

applications of electromagnetics fields, New York 1961. — D. R. Corson, P. Lorrain, Introduction to electromagnetic fields and waves, San Francisco 1962. — E. Hallen, Electromagnetic theory (prijevod sa švedskog), London 1962. — K. Lunze, E. Wagner, Einführung in die Elektrotechnik, Berlin 1962. — K. J. Binns, P. J. Lawrence, Analysis and computation of electric and magnetic field problems, Oxford 1963. — M. Javid, P. M. Brown, Field analysis and electromagnetics, New York 1963. — F. W. Sears, Elektricitet i magnetizam (prevod s engleskog), Beograd 1963. — N. Tralli, Classical electromagnetic theory, New York 1963. — J. van Bladel, Electromagnetic fields, New York 1964. — D. S. Jones, The theory of electromagnetism, Oxford 1964. — M. N. Ranojević, Osnovi elektrotehnike, Beograd 1964. — K. Shimoni, Teoretičeskaia elektrotechnika, Moskva 1964. — B. I. Spascki, Istorija fiziki II, Moskva 1964. — W. L. Weeks, Electromagnetic theory for engineering applications, New York 1964. — S. Ramo, J. R. Whinnery, T. van Duzer, Fields and waves in communication electronics, New York 1965. — J. Šurukta, Elektromagnetika, Beograd 1965. — R. S. Elliott, Elektromagnetics, New York 1966. — L. R. Haiman, K. C. Demirchian, Teoretičeskie osnovy elektrotechniki, Moskva 1966. — H. A. Romanowitz, Electrical fundamentals and circuit analysis, New York 1966. — E. Phillipow, Taschenbuch der Elektrotechnik I, II, Berlin 1968 i 1966. — E. U. Condon, H. Odishaw, Handbook of physics, New York 1967. — A. Haug, Grundzüge der Elektrotechnik, München 1967. — J. D. Jackson, Classical electrodynamics, New York 1967. — F. Jelaković, Uvod u elektrotehniku i elektroniku, Zagreb 1967. — V. Bego, Mjerenja u elektrotehnici, Zagreb 1968. — P. Silvester, Modern electromagnetic fields, New York 1968. — W. R. Smythe, Static and dynamic electricity, New York 1968. — V. Pinter, Osnove elektrotehnike I, Zagreb 1970. — T. Bosanac, Teoretska elektrotehnika I, Zagreb 1973.

Z. Haznadar V. Pinter

ELEKTROTERMIIJA, grana nauke i tehnike koja obraduje probleme pretvaranja električne energije u toplotu. Proučava principе, procese, načine i postupke zagrevanja te se bavi konstrukcijom i primenom električnih grejala (peći) i drugih pomoćnih i pratećih uređaja. Električno zagrevanje se primenjuje u industriji, građevinarstvu, brodarstvu (v. Brodska elektrotehnika, TE 2, str. 521), poljoprivredi, medicini (terapeutska i kirurška dijatermijska, v. Medicinski aparati) i domaćinstvu (v. Električni kućanski strojevi, TE 4, str. 100).

U ovom članku promatrat će se uglavnom elektrotermija u užem smislu, primenjena u metalurgiji.

Za početak razvoja elektrotermije može se uzeti 1843 godina, kada je Joule pronašao zakon pretvaranja električne energije u toplotu. Prvi patent za električno grejanje dobio je J. Y. Simpson 1859. Proučavajući vrtljone struje J. B. L. Foucault je samo godinu dana docnije (1860) učinio daljnje za elektrotermiju važno otkriće konstatujući da elektromotorne sile indukovane u provodnicima uzrokuju njihovo zagrevanje. Razumevanju tih pojava mnogo je doprinela teorija elektromagnetske indukcije (J. C. Maxwell 1870). Sledeci krupni koraci u razvoju elektrotermije bili su prva uspjesna izvedba elektročuve peći (W. Siemens 1879) i pronalazak indukcione peći (Kjellin 1899). Najnoviji elektrotermički postupci, zagrevanje dielektričnim gubicima i mlazom elektrona, počeli su se primenjivati u praksi tek posle drugog svetskog rata.

Privredni značaj elektrotermije. U preim秉stva elektrotermičkog grejanja ubraja se to što se za to potrebna električna energija vrlo ekonomičnim prenošenjem može srazmerno lako dostaviti na svako mesto i u svakom trenutku, za svaku snagu postrojenja, aparata ili uređaja, pomoću srazmerno jednostavnih sistema za napajanje, te se lako pretvara u toplotu. Utrošak

termički postupci uopšte su veoma značajni za grejanje, posebno u industriji. Važnost elektrotermije u industriji može se oceniti na osnovu podataka iz tabl. 1.

Ti podaci dokazuju da su elektrotermička postrojenja vrlo krupni, a ponegde i najveći potrošači električne energije u industriji razvijenih zemalja. Zbog toga, i ne računajući sa potrošnjom domaćinskih elektrotermičkih aparata, potrošnja električne energije u elektrotermičke svrhe predstavlja uopšte najznačajniju stavku ukupne svetske potrošnje električne energije.

PROCESI PRETVARANJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U TOPLITU

Pretvaranje električne energije u toplotu događa se tokom četiri osnovna procesa:

1. Kretanjem električnih naboja u bilo kojem sredstvu dio kinetičke energije pretvara se sudarima sa česticama sredstva u toplotu (v. Toplinski učinak električne struje, str. 113 i 118). To je u stvari suština pojma »električni otpor materijala«, pa se on za razliku od drugih električnih otpora naziva delatni (radni, realni, »omski«) otpor. Pri tome je potpuno svejedno da li je sredstvo — trošilo — direktno uključeno u strujni krug (zagrevanje električnim otporom), ili promenljivo magnetno polje u njemu uslovjava pojavu električnog polja koje uzrokuje struju (tzv. zagrevanje indukcijom).

2. U naizmeničnom magnetskom polju sredstvo je ovisno o magnetskim svojstvima, izloženo uzastopnoj promeni magnetizovanja pa se zbog unutarnjeg deformisanja dio energije pretvara u toplotu. To je tzv. zagrevanje magnetizovanjem. Ako sredstvo pokazuje i magnetostriktijska svojstva (v. Magnetostriktija, Elektrotehnički materijali, str. 56) i usled titranja molekula deo se energije pretvara u toplotu. U provodljivim sredstvima dolazi do indukcije, te stvaranja topote kao u prvom procesu.

3. U naizmeničnom električnom polju uzastopnom promenom polarizacije dielektrika deo energije pretvara se u toplotu (v. Elektrotehnički materijali, str. 73 i 74). To je tzv. zagrevanje usled dielektričnih gubitaka.

4. Naelektrisane mikro-čestice (elektroni, joni) mogu se ubrzavati električnim poljem, te usmeravati električnim ili magnetnim poljima prema nekom objektu. Sudarom će čestice većinu energije predavati objektu u obliku topote. To je tzv. zagrevanje mlazom čestica.

Ovi se procesi mogu u istom postupku i međusobno ispreplićati.

