatni material, iz katerega je nastal. Odgor ni odvisen samo od tehnike varjenja, temveč tudi od parametrov varjenja.

Praktične izkušnje so pokazale, da je za navarjanje bolje uporabiti take sestave jekel, ki imajo dobre varilno-tehnične lastnosti. To so običajno močnejše legirana krom-molibdenova, krom-volfram-molibdenova in volfram-molibden-kromova jekla, ki imajo nižjo vsebnost ogljika. Uporabljamo tudi razne neželezne zlitine na bazi kobalta ali niklja ter karbidov.

Poznani so tudi načini navarjanja, pri katerih na osnovni material najprej navarimo bolj plastičen tamponski sloj, na katerega nanesemo trdo delovno plast.

TOPLOTNA OBDELAVA

Toplotni režim in postopek navarjanja izberemo glede na kemično sestavo osnovnega in dodatnega materiala, stanje toplotne obdelave ter obliko in funkcijo orodja.

Pri navarjanju orodnih jekel uporabljamo dva načina. Toplotni režim izberemo tako, da varjenec že takoj po varjenju dobi zahtevane lastnosti ali pa orodje po varjenju ponovno toplotno obdelamo.

Prvi način je primeren za manjša dela. Orodje ohrani zunanje oblike. Obdelamo samo varjeno mesto. Na osnovi TTT diagrama določimo ohlajevalno hitrost, ki ustreza želeni strukturi navara. Temperaturo polja in časovno odvisnost temperature od vnosa toplote je teoretično obdelal Rykolin. Izpeljanih je nekaj preprostejših obrazcev za določanje temperature predgrevanja pri določenem vnosu toplote ter ohlajevalni hitrosti v območju premene (800—500°C). Često uporabljamo tudi praktične izkušnje oziroma podatke, ki jih dobimo na osnovi predhodnih preizkusov.

Vsa jekla niso enako občutljiva na hitrost ohlajanja. Na osnovi praktičnih preizkusov smo ugotavljali, kako vpliva temperatura predgrevanja jekla Č.4751 in Č.7680 na trdoto v navarjenem stanju. Podatki o trdotah so navedeni v tabeli II.

Tabela II: Trdote navarov v HRC

Jeklo	Temperatura predgrevanja °C					
	20	100	200	300	400	500
Č.4751	46—49	43—50	46—48	44—45	44—48	40—42
Č.7680	49—51	49—52	49—51	49—51	49—50	50—51

Iz podatkov je razvidno, da temperatura predgrevanja ne vpliva na trdoto navara. V vseh primerih se navarí pri ohlajanju enako zakalijo.

Bolj občutljiva so jekla za delo v hladnem. Če je ohlajanje prepočasno, var nima dovolj visokih trdot. Pri nižjih temperaturah predgrevanja dobimo dovolj visoke trdote, proti pa nevarnost, da orodje razpoka.

Prav tako moramo paziti, da pri varjenju ne pregrejemo in s tem popustimo ostale dele orodja.

Pri večslojnem navarjanju moramo računati tudi s tem, da vsak naslednji varek popušča predhodnega.

Zaradi zaostalega avstenita v strukturi navara pri jeklih za delo v toplem in hitroreznih jeklih ne dosežemo maksimalnih trdot. S popuščanjem trdote narastejo za 10 do 15%.

Po podatkih iz literature (1) se v navarjenem stanju v krom-volframovih jeklih nahaja 25—30% zaostalega avstenita, ki ga lahko le z večkratnim popuščanjem pretvorimo v martenzit.

Natezna trdnost navara iz hitroreznega jekla po prvem popuščanju doseže maksimalno vrednost 2000 N/mm². Maksimalno trdoto (65 HRC) in žilavost (7 J) dosežemo šele po četrtem popuščanju².

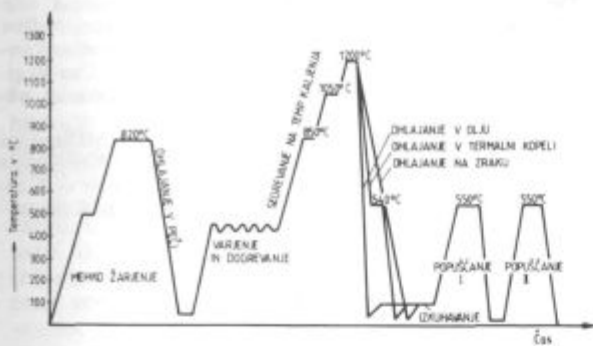
Po varjenju v vsakem primeru izvedemo popuščanje. Pri tem se delno sprostijo tudi notranje napetosti. Pri izbiri temperature popuščanja se ravnamo po osnovnem materialu. Temperatura popuščanja naj bo 20° C nižja, čas žarjenja naj bo daljši.

Navajamo podatke za popuščanje navarov za tipične skupine jekel:

- jekla za delo v hladnem
- jekla za delo v toplu
- hitrorezna jekla

Če orodje po varjenju ponovno toplotno obdelamo, izvedemo varjenje v mehko žarjenem stanju. Orodna jekla vedno varimo v predgretem stanju. Za izračun temperature predgrevanja ni uporabnih formul, kakršne poznamo pri konstrukcijskih jeklih. Temperaturo izberemo na osnovi kemične sestave, oblike varjenca, vnosa toplote. Orodna jekla varimo pri temperaturah med 200 in 700° C.

Po varjenju izvedemo toplotno obdelavo, ki je odvisna od vrste jekla. Pri toplotni obdelavi potekajo tudi difuzijski procesi na meji med varom in toplotno vplivano cono. Sprostijo se tudi notranje napetosti. Kot primer navajamo diagram toplotnega režima pri varjenju in toplotne obdelave za jeklo Č.7680 (slika 3).



Slika 3

Diagram toplotne obdelave z varjenjem za jeklo Č.7680

Fig. 3

Diagram of heat treatment with welding for Č.7680 steel

REPREZENTATIVNI PRIMERI REPARATURNEGA VARJENJA IZ PRAKSE

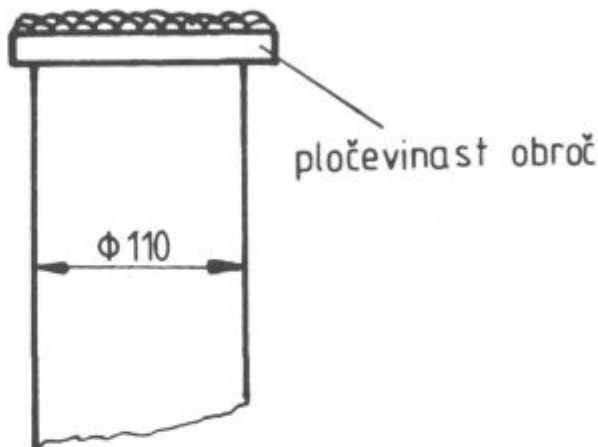
— Sendzimir valj iz kvalitete Č.4758, dim. Ø110 x 1250 mm se je pri toplotni obdelavi skrčil za 5 mm oziroma je bil prekratek.

Valj je bil kaljen in dvakrat popuščen na trdoto 58—60 HRC.

V toplu stanju in v dveh slojih smo ga čelno navarili po MIG postopku z žico Ø1,2 mm, podobne sestave jeklu Č.4758. Var smo mehansko obdelali. Izmerjena trdota je znašala 56—59 HRC. Valj je bil na koncu ultrazvočno in s ferofluksom pregledan in ni imel napak (slika 4).

— Varjenje noža za rezanje pločevine v toplu stanju.

Dimenzija noža je bila 170 x 100 x 3800 mm iz kvalitete Č.4757.



Slika 4

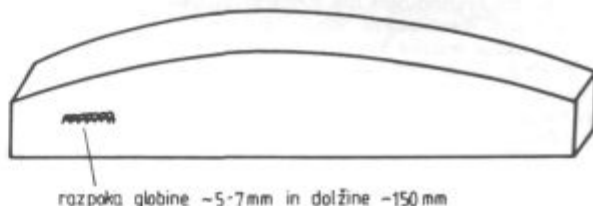
Reparaturno varjen sendzimir valj iz kvalitete Č.4758

Fig. 4

Repair welded Sendzimir roll of Č.4758 steel

Ugotovili smo, da je razpoka na zadnjem delu noža, ki v bistvu ne vpliva na kvaliteto noža, če jo zavarimo. Za dodatni material smo uporabili žico debeline 1,2 mm iz kvalitete Č.4757 — proizvod železarne Ravne.

Po ustaljenem postopku smo nož zavarili, mehansko obdelali, izmerili trdote vara, ki pa so bile v predpisanih mejah. Kontrola razpok je pokazala, da ni nobene površinske napake in napake v notranjosti (slika 5).



Slika 5

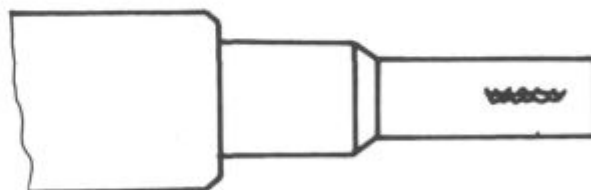
Reparaturno varjen nož za rezanje pločevine v toplu iz kvalitete Č.4757

Fig. 5

Repair welded hot-cutting sheet tool of Č.4757 steel

— Reparaturno varjenje valja za valjanje žice iz kvalitete Č.4850 v žarjenem stanju s trdoto do 250 HB.

Najprej je bila strokovna odločitev, da je razpoka na tanjšem delu čepa in ne more vplivati na kvaliteto valja. Valj smo uspešno zavarili po predhodno obrazloženi tehnologiji; kot dodatni material smo uporabili žico Ø2,5 mm iz kvalitete Č.4850, proizvedeno v železarni Ravne. Trdota valja je bila po toplotni obdelavi v zahtevanih mejah. Na varu nismo opazili razlik v trdoti (slika 6).



Slika 6

Reparaturno varjen valj iz kvalitete Č.4850

Fig. 6

Repair welded roll of Č.4850 steel

ZAKLJUČEK

Struktura in lastnosti navara ter toplotno vplivane cone so odvisne od ohlajevalne hitrosti, na katero vplivamo s predgrevanjem in vnosom toplote.

Predvsem pri jeklih za delo v toplem in hitroreznih jeklih je v navaru 25 do 30 % zaostalega avstenita.

Optimalne lastnosti navarov dobimo lahko le z ustrezno toplotno obdelavo. S primernim režimom se v navarjenem in popuščenem stanju lahko približamo optimalnim lastnostim.

Navari iz jekel Č.4751 in Č.7680 se zakalijo pri ohlajanju na zraku, ne glede na temperaturo predgrevanja.

Navarjanje orodnih jekel je zahtevno opravilo, ki je vezano tudi z riziki neuspeha. S pravilno tehnologijo in skrbno izvedbo bi se lahko marsikatero drago orodje z varjenjem uspešno obnovilo.

Literatura

1. N. S. Zubkov, N. S. Fedorov: Vpljanje termičeskoj obrabotki na svojstva naplavljenih hromovolframovih stalej; Svojstva i isledovanja naplavljenovo metala, Kijev 1979
2. I. A. Bartenjev, P. V. Gladkij: Nekatorije svojstva naplavljenih bistrorežuščih stalej; Naplavka v mašinostrojenji i remonte, Kijev 1981
3. I. A. Barkujev: Isledovanje svojstev naplavljenih molibdenovih bistrorežuščih stalej; Naplavočnije materialy, Kijev 1983
4. G. Aichele: Schutzgasschweissen im Werkzeugbau, Schweisstechnik avgust 84
5. P. S. Doyen, Q. R. Skrabec: A New Technique for Welding Tool Steel, Welding Journal september 1981
6. K. Wittke, J. F. Sotow: Verschleißfestes Auftragsschweissen von Schrüfraupen — messeren mit tiefem Einbrand, Schweisstechnik 3/79
7. G. Rihar, J. Gnamuš: Razvoj žic za navarjanja, Varilna tehnika 2/86

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden Probleme behandelt, welche beim Reparaturschweissen auftreten, das im letzten Jahrzehnt in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die Einführung der Technologie des Reparaturschweißens in die Produktion von Werkzeugen bringt neue technische Möglichkeiten und ökonomische Vorteile.

Wichtig ist die fachmännische Entscheidung — Schweißen oder nicht Schweißen, eine grobe Schätzung der Änderung mechanischer und anderer Eigenschaften an Werkzeugen und der Wärmebehandlung nach der Schweißung.

Die mechanischen Eigenschaften von Schweißgut von Auftragschweißungen so wie die mechanischen Eigenschaften der Zusatzwerkstoffe und die vorgehenden Wärmebehandlungen von Grundwerkstoff müssen gut bekannt sein. Das Regime der Vorwärmung vor dem Schweißen, der Erwärmung während dem Schweißen ist zu bestimmen.

Um die Reparaturschweißung erfolgreich durchführen zu können ist es nötig über genügend metallurgischer Kenntnisse zu verfügen, viel praktischer Erfahrungen zu haben und zugleich gründlich verschiedene Schweißstechniken zu können.

SUMMARY

The paper treats the problems appearing in repair welding which gained the industrial importance in the last decade. Introduction of the repair welding technology into the tool manufacturing process gives new technical possibilities and economic advantages.

Important are the professional decisions: to weld or not to weld, a rough estimation on possible changes of mechanical and other properties of tools, and heat treatment after welding.

Mechanical properties of welds, of building up, beside the mechanical properties of filler metals, and the preceding heat treatment of the welded piece must be well known. Processes of preheating before welding, of additional heating during welding, and of cooling after welding must be defined.

A successful repair welding demands a good complex knowledge on metallurgy, a lot of practical experiences beside the knowledge of various welding techniques.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы, которые получают при ремонтной сварки, что в течении прошедших десяти лет получает всё больше значения в промышленности. Введение технологии ремонтной сварки при изготовлении инструментов даёт новые технические возможности и экономические преимущества.

Важное значение представляет специальное решение — сваривать или не сваривать, грубая оценка, какие изменения наступают при механических и прочих свойствах инструментов, а также термическая обработка после сварки.

Необходимо хорошо быть ознакомлен с механическими свойствами сварных швов, приварков, механические свойства добавочного материала, а также предварительную термическую обработку сварочной детали.

Для успешного выполнения ремонтной сварки надо иметь достаточно комплексного знания в области металлургии, много практического опыта, одновременно же надо хорошо быть ознакомлен с различными способами техники сваривания.

Računanje temperaturnih napetosti v elastičnem področju

UDK: 531:536.4:517.2

ASM/SLA:U10, Q25p, U4e

F. Grešovnik

Obravnavane so osnove elastomehanike. Deformacijski tenzor je razširjen za primer, ko je prisotno tudi temperaturno raztezanje materiala. Na tej osnovi je prikazana splošna linearna zveza med napetostmi in deformacijami. Skupaj z gibalno enačbo za elastični kontinuum služi za izračun temperaturnih napetosti. Ustrezne diferencialne enačbe so prikazane tudi v cilindričnih in krogelnih koordinatah. Med praktičnimi primeri je obravnavano nastajanje napetosti zaradi osno simetričnega spreminjanja temperature valjastega telesa, napetosti v primeru navlačenja plašča na os valja ter nastajanje napetosti zaradi središčno simetričnega spreminjanja temperature krogle.

1. UVOD

V materialu nastanejo napetosti zaradi zunanjih mehanskih vplivov, temperaturnih gradientov ter gravitacijskih in elektromagnetnih polj. Prva dva vpliva sta pogosto vzrok za nastanek razpok oziroma za zlome.

V tem članku je obravnavano nastajanje napetosti zaradi temperaturnih gradientov. Obdelani so samo primeri, ko se material obnaša čisto elastično, natančneje rečeno, ko velja med napetostmi in deformacijami linearna zveza. Zunanji mehanski vplivi niso upoštevani, vendar je iz rešenih primerov razvidno, kako bi lahko upoštevali na primer hidrostatski tlak.

Uporabljena je analitična metoda reševanja diferencialnih enačb. V zadnjih letih se na tem področju vedno bolj uveljavljata numerično reševanje diferencialnih enačb in metoda končnih elementov¹. Poudariti je treba, da imata ti dve metodi očitno prednost le v primeru, če imamo na razpolago dovolj eksperimentalnih podatkov o lastnostih materiala. Za hitre ocene napetosti v materialu pa so rezultati analitične metode vsekakor ugodnejši, ker so pregledni in omogočajo hitre prilagoditve konkretnim razmeram. Seveda pa se moramo tu omejiti le na najpreprostejše geometrijske oblike preizkušancev.

2. OSNOVE ELASTOMEHANIKE

Napetostni tenzor

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Opisuje stanje napetosti, to je ploščinsko porazdeljenih sil, v elastičnem kontinuumu. Silo na enoto ploskve, ki je pravokotna na koordinato x_i ($i = 1, 2, 3$) s smernim vektorjem e_i , dobimo s pomočjo komponent tega tenzorja takole:

$$p_i = \sum_{k=1}^3 p_{ik} e_k \quad (2)$$

Silo na enoto ploskve, ki je pravokotna na poljubno smer n , dobimo po obrazcu

$$p_n = \sum_{i=1}^3 p_i \cos \alpha(n, e_i) = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_{ni} \quad (3)$$

Na osnovi (2) in (3) lahko hitro pokažemo, da se pri transformaciji koordinatnega sistema napetostni tenzor pretvori takole:

$$p_{nr} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ni} \alpha_{rj} p_{ij}, \quad (4)$$

kar je osnovna značilnost tenzorjev drugega reda. S pomočjo enačbe (4) poiščemo glavne smeri, to je tisti koordinatni sistem, v katerem so normalne napetosti p_{nn} ekstremne. Izkaže se, da so takrat tangencialne napetosti p_{nr} ($r \neq n$) enake nič.

Iz gibalnih enačb za kontinuum sledi, da je tenzor \mathbf{P} simetričen, torej

$$P_{ij} = P_{ji}$$

Sled tenzorja \mathbf{P}

$$\text{Tr } \mathbf{P} = \sum_{i=1}^3 p_{ii} = I_1$$

se pri transformaciji koordinatnega sistema ne spreminja.

Pod vplivom sil se elastični kontinuum deformira, kar pomeni, da se spreminjajo razdalje med točkami in koti med zveznicami točk (sl. 1). Omenjene spremembe popišemo z **deformacijskim tenzorjem**

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nazorni pomen komponent tega tenzorja je takle:

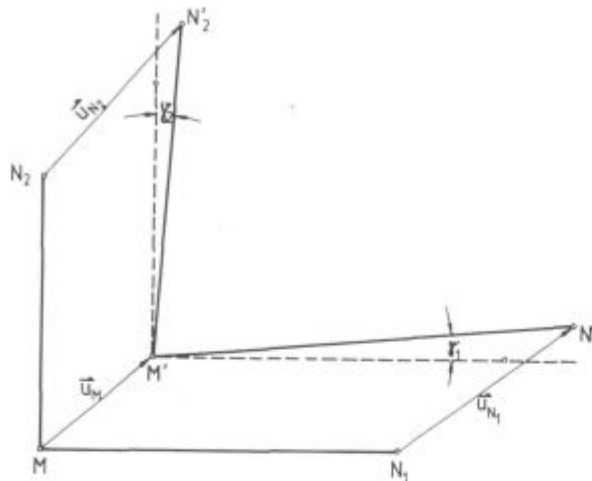
$$\gamma_{11} = 2 \epsilon_{11} = 2 \frac{\overline{M'N'_1} - \overline{MN_1}}{\overline{MN_1}},$$

$\gamma_{12} = \gamma_{21}$ in analogno za ostale.

S pomočjo premikov točk u pa se komponente γ_{ij} izračunajo takole:

$$\gamma_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

Iz (6) takoj sledi, da je $\mathbf{\Gamma}$ simetrični tenzor. Pri transformaciji koordinatnega sistema se pretvori podobno,



Slika 1
Spremembe pri deformaciji elastičnega kontinuuma
Fig. 1
Changes in deformation of elastic continuum

kot kaže obrazec (4). Pri tem se spet sled tenzorja ne spremeni. Sled deformacijskega tenzorja ima nazoren pomen; enak je dvakratni volumski dilataciji.

$$\text{Tr } \Gamma = \sum_{i=1}^3 \gamma_{ii} = 2\varepsilon_v = 2 \frac{V' - V}{V}$$

Enoosni natezni preizkus (smer obremenjevanja: e_1) izotropnega materiala pokaže pri majhnih napetostih naslednje zveze med napetostimi in deformacijami:

$$E \frac{\gamma_{11}}{2} = p_{11}, \quad (7)$$

pri čemer je E Youngov modul (modul elastičnosti). Preizkušane se deformira tudi v prečni smeri:

$$E \frac{\gamma_{22}}{2} = E \frac{\gamma_{33}}{2} = -\frac{p_{11}}{m} = -\nu p_{11} \quad (8)$$

m imenujemo Poissonova konstanta, ν pa Poissonovo število. Iz (7) in (8) sklepamo, da pri večosni obremenitvi velja zveza:

$$\frac{\gamma_{11}}{2} = \frac{p_{11}}{E} - \nu \frac{p_{22}}{E} - \nu \frac{p_{33}}{E}$$

oziroma

$$E \frac{\gamma_{11}}{2} = (1 + \nu)p_{11} - \nu I_1,$$

splošno pa za vsako glavno smer:

$$E \frac{\gamma_{ii}}{2} = (1 + \nu)p_{ii} - \nu I_1 \quad (9)$$

S transformacijsko formulo lahko izrazimo komponente deformacijskega tenzorja v poljubnem koordinatnem sistemu:

$$\gamma_{mn} = \frac{2}{E} [(1 + \nu)p_{mn} - \nu I_1 \delta_{mn}], \quad (10)$$

ker je γ_{mn} Kroneckerjev simbol ($= 1$, če je $m = n$, sicer je 0).

