

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

METALS ALLOYS TECHNOLOGIES

LETO 26 št. 3. 1992



IZDAJAJO ŽELEZARNA JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN INŠTITUT ZA KOVINSKE
MATERIALE IN TEHNOLOGIJO LJUBLJANA
REVIJA JE PREJ IZHAJALA POD NASLOVOM ŽELEZARSKI ZBORNIK

Navodila avtorjem za pripravo člankov za objavo v reviji *Kovine, zlitine, tehnologije*

V letu 1992 uvajamo nov način tehničnega urejanja in priprave za tisk revije *Kovine, zlitine, tehnologije*. Da bi pocenili tiskarske stroške, skrajšali čas od prejema članka do njegove objave in prepustili avtorju končno odgovornost za morebitne neodkrte tipografske napake, smo se v uredništvu odločili, da izkoristimo možnosti, ki jih danes nudi *namizno založništvo*.

Za oblikovanje in pisanje člankov smo izbrali $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ oziroma $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ sistem, ki je za pisanje tehničnih člankov in knjig v svetu najbolj razširjen. $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ oziroma $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ oblikovalnik besedil je izdelan za skoraj vse vrste računalnikov, od IBM PC kompatibilnih računalnikov, Apple Macintosh računalnikov, Atarijev, pa do velikih računalnikov. Besedila, oblikovana v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ -u, so enostavno prenosljiva, saj imajo obliko ASCII zapisa. Kodiranje naših šumnikov je enotno rešeno, tako da lahko pošljete članek, napisan v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ -u, kamorkoli po svetu, pa z njimi ne bo težav. Zato naprošamo avtorje, če je le mogoče, da napišejo svoje članke z $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ oblikovalnikom besedil, sicer pa naj nam poleg besedila na papirju pošljejo vsaj disketo z običajnim ASCII zapisom besedila brez kakršnih koli drugih ukazov za formatiranje.

Vsebina članka

Kako naj članek izgleda vsebinsko, naj si avtorji ogledajo v starih izdajah *Železarskega zbornika*. Vsak članek pa mora vsebovati:

- slovenski in angleški naslov članka,
- imena ter naslove avtorjev,
- povzetka v angleščini in slovenščini,
- reference, ki naj bodo v besedilu članka označene z zaporednimi številkami, primer¹⁻⁵. Način citiranja članka: avtor, inicialkam naj sledi priimek, naslov članka, ime revije, letnik, strani, leto. Način citiranja knjige: avtor, naslov, založnik in kraj izdaje, leto, po potrebi poglavje ali strani.

Besedilo članka naj bo razdeljeno na razdelke (označene z zaporednimi številkami) in po potrebi še na podrazdelke (označene z decimalno številko, kjer celi del označuje razdelek).

Slike

Vse slike naj bodo na posebnih listih papirja, z jasno označeno številko slike. Slike naj bodo označene z zaporednimi številkami povsod v članku. Originali za vse vrste slik naj bodo ostri in brez šuma. *Risbe* naj bodo narisane s črnim na belem ozadju. Vse oznake in besedila na risbah naj bodo v istem jeziku kot besedilo članka in dovolj velike, da omogočajo pomanjšanje slike na 8 cm. Le izjemoma lahko slika sega čez obe koloni besedila (16.5 cm). *Fotografije* so lahko katerekoli običajne dimenzije, na svetlečem papirju in

z dobrim kontrastom. Mikroskopska in makroskopska povečevanja označite v podpisu na sliki, še bolje pa z vrisanjem ustrezne skale na fotografiji.

Za vsako sliko naj avtor predvidi, kam naj se slika v besedilu članka uvrsti, kjer naj se nahaja ustrezen podnapis z zaporedno številko slike (na primer: "Slika 3 prikazuje..."; nikakor pa ne: "Na spodnji sliki vidimo...").

Tabele

Avtor naj se izogiba zapletenih tabel z mnogo podatki, ki bralca ne zanimajo, posebej še, če so isti podatki tudi grafično ponazorjeni. Nad vsako tabelo naj se nahaja zaporedna števila tabele s pojasnilom. Tabele naj bodo povsod v članku označene z zaporednimi številkami.

Pisanje besedil na računalniku

Avtorje naprošamo, da pri pisanju besedil na računalniku upoštevajo naslednja navodila, saj le-ta precej olajšajo naše nadaljnje delo pri pripravi za tisk:

- ne puščajte praznega prostora pred ločili (pikami, vejicami, dvopičji) in za predklepaji oziroma pred zaklepaji,
- puščajte prazen prostor za vsemi ločili (pikami, vejicami, dvopičji)—razen decimalno piko,
- pišite vse naslove in besede z majhnimi črkami (razen velikih začetnic in kratic),
- besedilo naj ne vsebuje deljenih besed na koncu vrstice.

Če avtor pripravlja ilustracije na računalniku, ga naprošamo, da priloži datoteke s slikami na disketo z besedilom članka, s pojasnilom, s katerim programom so narejene.

Pisanje v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ -u

Uporabljajte *article style*, sicer pa se držite vseh $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ konvencij. Vse matematične izraze, imena spremenljivk in podobno (razen SI enot) pišite v matematičnem okolju. Uporabljajte že vgrajene fonte, med pripravo za tisk jih bomo zamenjali z ustreznimi PostScript fonti.

Krtačni odtis

Krtačni odtis—končna podoba članka—bo poslan avtorju v končno revizijo. Avtorja naprošamo, da čim hitreje opravi korekture in ga pošlje nazaj na uredništvo. Hkrati naprošamo avtorje, da popravljajo samo napake, ki so nastale med stavljenjem članka. Če avtor popravljenega članka ne vrne pravočasno, bo objavljen nepopravljen, kar bo tudi označeno.

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

METALS ALLOYS TECHNOLOGIES

|| 229280

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

Izdajajo (Published by): Železarna Jesenice, Železarna Ravne, Železarna Štore in Inštitut za kovinske materiale in tehnologije Ljubljana

Izdajanje KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE delno sofinancira:
Ministrstvo za znanost in tehnologijo

UREDNIŠTVO (EDITORIAL STAFF)

Glavni in odgovorni urednik (Editor): Jožef Arh, dipl. ing.

Uredniški odbor (Associate Editors): dr. Aleksander Kveder, dipl. ing., dr. Jože Rodič, dipl. ing., prof. dr. Andrej Paulin, dipl. ing., dr. Monika Jenko, dipl. ing., dr. Ferdo Grešovnik, dipl. ing., Franc Mlakar, dipl. ing., dr. Karel Kuzman, dipl. ing., Jana Jamar

Tehnični urednik (Production editor): Jana Jamar

Lektorji (Lectors): Cvetka Martinčič, Jana Jamar

Prevodi (Translations): prof. dr. Andrej Paulin, dipl. ing., dr. Nijaz Smajić, dipl. ing. (angleški jezik), Jožef Arh, dipl. ing. (nemški jezik)

NASLOV UREDNIŠTVA (EDITORIAL ADDRESS): KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE,

Železarna Jesenice d.o.o., 64270 Jesenice, Slovenija

Telefon: (064) 81 441

Telex: 37 219

Telefax: (064) 83 397

Žiro račun: 51530-601-25734

Stavek in prelom: Igor Erjavc, **Tisk:** Gorenjski tisk, Kranj, **Oblikovanje ovitka:** Ignac Kofol

IZDAJATELJSKI SVET (EDITORIAL ADVISORY BOARD):

Predsednik: prof. dr. Marin Gabrovšek, dipl. ing.; člani: dr. Božidar Brudar, dipl. ing., prof. dr. Vincen Čizman, dipl. ing., prof. dr. D. Drobnjak, dipl. ing., prof. dr. Blaženko Koroušič, dipl. ing., prof. dr. Ladislav Kosec, dipl. ing., prof. dr. Josip Krajcar, dipl. ing., prof. dr. Alojz Križman, dipl. ing., dr. Karel Kuzman, dipl. ing., dr. Aleksander Kveder, dipl. ing., prof. dr. Andrej Paulin, dipl. ing., prof. dr. Z. Pašalić, dipl. ing., prof. dr. Ciril Pelhan, dipl. ing., prof. dr. Viktor Prosenc, dipl. ing., prof. dr. Boris Sicherl, dipl. ing., dr. Nijaz Smajić, dipl. ing., prof. dr. J. Sušnik, dr. Leopold Vehovar, dipl. ing., prof. dr. Franc Vodopivec, dipl. ing.

Po mnenju Ministrstva za znanost in tehnologijo Republike Slovenije št. 23-335-92 z dne 09. 06. 1992 šteje KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE med proizvode, za katere se plačuje 5-odstotni davek od prometa proizvodov.





Po petindvajsetih letih rednega izhajanja osrednje slovenske metalurške revije smo le tej spremenili ime in obliko. To so narekemale spremembe v slovenski jeklarski industriji, še bolj pa potrebe po drugačnem razvojno raziskovalnem delu za potrebe slovenske metalurške in kovinske industrije na sedanjem Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije, ki je tudi soizdajatelj revije. Pri tem ne gre le za spremembe, ki se dogajajo pri nas, v veliko večji meri so pomembne spremembe nastale v železarski in jeklarski industriji v Evropi in v svetu v času izhajanja *Železarskega zbornika*.

Razvoj v tej panogi industrije je bil in je izredno hiter. Proizvodnja jekla je danes čisto nekaj drugega kot je bila še v preteklosti. To velja tako za konvertorje kot za električne obločne peči, v še mnogo večji meri pa za vlivanje. Zamenjava statičnega vlivanja v bloke z dinamičnim kontinuirnim vlivanjem je sicer največji napredek v proizvodnji jekla, saj sta se s tem močno izboljšala kakovost jekla in izkoristek, vendar je pri visokokvalitetnih in legiranih jeklih naletela

na težave, ki so in še zahtevajo velike napore raziskovalcev pri zahtevi izdelati čisto jeklo z čim manj ali brez površinskih napak na polproduktu, to je na gredici, blumu ali slabu. Najbolj zahtevna v tem oziru je avtomobilska industrija, ki sprejema le izdelke brez kakršnih koli napak, kar velja tako za pločevino kot za profile. Zahtevana je popolna enakomernost lastnosti vseh pošiljk, visoka čistoča jekla, popolna homogenost sredine pri končnih izdelkih, površina brez napak. Tako zahtevna proizvodnja je mogoča le z visoko tehnologijo tako pri izdelavi jekla, kakor tudi pri vlivanju. Vlivanje v daljših sekvencah je zato skoraj nujnost. Z majhnimi preseki pri gredicah večinoma ni mogoče zadostiti tem zahtevam. Potrebna je večja stopnja predelave. Izhodni profil je zato lahko le blum, nekateri pa segajo že celo nazaj v bloku. Pametni proizvajalci so to pot večinoma tudi obdržali. Tako ima *Železarna Ravne* v tem pogledu prednost, ker še vliva bloke. Na *Jesenicah* so to možnost žal zapravili na valjavskem področju, sicer bi danes imeli mnogo več dela kot ga imajo.

Razmere so podobne pri pločevini in trakovih, le da je trg bolj širok. Nova jeklarna na *Jesenicah* obratuje šele pet let, vendar je imela že ob rojstvu nekaj napak. Nima ponovne peči, vlivanje daljših sekvenc ni mogoče, kontiliv pa ni najbolj primeren za vlivanje legiranih in mikrolegiranih jekel. Vzroki za prvo so, da ni bilo denarja, pri drugem pa nas je že prehitel razvoj. Je pač tako, ko gradiš eno, nekdo drug že razvija boljše naprave. Tudi vozimo se v tehnično vedno bolj dovršenih, a tudi dražjih avtomobilih.

Majhen slovenski trg nas sili v Evropo, kjer se soočamo s svetovno konkurenco. Osvajati evropski, pa tudi svetovni trg je zelo težko, ker je treba biti cenejši pri ceni in boljši pri kakovosti. Z zastarelimi in iztrošenimi napravami je prav zagotavljanje kakovosti premalo zanesljivo ali nemogoče, kar nam vstop na evropski trg že vnaprej otežuje. V slovenskih železarnah imamo sicer dovolj znanja in izkušenj, kar pa je v tem trenutku premalo. Le z novimi ali moderniziranimi napravami bo mogoče pošiljati na trg izdelke enakomerne in najboljše kakovosti, ker samo takšne trg tudi sprejma. Vse drugo so kot obupni poizkusi utaplajočega, da bi se obdržal na površini.

Želimo, da bi se ob prenovljeni reviji "*Kovine, zlitine in tehnologije*" združevali v znanju in raziskovalnem delu, kajti brez lastnega razvoja, brez temeljitega zasledovanja in kontrole kakovosti ne bo željenega napredka.

Zaželimo tej naši reviji kakor vsej slovenski jeklarski in kovinski industriji boljših časov. Če bomo združeni v trdnem delu se jih lahko tudi nadejamo.

Vsebina

<i>Ice B. Risteski:</i> Dimenzioniranje meniska tokom kontinuiranog livenja čelika	271
<i>Bratina Janez:</i> Električni lok v obločni peči	275
<i>M. Bolčina:</i> Uporaba PC preglednic s poudarkom na reševanju temperaturnih polj in polj mešanja taline	283
Tehnične novice	
<i>G. Wagner:</i> Economic Reasons and Technical Necessity: Modernization Measures in Rail Rolling Mills	289
<i>F. Legat:</i> Plastična predelava nerjavnih jekel za verige	290
Popravek	296
Doktorska in magistrska dela v šolskem letu 1990/91	299

Dimenzioniranje meniska tokom kontinuiranog livenja čelika

Ice B. Risteski, Institut za rudarstvo i metalurgija, 16-ta Makedonska brigada 18, 91000 Skopje, Makedonija

U predloženom radu dokazane su matematičke jednačine pomoću kojih se može izvršiti dimenzioniranje meniska, na osnovu uticajnih parametara procesa kontinuiranog livenja čelika.

In the given paper the validity of mathematical equations being applied for dimensioning meniscus was proved by influential parameters of continuous casting of steel. Dimensioning of meniscus is the main condition for mathematical model of lubrication between the surface of slab and the mould wall. The obtained quadrature expressions are suitable for direct preparation of software of the model. They correspond to the conditions of actual process of continuous casting of steel.

1 Uvod

Za dinamičku analizu procesa lubrikacije rastopljenim praškom, u rascepu između očvrsnute kore slaba i zida kristalizatora u okolini meniska, neophodno je egzaktno dimenzioniranje meniska. Koliko je poznato autoru ovog rada, do sada u literaturi nisu objavljeni nikakvi matematički podaci o dimenzioniranju meniska, sem aproksimativne numeričke vrednosti za linearan menisk. U istraživanju¹, prvi put su predložene jednačine dimenzioniranja meniska, ali bez njihovog dokaza, što u ovom radu neće biti slučaj.

2 Dimenzioniranje meniska

Kretanje rastopljenog praška u rascepu između očvrsnute kore slaba i zida kristalizatora, u okolini meniska je modelirano prema ilustraciji na sl. 1.

Kako se vidi na sl. 1, x -osa je postavljena u pravcu nivoa tečnog čelika u kristalizatoru, dok je y -osa postavljena po dužini slaba. Lubrikacija rastopljenim filmom praška u prostoru između očvrsnute kore slaba i zida kristalizatora, predstavljena je kao hidrodinamičko podmazivanje viskoznim fluidom između dve neparalelne površine.

Promena maksimalne oscilatorne brzine meniska u pravcu x -ose iznosi

$$2\pi f x = \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{d\eta}{dx} \quad (1)$$

Pomoću integrala diferencijalne jednačine (1)

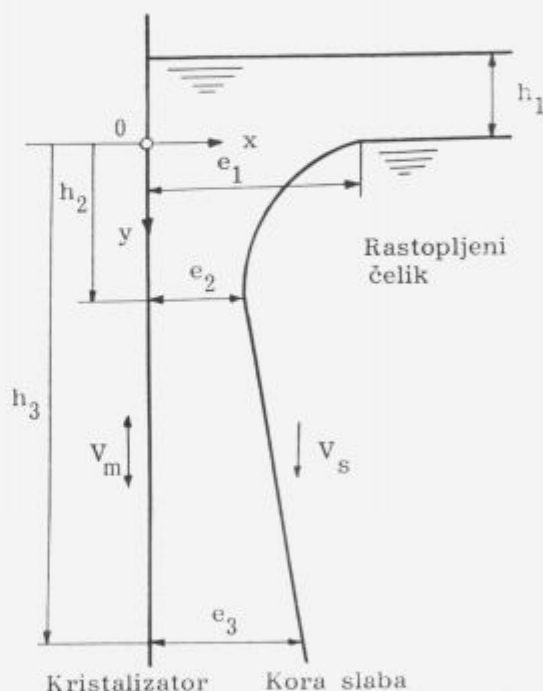
$$\int_0^{e_1} 2\pi f x dx = \int_0^{\eta} \frac{d\eta}{\rho_p} \quad (2)$$

dobija se jednačina

$$2\pi f \frac{e_1^2}{2} = \frac{\eta}{\rho_p} \quad (3)$$

iz koje se vidi, da rastojanje od početka krivoliniskog dela meniska do zida kristalizatora je

$$e_1 = \left(\frac{\eta}{\pi f \rho_p} \right)^{1/2} \quad (4)$$



Slika 1. Model filma rastopljenog praška između očvrsnute kore slaba i zida kristalizatora u okolini meniska¹.
Figure 1. Model of film of molten flux between the solidified shell of slab and the mould wall in the surrounding of meniscus¹.

Na kraju I regiona ($0 \leq y \leq h_2$), ubrzanje rastopljenog praška u x -pravcu će biti

$$\frac{\eta}{\rho_p} \cdot \frac{\partial^2 V_p}{\partial x^2} + g = 0, \quad (5)$$

sa graničnim uslovima

$$V_p(0) = 2\pi f A \cos 2\pi f t_c \quad V_p(e_2) = V_s \quad (6)$$

Posle dvojnje integracije jednačine (5) sa uzimanjem u obzir graničnih uslova (6) dobija se brzina kretanja praška

$$V_p = -\frac{\rho_p g}{2\eta} x^2 + \left(\frac{V_s - 2\pi f A \cos 2\pi f t_c}{\epsilon_2} + \frac{\rho_p g}{2\eta} \epsilon_2 \right) x + 2\pi f A \cos 2\pi f t_c. \quad (7)$$

Potrošnja praška određuje se pomoću formule

$$P_c^{\text{eksp}} = 2\rho_p(a+b) \int_0^t \int_0^{\epsilon_2} V_p dt dx. \quad (8)$$

Ako se u jednačini (8) zameni jednačina (7), a nakon dvojnog integrisanja se dobija potrošnja praška

$$P_c^{\text{eksp}} = 2\rho_p t(a+b) \left(\frac{\rho_p g}{12\eta} \epsilon_2^3 + \frac{V_s + 2\pi f A \cos 2\pi f t_c}{2} \epsilon_2 \right). \quad (9)$$

Posle sređivanja jednačina (9) dobija oblik

$$\epsilon_2^3 + \frac{6\eta(V_s + 2\pi f A \cos 2\pi f t_c)}{\rho_p g} \epsilon_2 - \frac{6\eta P_c^{\text{eksp}}}{\rho_p^2 g t(a+b)} = 0, \quad (10)$$

ili

$$\epsilon_2^3 + p\epsilon_2 + q = 0, \quad (11)$$

gde je

$$p = \frac{6\eta(V_s + 2\pi f A \cos 2\pi f t_c)}{\rho_p g}, \quad (12)$$

a

$$q = -\frac{6\eta P_c^{\text{eksp}}}{\rho_p^2 g t(a+b)}. \quad (13)$$

Na osnovu Cardano-vih formula², realno rešenje jednačine (11) je

$$\epsilon_2 = \left(c_1 + (c_1^2 + c_2^3)^{1/2} \right)^{1/3} + \left(c_1 - (c_1^2 + c_2^3)^{1/2} \right)^{1/3}, \quad (14)$$

gde je

$$c_1 = -\frac{q}{2} = \frac{3\eta P_c^{\text{eksp}}}{\rho_p^2 g t(a+b)}, \quad (15)$$

a

$$c_2 = \frac{p}{3} = \frac{2\eta(V_s + 2\pi f A \cos 2\pi f t_c)}{\rho_p g}, \quad (16)$$

pri čemu jednačina (16) za $t_c = \frac{2n-1}{4f}$, ($n = 1, 2, \dots$) dobija oblik

$$c_2 = \frac{2\eta V_s}{\rho_p g}. \quad (17)$$

Na formu meniska u početku I regiona ($0 \leq y \leq h_2$) najuticajnija je maksimalna brzina kristalizatora $V_m = 2\pi f A$, a na kraju II regiona ($h_2 < y \leq h_3$) najveći uticaj ima brzina izvlačenja slaba V_s , pošto se tada pojavljuje gasni zazor između površine slaba i zida kristalizatora.

Ako se brzine V_m i V_s pretstave kao vektorske veličine, onda se može postaviti sledeći vektorski odnos

$$\frac{V_m}{V_s} = \frac{e_1}{e_3}, \quad (18)$$

tako da je njihov modulni zapis

$$\frac{|V_m|}{|V_s|} = \frac{|e_1|}{|e_3|}, \quad (19)$$

pa prema tome sledi da je

$$\epsilon_3 = \frac{V_s}{V_m} \epsilon_1, \quad (20)$$

t.j.

$$\epsilon_3 = \frac{V_s \epsilon_1}{2\pi f A}. \quad (21)$$

Pošto čvrsti sloj filma prelazi put

$$y_k = A \cos 2\pi f t_c, \quad (22)$$

onda će slab prelaziti put

$$y_s = V_s t, \quad (23)$$

dok će debljina praška iznad nivoa tečnog čelika biti

$$h_1 = y_k + y_s = A \cos 2\pi f t_c + V_s t. \quad (24)$$

Diferenciranjem jednačine (24) u odnosu na vreme, dobija se

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = -2\pi f A \sin 2\pi f t_c + V_s. \quad (25)$$

Iz uslova stacionarnosti sledi

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = 0, \quad (26)$$

t.j.

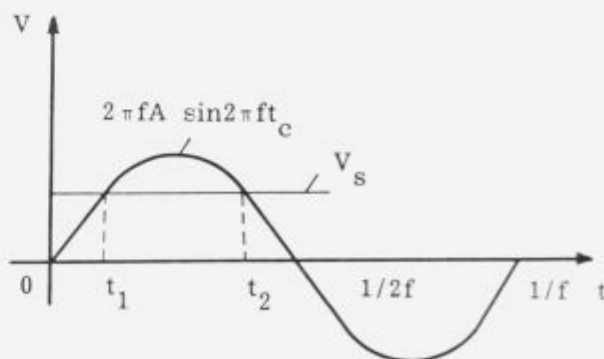
$$-2\pi f A \sin 2\pi f t_c + V_s = 0. \quad (27)$$

Iz sl. 2 i jednačine (27) dobija se

$$t_1 = \frac{1}{2\pi f} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A}, \quad (28)$$

i

$$t_2 = \frac{1}{2f} - t_1 = \frac{1}{2f} - \frac{1}{2\pi f} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A}. \quad (29)$$



Slika 2. Geometrijska interpretacija jednačine (27).

Figure 2. Geometrical interpretation of the equation (27).