Načini zagrevanja. Objekt se može zagrevati na dva načina, direktno i indirektno. Direktno se zagreva izazivanjem jednog od navedenih procesa na objektu. U tom slučaju on mora imati neka odredena svojstva potrebna za proces: provodljivost, magnetna ili

Tablica 1
INDUSTRIJSKA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA ELEKTROTERMIIJU U NEKIM ZEMLJAMA

Zemlja Godina	Austrija 1969	Francuska 1969	Italija 1969	Japan 1962	Norveška 1962	Jugoslavija 1969
Ukupna potrošnja električne energije u industrijske svrhe GWh	9 975	69 048	63 168	63 755	16 000	11 345
Potrošnja električne energije u industrijskim elektrotermičkim postrojenjima GWh	2 615	15 025	11 442	22 210	10 000	4 231
Potrošnja u industrijskim elektrotermičkim postrojenjima prema ukupnoj potrošnji u industrijske svrhe %	26,2	21,7	18,1	34,5	62,5	37,2

električne energije lako se meri, izbor postupaka elektrotermičkog grejanja je srazmerno širok, elektrotermička postrojenja, aparati i uređaji srazmerno su jednostavni, zauzimaju malo prostora, lako se instaliju i omogućavaju zagrevanje tačno određenih zona. Nadalje, tim se procesom grejanja može lako upravljati, automatizovati ga, regulisati njegov toplotni režim i pri tome postići velike toplotne stepene korisnog dejstva, faktore snage i faktore opterećenosti pogona. Takvo grejanje ne menja atmosferu u sistemima u kojima se upotrebljava, pa ni vakuum, osigurava dobre uslove rada i malo ili nikako ne deluje na atmosferu prostorija ni na okoliš.

Zbog toga, usprkos nedostacima kao što su ponekad veliki investicioni troškovi i visoka cena električne energije, elektro-

dielektrična svojstva itd., sve u onom području temperatura na kojima će se nalaziti.

Indirektno se zagreva objekt primanjem toplote od grejača (v. Elektrotehnički materijali, str. 68). Toplotu se sa grejača može prenositi na tri osnovna načina (v. Prenos topline): 1. provodenjem (kondukcijom), tj. direktnim dodirom objekta i grejača ili preko fiksнog posrednika dobre toplotne provodljivosti, 2. prenošenjem (konvekcijom) preko posrednika u kome možedoci do strujanja (i to makrostrujanja) tečnosti ili gasa, te 3. zračenjem (radijacijom) elektromagnetskih talasa u tzv. infracrvenom (IC) području (v. Infracrvena tehnika).

I ovi se načini prenosa toplote u praksi isprepliću, pa se nekada koristi mešovito prenošenje na dva ili sva tri načina.

Energetski odnosi pri pretvaranju električne energije

u toplotu. Prema Jouleovom zakonu toplotna snaga $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ (tzw. toplotni fluks ili tok) ovisna je o električnoj snazi,

$$\Phi = P = R I^2 = \frac{U^2}{R},$$

gde je R omska otpornost dela kola u kojem električna energija prelazi u toplotu, I efektivna jakost električne struje u tom delu kola, a U napon na tom delu kola. Pri tome R treba razumeti kao funkciju temperature, pa se sa njegovom promenom menjaju i efektivne vrednosti struje i napona.

Energetski aspekti pojedinih elektrotermičkih postupaka mogu se razmatrati jedino polazeći od tog zakona. Za oblik formula koje se pri tome dobijaju na prvom mestu merodavna je omska otpornost posmatranog elementa električnog kola. Ona je u velikoj meri zavisna od specifičnosti pojedinih elektrotermičkih postupaka. Tako je, npr., kad se radi o otpornosti običnog linijskog provodnika

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

gde je ρ specifična omska otpornost, l dužina, a S poprečni presek provodnika, a kad se radi o otpornosti električnog luka

$$r_1 = \frac{u_1}{i_1},$$

gde je i_1 trenutna vrednost jačine struje kroz električni luk, $u_1 = f(i_1)$ trenutna vrednost napona na krajevima električnog luka, pri čemu je međusobna funkcionalna zavisnost veličina u_1 i i_1 određena nekim analitičkim izrazima.

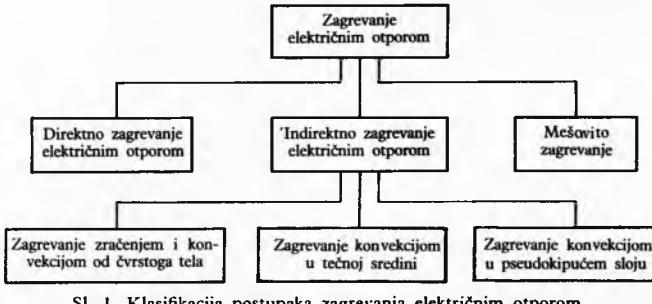
Klasifikacija elektrotermičkih postupaka. Po najgrubljoj klasifikaciji područje elektrotermije deli se na zagrevanje a) električnim otporom, b) indukciono, c) dielektričnim gubicima, d) električnim lukom i e) elektronskim mlazom. (Takva podela savsim je formalna jer, kako je pre rečeno, električno grejanje uvek je otporsko, a ne samo onda kad je realizovano električnim otporom.)

Sam toga u klasifikaciji elektrotermičkih postupaka razlikuju se postupci u kojima je elektrotermički izvor toplote u sredini grejanja koje je svrha tog procesa (postupci direktnog ili neposrednog grejanja električnim putem) i onim gde se taj izvor iz nekog razloga ne može nalaziti u toj sredini, pa se toplota od izvora do objekta (trošila toplote) prenosi na neki od načina prenosa toplote.

ZAGREVANJE ELEKTRIČNIM OTPOROM

Zagrevanje električnim otporom obuhvata sve postupke električnog direktnog i indirektnog zagrevanja pri proticanju jednosmerne ili naizmenične struje niske učestalosti kroz čvrstu ili tečnu sredinu.

Postupci zagrevanja električnim otporom mogu se klasifikovati kako je prikazano u shemi na sl. 1. Sem direktnog zagrevanja

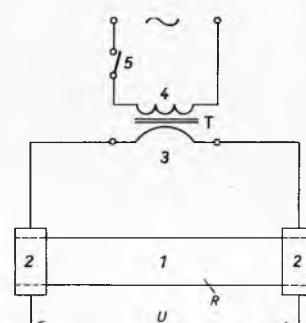


električnom otpornošću šarže, pri kojemu se električna energija pretvara u toplotu u šarži samoj, i indirektnog zagrevanja električnim otporom, pri kojemu se toplota sa direktno zagrevanog grejnog tela prenosi na šaržu zračenjem, konvekcijom ili provodenjem, na toj shemi je odvojeno prikazano mešovito zagrevanje pod elektroprovodnom troskom, pri kojemu se jedan deo šarže

(tečna troska) zagreva direktno električnom strujom, a drugi deo šarže (metalno kupatilo) indirektno toplotom troske.

Za indirektno zagrevanje električnim otporcem postoje tri karakteristične vrste uređaja: a) Uredaji u kojima se šarža zagreva konvekcijom ili zračenjem sa čvrstog grejnog tela. Posebno mesto ovde zauzimaju uređaji za zagrevanje infracrvenim zracima; njihov se toplotni fluks uglavnom koncentriše na površinske slojeve šarže. b) Uredaji za zagrevanje u tečnoj sredini (tečni metal, soli) u kojoj se nalazi telo koje se zagreva time što se na nj iz tečnosti prenosi toplota konvekcijom a donkles i provodenjem, te uređaji za zagrevanje u pseudo-kipućem (fluidiziranom) sloju, kod kojih se toplota od grejnog tela ka šarži prenosi na sličan način neprekidnim kretanjem sitnih čestica (pseudo-kipući sloj je u stalnom kontaktu sa grejnim telom i šaržom).