Enačbo (10) lahko tudi obrnemo in izrazimo komponente napetostnega tenzorja kot linearno funkcijo komponent deformacijskega tenzorja

$$p_{mn} = \frac{E}{1 + \nu} \left(\frac{\gamma_{mn}}{2} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \varepsilon_v \delta_{mn} \right). \quad (11)$$

3. OSNOVNE ENAČBE ZA IZRAČUN TEMPERATURNIH NAPETOSTI V ELASTIČNEM PODROČJU

Če homogeno in izotropno telo enakomerno segreje ali ohladimo od poljubne izhodiščne temperature na neko drugo temperaturo, so temperaturni specifični raztezki ε_T v vseh smereh enako veliki

$$\varepsilon_T = \alpha T \quad (12)$$

Pri tem je α temperaturni koeficient dolžinskega raztežka, T pa sprememba temperature. Ustrezen deformacijski tenzor je torej izotropen in se glasi:

$$\Gamma_T = \begin{bmatrix} 2\alpha T & 0 & 0 \\ 0 & 2\alpha T & 0 \\ 0 & 0 & 2\alpha T \end{bmatrix} \quad (13)$$

Če preprečimo prosto temperaturno raztezanje z zunanjim vpetjem ali okoliškimi območji v telesu (z drugačno temperaturo), nastopijo temperaturne napetosti, ki ustrezajo elastičnim deformacijam. Celotni raztezek snovi je sestavljen iz elastičnega raztežka in temperaturne raztežka. Od tod sledi, da se elastični deformacijski tenzor zapiše:

$$\Gamma_{el} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} - 2\alpha T & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} - 2\alpha T & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} - 2\alpha T \end{bmatrix} \quad (14)$$

Pri popolnoma togem vpetju je $\gamma_{mn} \equiv 0$ in je $\Gamma_{el} = -\Gamma_T$. Pri popolnoma neoviranem raztezanju in pri homogenem temperaturnem polju pa so vse komponente tenzorja Γ_{el} enake 0.

Hookeov zakon (11) se ob prisotnosti temperaturnih raztezkov glasi:

$$p_{mn} = 2G \left(\frac{\gamma_{mn}}{2} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \varepsilon_v \delta_{mn} - \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \alpha T \delta_{mn} \right) \quad (15)$$

Vpeljali smo strižni modul G , ki je z modulom elastičnosti povezan z enačbo

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (16)$$

V primeru, ko lahko volumske sile zanemarimo, se gibalna enačba za elastični kontinuum zapiše:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; \quad (17)$$

ρ je gostota snovi, t pa čas.

Če vstavimo Hookeovo enačbo (15) v gibalno enačbo (17) in pri tem upoštevamo (6), dobimo:

$$\Delta u_i + \frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_i} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{2(1 + \nu)}{1 - 2\nu} \frac{\partial(\alpha T)}{\partial x_i} \quad (18)$$

Δ je Laplaceov operator $\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$.

V cilindričnih koordinatah se te enačbe zapišejo za osnosimetrični primer takole:

— gibalna enačba za radialno smer:

$$\frac{\partial p_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(p_{rr} - p_{\theta\theta}) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (19 a)$$

— gibalna enačba za aksialno smer:

$$\frac{\partial p_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} + \frac{p_{rz}}{r} = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (19 b)$$

— komponente deformacijskega tenzorja:

$$\gamma_{rr} = 2 \frac{\partial u}{\partial r}, \gamma_{\varphi\varphi} = 2 \frac{u}{r}, \gamma_{zz} = 2 \frac{\partial w}{\partial z}, \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \quad (20)$$

ostale so 0

— volumska dilatacija:

$$\epsilon_v = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (20 \text{ a})$$

Namesto enačbe (18) imamo:

$$\Delta u - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial r} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial(\alpha T)}{\partial r} \quad (21 \text{ a})$$

$$\Delta w + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial z} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial(\alpha T)}{\partial z} \quad (21 \text{ b})$$

Laplaceov operator ima obliko:

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (22)$$

V krogelnih koordinatah se enačbe zapišejo za primer simetrije glede na koordinatno izhodišče takole:

— gibalna enačba za radialno smer:

$$\frac{\partial p_{rr}}{\partial r} + \frac{2}{r} (p_{rr} - p_{\varphi\varphi}) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad p_{\theta\theta} = p_{\varphi\varphi} \quad (23)$$

— komponente deformacijskega tenzorja:

$$\gamma_{rr} = 2 \frac{\partial u}{\partial r}, \gamma_{\varphi\varphi} = \gamma_{\theta\theta} = 2 \frac{u}{r}, \quad (24)$$

ostale so 0

— volumska dilatacija:

$$\epsilon_v = \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{u}{r} \quad (24 \text{ a})$$

Namesto enačbe (18) imamo

$$\Delta u - \frac{2u}{r^2} - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial(\alpha T)}{\partial r} \quad (25)$$

Laplaceov operator pa se glasi:

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right). \quad (26)$$

4. PRIMERI

Reševanje splošnega sistema parcialnih diferencialnih enačb (18), (21 a) in (21 b) ter (25) je zahtevna naloga. Poenostavitev dobimo v kvazistacionarnem primeru, ko je pospešek $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ tako majhen, da ga lahko zanemarimo. Dodatno poenostavitev dobimo, če lahko privzamemo ravninsko stanje deformacij.

Osnosimetrično spreminjanje temperature valjastega telesa

Dolg votel valj z notranjim polmerom R_n in zunanjim polmerom R_z naj bo ogrevan ali ohlajen tako, da je temperatura odvisna le od polmera in časa, vendar naj velja kvazistacionarni približek. Obe osnovni ploskvi naj bosta togo vpeti.

Pri teh pogojih je $\gamma_{rz} = 0$ in se vse napetosti izražajo s pomiki u v radialni smeri. Ker so tudi v cilindričnem koordinatnem sistemu posamezne koordinatne smeri

med seboj pravokotne, lahko uporabimo enačbo (15) in dobimo:

$$p_{rr} = \frac{2G}{1-2\nu} \left[(1-\nu) \frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{r} \right] - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (27)$$

$$p_{\varphi\varphi} = \frac{2G}{1-2\nu} \left[(1-\nu) \frac{u}{r} + \nu \frac{\partial u}{\partial r} \right] - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \quad (28)$$

$$p_{zz} = \frac{2G}{1-2\nu} \nu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) - \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \equiv \nu(p_{rr} + p_{\varphi\varphi}) - E\alpha T. \quad (29)$$

Enačba (21) se poenostavi v obliko

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (30)$$

Leva stran te enačbe se da zapisati v obliki

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (ru) \right] \right\}$$

in je zato mogoče diferencialno enačbo (20) rešiti z integriranjem. Splošna rešitev je

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\alpha}{r} \int_{R_n}^r x T(x, t) dx \quad (31)$$

C_1 in C_2 sta integracijski konstanti. Določimo ju tako, da na notranji in zunanji površini postavimo $p_{rr} = 0$. Iz enačbe (27) sledi, da mora biti izpolnjena enačba

$$C_1 - (1-2\nu) \frac{C_2}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} (1-2\nu) \frac{\alpha}{r^2} \int_{R_n}^r x T(x, t) dx$$

za $r = R_n$ in $r = R_z$. Od tod sledi

$$C_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} (1-2\nu) \frac{\alpha}{2} \bar{T}(R_z, t); \quad C_2 = \frac{R_n^2}{1-2\nu} C_1, \quad (32)$$

pri čemer je

$$\bar{T}(r, t) = \frac{2}{r^2 - R_n^2} \int_{R_n}^r x T(x, t) dx \quad (33)$$

povprečna temperatura (poprečenje po ploskvi) med R_n in r .

S pomočjo enačb (27), (28) in (29) potem dobimo:

$$p_{rr} = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \left(1 - \frac{R_n^2}{r^2} \right) [\bar{T}(R_z, t) - \bar{T}(r, t)] \quad (34)$$

$$p_{\varphi\varphi} = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} \left[\left(1 + \frac{R_n^2}{r^2} \right) \bar{T}(R_z, t) + \left(1 - \frac{R_n^2}{r^2} \right) \bar{T}(r, t) - 2T(r, t) \right] \quad (35)$$

$$p_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\nu \bar{T}(R_z, t) - T(r, t) \right] \quad (36)$$

Če je valj poln, je $R_n = 0$ in $C_2 = 0$, pa dobimo

$$p_{rr} = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} [\bar{T}(R_z, t) - \bar{T}(r, t)] \quad (37)$$

$$p_{\varphi\varphi} = \frac{E\alpha}{2(1-\nu)} [\bar{T}(R_z, t) + \bar{T}(r, t) - 2T(r, t)] \quad (38)$$

$$p_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\nu \bar{T}(R_z, t) - T(r, t) \right] \quad (39)$$

Če ima potek temperature v odvisnosti od polmera obliko kvadratne parabole (ta predpostavka je dokaj dobro izpolnjena v trenutku, ko je razlika med temperaturo na površini in v sredini velja največja), lahko zapišemo

$$T = ar^2 + b, \quad (40)$$

pri čemer je $a = \frac{T_z + T_n}{R_z^2}$, $b = T_n$ (T_n je temperatura v sredini valja, T_z pa na površini valja).

Povprečni temperaturi $\bar{T}(r, t)$ in $\bar{T}(R_z, t)$ izračunamo po prilagojenem obrazcu (33) in dobimo

$$\bar{T}(r, t) = \frac{T_z - T_n}{2R_z^2} r^2 + T_n \quad (41)$$

$$\bar{T}(R_z, t) = \frac{T_n + T_z}{2} \quad (42)$$

Če ta dva izraza vstavimo v enačbe (37), (38) in (39), dobimo

$$p_{rr} = \frac{E\alpha(T_z - T_n)}{4(1-\nu)} \left[1 - \frac{r^2}{R_z^2} \right] \quad (43)$$

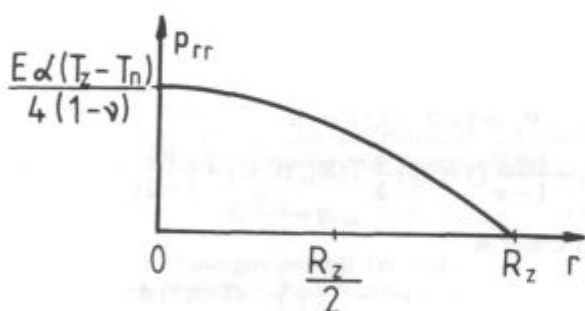
$$p_{\varphi\varphi} = \frac{E\alpha(T_z - T_n)}{4(1-\nu)} \left[1 - 3\frac{r^2}{R_z^2} \right] \quad (44)$$

in

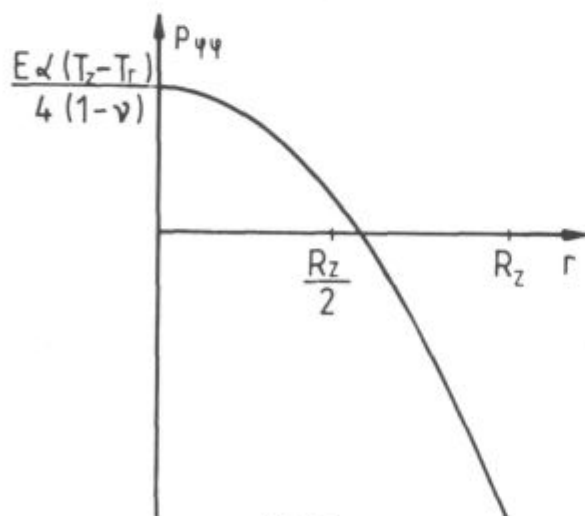
$$p_{zz} = \frac{E\alpha}{1-\nu} \left[\nu \frac{T_n + T_z}{2} - T_n - \frac{T_z - T_n}{R_z^2} r^2 \right] \quad (45)$$

Če je $T_n = T_z$, preide enačba (45) v znani izraz $p_{zz} = -E\alpha T_n$. Negativne napetosti imajo tlačni značaj, pozitivne pa natezni značaj.

Poteka p_{rr} in $p_{\varphi\varphi}$ v odvisnosti od polmera sta prikazana na sliki 2 in 3.



Slika 2
Potek radialne normalne napetosti p_{rr} v odvisnosti od polmera
Fig. 2
Course of radial normal stress p_{rr} as a function of radius



Slika 3
Potek cirkularne normalne napetosti $p_{\varphi\varphi}$ v odvisnosti od polmera
Fig. 3
Course of circular normal stress $p_{\varphi\varphi}$ as a function of radius

Če sta obe osnovni ploskvi valja prosti, lahko dobimo rešitev tako, da prištejemo k rešitvi (36), (39) ali (45) po preseku konstantno aksialno napetost $(p_{zz})_0$, ki mora biti tolikšna, da se rezultirajoča aksialna sila uniči². Temu pogoju ustreza negativna povprečna vrednost napetosti p_{zz} po enačbah (36), (39) ali (45).

$$(p_{zz})_0 = \bar{p}_{zz} = -\frac{2}{R_z^2} \int_0^{R_z} r p_{zz}(r) dr \quad (46)$$

Če se omejimo na rezultat enačbe (45), dobimo

$$(p_{zz})_0 = E\alpha \frac{T_z + T_n}{2}$$

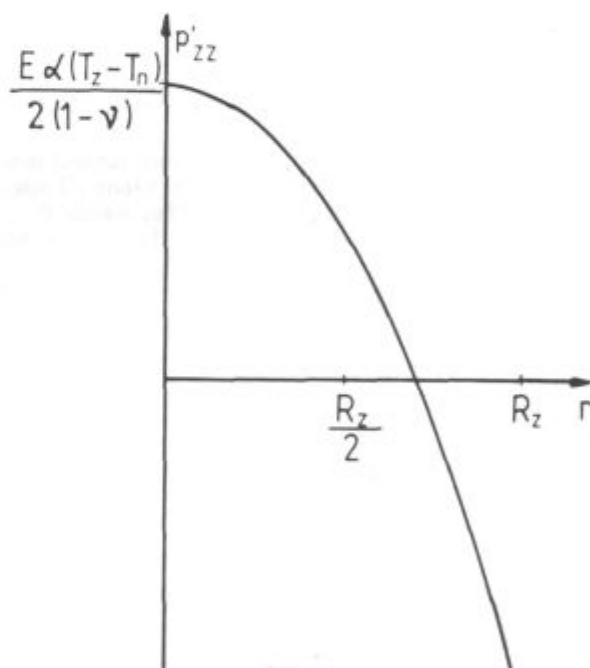
in je pri prostih osnovnih ploskvah valja odvisnost aksialne normalne napetosti p_{zz} od polmera takale:

$$p_{zz} = \frac{E\alpha(T_z - T_n)}{2(1-\nu)} \left(1 - 2\frac{r^2}{R_z^2} \right) \quad (47)$$

Na osnovi enačb (43) in (44) vidimo, da je

$$p_{zz} = p_{rr} + p_{\varphi\varphi}$$

Radialna in cirkularna napetost zaradi tega postopka nista prizadeti, rezultati pa po St.-Venantovem principu veljajo le v dovolj veliki oddaljenosti od obeh osnovnih ploskev. Potek napetosti p_{zz} v odvisnosti od polmera je prikazan na sliki 4.

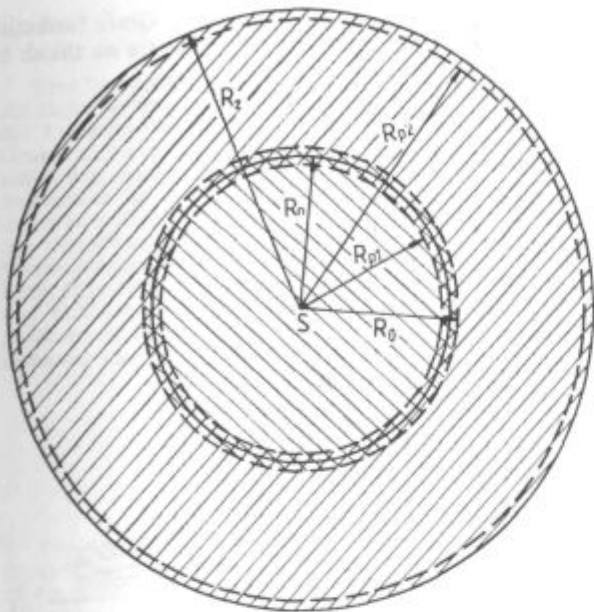


Slika 4
Potek aksialne normalne napetosti p_{zz} v odvisnosti od polmera
Fig. 4
Course of axial normal stress p_{zz} as a function of radius

Navlačenje plašča na os

Na os navlečemo plašč valja. Pri tem naj bo polmer osi za ΔR večji, kot je notranji polmer plašča (slika 5). Kolikšne napetosti pri tem nastanejo?

Nalogo rešimo s pomočjo rezultatov v 1. primeru. Če ni temperaturnih razlik, odpadejo v enačbah (27), (28), (29) in (30) vsi členi, ki vsebujejo temperaturo. Zaradi tega se pomiki točk v radialni smeri zapišejo za plašč



Slika 5

Spremembe dimenzij po navlačenju plašča na os valja

Fig. 5

Dimensional changes in pulling a casing on a cylindrical axis

za os pa
$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r}, \quad (48)$$

$$u' = C_1' r \quad (49)$$

Integracijske konstante določimo iz naslednjih treh pogojev:

a) pri $r = R_n: u - u' = R_0 - R_{p1} = \Delta R$

b) pri $r = R_n: (p_{rr})_{os} = (p_{rr})_{pl}$

c) pri $r = R_2: (p_{rr})_{pl} = 0$

Ob privzetku, da imata os in plašč enake elastične lastnosti, dobimo

$$C_1' = (1 - 2\nu) \frac{R_n \Delta R}{2(1 - \nu)} \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_n^2} \right)$$

$$C_1 = (1 - 2\nu) \frac{R_n \Delta R}{2R_2^2 (1 - \nu)}, \quad C_2 = \frac{R_n \Delta R}{2(1 - \nu)}$$

Sledijo enačbe za normalne napetosti - v osi

$$\left. \begin{aligned} p_{rr} &= G \frac{R_n \Delta R}{1 - \nu} \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_n^2} \right) = p_{\phi\phi} \\ p_{zz} &= 2G \frac{\nu}{1 - \nu} R_n \Delta R \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_n^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

če sta osnovni ploskvi toga vpeti - v plašču

$$\left. \begin{aligned} p_{rr} &= G \frac{R_n \Delta R}{1 - \nu} \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{r^2} \right), \\ p_{\phi\phi} &= G \frac{R_n \Delta R}{1 - \nu} \left(\frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{r^2} \right), \end{aligned} \right\}$$

$$p_{zz} = 2G \frac{\nu}{1 - \nu} \frac{R_n \Delta R}{R_2^2}, \quad (51)$$

če sta obe osnovni ploskvi toga vpeti.

Iz (50) in (51) je razvidno, da imajo radialne napetosti povsod tlačni značaj, cirkularne in aksialne napetosti pa imajo v osi tlačni značaj, v plašču pa natezni značaj. V osi so vse napetosti neodvisne od kraja, v plašču pa to velja le za aksialno napetost. Če sta obe osnovni ploskvi prosti, ravnamo tako, kot je opisano v 1. primeru in so aksialne napetosti identično enake 0. Najbolj kritične so cirkularne napetosti v plašču neposredno ob stiku z osjo. Od tod dobimo oceno

$$\Delta R < \frac{\sigma_{dop} (1 - \nu)}{G R_n \left(\frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_n^2} \right)} \quad (52)$$

Navlačenje izvedemo tako, da plašč segrejemo za

$$\Delta T > \frac{\Delta R}{\alpha R_n} \quad (53)$$

Če plašč navlečemo na cev, se radialni pomiki točk v cevi zapišejo

$$u' = C_1' r + C_2' / r$$

in je zato potreben še robni pogoj ob notranji površini cevi

d) za $r = R_{nc}: p_{rr} = p_{os}$,

sicer je račun podoben kot zgoraj.

Središčno simetrično spreminjanje temperature krogle

Polna krogla s polmerom R naj ima glede na središče simetrično, sicer pa poljubno porazdelitev temperature $T(r, t)$. Velja naj kvazistacionarni približek. Zanimajo nas napetosti v krogli, če je njena površina prosta. Enačba (25) se poenostavi v

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{\partial(\alpha T)}{\partial r} \quad (54)$$

Levo stran te enačbe lahko zapišemo

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) \right] \right\}$$

in se zato diferencialna enačba (54) da rešiti z zaporednim integriranjem. Splošna rešitev je

$$u = \frac{C_1 r}{3} + \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha \frac{1}{r^2} \int_0^r x^2 T(x, t) dx \quad (55)$$

Integracijsko konstanto C_1 določimo iz pogoja $(p_{rr})_{r=R} = 0$, pri tem pa poiščemo p_{rr} z uporabo enačbe (15)

$$p_{rr} = 2G \left(\frac{\gamma_{rr}}{2} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \epsilon_v - \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \alpha T \right); \quad (56)$$

γ_{rr} in ϵ_v sta določena z enačbama (24) in (24 a). Dobimo

$$C_1 = 2 \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \alpha \bar{T}(R, t), \quad (57)$$

pri čemer je

$$\bar{T}(R, t) = \frac{3}{R^3} \int_0^R x^2 T(x, t) dx \quad (58)$$

Končni rezultat za p_{rr} je

$$p_{rr} = \frac{2}{3} \frac{E \alpha}{1 - \nu} [\bar{T}(R, t) - \bar{T}(r, t)] \quad (59)$$

(51) Na podoben način dobimo

$$\begin{aligned} p_{\phi\phi} &= \frac{1}{3} \frac{E \alpha}{1 - \nu} 2 [\bar{T}(R, t) + \bar{T}(r, t) - 3 T(r, t)] = \\ &= p_{\phi\phi} \end{aligned} \quad (60)$$

Če poznamo funkcijo $T(r, t)$, lahko izračunamo p_{rr} in $p_{\theta\theta}$. $T(r, t)$ je mogoče v nekaterih primerih tudi izračunati z reševanjem difuzijske enačbe za prevajanje toplote

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T, \quad a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (61)$$

λ je toplotna prevodnost, c pa specifična toplota materiala, po katerem se širi toplota. V primeru krogelne simetrije temperaturnega polja se enačba (61) zapiše:

$$\frac{a}{r} \frac{\partial^2(r T)}{\partial r^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (62)$$

To enačbo je mogoče analitično rešiti za tak idealiziran primer: krogla z začetno enakomerno temperaturo T_0 se ohlaja v sredstvu s temperaturo 0 (temperaturno skalo si mislimo prilagojeno tako, da njeno izhodišče sovpada s temperaturo hladilnega sredstva). Toplotna prestopnost med kroglo in hladilnim sredstvom naj bo neskončno velika, kar pomeni, da površina krogle takoj na začetku ohlajanja doseže temperaturo kopeli.