Za jednačine (28) i (29), jednačina (24) dobija oblik

$$h_1 = A(\cos 2\pi f t_1 - \cos 2\pi f t_2) + V_s(t_1 - t_2). \quad (30)$$

Neka je

$$\alpha = 2\pi f t_1, \quad (31)$$

t.j. posle zamene jednačine (28) u jednačinu (31) dobija se

$$\alpha = \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A}. \quad (32)$$

Adekvatno, neka je

$$\beta = 2\pi f t_2, \quad (33)$$

ili posle zamene jednačine (29) u jednačinu (33) sledi

$$\beta = \pi - \alpha. \quad (34)$$

Iz trigonometrijske relacije

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}, \quad (35)$$

sa uzimanjem u obzir jednačine (34), dobija se

$$\cos \alpha - \cos \beta = 2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha \right) \right). \quad (36)$$

Ako se iz jednačine (28) oduzme jednačina (29) sledi

$$t_1 - t_2 = \frac{1}{2f} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A} \right). \quad (37)$$

Zamenom jednačina (37), (36) i (32) u jednačinu (30), dobija se

$$h_1 = 2A \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A} \right) \right) - \frac{V_s}{2f} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A} \right). \quad (38)$$

Neka je

$$N = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_s}{2\pi f A}, \quad (39)$$

onda sa uzimanjem u obzir jednačine (39), jednačina (38) dobija oblik

$$h_1 = 2A \sin \frac{\pi N}{2} - \frac{V_s N}{2f}. \quad (40)$$

Ako se na x -osi projektuju sile koje deluju na menisk, dobija se

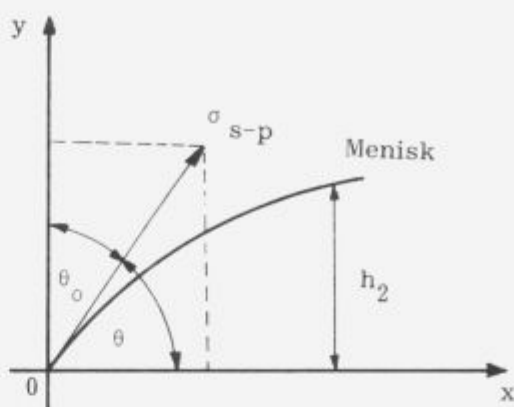
$$\sigma_{s-p} \cos \theta d\theta = (\rho_s - \rho_p) g y dy. \quad (41)$$

Ako se jednačina (41) integriše, sledi

$$\sigma_{s-p} \int_{\pi/2}^{\theta_0} \cos \theta d\theta = (\rho_s - \rho_p) g \int_0^{h_2} y dy, \quad (42)$$

t.j. posle integrisanja dobija se

$$\sigma_{s-p} (-\sin \theta) \Big|_{\pi/2}^{\theta_0} = (\rho_s - \rho_p) g \frac{y^2}{2} \Big|_0^{h_2}, \quad (43)$$



Slika 3. Šema određivanja sile meniska.

Figure 3. Scheme of determining meniscus force.

ili

$$\sigma_{s-p} (-\sin \theta_0 + 1) = (\rho_s - \rho_p) g \frac{h_2^2}{2}, \quad (44)$$

t.j. iz jednačinu (44) sledi da je

$$h_2 = \left(\frac{2\sigma_{s-p}(1 - \sin \theta_0)}{(\rho_s - \rho_p)g} \right)^{1/2}. \quad (45)$$

Postavljanjem brzinske jednačine

$$\frac{1}{h_3} (a + b) V_s = \left(\frac{\pi}{2} V_m \frac{\eta}{\rho_p e_2} \right)^{1/2}, \quad (46)$$

a pošto je

$$V_m = 2\pi f A, \quad (47)$$

iz jednačine (46) i (47) dobija se

$$\frac{1}{h_3} (a + b) V_s = \pi \left(\frac{\eta f A}{\rho_p e_2} \right)^{1/2}, \quad (48)$$

ili posle sređivanje jednačine (48) sledi

$$h_3 = \frac{(a + b) V_s}{\pi} \left(\frac{\rho_p e_2}{\eta f A} \right)^{1/2}, \quad (49)$$

Time je završeno matematičko dimenzioniranje meniska.

3 Diskusija

Idealan oblik meniska utiče na stvaranje žila koje nemaju defekte, međutim ako se radni uslovi brzo menjaju moguće je da se počnu stvarati greške. Mehaničke osobine kore i kontrakcija usled peritektičkih reakcija takođe predstavljaju bitne faktore.

U mnogim slučajevima već je dokazana važnost stabilne brzine livenja i kontrole nivoa čelika u kristalizatoru. Rezultati dobijeni ovakvim praćenjima u skladu su sa teorijom očvršćavanja meniska.

U cilju postizanja kontinuiranosti i stabilnosti očvršćavanja meniska, sve vrednosti radnih parametara treba da budu konstantne.

Kod čelika sa nižim sadržajem ugljenika, <0.10%, temperatura transformacije progresivno se smanjuje i do skupljanja česće dolazi pri kraju kristalizatora nego na menisku. Skupljanje zbog peritektičke reakcije postaje manje važno kod čelika koji imaju više od 0.15% C. Više tečnog čelika direktno se transformiše u gama fazu i javlja se manje ravnosti na površini slaba. Isto tako, dolazi do smanjenja vazdušnog đepa i postiže se glatka površina u delu neposredno do zida kristalizatora, a vazdušni đep više ne utiče na film praška. Ova opšta tvrdnja ne odnosi se na nerđajuće čelike ili specijalne legure.

Postoje još neke razlike između osobina delta feritnih i austenitnih faza što zavisi od odnosa čvrstine i rastvorivosti nečistoća, tako da se zavisno od strukture menja ponašanje kore u pogledu mehaničkih osobina.

4 Zaključak

Dimenzioniranje meniska je glavni preduslov za matematičko modeliranje procesa lubrikacije između površine slaba i zida kristalizatora.

Dobijene kvadraturne formule omogućavaju njihovu direktnu aplikaciju za softverzaciju modela. One su dobro uslovljene i odgovaraju ralnom procesu kontinuiranog livenja čelika.

Oznake

V_s	brzina izvlačenja slaba, m/s;
f	frekvencija oscilacija kristalizatora, Hz;
A	amplituda kristalizatora, m;
a	širina slaba, m;
b	debljina slaba, m;
η	dinamička viskoznost praška, Pa·s;

e_1	rastojanje od početka krivolinijskog dela meniska do zida kristalizatora, m;
ρ_p	specifična težina praška, kg/m ³ ;
e_2	rastojanje od kraja krivolinijskog dela meniska do zida kristalizatora, m;
P_c^{eksp}	eksperimentalna potrošnja praška, kg;
g	zemljino ubrzanje, m/s ² ;
t	vreme livenja čelika, s;
e_3	rastojanje od slaba do zida kristalizatora u linearnom delu meniska, m;
h_1	debljina praška iznad nivoa tečnog čelika u kristalizatoru, m;
h_2	visina krivolinijskog dela meniska, m;
σ_{s-p}	površinski napon između čelika i rastopljenog praška, N/m;
θ_0	početni ugao, rad;
ρ_s	specifična težina čelika, kg/m ³ ;
h_3	ukupna dužina meniska, m;
V_p	brzina kretanja praška u filmu, m/s;
x	horizontalna koordinata, m;
y	vertikalna koordinata, m;
V_m	brzina kristalizatora, m/s;
θ	ravnotežni ugao, rad.

5 Literatura

- I.B. Risteski: Matematičko modeliranje pojava u okolini meniska u toku kontinuiranog livenja čelika, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu 1991, s 37-39.
- D.S. Mitrinović, D.Ž. Đoković: Polinomi i matrice, Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd 1975, s 81-87.

Zusammenfassung

In der vorgelegten Arbeit werden mathematische Gleichungen mit deren Hilfe die Dimensionierung des Meniskus durchgeführt werden kann unter Beweis gestellt, und zwar auf Grund der Einflussparameter des Stranggießverfahrens von Stahl. Die Dimensionierung von Meniskus ist die Vorbedingung für die mathematische

Modelierung der Schmierwirkung zwischen der Brammenoberfläche und der Kokillenwand. Die erhaltenen Quadraturformeln machen deren direkte Anwendung bei der Programmierung des Modelles möglich. Diese entsprechen gut dem realen Prozess des Stranggießens von Stahl.

Summary

In the given paper the validity of mathematical equations being applied for dimensioning meniscus was proved by influential parameters of continuous casting of steel. Dimensioning of meniscus is the main condition for mathematical model of lubrication between

the surface of slab and the mould wall. The obtained quadrature expressions are suitable for direct preparation of software of the model. They correspond to the conditions of actual process of continuous casting of steel.

Električni lok v obločni peči

Bratina Janez, Železarna Ravne

Elektroenergetske in toplotnotehniške karakteristike močnostnega električnega loka v trifazni obločni peči določajo tako konstrukcijo obločne peči kot njeno obratovanje v posameznih tehnoloških fazah proizvodnje jekla. Transformatorska prilagoditev zahtevam moči loka in njegovega stabilnega gorenja je le prvi od številnih vplivnih parametrov loka; elektrotehniške veličine obločne peči kot napetost (U_l), tok (J), fazni faktor $\cos \varphi$, kratkostične (X_k, R_k) in obratovalne (X_o) upornosti peči so tesno povezane s fizikalnimi lastnostmi izmeničnega loka; dolžina loka (L_l), ki ga označujejo impedančna upornost loka (Z_l), faktor loka (θ) in njegova specifična moč (q) so parametri, ki so v neposredni povezavi z gradnjo in obratovanjem modernih močnostnih obločnih peči; erozijski faktor ER in njegova relativna vrednost Er omogočata tako dimenzioniranje in optimiranje gradnje obločnih peči kot njihovo vodenje; razmernostni faktor virtualne induktivne upornosti loka nasproti njegovi nadomestni ohmski upornosti (δ) ter ustrezno razmerje kratkostičnih upornosti peči (γ) pa omogočajo modeliranje vseh obratovalnih energetske in toplotne stanje obločne peči.

Električni lok predstavlja prevajanje električnega toka skozi plin; lok je torej plinski prevodnik toka. V nasprotju s kovinskimi ali tekočinskimi prevodniki toka ima plinsko prevajanje posebne lastnosti, ki se kažejo predvsem v tem, da se ob normalnih pogojih vrši prevajanje le v visokotemperaturnem stanju plina in da je za pričetek prevajanja potreben začetni toplotno-električni vžig loka. Električni lok predstavlja pretok elektronov, ki pri visokih temperaturah (termoemisijsko) izstopajo iz anode, ter pretok ionov, ki se generirajo v plinu z dovolj hitrimi trki elektronov ob njegove atome oziroma molekule. V električnem loku se plin nahaja v plazmi podobnem stanju, kjer so pomešani elektroni, ionizirane molekule in atomi; v plazmi podobnem stanju zato, ker je plazma po definiciji električno nevtralna, električni lok pa ima velik presežek elektronov, ki dosega v stebelu loka do 90% vseh nosilcev električnega toka.

Ločimo enosmerni in izmenični električni lok, glede na to, ali ga vzdržuje enosmerna ali izmenična napetost. Električni lok ima negativno napetostno karakteristiko, kar pomeni, da potrebna napetost gorenja na loku pada z večanjem električnega toka. Lok torej ni stabilen: pri stalni napajalni napetosti narašča preko vseh meja, ker večji tok loka potrebuje manjšo napetost; če napetost znižamo pod določeno vrednost, lok ugasne.

Električnemu loku omogočimo stabilno gorenje na ta način, da v njegov tokokrog vključimo ohmski ali induktivni upor, ki ob povišanem (znižanemu) toku samodejno zniža (zviša) napetost na loku na ravnotežno stanje. Pravimo, da dušilka (pri izmeničnem toku) oziroma upor (pri enosmernem toku) stabilizirata gorenje električnega loka.

Ločimo:

- *vžigno napetost* (U_v), to je napetost, pri katerem se lok prižge: napetost je dovolj visoka za vzpostavitev električnega polja, ki povzroči emisijo elektronov in ionizacijo plina oziroma potrebni napetostni preboj;
- *napetost gorenja* (U_g), to je napetost, ki jo izmerimo neposredno na loku in je odvisna od velikosti električnega toka; napetost gorenja se sestoji iz:
 - katodnega padca napetosti (8–10 V)

- anodnega padca napetosti (25–30 V)
- padca napetosti v stebelu loka (0.8–1.5 V/mm njegove dolžine);
- *ugasna napetost* (U_u), to je napetost, pri kateri lok ugasne.

Za električni lok so značilne različno velike električne poljske jakosti (V/m) ob obeh elektrodah:

- *katodna električna poljska jakost loka*, povzročena z oblakom pozitivnih ionov pred katodo (10 000 kV/m);
- *anodna električna poljska jakost loka*, povzročena z oblakom elektronov pred anodo (15 kV/m);
- *električna poljska jakost stebela loka* (0.8–1.5 V/mm).

Na obeh elektrodah imamo različno velike gostote moči: specifična površinska moč na stiku loka z anodo je bistveno večja od specifične površinske moči na stiku loka z katodo, kar povzroča 6 do 10 krat večjo toplotno abrazijo anodne elektrode.

Gostota elektronov v loku znaša od 10^{16} do 10^{17} elektronov/cm³. Za gorenje električnega loka je potreben tudi minimalen energijski izvor, ki je zmožen vzdrževati potrebno ionizacijsko stanje za njegovo gorenje. Ker je ionizacijsko stanje loka odvisno predvsem od njegove temperature, ta pa je odvisna od toplotnega pretoka lok-okolica, je za gorenje loka neposredno odločujoče prav toplotno stanje njegove okolice.

Poleg statične karakteristike električnega loka poznamo pri izmeničnih pojavih dinamično karakteristiko električnega loka, kjer sta predvsem vidni različno visoki vžigna in ugasna napetost loka. Slednja je vedno nižja od vžigne, kar je posledica toplotne vztrajnosti deionizacijskega pojava, ki ne more slediti hitrosti zmanjševanja izmenične napetosti.

Dinamična karakteristika visokotokovnega izmeničnega loka je prikazana na sliki 1, kjer so razvidne sledeče značilnosti takega loka:

- vžigna (U_v) in ugasna (U_u) napetost se po velikosti le malo razlikujeta, vendar nista enaki v obeh polperiodah: padec napetosti ob negativni elektrodi (katodni

padec napetosti) je manjši od padca napetosti ob pozitivni elektrodi (anodni padec napetosti);

- napetost gorenja loka (U_l) znotraj polperiode je skoraj konstantna.

Izmenični lok se v vsaki polperiodi prižiga in ugaša, njegov tok (J_l) se spreminja po velikosti od vrednosti nič do maksimuma ter ponovno do vrednosti nič, ter po smeri tako, kot se v vsaki periodi zamenjmeta katoda in anoda.

Poleg električnih lastnosti loka so za eksploatacijo pomembne njegove geometrijske in toplotne lastnosti.

Glede na konstantno vsoto katodnega in anodnega padca napetosti (30–40 V) ter glede na približno konstantno električno poljsko jakost v steblo loka (1 V/mm) lahko za industrijsko aplikacijo ugotavljamo dolžino izmeničnega loka obločne peči neposredno iz napetosti loka:

$$L_l(\text{mm}) = U_l(\text{V}) - 40,$$

pri čemer moramo upoštevati, da je U_l napetost med elektrodama, med katerima gori električni lok in ne napetost izvora toka (npr. napetost na sekundarnih sponkah pečnega transformatorja).

Premer električnega loka je v splošnem sorazmeren korenu iz njegovega toka:

$$d(\text{mm}) = k\sqrt{J}.$$

Električni lok se sicer ponazarja s cilindrično obliko s premerom po zgornji enačbi (slika 1), vendar je njegoval oblika bliže elipsoidnemu telesu, katerega pola predstavljata anodni in katodni stik z elektrodo.

Izmerjene gostote električnega toka v steblo loka znašajo pri toku 10 kA do 15 kA med 1 kA/cm² in 4 kA/cm², kar nam daje premere loka med 2.2 cm in 1.5 cm. Pri toku loka 100 kA in njegovi gostoti 10 kA/cm² pa je premer loka cca 3 cm.

Geometrijsko obliko električnega loka ustvarjajo predvsem sile, ki nanj delujejo:

- električna sila, ki nastaja zaradi toka, stiska steblo loka; ta takoimenovani Pinch-efekt skuša stisniti oziroma preščipniti lok;
- difuzijska sila deluje v nasprotni smeri kot elektrodinamična sila in zmanjšuje tlak, ki vlada znotraj loka;
- medsebojne sile v trifaznem tokovnem sistemu treh lokov.

Analize kažejo, da znaša pritisk loka na stiku z elektrodo cca 0.8 bara; ker je običajna industrijska napajalna napetost frekvence 50 Hz, pulzirajo elektrodinamične sile loka s frekvenco 100 Hz. Tudi sicer so fizikalni pojavi v loku izredno dinamični: računa se s hitrostmi ionov med 1000 m/s do 2000 m/s oziroma s termično časovno konstanto loka 10⁻⁵ s.

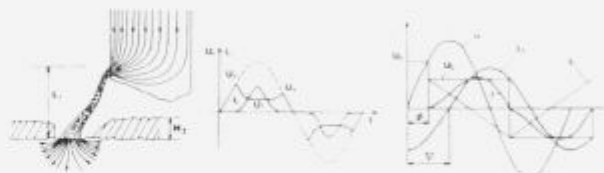
Bistvena aplikativna lastnost električnega loka je njegova visoka temperatura, ki znaša na njegovi površini med 4000°C in 5000°C, v notranjosti pa naraste do 15000°C, oziroma velika toplotna moč, ki se sprošča na loku pri direktni pretvorbi električne energije v toploto: moč posameznega (faznega) loka dosega v modernih obločnih pečeh že 30000 kW. Povprečna specifična površinska moč električnega loka se giblje med 50 kW/cm² in 200 kW/cm². Sicer pa fizikalni pojavi ob pretvorbi električne moči v

toplotno niso popolnoma pojasnjeni in so zelo kompleksni, saj obsegajo tako regeneracijo plazme in plazmi podobnih visokotemperaturnih stanj, taljenje in uparjanje kovin in elektrodnih snovi, njihovo temperaturno erozijo, ionizacijo, disociacijo molekul itd.

Prenos toplote iz loka na okolico poteka na več načinov:

- s *sevanjem* stebila in avreole, ki po nekaterih podatkih predstavlja le 30% do 60% celotne moči loka;
- s *konvekcijo avreole*, ki z zelo dinamičnimi pojavi na svojem obrobju omogoča intenziven toplotni prenos (50% do 30%);
- s *prevajanjem toplote* na stičnih mestih loka z elektrodo (10% do 20%).

Za analitično obravnavo in za boljše razumevanje razmer pri industrijskih aplikacijah loka so primerna idealizirana stanja napetosti in tokov pri izmeničnem električnem loku, kot so prikazane na desni strani slike 1.



Slika 1. Karakteristika izmeničnega električnega loka.

Figure 1. Characteristic of alternating current.

Za vžig loka potrebno vžigno napetost U_v dobimo po preteku časa φ od prehoda napajalne napetosti skozi nič in šele od tega trenutka naprej lahko steče tok med elektrodama, na samem loku pa se pojavi napetost gorenja U_l , ki je neodvisna od velikosti toka loka. Obliko toka loka lahko dobimo z rešitvijo diferencialne enačbe ravnotežnega stanja in robnih pogojev kot vsoto dveh tokov:

- toka J_1 , ki je linearna komponenta toka loka z maksimalno vrednostjo v točkah vžiga loka; v idealiziranih razmerah sta vžigna in ugasna napetost enaki, kar pomeni, da se ob ugasnitvi loka v času prevajanja v pozitivno smer istočasno ta prižge za prevajanje toka v negativno smer.
- toka J_2 , ki je čista sinusna vrednost, ki ima glede na gonilno napetost časovno zakasnitev φ .

Dobljeni rezultati pojasnjujejo praktične pojave pri obratovanju naprav z izmeničnim električnim lokom, kjer:

- razmerje med ohmskim (R) in induktivnim (X) bremenom določa časovno zakasnitev toka J_2 proti sinusnemu poteku napetosti;

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

- zakasneli vžig električnega loka pomeni zakasnitev pričetka prevajanja toka, kar neposredno pomeni tem slabšo vrednost $\cos \varphi$, čim večja je napetost gorenja loka proti njeni temenski vrednosti gonilne napetosti:

$$\cos \varphi = \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_l}{U_t} \right)$$

- rezultirajoči tok loka ni več sinusne oblike, ker je izgubil simetričnost glede na absciso in glede na ordinato.

S harmonsko analizo lahko ugotovimo, da zaradi take popačitve nastopijo v napajalnem omrežju lihi višji harmonski tokovi 5×50 Hz, 7×50 Hz, 11×50 Hz, 13×50 Hz itd. Kot posledica različne napetosti električnega loka v obeh smereh prevajanja toka, ki nastanejo zaradi razlike med anodnim in katodnim padcem napetosti, nastopajo tudi sodi višji harmonski tokovi 2×50 Hz, 4×50 Hz, 6×50 Hz. Ker višje harmonske komponente toka dodatno povzročijo poslabšanje rezultirajočega obratovalnega $\cos \varphi$, je ta vedno slabši, kot bi bil samo zaradi zakasnitve vžiga, slabši pa je tudi zaradi tega, ker so popačitve v realnih razmerah večje, kot jih da idealizirani izračun; in seveda tudi zato, ker nastopajo v tokokrogu z električnim lokom vedno tudi induktivne upornosti lastnega napajalnega sistema.

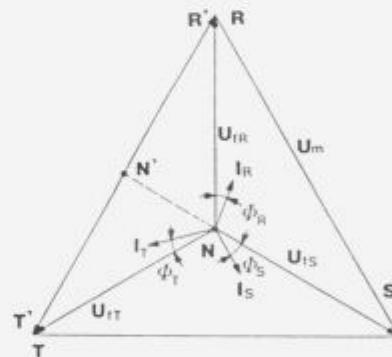
V enofazni elektroobločni peči se električni lok prižge tako, da se elektroda dotakne vložka (ali druge elektrode): torej s kratkim stikom: v tem trenutku steče v sklenjenem tokokrogu krakostičen tok, ki v hipu visoko segreje stično mesto elektrode z vložkom. Grafit elektrode in kovina vložka se segrejeta do uparitve oziroma do ionizacije; če primerno hitro razmaknemo elektrodo od vložka in če imamo na razpolago odgovarjajočo napetost, se ob tem potegne lok (Thowsendov vžig), ki bo gorel stabilno, ustrezno ionizacijskim pogojem oziroma ustrezno razdalji elektroda — vložek. Ob nadaljnjem povečevanju odmika elektroda — vložek bo glede na podano napajalno napetost lok ugasnil, saj bi daljšemu loku ustrezala neka druga višja napetost. Vzdrževanje gorenja loka pomeni ohranjanje dobrih ionizacijskih pogojev in vzdrževanje določenega razmaka med elektrodo in vložkom. Mimo gorenje električnega loka je mogoče le v primeru, ko ima lok po vsakokratnem prehodu toka skozi vrednost nič pogoje za lahek ponoven vžig. Poleg ustrezne toplotnotehnične mikroklima v neposredni bližini loka zagotavlja ponovno prižiganje loka dovolj zgodaj nastajajoča vžigna napetost: zaradi v pečnem tokokrogu prisotnih induktivnih upornosti ima gonilna napetost ob prehodu toka skozi nič že dovolj visoko trenutno vrednost, ki je blizu potrebni vžigni napetosti. Pravimo, da induktivnost v tokokrogu z lokom stabilizira njegovo gorenje; v električni tokokrog obločne peči zato vgrajujemo dušilke ali posebej grajene transformatorje s povišano samoinduktivnostjo. Vžig in gorenje loka v obločni peči sta podoben proces kot ga imamo pri izmeničnem obločnem ročnem varjenju, le da so elektrotplotne vrednosti pri obločni peči za nekaj velikostnih razredov večje.

Pri obratovanju naprav z električnim lokom moramo poleg popačitve sinusnih vrednosti tokov in napetosti in dokajšnjega deleža jalove moči, računati še s spremenljivimi obremenitvami, ki sežejo od kratkega stika (vžig loka) do praznega teka (ugasnitev loka). Obločne peči za industrijsko aplikacijo so grajene tako, da je velikost kratkega stika omejena na dva- do tri-kratno vrednost nazivnega toka naprave. Pravimo, da mora imeti obločna peč svoji nazivni moči ustrezno impedančno prilagoditev. Razmeje med kratkostično močjo napajalnega omrežja in krakostično močjo obločne peči je odločujoče za vpliv obratovanja peči na stabilnost napajalne napetosti (nastanek flikerjev), zato je potrebna tudi prilagoditev moči obločne peči karakteristikam napajalne mreže.