Direktno zagrevanje električnim otporom. Princip takvog zagrevanja prikazan je shemom na sl. 2. Tu se vidi da se uključivanjem sklopke 5 uključuje napon na krajeve predmeta 1 koji treba grejati. Proticanjem struje u njemu električni rad se pretvara u toplotu. Zbog toga je taj način električnog grejanja jedan od najekonomičnijih.



Sl. 2. Principijelna shema uređaja za direktno zagrevanje električnim otporom. 1 Telo koje se zagрева, 2 kontaktne celjusti, 3 sekundarni i 4 primarni namot transformatora T, 5 sklopka

Toplota koja se oslobodi u telu nastala je prema Jouleovom zakonu na račun električnog rada ($P \cdot t$), uz neki stepen korisnog (toplotonog) dejstva η_{th} :

$$c \cdot m (\vartheta_1 - \vartheta_0) = \eta_{th} (P \cdot t),$$

gde je c specifična toplota materijala, m masa tela, ϑ_0 početna, ϑ_1 konačna temperatura tela, P snaga grejača a t trajanje procesa.

Proizvedena toplota $dQ_1 = cm dt$ raspoređuje se na toplotu dQ_2 koja se akumulira u predmetu i dQ_3 koja ga napušta (zračenjem i konvekcijom) kroz spoljnu površinu S_s .

Uz uslove da se tu tokom procesa toplotne i električne karakteristike predmeta ne menjaju, da je njegov poprečni presek u odnosu na dužinu mali, tako da se pri tome gustina struje sme smatrati nepromjenjenom po celom preseku, da se greje jednosmernom strujom ili naizmeničnom strujom niske učestalosti, može se izvesti izraz za srednju temperaturu ϑ predmeta kao funkciju vremena t :

$$\vartheta = \frac{\Phi}{\alpha_s S} \left[1 - \exp \left(- \frac{\alpha_s S}{m c} t \right) \right] + \vartheta_0,$$

gde je $\Phi = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 S}{\rho l}$ stalna vrednost toplotnog fluksa izvora, S poprečni presek, ρ specifična električna otpornost materijala, l aktivna dužina, α_s srednja vrednost koeficijenata prenošenja toplote na okolinu. Može se izvesti i izraz za takvim grejanjem maksimalno dosivu temperaturu predmeta:

$$\vartheta_{max} = \frac{\Phi}{\alpha_s S_s} + \vartheta_0.$$

Glavni problem pri direktnom zagrevanju električnim otporom jest svodenje kontaktne otpornosti između čeljusti 2 i predmeta 1 na što manju meru. To se postiže velikim kontaktnim površinama, izradom čeljusti od materijala sa malom kontaktnom otpornošću (npr. od bronce) i hlađenjem čeljusti prinudnom cirkulacijom vode.

Za izbor transformatora takvih uređaja merodavna je maksimalna jačina I struje potrebne za zagrevanje predmeta iz predviđenog assortmana i maksimalnog napona U na njihovim krajevima. Te dve karakteristične vrednosti dobijaju se iz izraza

$$I = S \sqrt{\frac{c d (\vartheta_1 - \vartheta_0)}{\rho \eta_{th} t}},$$

odnosno:

$$U = l \sqrt{\frac{cd\varrho(\vartheta_1 - \vartheta_0)}{\eta_{th} t}},$$

gde je d gustoća predmeta $\left(\frac{m}{l^2}\right)$.

Stepen je toplotnog korisnog dejstva η_{th} između 0,7 i 0,9 u zavisnosti od odnosa l/S .

Primena direktnog zagrevanja električnim otporom. Ovo je zagrevanje jedan od najekonomičnijih načina zagrevanja, zbog toga što se električna energija pretvara u toplotu u predmetu koji se termički obraduje.

S obzirom na to da se velike količine energije troše direktno za zagrevanje električnom strujom kupatila pri elektroličkom dobijanju i rafinaciji metala, npr. aluminijuma i bakra (v. Elektroliza glinice i elektrolička rafinacija aluminijuma, TE 1, str. 228 i Rafinacija bakra, TE 1, str. 656), u stvari se i te grane elektrometalurgije kao područje primene direktnog zagrevanja električnim otporom mogu smatrati delom elektrotermije, mada je uobičajeno da se obraduju kao deo tehničke elektrokemije (v. Elektrokemija, TE 4, str. 388). Važno područje primene tog načina zagrevanja jest metaloprerađivačka industrija, ali se ono primenjuje i za razne druge svrhe. Direktno zagrevanje električnim otporom mnogo se upotrebljava za zagrevanje predmeta od metala, uglavnom šipki, profila, gredica, trupaca, koje treba podvrći mehaničkoj obradi, obično kovanju, presovanju, ekstruziji. Prednost takvog načina zagrevanja jest što se usled mogućnosti primene velikih specifičnih snaga može izvesti za veoma kratko vreme, tako da je izolacija radi smanjenja gubitaka topline pri tome suvišna. Vreme zagrevanja direktno je proporcionalno sa preprečnim presekom. Tako npr. za kružni presek prečnika d (u santimetrima) to vreme (u sekundama) iznosi $2d^2$ do $3d^2$.

Takođe se direktno zagrevanje električnim otporom upotrebljava i u tehnici zavarivanja (v. Zavarivanje). Za razliku od prethodnog slučaja, glavna količina topline ovde treba nastojati savladanjem otpornosti u zoni spoja koji treba izvesti. Zbog toga ona mora biti primereno velika u odnosu na otpornosti ostalih delova električnog kola u kome se odvija proces. To je neophodno još i zbog toga što se ovde radi sa strujama veoma velike jačine (do nekoliko stotina hiljada ampera), pa bi inače nastupili značajni gubici topline. Zbog velike kondukcije topline u zoni oko mesta spajanja, stepen korisnog dejstva je u tim procesima nizak, ali oni pružaju izuzetne mogućnosti pa se primenjuju u mnogim slučajevima zavarivanja.

Taj način grejanja upotrebljava se i u industriji stakla. Staklo se prvo mora dogrevati do temperatura (1700...1800 K) iznad kojih direktno zagrevanje električnim otporom postaje izvodljivo nastupanjem disocijacije alkalnih silikata i porastom pokretljivosti njihovih jona (između 900 i 1100 K već prema sastavu stakla), usled čega staklo, inače izolator, postaje provodnik (v. Staklo).

Ponekad se taj način grejanja upotrebljava i za ubrzano očvršćavanje betona. Postupak se sastoji u korišćenju armature kao provodnika, a električna struja može se voditi i kroz masu tečnog betona, jer je on takođe provodnik.

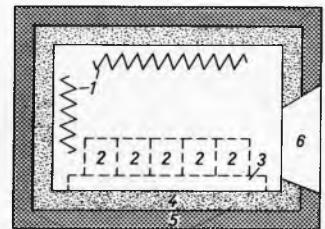
Takođe se taj način grejanja ponekad primenjuje i za grejanje vode. To je omogućeno time što prirodna voda ima srazmerno visoku specifičnu električnu otpornost (voda iz vodovoda oko 20 Ωm).

Osim toga na takav način običava se grejati i druge tečnosti, npr. melasu, rastvore gluokoze itd. Direktno grejanje električnim otporom upotrebljava se i u proizvodnji elektrografita (v. Graft i proizvodnja olovaka), proizvodnji silicijum-karbida (v. Silicijum) i u brojne druge svrhe.