Enačbo (62) rešimo z ločitvijo spremenljivk, to je z nastavkom

$$\begin{aligned} T &= P(t) Q(r) \\ P(t) &= e^{-\beta_n t} \end{aligned} \quad (63)$$

Za $Q(r)$ dobimo potem diferencialno enačbo

$$\frac{\partial^2(r Q)}{\partial r^2} + \frac{\beta_n}{a} (r Q) = 0 \quad (64)$$

Njena splošna rešitev je

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{r} \sin\left(\sqrt{\frac{\beta_n}{a}} r\right).$$

Tu je že upoštevana zahteva, da mora biti rešitev končna pri $r=0$. Pri $r=R$ mora biti $Q=0$, iz česar sledi

$$\sqrt{\frac{\beta_n}{a}} R = n\pi, \text{ oziroma } \sqrt{\frac{\beta_n}{a}} = \frac{n\pi}{R} \quad (65)$$

Koeficiente določimo tako, da je izpolnjen začetni pogoj

$$T_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{r} \sin \frac{n\pi}{R} r \quad (66)$$

Če enačbo (66) pomnožimo z $r \sin\left(\frac{n\pi}{R} r\right) dr$ in integriramo od $r=0$ do $r=R$, sledi zaradi ortonormiranosti trigonometričnih funkcij

$$A_n = \frac{2T_0 R}{n\pi} (-1)^{n+1}. \quad (67)$$

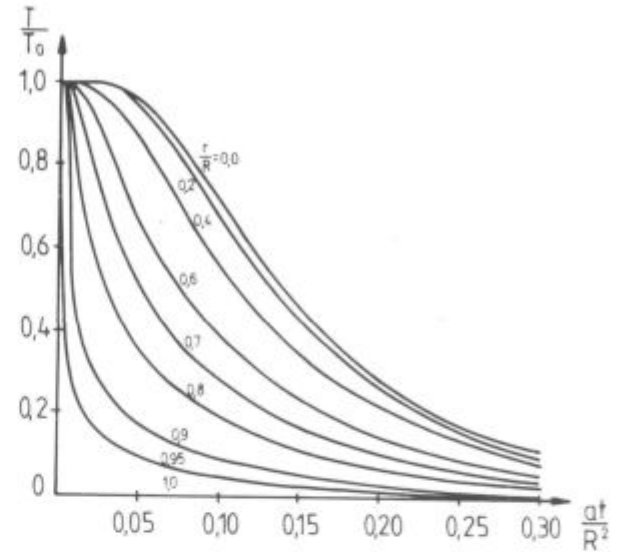
Končna rešitev enačbe (62) je torej

$$T(r, t) = \frac{2T_0 R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin \frac{n\pi r}{R} e^{-\alpha n^2 \pi^2 t / R^2} \quad (68)$$

Ta vrsta je enakomerno konvergentna tako glede spremenljivke t kot glede spremenljivke r . Po obrazcu (58) dobimo iz enačbe (68)

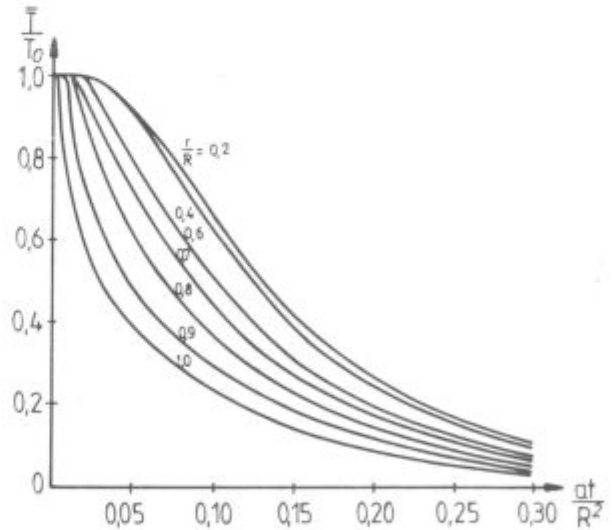
$$\begin{aligned} \bar{T}(r, t) &= 6 T_0 \left(\frac{R}{\pi r}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \left(\cos \frac{n\pi r}{R} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{R}{n\pi r} \sin \frac{n\pi r}{R}\right) e^{-\alpha n^2 \pi^2 t / R^2} \end{aligned} \quad (69)$$

S tem lahko izračunamo p_{rr} in $p_{\theta\theta} = p_{\phi\phi}$. Grafa funkcije $T(r, t)$ in $\bar{T}(r, t)$ v brezdimenzijski obliki sta na slikah 6 in 7.



Slika 6
Potek temperature krogelne površine med ohlajanjem v odvisnosti od kraja in časa (v brezdimenzijski obliki)

Fig. 6
Temperature changes in a sphere during cooling as a function of position and time (in dimensionless form)



Slika 7
Potek povprečne temperature notranjosti krogelne površine med ohlajanjem v odvisnosti od časa (v brezdimenzijski obliki)

Fig. 7
Change of the average temperature in the interior of the sphere during cooling, depending on time (in dimensionless form)

Literatura

1. F. Sturm in R. Harreither: Berechnung von Wärmespannungen mit der Methode der finiten Elemente, Arch. Eisenhüttenwes. 47 (1976), št. 6, str. 357
2. H. Parkus: Stationäre Wärmespannungen, Springer Verlag, Dunaj 1959

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Beschreibung der Spannungen im elastischen Bereich mit Hilfe des Spannungstensors wird gegeben. Die Bedeutung der Komponenten des Verformungstensors wird gezeigt. Auf Grund der experimentell festgestellten Verbindungen zwischen den Spannungen und Verformungen bei einachsiger Zugversuch ist die Verbindung zwischen den Komponenten dieser zwei Tensoren ausgeführt worden. Mit der Erweiterung des Verformungstensors für den Fall wo auch eine isotrope Temperaturexpansion des Werkstoffes anwesend ist wird noch allgemeine lineare Verbindung zwischen Spannungen und Verformungen angegeben. Zusammen mit der Bewegungsgleichung für den elastischen Kontinuum dient diese für die Berechnung der Temperaturspannungen. Entsprechende Diffe-

renzialgleichungen werden auch in zylindrischen und Kugelkoordinaten angegeben. Unter den praktischen Beispielen wird die Entstehung der Spannungen wegen der achsensymmetrischen Temperaturänderung des zylindrischen Körpers, Spannungen im Falle des Aufziehens eines Mantels auf die Achse des Zylinders, und die Entstehung der Spannungen wegen der vom Mittelpunkt ausgehenden symmetrischen Temperaturänderung einer Kugel. Die analytische Methode ist für die Lösung der Differenzialgleichungen angewendet worden. Äußere mechanische Einflüsse werden nicht berücksichtigt, jedoch ist aus den gelösten Beispielen zu entnehmen wie zum Beispiel hydrostatischer Druck berücksichtigt werden konnte.

SUMMARY

The description of stresses in an elastic continuum by a stress tensor is presented. The significance of the components of the strain tensor is also given. Based on the experimentally determined correlations between the stresses and strains at uniaxial tensile test the correlation between the components of the two tensors was deduced. By extending the strain tensor on the case where also isotropical temperature expansion of material is present, even a more general linear correlation between the stresses and the strains is given. Together with the motive equation for the elastic continuum it can be applied in calculating the temperature stresses. Corresponding differen-

tial equations are given also for cylindrical and spherical coordinates. As practical examples the appearance of stresses due to axially symmetric variation of temperature in a cylinder, the stresses appearing in pulling-on a casing over a cylindrical axis, and the appearance of stresses due to centre symmetrical variation of temperature in a sphere were calculated. Analytical method for solving differential equations was applied. External mechanical influences are not taken in account, but the solved examples show how e. g. hydrostatic pressure could be taken in account.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание напряжения в эластичном континууме при помощи напряжения упругости. Рассмотрено значение компонент деформационной упругости. На основании экспериментально установленной связи между напряжением и деформацией при одноосевом натяжном опыте выведена связь между компонентами этих двух упругостей.

С расширением деформационной упругости, нпр. когда присутствует также изотропно температурное растяжение материала, приведена ещё более в общем виде линейная связь между напряжением и деформацией. Вместе с движущим уравнением для эластичного континуума служит для вычисления температурных напряжений.

Соответственные дифференциальные уравнения при-

ведены также в форме цилиндрических и шарообразных координат.

Между практическими примерами рассматривается появление напряжения вследствие осесимметричного изменения температуры цилиндрического тела, напряжения на примере натягивания корпуса на ось вала, также наступления напряжений вследствие центрально симметричного изменения температуры шара.

Употреблён аналитический метод решения дифференциальных уравнений. Внешние механические влияния не были приняты во внимание, хотя из разрешённых примеров можно видеть, что не представляло бы препятствия, если бы, например, учитывали гидростатическое давление.



Ohlajanje jeklenega valja na vozičku

BOŽIDAR BRUDAR

UDK: 536.:621.771.07

ASM/SLA: 12, W23k, PMJ

UVOD

Gre za študij prenosa toplote z jeklenega bloka v okolico s sevanjem. Pri tem predpostavljamo, da gre za sevanje sivih površin in da so v okolici druga siva telesa z različno orientiranimi ploskvami glede na jekleni blok.

Za primer smo izbrali ohlajanje jeklenega valja, ki se nahaja nad vozičkom, ki je prekrit s plastjo šamota. Gre za prenos toplote s površine valja na ravno ploskev končnih dimenzij, ki se nahaja blizu valja. Takšen primer srečamo v železarni Štore.

Uliti valj namreč naložijo na poseben voziček in ga porinejo v žarilno peč, da se homogeno pregreje na temperaturo od 800 do 1000°C.

Po končanem žarjenju potegnejo voziček z valjem iz peči in ga hladijo na zraku. Da bi postopek pospešili, si pomagajo še s pihanjem na valj s stisnjenim zrakom.

Od hitrosti ohlajanja valja je odvisna tudi struktura v valju. Za cilj raziskovalne naloge smo si postavili izdelavo računalniškega programa za prenos toplote pri ohlajanju valja na vozičku. Praktične meritve časovnega poteka temperature na površini valja in vozička so opravili sodelavci železarne Štore, FNT in MI, mi pa smo izdelali še računalniški program za simuliranje ohlajanja valja in vozička.

Za začetek smo izdelali dvoimenzionalni model. Z njim smo preizkusili samo metodo in se prepričali, da tudi problem v treh dimenzijah ne bi predstavljal nobenih posebnih težav. Rešitev je zelo zanimiva s stališča matematične fizike, saj obravnava kombinacijo sevalnega in konvekcijskega robnega pogoja v dveh različnih koordinatnih sistemih. S pomočjo računalniškega programa je mogoče variirati fizikalne lastnosti in dimenzije valja in vozička in vnaprej analizirati pogoje ohlajanja pri predpostavljenih emisijskih koeficientih obeh površin.

Problem reševanja parcialne diferencialne enačbe za prenos toplote v takih pogojih je nelinearen, pa kljub temu rešljiv z opisano interakcijsko metodo.

REŠEVANJE TOPLOTNE ENAČBE

Problem obravnavamo v dveh dimenzijah:

Preko krožnega preseka valja si mislimo napeto cilindrično mrežo, preko pravokotniškega prereza izolirne plasti na vozičku pa pravokotno mrežo. Zaradi simetrije problema obravnavamo le eno polovico mreže.

Mrežna razdalja na vozičku v obeh smereh naj bo enaka mrežni razdalji pri valju v radialni smeri. Časovni korak v cilindrični mreži določimo s pomočjo stabilnostnega kriterija, iz predpostavljenega krajevnega koraka v smeri kota in izbranega krajevnega koraka v radialni smeri.

Toplotna prevodnost in specifična toplota naj se ne spreminjata s temperaturo niti pri valju niti pri vozičku. (Iz rezultatov prejšnjih obdelav pa se lahko prepričamo, da temperaturna odvisnost ne bi predstavljala prevelikega problema).

Emisijska koeficienta površine valja in vozička sta lahko različna.

Okolica naj ima stalno temperaturo, tudi konvekcijski koeficient naj bo konstanten.

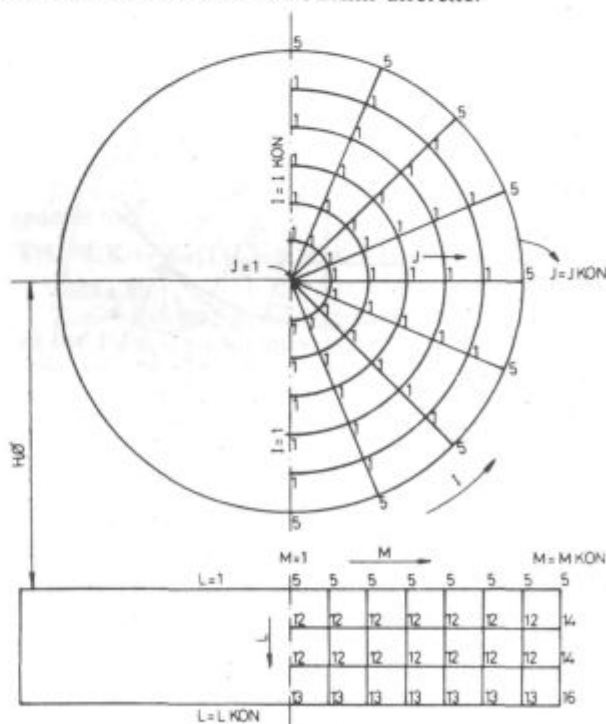
Začetna temperatura v prerezu valja naj bo povsod enaka ali pa naj se spreminja po nekem znanem predpisu. Začetna temperatura v prerezu šamotne plasti na vozičku pa naj pada eksponentialno.

Okolica ima »črno« površino in je stalno ogreta na temperaturo TOK.

Enačba za prevajanje toplote, ki velja znotraj valja

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \cdot \frac{\partial T}{\partial r'} + \frac{1}{r'^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = \frac{RO \cdot CP}{PR} \cdot \frac{\partial T}{\partial t'}$$

Enačbo zapišemo v brezdimenzijski obliki in rešujemo numerično z metodo končnih diferenc.



Slika 1
Cilindrična in pravokotna mreža
Fig.1
Cylindrical and rectangular net

Vpeljemo referenčno dolžino $R\varnothing$, ki je lahko kar enaka $R\varnothing = 1$ meter, in referenčni čas $T\varnothing = 1$ sekunda, da lahko zapišemo enačbo v brezdimenzijski obliki:

$$r = \frac{r'}{R\varnothing} \quad t = \frac{t'}{T\varnothing}$$

$$\nabla^2 T = \frac{R\varnothing \cdot R\varnothing \cdot R\varnothing \cdot CP}{PR \cdot T\varnothing} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Vpeljemo

$$C = \frac{R\varnothing \cdot R\varnothing \cdot R\varnothing \cdot CP}{PR \cdot T\varnothing}$$

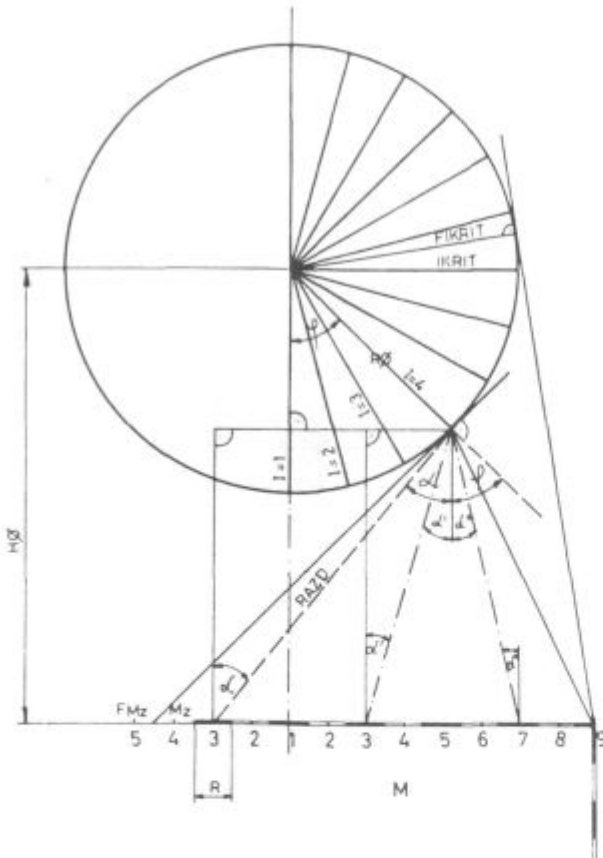
Enačbo (1) zapišemo v diferencialni obliki za cilindrični koordinatni sistem (slika 1), v katerem naraščajo indeksi I v smeri kota φ , indeksi J pa v smeri polmera in indeksi K v smeri časa.

V točki (I, J) lahko temperaturo v (K+1) trenutku zapišemo v obliki:

$$T(I, J, K+1) = T(I, J, K) \cdot \left[1 - \frac{K}{C} \left(\frac{2}{R^2} + \frac{2}{R^2(J-1)^2 \cdot FI^2} \right) \right] +$$

$$+ T(I, J+1, K) \cdot \left[\frac{K}{C} \cdot \left(\frac{1}{R^2} + \frac{1}{2R^2(J-1)} \right) \right] +$$

$$+ T(I, J-1, K) \cdot \left[\frac{K}{C} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{2R^2(J-1)} \right) \right] +$$



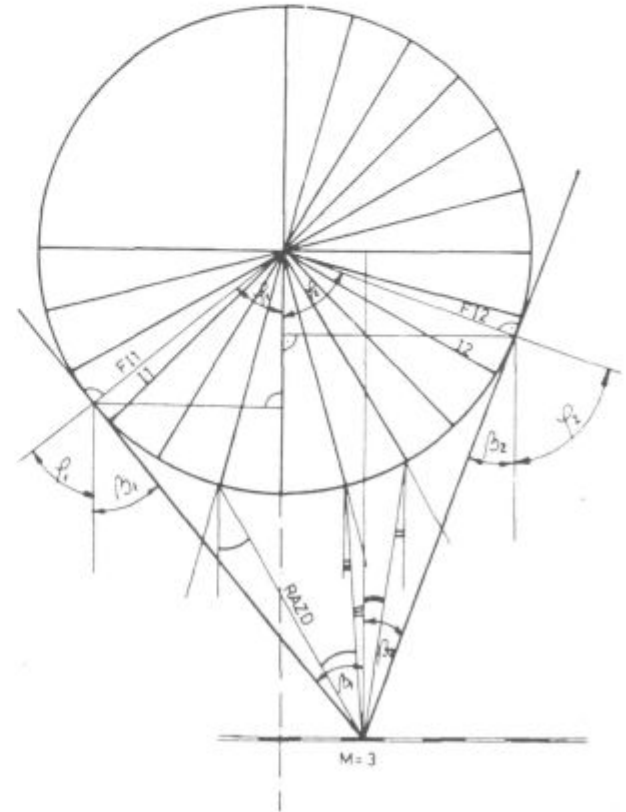
Slika 2
Določanje faktorja vidnosti za točke na površini valja

Fig. 2
Determination of the view factor for the points on the cylindrical surface.

$$+ T(I+1, J, K) \cdot \left[\frac{K}{C} \cdot \frac{1}{(J-1)^2 \cdot R^2 \cdot FI^2} \right] +$$

$$+ T(I-1, J, K) \cdot \left[\frac{K}{C} \cdot \frac{1}{(J-1)^2 \cdot R^2 \cdot FI^2} \right] \quad (2)$$

Pri tem pomenijo R, FI, K brezdimenzijske korake v smereh polmera, kota in časa.



Slika 3
Določanje faktorja vidnosti za točke na vozičku

Fig. 3
Determination of the view factor for the points on the horizontal plane

Enačba, ki velja za središče krožnega prereza

Okrog središča prereza valja si mislimo narisani krog¹ s polmerom R in uporabimo naslednji izraz:

$$\nabla^2 T(I, J, K) = \frac{4T_m - T(I, J, K)}{R^2},$$

pri čemer je T_m srednja vrednost temperatur na krožnici s polmerom R:

$$T_m = \frac{2 \sum_{l=2}^{IKON-1} T(I, 2, K) + T(1, 2, K) + T(1, IKON, 2, K)}{2 \cdot (IKON - 1)}$$

$$T(I, J, K+1) = T(I, J, K) \cdot \left[1 - \frac{4 \cdot K}{CR^2} \right] + 4 \cdot T_m \cdot \frac{K}{CR^2} \quad (3)$$

Enačba za prevajanje toplote v šamotni plasti na vozičku

Mrežni razdalji v vodoravni in navpični smeri naj bosta enaki mrežni razdalji v radialni smeri pri valju. Za ta primer dobimo:

$$T(L, M, K + 1) = T(L, M, K) \cdot \left[1 - \frac{KW}{CW \cdot R^2} \cdot 4 \right] + \frac{KW}{CW \cdot R^2} [T(L + 1, M, K) + T(L - 1, M, K) + T(L, M - 1, K) + T(L, M + 1, K)] \quad (4)$$

V pravokotni mreži narašča indeks L od zgoraj navzdol, M pa od leve proti desni.

$$CW = \frac{R \cdot \varnothing^2 \cdot ROW \cdot CPW}{PRW \cdot T \varnothing}$$

Stabilnostni kriterij za diferenčne enačbe

Upoštevati moramo kriterije, ki morajo biti izpolnjeni za izračun temperatur po metodi končnih diferenc v enačbah, ki veljajo za notranjost krožnega prereza, za samo središče in za pravokotno mrežo v prerezu šamotne plasti na vozičku.