Gorenje treh električnih lokov pri trifazni obločni peči se od opisanega razlikujejo le v posebnostih trifaznega napajalnega sistema, ki nima ničelnega vodnika. Za tak sis-

tem velja pravilo, da mora biti vektorska vsota vseh treh faznih tokov vedno nič. Trifazni sistem napetosti in tokov obločne peči je prikazan na **sliki 2**: posamezne medfazne napetosti (U_m) so podobno kot fazne napetosti (U_f) medsebojno zamaknjene (časovno vektorsko gledano) po 120 stopinj; medfazna napetost je vedno za $\sqrt{3} = 1.73$ večja od ustrezne fazne napetosti. Kazalčne lege elektrodnih tokov so odvisne izključno od razmerja delovnih in jalovih komponent toka pod ustreznimi napetostmi lokov posameznih faz. Dogovorno leži tok loka vedno v fazi z napetostjo loka. Posebnost obratovanja takega sistema treh napetosti je v tem, da nevtralna (ničelna) točka sistema ni fiksirana (s posebnim nevtralnimi vodnikom), ampak se premika znotraj napetostnega trikotnika: fazna napetost katerekoli faze se zato lahko spreminja od vrednosti nič do vrednosti medfazne napetosti.

Opis dogajanj je najenostavneje pričeti z začetkom obratovanja take peči. Elektrode se spuščajo proti vložku tako dolgo, dokler se ga ne dotaknejo: ko se ga dotakne prva elektroda, še ne pride do kratkega stika, ker električni tokokrog ni sklenjen. To se zgodi, ko se vložka dotakne druga elektroda; kratkostični tok povzroči odmik te elektrode in vžig loka, na katerem leži sedaj celotna medfazna napetost. Šele potem, ko se odmakne druga elektroda, ki je bila v kratkem stiku, in se prižge lok tudi pod njo, se medfazna napetost razdeli na napetosti obeh lokov; sorazmerno z nastavitvijo dolžine obeh lokov, saj je tok za oba loka po velikosti enak. (Na **sliki 2** predstavlja tak trenutek točka N' v primeru, da sta bili opisani elektrodi R' in T').



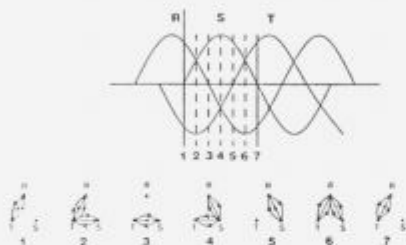
Slika 2. Trifazni sistem napetosti in lokov.

Figure 2. Three-phase system of voltages and arcs.

Od trenutka, ko se je prižgal lok tudi v tretji fazi, kar se je zgodilo po tem, ko se je tudi ta elektroda dotaknila oziroma se odmaknila od vložka, se premakne obratovalna nevtralna točka v novi položaj (iz N' v N), ki ga sedaj določajo vse tri dolžine posameznih lokov, oziroma vse tri napetosti posameznih lokov. Če sta bili na **sliki 2** napetosti pod lokoma faz R in T enaki (polovični medfazni napetosti) se od trenutka vžiga loka v fazi T spreminja (povečuje) napetost loka v fazi R in T in sicer tem bolj, čim bolj se premika nevtralna točka proti središču napetostnega trikotnika. Vidimo značilno lastnost sistema trifaznih električnih lokov, da sprememba gorenja enega loka povzroča spremembo napetosti pod drugima lokoma, čeprav vladajo tod stabilne razmere. Delovno moč takega trifaznega sistema lahko določimo le z vsoto delovnih moči posameznih faz:

$$P_d = U_{fR} J_R \cos \varphi_R + U_{fS} J_S \cos \varphi_S + U_{fT} J_T \cos \varphi_T.$$

Električni lok ugasne pri vsakem prehodu toka skozi nič: ugaša in prižiga se torej z dvojno mrežno frekvenco t.j. s 100 Hz. Pri trifaznem sistemu napetosti oziroma tokov se vrsti ugašanje in prižiganje lokov pod elektrodami na enak način s tem, da vsaka ugasnitev sosednje elektrode kasni oziroma prehiteva za 6,66 ms, kar ustreza 120 stopinj prehitevanja oziroma kasnjenja sosednjih faz trifaznega sistema. Na **sliki 3** je prikazan trifazni sistem tokov, iz katerega se ta kasnitev faz *R, S, T* lepo vidi. Na spodnjem delu slike je podanih sedem zaporednih trenutkov gorenja lokov pod posameznimi fazami (elektrodami) in pripadajoče smeri tokov. Trenutki so zaradi enostavnejšega prikaza izbrani s presledki 30 stopinj ali 1.66 ms: v 10 ms ali v času ene polperiode elektroda *S* dvakrat ne vodi električnega toka — torej lok pod elektrodo resnično ugaša z dvojno frekvenco!



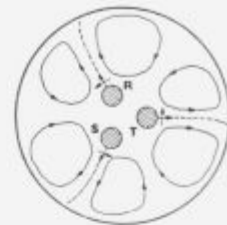
Slika 3. Gorenje električnega loka pri trifaznem sistemu tokov.
Figure 3. Arc operation in a three-phase system of currents.

Geometrijska zamaknitev posameznih elektrod za 120 stopinj in istočasna fazna zamaknitev poteka tokov trifaznega sistema za 120 stopinj povzroči (po Teslinem principu) vrtilno magnetno polje pod elektrodami obločne peči. Iz spodnjega prikaza na **sliki 3** vidimo, da je v času od trenutka 1 do trenutka 7 t.j. v eni polperiodi (10 ms) zarotiralo elektromagnetno polje za 180 stopinj: potreben čas za celoten obrat je torej čas cele periode, ki traja pri frekvenci 50 Hz $1/50 \text{ s} = 20 \text{ ms}$. Na sekundo zarotira polje 50 krat, oziroma s 3000 obrati na min, kar je sinhrono število vrtljajev dvopolnega stroja. Med vrtilnim magnetnim poljem in obločnimi tokovi posameznih elektrod nastopajo sile, ki hočejo pomakniti steblo loka navzven proti steni peči: lok pri trifazni obločni peči gori vedno nekoliko poševno nagnjen od zunanega roba elektrode tako, da sili navzven v korenu loka (glej **sliko 1**). Smer vrtenja elektromagnetnega polja pod elektrodami določa fazno zaporedje *R, S, T*. Poleg opisanih sil, ki delujejo na električni lok, delujejo te pulzirajoče sile tudi na elektrode ter v končni konsekvenci tudi na talino. Sistem sil in smer gibanja taline v obločni peči kaže **slika 4**. Sile, ki nastopajo, so odvisne predvsem od jakosti toka, od simetričnosti obremenitev posameznih faz ter od premera delilnega kroga elektrod. Globina vdiranja električnega toka v talino ni večja kot 60 mm, zato je mešanje taline omejeno predvsem na njeno površino.

V elektroenergetskih obračunavanjih karakterističnih stanj obločne peči ponazarjamo električno moč loka z njegovo nadomestno ohmsko upornostjo:

$$R_l = \frac{P_l}{J_l^2},$$

kar pa velja le v zelo grobem približku samo za zelo stabilno obratovanje pri popolnoma raztaljenem vložku. V splošnem je potrebno poleg čiste ohmske upornosti loka v izračunih upoštevati še njegovo navidezno induktivno upornost X_l .



Slika 4. Površinski tokovi v kopeli obločne peči in sile nanjo.
Figure 4. Surface currents in the melt of arc furnace and forces on it.

Za določena tehnološka stanja v peči ima razmerje obeh upornosti $\delta = X_l/R_l$ karakteristične vrednosti; za fazo taljenja na pr. velja $\delta = 0.30-0.60$, za fazo raztaljenega vložka pa je $\delta = 0.05-0.15$. Razmerje δ je določljivo iz izmerjene vrednosti za obratovalno induktivno upornost X_0 in iz pripadajočega faznega faktorja $\cos \varphi$:

$$\delta = \frac{\gamma \left(\frac{X_0}{X_k} - 1 \right)}{\gamma \frac{X_0}{X_k} \text{ctg} \varphi - 1}$$

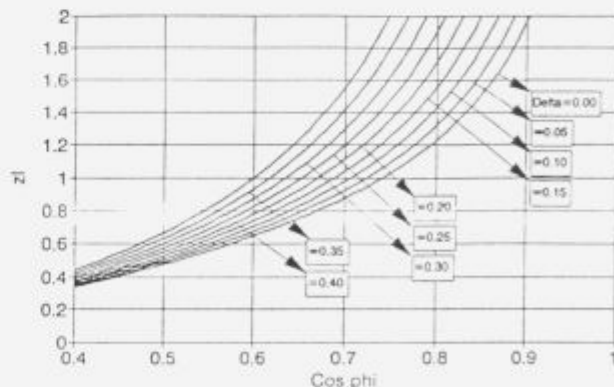
Impedančna upornost loka je glavna regulacijska veličina elektroobločne peči; definirana je kot geometrijska vsota induktivne in ohmske upornosti loka. Absolutno vrednost impedančne upornosti loka Z_l ($\text{m}\Omega$) dobimo po definiciji iz njegove relativne vrednosti z_l in iz kratkostične induktivne upornosti peči X_k ($\text{m}\Omega$):

$$Z_l = z_l X_k.$$

Relativna vrednost impedance loka je kot razmerje med napetostjo loka (e_l) in njegovega toka (j) ter ustrezno z izvajanjem v^1 definirana:

$$z_l = \frac{\gamma \sqrt{1 + \delta^2}}{(\gamma - \delta)^2} (\text{tg} \varphi - \delta) (\gamma - \text{tg} \varphi) \cos^2 \varphi.$$

Potek odvisnosti impedance loka je v odvisnosti od $\cos \varphi$ ter obeh razmernostnih faktorjev γ in δ prikazan na **sliki 5**.



Slika 5. Relativna impedanca električnega loka z_l , $\gamma = 10$.
Figure 5. Relative impedance of electric arc z_l , $\gamma = 10$.

Podrobno so analizirana realna elektroenergetka stanja obločne peči, ki jih dobimo s pomočjo razmernostnih faktorjev kratkostičnih upornosti obločne peči (γ) upornosti loka (δ), $v^1 \text{ in}^2$.

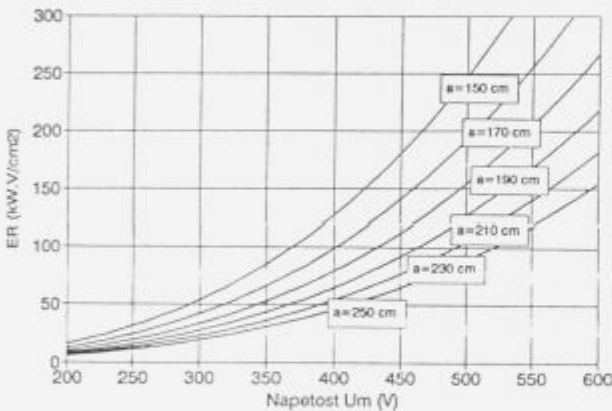
Toplototehniške razmere v obločni peči so v največji meri odvisne od geometrije in fizike loka: sevanje loka v prostor je odvisno od moči loka (napetost loka krat tok loka) ter od njegove dolžine, ki je, kot smo videli, sorazmerna napetosti loka. Erozijski indeks (kW V/cm^2), ki opisuje sevalne lastnosti električnega loka na obzidavo peči, je zato sorazmeren produktu moči loka (P_l) in njegove napetosti (U_l) ter obratno sorazmeren z kvadratom oddaljenosti loka od stene peči (a):

$$ER = \frac{U_l^2 J}{a} \quad (\text{W V/cm}^2).$$

Erozijski indeks lahko izrazimo tudi z napetostjo transformatorja (U_t), induktivno upornostjo peči (X_k), razdaljo lok-stena (a) in z relativno vrednostjo erozijskega indeksa Er :

$$ER = \frac{U_t^3}{X_k a^2} Er \quad (\text{W V/cm}^2).$$

Važno spoznanje za gradnjo obločnih peči je dejstvo, ki izhaja iz zgornje enačbe, da narašča obremenjenost pečne obzidave s tretjo potenco transformatorjeve napetosti in pada s kvadratom razdalje elektroda-stena (slika 6).



Slika 6. Erozijski indeks ER obločne peči v odvisnosti od napetosti transformatorja U_t in razdalje elektrode od stene a , $\gamma = 10$, $\delta = 0.15$, $\cos \varphi = 0.75$.

Figure 6. Erosion index ER of arc furnace depending on transformer voltage U_t and electrode-wall distance a , $\gamma = 10$, $\delta = 0.15$, $\cos \varphi = 0.75$.

Za vodenje obratovanja obločne peči pri določeni napetosti in pri dani geometriji peči je običajno dovolj, če poznamo potek relativnega erozijskega indeksa v odvisnosti od toka loka ali faznega faktorja $\cos \varphi$. Za idealizirane razmere relativno vrednost erozijskega indeksa izrazimo:

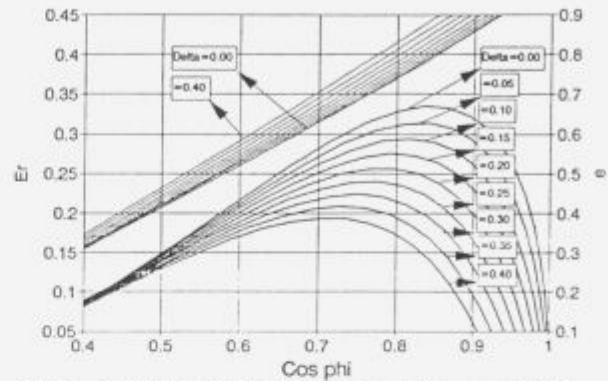
$$Er = \frac{\gamma}{(\gamma - \delta)^3} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi)^2 (\sin \varphi - \delta \cos \varphi).$$

Ker je napetost loka (in s tem tudi njegova dolžina) pri določeni transformatorski napetosti značilno sorazmerna z faznim faktorjem $\cos \varphi$, lahko za potek relativne napetosti loka in za realne razmere zapišemo tudi odvisnost:

$$e_l = \frac{1}{\gamma - \delta} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi).$$

Slika 7 kaže potek obeh relativnih vrednosti za simulacijo realnih razmer v obločni peči, ki jo omogoča vnos

razmernostnega faktorja δ , kot razmerja med virtualno induktivno upornostjo in nadomestno ohmsko upornostjo loka: dolžina loka raste z naraščajočim $\cos \varphi$, maksimalne vrednosti erozijskega indeksa pri raztaljenem vložku pa nastajajo vedno v določenem razponu $\cos \varphi = 0.82-0.86$, zato se moramo takega obratovanja pri raztaljenem vložku izogibati.



Slika 7. Relativni erozijski indeks Er in relativna napetost loka e_l , $\gamma = 10$.

Figure 7. Relative erosion index Er and relative arc voltage e_l , $\gamma = 10$.

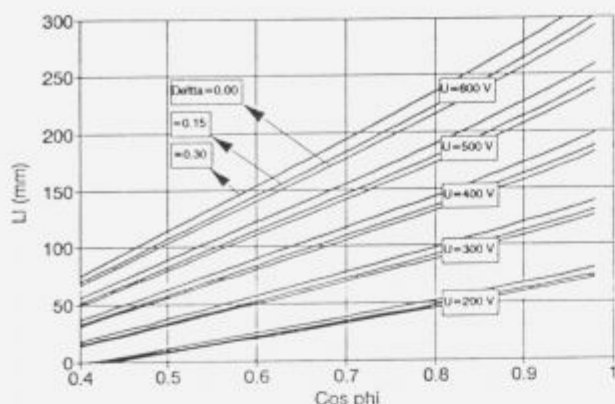
Pri klasično obzidani peči nastanejo omejitve obratovanja z maksimalno dopustno temperaturo obzidave peči (na pr. 1670°C) oziroma z maksimalnim erozijskim indeksom 30 do 50 kW V/cm^2 , pri peči z vgrajenimi vodnohlajenimi stenami pa z maksimalno dopustno toplotno obremenitvijo teh elementov (na pr. 300 kW/m^2) oziroma z mnogo višjim dopustnim erozijskim indeksom (na pr. 80 kW V/cm^2).

Pri obratovanju z zakritim lokom, kjer je lok obdan z neraztaljenim vložkom, ni nevarnosti sevanja loka na obzidavo peči, ob raztaljenem vložku pa zakriva sevanje loka le žilindra, katere višina nad kopeljo je izrazit tehnološki parameter, zato je vodenje obratovanja obločne peči v tej fazi odvisno ne le od potrebne dovedene moči za segrevanje in kritje toplotnih izgub peči temveč tudi od dovoljene dolžine loka. Potrebujemo torej dejansko dolžino loka:

$$\begin{aligned} L_l &= \frac{U_t}{\sqrt{3}} e_l - 40 \quad (\text{mm}) \\ &= \frac{U_t}{\sqrt{3}} \frac{1}{\gamma - \delta} (\gamma \cos \varphi - \sin \varphi) - 40 \quad (\text{mm}) \end{aligned}$$

Ustrezni rezultati so podani na sliki 8. V splošnem velja, da imamo obratovanje s kratkim lokom pri nizkih napetostih in nizkih faznih faktorjih $\cos \varphi$ in obratno.

Že uveljavljeno merilo za okarakterizacijo loka v obločni peči je takoimenovani faktor loka θ (mm/kA), za katerega velja, da je poleg napetosti in $\cos \varphi$ odvisen še od induktivne upornosti peči X_k in razmernostnega faktorja δ tako, da faktor loka raste z naraščajočo upornostjo in z naraščajočim razmerjem δ . Če poenostavimo, da kot napetost loka upoštevamo le vrednost, dobljeno iz njegove dolžine in iz njegove električne poljske jakosti 1 V/mm , so izračunane vrednosti za θ izražene v mm/kA že tudi približne vrednosti impedančne upornosti loka Z_l izražene v $\text{m}\Omega$. Za označitev loka veljajo sledeče vrednosti faktorjev loka po tabeli 1, kjer so prikazani tudi približki ustreznih upornosti loka.



Slika 8. Dolžina električnega loka L_l v odvisnosti od transformatorke napetosti U_t in $\cos \theta$, $\gamma = 10$.
Figure 8. Length of electric arc L_l depending on transformer voltage U_t and power factor $\cos \varphi$, $\gamma = 10$.

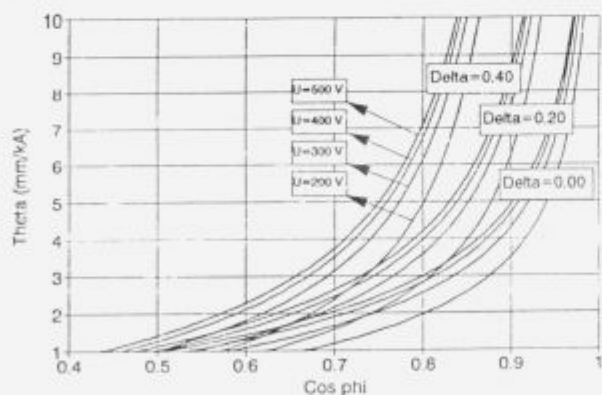
Tabela 1. Karakteristične vrednosti električnega loka obločne peči

	Faktor loka θ (mm/kA)	Približna impedanca loka Z_l (mΩ)
kratek lok	$\theta = 1-3$	1-3
srednje dolgi lok	$\theta = 3-4$	3-4
dolgi lok	$\theta = 4-8$	4-8

Značilni potek faktorja loka kaže **slika 9**. Za idealizirane razmere ($\delta = 0.00$) lahko dobimo faktor loka tudi kot od napetosti neodvisen poenostavljeni približek:

$$\theta = X_k \operatorname{ctg} \varphi - 1 \quad (\text{mm/kA}),$$

v katerem je X_k podan v mΩ.



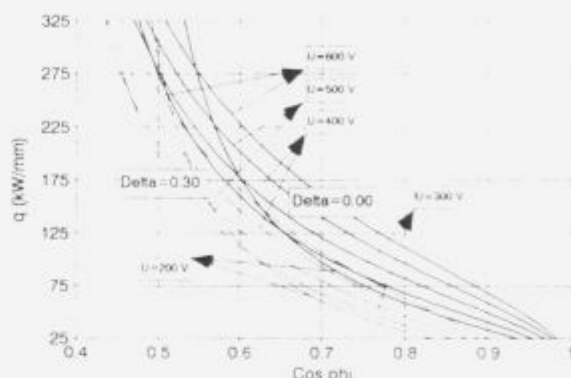
Slika 9. Faktor loka θ v odvisnosti od transformatorke napetosti U_t , induktivne upornosti peči X_k in $\cos \varphi$, $\gamma = 10$, $X_k = 3 \text{ m}\Omega$.
Figure 9. Arc factor θ depending on transformer voltage U_t , inductive reactance of furnace X_k and power factor $\cos \varphi$, $\gamma = 10$, $X_k = 3 \text{ m}\Omega$.

Poleg razmernostnega faktorja upornosti loka δ , absolutnega (ER) in relativnega erozijskega indeksa (Er) loka, dolžine loka (L_l) ter faktorja loka (θ) imamo kot njegovo značilno lastnost še specifično moč loka (q), ki je podana

kot razmerje med močjo loka in njegovo dolžino:

$$q = \frac{U_t}{\sqrt{3}} \cdot \frac{e_l}{\theta} \quad (\text{kW/mm}).$$

Ustrezne odvisnosti so podane na **sliki 10**.



Slika 10. Specifična moč električnega loka q v odvisnosti od transformatorke napetosti U_t in $\cos \varphi$.
Figure 10. Specific power of arc q depending on transformer voltage U_t and power factor $\cos \varphi$.

Realna razmerja posameznih delov sevalnih moči električnega loka, ki slede Stefan-Bolzmannovemu zakonu, v katerem izražajo sevalni in ploskovni integracijski faktorji medsebojno sevanje i -površine na j -površino, lahko na osnovi označb na Sl.1 izrazimo v odvisnosti od dolžine loka, debeline žlindre in od ostalih geometrijskih posebnosti obločne peči. Ločiti moramo moč električnega loka ter moč stebra loka, ki se od moči loka razlikuje za vsoto moči na anodnem in katodnem delu loka, kakor tudi del moči loka, ki se na okolico prenaša s konvekcijo. Za obratovanje obločne peči so važne predvsem moči, ki jih absorbira talina, žlindra in obzidava peči.

Posamezni deleži moči so odvisni tako od čistih elektrotehniških parametrov obločne peči, kakor tudi od njenih konstrukcijskih posebnosti (višina žlindre, oddaljenost elektrod od obzidave oziroma od panelov peči, razdalja oboka peči od taline) in od ostalih toplotnotehniških procesov v peči — predvsem od oksidacije elementov v talini in v žlindri, ki določajo velikosti deležev konvekcijskih toplotnih moči. Kako se deleži posameznih moči spreminjajo z debelino žlindre, je za primer konstantne dolžine loka in za različne višine žlindre prikazano v **tabeli 2**.

Tabela 2. Deleži sevalne moči električnega loka v odvisnosti od debeline žlindre

H_z (cm)	P_{i_t} (%) na talino	P_{i_s} (%) na žlindro	P_{i_o} (%) na obzidavo
10	45	25	30
20	40	35	25
30	35	45	20

Ker prenašamo električno moč s pomočjo električnega loka kot toplotno moč neposredno na vložek, na žlindro in na obzidavo peči, vplivajo razmere okrog električnega loka na izkoristek tega prenosa. Ločimo predvsem dve karakteristični obratovalni fazi obločne peči: fazo taljenja, v

kateri je lok večinoma zakrit z vložkom in raztaljeno fazo, v kateri lahko lok mnogo bolj nezasenčeno seva v okolico. Za doseganje dobrih toplotnih učinkov pri izdelavi jekla sta važni obe fazi: toplotne izkoristke lahko štejemo od vrednosti nič pri kratkem stiku, ko je elektroda v stiku z vložkom ali s talino, do vrednosti cca 90% v fazi taljenja, ko imamo električni lok popolnoma zakrit z obdajajočim vložkom, ali v raztaljeni fazi, ko imamo pri tehnologiji peneče žlindre lok tudi obdan z žlindro. V splošnem dosegamo v času taljenja srednje toplotne izkoristke nad 70%, v raztaljeni fazi pa so toplotni izkoristki vedno nižji.