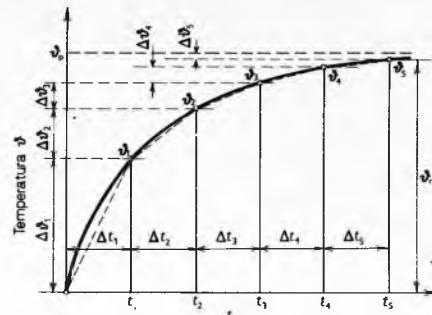
Indirektno zagrevanje električnim otporom. Kako je već rečeno, pri tom načinu zagrevanja direktno se greje samo grejno telo, a kako je već prikazano na sl. 1, postupci tog zagrevanja klasifikuju se prema tome na kakav se način toplota iz tog tela prenosi, pri tome se razlikuju postupci prenošenja topline zračenjem i konvekcijom (među kojima se posebno izdvajaju postupci zagrevanja infracrvenim zračenjem) od postupaka prenošenja topline konvekcijom i kondukcijom u tečnoj sredini i pseudokonvekcijom sloju (v. Fluidizacija).

Zagrevanje zračenjem i konvekcijom topote grejnog tela jedan je od načina grejanja u zatvorenim komorama. Tipični slučaj takvog grejanja jest grejanje u šaržnim komornim pećima. Princip dejstva tih peći shematski je prikazan na sl. 3. Već zagrejana peć puni se izracima 2 na nosaču 3 kroz otvor 6, koji se zatim zatvara. Izraci se zagrevaju pomoću grejača 1. Takovo se zagrevanje šarže primenjuje za podizanje temperature šarže pri ulasku (ϑ_0) na neku radnu temperaturu (ϑ_r) te održavanje te temperature kroz neko vreme. Zbog neizbežnih gubitaka potrebno je da temperatura peći ϑ_p bude nešto viša od radne temperature ϑ_r .

Za termičku obradu šarže koja se zagreva na taj način obično je iz tehnoloških razloga potrebno odrediti vreme t za koje temperatura šarže naraste od vrednosti ϑ_0 na vrednost ϑ_r . Međutim, analitički izraz za funkciju $\vartheta = f(t)$, gde je ϑ bilo koja temperatura između ϑ_0 i ϑ_r , a t vreme njenog dosizanja računajući od početka procesa, nije poznat, jer su prema zakonima prenošenja topline (v. Prenos topline) u tom procesu fluksevi topline koja se prenosi zračenjem (Φ_z) i konvekcijom (Φ_k) takođe veličine promenljive sa vremenom. Da bi se na neki način dobila predstava o vremenu zagrevanja i pored toga što je nepoznat analitički izraz za krivu promene temperature sa vremenom, sprovodi se postupak aproksimacije te krive ograničenim brojem pravih odsečaka (sl. 4),



Sl. 3. Komorna šaržna peć za direktno zagrevanje konvekcijom i zračenjem. 1 Grejač, 2 izraci, 3 nosač, 4 unutarnja vatrostalna obloga, 5 vanjska termoizolaciona obloga, 6 otvor peći



Sl. 4. Zavisnost temperature ϑ indirektno zagrevanog tela od vremena t

pa se na taj način može odrediti i vremenski interval Δt koji odgovara izabranoj temperaturnoj razlici $\Delta\vartheta$. Tako se u pojedinim intervalima linearne zavisnosti može odrediti vrednost temperature, a time i srednja vrednost toplotnih fluksova, zračenja ($\Phi_{z1}, \dots, \Phi_{zn}$) i konvekcije ($\Phi_{k1}, \dots, \Phi_{kn}$), te se može izračunati potrebno vreme zagrevanja u pojedinim odsečcima:

$$\Delta t_1 = \frac{mc\Delta\vartheta_1}{\Phi_{z1} + \Phi_{k1}}; \quad \Delta t_2 = \frac{mc\Delta\vartheta_2}{\Phi_{z2} + \Phi_{k2}}; \\ \Delta t_n = \frac{mc\Delta\vartheta_n}{\Phi_{zn} + \Phi_{kn}},$$

a ukupno vreme t izračunati njihovim sumiranjem:

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n.$$

Sem toga, sasvim grubo određivanje vremena t može se izvesti polazeći od pretpostavke da je kriva zagrevanja jednostavna, npr. parabola. Tada se dobija izraz

$$t = \frac{mc(\vartheta_p - \vartheta_0)}{0,3 a_s a_p S_s},$$

gde je a_s složeni koeficijent prenošenja topline zračenjem i konvekcijom, a S_s srednja površina predmeta koji tu toplotu prima.

Iz tih izraza se vidi da je t zavisno od mase predmeta koji se termički obraduju, tako da je za velike mase vreme njihovog zagrevanja na temperaturu ϑ_r veliko, bez obzira na to koliko to traže tehnološki zahtevi. Zbog toga, i zbog srazmerno malih spe-

cifičnih topotnih snaga koje je pri takvom načinu zagrevanja moguće postići (do 30 kW/m^2), važno je što više smanjiti gubitke toplotne. Zbog toga se kako za vatrostalnu (4 na sl. 3) tako i za termoizolacionu (5 na sl. 3) oblogu tih peći biraju materijali sa malom topotnom vodljivosti.

Grejna tela (otpornici) su izvori toplote za indirektno zagrevanje zračenjem i konvekcijom topline. Za ispravnu funkciju ovih grejnih tela važno je da su izrađeni od materijala postojanih u uslovima upotrebe kojoj su namenjeni (v. *Elektrotehnički materijali*, str. 68) te da su primernih dimenzija.

Zahteva se da grejno telo izdrži predviđeni vek trajanja uz izlaganje maksimalnim temperaturama (ϑ_{rp}) koje može postići i uz to vladajućoj agresivnosti atmosfere u kojoj će dejstvovati. Dimenzionisanje grejnih tela sastoji se u određivanju njihovog poprečnog preseka i dužine pomoću formula izvedivih polazeći od specifičnog vatnog opterećenja površine

$$p = \frac{P_1}{S} = k p_{\max},$$

gde je P_1 deo ukupne električne snage uređaja koji otpada na grejno telo 1, S njegova površina, p_{\max} maksimalno dopušteno specifično opterećenje površine, a k korekcioni koeficijent zavisan od tehnološke izvedbe grejnog tela.

Za dimenzionisanje grejnih tela sa kružnim presekom upotrebljavaju se izrazi: za prečnik d preseka:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \rho_r P_1^2}{\pi^2 p U_1^2}},$$

gde je ρ_r specifična električna otpornost na radnoj temperaturi, a U_1 napon na njegovim krajevima, i za dužinu l

$$l = \sqrt[3]{\frac{U_1^2 P_1}{4 \rho_r p^2}}.$$

Za dimenzionisanje grejnog tela pravougaonog preseka upotrebljava se izraz za jednu dimenziju, npr. debljinu

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_r P_1^2}{2 p m (1 + m) U_1^2}},$$

gde je m kvocijent širine b i debljine a grejnog tela. Pri tome se upotrebljavaju samo neke od vrednosti za m , npr.: 5, 8, 10, 12 ili 15, tako da je tim izrazom određeno i b (jer je $b = m a$) i za dužinu grejnog tela:

$$l = \sqrt[3]{\frac{m p_1 U_1^2}{4 \rho_r (1 + m^2) p^2}}.$$

Međutim, računanje ovim formulama retko dolazi u obzir, jer obično proizvođači materijala za izradu otpornih grejača stavlju na raspolaganje pomoću tih formula već izrađene nomograme. Pomoću njih se d , a , b i l izravno određuju iz P_1 , U_1 , ρ_r , p i m . Pri tome P_1 i U_1 zavise od veza grejnih tela koje se odabiru prema zahtevima regulacije snage uređaja.