Potrebni pogoj, ki mora biti izpolnjen v enačbi (2):

$$\frac{2K}{CR^2} \cdot \left[1 + \frac{1}{(J - 1)^2 FI^2} \right] \leq 1$$

Najbolj neugodna situacija je takrat, ko je J = 2. Zato mora veljati:

$$K \leq \frac{R^2 \cdot FI^2 \cdot C}{2(FI^2 + 1)} \quad (5)$$

Odločimo se za enačaj in pri izbrani vrednosti FI določimo največji časovni korak K:

$$K = \frac{R^2 \cdot FI^2 \cdot R \varnothing^2 \cdot RO \cdot CP}{2 \cdot (FI^2 + 1) \cdot PR \cdot T \varnothing} \quad (6)$$

V primeru pravokotne mreže pa mora veljati¹:

$$\frac{4KW}{CW \cdot R^2} \leq 1$$

Za časovni korak v šamotni plasti mora torej veljati:

$$KW \leq \frac{CW \cdot R^2}{4}$$

K in KW morata biti enaka.

Kdaj sta oba pogoja izpolnjena?

Če vzamemo pogoj za valj in izenačimo K = KW, mora veljati:

$$K = \frac{R^2 \cdot FI^2 \cdot C}{2 \cdot (1 + FI^2)} \leq \frac{CW \cdot R^2}{4}$$

oziroma

$$\frac{FI^2}{1 + FI^2} \leq \frac{ROW \cdot CPW \cdot PR \cdot 1}{RO \cdot CP \cdot PRW \cdot 2}$$

To pa je v primeru jeklenega valja in šamotne plasti na vozičku vedno izpolnjeno.

Odločimo se torej, da časovni korak K določimo iz pogoja (6), ki velja za notranjost krožnega prereza.

Središče krožnega prereza pa postavlja svojo omejitvev.

V diferenčni enačbi za izračunavanje temperature v središču mora namreč biti izpolnjen pogoj:

$$K \leq \frac{CR^2}{4} \quad (7)$$

To pa postavlja dodatne omejitve glede izbire mrežne razdalje FI, ki ne sme biti večja od 1.

Če je namreč FI v izrazu za K (5) ravno enak 1, je ravno še izpolnjen pogoj (7). Če pa bi bil FI večji od 1, pa pogoja (7) ne bi mogli več izpolniti.

Diferenčne enačbe v posameznih mrežnih točkah

Točka 1:

Uporabimo formulo (2).

Točka 4:

Uporabimo formulo (3).

Točka 12:

Uporabimo enačbo (4).

Točka 13:

Toplotni tok, ki priteka na površino iz notranjosti šamotne plasti, je enak koanvekcijskemu toplotnemu toku, ki odteka v okolico. Temperaturo v točki (L, M, K + 1) izračunamo po formuli:

$$T(L, M, K + 1) = \frac{PRW \cdot T(L - 1, M, K + 1) / R + ALPHA \cdot TOK}{ALPHA + PRW / R}$$

Točka 14:

Za temperature v teh točkah velja podoben izraz kot v točki 13:

$$T(L, M, K + 1) = \frac{PRW \cdot T(L, M - 1, K + 1) / R + ALPHA \cdot TOK}{ALPHA + PRW / R}$$

Točka 16:

Odločimo se za srednjo vrednost temperatur v sosednjih točkah:

$$T(L, M, K + 1) = [T(L - 1, M, K + 1) + T(L, M - 1, K)] / 2$$

Točka 5:

Tudi v točkah 5 bi želeli uporabiti enačbo (2) oziroma (4). Pri tem pa se pojavi težava: potrebovali bi temperaturo v točki, ki pa leži že za eno mrežno razdaljo stran od roba valja oziroma vozička. Te namišljene (fiktivne) vrednosti pa lahko izračunamo iz znanega izraza za toplotni tok, ki priteka na rob iz notranjosti. Ta pa je odvisen od emisijskega koeficienta površine valja, vozička in okolice, pa tudi od konvekcijskega koeficienta. Ker gre za sevanje sivega telesa, si oglejmo nekoliko podrobneje, katere zakonitosti veljajo v točkah 5.

Predpostavljamo, da je krožni obod prereza valja sestavljen iz mnogokotnikov s stranico Rϕ · FI. Krožnica naj predstavlja del vrtanega kroga v mnogokotniku. Na ta način problem nekoliko poenostavimo, kar je tudi smiselno, saj uporabljamo metodo končnih diferenc. Mrežna točka se nahaja v sredini te stranice mnogokotnika. Tudi posameznim točkam na površini vozička pripadajo posamezne daljice z dolžino R.

S ploskvice A, odteka toplotni tok, ki je sestavljen iz sevalnega toka (sivo telo) in odbitega sevanja, ki pade

na to ploskev z drugih ploskvic. Naj bo B_i gostota sevalnega toplotnega toka, ki izhaja iz ploskvice i :

$$B_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot \left[\sum_{j=1}^n F_{i,j} \cdot B_j + \sigma \cdot \text{TOK}^4 \cdot F_{ok,i} \right] \quad (8)$$

$\epsilon_i \sigma T_i^4$ predstavlja gostoto sevalnega toka zaradi temperature ploskvice, pri kateri znaša emisijski koeficient ϵ_i

$1 - \epsilon_i$ je koeficient odbojnosti. Sevanje, ki se odbije od ploskvice i , prihaja iz drugih ploskvic j .

Pri vsem tem smo predpostavili naslednje:

- emisijski koeficient ϵ_i ni odvisen od valovne dolžine,
- gre za difuzni odboj,
- temperatura se na majhni ploskvisi nič ne spreminja.

Tisti del toplote, ki jo »odnese« konvekcija, ne vpliva na gostoto sevalnega toka, ki bi padel na sosednje ploskve.

$F_{i,j}$ — faktor vidnosti

Po definiciji predstavlja $F_{i,j}$ med ploskvama A_i in A_j tisti del sevanja, ki ga oddaja ploskev A_i in ga sprejme ploskev A_j .
Velja:

$$A_i \cdot F_{i,j} = F_{j,i} \cdot A_j$$

Toplotni tok, ki odteka s ploskve j , je $B_j \cdot A_j$. Če to pomnožimo še s $F_{i,j}$, dobimo toplotni tok, ki ga je presegla ploskev i . V gostoti toka bi se to poznalo kot

$$\frac{B_j \cdot A_j \cdot F_{i,j}}{A_i} = \frac{B_i \cdot A_i \cdot F_{i,j}}{A_i}$$

ker je $A_j \cdot F_{j,i} = A_i \cdot F_{i,j}$.

Prav zaradi tega lahko tudi zapišemo prvi člen v oglatem oklepaju $F_{i,j} \cdot B_j$, ki predstavlja gostoto, ki pade na ploskev i s ploskve j .

Seveda pa pade na ploskev i tudi sevanje iz okolice. Poleg ploskvic na valju in na vozičku moramo upoštevati še okolico. V zaprtem prostoru, ki ga omejuje n ploskvic, mora veljati:

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} = 1 \quad (9)$$

Iz te relacije lahko določimo tudi $F_{ok,i}$, ki predstavlja del sevalnega toka, ki ga seva okolica s temperaturo TOK (ki je črna) in ki pade na ploskev i .

$F_{ok,i}$ določimo iz enačbe (9).

V našem primeru smo si predstavljali, da imamo na površini valja IKON ravnih ploskvic, ki ustrezajo stranicam z dolžino $R\theta$ oziroma R , če gre za površino vozička. Teh je pa MKON. Oboje se nanaša na del valja in vozička na desni strani simetrale po sliki 1. Upoštevati je treba naslednje:

Ploskvice na valju se med seboj ne »vidijo« in zato je $F_{i,j} = 0$, če pomenita indeksa i in j par ploskvic na valju. Prav tako ploskvisca i na valju ne »vidi« vozička, če je i večji od IKRIT.

Tudi ploskvice na vozičku se ne »vidijo« med seboj in ne »vidijo« tistih ploskvic j na valju, pri katerih je j večji od I1 ali I2. V vsakem primeru pa je $F_{ok} \neq 0$, pa naj valja za ploskev na valju ali pa na vozičku. Vedno ga lahko izračunamo iz formule (8).

Če pa upoštevamo še konvekcijo, zapišemo izraz za celotno gostoto toplotnega toka, ki izhaja iz ploskvice i , takole:

$$C_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot \left[\sum_j F_{i,j} \cdot B_j + \sigma \cdot \text{TOK}^4 \cdot F_{ok,i} \right] + \text{ALPHA} \cdot (T_i - \text{TOK}) \quad (10)$$

Prvi člen v enačbi (10) predstavlja gostoto toplotnega toka, ki ga seva ploskev i zaradi temperature ploskve T_i , drugi člen predstavlja gostoto odbitega sevalnega toka, ki prihaja iz okolice, tretji člen za gostoto toplotnega toka, ki ga »odnaša« konvekcija. ALPHA pomeni konvekcijski koeficient zaradi prisilne konvekcije pri pihanju s stisnjenim zrakom.

V enačbi (10) je zapisan izraz za gostoto toka le za eno ploskvico z oznako i , ki naj leži bodisi na valju ali na vozičku. V resnici bi morali zapisati toliko enačb, kolikor točk je na sliki 1 označenih s številko 5.

Če bi bile temperature na površini in v okolici znane, bi lahko iz takšnega sistema (IKON + MKON) enačb izračunali gostote sevalnih toplotnih tokov B_i , saj gre za sistem linearnih enačb. Izraz v oglatem oklepaju v enačbi (10) pa lahko zapišemo zaradi preglednosti takole:

$$H_{Bi} = \sum_j F_{i,j} \cdot B_j + \sigma \cdot \text{TOK}^4 \cdot F_{ok,i}$$

Tudi izraz za B_i v enačbi (8) potem lahko zapišemo takole:

$$B_i = \epsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 + (1 - \epsilon_i) \cdot H_{Bi}$$

Izraz za H_{Bi} predstavlja ves sevalni toplotni tok, ki pade na ploskev i iz okolice. Ta tok, pomnožen z emisijskim koeficientom ploskve i , pa predstavlja toplotni tok, ki skuša teči v material preko ploskve i .

Ker gre v našem primeru za ohlajanje, pričakujemo, da iz notranjosti valja ali vozička doteka toplotni tok na površino. Označimo ga z D_i .

Zapišemo ga pa takole:

$$D_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 - \epsilon_i \cdot H_{Bi} + \text{ALPHA} \cdot (T_i - \text{TOK}) \quad (11)$$

Prvi in tretji člen v enačbi (11) sta gostoti toplotnega toka, ki dotekata iz notranjosti valja (vozička) na površino in se širita potem v obliki konvekcijskega ali sevalnega toka. Drugi člen ima negativni predznak, saj je to tisti del sevalnega toka, ki iz okolice vdre preko površine in teče v notranjost.

Spet velja trditev, da bi takšnih izrazov lahko zapisali prav toliko, kolikor imamo površinskih mrežnih točk z oznako 5 po sliki 1.

Levo stran (11) pa zapišemo za točke na valju takole:

$$D_i = PR_i \cdot \frac{T(I, JKON - 1) - T(I, JKON + 1)}{2 \cdot R} = PR_i \cdot \frac{T_i - T_i''}{2R}$$

pri čemer pomeni T_i' temperaturo v točki, ki leži za eno mrežno razdaljo R pod točko i v notranjosti valja, T_i'' pa temperaturo v fiktivni točki, ki bi ležala v oddaljenosti R nad valjem.

Če to vstavimo v enačbe (11), dobimo izraz, iz katerega lahko določimo fiktivne vrednosti T_i'' :

$$\frac{PR_i \cdot (1 - \epsilon_i)}{2 \cdot R \cdot \epsilon_i} (T_i' - T_i'') = \sigma T_i^4 - B_i + \frac{\text{ALPHA}}{\epsilon_i} \cdot (1 - \epsilon_i) \cdot (T_i - \text{TOK}) \quad (12)$$

Za točke na površini šamotne plasti na vozičku bi zapisali izraz, ki bi bil podoben enačbi (12), le da bi ustrezno morali upoštevati toplotno prevodnost šamota PRW oziroma emisijski koeficient na površini vozička.

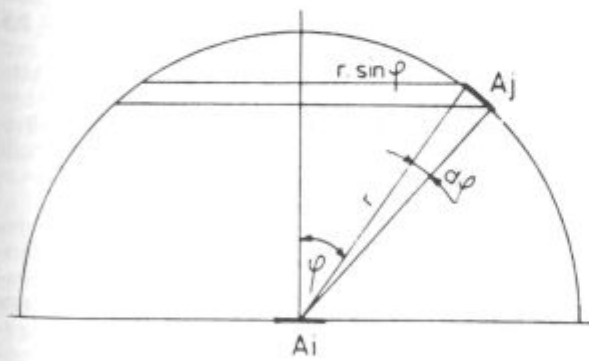
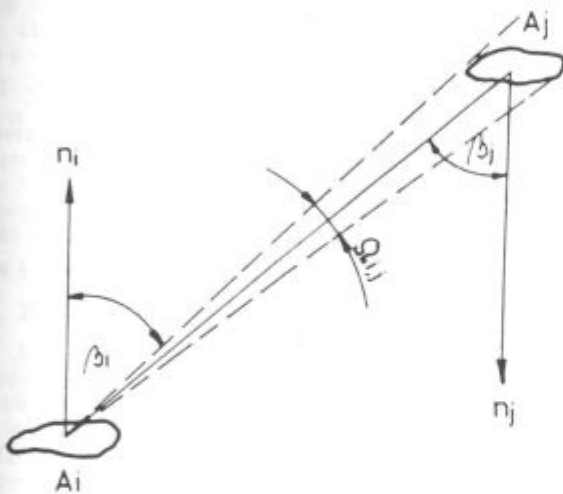
Če pa želimo študirati sevanje črnega telesa, določimo fiktivne vrednosti T_i^* iz enačbe (13):

$$\frac{PR_i}{2 \cdot R} (T_i^* - T_i^*) = \sigma T_i^4 - F_{ok,i} \cdot TOK^4 + \\ + ALPHA \cdot (T_i - TOK) - \sum_j F_{i,j} \cdot \sigma \cdot T_j^4 \quad (13)$$

Reševanje obeh sistemov enačb bomo opisali nekoliko pozneje. Zdaj se ponudimo še nekoliko pri izračunu faktorjev vidnosti (view factor).

Faktor vidnosti v treh dimenzijah $F_{i,j}$

Po definiciji je to del sevalne moči, ki jo oddaja ploskev i in sprejme ploskev j (slika 4). Naj bosta ploskvi A_i in A_j majhni v primeri z njuno medsebojno razdaljo r . Kot β_i naj bo kot med normalo na ploskev A_i in zveznico, kot β_j naj bo pa kot med normalo na ploskev A_j in zveznico.



Slika 4
Faktor vidnosti v treh dimenzijah
Fig. 4
View factor in three dimensions

Moč, ki jo oddaja ploskev A_i naj bo v vseh smereh enaka. Gostota toplotnega toka na enoto prostorskega kota naj bo J_i . Če je med normalo na ploskev A_i in zveznico med i in j kot β_i , lahko zapišemo toplotni tok, ki odteče proti j , kot:

$$\Phi = J_i \cdot \cos \beta_i \cdot \Omega_{ij},$$

pri čemer je Ω_{ij} prostorski kot, pod katerim je mogoče videti ploskev j s ploskve A_i .

Seveda pa je sevalni toplotni tok, ki pade na ploskev j , odvisen od orientacije te ploskve na smer žarkov.

Celoten toplotni tok, ki pade na ploskev A_j je torej sorazmeren z A_j , pomnožimo s $\cos \beta_j$ (kot med normalo na ploskev A_j in zveznico $i-j$).

Iz ploskve A_i torej seva celotna moč $B_i \cdot A_i$, kar pomeni, da smo gostoto toplotnega toka pomnožili s ploskvijo. Ta produkt pride v imenovalce izraza:

Ploskev seva celotno.

$$F_{i,j} = \frac{A_i J_i \cos \beta_i \Omega_{ij} \cos \beta_j}{B_i A_i} = \frac{J_i \cos \beta_i \cos \beta_j}{B_i} \frac{A_j}{r^2}$$

$F_{i,j}$ je torej razmerje med sevanjem, ki ga ujame ploskev A_j , in tistim, ki ga emitira ploskev A_i .

Če bi ploskev A_i postavili vodoravno v središče polkrogle in integrirali po vsej polkrogli, bi to pomenilo, da bi dobili

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} = 1,$$

saj bi polkrogla ujela prav vse sevanje iz ploskvice A_i , ki si jih mislimo razporejene po površini polkrogle. Sledi:

$$1 = \int_0^{\pi/2} J_i \cdot \cos \varphi \cdot 1 \cdot 2\pi r \cdot \sin \varphi \cdot r \cdot d\varphi \\ B_i r^2$$

oziroma

$$B_i = J_i \cdot \pi$$

Tako smo prišli do običajnega izraza za faktor vidnosti

$$F_{i,j} = \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j A_j}{\pi r^2}$$

ki ga je mogoče najti tudi v literaturi^{2,3}.

Faktor vidnosti v dveh dimenzijah $F_{i,j}$

Ploskve A_i in A_j nadomestimo z daljicami z dolžino s_i in s_j (slika 5). Celoten izračun poteka tako kot v treh dimenzijah, razlika je le v kotu ω , ki zdaj ni več prostorski kot.

$$F_{i,j} = \frac{s_j J_i \cos \beta_i \cdot \omega_{ij} \cdot \cos \beta_j}{B_i \cdot s_i}$$

$$F_{i,j} = \frac{J_i \cdot \cos \beta_i \cdot s_j \cdot \cos \beta_j}{r \cdot B_i}$$

Če postavimo daljico s_i vodoravno in v središče polkroga in integriramo po vsem polkrogu, dobimo:

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} = 1$$

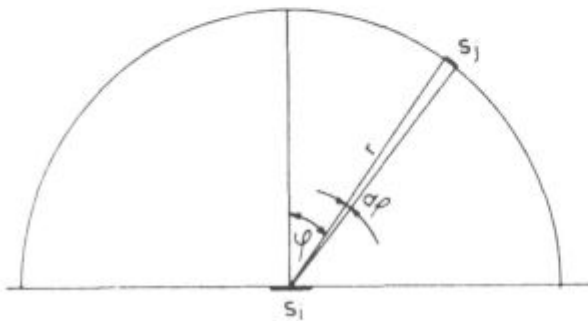
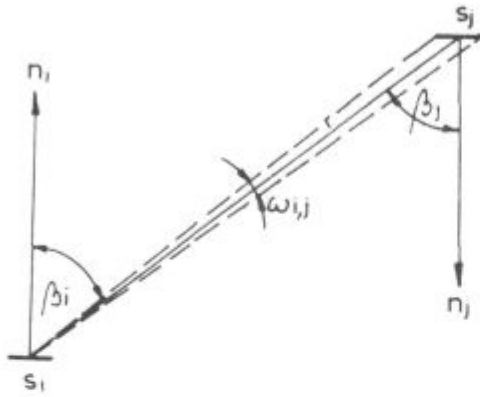
oziroma:

$$1 = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{J_i \cdot \cos \varphi \cdot r \cdot d\varphi}{r B_i}$$

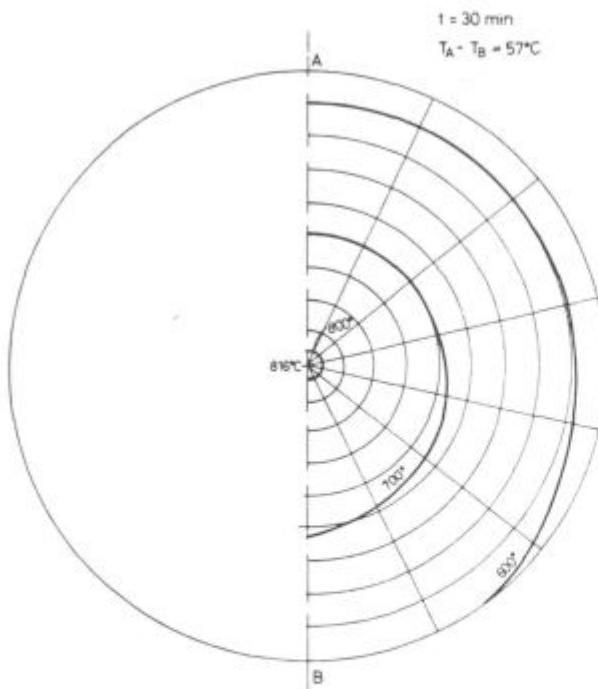
Sledi:

$$B_i = 2 J_i$$

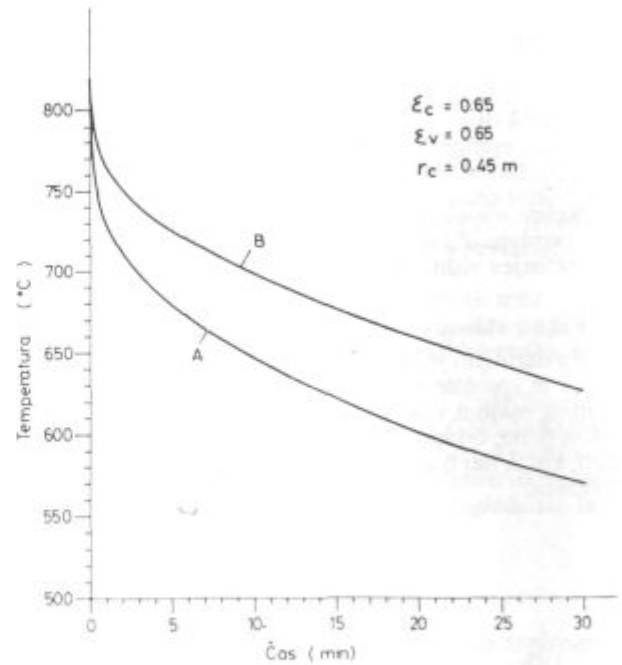
$$F_{i,j} = \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j s_j}{2r}$$



Slika 5
Faktor vidnosti v dveh dimenzijah
Fig. 5
View factor in two dimensions



Slika 6
Temperaturna porazdelitev v prerezu valja
Fig. 6
Temperature distribution in the cross-section of the cylinder.



Slika 7
Časovni potek temperature v točkah A in B.

Fig. 7
Time dependence of the temperature in the points A and B

RAČUNALNIŠKI PROGRAM

Najprej prečitamo osnovne podatke in določimo krajevni in časovni interval tako, da je zadoščeno opisanim pogojem. Nato zapišemo začetne temperature. Določimo kritične vrednosti IKRIT, I1 in I2.