Zaključek

Toplotnotehniške in elektroenergetke karakteristike trifazne obločne peči za proizvodnjo jekla so neposredno povezane z značilnostmi izmeničnega električnega loka in z razmerami, ki nastajajo ob njegovem gorenju v peči pri posameznih tehnoloških fazah izdelave jekla. Prilagoditev zahtevam stabilnega gorenja električnega loka se kaže predvsem v potrebni izbiri električnih parametrov: moč, razpon napetosti, razpon toka, induktivna upornost napajalnega sistema vključno z visokotokovnim dovodom na peč, s pečnim transformatorjem in napajalnim elektroenergetskim omrežjem. Fizikalne lastnosti loka so opisane z dolžino loka (L_1), faktorjem loka (θ), s specifično močjo loka (q), njegovo absolutno (Z_1) in relativno (z_1) impedančno upornostjo, erozijskim faktorjem (ER) in njegovo relativno vred-

nostjo (Er), z razmerjem (δ) kot kvocientom med virtualno induktivno upornostjo loka (X_1) in njeno nadomestno ohmsko upornostjo (R_1), kakor tudi z osnovnimi karakteristikami peči kot je razmerje (γ), ki ponazarja kvocient iz kratkostične induktivne upornosti (X_k) in kratkostične ohmske upornosti (R_k) peči. Podane so odvisnosti navedenih parametrov od obratovalnih napetosti transformatorja ter od obratovalnega faznega faktorja $\cos \varphi$, ki je glavno merilo za določitev impedance loka kot vodilne regulacijske veličine regulacije moči loka in je tudi splošni parameter, s pomočjo katerega je mogoče skupno s faktorjem δ objektivno ugotavljati obratovalna stanja obločne peči za proizvodnjo jekla.

1 Literatura

- 1 Bratina Janez: Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla, ŽZB 23, 1989/2
- 2 Bratina Janez: Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla — grafičen prikaz, ŽZB 24, 1990/2
- 3 Tsutsuro Miashita: Experience of Long Arc Operatin for Electric Arc Furnace, UIE Malaga 11 1988
- 4 I. Ignatov: Calculation of Thermal Operations of UHP Arc Furnace, UIE 10 Stockholm 1984
- 5 N.P. Lyakishev: Heating of Molten Metal Bath in UHP Electric Arc Steelmaking Furnace, Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya 1990

Zusammenfassung

Die Wärmetechnischen und elektroenergetischen Charakteristiken des dreiphasen Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl sind unmittelbar mit den Eigenheiten des elektrischen wechselstrom Lichtbogens und mit den Verhältnissen die beim Brennen des Lichtbogens im Ofen entstehen, bei den einzelnen technologischen Phasen der Stahlerzeugung, verbunden.

Die Anpassung den Forderungen für ein stabiles Brennen des Lichtbogens äussert sich vor allem in der nötigen Auswahl der elektrischen Parameter: Leistung, Spannungsspannweite, Stromspannweite, induktiver Widerstand des Speisungssystemes einschliesslich mit den Hochstromzuführungen zu dem Ofen, mit dem Ofentransformator und dem elektroenergetischen Speisungsnetz.

Die physikalischen Eigenschaften des Lichtbogens sind beschrieben durch die Lichtbogenlänge (L_1) den Lichtbogenfaktor (θ), durch die speziphische Lichtbogenleis-

tung (q) seinem absoluten (Z_1) und relativen (z_1) Impedanzwiderstand, dem Erosionsfaktor (Er) mit dem Verhältniss (δ) als Quotient zwischen dem virtuelen induktiven Widerstand des Lichtbogens (X_1) und seinem ohmschen Ersatzwiderstand (R_1), wie auch durch die Grundcharakteristiken des Ofens wie das Verhältniss (γ) der den Quotient aus dem induktiven Kurzschlusswiderstand (X_k) und des ohmschen Kurzschlusswiderstandes des Ofens (R_k) veranschaulicht. Gegeben sind die Abhängigkeiten der genannten Parameter von den Betriebsspannungen des Transformators wie von dem Betriebsphasenfaktor $\cos \varphi$ der der Hauptmasstab für die Bestimmung der Impedanz des Lichtbogens als der führenden Regulierungsgrösse für die Regulation der Lichtbogenleistung ist, aber auch ein allgemeiner Parameter mit dessen Hilfe zusammen mit dem Factor δ möglich ist den Betriebszustand des Lichtbogenofens für die Erzeugung von Stahl objektiv zu bestimmen.

Summary

Heat-engineering and electrical characteristics of three-phase steelmaking arc furnace are directly dependent on the characteristics of alternating electric arc, and on the conditions being formed during its appearance in the furnace at single technological stages of steelmaking. Adaptation to the demands of stable electric arc can be achieved mainly by choosing electrical parameters: power, voltage range, current range, inductive reactance of supply system including high-current lead to the furnace, furnace transformer, and supply electrical network. Physical properties of arc are described by the length of arc (L_1), arc factor (θ), specific arc power (q), its absolute (Z_1) and relative (z_1) impedance resistance, erosion factor (ER) and its relative value (Er),

the ratio (δ) between virtual inductive reactance of arc (X_1) and the substituted ohmic resistance (R_1), and also by the basic characteristics of furnace, e.g. ratio (γ) representing ratio of short-circuit inductive reactance (X_k) and short-circuit ohmic resistance (R_k) of furnace. Relations of the previously mentioned characteristics with the operational voltages of transformer and with operational power factor which is the main parameter in determining arc impedance as the most important regulation quantity in controlling arc power are presented. Power factor is also general parameter which enables together with the ratio δ to determine objectively the operational conditions of steelmaking electric arc furnace.



ŽELEZARNA JESENICE

64270 JESENICE, Cesta Železarjev 8 - telefon: (064) 81-341, 81-441, 84-262
telex: (064) 83-395 - telex: 37-219, 37-212 željzn - telegram: Železarna Jesenice

dodajni materiali za varjenje

- Nizko legirane kisle, rutilske in celulozne elektrode
- Visoko produktivne elektrode
- Nizko legirane bazične elektrode
- Srednje legirane bazične elektrode za varjenje drobnozrnatih jekel
- Srednje legirane bazične in rutilske elektrode za varjenje toplotno obstojnih jekel
- Visoko legirane feritne elektrode
- Visoko legirane feritno avstenitne elektrode
- Visoko legirane elektrode za varjenje jekel odpornih na visoke temperature
- Visoko legirane elektrode za posebne namene
- Elektrode za navarjanje
- Elektrode za navarjanje delov, ki se utrujejo z udarci
- Elektrode za navarjanje delov izpostavljenih močni obrabi
- Elektrode in žice na bazi kobalta
- Elektrode za varjenje sive litine
- Elektrode za varjenje brona in AL legur
- Elektrode za žlebljenje in rezanje
- Oploščeni loti
- Aglomerirani praški
- Žice in trakovi za avtomatsko varjenje pod praškom
- Žice za varjenje v zaščitnem plinu CO-MAG
- Žice za varjenje v plinskih mešanicah po postopku MIG
- Žica za varjenje v zaščitnem plinu po postopku TIG
- Žice za plamensko varjenje

Dobri varilci
uporabljajo naše
dodajne materiale
za varjenje
že 50 let



dodajni materiali za varjenje

Uporaba PC preglednic s poudarkom na reševanju temperaturnih polj in polj mešanja taline

Application of Computer Spreadsheets with Emphasis on the Solution of Temperature Fields and Fields of Melt Stirring

M. Bolčina, Železarna Štore

S hitrim razvojem računalniške tehnologije se v inženirski praksi vse pogosteje uporabljajo numerične metode reševanja konkretnih problemov reševanja polj, opisanih z nelinearnimi parcialnimi diferencialnimi enačbami. Rezultati, ki jih na ta način dobimo, bistveno bolj ustrezajo dejanskemu stanju, kot rezultati, ki smo jih dobili po klasičnih postopkih, kjer smo morali vrsto vplivnih faktorjev zanemariti, da smo določene obrazce oziroma procedure lahko uporabili. Edina ovira je, da moramo imeti na razpolago ustrezno programsko in aparaturno opremo.

Application and adaptation of the so called spreadsheets is presented. They can be satisfactorily used in solving partial differential equations. Nowadays they are available practically for each home computer or PC. The method of final differences and iterations are used till in any field segment the desired accuracy is achieved. Use of this method is extremely simple for the solution of a suitable form of Laplace or Poisson differential equation. It must not be neglected that always and immediately also corresponding graphical presentation of the system solution is available. The procedure was illustrated by two examples, i.e. by the solution of Fourier heat transfer differential equation, and by the somewhat more demanding solution of Navier-Stokes differential equation which was applied in estimating the stirring intensity of melt in an induction furnace.

1 Uvod

Prikazali bomo uporabo in prilagoditev tabelaričnih kalkulatorjev oziroma t.i. preglednic (spreadsheet), ki jih lahko v ta namen s pridom uporabimo in so na voljo praktično za vsak hišni ali osebni računalnik. Pri tem je uporabljena metoda končnih diferenc in iterativni postopek do željenega pogreška v poljubnem segmentu polja. Uporaba za reševanje ustrezne oblike Laplaceove oziroma Poissonove diferencialnih enačb za 2D je skrajno enostavna, pri novjših preglednicah pa tudi za tri in več dimenzionalne probleme. Ne smemo zanemariti, da imamo vedno in takoj na voljo ustrezno grafično ponazoritev rešitve sistema. Postopek bomo ponazorili z dvema primeroma in sicer Fourierjeve diferencialne enačbe prenosa toplote in nekoliko zahtevnejšega postopka reševanja Navier-Stokesove diferencialne enačbe, s pomočjo katere smo ocenjevali intenzivnost mešanja taline v indukcijski peči.

2 Preglednice — tabelarični kalkulatorji (spreadsheet)

Pri delu lahko uporabljamo preglednice, kot so npr. Microsoft Works, Excel, Lotus 123, QuattroPro, Symphony itd. Ker predpostavljamo poznavanje vsaj ene od omenjenih preglednic, podajamo samo njihov kratek splošni opis. Posamezne preglednice imajo specifične prednosti. Namenjene so predvsem hitri in enostavni obdelavi podatkov po znanem ključu. Posamezne celice preglednice imajo svoje naslove sestavljene iz črk, ki definirajo stolpec in številko, ki definirajo vrstico nahajanja celice v tabeli, npr.: A1, DF205, CY5698 itd. Vse celice so na začetku prazne in med seboj enakovredne. Vanje lahko pišemo besedila, številčne vrednosti ali formule, s katerimi povezujemo posamezna polja.

Tako lahko npr. s formulo SUM(B2..B133) v trenutku dobimo vsoto vseh vrednosti, ki so v stolpcu B na vrsticah od 2 do 133. Rezultat se izpiše v celici, v kateri smo napisali zgornjo formulo. Dobljeni rezultat lahko ponovno koristimo pri nadaljni obdelavi. Poleg vseh bistvenih matematičnih, logičnih, časovnih itd. funkcij in izrazov, ki so implementirane v posamezne preglednice, omenimo še možnost uporabe iteracij, ki jo uporabimo pri numeričnem reševanju parcialnih diferencialnih enačb, do željenega pogreška. Za uporabnika je zelo pomembno dejstvo, da je uporaba hitra, priročna, rezultati pa so ponazorjeni v grafični obliki.

3 Uporaba pri reševanju temperaturnega polja

Kot prvi primer prikažimo način uporabe preglednic pri numeričnem reševanju Fourierjeve parcialne diferencialne enačbe, ki jo za stacionarno stanje preoblikujemo v Laplaceovo obliko,

$$\operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \rho c \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta q}{\delta V} \quad (1)$$
$$T = T(x, y, z, t)$$

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} = Q, \quad (2)$$

kjer so parametri k , ρ , δ lahko krajevno, časovno in temperaturno odvisni. Ker pri tem uporabljamo diferenčno metodo, podajamo kratek opis izpeljave za omenjeni primer dvodimenzionalnega polja, kot kaže **slika 1**:

$$\frac{\Delta T_n}{\Delta y} = \frac{T_n - T_o}{h}$$

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta x} = \frac{T_o - T_c}{h}$$

$$\frac{\Delta T_w}{\Delta x} = \frac{T_w - T_o}{h}$$

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta y} = \frac{T_o - T_s}{h}$$

sledi:

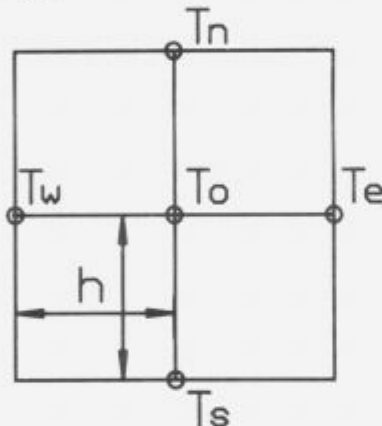
$$\frac{\Delta \frac{\Delta T}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{\frac{\Delta T_w}{\Delta x} - \frac{\Delta T_c}{\Delta x}}{\Delta x}$$

$$\frac{\Delta \frac{\Delta T}{\Delta y}}{\Delta y} = \frac{\frac{\Delta T_n}{\Delta y} - \frac{\Delta T_s}{\Delta y}}{\Delta y}$$
(3)

Kot rezultat dobimo iskano temperaturo:

$$T_o = \frac{T_w + T_c + T_n + T_s + Qh^2}{4}$$
(4)

za poljubno vozlišče (celico) končnih difrenc znotraj obravnavanega polja. Podoben pristop lahko uporabimo tudi za časovno odvisna in večdimenzionalna polja. Na osnovi te izpeljave lahko z pomočjo iteracij uporabljamo to metodo v prej omenjenih preglednicah. V splošnem nimamo težav z divergiranjem h končni rešitvi (velja za eliptični tip diferencialnih enačb).



Slika 1. Osnovna mreža končnih diferenc.
Figure 1. Basic net of final differences.

Vzeli smo primer, kjer ploščinskemu homogenemu elementu specifične oblike (npr. kovinski plošči v obliki črke L), ki jo vizuelno ponazorimo v preglednici z podajanjem robnih in začetnih pogojev in potrebnim številom celic glede na potrebno natančnost. Naša naloga je določiti pripadajoče temperaturno polje. V našem primeru naj bodo robni pogoji na vseh straneh 100°C, razen na zgornjem robu, kjer predpostavimo konstantno temperaturo 500°C in na desni strani, kjer predpostavljamo idealno toplotno izolacijo (slika 2). Po preoblikovanju parcialne časovno neodvisne diferencialne enačbe v ustrezno numerično obliko (po metodi končnih diferenc s korakom h), vidimo, da je temperatura v posamezni točki, ki jo ponazarja vrednost v celici, za homogene kovinske plošče enaka povprečju obdajajočih temperatur in toplotnemu izvoru v tej točki. Temperature na zunanjih robovih so konstante, razen na desnem robu, kjer je temperatura enaka vrednosti v sosednji točki (celici) v notranjosti elementa. Po večjih interakcijah pridemo do zadovoljivega pogreška, ki pa je poleg števila iteracij odvisen tudi od kvadrata koraka delitve h , kot kaže slika 2.

Tako v poljubno celico preglednice napišemo splošno enačbo 4, ki jo nato prekopiramo v druge celice glede na geometrično obliko opazovanega polja. (Pri tem preglednice

	A	B	C	D	E	F	G
2		STACIONARNO 2D TEMPERATURNO POLJE					
3		500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	
4	100.00	295.01	369.15	401.37	416.34	422.46	422.46
5	100.00	210.91	280.22	319.98	341.53	351.04	351.04
6	100.00	168.39	220.84	256.79	278.76	289.12	289.12
7	100.00	141.81	177.98	207.57	227.62	237.56	237.56
8	100.00	120.87	141.69	167.89	186.59	195.95	195.95
9		100.00	100.00	135.72	154.90	163.68	163.68
10			100.00	120.09	133.59	140.21	140.21
11			100.00	111.05	119.18	123.36	123.36
12			100.00	104.94	108.70	110.69	110.69
13				100.00	100.00	100.00	

USTREZNI ALGORITEM (50 iteracij)

	A	B	C	D	E	F	G
15		USTREZNI ALGORITEM (50 iteracij)					
16		500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	
17	100.00						F17
18	100.00						F18
19	100.00						F19
20	100.00						F20
21	100.00						F21
22		100.00	100.00				F22
23			100.00				F23
24			100.00				F24
25			100.00				F25
26				100.00	100.00	100.00	
27							

Slika 2. Primer uporabe preglednic za določevanje dvodimenzionalnega temperaturnega polja.
Figure 2. Example of use of spreadsheets in determining a two-dimensional temperature field.

avtomatično prevzamejo relativne naslove obrazcev, torej ustrezne sosednje celice posamezne prekopirane celice). Če imamo opravka s konstantnimi zunanjimi temperaturami vnesemo kot robne parametre ustrezne številčne vrednosti, drugače pa ustrezne obrazce, ki opisujejo robne efekte toplotne izolacije, toplotne prestopnosti, sevanja itd. Tudi tu si pomagamo s kopiranjem istosmiselnih obrazcev.

4 Uporaba pri reševanju polj mešanja taline

V električnih prevodnikih, ki so v izmeničnem magnetnem polju, se inducira električni tok. Komponenta magnetnega polja, ki je pravokotna na ta električni tok, povzroči t.i. Lorentzovo silo. V tekočih prevodnikih je ta sila vzrok za generiranje toka te tekočine in s tem mešanje fluida. Ta osnovni princip izkoriščamo pri elektromagnetnem mešanju taline. Pri tem uporabljamo izmenično (rotirajoče ali utripajoče) magnetno polje, ki ga ustvari ustrezen zunanji elektromagnet.

Tema tega primera je obdelati elektromagnetno mešanje taline v indukcijski lončni peči s pomočjo omenjenih preglednic. Ker smo predpostavljali osnosimetrični problem (lončna peč), smo s tem zanemarili komponente hitrosti v $I\varphi$ smeri, ki bi lahko nastale kot posledica turbolenčnih efektov. Torej je problem najlažje rešljiv v cilindričnih koordinatah. Čeprav je vzbujevalno magnetno polje časovno

odvisno s frekvenco napajalne napetosti na induktorju, je komponenta Lorenzove sile, ki premika fluid, stalna (Moffatt je dokazal, da je časovno odvisna komponenta kompenzirana s časovno odvisnostjo v pritisku fluida, kar pa presega okvir tega dela).

kjer je

V	hitrost fluida
p	pritisk
ρ	gostota
η	kinematična viskoznost
F	sila na enoto mase delujoča na fluid.

Obravnavamo torej tok fluida v dveh dimenzijah v pravokotnem območju lonca peči $0 < r < r_{\max}$, $0 < z < z_{\max}$. V nadaljevanju vzamemo enačbe, ki opisujejo vrtilne tokove za opis gibanja fluida. Vidimo, da ima v našem primeru cirkulacija ω_c samo 1φ komponento. Sedaj definiramo tokovno funkcijo Ψ kot:

$$\mathbf{V} = \nabla \Psi = \mathbf{1r} \frac{-\partial \Psi}{\partial z} + \mathbf{1z} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (7)$$

Cirkulacija ω_c je podana z:

$$\mathbf{1}\varphi \omega_c = \nabla \times \mathbf{V} = \nabla^2 \Psi \quad (8)$$

Operator nabla ∇ in Laplacov operator sta v tem primeru dvodimenzionalna operatorja in sta definirana kot:

$$\begin{aligned} \nabla &= \mathbf{1r} \frac{\partial}{\partial z} + \mathbf{1z} \frac{\partial}{\partial r} \\ \nabla^2 &= r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ \nabla^2 &\approx \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Končno dobimo v primeru konstantne viskoznosti (nestisljivega fluida) s pomočjo Navier-Stokesove enačbe 6 izraz:

$$RF_{(r,z)} + \eta \nabla^2 \omega_c = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} \cdot \frac{\partial \omega_c}{\partial r} + \frac{\partial \Psi}{\partial r} \cdot \frac{\partial \omega_c}{\partial z} \quad (10)$$

6 Tehnika računanja Navier-Stokesove enačbe s pomočjo preglednic

V tem primeru moramo biti pri sami tehniki računanja po opisanih metodah posebej pazljivi. Razlike pri velikih številih, ki pri tem izračunu nastopajo v posameznih celicah preglednice, so relativno majhne in velika nevarnost je, da reševanje po iterativnem postopku ne konvergira. (Paziti torej moramo, da v lastni matriki računane sistema prevladujejo diagonalni koeficienti.) To velja predvsem za preglednice starejše generacije, ki pri računanju upoštevajo manjše število decimalnih mest.

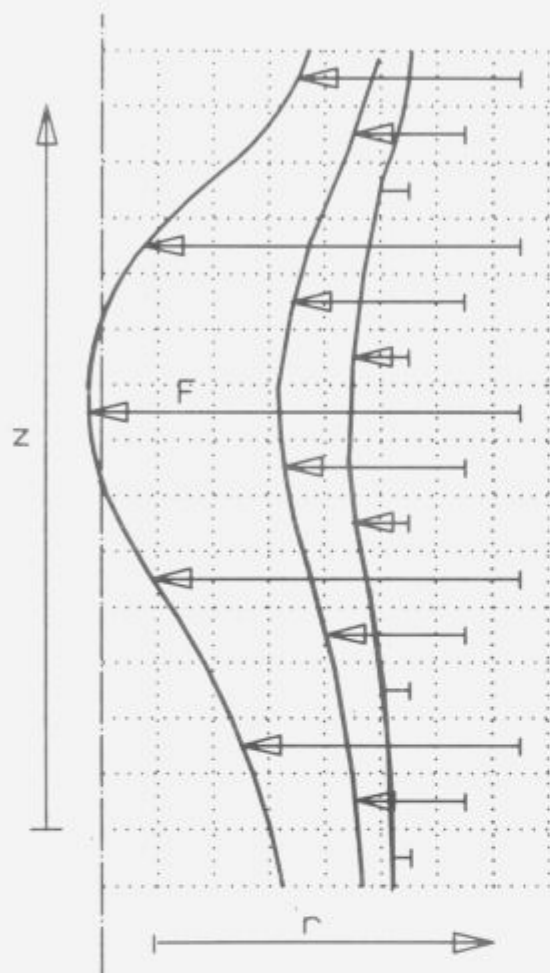
V nadaljevanju izhajamo iz sistema naslednjih dveh parcialnih diferencialnih enačb:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \omega_c \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \omega_c}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \omega_c}{\partial z^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial \omega_c}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \omega_c}{\partial r} - RF_{(r,z)} \right) \quad (12)$$

z dvema neznankama ω_c in Ψ . Enačbi lahko rešujemo po metodi, ki smo jo opisali v prejšnjem poglavju. Če predpostavimo $\eta \rightarrow \infty$, potem je rešitev spodnje enačbe relativno enostavna:

$$\omega_{c0} = \frac{\omega_{cw} + \omega_{ce} + \omega_{cn} + \omega_{cs}}{4} \quad (13)$$



Polje sil v talini

Slika 3. Prikaz sil na enoto taline.

Figure 3. Presentation of forces per unit melt.

Razlika sil na robovih poljubno majhnega geometrijskega telesa v talini povzroči njegovo vrtilčenje. Zato po numerični poti določimo rot $F(r, z)$ v cilindričnih koordinatah, ki ima smer 1φ .

$$\begin{aligned} RF_{(r,z)} &= \text{rot } F(r, z) = \mathbf{1}\varphi \left(\frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial r} \right) \\ &\approx \mathbf{1}\varphi \left(\frac{\partial F_r}{\partial z} \right) \approx \mathbf{1}\varphi \left(\frac{\Delta F_r}{\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

5 Dinamika fluida

Osnovna enačba za stalen tok nestisljivega fluida, kar opisuje obrazec $\nabla \mathbf{V} = 0$ je:

$$V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \eta \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (6)$$

S to rešitvijo pa sproti iterativno rešujemo tudi zgornjo enačbo:

$$\Psi_0 = \frac{\Psi_w + \Psi_e + \Psi_n + \Psi_s + \omega_{c0} h^2}{4}, \quad (14)$$

Z rešitvami polja tokovne funkcije $\Psi_0 = \Psi(r, z)$, po zadostnem številu iteracij ($\Psi_0^{(n)} - \Psi_0^{(n-1)} < \varepsilon_{\max}$), lahko določimo hitrostno polje taline po obrazcu:

$$\mathbf{V} = \nabla \Psi = \mathbf{1r} \frac{-\Delta \Psi}{\Delta z} + \mathbf{1z} \frac{\Delta \Psi}{\Delta r}. \quad (15)$$

Seveda pa moramo upoštevati dejansko vrednost za viskoznost $\eta(T)$, ki bistveno vpliva na končno rešitev. Zato v postopek iterativnega računanja preko ustreznih celic v preglednici in pripadajočih matematičnih povezav vključimo medsebojni vpliv med obema enačbama, kakor tudi vpliv polja elektromagnetnih sil, kar definira izraz:

$$\frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial r} \frac{\partial \omega_c}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \frac{\partial \omega_c}{\partial r} - RF(r, z) \right). \quad (16)$$

V tem primeru postane sistem za realne vrednosti η večkrat nestabilen, oziroma rešitve v splošnem ne konvergirajo h končni vrednosti. Vzrok ni samo v matematičnem, ampak tudi fizikalnem ozadju opisanega primera (efekt turbolenc). Rešitev problema smo našli po dveh poteh. Ker vemo, da lahko imamo laminarni tok tudi preko meje $Re > 10^3$, če eksperiment oz. povečevanje hitrosti fluida opravljamo silno previdno (zelo počasi, brez zunanjih tresljajev itd.), smo prvi način rešitve našli po tej poti. Postopek iterativnega računanja smo namreč pričeli z zadosti veliko viskoznostjo η . Ko smo pri tej vrednosti η dobili dovolj majhen pogrešek $\varepsilon \rightarrow 0$, smo η ponovno zmanjšali. Ta postopek smo avtomatizirali tako, da je bil novi η_{n+1} pri $\varepsilon(r, z) \rightarrow 0$:

$$\eta_{n+1} = \eta_n - 0.01(\eta_n - \eta_{\text{dejanski}}). \quad (17)$$

Postopek računanja je zelo dolgotajen, saj je potrebno izvesti več tisoč iteracij (v preglednici Excel ob mikroprocesorju 386 s koprocesorjem je potrebno nekaj ur računanja). Pri tem si lahko pomagamo s t.i. makro ukazi.