Posebni problem pri konstruisanju grejnih tela tih uređaja jest izvođenje krajeva otpornika, jer zbog neizbežne kontaktne otpornosti na njihovim priključcima oni mogu biti najviše opterećeni. Proizvođači materijala za otpornike daju iscrpna uputstva za rešavanje tih problema i za mogućnosti nastavljanja tih provodnika zavarivanjem ili tvrdim lemljenjem, koje se primenjuje u iznimnim slučajevima (v. Materijali za kontakte u članku *Elektrotehnički materijali*, str. 69).

Primena indirektnog zagrevanja zračenjem i konvekcijom. Principijelno se zagrevanje na taj način može upotrebiti u svim slučajevima gde je za to dovoljna maksimalna dopustiva temper-

tura grejnog tela i gde je dopušteno da se predmeti koje treba zagrejati greju kroz njihovu spoljnu površinu. Tako se npr. može upotrebom grejnog tela od grafita u evakuisanoj komori postići radna temperatura od 2700 K. Zbog toga je primena tog načina grejanja vrlo raširena u industriji, poljoprivredi i domaćinstvu. Sve električne peći za zagrevanje vazduha, spremnici tople vode, bojleri, električni štednjaci i drugi slični aparati greju se na taj način (v. *Električni kućanski strojevi, aparati i naprave*, TE 4, str. 85).

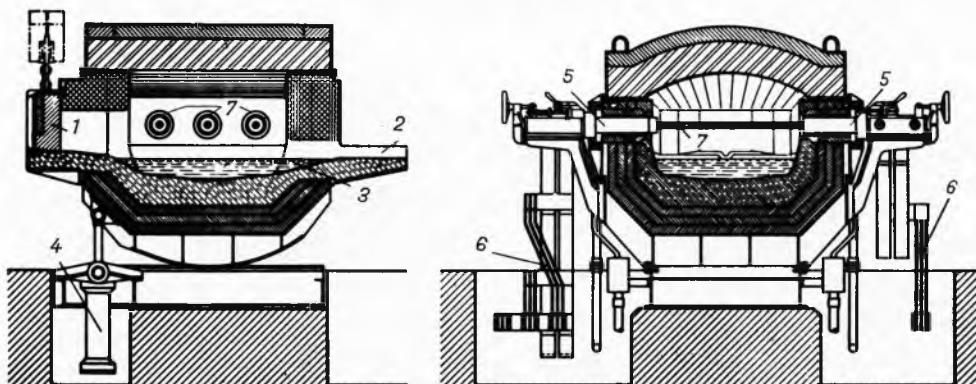
Peći koje služe za zagrevanje na taj način klasikuju se prema načinu rada (sa isprekidanim ili sa stalnim pogonom), prema visini njihovih radnih temperatura: sa niskom (do 700 K), srednjom (do 1300 K) ili visokom temperaturom (do 1900 K) pod normalnim pritiskom, te sa visokom temperaturom u vakuumu (i više od 1900 K), te prema vrsti atmosfere u peći (sa oksidajućom, tj. vazdušnom, sa kontrolisanim atmosferom raznih gasova ili vakuumsko). Peći se nadalje razlikuju po konstrukciji, a primenjuju se komorne, mufolne, kanalne, zvonaste, elevatorske sa pokretnim podom, konvejerne i druge peći.

Ipak, čak i u opisanoj primenljivosti tog zagrevanja ono je često manje efikasno i ekonomično od zagrevanja novijim postupcima, pa ga oni sve više potiskuju, naročito iz industrije. Ovde se taj postupak zagrevanja najviše zadržao radi pretaljivanja u metalurgiji, pa i za proizvodnju stakla, u slučajevima gde se radi sa malim šaržama i čestim promenama sastava talina. Jedna izvedba peći za takve svrhe uz kapacitet otprilike 1 t prikazana je na sl. 5.

Zagrevanje infracrvenim zračenjem. Zagrevanjem infracrvenim zračenjem (IC) energija se prenosi od izvora do trošila gotovo nezavisno od sredine u kojoj se oni nalaze. To je indirektno zagrevanje, pri kojem se u stvari ne prenosi toplota nego energija zračenja, a ta prelazi u toplotu tek apsorpcijom u telima koja se zagrevaju. Izvori, tzv. radijatori, izrađeni su na principu zagrevanja otporom, a zračenje koje emituju zavisi uglavnom od njihove temperature, materijala i kvaliteta površine te od spektralne raspodeli energije. Pretežni deo tog zračenja je u tzv. infracrvenom području, pa se ono obično (ali ne najtačnije) naziva IC-zračenje, a prema anglosaskim, odnosno nemačkim terminima infrared, odnosno infrarot, odnosno ultrarot, još i IR-, odnosno UR-zračenje. (O prirodi, emisiji i apsorpciji IC-zračenja v. *Fotografija, Infracrvena tehnika, Instrumentalne metode kemijske analize, Medicinski aparati, Prenos topline, Regulacijska tehnika, Signalna i sigurnosna tehnika*.)

U okviru elektrotermije obraduju se problemi generisanja i apsorbovanja IC-zračenja, dakle konstruisanje i upotreba radijatora i metode zagrevanja.

Izvori IC-zračenja. Radijatori se klasikuju na kratko-, srednjo- i dugotalasne prema maksimumu u spektralnoj raspodeli intenziteta zračenja. Ta podela radijatora nije sasvim jednaka uobičajenoj podeli IC-zračenja, jer su radne temperature tehničkih IC-radijatora ispod 3000 K, te njihovo kratkotalasno područje temperaturnog zračenja ne dosije do granica kratkotalasnog temperaturnog zračenja Sunca. Te razlike dobro su ilustrovane podacima u tabl. 2, gde su T_{\max} gornje granice radnih temperatura radijatora, $\lambda_{(E, T) \max}$ dužine talasa na kojima se najčešće nalazi



Sl. 5. Trofazna peć za indirektno zagrevanje s otporima od grafita. 1 Vrata, 2 izlev, 3 talina, 4 uređaj za iskretnje, 5 priključci, 6 dovodi struje, 7 grafitni štapovi

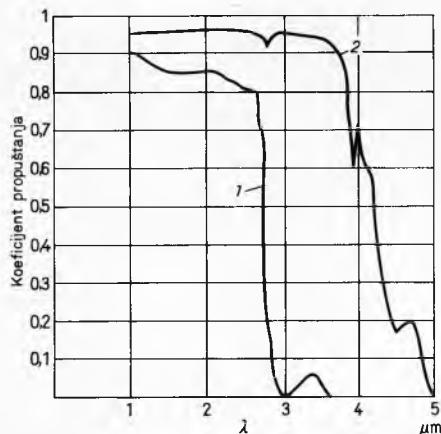
maksimum krive raspodele energije njihovog zračenja, a $100 E_{\lambda<1\mu m}/E$ i $100 E_{\lambda<2\mu m}/E$ procentni udeli energija $E_{\lambda<1\mu m}$ i $E_{\lambda<2\mu m}$ koje se pri tome prenose dužinama talasa $\lambda < 1\mu m$, odnosno $\lambda < 2\mu m$ prema ukupnoj energiji E emitovanog zračenja.