Temperature v posameznih točkah mreže po sliki (1) izračunamo po ustreznih formulah (2), (3) ali (4). Točke, označene s številčkami 5, pa ležijo na površini in pri njih je postopek reševanja nekoliko drugačen.

Pri vsaki točki na površini valja ali vozička izračunamo faktor vidnosti za vsako sosednjo ploskev i, ki jo je s te ploskve mogoče videti. Ko seštejemo po ploskvicah j, pridemo do koeficientov v sistemu linearnih enačb (8) za gostote toplotnega toka, ki izhajajo iz posameznih ploskvic B.

Pri vsakem časovnem koraku namreč najprej s temperaturami iz predhodnega koraka izračunamo vrednosti B. Pri tem si pomagamo s podprogramom za reševanje sistema linearnih enačb. Te vrednosti nato vstavimo v enačbe (12) ali (13), da bi izračunali fiktivne temperature T'. S pomočjo fiktivnih vrednosti na namišljeni podaljšan ploskvi lahko tudi za robne točke (5) uporabimo enačbe (2) in (4).

PRIMER

Izmislili smo si primer, ki pojasnjuje le delovanje programa in se ne nanaša na praktične meritve.

Izbrali smo si naslednji primer:

Valj:	
Primer valja	900 mm
Širina vozička	900 mm
Oddaljenost središča valja od šamotne površine na vozičku	750 mm

Gostota valja	7850 kg/m ³
Gostota šamotne plasti	2000 kg/m ³
Specifična toplota valja	630 J/(kg.K)
Specifična toplota šamota	1000 J/(kg.K)
Toplotna prevodnost valja	30 W/MK
Toplotna prevodnost valja	30 W/mK
Časovni korak	2 sekundi
Začetna temperatura v valju	820° C
Začetna temperatura v šamotu	700° C
Krajevni korak v radialni smeri v valju in mrežna razdalja v šamotu	50 mm
Krajevni korak v smeri kota v valju	$\pi/7$
Emisijski koeficient površine valja in površine vozička naj bosta enaka	0.65
Temperatura v okolici TOK	26° C

Računalnik je izračunal kritično vrednost za IKRIT in vrednosti za I1 in I2. Sledi matrika faktorjev vidnosti za vse kombinacije površinskih točk $F_{i,j}$ in pripadajočih $F_{ok,i}$ za točke na površini valja in na površini šamota.

Odločili smo se, da naj računalnik izpiše temperature v vseh mrežnih točkah vsako minuto ohlajanja. Celoten čas, ki nas je zanimal, pa je znašal 30 minut.

Na sliki 6 je prikazana temperaturna porazdelitev v prerezu valja po 30 minutah takšnega ohlajanja, pri katerem smo predpostavljali, da konvekcije ni. Na sliki 7 pa je prikazan časovni potek temperature v točkah na površini valja, ki sta najbližje in najbolj oddaljeni od vozička ($I=1$ in $I=IKON$).

ZAKLJUČEK

Opisana računalniška obdelava kaže, da je z metodo končnih diferenc pri reševanju toplotne enačbe mogoče priti do rezultata, tudi če robni pogoji niso linearni. S primernim iteracijskim postopkom lahko obravnavamo tudi sevanje sivega telesa, kar daje zelo zanimive možnosti tudi pri drugih metalurških problemih.

Kot nadaljevanje tega dela se bomo lotili izračunavanja toplotnih izgub pri sevanju iz jeklarške ponovce, ki je brez pokrova. Pri tem bomo upoštevali različne emisijske koeficiente šamotne obloge in površine žlindre, pa tudi kot, pod katerim pada sevalni toplotni tok na steno ponovce. Izračunali bomo tudi, kakšen je potek temperature v steni ogrete prazne ponovce, ki jo pustimo na zraku brez pokrova.

Opisani postopek pa omogoča izpopolnitev dosedanjih programov za opisovanje ogrevanja v globinskih in v potisnih pečeh.

Do sedaj smo namreč predpostavljali, da poznamo temperaturo v okolici bloka, katerega ogrevanje smo študirali, zdaj pa bomo lahko simulirali ogrevanje, pri katerem bomo upoštevali ne le temperaturni profil peči, ampak konfiguracijo stropa in upoštevali razporeditev sosednjih blokov in njihove medsebojne vplive (senčenje). Prepričan sem, da bomo lahko ta proces bolje opisali in da bodo naši rezultati precej bližje dejanski situaciji.

Tako bomo prišli do boljšega algoritma za procesni računalnik, ki bo nekoč vodil ogrevanje in ohlajevanje v potisnih in v globinskih pečeh.

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

A_j	ploskev, s katere izhaja sevalni toplotni tok
A_i	ploskev, ki ujame sevalni toplotni tok, ki izhaja s ploskve A_j
ALPHA	konveksijski koeficient

B_i	gostota toplotnega toka, ki izhaja s ploskve i
CP	specifična toplota jeklenega valja
CPW	specifična toplota šamotne plasti na vozičku
$F_{i,j}$	faktor vidnosti (v dveh ali v treh dimenzijah) med ploskvama i in j
$F_{ok,i}$	faktor vidnosti med ploskvijo i in okolico
FI	mrežna razdalja v smeri kota
G_i	gostota toplotnega toka, ki priteka iz notranjosti na površino
$H\emptyset$	oddaljenost od šamotne površine do osi valja
I, J	mrežni koordinati v smeri kota in polmera pri valju
J_i	prostorska gostota toplotnega toka pri izračunu faktorjev vidnosti
I1, I2	mejni kotni koordinati, znotraj katerih je viden valj z neke točke na vozičku
IKRIT	največja kotna koordinata, s katere je še mogoče videti šamotno plast na vozičku
IKON	kotna koordinata na skrajnem robu cilindrične mreže
K	časovni korak v cilindrični mreži
KW	časovni korak za pravokotno mrežo
L, M	koordinati v pravokotni mreži
MKON	koordinata na skrajnem desnem robu pravokotne mreže
PI	3.141592
PR	toplotna prevodnost jeklenega valja
PRW	toplotna prevodnost šamotne plasti na vozičku
R	mrežna razdalja v smeri polmera
RO	gostota jeklenega valja
$R\emptyset$	polmer valja
ROW	gostota šamotne plasti na vozičku
r'	oddaljenost v radialni smeri
r	brezdimenzijska razdalja v radialni smeri
T	temperatura
T_i	temperatura za eno mrežno razdaljo pod površino
T'_i	temperatura v fiktivni točki onkraj roba
TOK	temperatura v okolici
t'	čas
t	brezdimenzijski čas
$T\emptyset$	referenčni čas
β_i	kot med normalo na ploskev A_i in zveznico me ploskvama A_i in A_j
β_j	kot med normalo in ploskev A_j in zveznico med ploskvama A_i in A_j
ϵ_i	emisijski koeficient ploskve A_i
σ	Stefanova konstanta
Φ	kotna koordinata
Ω	prostorski kot
ω	kot v dvodimenzionalnem primeru

LITERATURA

- G. D. Smith: Numerical Solution of Partial Differential Equations, London, Oxford University Press, 1971, stran 58—60.
- Szekely, Themelis: Rate Phenomena in Process Metallurgy, Wiley — Interscience, New York 1971, stran 281—284.
- VDI — Wärmeatlas, VDI Verlag, Düsseldorf 1963, poglavje K_1 .
- Računalniški program za simulacijo ogrevanja in ohlajanja v eni od dveh dimenzijah, Raziskovalni oddelek Železarne Jesenice.

ZUSAMMENFASSUNG

Die beschriebene rechnerische Bearbeitung zeigt, dass es mit der Methode der Enddifferenzen bei der Lösung der Wärmeleichung möglich ist zum Ergebniss zu kommen, auch wenn die Randbedingungen nicht linear sind. Mit einer geeigneten Iterationsmethode kann auch das Strahlen eines grauen Körpers behandelt werden, wodurch interessante Möglichkeiten auch bei der Behandlung anderer metallurgischer Probleme geboten werden.

Als Fortsetzung dieser Arbeit beabsichtigen wir die Wärmeverluste beim Strahlen aus einer Stahlwerkspfanne ohne Deckel zu berechnen. Dabei werden wir die verschiedenen Emissionskoeffiziente der Pfannenausmauerung und der Schlackenoberfläche und auch den Winkel unter dem der Strahlungswärmefluss auf die Pfannenwand fällt, berücksichtigen. Wir werden auch den Temperaturverlauf in der Wand einer erwärmten und leeren Pfanne die ohne Deckel an der Luft abkühlt berechnen.

Das beschriebene Verfahren macht die Vervollständigung der bestehenden Programme für die Beschreibung der Erwärmung in Tief und Stossöfen möglich.

Bis jetzt hat man vorausgesetzt, dass die Temperatur der Umgebung des zu erwärmenden Blockes bekannt ist, von jetzt ab kann die Erwärmung simuliert werden mit der Berücksichtigung nicht nur des Ofentemperaturprofills sondern auch der Deckenkonfiguration und der Verteilung der benachbarten Blöcke und deren gegenseitigen Einfluss. Ich bin überzeugt, dass wir dieses Prozess besser beschrieben werden können und das unsere Ergebnisse dan viel näher dem tatsächlichen Stand sein werden.

So werden wir zu einem besseren Algorithmem für den Prozessrechner kommen, womit einmal die Erwärmung und die Abkühlung in Stoss und Tieföfen gesteuert wird.

SUMMARY

The described computer treatment shows that the method of finite differences in solving the heat equation enables to obtain result though the boundary conditions are not linear. By a suitable iteration procedure also the grey-surface radiation can be taken in account which gives very interesting possibilities in solving also other problems in metallurgy.

In further, the calculation of thermal losses by radiation from the steelmaking ladle without cover will be prepared. Various emissivities of the fire-clay lining and the slag surface as well as the angle of incidence of the radiant-heat flow on the ladle wall will be taken in account.

Also the temperature course in the wall of an empty heated ladle left in air without cover will be calculated.

The described procedure enables to complete the present programs describing the heating in pit and push-type furnaces.

So far, the approximation was used that the temperature around the heated block is known. In further, also such heating can be simulated where also roof configuration and arrangement of neighbouring blocks including their mutual influences (shading) will be taken in account next to the temperature profile of the furnace. I am convinced that this process will be better presented and that the obtained results will be closer to the actual situation.

Thus a better algorithm for the process computer will be obtained for controlling heating and cooling in push-type and pit furnaces.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дано описание вычислительной обработки, которая указывает, что с методом конечных разностей при решении температурного уравнения можно получить результат тоже, если условия кромки нелинейные. С соответствующим итерационным способом можно рассматривать также излучение серого тела, что даёт очень интересные возможности также при прочих металлургических проблемах. В статье рассмотрено вычисление потери теплоты при излучении из разливочного ковша, который не имеет крышки. При этом будем соблюдать различные температурные коэффициенты шамотной облицовки и поверхности шлака, а также угол, под которым находится воздействие излучения на стенку ковша. Вышитаем также протекание температуры в стенке сагретого пустого ковша, которого оставим на воздухе без крышки.

Описанный способ даёт возможность усовершенствовать прежний программы описания согревания в нагревательных колодцах и в методических печах.

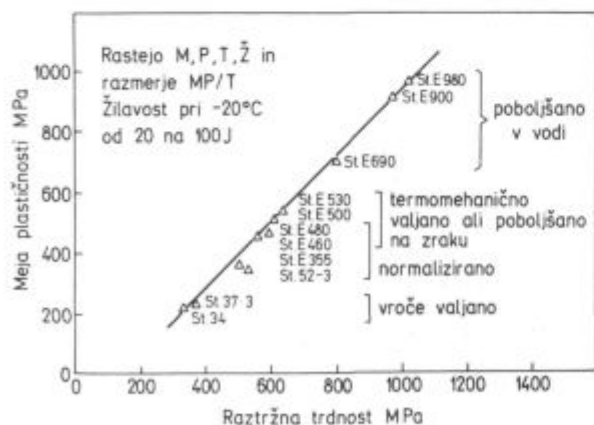
Мы до сих пор предполагали, что мы знаем температуры в окружности блока, согревание которого мы изучали. Теперь же мы будем симилировать согревание, при профил чём будем иметь во внимании не только температурный печи, а также конфигурацию потолка, также учитывали распределение соседних блоков, а также из взаимное влияние (действие теней). Автер статьи уверен, что будет возможность этот процесс описать лучше, так что результаты, описанные в этой работе были бы ближе фактической ситуации.

O RAZVOJNIH MOČNOSTIH JEKEL IN NEKATERIH POSEBNIH ZLITIN TER POSTOPKOV ZA NJIHOVO IZDELAVO, ULIVANJE IN PLEMENITENJE

F. Vodopivec, O. Kürner in A. Lagoja, F. Grešovnik in A. Rodič, S. Senčič in F. Vizjak

I. UVOD

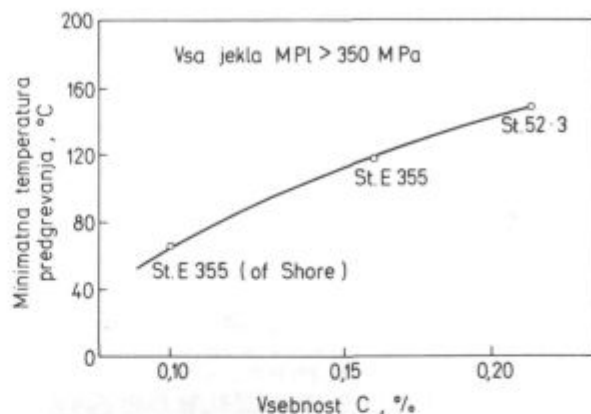
Sodobne statistike kažejo, da se proizvodnja jekla po približno parabolični krivulji približuje v vsaki državi neki optimalni vrednosti, ki je kompromis med porabo, gospodarsko proizvodnjo in politično neodvisnostjo (1). V zapadnih državah, kjer je proizvodnja zrastle preko naravnih potreb in odkoder se je veliko jekla izvažalo v države v razvoju v surovem stanju in v obliki strojev, naprav in konstrukcij, pa proizvodnja celo pada. Objektivni pregled statistik pa odkrije, da zmanjšanje količine proizvedenega jekla ne pomeni tudi enakovrednega padca dejanske porabe jekla kot gradiva. To lepo pokažeta dva primera. Z uvedbo kontinuirnega litja se je izplen pri proizvodnji jekla dvignil v zadnjih 15 letih od okoli 78 na 92 %. Zato je sedaj pri enaki teži jekla, ki je ulito iz peči, na voljo 14 % več valjanih proizvodov kot popreje, ko se je jeklo ulivajo v bloke. Po vojni je imelo varivo jeklo za nosilne konstrukcije mejo plastičnosti največ 350 MPa, danes imamo variva jekla za iste namene z mejo plastičnosti 700 MPa ali celo blizu 1000 MPa (sl. 1) ob povečani žilavosti in nižji prehodni temperaturi žilavi krhki lom. To pomeni, da so jeklene konstrukcije dvakrat lažje in se zanje porabi dvakrat manj jekla. Zelo je pomembno, da se enaka trdnost dosega pri nižjem ogljiku, to pa zniža temperaturo



Slika 1

Evolucija trdnosti varivih gradbenih jekel od leta 1960 naprej.

Predavanje na 36. Posvetu o metalurgiji in kovinskih gradivih, Portorož, 2. in 3. oktober 1986



Slika 2

Odvisnost med količino ogljika in minimalno temperaturo predgrevanja za jekla iz istega trdnostnega razreda.

predgrevanja pri varjenju in tudi sicer poveča varivost jekla (sl. 2).

V razvitih državah se je uporaba sodobnih jekel z veliko trdnostjo že močno uveljavila. Pri avtomobilu je mogoče na primer z uporabo visokotrdnih jekel prihraniti do 20 % na teži pri enaki trdnosti in togosti (3, 4, 5). Podobno velja tudi pri gradbenih konstrukcijah, kjer napredek temelji na izkoriščanju večje trdnosti in varnejšega dimenzioniranja na osnovi metod lomne mehanike.

Pri nas pri uporabi visokotrdnih jekel nekoliko zaostajamo za razvitimi državami praktično na vseh področjih. Še posebej velja to za SR Slovenijo, kjer je struktura industrije taka, da porabi premalo plemenitih jekel, tudi jekel iz programa proizvodnje SZ. V SZ se že danes po sodobnih metodah uspešno proizvaja velika večina jekel, ki so temelj sodobne elektro in strojne industrije v razvitih državah, od visokotrdnih pločevin, preko jekel za hladno in vroče kovanje, avtomatnih jekel, jekel za termično obdelavo, orodnih jekel in drugih, poraba v SR Sloveniji pa je še preveč usmerjena v masovne kvalitete. Zato je potrebno, da se izvrši prestrukturiranje porabe jekla v prid uporabe večjega deleža plemenitih jekel v vseh vejah kovinsko predelovalne in strojne industrije. Položaj jekla kot osnovnega gradiva za te veje industrije ni ogrožen tudi v bodočnosti (1), tudi ni položaj jekla ogrožen v avtomobilski industriji (3, 4, 5), kjer se pričakuje, da bo z uvedbo novih materialov, predvsem pa z večjim deležem uporabe jekel z visoko trdnostjo v avtomobilu bodočnosti material na osnovi železa predstavljal 50 do 55 % celotne teže. Za primerjavo povemo, da je v sedanjem Golfu teža delov iz železovih materialov okoli 68 %.

Ker je zagotovljeno, da bo jeklo tudi v bodočnosti osnovno gradivo kvalitetne industrije strojev in naprav, ker imamo znanje in izkušnje, je upravičeno, da se načrtuje razvoj proizvodnje jekla v SR Sloveniji v že sprejeti smeri povečanja količine tistih vrst jekla in izdelkov, za proizvodnjo katerih je potrebno več znanja in dela in pri enaki teži prinašajo večji zaslužek. Železarji pričā-

kujemo, da v bodočnosti poraba jekla v SR Sloveniji ne bo več capljala za proizvodnjo, temveč da bodo prav porabniki silili železarje k osvajanju novih in bolj kvalitetnih materialov, ne pa da bo narobe kot do sedaj.

Na teh spoznanjih sloni tudi načrtovanje razvoja proizvodnje novih materialov v SŽ, kjer bomo nadaljevali z usmeritvijo, ki nam bo zagotavljala gospodarno proizvodnjo kvalitetnih jekel, prilagojeno možnostim prodaje doma in v izvozu. Zavedamo pa se, da je potrebno še bolj intenzivno kot do sedaj razvijati nove materiale in tehnologije, ki bodo naše proizvode napravili bolj trdne, bolj odporne proti koroziji in obrabi ter sposobne za gospodarno uporabo v novih napravah in tehnologijah, ki se bodo še razvile na vseh področjih uporabe jekla.

2. IZHODIŠČE

V tuji strokovni literaturi najdemo številne podatke o razvoju materialov in tehnologij za bodočnost, nekatere vire smo že omenili, druge pa še bomo v nadaljevanju tega sestavka. Ministrstvo za raziskave in tehnologijo ZR Nemčije navaja v posebni brošuri (6), da ima ZR Nemčija tradicionalno močan položaj na področju konvencionalnih konstrukcijskih materialov, ki so temeljnega pomena za industrijo strojev, prometnih sredstev, procesne in investicijske opreme, energetiko in gospodinjne naprave, da pa bo ta položaj mogoče ohraniti samo z intenzivnim lastnim razvojem materialov, ker se je težko enakovredno vključiti v sodobne mednarodne projekte. Podpiralo bo samo uporabno usmerjene osnovne raziskave na omejenem številu projektov, ki bodo hitro uresničene v proizvodnji. Ministrstvo zagotavlja za vse projekte le 50 % financiranja, drugo mora prispevati industrija, razen če gre za popolnoma nove ideje, za uresničitev katerih je potrebno nadpoprečno veliko osnovnih raziskav. Z obveznim sofinanciranjem se zagotavlja, da industrija usmerja raziskave in ne dovoljuje, da bi svrha dela postala predvsem obogatitev bibliografije raziskovalcev.

Pri sestavi plana raziskovalne dejavnosti za obdobje 1986—1990 smo v RSS izhajali iz drugačnih načel in le za cca 1/5 programa, ki se financira iz PoRSov, vpeljali sofinanciranje kot kriterij za pridobitev sredstev zbranih s prispevno stopnjo. Tudi sicer smo relativno malo gledali na utrditev položaja klasičnih proizvodov.

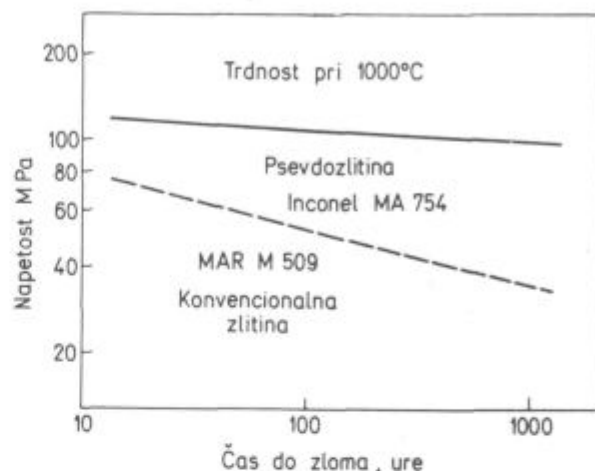
Danes je 5 posebno prodornih smeri v raziskavah novih materialov: keramika, metalurgija prahu, kovinski visokotemperaturni in posebni materiali, novi polimeri in kompoziti. Težišče razvoja novih materialov naj bi bili: trdnost pri visokih temperaturah, visoka konstrukcijska trdnost in togost v širokem intervalu temperature, visoka obrabna in korozijska odpornost. Nove lastnosti je mogoče doseči z novimi legirnimi kombinacijami in z novimi postopki izdelave oziroma z dopolnilni klasičnih postopkov, ki jih omogočajo nove ideje in računalniško krmiljenje proizvodnih naprav.