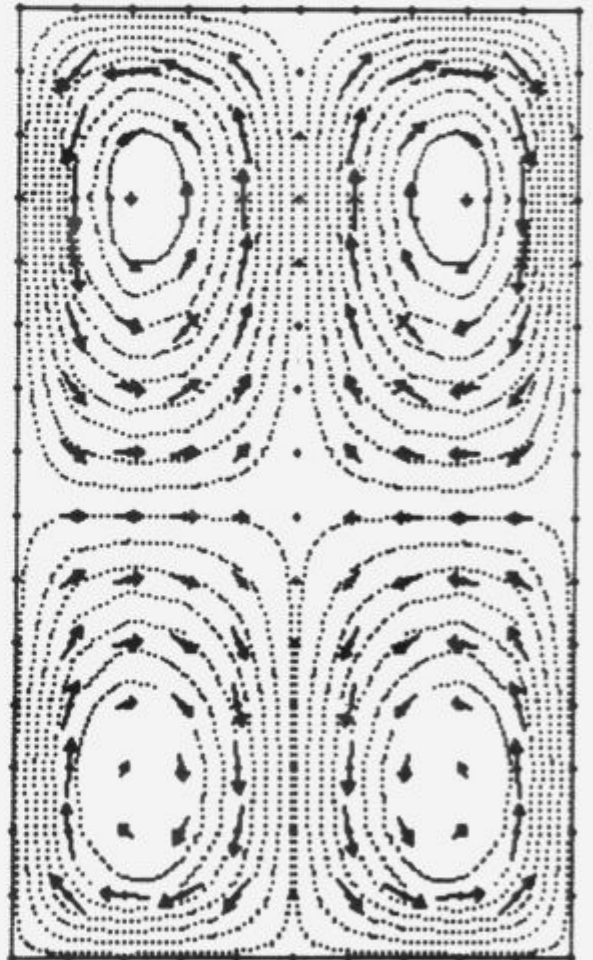
Te težave presežemo s takoimenovano "forward" oz. "backward" diferenčno metodo, namesto centralnih diferenc za prve odvode. Ta način nam zagotovi pozitivni prispevek k diagonalnim členom matrike koeficientov. Napaka pri diskretizaciji na razdalji h je tako $\mathcal{O}(h)$, pri uporabi centralnih diferenc pa bi bila $\mathcal{O}(h^2)$. Opisani postopek računanja sta prva predlagala Richards in Crane. Računanje smo izvedli v preglednici Excel po naslednjih splošnih obrazcih:

$$\begin{aligned} \Psi_0^{(m+1)} &= (1 - w_1) \Psi_0^{(m)} + \\ &+ \frac{w_1}{4} \left(\Psi_w^{(m+1)} + \Psi_n^{(m+1)} + \right. \\ &\left. + \Psi_e^{(m)} + \Psi_s^{(m)} - h^2 \omega_{c0} \right) \\ \omega_{c0}^{(m+1)} &= (1 - w_2) \omega_{c0}^{(m)} + \\ &+ w_2 \left(U_w \omega_{cw}^{(m+1)} + U_n \omega_{cn}^{(m+1)} + \right. \\ &+ C_e \omega_{ce}^{(m)} + C_s \omega_{cs}^{(m)} + (C_w - U_w) \omega_{cw}^{(m)} + \\ &\left. + (C_n - U_n) \omega_{cn}^{(m)} + h^2 RF/\eta \right), \quad (18) \end{aligned}$$

pri čemer velja:

$$\begin{aligned} C_n &= 1 - p & C_s &= 1 + p \\ C_e &= 1 + q & C_w &= 1 - q \\ U_n &= C_n + (p) & U_s &= C_s + (p) \\ U_e &= C_e + (q) & U_w &= C_w + (q) \\ p &= \frac{\Psi_e - \Psi_w}{4\eta} & q &= \frac{\Psi_n - \Psi_s}{4\eta} \\ w_1 &= 0.5 & w_2 &= 0.5. \end{aligned} \quad (19)$$

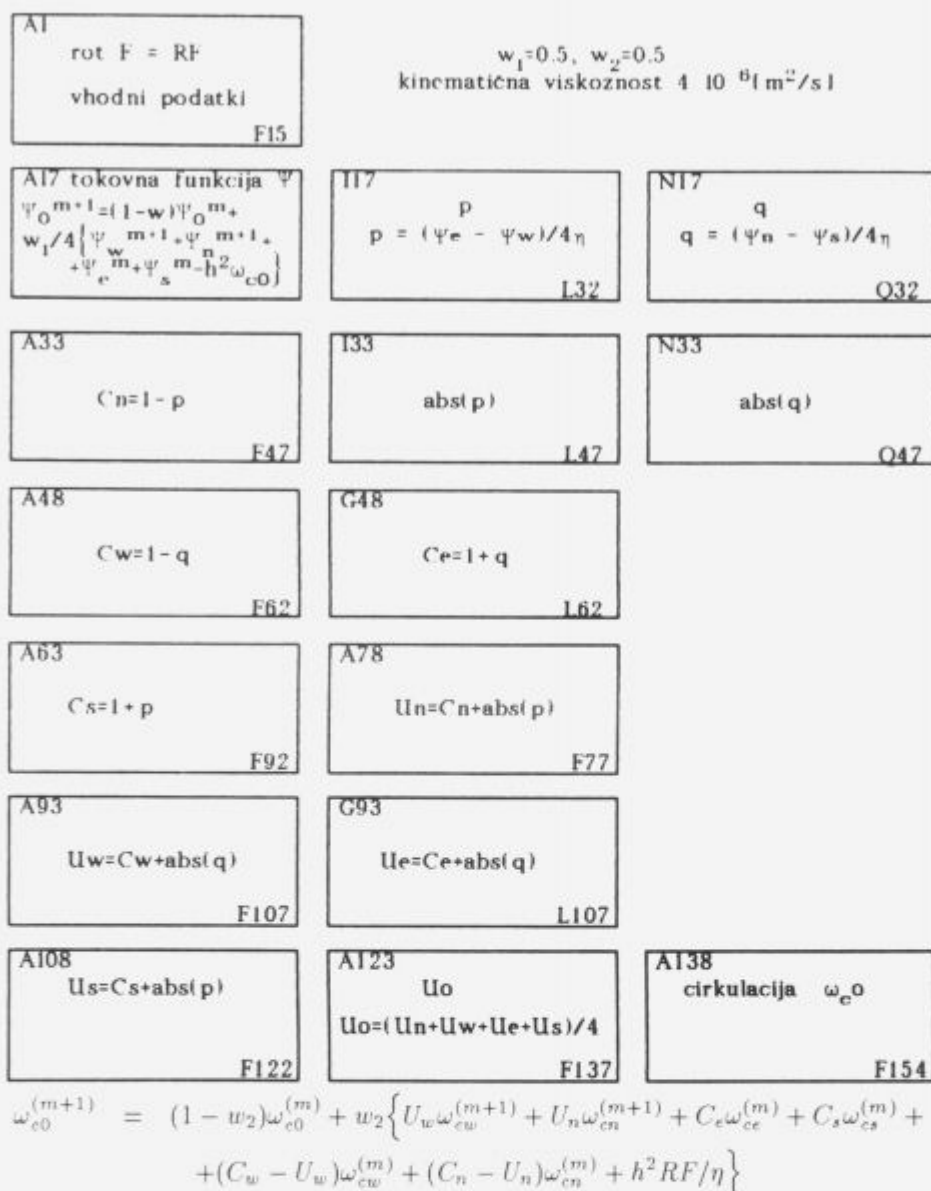
Konkretna razporeditev celic je prikazana v tabeli 1. Pri tem načinu uporabe preglednic pridemo veliko hitreje do rešitve tokovne funkcije Ψ . V opisanem primeru so robni pogoji za Ψ na stenah lonca konstantni (npr. 0), saj je tudi hitrost taline na teh mestih enaka 0. Konkretni izračun za naš primer je podan spodaj. Slika 4 prikazuje tipični način podajanja rezultatov s tokovnicami in tangencialnimi vektorji hitrosti fluida.



Slika 4. Tokovnice taline pri elektromagnetnem mešanju v indukcijski peči.

Figure 4. Melt flowlines in electromagnetic stirring in an induction furnace.

Ker lahko zanemarimo povezavo vpliva gibanja taline na elektromagnetne razmere (enačba $\mathbf{V} \times \mathbf{B} \rightarrow 0$), lahko Maxwellove enačbe (oziroma električni model indukcijske peči) rešujemo na enak način neodvisno od problematike fluida. Med posameznimi točkami, kjer nimamo definiranih razmer, lahko uporabimo postopke interpolacije.



Slika 5. Prikaz razvrstitve celic pri določanju tokovne funkcije v preglednici.

7 Sklep

V delu smo nakazali nekaj načinov uporabe računalniških preglednic, ki jih lahko hitro in koristno uporabimo v inženirski praksi, kadar nimamo na razpolago specialne programske in aparaturne opreme. Čeprav že preračuni v sodobnih preglednicah tečejo relativno dovolj hitro, lahko na ta način razvite algoritme uporabimo kot osnovo za hitrejšo projektiranje programske opreme v višjih programskih jezikih. Velika prednost je tudi v tem, da lahko končni uporabnik sam in po svojih potrebah oz. znanju hitro preizkusi različne algoritme, različne začetne in robne pogoje nekega sistema in robustnost rešitev na vpliv posameznih (geometrijskih, snovnih) faktorjev. Sočasna grafična ponazoritev rešitev pa pomaga pri utrjevanju in iskanju novih spoznanj o obravnavanem sistemu.

8 Razvrstitev celic pri določanju tokovne funkcije v preglednici

Razvrstitev celic pri določanju tokovne funkcije v preglednici je prikazana na sliki 5.

9 Literatura

- ¹ Holman J.P.: Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1986.
- ² Scellato D.: Microsoft works, McGraw-Hill, New York, 1986.
- ³ Vodovnik L.: Dinamični sistemi, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1981.
- ⁴ Željznov M., Popovič M., Valenčič V., Sinigoj A., Korez A.: Računalniški program "IMF-CAD" za projektiranje električnega dela indukcijskih lončnih peči z računalniškim sistemom "ATARI ST", Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1987.

- ⁵ Obrović B.: Osnovi termotehnike, Naučna Knjiga, Beograd, 1986, str.: 152-211.
- ⁶ Brokmeier K.: Induktives Schmelzen, Brown, Boveri & Cie, Essen, 1966.
- ⁷ Milinčić D.: Termodinamika, IRO Gradjevinska knjiga, Beograd, 1981.
- ⁸ Donald A. Pierre: Optimization theory with applications, John Wiley & Sons, New York, 1972.
- ⁹ James K.: Linear and dynamic programming with LOTUS 123, Management Information Source, London, 1987.
- ¹⁰ Smith R.J.: Computer simulation of continuous systems, Cambridge University Press, Cambridge, 1975.
- ¹¹ Miličić M.P.: Zbirka zadataka iz više matematike II, Naučna knjiga, beograd, 1979.
- ¹² Himmelblau D.M., Bischoff K.B.: Proces analysis and simulation deterministic systems, John Wiley & Sons, New York, 1968.
- ¹³ Hudson P.C.: Mathematical modelling of industrial processes, Emojc Press, Northallerton, 1983.
- ¹⁴ Bolčina M.: Spremljanje in vodenje indukcijske peči, Magistersko delo, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1991.
- ¹⁵ Plavšić M.: Mehanika fluida, Naučna knjiga, beograd, 1976.
- ¹⁶ Asea Brown Boveri: 12th International ABB Conference on Induction Furnaces, ABB, Dortmund, 1991.
- ¹⁷ Forsythe G.E.: Finite Difference Methods for partial differential equations, John & Sons, New York, 1960.

Zusammenfassung

Im Artikel wird die Anwendung und Anpassung der sogenannten Übersichtstabellen (spreadsheets) die nützlich bei der Lösung der differential - partial Gleichungen angewendet werden gezeigt. Heutzutage sind diese praktisch für jedes Haus bzw. Personenrechner zur Verfügung. Dabei wird die Methode der Enddifferenzen und das iterative Verfahren angewendet, solange im beliebigen Feldsegment nicht der gewünschte Fehler erreicht wird. Die Anwendung dieser Methode ist bei der Lösung der entsprechenden Form der Lapac bzw. der

Poisson Differentialgleichung äusserst einfach. Dabei ist nicht zu vernachlässigen, dass immer und sofort auch die entsprechende graphische Darstellung für die Lösung des Systemes zur Verfügung steht. Das Verfahren wird an zwei Beispielen gezeigt und zwar mittels der Fourier. Differentialgleichung der Wärmeübertragung und mittels des etwas anspruchsvollen Verfahrens für die Lösung der Navier-Stokes-Differentialgleichung mit deren Hilfe die Rührintensität von Schmelzen im Induktions — ofen bewertet worden ist.

Summary

Application and adaptation of the so called spreadsheets is presented. They can be satisfactorily used in solving partial differential equations. Nowadays they are available practically for each home computer or PC. The method of final differences and iterations are used till in any field segment the desired accuracy is achieved. Use of this method is extremely simple for the solution of a suitable form of Laplace or Poisson differential equation. It must not be

neglected that always and immediately also corresponding graphical presentation of the system solution is available. The procedure was illustrated by two examples, i.e. by the solution of Fourier heat transfer differential equation, and by the somewhat more demanding solution of Navier-Stokes differential equation which was applied in estimating the stirring intensity of melt in an induction furnace.

Tehnične novice

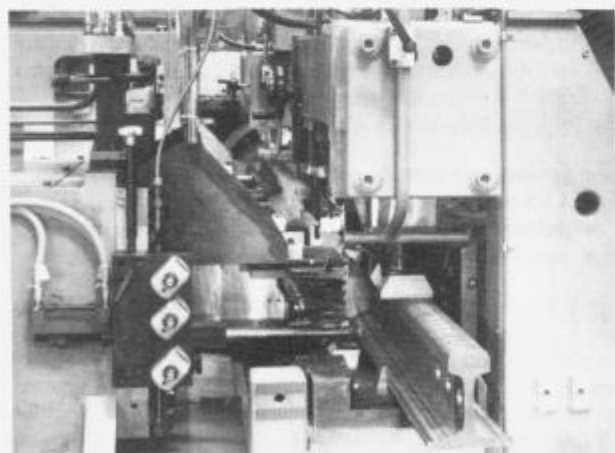
Gustav Wagner Maschinenfabrik BmbH & Co KG
Postfach 29 42
D-7410 Reutlingen 1

Economic Reasons and Technical Necessity:

Modernization Measures in Rail Rolling Mills

The expected increase in rail traffic is creating the need to extend railway networks. Nowadays, rail rolling mills should be equipped with modern, high-performance finishing machinery whose carbide-tipped tooling in the sawing and drilling machines can triple the production compared to conventional plant equipment. Auxiliary devices have been developed to reduce down-time to a minimum. A typical example of this new technology is the modernization of rail production in a Soviet rolling mill at Asovstal, which will be explained briefly in this article.

Maschinenfabrik Gustav Wagner from Reutlingen, Germany a world renown manufacturer of rail sawing and drilling machinery, has secured the contract for state-of-the-art modernization of rail production in the Asovstal Works at Mariupol in the Soviet Union. In addition to three machining lines for rail production the scope of supply contains a separate manufacturing line for shorter rail sections and a complete service facility to guarantee a constant supply of well sharpened carbide-tipped saw blades — a field in which Wagner excels world-wide as well. The plant is to be delivered and will begin production in 1992.



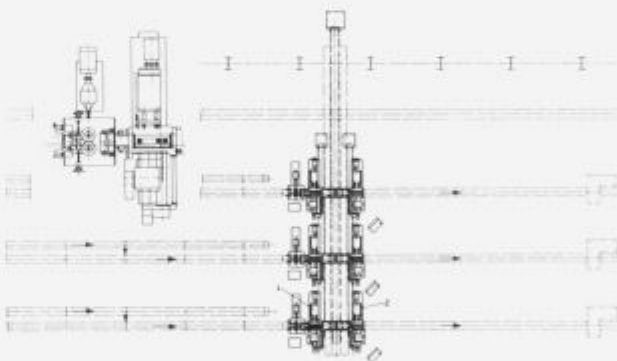
The modernization of finishing operations has been made possible by considerable advances in carbide-tip technology in drilling and circular sawing.

Modern high-strength rails, designed to withstand heavier loads, can hardly be machined at all with conventional HSS-tooling. In contrast, carbide-tipped sawblades will saw even the strongest rails (i.e. 1,400 N/Sq.MM, R 65 rails) in approximately 36 seconds, while giving an entirely suffi-

cient tool life. The time needed for (simultaneous) drilling with carbide-tipped drill bits is even shorter, just 19 seconds.

When carbide-tipped tooling is used to machine UIC rails of 1,100 N/SQ.MM output is increased by 300%. Output is the decisive factor from the standpoint of economics. Machinery downtime has to be minimized by design. The various system components, i.e. measuring devices, material handling, clamping units etc. have to operate most efficient and must be grouped properly.

Of the various possible layouts a longitudinal rail processing design was chosen. The working cycle begins with machine 1, which performs a crop-cut and simultaneously drills fishplate holes. The rail, about 26 M long and machined at one end, then is transported against a measuring end-stop at machine 2, is clamped and sawing and drilling of the opposite end commences. Chips and remnant ends are removed through a centrally located underground scrap outlet.



For processing of shorter rail sections a separate system will be installed, capable of sawing and drilling 6 fishplate holes simultaneously. This system also works in longitudinal direction and can produce rail sections of any desired length. Although the output is lower due to only one sawing machine in operation, this arrangement is characterized by its great flexibility.

To ensure fast rail transport all the machines are equipped with driven rollers and length measuring units, which monitor the distance travelled by means of a rotary pulser, allowing for exact positioning once the rail end has been fixed.

The modernization of the finishing processes in this Soviet rail plant is symptomatic of the present trend towards inevitable and rapid extension of railway traffic all over the world. New railways as well as the need for extensive renovation work require expanded production capacities.

Wagner is making an essential contribution to this: Standard components combined with custombuilt machinery of various designs provide competent solutions in technical and economic terms for every possible application.

Plastična predelava nerjavnih jekel za verige

F. Legat, dipl. ing., Veriga Lesce

1 Uvod

Največji potrošnik nerjavnih jekel je kemična industrija. Dobra korozijska odpornost aparatov, armatur ali drugih sestavnih delov ne pomeni samo daljše življenske dobe naprav samih, ampak zagotavlja tudi pravilno potekanje proizvodnega procesa, ki bi ga korozijski produkti lahko bistveno motili.

Korozijska odpornost je pomembna tudi za estetski videz predmetov, pri čemer prav drobni detajli, kot npr. verige, vijaki in matice, posebno motijo, če so izdelani iz neustreznega, korozijsko neodpornega materiala. Nerjavna jekla se uporabljajo vedno več za predmete široke potrošnje, zato proizvodnja nerjavnih izdelkov v zadnjih letih še posebno močno narašča.

Težko je oceniti, kolikšen delež nerjavnih jekel porabimo za izdelavo verig in vijakov.

Domača proizvodnja nerjavnih verig in opreme je šele v razvoju. Po količini je nizka, nekoliko boljša je pri drugih izdelkih, saj izdelujemo že nekatere vrste vijakov, ki so glede na preoblikovanje zelo zahtevni, npr. nerjavni pločevinski vijaki.

Domača industrija je uporabljala za izdelavo nerjavnih vijakov in matic izključno uvožena jekla. V okviru slovenskih železarn so bili opravljeni že poskusi izdelave vijakov in matic iz nerjavnih jekel, ki jih sedaj izdelujejo naše železarnice. Izkazalo se je, da so domače vrste nerjavnih jekel, čeprav podobne kemične sestave kot inozemska jekla, manj primerna za izdelavo kvalitetnejših nerjavnih vijakov. To pomeni, da morajo imeti nerjavna jekla, ki so primerna za izdelavo vijakov in matic še nekatere specifične lastnosti. Tudi za verige smo večino jekla uvažali. Izbor nerjavnih jekel, ki so uporabna za izdelavo verig, vijakov in matic povzemamo iz literarnih podatkov, ki se v glavnem nanašajo na DIN 267, list 11, 1977. Gre za izbor Cr-Ni in Cr-Ni-Mo austenitnih jekel (karakteristična oznaka A) ter Cr in Cr-Mo feritnih in martenzitnih jekel (karakteristična oznaka C) ter za austenitna in martenzitna jekla z izločevalnim utrjanjem. Potrebno je pripomniti, da je največji del nerjavnih vijakov izdelan iz austenitnih jekel, zlasti iz vrste A 2 in A 4, to je jekel, ki sta podobni našim jeklom Č.4580 (Prokron 11 extra) in Č.4573 (Prokron 12). Znana firma Bauer izdeluje kar 98% svojega programa nerjavnih vijakov iz austenitnih jekel, iz feritnih oziroma martenzitnih jekel so izdelani le vijaki za specialne namene, predvsem za korozijske medije, za katere so Cr jekla s feritno strukturo odprmejša.

Osnovno lastnost nerjavnih jekel, to je korozijsko odpornost — pri vijakih še zlasti odpornost proti napetostni koroziji — zagotavljata sestava in struktura jekla. Za nerjavne vijake in matice morajo imeti jekla tudi dobre razteznostne lastnosti in sposobnost za hladno preoblikovanje, pri čemer z načinom izdelave vijakov zagotovimo zahtevane mehanske lastnosti. Pri verigah pa je hladno pre-

oblikovanje manjše, vendar je varjenje odprto vprašanje za varilne avtomate drobnejših verig.

Za verige smo uporabljali iste kvalitete. Težave so bile različne:

- jeklo je imelo pisane lastnosti, kar pomeni nesimetrično upogibanje,
- težave pri varjenju zaradi vzmetnih sil v hrbtnem delu, ki so bile tudi različne.

Ker nas je posebej zanimala samo tehnologija proizvodnje z vsemi posebnostmi smo zasledovali izdelavo verige iz austenitnega jekla.

Kot vzorčni primer smo vzeli verigo DIN 766 ϕ 13 mm kalibrirano in preizkušeno po upogibanju na stroju KER 7 in varjeno na stroju KEH 7.

Jeklo po kvaliteti: Wn. 1.4401, X5 CrNiMo 18 10, Č.4573.

Žica je imela kemično sestavo, podano v tabeli 1.

Tabela 1. Kemična sestava žice

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
%	%	%	%	%	%	%	%
0.04	0.92	2.0	0.014	0.012	11.9	17.9	2.3

Valjani kolobarji so imeli premer kot običajni kolobarji pri valjčnih progah, žica pa je imela premer ϕ 15 mm z običajnimi tolerancami na premer in obliko.