Tablica 2

RADNE TEMPERATURE I RASPODELA ENERGIJE ZRAČENJA KRATKO-, SREDNJO-, I DUGOTALASNIH IC-RADIJATORA

T_{max} K	Vrsta zračenja	$\lambda_{(E, T)max}$ μm	$E_{\lambda<1\mu m}/E$ %	$E_{\lambda<2\mu m}/E$ %
1 000	IC-dugotalasno	2,89	—	11,8
1 500	IC-srednjotalasno	1,92	1,3	27,6
2 500	IC-kratkotalasno	1,16	16	63,2
6 000	Sunčev	0,48	74	94,5

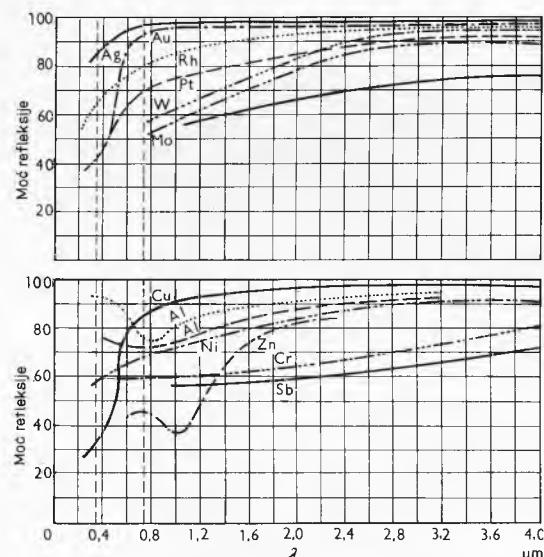
Osim položaja maksima u spektralnoj raspodeli energije zračenja IC-radijatora sa energetskog gledišta prilično je važno koliko ona zadire u područje zračenja svetla, jer se zracima iz tog područja prenosi energija koja se ne može iskoristiti za postizanje toplotnih učinaka. Gledano s tog stanovašta važno je razlikovati svetle i tamne IC-radijatore. Svetli IC-radijatori rade sa visokim temperaturama, od 2400 pa do blizu 3000 K. Oni emituju i za zagrevanje beskorisno zračenje svetla od nekoliko procenata pa do nekoliko desetaka procenata od ukupne energije zračenja. Tamni IC-radijatori rade sa temperaturama ispod 700 K. Tehnički IC-radijatori moraju, nadalje, imati stalnu moć emisije, moraju biti trajni, robustni, lako se moraju izmenjivati te biti otporni u uslovima u kojima se upotrebljavaju. Zato se ugradjuju u zaštitne omotače koji mogu biti neprozračni ili prozračni. Ako su neprozračni, oni su faktični izvor toplotnog zračenja koji je indirektno grejan električnim otporom. Neprozračni omotači od neprovodnika ponašaju se približno kao siva tela. Radijatori sa neprozračnim metalnim omotačima ponašaju se kao selektivni izvori zračenja. U radijatorima sa prozračnim omotačima izvor toplotnog zračenja je sam direktno grejan otpornik. Dakako, od omotača tih radijatora traži se da dobro propušta toplotno zračenje. To njihovo svojstvo meri se tzv. koeficijentom propuštanja (udelom ukupne energije zračenja kojega propuštaju) zavisnim od istih parametara od kojih je zavisan i koeficijent apsorpcije. Krive zavisnosti tih koeficijenata prikazane su dijagramima na sl. 6 za najvažnije materijale prozračnih omotača, staklo (1) i prozirno kremeno staklo (2).



Sl. 6. Zavisnost koeficijenta propuštanja od duljine vala IC-zračenja za: 1 staklo (3 mm) i 2 kremeno staklo (2,5 mm)

Osim tih svojstava od IC-radijatora se traži i da im zračenje bude usmereno, pa se obično kombinuju sa reflektorima. Dakako, za prirodu i kvalitet dejstvujućih površina tih elemenata merodavni su zahtevi u pogledu refleksije toplotnog zračenja u

IC-području. Krive zavisnosti moći refleksije nekih od najvažnijih materijala koji dolaze u obzir za izradu tih površina prikazane su na sl. 7.



Sl. 7. Moć refleksije elektromagnetskog zračenja površina nekih metala u zavisnosti od talasne dužine

Zbog važnosti njihovih omotača IC-radijatori se često dele prema tome kakve su konstrukcije i od kakvog su materijala ti njihovi elementi.

Najvažniji *dugotalasni* IC-radijatori jesu panoi od elektroprovodnog stakla i radijatori sa keramičkim omotačima. *Srednjotalasni* IC-radijatori obično su sa metalnim omotačima ili omotačima od neprozračnog stakla. Savremeniji *kratkotalasni* IC-radijatori zaštićeni su cevima od prozračnog kremena stakla. U toj skupini radijatora u novije vreme pojavili su se tzv. halogeni radijatori. Ranije najvažniji IC-radijatori, IC-sijalice, sve se manje upotrebljavaju.

Panoi od elektroprovodnog stakla. Pod elektroprovodnim staklom razumevaju se ploče od stakla na koje je nekim od zato raspoloživih postupaka nanesen adherentni i vrlo tanak sloj oksida kalaja ili kadmijuma koji je tu provodnik i kojega otpornost se koristi za grejanje. Već prema debljinji tih slojeva (nalazi se u granicama od 0,2 μm do 1 μm) IC-radijatori izrađeni od tih materijala u obliku kvadrata dimenzija 0,4 m \times 0,4 m mogu imati električnu otpornost među suprotnim rubovima od $10 \text{ k}\Omega$ do $100 \text{ k}\Omega$. To su tamni IC-radijatori sa radnom temperaturom ograničenom koeficijentom toplotne dilatacije staklene podloge (na 350 K, odnosno 420 K, odnosno 670 K kad je to obično, tvrdi ili pyrex-staklo). Prednost im je vrlo jednolična radna temperatura. Zbog toga se upotrebljavaju za precizno zagrevanje, npr. u termičkoj obradi klišaja, za sušenje tankih slojeva emulzija i slično.

IC-radijatori sa keramičkim omotačima keramičke su ploče ili cevi koje se indirektno zagrevaju ugrađenim otpornicima. Dobijaju se obično pečenjem keramičkog materijala zajedno sa otpornicima. Da bi, kao neprozračni, mogli emitovati povoljno zračenje, tim se keramičkim materijalima dodaju materijali koji intenzivno zrače (obično se zasićuju silicijum-karbidiom), a da bi dobro štitili otpornike, glaziraju se. I to su tamni radijatori. Radne temperature su im obično 700 ... 900 K, ali dosižu i do maksimalnih temperatura područja primene tamnih IC-radijatora. Prednost su im čvrstoća, otpornost prema promenama temperature uzrokovanim strujanjem zraka, prskanjem vode i prema hemijskim uticajima.