3. RAZVOJ V SVETU

Metalurgija prahu

Metalurgija prahu ima pomembno mesto v načrtih razvoja (6, 7, 8, 9, 10). Če je bilo gibalno razvoja metalurgije prahu v preteklosti predvsem točnost oblike ter pomenitev zaradi zmanjšanja obdelave, se danes izpostavljajo druge prednosti, na primer možnost izdelave gradiv iz sicer nezdržljivih sestavin, npr. pseudozliti in iz

kovin in oksidov, ter velika homogenost in majhna zrna zaradi hitrega strjevanja. Ti dve prednosti olajšujeta tudi uveljavitev metalurgije prahu na področju jekel. Pseudozlitina na osnovi niklja in oksida ima mnogo večjo trdnost pri temperaturi nad 900°C od prave zlitine (sl. 3).



Slika 3
Čas od zloma pri različni obremenitvi pri 1000°C za nikljevo zlitino in pseudozlitino.

Posebno bodočnost se pri tem obeta materialom iz hitro strjenih prahov, ki jih je mogoče izdelovati z velikostjo zrn v razponu od desetinke do nekaj mm. Predvideva se celo možnost, da bi preko prahov in hitrega strjevanja prišli v področje polikristalov z velikostjo zrn v razponu 10 do 100 nm, kjer bi imeli cca 10^{18} zrn/cm³ in bi bile lastnosti materiala odvisne od kristalnih mej, ne pa od urejene notranjosti zrn (12). Drago zgoščevanje zlitin v vroči izostatski stiskalnici je doslej oviralo prodor metalurgije prahu v področje jeklenih gradiv. Izgleda, da bo to mogoče preseči, ko se bo uveljavil nov postopek zgoščevanja prahov s kovanjem v kontejnerjih.

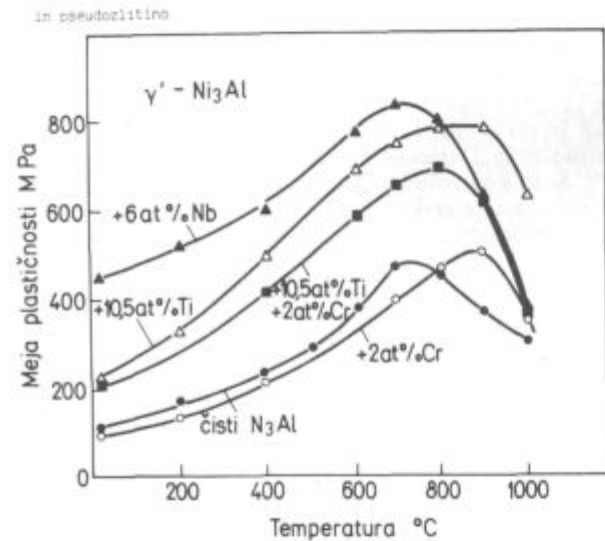
Visokotemperaturni in posebni materiali

Razvoj gre v dveh smereh: v razvoj novih sestav, s katerimi bi dosegli boljše mehanske in korozijske lastnosti pri visokih temperaturah, ali napravili materiale cenejše in v razvoj postopkov, ki bi omogočili, da se konstrukcijski deli izdelajo po postopkih, ki zagotavljajo večjo homogenost, na primer v težkih izkrokih za energetiko. Cilj je dvigniti delovno temperaturo standardnih jekel, ki se sedaj uporabljajo v termo in jedrski energetiki nad 565°C, austenitnih jekel nad 800°C in superzlitin nad 1050°C. V viru 7 najdemo podatek, da je dvig delovne temperature v turbinskih lopaticah letalskih motorjev za 70°C omogočil, da se je pri letalih izboljšalo razmerje potisk/teža za 40 %.

V nikljevih zlitinah se je v zadnjih 20 letih dvignila delovna temperatura za 100 urno trdnost pri napetosti 140 MPa od 850 do 1100°C. Nič ne kaže, da se je razvoj ustavil. Napredek se išče v monokristalih, v usmerjenem strjevanju, v bolj obstojnih mikrostrukturah, v pseudozliti inah, v uporabi intermetalnih spojin, v kompozitih, ki so ojačeni s kovinskimi ali karbidnimi vlakni, pa tudi v keramiki. Vendar pa je potrebno razvijati tudi klasične materiale. Na primer termoenergetske naprave so vedno večje. Potrebni so čedalje večji odkovki

za rotorje in gredi in najti je potrebno jekla, ki bi zagotavljala zadostno žilavost tudi v jedru turbinskih rotorjev s premerom 1,5 m (13).

Predvideva se, da so možnosti niklja in kobalta kot matičnega elementa superzlitin za visoke temperature skoraj izkoriščene, saj dosega delovna temperatura pri monokristalnih turbinskih lopaticah in pseudozlitinah do 85 % solidusa, zato se iščejo druge nosilne kovine z višjim tališčem. Na žalost imajo molibden, tantal in volfram, ki imajo tališče nad 2500°C, majhno korozijsko in oksidacijsko odpornost. Zato se veliko dela usmerja v keramiko, predvsem silicijev nitrid in karbid, pa tudi Al_2O_3 in ZrO_2 . Pričakuje se, da bo mogoče za visokotemperaturne namene izkoriščati tudi intermetalne faze, ki so po svoji fizikalno kemijski naravi med kovinami in oksidi. V materialih za visoke temperature je najbolj poznana γ' faza, ki je temelj utrditve nikljevih superzlitin. Da je faza lahko nosilna matica novih zlitin, so dokazali v ZDA, kjer so razvili zlitine LROAA (long range ordered advanced aluminides), pri katerih je pri 800°C meja plastičnosti na istem nivoju kot v visokotrdnih konstrukcijskih jeklih pri sobni temperaturi (sl. 4) in so uporabne še pri 1400°C (10).



Slika 4

Odpisnost med temperaturo in mejo plastičnosti za različne zlitine na osnovi faze Ni_3Al .

Velja še omeniti, da so z optimalnimi legirnimi kombinacijami razvili legirana jekla, ki se po mehanskih lastnostih približujejo zlitini Incolloy 800, so pa mnogo bolj odporna proti atmosferam bogatim z žveplom in CO ter zato primerna za naprave za vplinjavanje premogov (13).

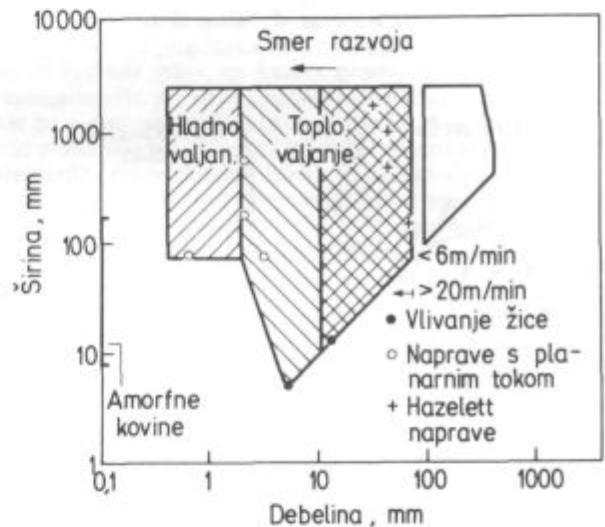
Hitro strjeni materiali

Razvoj v tej smeri sloni na dveh prednostih: zmanjšanje zrn je edini način, da se istočasno povečata trdnost in žilavost in da predelavnost tudi materialom, ki so nepredelovalni v hladnem, če se izdelajo po klasičnih tehnologijah. Hitro strjevanje se uveljavlja v širokem razponu hitrosti ohlajanja, od 10°C do 10⁶°C/sek, kolikor je potrebno za izdelavo amorfnih kovin, ki so včasih poimenovane tudi kovinska stekla. Pri konstrukcijskih jeklih je mogoče doseči zmanjšanje zrn s termomehnično obdelavo, ki izkorišča za ta namen soodvis-

nost med procesi tvorbe izločkov in odprave deformacijske energije iz jekla.

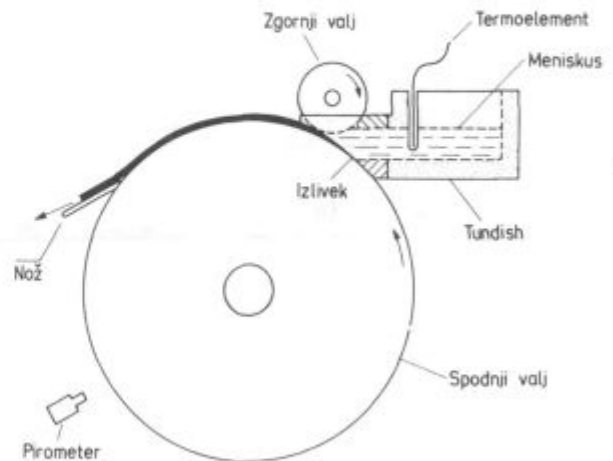
Na sl. 5 je shematično prikazan trend razvoja kontinuirnega litja trakov (14). Za ulivanje trakov s hitrostjo nad 6 m/min (to je meja konvencionalnega konti litja blumov in slabov) se razvija več sistemov. Trak se uliva na enega ali med dva valja (sl. 6) in se nato toplo predvalja, ali pa navija in hladno izvalja na mero. Žica se uliva v livno kolo in nato direktno valja na končno mero.

Drugi postopek za izdelavo tudi debelejših profilov s fino strjevalno strukturo je tako imenovano pršilno ulivanje (Sprühgiessen, sprayforming), pri katerem na podlogo nanašajo kapljice staljene ali testaste kovine z velikostjo od 0,01 do 10 mm (sl. 7). Velika hitrost strjevanja omogoča, da se dosega drobna mikrostruktura brez izcej. Podobne rezultate se dosega z zaporednim navarjanjem tankih slojev. Pri firmi Thyssen v ZR Nemčiji izdelujejo na ta način surovce za težke dele naprav (sl. 8). Z zaporedno depozicijo se dosega tudi termična obdelava spodnjih slojev, zaradi tega ni potrebna posebna končna termična obdelava. Ekonomika se do-



Slika 5

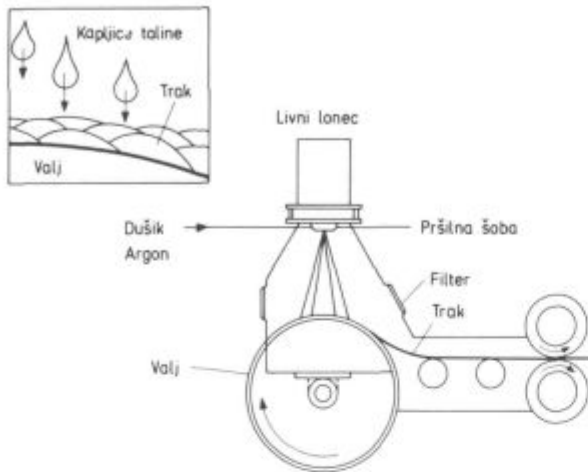
Shematično nakazana smer razvoja konti litja trakov.



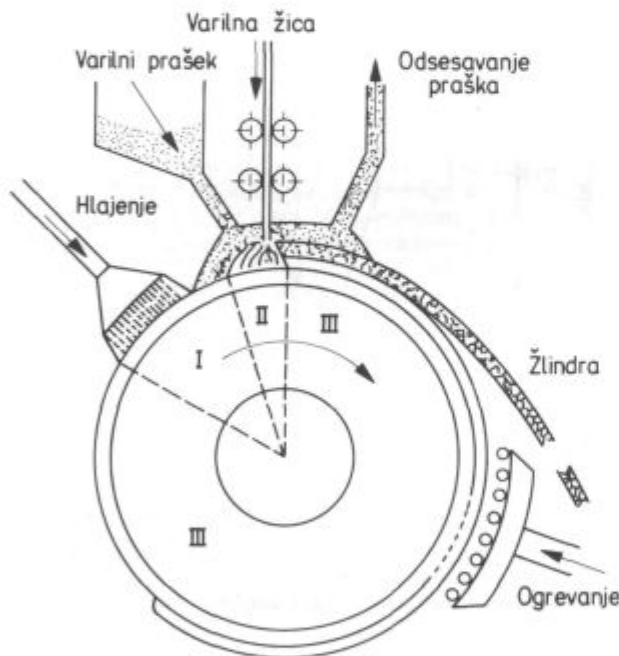
Slika 6

Shema vliivanja širokih trakov med dva valja.

sega z boljšimi lastnostmi, manjšo težo zaradi večje homogenosti in boljših lastnosti pri velikih presekih, z zmanjšanjem stroškov za termično obdelavo in z večjim



Slika 7
Shema pršilnega vlijanja trakov.



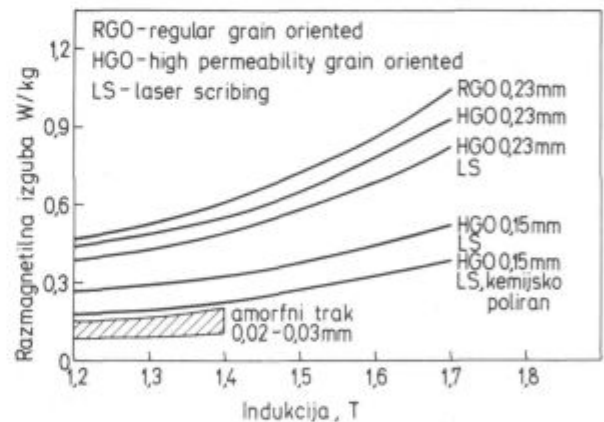
Slika 8
Shema izdelave rotacijsko simetričnih kosov z navarjanjem iz tankih slojev.

izkoristkom materiala, posebno še, ker se lahko paralelno izvrši še platiniranje s korozijsko odpornimi materiali.

Naslednja kvalitetna stopnja je ulivanje trakov z debelino od nekaj mm do nekaj desetink mm in s hitrostjo strjevanja do 10^{10} C/sek. Pregled nekaterih postopkov je v tabeli 1. Tu se dosegajo mikrokristalinične strjevalne mikrostrukture.

Poroča se na primer, da je tako izdelan trak $200 \times 0,1 - 0,4$ mm iz jekla s 6,5 % Si mogoče hladno valjati, medtem ko se sposobnost za hladno valjanje pri konvencionalni izdelavi ustavi že pri okoli 3,5 % Si (17, 16). Poroča se tudi o možnostih, da se tako doseže hladna predelavnost pri materialih, ki so nepredelavni zaradi karbidov, npr. močno legiranih jeklih in celo sivi litini (7).

Zadnja kvalitetna stopnja so amorfne kovine. Da bi se preprečilo kristalinično strjevanje, so potrebne hitrosti strjevanja nad 10^6 °C/sek. Po sedanjih spoznanjih je mogoče amorfno strjevanje doseči v zlitinah eutektičnega tipa, ki vsebujejo mnogo elementov, ki znižujejo tališče, predvsem bora. Kovinska stekla se odlikujejo po zelo visoki meji plastičnosti, abrazivni trdnosti, korozijski odpornosti in trdoti, vendar lahko kljub temu prenešajo precejšnjo hladno deformacijo s tlačanjem, zato jih je mogoče hladno valjati. Predvsem pa se odlikujejo po magnetnih lastnostih in tu so tudi sedaj področja uporabe. Zanimivo je, da je prav odkritje, da imajo amorfne kovine lastnosti, ki presegajo tiste pri elektropločevinah in nikljevih zlitinah, močno pospešilo razvoj elektropločevin. Danes so razvite elektropločevine iz jekla s 3 % Si in kontrolirano velikostjo magnetnih domen, ki se dosega z lasersko obdelavo površine in ki imajo podobne magnetne lastnosti kot kovinska stekla, kar se lepo vidi na sliki 9.



Slika 9
Lastnosti nekaterih sodobnih orientiranih elektropločevin in amorfnih zlitin.

Tabela: Vlivanje tankih jeklenih trakov

Firma	Postopek	Dimenzija	Opomba
Alleghemi Ludlum	vlivanje na 1 valj	$300 \times 1 - 2$ mm	proizvodnja
Alleghemi Ludlum	vlivanje na 1 valj	$600 \times 1 - 2$ mm	projekt, 4,5 t
Allied Corporation	vlivanje na 1 valj	$1800 \times 0,25$ do 5 mm	projekt
C & M	vlivanje med 2 valja	300×1 do 25 mm	pilotna naprava
IRSID	vlivanje med 2 valja	200×1 do 25 mm	pilotna naprava
Kawasaki	vlivanje med 2 valja	$200 \times 0,1$ do 0,4 mm	proizvodna naprava
Kobe steel	vlivanje med 2 valja	270×1 do 2 mm	pilotna naprava
Nippon steel	vlivanje med 2 valja	200×1 mm	pilotna naprava
Nippon Metal	vlivanja na 1 ali med dva valja	315×1 do 3 mm	pilotna naprava

Razvoj standardnih jekel

V to skupino spadajo različne vrste jekel, ki so danes v proizvodnji in bodo še naprej v uporabi pod pogojem, da bodo lahko parirala poostrenim kvalitnim zahtevam, ki jih bo prinesel razvoj novih in napredek konvencionalnih tehnologij predelave, pa tudi večjim kvalitnim zahtevam, kot je bilo že omenjeno za jekla za termoenergetiko. V raznih virih najdemo precej podatkov o tem, katera standardna jekla je potrebno dalje razvijati (11, 13, 17, 18, 19). Navedene so naslednje vrste jekla: mikrolegirana feritna in perlitna v ploščah, trakovih in profilih, nerjavna z visoko trdnostjo in superferitna z veliko duktilnostjo (tem se celo obeta, da bodo sčasoma nadomestila velik del austenitnih nerjavnih jekel), jekla za avtomate, jekla za hladno, toplo in vroče kovanje, orodna jekla, jekla za visokotemperaturno cementacijsko odporna proti notranji oksidaciji, konstrukcijska variva jekla z visoko trdnostjo in odporna proti pregretju in koroziji, nerjavna jekla odporna proti ogrevnim medijem, jekla odporna proti obrabi in jekla za elektroplöčevino.

Razvoj tehnologij

Na področju valjarnišstva se predvideva uveljavljanje procesnega vodenja vseh faz predelave: od segrevanja, preko valjanja, do ohlajanja s ciljem, da se optimalno izkoristijo vse možnosti, ki jih daje sestava, strogo krmiljen proces vroče deformacije in optimalno izkoriščanje mikrostrukturnih procesov med valjanjem in po njem za povečanje trdnosti in žilavosti. Predvideva se, da se bo valjanje nadaljevalo v smeri linijskih prog s kompaktnimi bloki, v posebnih primerih pa tudi v kombinaciji kovaško valjavskih linij. Veliko se dela na konti induktivnem in uporovnem segrevanju gredic, s čemer bi dosegli veliko zmanjšanje energije, ki se porabi za segrevanje, bilo pa bi tudi manj izgube zaradi škajanja. Končni cilj je seveda »on line« valjanje, torej valjanje v spregi s konti ulivanjem, ki je na primeru žice že doživelo industrijsko aplikacijo (15).

Intenzivno se bo dalje razvijalo izkoriščanje entalpije vroče valjanega jekla za termično obdelavo. To se sedaj široko uporablja pri žici in trakovih, zato se bo razvoj usmeril na profile. Predvideva se tudi razširitev »on line« sistemov za kontrolo napak površine na vročem in hladnem jeklu, da bi se tako uspešneje pariralo zahtevam po izboljšavi površine valjanih proizvodov. Bolj in bolj bo v proizvodnji potrebno spreminjati miselnost od »preverjali bomo kvaliteto po izdelavi« v »zagotovimo kvaliteto med izdelavo«.

Pri termični obdelavi se širi delo v vakuumu, v varovalnih atmosferah in v konti linijah z računalniškim krmiljenjem. Predvideva se, da bo počasi termična obdelava v lebdečem sloju izpodrinila solne kopeli za popuščenje in celo solne kopeli za austenitizacijo, ker nudi enake možnosti segrevanja in ni ekološko vprašljiva. Med kemotermičnimi postopki zaščitite se predvideva širjenje metod na osnovi naprševanja in depozicije in še posebej jonske implantacije. Veliko se obeta od laserske termične obdelave površine, ki je v ZDA že posegla celo v specializirano množično proizvodnjo.

Na področju kovanja se predvideva močan razvoj avtomatizacije, kontroliranega kovanja in kovanja z ožjimi tolerancami, ki zahteva manjšo mehansko obdelavo in troši manj materiala. V zvezi s tem se že piše o možnosti toplega kovanja pri temperaturah, kjer je jeklo že mehkejše, pa še ne škaja. S tem postopkom bi bilo mogoče združiti nekatere prednosti vročega in hladnega kovanja.

4. RAZVOJ MATERIALOV IN TEHNOLOGIJ V SZ

Pri planiranju razvoja na tem področju je potrebno upoštevati, da imajo SZ proizvodni program, za katerega je danes in bo tudi v bodočnosti zagotovljeno tržišče doma in v tujini in je dokaj usklajen znotraj države, jeklo pa ostaja tudi za bodočnost temeljno gradivo velikega dela industrije. Tehnološko znanje in oprema, ki je že, ali bo kmalu na voljo, omogočata, da proizvodnja poseže močnejše tudi v zlitine elementov železove skupine niklja in kobalta, kjer smo se do sedaj omejevali le na maloserijsko proizvodnjo. Zato moramo naše raziskovalno in razvojno delo usmeriti v obeh smereh, delati na napredku sedanjega programa in razvijati izdelke in znanje, ki bo potrebno pri osvajanju popolnoma novih materialov.

Razvoj proizvodov

Program jeklenih proizvodov ostaja v glavnem nespremenjen, torej v metalurškem delu SZ profili in žica, pločevina, trakovi, različne litine, izkovki, valji in varilni material.