Priprava žice je bila naslednja:

- peskanje valjane žice ϕ 15 mm in takoj vlečenje na ϕ 13.6 mm
- gašenje s temperature 1030–1050°C v vodi in
- ponovno vlečenje na ϕ 13.2 mm

V praksi uporabljamo tudi drugo tehnološko pot, ki ima kot osnovno dimenzijo valjano žico ϕ 14 mm, gašeno takoj in nato vlečeno na ϕ 13.2 mm. Ta postopek je bolj nesiguren, zato je pri nas v uporabi dvakratno vlečenje in vmesno gašenje.

Po pripravi smo imeli mehanske lastnosti, podane v tabeli 2.

Tabela 2. Mehanske lastnosti

Jeklo	R _e N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %
Č.4573	210	700	48

Upogibanje je teklo v hladnem stanju na upogibalnem stroju tipa KER. To je stroj firme WAFIOS, pri katerem je

sistem upogibanja izveden z rolnami tako, da se deformacija lepo porazdeli po celem radiusu člena. Priprava palice za člen je enaka kot za druge verige iz mikrolegiranega jekla. Zvarni spoj ima posebno "V" obliko, ki zagotavlja enakomeren in dober zvar.

Stroj je imel kapaciteto 33–35 čl/minuto in ni kazal povečane porabe upogibalnega orodja. Spojni deli so imeli ustrezen kot, vzmetnost pa se je gibala med 0,6–0,8 pri delitvi $t = 37 - 37,5$ mm.

Varjenje je potekalo na stroju KEH 7, to je stroj firme WAFIOS, ki ima že moderno elektroniko in automatiko. Zvari so enakomerni, zvarni venec pa se lepo obreže iz dveh strani: prečni odrez in nato še vzdolžni odrez po osi člena. Ta način nam daje popolnoma čist zvar in ga štejemo za 100% zvar. Vsi prelomi pri pravem postopku nastopijo v osnovnem materialu.

Razlika je, če primerjamo to jeklo z mikrolegiranimi, da morajo biti razdalje med elektrodami čim manjše. Pri varjenju in stiskanju moramo vzeti čim ožji del segretega člena. V nasprotnem slučaju je žmula prevelika, pritisk se ne koncentrira na pravem mestu, pa tudi zvarni venec je toliko širok, da je problematično obrezovanje. Seveda pa so pri teh jeklih elektrode bolj izpostavljene, ker hitreje pride do lokalnega pregretja in do okvare elektrod. V našem primeru smo uporabljali elektrode zlitine CuCrZr z oznako CRM 16 ali VARMAT 3 po oznaki Mariborske livarne s trdoto 120–135 HB.

Varilni stroj je varil s hitrostjo 20 čl/minuto.

Zaradi zanimivih rezultatov navajamo v slikah nekaj vrednosti o trdnosti in ostalih lastnostih, ki so za verige te vrste pomembne.

2 Rezultati preiskusov

Veriga ϕ 13 mm DIN 766 iz jekla Č.4573, varjena na stroju KEH 7, kalibrirana in preizkušena.

- Trgalne probe so dale prelome vse v osnovnem materialu z dobrim raztežkom.

Trganje smo izvedli na automatiziranem trgalnem stroju firme PRÜFTECHNIK GRAZ tako, da smo posneli tudi diagram sila-raztežek. Ploskev v diagramu je dokaj velika, kar pomeni, da ima veriga veliko energijsko sposobnost in s tem tudi žilavost.

- Pri upogibnih probah preko zvara smo upoštevali upogibni faktor, ki je predpisan za visokoodporne verige. Veriga mora doseči poves "D" brez pojava razpok v zvaru. Ta poves znaša v našem primeru 13 mm in je bil dosežen v obeh stanjih verige.
- Za sam preiskus zvara se pogosto uporablja gnetilna proba tako, da se pri tlačenju zvar preseli na končno stran člena.
- Meritve trdot so prikazane v tabeli 3.
- Obe toplotni stanji zvarov na naši verigi smo posneli tudi z mikroskopom.

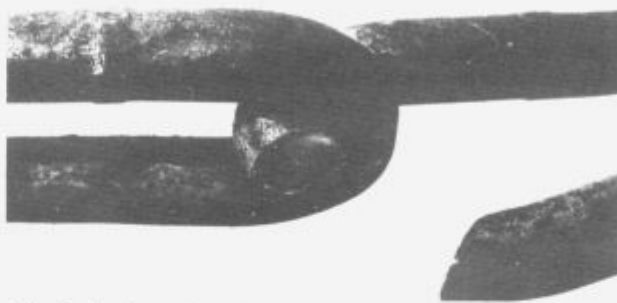
Vse te verige redno kontroliramo in preiskujemo po normah in zahtevah kupca.

Če pogledamo samo delo in kvaliteto verige lahko ugotovimo, da so važnejše postavke pri tehnologiji naslednje:

- nastavljanje in delovanje elektrod
- oblika in kvaliteta zvarnega spoja
- enakomernost upogibanja
- lastnosti osnovnega materiala



Slika 1. Sila trganja in kontrakcije sta presegle predpisano vrednost. Veriga je bila gašena s 1050°C v vodi.



Slika 2. Trgalna proba verige še v surovem stanju (negašena). Veriga ϕ 13 mm.



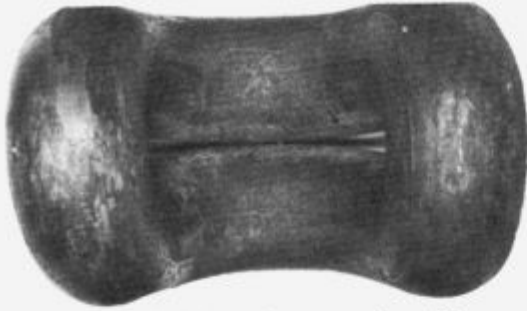
Slika 3. Upogibna proba gašene verige ϕ 13 mm. Včasih na členih napravimo rastersko razdelitev in ugotovljamo lokalni raztežek na natezni strani upogibnega člena.

- nekoliko povečana poraba orodja

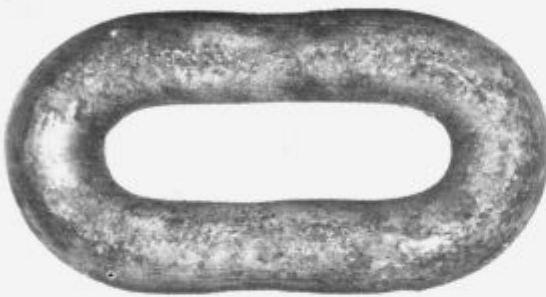
Jeklo se lepo preoblikuje, vendar so deformacijske sile večje, tako, da v praksi velikosti spojev za posamezne dimenzije za 1 stopnjo po moči premaknemo navzgor. Podobno kot pri vijačnih stiskalkah lahko stroj, ki vari ali upogiba ϕ 10 mm pri navadnem jeklu, proizvaja verige iz nerjavnega austenitnega jekla le do ϕ 8 mm.

Druga delna ovira pa je dokaj visoka cena, ki jo povzročajo legirni elementi in proizvodnja osnovnega jekla.

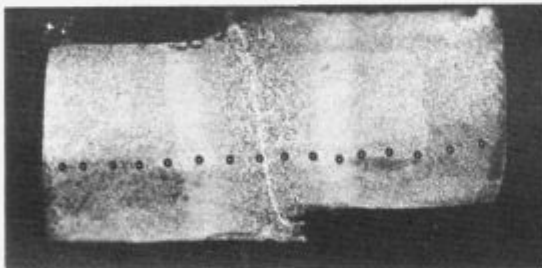
Prav zato so metalurgi naših železarn iskali druge rešitve in na ta način izdelali feritno Cr jeklo z zelo nizkim C in



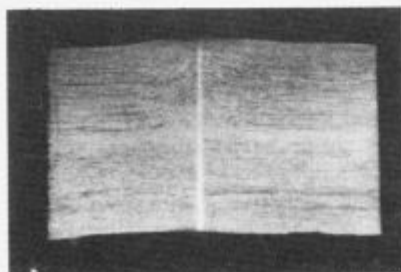
Slika 4. Upogibna proba surove verige ϕ 13 mm.



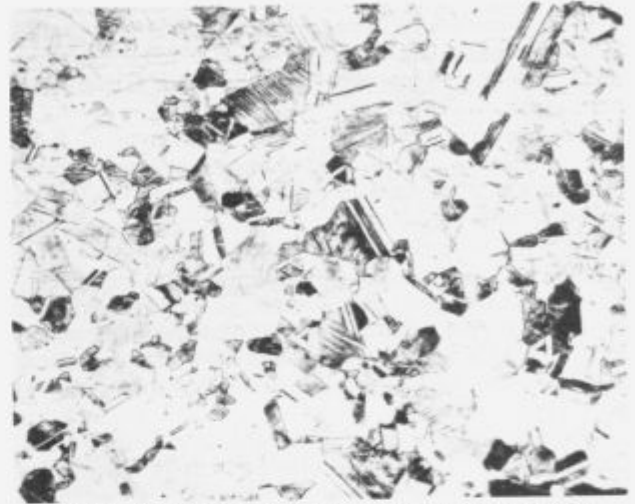
Slika 5. Gnetilna proba verige ϕ 13 mm v gašenem stanju.



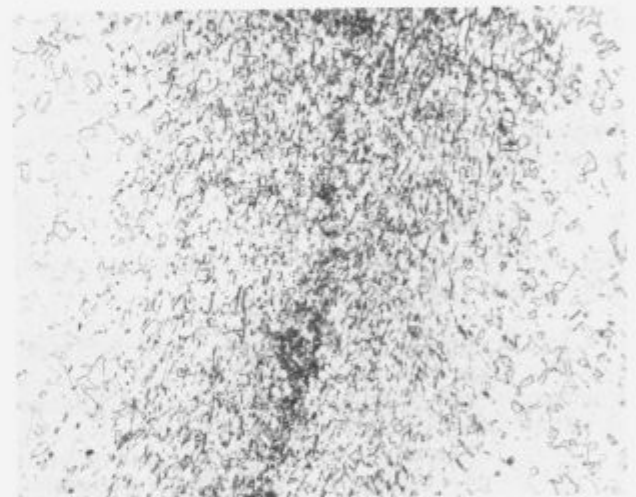
Slika 6. Makroposnetek s trdotnimi odtisi in slabo obrezanim zvarom.



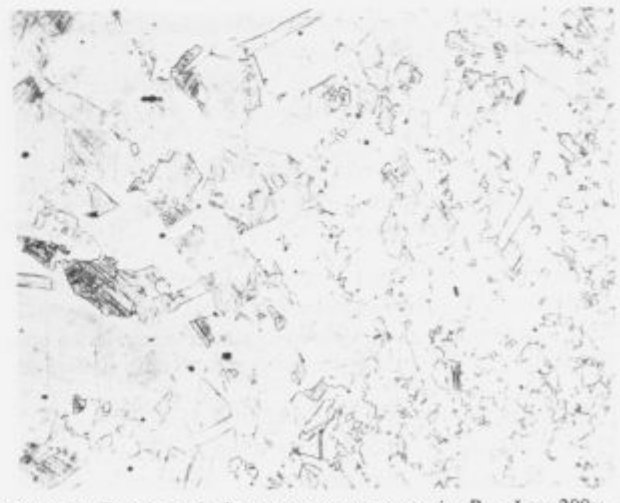
Slika 7. Dobro obrezan člen kot nam kaže slika.



Slika 8. Toplotno vplivana prehodna cona v gašenem stanju. Povečava 200x. Toplotno vplivana cona v gašenem stanju se skoraj popolnoma izenači z osnovnim materialom. Temperatura je bila 1040°C, ohlajanje pa v vodi.



Slika 9. Sredina zvara v gašenem stanju. Povečava 200x.



Slika 10. Zvar in prehodna cona v surovem stanju. Povečava 200x.

Tabela 3. Prikaz meritev trdot

Veriga, surovo stanje HV 10/10			
Hrbtina stran	Zvarna stran	Notranji radius	Zunanji radius
HV 213–222	198–222	263–308	233–300
Veriga, gašeno stanje			
185–191	185–191	170–183	179–188
Mere po opravljenem preizkušanju in kalibriranju			
Premer mm	Delitev člena mm	Širina člena mm	Kaliber 11 × 1 mm
φ 13 (+0.2)	36 ± 0.2	b–16, B–43.8	396.5–397

ga danes poznamo kot "superferitno jeklo".

Superferitna nerjavna jekla sodijo med novejša jekla, ki predstavljajo zahtevnejše jeklarske izdelke. Po mehanskih in korozijskih lastnostih jih lahko primerjamo z austenitnimi nerjavnimi jekli. Po kemijski sestavi se od austenitnih razlikujejo po tem, da ne vsebujejo niklja, da vsebujejo 16 in več odstotkov kroma in pod 250 ppm ogljika in dušika. Korozijska obstojnost superferitnih jekel se povečuje z vsebnostjo kroma in dodatkom molibdena. Delimo jih v več skupin, z največjo vsebnostjo kroma do 29% in molibdena do 4%. Omenimo naj, da se superferitno jeklo vrste 29Cr-4Mo po svoji izredni korozijski obstojnosti lahko primerja z bistveno dražjim titanom in superzlitinami. Ker superferitna jekla ne vsebujejo niklja, so cenejša od austenitnih. Tako superferitno jeklo ima zelo dobre preoblikovalne sposobnosti in podobno korozijsko odpornost kot austenitno.

Raziskave so bile usmerjene predvsem v ugotavljanje njegovih vlečnih sposobnosti in tistih mehanskih lastnosti jekla, iz katerih bi lahko sklepali na uporabnost jekla pri izdelavi vijakov, matic in verig.

Preoblikovalne sposobnosti superferitnega jekla smo ugotavljali s preiskusi vlečenja, trgalnimi preiskusi, krivuljami tečenja, meritvami mikrotvdot, izdelavo vijakov, matic in verig in metalografskimi preiskavami. Ugotavljali smo tudi rekristalizacijske lastnosti jekla. Zaradi boljše predstavitve preoblikovalnih lastnosti superferitnega jekla ga nismo primerjali le z austenitnim nerjavnim jeklom, ki se pri preoblikovanju bolj utrjuje, temveč tudi z jekli za masivno preoblikovanje, jekloma JMP 10 in JMP 15, ki ju preoblikujemo pri nižjih preoblikovalnih napetostih. Za proizvodnjo verig smo vzeli jeklo z naslednjo kemijsko sestavo:

Acrom 1ex, chg 111840

0.021% C; 0.59% Si; 0.56% Mn; 16.90% Cr; 0.0097% N

$$(C + N = 0,0307)$$

Žica je bila po valjanju žarjena pri temperaturi 880°C.

O preoblikovalnih sposobnostih superferitnega jekla pred preiskavami nismo imeli podatkov, zato smo najprej ugotavljali njegove preoblikovalne trdnosti in jih primerjali tudi s trdnostmi jekla Č.1221, za katerega vemo, da ima dobre preoblikovalne lastnosti in austenitnim nerjavnim jeklom vrste Č.4571, ki se med preoblikovanjem močno utrjuje. Iz primerjave med trdnostmi in eksponenti utrjevanja jekla Acrom 1ex in jeklom Č.1221 vidimo, da se jeklo Acrom 1ex med preoblikovanjem le nekoliko bolj utrjuje od jekla Č.1221, njegove preoblikovalne napetosti pa so nekaj višje kar nam dokazuje, da ima jeklo Acrom 1ex zelo dobre preoblikovalne sposobnosti. Še zanimivejša je primerjava z jeklom Č.4571. Jeklo Č.4571 se še enkrat

bolj utrjuje kot superferitno jeklo, njegove preoblikovalne trdnosti so mnogo višje, prenese pa manjše deformacije.

Za pripravo naše žice za verige smo žico valjano seveda prevlekli na željeno dimenzijo.

Žico premera 6 mm smo pred vlečenjem žarili, jo zlužili ter nanjo nanесли nosilec maziva steelfor, ki ga uporabljamo za vlečenje nerjavnih jekel. Kot mazivo pri vlečenju smo uporabili stearatni prašek, ki ga prav tako uporabljamo za vlečenje nerjavnih jekel.

Delne redukcije pri vlečenju so bile velike od 20 do 25%, podobne kot jih uporabljajo pri vlečenju austenitnih nerjavnih jekel; pri tanjših dimenzijah pa tudi manjše. Vlekli smo jo tudi do tistih željenih dimenzij, iz katerih lahko izdelujemo vijake, matic in verige. Poudariti moramo, da žico med vlečenjem nismo vmesno žarili, kar nam dokazuje, da ima preizkušano superferitno jeklo izredne preoblikovalne sposobnosti. Vlek je izgledal tako kot nam kaže tabela 4.

Tabela 4. Premeri in redukcije vlečene žice ACROM 1ex za verigo φ 4 mm iz valjane žice φ 6 mm

Vlek št.	Premer žice v mm	Deformacija		
		ϵ_p (%)	ϵ_{sk} (%)	φ_{sk}
Valjana žica	6.0			
1	5.30	22.0	22.0	0.25
2	4.68	22.0	39.1	0.50
3	4.12	22.5	52.8	0.75

Pri tem vlečenju smo dobili mehanske lastnosti, prikazane v tabeli 5.

Tabela 5. Mehanske lastnosti vlečene žice iz jekla ACROM 1ex

Premer žice v mm	R_e N/mm ²	R_m N/mm ²	A %	Z %	Trdota HV 4
6.0	315	476	30	84	167
5.30	582	631	6	74	220
4.68	678	710	5	71	237
4.12	714	768	4	70	255

Da bi ugotovili preoblikovalne sposobnosti jekla pri masivnem preoblikovanju in upogibanju, ki sta s stališča delovanja preoblikovalnih sil in mazanja zahtevnejša preoblikovalna procesa od vlečenja, smo izdelali verige φ 5 mm.

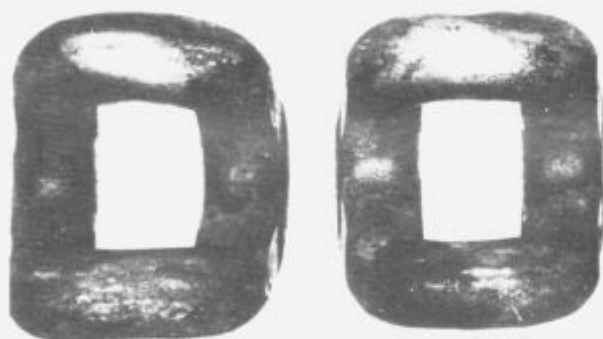
Verigo smo izdelali na industrijskem stroju KEH 3 iz premera vlečene žice 4,98 mm. S stališča preoblikovalnosti predstavlja veriga manj zahteven izdelek, zato smo

Tabela 6. Rezultati trgalnih preizkusov

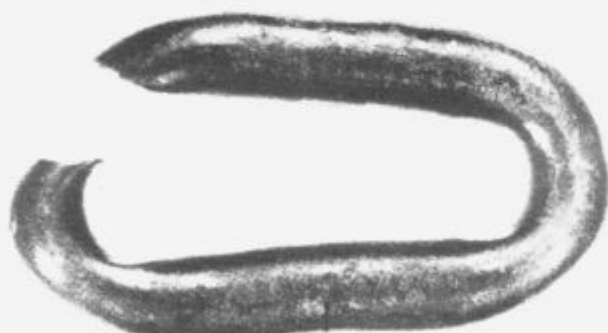
Vzorec	Sila preloma KN	Mesto preloma
1	17.50 KN	Osnovni material
2	17.60 KN	na prehodu
3	17.70 KN	člena v
4	17.80 KN	radius pri
5	17.70 KN	vseh probah.



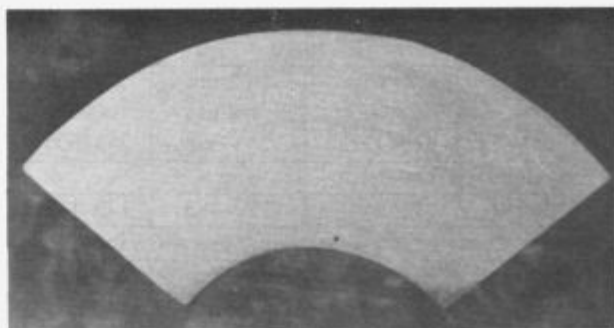
Slika 11. Osnovni material. Povečava 100x.



Slika 12. Upogibalne probe na tmu $D = 4$ mm. Povečava 2x



Slika 13. Prelom člena pri trgalnem preiskusu. Povečava 1,5x.



Slika 14. Makroposnetek zvara po delnem upogibalnem preiskusu. Povečava 5x.



Slika 15. Ravni del člena. Povečava 100x.

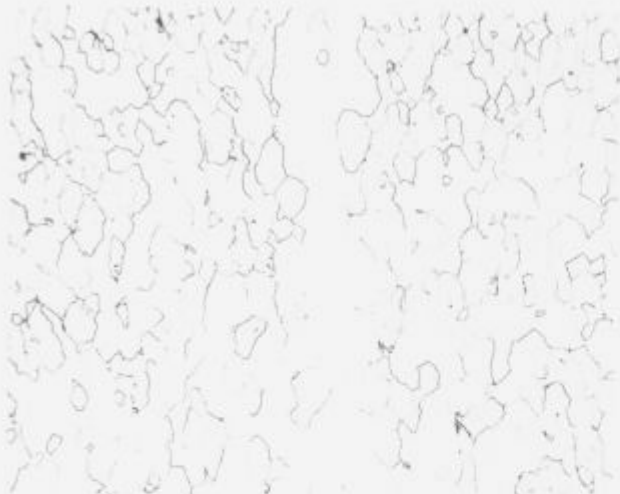


Slika 16. Radius člena. Povečava 100x.

vse preiskuse osredotočili v kaliteto zvara. Zvare smo pregledali metalografsko in jih mehansko preiskusili s trgalnimi preiskusi.

Pri mikrostrukturnem pregledu zvara smo ugotovili, da so bili zvari po celotnem preseku zapolnjeni, brez poroznosti na sredini v staljenem delu zvara smo opazili nekaj večje kristalno zrno. O kvaliteti zvarov pričajo tudi rezultati trgalnih preiskusov, pri katerih se členi verige niso

trgali na zvarjenih mestih, temveč na nezvarjenih. Do trganja je prišlo pri obremenitvah 17,6 KN. Trdnost R_m znaša 444 N/mm², kar je za tretjino manj kot znaša trdnost žice, iz katere je bila veriga narejena. Iz omenjenih preiskusov lahko zaključimo, da je jeklo Acrom 1ex uporabno tudi za izdelavo nerjavnih verig.



Slika 17. Sredina zvara na členu. Povečava 100×.

Rezultati so naslednji:

- S hitrostjo 70 čl/minuto upogibanja in varjenjem na varilnem stroju KEH 3 smo verige takoj preiskusili in kalibrirali. Mere na 11 t so bile v predpisanih tolerancah.
- Rezultati trgalnih preizkusov so bili zadovoljivi, prikazani so v tabeli 6.
- Pet upogibnih prob s trnom $D = 4$ mm, kot 180° ; vsi rezultati so bili dobri.
- Zoženje prelomnega mesta na členu $5\times$ preko 66%.
- Nekaj značilnih struktur nam podajajo slike 11 do 17.

3 Zaključek

Po prvih izkušnjah pri proizvodnji in preizkusu verig lahko zaključimo:

- Superferitno jeklo ima zelo dobre preoblikovalne lastnosti in je za samo upogibanje potrebno cca 35% manj energije kot pri austenitnem jeklu.
- Stroji tečejo z neznatno povečano porabo orodja, pri austenitnem jeklu je poraba nožev za obrez zvara 40% večja.
- Pri varjenju so pogoji isti kot pri mikrolegiranem jeklu, za austenitno jeklo pa je razdalja med elektrodami manjša. Sile stiskanja se morajo povečati tako, da se dimenzijska območja na strojih za jekla tipa 18/8 za eno stopnjo znižajo.
- Superferitno jeklo nima niklja, zato je tudi dokaj cenejše.
- Vlečenje pri pripravi žice ne predstavlja posebnih težav, če določimo pravo čiščenje in pravilna mazilna sredstva za vlečenje.
- Pomembna za nas je nevarnost interkristalne korozije, ki pri superferitnem jeklu ne nastopa.
- Korozijska odpornost je pri austenitnem jeklu boljša, vendar se pri superferitnem jeklu z dodatkom Mo tej odpornosti austenitnega jekla približuje.