IC-radijatori sa metalnim omotačima slične su konstrukcije kao i oni sa keramičkim cevnim omotačima. I otpornici i cevni omotači su obično od legura nikla i hroma, ali se njihovi omotači izrađuju i od drugih materijala koji emituju povoljno zračenje, npr. čelika koji je površinskim legiranjem (obično sa hro-

mom) učinjen otpornim prema hemijskim uticajima. Otpornici tih radijatora moraju, dakako, biti električki izolirani. Najprikladniji materijal za tu svrhu jest taljeni magnezit, jer sem što je dobar električki izolator on je i dobar provodnik topline. Međutim, u prisutnosti železa, a to je ovde neizbežno, električna otpornost magnezita može naglo opasti na temperaturama $1000\cdots 1100$ K, pa su to gornje granice područja radnih temperatura tih radijatora. Zbog toga i oni pripadaju skupini tamnih IC-radijatora. Takođe, prisustvo čak i vrlo malih količina vode može uzrokovati gubitak izolacionih osobina magnezita, pa se pri izradi tih radijatora mora pokloniti posebna pažnja zaštiti izvoda otpornika od vlage. Zbog toga što su im omotači od metala i što se njihovi otpornici mogu dobro centrirati, prednost je tih radijatora što se mogu oblikovati savijanjem na najrazličitije načine. Glavni nedostatak im je veća termička tromost ($2\cdots 3$ min) uzrokovanu masom izolacije i omotača.

IC-radijatori sa omotačima od kremenog stakla. Svojstva kremenog stakla koja ga čine opšte važnim konstrukcionim materijalom IC-radijatora jesu što mu je koeficijent toplotne dilatacije vrlo mali, što je vrlo otporno prema hemijskim uticajima i prema visokim temperaturama, što zadržava svojstva izolatora i do 1500 K i posebno što njegove neprozračne modifikacije emituju zračenje sa maksimumom intenziteta u srednjotalasnom IC-području, a, kako je već navedeno, njegove prozračne modifikacije imaju velik koeficijent propuštanja u čitavom području IC-zračenja zanimljivog za elektrotermiju, te što su vrlo otporne na toplotne udare.

Omotači obeju vrsti ovih radijatora (srednjotalasnih sa omotačima od neprozračnog i kratkotalasnih sa omotačima od prozračnog kremenog stakla) jesu cevi u koje su slobodno uvučeni otpornici. U srednjotalasnim IC-radijatorima ove vrsti ti su otpornici od legura nikla i hroma i ne zahtevaju zaštitu inertnim gasom, jer su na radnim temperaturama postojani, tako da im je trajnost obično nekoliko godina. Kratkotalasni IC-radijatori zbog visokih radnih temperatura ($2400\cdots 2500$ K), smešteni su u atmosferu inertnog gasa, obično argona. Mali koeficijent toplotne dilatacije prozračnog kremenog stakla pričinjava velike teškoće pri hermetizaciji izvoda otpornika sa omotačima od toga materijala. Ti problemi rešavaju se zamenom niti volframa tankim trakama od molibdena, pri čemu su odnosi koeficijenata toplotne dilatacije na spoju izvoda sa materijalom omotača povoljniji.

Za njihovu primenu jedno od najvažnijih svojstava kratkotalasnih IC-radijatora sa omotačima od prozračnog kremenog stakla jest njihova mala toplotna inercija. (Njihov intenzitet zračenja dosiže 63% od maksimuma već nakon 0,3 sekunde od početka grejanja. Trajinost im je ~ 5000 časova, a maksimalna specifična snaga 250 kW/m^2 .)

IC-sijalice (žarulje) načelno se ne razlikuju od svih ostalih električnih sijalica sa užarenom niti (v. Električni izvori svjetlosti, Žarulje sa užarenom niti, TE 4, str. 267, odn. 269, u članku *Električno osvetljivanje*) i one takođe emituju toplotno zračenje pretežno u IC-području. Od ostalih sijalica sa žarnom niti IC-sijalice razlikuju se samo time što su im radne temperature žarnih niti niže, pa im se maksimum intenziteta zračenja pomera dublje u IC-područje. Te temperature su od 2200 do 2400 K, a talasne dužine na kojima se nalazi maksimum intenziteta zračenja su od $1,2 \mu\text{m}$ do $1,3 \mu\text{m}$.

Glavno povoljno svojstvo IC-sijalica jest što im je termička inercija vrlo mala. Međutim, njihovi nedostaci, osetljivost staklenog balona, naročito na dodir sa vodom, male dosisive maksimalne snage (do 25 kW/m^2), visoki gubici topline kroz grlo ($\sim 13\%$) i intenziteta zračenja apsorpcijom u materijalu balona (daljih $\sim 22\%$), čine ih sve manje zanimljivim za tehničko IC-grejanje, pa se proizvode uglavnom kao doknadni delovi za stare instalacije.

Halogeni IC-radijatori takođe su jedna vrsta sijalica. Te sijalice pretežno se upotrebljavaju za električno osvetljenje u specijalnim slučajevima. Naziv im potiče odatle što im zaštitni gas u balonu sadrži male količine nekog halogena (najčešće joda). Njihovo najvažnije svojstvo pri upotrebni za osvetljenje jest što im je intenzitet zračenja svetla u poređenju sa ostalim sijalicama sa žarnom niti znatno veći, jer su im radne temperature žarne niti mnogo više (do 3000 K). Dejstvovanje pod tim uslovima bez kondenzacije para volframa koje nastaju iz žarne niti i time ta-

loženja tamnih, jako apsorbujućih slojeva na unutrašnjem zidu balona, do čega bi bez prisustva halogena došlo, omogućeno je stalnim odvijanjem tzv. halogenskog ciklusa (sl. 8), a i srazmerno visokim temperaturama balona. Pod halogenskim ciklusom razumeva se spajanje volframa i halogena u parnoj fazi u volfram halogenid, do čega dolazi u spoljnoj, hladnijoj zoni unutrašnjosti balona, sa temperaturom ispod 1700 K, i raspad halogenida u unutrašnjoj toplijoj, sa temperaturom iznad 1700 K.

To omogućava konstrukciju sijalica srazmerno malih dimenzija kojom se ujedno osigurava i dovoljno visoka temperatura balona, a to diktira upotrebu kvalitetnog materijala za izradu tog elementa. Za to najbolje odgovara prozračno kremeno staklo, jer sem što zadovoljava u pogledu postojanosti, još i propušta zračenje bolje od stakla.

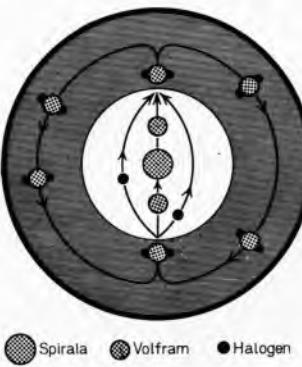
Upotrebljivost halogenih sijalica za IC-radijatore zasniva se na okolnosti što one unatoč jačoj emisiji svetla emituju i vrlo intenzivno IC-zračenje (omogućavaju specifične snage zračenja do 1500 kW/m^2) i to na srazmerno vrlo kratkim talasima, pa su prikladne za zagrevanje debelih predmeta na srazmerno visoke temperature. Vek trajanja tih radijatora je ~ 5000 sati.

Primena IC-zagrevanja. Najviše se IC-zagrevanje upotrebljava za termičku obradu površina ili tankih slojeva. Za takvu obradu najvažniji postupci IC-zagrevanja jesu sušenje premaza te sušenje tekstila i papira. Taj se način zagrevanja dosta upotrebljava i za postizanje visokih temperatura u procesima prerade metalova.