Na področjih profilov in žice se program ne bo spremenil, več poudarka bo dano oplemenitenju površine in razvoju jekel, za katera predvidevamo, da bodo pomembnejša za nove predelovalne tehnologije, od jekel za vse postopke kovanja, preko jekel za kemotermično obdelavo površine do jekel za avtomate in za vezne elemente. Pri ventilskih jeklih je že osvojen naj sodobnejši program in tudi homologiran v tujini. Ta jekla se bodo še naprej razvijala, da jih bo mogoče plasirati najbolj uglednim proizvajalcem avtomobilov v tujini. Podobno velja za orodna ledeburitna in brzorezna jekla, kjer se načrtuje proizvodnja vsega razpona dimenzij od izkovkov za velika orodja do vlečenih palic za valjanje svedrov. Tudi na področju utopnih jekel se načrtuje, da se bo ohranjal visok kvalitni nivo. Na področju debele pločevine se predvideva osvajanje jekel z višjo trdnostjo, predvsem mikrolegiranih, da bi obvladovali razpon meje plastičnosti od 400 do 1000 MPa ter proizvodnjo jekel odpornih proti raznim oblikam korozije, tudi nerjavnih in platiranih. Za vse te pločevine se bodo proizvajala sodobna varilna sredstva. Iz programa trakov se bodo stalno umikala mehka jekla na račun nerjavnih in jekel za elektroplöčevine — tudi orientiranih. V SZ si bomo prizadevali, da obvladamo kompleten program valjev, od kovanih za hladno valjanje kovin, preko poljeklenih za vroče valjanje kovin, do valjev za različne namene uporabe: od tekstila do prehranske industrije. Svoje mesto želimo razširiti tudi na področju materialov odpornih proti obrabi, od plošč, preko ulitkov do elektrod. Končno načrtujemo tudi osvajanje novih kvalitet grafitnih litin ter konstrukcijskih in nerjavnih litin, posebno nerjavnih litin za armature in energetiko.

Razvoj tehnologij

Potrebne so rekonstrukcije naprav za vroče valjanje vseh vrst, da bi se lahko vpeljalo procesno krmiljenje in dosegala večja točnost in enakomernost v dimenzijah in lastnostih. Najdlje je rekonstrukcija valjarn v Železarni Štore. V Železarni Ravne se načrtuje nova kombinirana kovaško valjavska linija s horizontalnim konti ulivanjem, s katero bo mogoče obvladati zelo širok program proizvodnje. V Železarni Jesenice se načrtuje popolna rekonstrukcija bluminga in Steckel valjalnega stroja z računalniškim krmiljenjem. Na blumingu naj bi se v

kvarto izvedbi valjale tudi debele pločevine z debelino 40 mm iz konti slabov. Ker se načrtuje tudi sodobno ohlajanje, bo tako nastala možnost prave termomehanske obdelave jekla. Gotovo bo potrebno uresničiti vsaj nekatere možnosti za izkoriščanje entalpije vroče izvaljanega jekla za nadomeščanje termične obdelave.

Na področju primarne termične obdelave velja posebej izpostaviti naprave za termično obdelavo velikih plošč v Železarni Jesenice, ki bodo kmalu v pogonu. Velika pridobitev je tudi naprava za krojenje debele pločevine. V Železarni Jesenice se predvideva še izgradnja novih procesnih linij za elektropločevino in nerjavno pločevino.

V Železarnah Štore in Ravne se načrtuje razširjenje in modernizacija naprav za termično obdelavo, tudi za termično obdelavo valjev. Posebej velja omeniti napravo za konti ulivanje tankih profilov, ki je namenjena za izdelavo palic iz superzlitin za elektrode in za ulivanje palic iz težko predelovalnih materialov, npr. brzoreznih in ventilskih jekel, pa tudi za nerjavno žico za izdelavo veznih elementov in za žico za grelni elemente.

Raziskovalni program

Metalurgija je udeležena v prednostni raziskovalni smeri RSS »Novi materiali« s cca 1,5 FTE od skupno 13 FTE, ki jih je namenjenih za to področje. To neugodno razmerje odseva relativno slab položaj metalurgije v raziskovalni sferi, vprašljivo pa je tudi, ali bi bili sposobni pridobiti več raziskovalcev. Del raziskovalnega programa, ki smo ga predložili za obdobje 1986—1990 za financiranje iz sredstev zbranih s prispevno stopnjo posega v probleme povezane s sedanjo proizvodnjo, del pa prav v srčiko sodobnih programov in področja materialov. Usklajeno s tem se je tudi zadnji dve leti nabavljala raziskovalna oprema na metalurškem inštitutu. Vakuumska žarilno-kalilna peč bo omogočila kvaliteten skok pri raziskavah, razvoju in maloserijski proizvodnji posebnih materialov, posebno tankih pločevin in materialov za elektroniko, naprava za atomizacijo ter vroča izostatska stiskalnica pa bosta odprli na široko vrata k zlitinam in pseudozlitinam iz kovinskih prahov. Velik skok na področju superzlitin in težko predelovalnih jekel se pričakuje od naprave za konti litje tankih palic. V program za leto 1986 so vključene uvodne raziskave usmerjene v izdelavo masivnih surovcev za orodja in druge namene z navarjanjem iz tankih trakov. V program raziskav elektropločevin je vključena tudi orientirana pločevina. Velja pa še omeniti teoretično predstudijo možnosti izdelave superferitnih nerjavnih jekel v agregatih, ki so na voljo. Za predelovalce v okviru SZ so v toku sistematične raziskave možnosti izboljšanja vzdržljivosti orodij z depozicijo TiN. Vse prepočasi se odvija program osvajanja modernih mikrolegiranih jekel za kvalitetne vezne elemente, ki bi bila bolj prilagojena razpoložljivi tehnološki opremi. Že več let se tudi razvijajo zlitine za predelovalne permanentne magnete.

V program RSS je vključena tudi raziskava, ki naj pomaga, da bomo lažje osvojili industrijsko proizvodnjo superzlitin vrste Nimonic, pa tudi raziskava z vodikom povezane krhkosti v jeklih za visokotrdne vijake.

Na FNT je v teku program za zbiranje termomehanskih podatkov o vroči predelavi jekla, ki so potrebni za računalniško krmiljenje valjanja.

Velja, da so v zadovoljivem deležu v program raziskav vključene tudi raziskave usmerjene v nove materiale in tehnologije, zelo izrazite komponente take usmeritve pa najdemo tudi v programih posameznih DO. Realizacija teh programov bo postala kritična, če

ne bo mladih inženirjev. Zavedati se namreč moramo, da je danes v slovenski industriji delež inženirjev manjši, kot leta 1950 v ZR Nemčiji. Če ne bo delalo v razvoju metalurgije leta 1995 vsaj 2 do 3 krat več inženirjev kot danes, ne bo možnosti posebnih prodorov in dolgoročne okrepitve metalurgije, ne kot industrije in ne kot ene od tehniških ved.

ZAKLJUČEK

Ta zelo zgoščena predstavitev raziskovalnih in razvojnih ciljev pokaže, da imajo materiali in tehnologije na osnovi železa velike razvojne možnosti. Gibalo hitrega napredka je potreba, da se ohrani vloga teh zlitin, kot osnovno gradivo za velik del industrije. Tudi pri nas so realne možnosti za daljnji razvoj metalurgije železa, podlaga zanj so sedanji proizvodni dosežki, ki so po kvaliteti in uporabnosti enakovredni najsodobnejšim dosežkom v tujini in kvalitetni ter realni razvojni načrti. Metalurgija upa, da bo družba znala ceniti njen delež v materialni proizvodnji SR Slovenije in podprla realne razvojne načrte.

Viri

1. N. N.: Gesamtwirtschaftliche Entwicklung und Stahlverbrauch Stahl hat Wachstumschancen, Stahl und Eisen 104, 1986, št. 16, 79—82.
2. J. Degenkolbe, F. J. Flossdorf in W. Heller: Fortschritte bei unlegierten und niedriglegierten Baustählen; Stahl und Eisen 106, 1986, št. 13, 19—23.
3. W. Jacobi: Entwicklungstrends in der Presswerkstechnik für PKW- Karosserieteile; Stahl und Eisen 106, 1986, št. 12, 36—42.
4. N. N.: 100 Jahre Automobil; Stahl und Eisen 106, 1986, št. 12, 56—58.
5. E. Fiala in U. Sorgatz: Moderne Methoden für die Karosserie-Entwicklung; Stahl und Eisen 106, št. 12, 1986, 29—35.
6. Materialforschung, izd. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, 1985.
7. H. J. Engell in J. Hartwig: Perspektiven der Werkstoffentwicklung; Stahl und Eisen 106, 1986, št. 6, 69—78.
8. N. A. Waterman: Materials for the 1980' and 1990'; The metallurgist and Material technologist, 1984, september, 461—463.
9. H. Bühler: Neue Werkstoffe; VDI Nachrichten Magazin, 1985, št. 11, 4—9.
10. G. Hack: Superalloys for the '80s; Metallurgia, 1982, junij, 256—257.
11. N. N.: Technology Forecast 86; Metal Progress, 1986, januar, 25—100.
12. H. Gleiter in P. Marquart: Nanokristalline strukturen — ein Weg zu neue Materialien; Z. Metallkunde 75, 1984, št. 4, 263—267.
13. B. Hochtemann, K. Forch, E. Potthast, H. Weber in W. Witte: Fortschritte bei warmfesten und hochwarmfesten Stählen; Stahl u. Eisen 106, 1986, št. 13, 35—40.
14. R. Steffen in R. Thielman: Entwicklung zum Bandgiessen von Stahl; Stahl u. Eisen 106, 1986, št. 6, 51—60.
15. H. Hornich: Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Giessrades für Stahl; Berg und Hüttenmännische Monatshefte 130, 1985, št. 9, 316—324.
16. F. Bölling in M. Hastenrath: Kornorientiertes Elektroblech im Wettbewerb zu metallischen Gläsern und mikrokristallinen Werkstoffen; Stahl u. Eisen 106, 1986, št. 16, 57—59.
17. V. Schuler, H. Gulden in H. Stelzenmüller: Fortschritte bei legierten Baustählen; Stahl u. Eisen 106, 1986, št. 13, 31—34.
18. W. Wesling: Fortschritte bei nichtrostenden Stählen; Stahl u. Eisen 106, 1986, št. 13, 41—46.

Osebne vesti

Zamenjava v vodstvu Metalurškega inštituta v Ljubljani:

Po dvajsetih letih uspešnega vodenja MI odhaja v zasluženi pokoj direktor Alojz Prešern, dipl. ing. metalurgije. Za novega direktorja MI je bil z začetkom januarja leta 1987 imenovan izr. prof. dr. Jože Rodič, dipl. ing. metalurgije.



A. Prešern je bil rojen 23. 12. 1920 v Globokem pri Poljčanah. Montanistiko je vpisal leta 1939 na Univerzi v Ljubljani, študij metalurgije pa je dokončal leta 1943 v Leobnu. Konec vojne je dočkal v prekomorski brigadi NOV. Leta 1946 je delal kot asistent v jeklarni Železarno Ravne, maja leta 1947 je bil prestavljen v Železarno Jesenice, leta 1948 v Železarno Zenica, nato pa ponovno v Železarno Jesenice, kjer je ostal do avgusta leta 1963. V tem času, ki sovpada z najtežjim povojnim časom obnove in industrializacije, je tov. Prešern postal vodja vseh topilnic v Železarni Jesenice, to je martinarne, elektrojeklarne, livarne, visoke peči in šamotarne. Postal je eden najvidnejših jeklarskih strokovnjakov, ne le v Sloveniji, temveč tudi v Jugoslaviji. To je bil čas največjega vzpona jeklarstva, ko so se uvajala nova jekla za izgradnjo energetskih objektov, predelovalno industrijo, strojogradnjo in ladjedelništvo. Velik dosežek v tem času je bil energetski preobrat pri kurjenju SM peči, prehod iz generatorskega plina na mazut. Jeklarna na Jesenicah je bila takrat šola jeklarstva za vso Jugoslavijo. Za strokovne in organizacijske dosežke je bil tov. Prešern odlikovan z ordenom dela III stopnje.

Leta 1963 je prišel ing. Prešern na Metalurški inštitut v Ljubljani. Najprej je delal kot tehnični direktor, nato pa je bil leta 1966 prvič imenovan za direktorja. Razen strokovnosti in velikega ugleda, ki ga je imel, je bila odločilna za njegovo imenovanje tudi želja takrat še ne združenih slovenskih železarn, da se delo MI bolj vključi v tehnološke smeri razvoja slovenske metalurgi-

je. Ponovno je bil imenovan za direktorja MI v letih 1970, 1974, 1978 in 1982.

Kljub zahtevnemu delu vodenja MI je ing. Prešern vse do leta 1978 intenzivno delal tudi kot raziskovalec na jeklarskem področju. Izdelal je 48 raziskovalnih nalog, katerih tematike pričajo o njegovem vsestranskem poznavanju jeklarskih tehnologij in kemizma reakcij v staljenem stanju. Področja njegovih raziskovanj so bila rekonstrukcije peči, gorilci in zgorevanje, vakuumske tehnologije, vpihovanje argona in prašnatih snovi, emisije, površinske napake na gredicah, predvsem pa korelacije med dezoksidacijskimi postopki in nekovinskimi vključki v jeklu. Objavil je 14 strokovnih člankov, večinoma v Železarskem zborniku, in imel 19 predavanj, doma in v tujini.

Kot direktor je tov. Prešern ves čas ohranjal in negoval vezi ter medsebojno odvisnost MI z železarnami in drugimi metalurškimi podjetji, zavedajoč se, da je to edina trdna garancija za obstoj MI. Tako je v veliki meri njegova zasluga, da se je MI že pred 13 leti pridružil SOZD-u SŽ kot samostojna DO, obenem pa je ohranil status osrednje raziskovalne organizacije za vso slovensko metalurgijo. Metalurški inštitut je v teh letih napravil velik napredek, saj je danes njegov položaj trdno zasidran tako v družbenem raziskovalnem okolju, kot v SŽ in drugih metalurških podjetjih.

Direktorja A. Prešerna je odlikovala ne le strokovna, raziskovalna in poslovodna sposobnost, temveč tudi pristnost, tovarištvo, neposrednost in preprostost v odnosih do sodelavcev, zato se ga bomo spominjali tudi kot dobrega prijatelja in tovariša. Ob odhodu v pokoj mu izrekamo iskreno zahvalo za vse njegovo delo v SŽ in želimo vse najboljše in še mnogo zdravih let!



J. Rodič je bil rojen 26. 5. 1931 v Ljubljani. Metalurgijo je študiral v Ljubljani in 14. 2. 1958 diplomiral za inženirja metalurgije. Za doktorja metalurških znanosti

je promoviral leta 1981 na FNT v Ljubljani, na isti fakulteti pa je bil leta 1983 habilitiran za izrednega profesorja. Po dokončanem študiju metalurgije je služboval v Železarni Ravne, kjer se je zaposlil 1. 5. 1959. Ves čas je delal na vodilnih mestih v razvojno raziskovalni dejavnosti, nazadnje je bil v letih od 1975 do 1984 vodja Službe za razvoj, tehnologijo in raziskave. Od leta 1984 je bil zaposlen v DSSS SOZD SŽ kot vodja službe za razvoj in raziskave. Bil je član Kolegija DSSS SOZD SŽ in član Poslovnega sveta SOZD SŽ. Od ustanovitve SOZD-a Slovenskih železarn je član Odbora za znanstveno raziskovalno delo, ki v SŽ usmerja in koordinira znanstveno raziskovalno delo in ima s tem tudi odločilen vpliv na razvoj in usmeritve Metalurškega inštituta. Že 20 let je tudi član uredniškega odbora Železarskega zbornika.

V začetku leta 1986 je Služba za razvoj in raziskave pri SOZD-u SŽ, s posebno zavzetostjo J. Rodič-a, organizirala anketno razpravo v vseh DO SŽ in FNT o današnjem stanju, usmeritvah in srednjeročnem programu raziskovalno razvojne dejavnosti v SOZD-u SŽ. V teh razpravah je sodelovalo okoli 150 raziskovalcev iz vseh DO SŽ. Na osnovi teh in nadaljnjih razprav, zaključkov in lastnega pogleda na razvoj RR dejavnosti v SOZD-u SŽ je J. Rodič izdelal obširen elaborat z naslovom »Racionalna reorganizacija raziskovalno razvojne dejavnosti«. To delo vsebuje analizo današnjega stanja, izhodišča, cilje in zasnovo reorganiziranja, novo organizacijo MI, usmeritve RR dejavnosti, projektno organiziranost raziskav, programiranje, usmerjanje inovacij in financiranje RR dejavnosti. Pravkar so v delu tudi dopolnitve, ki se v istem smislu nanašajo še na barvno metalurgijo in lívarstvo. V zelo skopih obrisih je bistvo predlogov v tem, da naj se v okvirih Metalurškega inštituta organizira celotna veriga RR dejavnosti, ki naj bi obsegala raziskave, razvoj, pilotno proizvodnjo in v naslednji fazi tudi inženiring. Predlagana je tudi ustrezna organizacijska povezanost z raziskovalnimi oddelki v delovnih organizacijah SŽ.

Poseben pomen je dan novemu načinu operativnega organiziranja raziskav, ki naj bi potekalo v okviru večjih projektov, usmerjenih v točno določene raziskovalne, razvojne ali proizvodne cilje.

V istem času se je J. Rodič močno angažiral tudi pri projektu »Pilotne proizvodnje«, ki bo realiziran na lokaciji TOVIL-a, vendar v okviru MI. Naročen je že prvi tališniško-livni sklop z vakuumsko tališno pečjo in horizontalno kontinuirno livno napravo.

V začetku januarja 1987 je J. Rodič prevzel dolžnost direktorja Metalurškega inštituta v Ljubljani. Želimo mu izpolnitev vseh načrtov, dobrega sodelovanja in mnogo uspehov pri nadaljnjem delu!

DIPLOMSKA DELA 1986

Z namenom širše obveščati metalurško strokovno javnost o dogajanjih na metalurškem področju je Uredniški odbor sklenil, da bo v vsakoletni prvi številki obja-

vil naslove in kratke izvlečke diplomskih del ter s tem tudi nove diplomirane inženirje, ki so v predhodnem letu diplomirali na odseku za metalurgijo, VTOZD Montanistika — FNT, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani. Letos je izjemoma ta pregled v drugi številki Železarskega zbornika.

— Jožica Bezjak: Pasivacija v notranje oksidiranih srebrovih zlitinah

Če pri notranji oksidaciji prostornina nastalega oksida tako naraste, da zmanjša dotok kisika v reakcijski prostor do take mere, da več ne ustreza dotoku zlitinske sestavine, pride do pojava pasivacije. Avtorica je raziskovala pojav pasivacije v zlitinah srebra z indijem in cinkom. Istočasno jo je zanimala možnost, če lahko majhna količina Al, Si ali Zn prepreči pasivacijo. Nadalje je raziskovala t. i. spomin teh zlitin na zaporedje operacij: notranja oksidacija — notranja redukcija — notranja oksidacija, t. j. če nastanejo po drugi oksidaciji oksidni delci na istih mestih kot po prvi oksidaciji.

56 strani

6 literaturnih citatov

Silva Popič: Vpliv sestave modulatorja na reakcije v talini

V praksi se za izdelavo nodularne litine (litine s kroglastim grafitom) največkrat uporabljajo magnezij in njegove zlitine. Avtorica je uporabila najpogostejšo zlitino tipa FeSiMg, ki vsebuje okoli 55 % Si ter 5...35 % Mg. Pozornost je posvetila reakcijam, ki potekajo med talino in nodulatorjem, ter reakcijskim produktom, ki nastanejo. Raziskave so slonele predvsem na metalografski analizi. Ugotovila je, da se v stiku med nodulatorjem in talino praviloma razvijejo cona neraztaljenega nodulatorja, reakcijska cona ter cona taline, kjer še ni vpliva nodulatorja na strukturo. V reakcijski coni so krogle ogljika na meji taljenja nodulatorja nepravilnih oblik, v smeri proti talini pa se pravilno oblikujejo. V področju taline, kjer pojema vpliv nodulatorja pa je ozka cona, kjer se zopet pojavljajo nepravilne krogle, še naprej pa nastopi širša cona drobnega grafita, ki predstavlja sklenjen grafitni skelet. Koncentracijske in temperaturne spremembe vplivajo na morfologijo.

72 strani

26 literaturnih citatov

Stanislav Horvat: Vpliv nečistoč na potek strjevanja med K.CuZn40

Zaradi nečistoč imajo lahko medeni ulitki kljub enaki kemični sestavi zlitine različne livno-mehanske lastnosti ter različno strjevalno strukturo. Avtor je analiziral vpliv nečistoč, ki jih JUS dovoljuje, t. j. Sn, Al, Ni, Mn, Sb, Fe, Si, Mg in Be. Ugotovil je, da zelo majhni dodatki Al, Si, Mg, Be in Mn povečujejo makrolunker, večji dodatki Fe in Sn pa delujejo nasprotno. Be in Al povzročata dobro ulivnost, neugoden za ulivnost pa je Sb. Mehanske lastnosti je ugotavljal z ulitimi preskušanci ter analiziral vpliv vsakega dodanega elementa.

105 strani

10 literaturnih citatov

Darja Oblak: Vpliv arzena na popustno krhkost jekla

Med oligoelementi v jeklu predvsem P, Sn in Sb povzročajo popuščno krhkost. Podoben vpliv naj bi imel tudi arzen. Avtorica je raziskala vpliv arzena na popuščno krhkost jekla za cementacijo Č. 1221 in jekla za popuščanje Č. 1531. Vzela je po dve primerjalni talini z različno velikim deležem arzena. Z metalografskimi in fraktografskimi preiskavami je ugotavljala temperaturno območje krhkosti, njeno reverzibilnost ter vpliv časa popuščanja. Majhna ugotovljena žilavost jekla s precej arzena (0,57 %) (Č. 1221) ni bila posledica reverzibilne popuščne krhkosti, pač pa krhkosti ferita zaradi raztopljenega arzena v njem. Raziskave bi bilo treba razširiti na več talin.

53 strani

11 literaturnih citatov

Rudi Vorša: Raziskave homogenizacijskega žarjenja bram iz zlitine AlMg6

Raziskava je sestavni del razvojno-raziskovalnega projekta Impola v pripravi: Valjarna 34 000. Zlitina AlMg6 za posebne namene dela težave pri predelavi. Avtor je raziskal ulito stanje polkontinuirno ulitih bram ter skušal poiskati optimalni režim homogenizacijskega žarjenja. Ugotovil je livarske napake, nehomogeno porazdelitev faz, prisotnost nečistoč, predvsem Na ter neustrezne temperature homogenizacijskega žarjenja do sedaj, ker nastopa nataljevanje mikrostrukturnih sestavin že pri 451°C. Dvostopenjsko homogenizacijsko žarjenje pri 450 in 505°C omogoča v prvi fazi raztopitev večkomponentnih evtektikov nato pa pravo homogenizacijo faz.