Zaradi omenjenih prednosti jeklo dobiva na vrednosti in ima pri predelovalcih žice v prihodnosti pomembno mesto.

4 Literatura

- ¹ B. Arzenšek, F. Perko, J. Mrak, N. Vojnovič, D. Lazar, F. Legat, D. Kmetič, J. Žvokelj: Hladno preoblikovanje superferitnega jekla, Naloga MI 90-038, Ljubljana
- ² Wafios: Navodila za upogibanje in varjenje jekel z novo elektroniko in automatiko.

Popravek

Pri stavljenju članka *Faktor mejne intenzitete napetosti pri počasnem natezanju navodičenega jekla z visoko trdnostjo* avtorjev B. Uleta, F. Vodopivec, L. Vehovarja in L. Kosca, ki je izšel v 4. številki Železarskega zbornika leta 1991, je prišlo do nekaj neljubih tiskarskih napak. V tej številki objavljamo popravke nastalih napak. V levem stolpcu je napačno besedilo oziroma formule, v desnem pa pravilno. Uredništvo se avtorjem opravičuje za nastale napake.

Popravki v slovenskem besedilu

Stran 139, 2. odstavek, vrstica 8

kla, peč pa imajo za posledico pojavljanje faktorja mejh-

Stran 141, enačba 1

$$\mu - \mu_0 = \sigma_{ij} E_{ij} dV \quad (1)$$

3. odstavek, vrstici 1 in 2

Deformacijski tenzor E_{ij} opisuje deformacijsko polje okrog intersticijskega atoma vodika, $\mu\sigma_{ij}$ je napetostni

Enačba 2

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_{ij} E_{ij} dV}{RT} \quad (2)$$

5. odstavek, vrstica 5

tošnega tenzorja $[\sigma_m = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)]$, \bar{V}_H pa je parci-

Enačba 4

$$K_{TH} = \frac{RT}{\alpha V_H} \ln \frac{[H]_{cr}}{[H]_0} - \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \quad (4)$$

Stran 142, 1. odstavek, vrstica 3

sta zapisala kot $[H]_{cr} \propto 1/\sigma_{ys}$. Kim in Loginow¹¹ pa sta

1. odstavek, vrstica 5

več vodika, torej $[H]_0 \propto \sigma_{ys}$. Z upoštevanjem obeh nave-

Enačba 5

$$\frac{[H]_{cr}}{[H]_0} \simeq \frac{\beta}{\rho_{ys}} \quad (5)$$

Enačba 7

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{0,05 E_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} \quad (\text{MPa m}^{1/2}) \quad (7)$$

4. odstavek, vrstica 1

Pri tem je E_f lomna duktilnost, ki jo izračunamo iz

Enačba 8

$$E_f = \ln[1/(1 - Z)] \quad (8)$$

kla, pač pa imajo za posledico pojavljanje faktorja mejn-

$$\mu - \mu_0 = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (1)$$

Deformacijski tenzor ε_{ij} opisuje deformacijsko polje okrog intersticijskega atoma vodika, σ_{ij} je napetostni

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV}{RT} \quad (2)$$

tošnega tenzorja $[\sigma_m = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)]$, \bar{V}_H pa je parci-

$$K_{TH} = \frac{RT}{\alpha V_H} \ln \frac{[H]_{cr}}{[H]_0} - \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \quad (4)$$

sta zapisala kot $[H]_{cr} \propto 1/\sigma_{ys}$. Kim in Loginow¹¹ pa sta

več vodika, torej $[H]_0 \propto \sigma_{ys}$. Z upoštevanjem obeh nave-

$$\frac{[H]_{cr}}{[H]_0} \simeq \frac{\beta}{\sigma_{ys}} \quad (5)$$

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{0,05 \varepsilon_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} \quad (\text{MPa m}^{1/2}) \quad (7)$$

Pri tem je ε_f lomna duktilnost, ki jo izračunamo iz

$$\varepsilon_f = \ln[1/(1 - Z)] \quad (8)$$

Enačba 10

$$\beta = \sigma_{ys} \exp \frac{\alpha \tilde{V}_H}{RT} \left\{ \sqrt{\frac{0,05 E_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} + \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \right\} \quad (10)$$

7. odstavek, vrstica 1

V izrazu (10) so veljavne vrednosti za σ_{ys} , E_f ter n , kot

Stran 143, 2. odstavek, vrstica 4

Eksperimentalni sklop s katodnim polariziranjem preiz-

5. odstavek, vrstica 1

Lomno duktilnost E_f in eksponent deformacijskega

Stran 145, 3. odstavek, vrstici 4, 5

\dot{E}_c , upošteva hitrost natezanja $v = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$ (0,1 mm/min), vrednost $\dot{E}_c = v/l = 5,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

4. odstavek, vrstica 2

koliko višje vrednosti \dot{E}_c , približno 10^{-1} s^{-1} . Raziskave Na-

4. odstavek, vrstica 7

že pri kritični hitrosti deformacije $\dot{E}_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, to pa je že

Stran 146, 2. odstavek, vrstica 3

čejo, da je prelom lokalno še vedno tudi duktilne vrste.

Popravki v angleškem besedilu

Stran 140, enačba 1

$$\mu - \mu_0 = \sigma_{ij} E_{ij} dV \quad (1)$$

Zadnji odstavek, vrstica 2

scribed by the deformation tensor E_{ij} ; ρ_{ij} is the stress

Stran 141, enačba 2

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_{ij} E_{ij} dV}{RT} \quad (2)$$

Enačba 3

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_m d\tilde{V}_H}{RT} \quad (3)$$

3. odstavek, vrstici 5, 6

where σ_m is the hydrostatic component of stress tensor $\sigma_m = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ and \tilde{V}_H is the partial molal volume

6. odstavek, vrstica 10

$[H]_{cr} \propto 1/\sigma_{ys}$.

7. odstavek, vrstica 3

strength, thus $[H]_0 \propto \sigma_{ys}$. If both statements are taken in-

$$\beta = \sigma_{ys} \exp \frac{\alpha \tilde{V}_H}{RT} \left\{ \sqrt{\frac{0,05 \varepsilon_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} + \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \right\} \quad (10)$$

V izrazu (10) so veljavne vrednosti za σ_{ys} , ε_f ter n , kot

Eksperimentalni sklop za katodno polariziranje preiz-

Lomno duktilnost ε_f in eksponent deformacijskega

$\dot{\varepsilon}_c$, upošteva hitrost natezanja $v = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$ (0,1 mm/min), vrednost $\dot{\varepsilon}_c = v/l = 5,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

koliko višje vrednosti $\dot{\varepsilon}_c$, približno 10^{-1} s^{-1} . Raziskave Na-

že pri kritični hitrosti deformacije $\dot{\varepsilon}_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, to pa je že

žejo, da je prelom lokalno še vedno tudi duktilne vrste.

$$\mu - \mu_0 = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (1)$$

scribed by the deformation tensor ε_{ij} ; σ_{ij} is the stress

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV}{RT} \quad (2)$$

$$[H] = [H]_0 \exp \frac{\sigma_m \tilde{V}_H}{RT} \quad (3)$$

where σ_m is the hydrostatic component of stress tensor $[\sigma_m = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)]$ and \tilde{V}_H is the partial molal volume

$[H]_{cr} \propto 1/\sigma_{ys}$.

strength, thus $[H]_0 \propto \sigma_{ys}$. If both statements are taken in-

Popravek

Enačba 5

$$\frac{[H]_{cr}}{[H]_0} \simeq \frac{\beta}{\rho_{ys}} \quad (5) \qquad \frac{[H]_{cr}}{[H]_0} \simeq \frac{\beta}{\sigma_{ys}} \quad (5)$$

Enačba 6

$$K_{TH} = \frac{RT}{\alpha \bar{V}_H} \ln \frac{\beta}{\sigma_{vs}} - \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \quad (6) \qquad K_{TH} = \frac{RT}{\alpha \bar{V}_H} \ln \frac{\beta}{\sigma_{ys}} - \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \quad (6)$$

Stran 142, enačba 7

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{0,05 E_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} \quad (\text{MPam}^{1/2}) \quad (7) \qquad K_{IC} = \sqrt{\frac{0,05 \varepsilon_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} \quad (\text{MPam}^{1/2}) \quad (7)$$

1. odstavek, vrstica 8

where E_f is the fracture ductility, calculated from the ac-

where ε_f is the fracture ductility, calculated from the ac-

Enačba 8

$$E_f = \ln[1/(1 - Z)] \quad (8) \qquad \varepsilon_f = \ln[1/(1 - Z)] \quad (8)$$

Enačba 10

$$\beta = \sigma_{ys} \exp \frac{\alpha \bar{V}_H}{RT} \left\{ \sqrt{\frac{0,05 E_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} + \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \right\} \quad (10) \qquad \beta = \sigma_{ys} \exp \frac{\alpha \bar{V}_H}{RT} \left\{ \sqrt{\frac{0,05 \varepsilon_f n^2 E \sigma_{ys}}{3}} + \frac{\sigma_{ys}}{2\alpha} \right\} \quad (10)$$

4. odstavek, vrstica 1

As already mentioned, the relevant values of σ_{ys} , E_f

As already mentioned, the relevant values of σ_{ys} , ε_f

Stran 143, 2. odstavek, vrstica 7

fracture ductility E_f and the strain hardening exponent n

fracture ductility ε_f and the strain hardening exponent n

Stran 145, zadnji odstavek, zadnja vrstica

of $\dot{\varepsilon}_c = v/l = 5,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ is obtained.

of $\dot{\varepsilon}_c = v/l = 5,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ is obtained.

Stran 146, 1. odstavek, 1. vrstica

Professional literature¹⁵ quotes somewhat higher $\dot{\varepsilon}_c$ -

Professional literature¹⁵ quotes somewhat higher $\dot{\varepsilon}_c$ -

1. odstavek, vrstica 9

$\dot{\varepsilon}_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, whose magnitude is of the same order as

$\dot{\varepsilon}_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, whose magnitude is of the same order as

zadnji odstavek, II. vrstica

of hydrogen-charged high-strength steel weaknes the

of hydrogen-charged high-strength steel weaknes the

Stran 147, 1. odstavek, 3. vrstica

(7), into Gerberich's equation (6). We thus obtained a

(7), into Gerberich's equation (6). We thus obtained a

1. odstavek, vrstica 5

yield strength of steel, as requested by Gerberich's

yield strength of steel, as requested by Gerberich's

2. odstavek, vrstica 2

faces of highstrength hydrogen-charged steel tested at

faces of high strength hydrogen-charged steel tested at

2. odstavek, vrstica 3

slow-strain indicate that, locally, the fracture is still

slow-strain indicate that, locally, the fracture is still

Doktorska in magistrska dela na Odseku za Metalurgijo in Materiale —FNT, Univerze v Ljubljani v šolskem letu 1990/91

Doktorski deli

Miroslav Jakovljević (26.11.1990 – mentor A. Paulin)
Magnetno-hidrodinamična stanja elektrolizne celice kot element za optimizacijo procesa pridobivanja aluminija

Potreba po zmanjšanju specifične porabe energije ter iskanje postopkov za skrajšanje časa konstruiranja nove celice od zamisli do industrijske uporabe sta povzročila, da je študij magnetno-hidrodinamičnih pojavov postal pomemben. Ti pojavi povzročajo statično deformacijo mejne površine kovina-elektrolit, vrtnčenje kovine in elektrolita ter električno nestabilnost celice, kar moti elektrolizni proces ter vpliva na tokovni izkoristek. Avtor je s tega stališča obdelal magnetno optimizacijo elektrolizne celice, kot primer je vzel 140 kA celico firme Pechiney, ter na osnovi izdelanega matematičnega modela pripravil lastni programski paket za osebni računalnik.

179 strani

42 cit.

Boris Ule (11.4.1991 – mentor L. Kosec)
Faktor mejne intenzitete napetosti pri upočasnjem natezanju navodičenega jekla

Zelo trdna konstrukcijska jekla z veliko napetostjo tečenja se vse več uporabljajo. Zaradi razmeroma majhne žilavosti in slabo izraženega prehoda v krhko stanje so toliko pomembnejše njihove lomne značilnosti. Lomna žilavost je močno odvisna od vodika v jeklu. Napetostno inducirani izločeni vodik vodi do zapoznelega loma obremenjenega jekla. Faktor mejne intenzitete napetosti je merilo, kakšno napetost material vzdrži, da ne pride do zapoznelega loma. Avtor je ugotavljal ta faktor z nateznimi preskusi, kar v literaturi še ni bilo ustrezno obdelano. Upočasneni natezni preskus (0,1 mm/min) za razliko od standardnega omogoča ugotavljanje vpliva vodika na lomno žilavost. Obenem je analiziral tudi vpliv toplotne obdelave na lomno žilavost navodičenega jekla.

85 strani

119 cit.

Magistrska dela

Vladimir Cvetkovski (10.10.1990 – mentor A. Paulin)
Projekt elektrolizne rafinacije bakra

Avtor daje najprej pregled sodobnih elektroliznih postopkov v svetu z vidika investicijskih in obratovnih stroškov za kapacitete 100 000 t Cu/leto ter izdela primerjavo s klasično elektrolizo za 50 000 t/leto. Nato razčleni idejni tehnološki in investicijski projekt za moderno standardno elektrolizo z modulno kapaciteto 50 000 t/leto, skupaj s pomožnimi obrati. Ugotavlja, da se z uporabo reverziranega toka lahko poveča proizvodnost za 40%. Z dograditvijo dodatnega modula se lahko kapaciteta elektrolize brez težav poveča na 100 000 t/leto. Obenem je nakazal enostavno možnost rekonstrukcije standardne elektrolize na polno avtomatizirano stanje.

112 strani

25 cit.

Ph.D. and MSc. theses at the Department of Metallurgy and Materials, University of Ljubljana in academic year 1990/91

Ph.D. theses

Miroslav Jakovljević (26.11.1990 – supervisor A. Paulin)
Magneto-hydrodynamic states of electrolytic cell as parameter for optimization of aluminium electrowinning process

Need to reduce specific consumption of energy and to find ways for time reduction in designing new cell from idea to industrial application made analysis of magneto-hydrodynamic phenomena essential. These phenomena cause static deformation of melt/electrolyte interface, circulation of melt and electrolyte and electric instability of cell which all disturb the electrolytic process and influence current efficiency. Thus the author analyzed the magnetic optimization of electrolytic cell, taking 140 kA Pechiney cell, and based on prepared mathematical model he had composed own software for PC.

179 pages

42 ref.

Boris Ule (11.4.1991 – supervisor L. Kosec)
Threshold stress intensity factor in slow tensile test of steel with picked-up hydrogen

High-strength structural steels with high yield stress are widely used. Due to relatively low toughness and undistinctive transition into brittleness, their fracture characteristics are essential. Fracture toughness is highly dependant on hydrogen in steel. Stress-induced precipitated hydrogen causes delayed fracture of loaded steel. Threshold stress intensity factor is a measure of stress which material can endure without danger of a delayed failure. Author determined this factor by tensile tests which in references was not yet adequately treated. Slow tensile test (0.1 mm/min) in comparison with the standard one enables determination of hydrogen influence on fracture toughness. Next, also influence of heat treatment on fracture toughness of hydrogen containing steel was analyzed.

85 pages

119 ref.

MSc. theses

Vladimir Cvetkovski (10.10.1990 – supervisor A. Paulin)
Designing copper electrolytic refining plant

At first a review of modern electrolytic processes in the world is given from the viewpoint of investments and operational costs for a capacity of 100 000 t Cu/year, and a comparison with a common electrolytic plant of 50 000 tpy is made. Then a design of technology with necessary equipment and investment costs for a modern standard electrolytic plant as modulus capacity of 50 000 tpy was prepared, including auxiliary departments. Author cites that application of reversing current can increase output for about 40%. Erection of additional 50 000 tpy modulus is the simplest way to increase plant output to 100 000 tpy. Simultaneously the possibility to reconstruct standard plant in a simple way to a fully automatic one is also indicated.

112 pages

25 ref.

Matjaž Pristavec

(15.11.1990 – mentor V. Marinković)

Mikrostrukturne raziskave donorsko dopirane keramike PZT

Keramika PZT sloni na trdni raztopini $Pb(Zr, Ti)O_3$ in predstavlja najpomembnejšo skupino trgovskih piezoelektričnih materialov. Uporabne lastnosti zavisi od razmerja Zr/Ti, koncentracije vgrajenih kationov z drugačno valenco ter seveda od mikrostrukture keramike. Avtor se je omejil v svojem delu na vpliv vgradnje nekaterih višjevalentnih kationov donorjev (Sb^{5+}, Nb^{5+}) na mikrostrukturne značilnosti te keramike. Za analizo je uporabil elektronski mikroskop. Do koncentracije 2.5 at. % Nb ali Sb v keramiki nastajajo ploskovni defekti zaradi pojavljanja koherentno vgrajenih izločkov $P - Nb_2O_5$. Pri deležih nad 2.5% pa v zrnih nastajajo "podzrna". Podmeje, ki se pojavljajo, so tudi posledica vgradnje prebitnega $P - Nb_2O_5$. Predlagani model ni dokončen, ker so potrebne dodatne preiskave z zahtevnejšimi aparaturami. Sb se obnaša enako kot Nb.

77 strani

43 cit.

Mustafa Serdarević (20.12.1990 – mentor J. Lamut)**Izboljšanje kvalitete kovaških ingotov z obdelavo tekočega jekla v ponovci**

Delo prispeva k naporom Železarne Zenica za prestrukturiranje proizvodnje, da bi se kakovost martinskega jekla izboljšala z lončno metalurgijo. Avtor je pripravil dve varianti izvenpečne obdelave ogljikovih jekel za ladjedelniške izkivke: popolna dezoksidacija v loncu, obdelava s sintetično žlindro, vakuumska obdelava ter obdelava s kalcijem; izdelava polpomirjenega jekla, obdelava s sintetično žlindro, vakuumska obdelava, vakuumska dezoksidacija z FeSi in Al, prepričevanje z argonom ter obdelava s kalcijem. Le druga varianta je dala ustrezne rezultate, zahteva pa dovolj visoke temperature — izlita talina mora imeti vsaj $1660^\circ C$, lonci pa morajo biti predgreti na 900 do $1100^\circ C$. Analizirana je bila tudi oblika in sestava nekovinskih vključkov.

99 strani

35 cit.

Darja Oblak (27.12.1990 – mentor L. Kosec)**Tvorba izločkov aluminijevega nitrída in rast avstenitnih zrn v krom-nikljevem jeklu za cementacijo**

Ta jekla se uporabljajo za izdelavo delov motorjev in sklopov za prenos moči. Problem pri njih pa predstavlja doseganje drobnih in enakomernih avstenitnih zrn. Avtorica je obdelala vpliv deleža aluminija v jeklu na velikost zrn. V laboratorijskih poskusih je talinam dodajala tudi niobij za zmanjševanje zrna ter napravila primerjavo s krom-manganovim jeklom Č.4320, za katerega so znane koncentracije Al in N, ki omogočajo drobno zmo. Ugotovila je, da pri Cr-Ni cementiranih jeklih zrna rastejo tako zaradi anizotropije energije kristalnih mej kot zaradi anizotropije mobilnosti kristalnih mej. Nekoliko prevladuje drugi mehanizem, verjetno pa je mehanizem rasti povezan s predhodno toplotno in deformacijsko zgodovino materiala. Velikost normalnih zrn pada z deležem aluminija in nad 0.025% Al so zrna manjša od 5 po ASTM še pri temperaturi žarjenja $1050^\circ C$. Ker je topnost AlN v jeklu z nikljem večja, je treba več Al za stabilizacijo neke začetne velikosti zrn. Izračunani so bili tudi topnostni produkti za niobijev karbonitrid.

72 strani

34 cit.

300

Matjaž Pristavec

(15.11.1990 – supervisor V. Marinković)

Microstructural investigations of donor doped PZT ceramics

PZT ceramics is based on $Pb(Zr, Ti)O_3$ solid solution, and it is the most important group of commercial piezoelectric materials. Its useful properties depend on Zr/Ti ration, concentration of incorporated cations of different valency, and essentially on the microstructure of ceramics. Author treated in his thesis the influence of incorporation of some higher-valency cations (Sb^{5+}, Nb^{5+}) on the microstructural characteristics of that ceramics. In his analysis he applied electron microscope. Up to 2.5 at. % Nb or Sb in ceramics, surface defects are formed due to appearance of coherently incorporated $P - Nb_2O_5$ precipitates. Above 2.5% "subgrains" are formed in the grains. Subboundaries being formed are also the consequence of incorporation of excess $P - Nb_2O_5$. Proposed model is not a final one since additional investigations with more sophisticated equipment are necessary. Sb behaves like Nb.

77 pages

43 ref.

Mustafa Serdarević (20.12.1990 – supervisor J. Lamut)**Improvement of the quality of forge ingots by treating steel melt in ladle**

Research is a part of Zenica Iron and Steelworks trends to improve its production program by improving the quality of open-hearth steel by ladle metallurgy. Author prepared two possibilities of out-of-furnace treatment of carbon steel for shipmaking forgings: complete deoxidation in ladle, treatment with synthetic slag, vacuum treatment, and treatment with calcium; making of semikilled steel, treatment with synthetic slag, vacuum treatment, vacuum deoxidation with FeSi and Al, blowing with argon, and treatment with calcium. Only the second technology gave adequate results, but it demands sufficiently high temperatures — initial melt from furnace must have at least $1660^\circ C$ while ladle must be preheated to $900-1100^\circ C$. Also shapes and composition of non-metallic inclusions were analyzed.

99 pages

35 ref.

Darja Oblak (27.12.1990 – supervisor L. Kosec)**Formation of precipitates of aluminium nitride and growth of austenite grains in chromium-nickel casehardening steel**

These steels are used in making motor parts and power-transmission joints. The problem with them is how to obtain fine and uniform austenite grains. The authoress analysed the influence of aluminium content in steel on the grain size. In laboratory tests also niobium was added to melts are grain refiner. Comparison with Č.4320 chromium-manganese steel was made since Al and N concentrations giving fine grain are known for it. It was found that grains in Cr-Ni case-hardening steel grow due to anisotropy of grain-boundary energy and due to anisotropy of grain-boundary mobility. The second mechanism is slightly prevailing. The mechanism of growth is probably connected with the thermal and deformation history of material. Size of normal grains is reduced with higher aluminium content and above 0.025% Al the grains are smaller than 5 according to ASTM scale even at annealing temperature of $1050^\circ C$. Since AlN solubility in steel with nickel is higher, more Al is needed to stabilize some initial grain size. Also solubility products for niobium carbonitride were calculated.

72 pages

34 ref.

Zlatko Lajtinger (16.4.1991 – mentor A. Smolej)
**Izdelava in raziskava superplastičnih zlitin vrste
 Al-Cu-Zr in Al-Zn-Mg-Cu**

Superplastičnost je sposobnost posebnih polikristalnih kovinskih materialov, da dosežejo pri natezni obremenitvi pri povišanih temperaturah izjemno velike raztezke brez makroskopsko vidnega zožka ali zloma. Napetosti tečenja pri superplastičnem preoblikovanju so manjše kot pri običajnem vročem preoblikovanju. Avtor je izdelal in preiskal drobnozrnati zlitini AlCu6Zr0,4 in AlCu6Zn5,7Mg2,3Zr0,4. Dobil je največje vrednosti raztezka 975% za prvo zlitino pri preoblikovalni hitrosti $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ in temperaturi 450 do 475°C, pri drugi pa 305% za $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ in 450°C. Indeks občutljivosti za preoblikovalno hitrost je bil pri obeh zlitinah med 0.5 in 0.7. Med superplastičnim preoblikovanjem nastane zelo drobnozrnata mikrostruktura kot posledica dinamične rekristalizacije. Nastanek in rast por med preoblikovanjem pa omejuje največje raztezke. Prva zlitina je bila bolj odporna pred tem pojavom.

60 strani

32 cit.

Ratko Marojević

(9.5.1991 – mentorja B. Dobovišek, A. Rosina)

**Vpliv mase vzorca in hitrosti segrevanja na
 karakteristike DTA pika**

Namen dela je bil ugotoviti vpliv hitrosti segrevanja v mejah 2 do 50°/min in mase vzorca v mejah 5 do 30 mg na osnovne značilnosti DTA konic. Preiskovane snovi so bili magnezit, dolomit in magnezijev hidroksid karbonat. Eksperimentalno ugotovljene vplive je avtor z regresijsko analizo pretvoril v matematično obliko kot polinom druge oz. četrte stopnje. Hitrost segrevanja bolj vpliva na kvalitativne, masa pa na kvantitativne značilnosti DTA konic. Obdelal je točke na krivulji, ki predstavljajo začetni odklon od ničelne črte, temperaturo in velikost konice ter točke, ko se DTA odklon vrne k ničelni črti, obenem pa tudi nastalo površino med DTA krivuljo in ničelno črto. Posredno je ugotovil zanesljivo natančnost uporabljene DTA naprave Linseis L62.

141 strani

48 cit.

Izidor Derganc (11.6.1991 – mentor C. Pelhan)

**Preiskava nodulatorja FeSiMg(Ca) in njegov vpliv na
 proizvodnjo nodularne litine**

Kroglasto obliko grafita pri tehničnih zlitinah dosežemo z dodatkom ustreznih nodulatorjev. Vloga kalcija v kompleksnem nodulatorju še ni v literaturi povsem pojasnjena. Smatrajo, da majhni dodatki kalcija zmanjšujejo burnost reakcije pri obdelavi taline z magnezijem in obenem povečujejo izkoristek magnezija. Avtor je v svojem delu analiziral faze, ki se tvorijo v FeSiMg(Ca) nodulatorju ter vpliv deleža kalcija v nodulatorju na mehanske lastnosti obdelane taline. Najpogostejši fazi sta po pričakovanju FeSi₂ in FeSi. Magnezij tvori Mg₂Si, tudi v kombinaciji Mg₂Si + Si in Mg₂Si + MgSi, ob prisotnosti kalcija in aluminija pa še Mg₂Si + CaSi₂ + Si, Mg + Mg₂Si + Al₂Mg₃, Al + Mg₂Si in Al + Mg₂Si + Si. Kalcij tvori predvsem CaSi₂, deloma tudi Mg₂Ca ter še CaSi₂Al₂. Prisotnost cerija in barija pa daje še Si + CeMg₂Si₂ in Al + BaMg₂Si₂ med zni osnovne. DTA analiza je pokazala, da Ca prispeva k nižji začetni temperaturi taljenja nodulatorja. Večji deleži Ca, kot se običajno uporabljajo, izboljšujejo mehanske lastnosti taline, posebno če je delež žvepla v talini večji, saj Ca talino razžvepla in dezoksidira, magnezij pa je prost za nodulacijo grafita. Ni pa nodulator z večjim deležem Ca primeren za Inmold postopek.

82 strani

24 cit.

Zlatko Lajtinger (16.4.1991 – supervisor A. Smolej)
**Making and testing Al-Cu-Zr and Al-Zn-Mg-Cu
 superplastic alloys**

Superplasticity is the property of special polycrystalline metallic materials to exhibit extraordinary elongations without macroscopic contraction or failure at tensile loading at elevated temperatures. Yield stresses in superplastic working are lower than in normal hot working. Author prepared and tested fine-grained AlCu6Zr0,4 and AlCu6Zn5,7Mg2,3Zr0,4 alloys. The highest elongation of 975% for the first alloy was obtained at working rate of $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ in temperature range 450 to 475°C, while for the second alloy it was 305% at $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and 450°C. Index of sensitivity to working rate was 0.5 to 0.7 for both alloys. In superplastic working the fine-grained microstructure is formed due to dynamic recrystallization. Formation and growth of pores during working is limiting factor for elongations. The first alloy is more resistant to these phenomena.

60 pages

32 ref.

Ratko Marojević

(9.5.1991 – supervisors B. Dobovišek, A. Rosina)

**Influence of sample mass and heating rate on
 characteristics of DTA peak**

Research had intention to investigate the influence of heating rate in range 2 to 50°/min and sample mass in range 5 to 30 mg on the basic characteristics of DTA peaks. Tested materials were magnesite, dolomite and magnesium hydroxide carbonate. Experimentally determined influences were transformed into mathematical form by regression analysis giving polynomials of second or fourth order. Heating rate has greater influence on qualitative while sample mass has greater influence on quantitative characteristics DTA peaks. Author analyzed points on DTA curve representing the beginning of the peaks, temperatures and heights of peaks, and points on DTA curves representing the end of the peaks, next to surfaces between DTA curves and zero lines. Thus he had determined the reliable accuracy of the used DTA equipment Linseis L62.

141 pages

48 ref.

Izidor Derganc (11.6.1991 – supervisor C. Pelhan)

**Investigation of FeSiMg(Ca) nodularising agent and its
 influence in making spheroidal graphite cast iron**

Spheroidal shape of graphite in technical alloys can be achieved by additions of suitable nodularising agents. Role of calcium in the complex nodularising agent is in references not adequately explained yet. Some are of opinion that additions of calcium reduce vigorousness of reactions in treatment of melt with magnesium and simultaneously increase its yield. Author analyzed phases being formed in FeSiMg(Ca) nodularising agent and the influence of calcium in the agent on the mechanical properties of treated melt. As expected, the most frequent phases were FeSi₂ and FeSi. Magnesium forms Mg₂Si, also in combinations as Mg₂Si + Si and Mg₂Si + MgSi. If calcium and aluminium are present, there are also Mg₂Si + CaSi₂ + Si, Mg + Mg₂Si + Al₂Mg₃, Al + Mg₂Si and Al + Mg₂Si + Si. Calcium forms mainly CaSi₂, partially also Mg₂Ca and CaSi₂Al₂. Presence of cerium and barium gives also Si + CeMg₂Si₂ and Al + BaMg₂Si₂ in spaces between matrix grains. DTA showed that Ca reduces initial melting temperatures of nodularising agent. Higher amounts of Ca than usual improve mechanical properties of cast iron especially at higher sulphur contents in melt since Ca desulphurizes and deoxidizes, while magnesium is available for spheroidization of graphite. But the agent with increased content of calcium is not suitable for the Inmold process.

82 pages

24 ref.

Tatjana Večko (21.6.1991 – mentor R. Turk)
Topla preoblikovalnost duplex avstenitno-feritnega jekla

Pri dupleksnih avstenitno-feritnih zlitinah ostaja, kljub množici raziskav v zadnjih letih, še vrsta nerešenih vprašanj o deformacijskih mehanizmi in možnosti krmiljenja termomehanskih procesov. Namen dela je bilo zasledovati mikrostrukturo dupleksnega nerjavnega jekla PJ325 z 0.1% C, 29% Cr in 9% Ni v prvi fazi od litja do končnega izdelka — predelava lite strukture. V litem stanju je jeklo dobro preoblikovalno med 1250 in 1200°C. Pod to temperaturo plastičnost močno zmanjšujejo izceje, neugodno razmerje avstenit/ferit ter karbidni izločki. Pri 1200–1250°C se jeklo deformira superplastično, prevladuje mehanizem mehčanja zaradi intenzivne dinamične poprave ferita. Pod 1150°C poteka deformacija z drsenjem dislokacij, mehanizem mehčanja pa je verjetno kombinacija dinamične poprave ferita in dinamične rekristalizacije avstenita. Homogenizacijsko žarjenje pri 1250°C omogoči superplastičnost pri določenih preoblikovalnih hitrostih do 950°C, poslabša pa mejno plastičnost. Ugotovljeni so bili termomehanski parametri za dobro preoblikovalnost lite strukture.

116 strani

63 cit.

Tatjana Večko (21.6.1991 – supervisor R. Turk)
Hot workability of duplex austenitic-ferritic steel

In duplex austenitic-ferritic steel, there are still many questions on deformation mechanisms and the possibility of controlling thermomechanical processes open though many investigations were made in recent years. The research had intention to follow the microstructure of duplex stainless steel PJ325 with 0.1% C, 29% Cr and 9% Ni in the first stage from pouring to final product, i.e. working of cast microstructure. Steel as cast has good workability between 1250 and 1200°C. Below this temperature the plasticity is highly reduced due to segregations, unsuitable austenite/ferrite ration, and carbide precipitates. In 1200–1250°C range steel is deformed superplastically, the mechanism of softening due to intensive dynamic recovery of ferrite is prevailing. Below 1150°C deformation takes place by gliding of dislocations, while mechanism of softening is probably a combination of dynamic recovery of ferrite and dynamic recrystallization of austenite. Homogenizing at 1250°C enables superplasticity at certain working rates down to 950°C, but limiting plasticity is reduced. Thermomechanical parameters for good workability of cast microstructure were determined.

116 pages

63 ref.

Jurij Bavdaž (21.6.1991 – mentor R. Turk)
Nestacionarnost testnih pogojev pri simulaciji termomehanskih stanj na raziskovalni opremi Gleeble 1500

Laboratorijske raziskave na simulatorjih procesov, povezanih z računalnikom, izpodrivajo drage in nepraktične raziskave pri industrijskih pogojih. Na simuliranje plastomehanskih dogajanj vplivajo lastnosti simulatorja ter pravilne izbire oblike in velikosti vzorca. Ugotovljeno je bilo, da se nastavljeni pogoji preskušanja med poskusom spreminjajo, česar računalniški program ne upošteva dovolj ali pa sploh ne. Z definiranjem pogojev preskušanja, zasledovanjem njihovega izvajanja in analizo dobljenih rezultatov naj bi dosegli večjo zanesljivost meritev. Naprava Gleeble ne upošteva nestacionarnega toka materiala med plastično deformacijo. Zato bo potrebno izpopolnjevanje merilne in procesne tehnike ter imeti numerično podprte analize opravljenih preskusov.

176 strani

90 cit.

Jurij Bavdaž (21.6.1991 – supervisor R. Turk)
Unsteady testing conditions in simulation of thermomechanical states on research equipment Gleeble 1500

Laboratory investigations on process simulation by computerized equipment substitute expensive and unpractical industrial tests. Simulation of plastomechanical phenomena is influenced by properties of simulator and correct choice of sample shape and size. It was found that set conditions of testing are changed during the experiment which computer program does not take in account enough or even not at all. Thus defining testing conditions, following their execution and analysis of obtained results should improve the reliability of measurements. Gleeble equipment does not take in account unsteady slow of material during plastic deformation. Therefore measuring and process techniques must be improved, and the numerically aided analysis of made experiments is essential.

176 pages

90 ref.

Radonja Minić (21.6.1991 – mentor J. Lamut)
Jeklo za cementacijo Č.4321 mikrolegirano z niobom in borom

Avtor je skušal z analizo toplo valjanih gredic in palic iz mikrolegiranega Cr-Mn konstrukcijskega jekla pokazati ugoden vpliv mikrolegiranja teh jekel. Analiziral je mikrostrukturo, nekovinske vključke, zrno, prekaljivost in mehanske lastnosti. Pokazal se je različen vpliv mikrolegiranja z niobijem, borom ali obema na posamezne značilnosti jekel. Namen dela je izboljšava kakovostnega programa Železarne Nikšić.

209 strani

85 cit.

Radonja Minić (21.6.1991 – supervisor J. Lamut)
Case-hardening Č.4321 steel microalloyed with niobium and boron

Author tried with the analysis of hot rolled billets and rods made of microalloyed Cr-Mn structural steel to show the favourable influence of microalloying those steels. Microstructure, non-metallic inclusions, grains, through hardenability and mechanical properties were analyzed. It was found that there is various influence of microalloying with niobium, boron, or both on various steel characteristics. Research had intention to give contribution to improve quality program of Nikšić Ironworks.

209 pages

85 ref.

Zvonko Erbus

(2.7.1991 – mentorja F. Pavlin, T. Kolenko)

Prenos toplote v kovinskih talinah

Namen dela je spoznati mehanizme prenosa toplote v metalurških reaktorjih (npr. v loncu pri lončni metalurgiji), ki se vse več uporabljajo za obdelavo talin izven peči. Avtor se je osredotočil na prenos toplote v homogenih mirujočih talinah, kjer potekajo reakcije in postavil za ta problem matematični model. Pri tem je upošteval eksotermnost reakcij. Obdelal je prenos toplote v vodi, jeklu, bakru in aluminiju. Ker ni bilo na razpolago posebne opreme za merjenje temperaturnih razlik na relativno majhnih razdaljah in v kratkih časovnih presledkih, matematičnega modela ni mogel preveriti s poskusi.

81 strani

19 cit.

Zvonko Erbus

(2.7.1991 – supervisors F. Pavlin, T. Kolenko)

Heat transfer in metallic melts

Research had intention to learn heat transfer mechanisms in metallurgical reactors (e.g. ladle) which are widely used in the out-of-furnace treatment of melts. Author focused the heat transfer in homogeneous steady melts in which reactions take place. He developed a mathematical model, taking in account exothermal reactions. Heat transfer in hot water, steel, copper and aluminium was analyzed. Since equipment for measuring temperature differences on small distances and in short intervals was not available the mathematical model could not be tested.

81 pages

19 ref.



ŽELEZARNA JESENICE

64270 JESENICE, Cesta Železarjev 8 - telefon: (064) 81-341, 81-441, 84-262
telex: (064) 83-395 - telex: 37-219, 37-212 zeljen - telegram: Železarna Jesenice

IZDELUJE

ELEKTRO PLOČEVINE IN TRAKOVI

NERJAVNA JEKLA

MIKROLEGIRANA JEKLA

VISOKO OGLJIČNA JEKLA za poboljšanje

- debelo, srednje in tanko pločevino
- hladno valjane trakove in pločevino
- dinamno trakove in pločevino
- nerjavne trakove in pločevino
- vlečeno, brušeno in luščeno jeklo
- valjano in vlečeno žico
- patentirano žico
- pleteno patentirano žico
za prednapeti beton
- hladno oblikovane profile
- kovinske podboje za vrata
- dodajni material za varjenje
- žičnike
- tehnične pline

NUDIMO TUDI **STORITVE**

- prevaljanja, vlečenja, iztiskanja
in toplotne obdelave pločevine in žice
- tehnične dejavnosti: elektro, strojne,
konstrukcijske, obrtne in tehnične

Vsebina

Prenos toplote, dinamika fluida, diferencialne enačbe (numerično reševanje parcialnih diferencialnih enačb), numerične rešitve

M. Bolčina

Uporaba računalniških preglednic s poudarkom na reševanju temperaturnih polj in polj mešanja taline

KZT, 26 (1992) 3, s 283–288

Prikazana je uporaba in prilagoditev t.i. preglednic (spreadsheet), ki jih lahko s pridom uporabljamo pri reševanju parcialnih diferencialnih enačb. Danes so te na voljo praktično za vsak hišni ali osebni računalnik. Pri tem uporabljamo metodo končnih diferenc in iterativni postopek, dokler v poljubnem segmentu polja ne pridemo do željenega pogoška. Uporaba te metode je skrajno enostavna za reševanje ustrezne oblike Laplaceove oziroma Poissonove diferencialne enačbe. Pri tem ne smemo zanemariti, da imamo vedno in takoj na voljo ustrezno grafično ponazoritev rešitve sistema. Postopek smo podali preko dveh primerov, in sicer Fourierjeve diferencialne enačbe prenosa toplote in nekoliko zahtevnejšega postopka reševanja Navier-Stokesove diferencialne enačbe, s pomočjo katere smo ocenjevali intenzivnost mešanja taline v indukcijski peči.

Avtorski izvleček

Elektroobložne peči, elektrotehnika, zalaganje, taljenje

J. Bratina

Električni lok v obložni peči

KZT, 26 (1992) 3, s 275–281

Opisani so parametri, ki določajo fizikalne lastnosti loka v elektroobložni peči. Podane so odvisnosti teh parametrov od obratovalne napetosti transformatorja ter od obratovalnega faznega faktorja $\cos \varphi$.

Avtorski izvleček

Metalurgija, kontinuorno livenje, matematičke rešitve

I.B. Ristetski

Dimenzioniranje meniska tokom kontinuiranog livenja čelika

KZT, 26 (1992) 3, s 271–274

U predloženom radu dokazane su matematičke jednačine pomoću kojih se može izvršiti dimenzioniranje meniska, na osnovu uticajnih parametara procesa kontinuiranog livenja čelika.

Avtorski izvleček

Inhalt

<p>Lichtbogenofen, Elektrotechnik, Einsetzen und Schmelzen J. Bratina Der Lichtbogen im Lichtbogenofen KZT, 26 (1992) 3, S 275-281</p> <p>Parameter, durch welche die physikalischen Eigenschaften des Lichtbogens in Lichtbogenofen bestimmt werden, werden beschrieben. Gegeben sind die Abhängigkeiten dieser Parameter von der Betriebsspannung des Transformators wie von dem Betriebsphasenfaktor $\cos \varphi$.</p> <p style="text-align: right;">Auszug des Autors</p>	<p>Wärmeübertragung, Fluidodynamik, numerische Lösung, Differential partial Gleichungen M. Bolčina Anwendung von Rechner Übersichtstabellen (spreadsheets) mit der Betonung auf der Lösung der Temperaturfelder und der Rührfelder von Schmelzen KZT, 26 (1992) 3, S 283-288</p> <p>Im Artikel wird die Anwendung und Anpassung der sogenannten Übersichtstabellen (spreadsheets) die nützlich bei der Lösung der differential — partial gleichungen angewendet werden gezeigt. Heutzutage sind diese praktisch für jedes Haus bzw. Personenrechner zur Verfügung. Dabei wird die Methode der Enddifferenzen und das iterative Verfahren angewendet, solange im beliebigen Feldsegment nicht der gewünschte Fehler erreicht wird. Die Anwendung dieser Methode ist bei der Lösung der entsprechenden Form der Lapac bzw. der Poisson Differentialgleichung äusserst einfach. Dabei ist nicht zu vernachlässigen, dass immer und sofort auch die entsprechende graphische Darstellung für die Lösung des Systemes zur Verfügung steht. Das Verfahren wird an zwei Beispielen gezeigt und zwar mittels der Fourier. Differentialgleichung der Wärmeübertragung und mittels des etwas anspruchsvollen Verfahrens für die Lösung der Navier-Stokes-Differentialgleichung mit deren Hilfe die Rührintensität von Schmelzen im Induktionsofen bewertet worden ist.</p> <p style="text-align: right;">Auszug des Autors</p>
	<p>Metallurgie, Stranggiessen, mathematische Lösungen I.B. Risteski Dimensionierung des Meniskus während des Stranggiessens von Stahl KZT, 26 (1992) 3, S 271-274</p> <p>In der vorgelegten Arbeit werden mathematische Gleichungen mit deren Hilfe die Dimensionierung des Meniskus durchgeführt werden kann unter Beweis gestellt, und zwar auf Grund der Einflussparameter des Stranggiessverfahrens von Stahl.</p> <p style="text-align: right;">Auszug des Autors</p>

Contents

Heat transfer, Fluid dynamics, Numerical solution, Partial differential equations

M. Bolčina

Application of Computer Spreadsheets with Emphasis on the Solution of Temperature Fields and Fields of Melt Stirring

KZT, 26 (1992) 3, p 283-288

Application and adaptation of the so called spreadsheets is presented. They can be satisfactorily used in solving partial differential equations. Nowadays they are available practically for each home computer or PC. The method of final differences and iterations are used till in any field segment the desired accuracy is achieved. Use of this method is extremely simple for the solution of a suitable form of Laplace or Poisson differential equation. It must not be neglected that always and immediately also corresponding graphical presentation of the system solution is available. The procedure was illustrated by two examples, i.e. by the solution of Fourier heat transfer differential equation, and the somewhat more demanding solution of Navier-Stokes differential equation which was applied in estimating the stirring intensity of melt in an induction furnace.

Author's Abstract

Electric arc furnaces, Electrical engineering, Charging and melting

J. Bratina

Electric Arc in Arc Furnace

KZT, 26 (1992) 3, p 275-281

Parameters describing physical properties of arc in electric arc furnace are given. Further, relations between those parameters, and the operational transformer voltage, and operation power factor are presented too.

Author's Abstract

Metallurgy, Continuous casting, Mathematical solutions

I.B. Risteski

Dimensioning of Meniscus during the Continuous Casting of Steel

KZT, 26 (1992) 3, p 271-274

The paper presents and experimentally proves mathematical equations which can be applied for dimensioning of meniscus and thus the influential process parameters for continuous casting of steel.

Author's Abstract



TEHNIČNE DEJAVNOSTI

ERZ — elektro delavnice, regulacija in zveze

- elektroinstalacijska dela in popravila elektro motorjev
- popravila in remontni regulacijskih sistemov
- montaža in popravila klimatizacijskih in tehalnih naprav
- servis ročnih električnih in gospodinskih strojev
- izdelava in vzdrževanje žičnih, brezžičnih in računalniških zvez

SD — strojne delavnice

- izdelava in popravilo strojnih rezervnih delov
- termična obdelava
- izdelava odkovkov do teže 30 kg
- izdelava in popravilo orodij in hidravlične ter pnevmatske opreme
- izdelava in kompletiranje metalurške in sorodne opreme

KD — konstrukcijske delavnice

- izdelava, popravila in montaža jeklenih konstrukcij
- metalizacija in navarjanje delov z različnimi dodajnimi materiali
- popravila in remontni žerjavov in žerjavnih prog

KOVIN — kovinska industrija

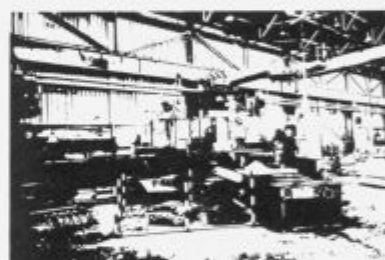
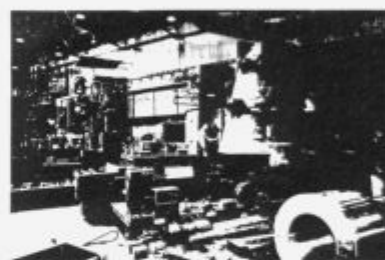
- izdelava opreme in elementov za gradbeništvo
- izdelava hlevske opreme
- izdelava proizvodov galanterije za trg in kooperacijo
- izdelava delov za manjše individualne naročnike

OD — obrtne delavnice

- obrtna kleparska in plastičarska dela
- izvedba sanitarnih, toplotnih, mazalnih in hidravličnih ter ostalih industrijskih instalacij
- izdelava in montaža lesnih izdelkov za manjše serije in individualne naročnik

TIDN — tehnične izboljšave delovnih naprav

- projektiranje delovnih naprav (strojno, elektro, hidravlično in pnevmatsko)
- projektiranje in uvajanje procesno vodenih tehnoloških procesov



ŽELEZARNA JESENICE

64270 JESENICE, Cesta Železarjev 8 - telefon: (064) 81-341, 81-441, 84-262 -
telefax: (064) 83-395 - telex: 37-219, 37-212 zeljsn - telegram: Železarna Jesenice



ŽELEZARNA JESENICE

64270 JESENICE, Cesta Železarjev 8 - telefon: (064) 83-561, 84-261, 81-341
telex: (064) 83-395 - telex: 37219, 37212 željsl - telegram: Železarna Jesenice

Slovenija

IZDELUJE

**MIKROLEGIRANA
JEKLA**

**NERJAVNA
JEKLA**

**ELEKTRO PLOČEVINE
IN TRAKOVI**

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

NUDIMO TUDI STORITVE

- * prevaljanja, vlečenja, iztiskanja
in toplotne obdelave
pločevin in žice
- * tehnične dejavnosti: elektro, strojne,
konstrukcijske, obrtne in tehnične



ŽELEZARNA JESENICE

ACRONI

METALURGIJA



IZDELUJE

- MIKROLEGIRANA JEKLA
- NERJAVNA JEKLA
- ELEKTRO PLOČEVINE IN TRAKOVE

**MIKROLEGIRANA
JEKLA**

**NERJAVNA
JEKLA**

**ELEKTRO PLOČEVINE
IN TRAKOVI**

- vroče valjane trakove in pločevine
- hladno valjane trakove in pločevine
- dinamo trakove in pločevine
- nerjavne trakove in pločevine
- hladno oblikovane profile
- kovinske podboje za vrata

NUDIMO TUDI STORITVE

- prevaljanja, iztiskanja, krojenja in toplotne obdelave pločevin