59 strani

10 literaturnih citatov

Alojz Kegel: Raziskava preoblikovalne sposobnosti bram iz zlitine AlMg6

Naloga je nadaljevanje diplomske naloge R. Vorše. Avtor je analiziral preoblikovalne sposobnosti omenjene zlitine, da bi predlagal optimalni režim tehnologije valjanja. Preoblikovalnost je ugotavljal s tlačnim preskusom v vročem in ugotovil optimalno temperaturo valjanja 480°C. Uporabljene redukcije pri industrijskem valjanju so bile omejene z dopustno obremenitvijo valjalnega stroja. Uporabljena metoda za ugotavljanje preoblikovalnosti bi lahko postala tudi obratovalna metoda.

77 strani

17 literaturnih citatov

Zvonko Erbus: Toplotnotehnična preiskava električne uporovne peči za toplotno obdelavo

Avtor je preiskal komorno peč AEG, ki jo v Mari-borski livarni uporabljajo za napetostno žarjenje medi ter umetno staranje malolegirane bakra. Meritve so pokazale na slab prenos toplote in da je potrebna rekonstrukcija vetril in zračnih kanalov v peči za uspešno napetostno žarjenje, medtem ko je za umetno staranje že sedaj peč zadovoljiva. Avtor predlaga poleg manjših potrebnih rekonstrukcijskih posegov tudi spremenjeno krmiljenje temperature v peči.

70 strani

6 literaturnih citatov

Tatjana Večko: Obseg raziskav pri osvajanju kompaundnih jekel

Pri orodnih jeklih se za kompaundna gradiva odločamo zaradi doseganja željenih uporabnih lastnosti in zaradi boljše gospodarnosti pri izdelavi orodij, npr. s kombinacijo konstrukcijskega in orodnega jekla pri industrijskih nožih dobimo trdno in žilavo osnovo ter dobro rezilnost površine. S študijem difuzije, spremembe mikrostrukture pri topli plastični deformaciji ter valjanjem kompaundnih klinov je avtorica ugotovila pogoje priprave gradiv za kompaundiranje s toplim valjanjem, pomen kemične sestave ter difuzije v prehodni coni. Obenem je ugotovila, katere raziskave so nujno potrebne, da ugotovimo možnost izdelave in preoblikovanja kompaundnih dvojic pri jeklih.

108 strani

49 literaturnih citatov

ODSEK ZA METALURGIJO, VTOZD MONTANISTIKA — FNT

Z željo spremljati dogajanja na šoli, ki vzgaja inženirje, diplomirane inženirje, magistre in doktorje metalurgije, bo Železarski zbornik občasno objavljati tudi osebne novice s tega področja. Zato v tej številki objavljamo kratko organizacijsko shemo odseka za metalurgijo skupaj s pregledom učiteljev in sodelavcev.

V okviru rudarskega oddelka tehniške fakultete ljubljanske univerze je bil leta 1935 ustanovljen kabinet za fužinarstvo, ki ga je vodil doc. dr. M. Žumer. Leta 1939 je bilo sklenjeno, da se ustanovi metalurški odsek na oddelku za montanistiko in v začetku naslednjega leta je to potrdil tudi univerzitetni svet. Odsek je bil sestavljen iz zavodov: za kovinarstvo, toplotno tehniko in peči, železarstvo, fužinarsko strojeslovje. Po osvoboditvi leta 1945 so se enote metalurškega odseka preimenovali v inštitute ter število enot se je povečalo na 5: za inštitut za metalografijo. Podobne enote so še danes, le da se imenujejo katedre.

Danes je metalurški odsek enota v okviru VTOZD Montanistika, ki je enota Fakultete za naravoslovje in tehnologijo. Personalna zasedba ter individualni poslovodni organi pa so naslednji (do jeseni 1987):

Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo

dekan: red. prof. dr. Jože Marsel, dipl. inž. kemije
VTOZD Montanistika

predstojnica: red. prof. dr. Vera Gregorič, dipl. inž. geologije

Odsek za metalurgijo

predstojnik: doc. dr. Franc Pavlin, dipl. inž. metalurgije

Katedra za metalografijo:

Ivan Kosovinc, red. prof.

Velibor Marinković, red. prof.

Savo Spaić, doc.

Vesna Perhaj, tehniški sodelavec

Katedra za ekstraktivno metalurgijo:

Bogomir Dobovišek, red. prof.
Vasilij Gontarev, doc.
Jakob Lamut, izred. prof.
Andrej Paulin, red. prof.
Dušan Repovš, doc. matematike
Andrej Rosina, izred. prof.
Marjan Senegačnik, red. prof. kemije
Marjeta Blažej, tehniški sodelavec
Simona Koren, tehniški sodelavec

Katedra za metalurško energetiko:

Tomaž Kolenko, doc.
Franc Pavlin, doc.
Bogdan Sicherl, red. prof.
Marija Ribič, tehniški sodelavec

Katedra za tehnologijo in livarstvo:

Marin Gabrovšek, red. prof.
Pavel Jagodič, mag., prof. višje šole
Ladislav Kosec, red. prof.
Ciril Pelhan, red. prof.
Anton Smolej, doc.
Milan Trbižan, doc.
Tomaž Martinčič, tehniški sodelavec
Tatjana Smole, tehniški sodelavec

Katedra za preoblikovanje in metalurško strojništvo:

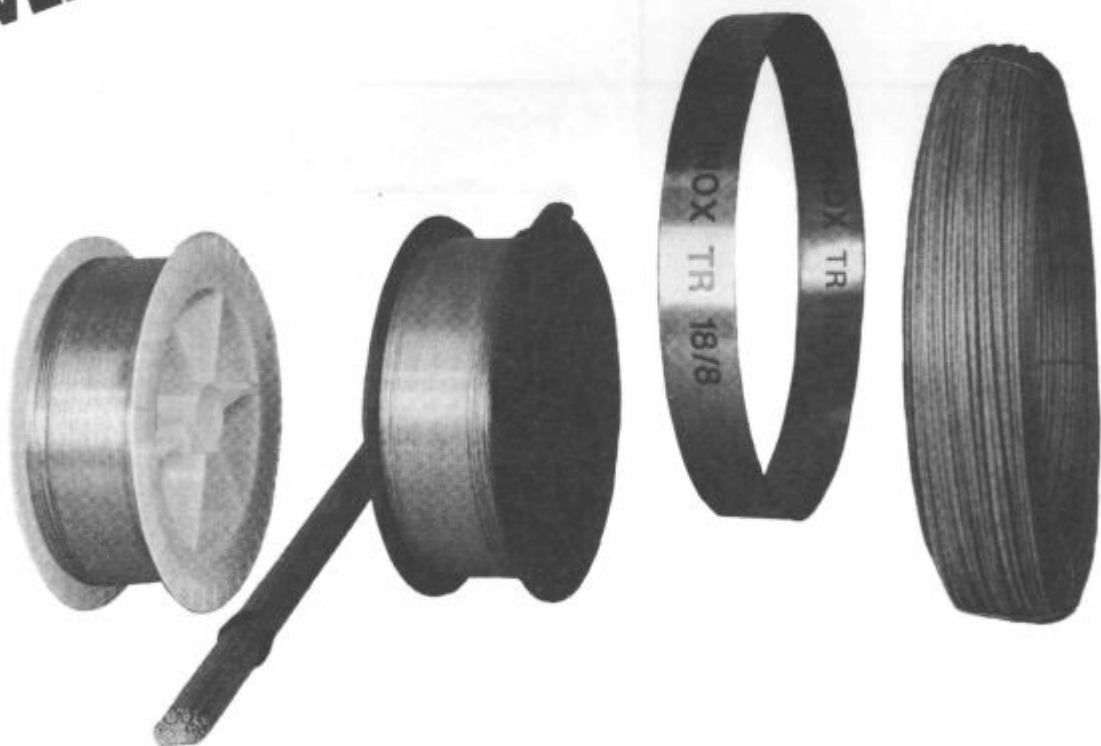
Vincenc Čizman, red. prof.
Janko Perne, dipl. inž., predavatelj
Rado Turk, doc.
Ivan Bizjak, dipl. inž., asistent
Peter Fajfar, dipl. inž., stažist asistent
Milan Terčelj, dipl. inž., stažist raziskovalec

NOVO

VLEČENE ŽICE IZ NERJAVNIH JEKEL

ACRONI

žice za mreže, verige
in za oplaščene elektrode



MIG — varilne žice
EPP — varilne žice
TIG — varilne žice



**SLOVENSKE
ŽELEZARNE**

ŽELEZARNA JESENICE

64270 Jesenice, Cesta železarjev 8

telefon: (064) 81-231, 81-341, 81-441

telegram: Železarna Jesenice, teleks: 34526 ZELJSN

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

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

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

VSEBINA

UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462

ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb

Metalurgija — Plavž — Svinec — Energija

A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik

Reaktivnost koksa in njen vpliv na delo plavža

Železarski zbornik 21 (1987) 2 s 65—71

Reaktivnost koksa je zelo pomembna za obratovanje plavža. Na osnovi modifikacije Koppersove metode za merjenje reaktivnosti smo pri svinčevem plavžu v Mežici ugotavljali odvisnosti med reaktivnostjo in specifično porabo koksa, izdelali smo primerjalni diagram za vrednosti reaktivnosti po Koppersovi in naši metodi, ter na koncu prišli do odvisnosti med specifično porabo koksa in sestavo plinov, ki nastanejo pri zgorevanju. Ta odvisnost pa predstavlja enega izmed parametrov za računalniško vodenje plavža.

Avtorski izvleček

UDK: 536.2:621.771.07

ASM/SLA: 12, W23k, P11j

Metalurgija — ohlajanje — sevanje sivih površin — faktor vidnosti

B. Brudar

Ohlajanje jeklenega valja na vozičku

Železarski zbornik 21 (1987) 2 s 85—92

Opisan je dvodimenzionalni matematični model ohlajanja vročega jeklenega valja, ki se nahaja v manjši oddaljenosti od vozička, ki je pokrit s šamotno plastjo. Pri tem predpostavljamo, da gre za prenos toplote s sevanjem in s konvekcijo. Pri sevanju predpostavljamo, da gre za sevanje sivih površin in pri izračunu toplotnih tokov upoštevamo zorni kot (faktor vidnosti), pod katerim se »vidijo« med seboj ploskve, ki izmenjujejo toploto.

Toplotno enačbo rešujemo z metodo končnih diferenc v cilindrični mreži v preseku valja in v pravokotni mreži v šamotni plasti.

Robni pogoj je nelinearen, vendar pa z opisano iteracijsko metodo najdemo rešitev.

Omenjeni model predstavlja izhodišče za študij prenosa toplote v ogrevnih pečeh, kjer bomo upoštevali konkretno zgradbo same notranjosti peči in dejansko razporeditev blokov v njej.

Avtorski izvleček

UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25

ASM/SLA: K 9p, K1, K2, TSb, 18—72

Metalurgija — reparaturno varjenje — toplotna obdelava — dodajni materiali

J. Gnamuš, G. Rihar

Reparaturno varjenje orodnih jekel

Železarski zbornik 21 (1987) 2 s 73—76

Prispevek obravnava probleme, ki nastopajo pri reparaturnem varjenju, ki zadnje desetletje dobiva vedno večji pomen v industriji. Uvajanje tehnologije reparaturnega varjenja v proizvodnjo orodij prinaša nove tehnične možnosti in ekonomske prednosti.

Pri tehnologiji navarenja orodnih jekel je zelo važna pravilna izbira dodajnih materialov, prav tako pa tudi predhodna in končna toplotna obdelava.

Avtorski izvleček

UDK: 531:536.4:517.2

ASM/SLA: U10, Q25p, U4e

Mehanika — temperaturne napetosti — diferencialne enačbe ter vektorska in tenzorska analiza

F. Grešovnik

Računanje temperaturnih napetosti v elastičnem področju

Železarski zbornik 21 (1987) 2 s 77—83

Izpeljane so osnovne zveze za izračun temperaturnih napetosti v elastičnem področju. Pri obravnavi praktičnih primerov je uporabljena analitična metoda reševanja diferencialnih enačb.

Avtorski izvleček

INHALT

UDK: 536.2:621.771.07

ASM/SLA: I2, W23k, P11j

Metallurgie — Kühlung — Strahlung zwischen grauen Flächen — Winkelverhältniss

B. Brudar

Die Kühlung eines stählernen Zylinders auf einem Wagen

Železarski zbornik 21 (1987) 2 S 85—92

Ein zweidimensionales mathematisches Model für die Kühlung eines Stählernen Zylinders der sich in einer kleinen Entfernung von einem Wagen befindet, bekleidet mit einer Schicht aus Schamotte wird beschrieben. Dabei wird es angenommen, dass es sich um einen Wärmeaustausch durch Strahlung und Konvektion handelt. Bei der Strahlung wird weiter angenommen, dass es sich um die Strahlung grauer Flächen handelt und bei der Ausrechnung der Wärmeflüsse wird der Blickwinkel bzw. das Winkelverhältniss zwischen den Flächen, die sich sehen und die Wärme austauschen berücksichtigt.

Die Wärmeleitungsgleichung ist mit der Methode der endlichen Differenzen gelöst worden und zwar im zylindrischen Netz für den Zylinderquerschnitt und im rechteckigen Netz für die Schamotteschicht.

Die Randbedingung ist nicht linear, jedoch kann man mit der beschriebenen Iterationmethode eine Lösung finden.

Das beschriebene Modell stellt eine Grundlage für das Studium des Wärmeaustausches in Erwärmsöfen dar, wo auch die konkrete Konstruktion des Ofeninneren und die tatsächliche Verteilung der Blöcke in Betracht genommen werden. Auszug des Autors

UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462

ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb

Metallurgie — Hochofen — Blei — Energie

A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik

Reaktionsfähigkeit von Koks und deren Einfluss auf die Arbeit des Hochofens

Železarski zbornik 21 (1987) 2 S 65—71

Die Reaktionsfähigkeit von Koks ist für den Betrieb vom Hochofen sehr wichtig. Aufgrund der modifizierten Methode für die Bestimmung der Reaktionsfähigkeit nach Koppers hat man beim Hochofen für die Gewinnung von Blei in Mežica die Abhängigkeit zwischen der Reaktionsfähigkeit und dem spezifischen Koksverbrauch festgestellt. Ein Vergleichsdiagramm für die Reaktionsfähigkeitswerte nach der Koppersmethode und unserer Methode ist ausgearbeitet worden. Im weiteren ist die Abhängigkeit zwischen dem spezifischen Koksverbrauch und der Zusammensetzung der beim Verbrennungsprozess entstehenden Gase festgestellt worden. Diese Abhängigkeit stellt den Parameter für die rechnerische Führung des Hochofens dar.

Auszug des Autors

UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25

ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18—72

Metallurgie — Reparaturschweissen — Wärmebehandlung — Schweisszusatzwerkstoffe

J. Gnamuš, G. Rihar

Reparaturschweissen von Werkzeugstählen

Železarski zbornik 21 (1987) 2 S 73—76

In Beitrag werden Probleme behandelt, welche beim Reparaturschweissen auftreten, das im letzten Jahrzehnt in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die Einführung der Technologie des Reparaturschweissens in die Produktion von Werkzeugen bringt neue technische Möglichkeiten und ökonomische Vorteile.

Bei der Technologie der Auftragschweissung von Werkzeugstählen ist die richtige Auswahl der Schweisszusatzwerkstoffe von besonderer Wichtigkeit, genau so auch die vorgehende und die nachträgliche Wärmebehandlung.

Auszug des Autors

UDK: 531.536.4:517.2

ASM/SLA: U10, Q25p, U4e

Mechanik — Temperaturspannungen — Differentialgleichungen — Vektor und Tensoranalyse

F. Grešovnik

Berechnung der Temperaturspannungen im elastischen Bereich

Železarski zbornik 21 (1987) 2 S 77—83

Die Grundverbindungen für die Berechnung der Temperaturspannungen im elastischen Bereich werden ausgeführt. Bei der Behandlung praktischer Beispiele ist für die Lösung der Differentialgleichungen die analytische Methode angewendet worden.

Auszug des Autors

CONTENTS

UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462
ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb
Metallurgy — Blast Furnace — Lead — Energy

A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik

Coke Reactivity and Its Influence on the Blast Furnace Operation

Železarski zbornik 21 (1987) 2 P 65—71

Coke reactivity is very important for the blast furnace operation. With a modified Koppers method for reactivity measurements, the relationship between the coke reactivity and its specific consumption in the lead blast furnace in Mežica was determined. Further, a comparison plot for the absolute values of reactivity by the Koppers and by our method was constructed. Finally, the relationship between the coke consumption and the composition of the combustion gases was deduced. This relationship can be applied in a computer control of the blast furnace operation.

Author's Abstract

UDK: 536.2:621.771.07
ASM/SLA: I2, W23k, P11j
Metallurgy — Cooling — Grey-Surface Radiation — View Factor
B. Brudar

Colling of a Steel Cylinder on a Chariot

Železarski zbornik 21 (1987) 2 P 85—92

A twodimensional mathematical model of cooling a hot steel cylindrical block being placed close above the chariot platform which is covered with a fire-clay layer is described. Heat transfer by radiation and by convection is assumed. In radiation the assumption of a grey-surface radiation is assumed, and the geometrical view factor of radiation exchange between surface elements is taken in account in calculating the heat flows.

The heat equation is being solved by the finite-difference method in the cylindrical net in the cylinder cross section, and in the rectangular net in the fire-clay layer.

The boundary condition is not linear but the described iteration procedure enables to come to a solution.

The mentioned model represents the starting point for studying the heat transfer in heating furnaces where the actual construction of the furnace interior and the actual arrangement of the ingots in it can be taken in account.

Author's Abstract

UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25
ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, I8—72
Metallurgy — Repair Welding — Heat Treatment — Filler Metals

J. Gnamuš, G. Rihar

Repair Welding of Tool Steel

Železarski zbornik 21 (1987) 2 P 73—76

The paper treats the problems appearing in repair welding which gains the industrial importance in the last decade. Introduction the repair welding technology into the tool manufacturing process gives new technical possibilities and economic advantages.

In building up the tool steel the selection of filler metal as well as the preceding and final heat treatment are of a great importance.

Author's Abstract

UDK: 531.536.4:517.2
ASM/SLA: U10, Q25p, U4e
Mechanics — Temperature Stresses — Differential Equations and Vector and Tensor Analysis

F. Grešovnik

Calculation of Temperature Stresses in the Elastic Region

Železarski zbornik 21 (1987) 2 P 77—83

Basic correlations for calculating temperature stresses in the elastic region are deduced. In treating practical examples the analytical method of solving differential equations was applied.

Author's Abstract

СОДЕРЖАНИЕ

UDK: 536.2:621.771.07

ASM/SLA: I2, W23k, P11j

Металлургия — охлаждение — излучение серых поверхностей — фактор видимости.

B. Brudar

Охлаждение стального вала на тележке.

Železarski zbornik 21 (1987) 2 С 85—92

Дано описание двухразмерной математической модели охлаждения горячего стального вала, который находится в небольшом расстоянии от тележки и покрыт с слоем шамота. При этом предполагаем, что передача теплоты выполняется излучением и выпуклостью. При излучении предполагаем, что оно происходит от серых поверхностей, а при вычислении тепловых потоков берётся во внимание угол видимости (фактор видимости), под которым «видны» между собой площади, которые сменяют теплоту.

Тепловые уравнения разрешаем методом конечной разности в цилиндрической сети в сечении вала и в прямоугольной сети шамотного слоя.

Условие хромки нелинейное, хотя с описанным методом итерации решение возможно.

Упомянутая модель представляет собой исходной пункт для изучения передачи теплоты в нагревательных печах, где надо конкретно учитывать конструкцию внутренности печи и фактическое распределение в ней блоков.

Автореф.

UDK: 669.431.22:662.749.2:669.046.462

ASM/SLA: C21a, RMj43, P13b, Pb

Металлургия — доменная печь — свинец — энергия

A. Paulin, J. Lamut, D. Dretnik

Реакционная способность кокса и его влияние на работу доменной печи.

Železarski zbornik 21 (1987) 2 С 65—71

Реакционная способность кокса представляет собой значительное влияние на режим работы доменной печи. На основании модификации метода по Копперсу (Koppers) для измерения реактивности авторы статьи определяли при доменной печи свинца промышленного центра Межица (ФР-Словения зависимость реакционной способности кокса и его удельного потребления, приготовили также сравнительную диаграмму на значение реактивности по Копперсу и по методу завода в Межице. В конце статьи заключили о зависимости между удельного потребления кокса и состава разов, которые образуются при сгорании. Эта зависимость же и представляет один из параметров для расчётного управления доменной печи.

Автореф.

UDK: 621.791.004.67:669.14.018.25

ASM/SLA: K9p, K1, K2, TSb, 18—72

Металлургия — ремонтная сварка — термическая обработка — добавочный материал.

J. Gnamuš, G. Rihar

Ремонтная сварка инструментальных сталей.

Železarski zbornik 21 (1987) 2 С 73—76

В статье рассмотрены вопросы, которые получают при ремонтной сварки, что в течении последних десяти лет оказывает всё больше значение в промышленности. Ведение технологии ремонтной сварки при изготовлении инструментов вызывает новые технические возможности и экономические преимущества.

При технологии приварки инструментальных сталей существенное значение имеет правильный выбор добавочного материала, а также предварительная и конечная термическая обработка.

Автореф.

UDK: 531:536.4:517.2

ASM/SLA: U10, Q25p, U4e

Механика — температурные напряжения — дифференциальные уравнения и векторный и тензорный анализ.

F. Grešovnik

Вычисление температурных напряжений в области упругости.

Železarski zbornik 21 (1987) 2 С 77—83

Выполнены основные связи для исчисления температурных напряжений в области упругости. При рассмотрении практических примеров был употреблен аналитический метод разрешений дифференциальных уравнений.

Автореф.