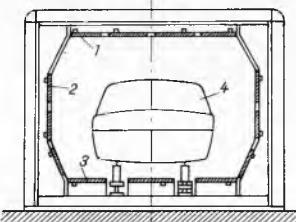
IC-sušenje premaza. Kao i drugi termički postupci za to tzv. sušenje i taj se postupak upotrebljava za ubrzavanje procesa otvrđivanja filmova premaza. Već prema tome da li taj proces teče samo otparavanjem rastvarača ili su za to još potrebne i reakcije u vezivu posle toga, potrebno je da su temperature filma $310\cdots 470$ K. To je izvedivo i pomoću tamnih IC-radijatora sa radnom temperaturom ispod temperature paljenja para rastvarača, koja su obično $800\cdots 900$ K, pa je tada velika prednost tog postupka što ne zahteva primenu posebnih mera predstrožnosti za zaštitu od eksplozije. Peć za takvo sušenje prikazana je shematski na sl. 9.

IC-sušenje tekstila i papira. I uklanjanje vode iz tekstila i papira u toku njihove proizvodnje može se izvesti na sličan način. I u tom postupku je dejstvo tamnih IC-radijatora povoljnije. Kako su materijali o kojima se tu radi uvek trake, uredaji za izvođenje tih postupaka uvek su kontinualni. Pored toga njihove snage srazmerno su velike, jer su količine vode koje treba ispariti takođe srazmerno velike, a specifični utrošci energije su od 1 kW do 2 kW za svaki kilogram isparene vode, već prema tome kakve su konstrukcije i kakvi se materijali preraduju. Zaštita od paljenja materijala u preradi zahteva od tih sušnica automatsko prekidanje strujnog kola grejanja sa prekidom toka trake, te zbog termičke inercije radijatora i reflektora i njihovo istovremeno zaklanjanje ili skretanje u stranu.

IC-zagrevanje do visokih temperatura postiže se u komorama sa halogenim radijatorima. Primjenjuje se u preradi metala za predgrevanje tamo gde je direktno zagrevanje električnim otporom i indukciono grejanje nepovoljno, npr. kod predgrevanja trupaca koji su kratki ili imaju nejednoličan prečnik.



Sl. 8. Shematski prikaz halogenog ciklusa. Bela zona oko spirale $T > 1700$ K, senčena zona $T < 1700$ K



Sl. 9. Poprečni presek IC-peći za sušenje premaza. 1 Stropni grejač ($2\cdots 3 \text{ kW/m}^2$), 2 bočni grejač ($2\cdots 3 \text{ kW/m}^2$), 3 podni grejač ($8\cdots 10 \text{ kW/m}^2$), 4 prema zani izradak

ELEKTROTERMIIJA

Osim toga IC-zagrevanje radi postizanja visokih temperatura primenjuje se i za lemljenje, pa i za zavarivanje, posebno na nepristupačnim mestima (v. *Zavarivanje i lemljenje*).

Ostale primene IC-zagrevanja. Neko od ostalih primena IC-zagrevanja jesu: za predgrevanje u grafičkoj industriji, za lepljenje u industriji papira, za predgrevanje, zagrevanje reakcionih smeša i zavarivanje u industriji plastičnih masa, za sterilizaciju, pečenje i sušenje u prehrambenoj industriji, priređivanje hrane i grejanje u kućanstvu (v. *Električni kućanski strojevi*, TE 4, str. 85) za grejanje u medicini i drugde.

Mešovito zagrevanje. Zagrevanje pod elektroprovodnom troskom je poseban, relativno novi postupak proizvodnje specijalnih čelika (npr. konstrukcijskih, nerđajućih, alatnih, vatrostalnih, za kuglične ležaje) pomoću električnih peći koje se mešovito zagrevaju kombinacijom direktnog i indirektnog zagrevanja električnim otporom. Peć za takvo zagrevanje prikazana je shematski na sl. 10.

Kao i u elektrolučnom postupku proizvodnje čelika (v. *Elektrolučni procesi*, TE 3, str. 63, u članku *Čelik*) i u tom postupku temeljne su reakcije između sastojaka sirovine i elektroprovodne troske, pa njihovi sastavi moraju biti prilagođeni jedan drugome. Od sirovine formira se (npr. livenjem, kovanjem, valjanjem) elektroda 1. Protuelektroda 8 je od grafita. Obe su priključene na izvor 11 naizmenične struje (transformator). Na početku procesa strujno kolo zatvoreno je troskom među elektrodama. Proces počinje topljenjem troske na dnu peći pod uticajem zagrevanja električnim otporom, a nastavlja se topljenjem materijala elektrode. Pri tome nastaju sitne kapljice 2, koje polako padaju kroz rastaljenu trosku. Pri padanju njihova velika ukupna površina (koja može doseći i do 30 m^2) omogućava njihov dobar kontakt sa troskom pa se na kraju formira rastop 3 proizvoda, tzv. metalno kupatilo. Kako se proces odvija pod uticajem hlađenja vodom koja protiče kroz omotač peći od ulaza 9 do izlaza 10, troska i metalno kupatilo na dnu peći postepeno očvršćavaju. Time se postepeno formira ingot 4 sa korom 5 od očvrsnute troske, ali elektroda 1 ostaje stalno zaronjena u sloju 6 rastopa troske. Na taj način do sada su odliveni komadi mase i do 40 tona.

Prednosti tog postupka u poređenju sa postupcima u elektrolučnim pećima jesu što se tu koristi izvor naizmenične struje, nije potreban vakuum, šarža se lako vadi iz peći, investicioni i eksploracioni troškovi su manji, a kvalitet proizvoda nije lošiji.

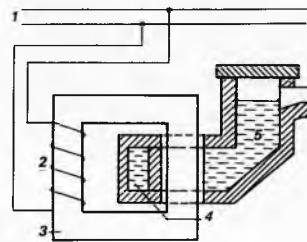
Zbog toga što troska ovde i oplemenjuje materijal i štiti proizvod od oksidacije za vreme izrade, princip tog postupka važan je i za tehnologiju zavarivanja specijalnih čelika (v. *Zavarivanje*).

ZAGREVANJE ELEKTRIČNOM INDUKCIJOM

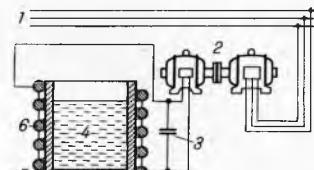
Pod zagrevanjem električnom indukcijom razumeva se zagrevanje materijala i predmeta pod uticajem vrložnih struja nastalih usled napona indukovanih u njima naizmeničnim magnetnim poljem u kojemu se ti predmeti nalaze. Dakako, zato je potrebno da ti objekti budu provodnici. Dva su osnovna principa na kojima se zasniva konstrukcija uređaja za takvo grejanje, pa postoje i dve vrste peći: sa magnetnim jezgrom i bez njega.

Indukcione peći sa magnetnim jezgrom, u novije vreme sve više poznate kao peći sa kanalom (žlebom), ilustrovane su primerom na sl. 11. Očigledno je njihov princip dejstva potekao od transformatora. Principijelna razlika dejstva transformatora (v. *Transformator*) i tih peći samo je u tome što je, namesto da je otvoreni namotaj, sekundar induktivnih peći kratko spojeni prsten od materijala koji se greje, a nalazi se u takode prstenastom kanalu peći. Odatle se onda toplota prenosi na šaržu u celosti konvekcijom i kondukcijom.

Indukcione peći bez magnetnog jezgra, u novije vreme sve više poznate kao peći s tignjem, ilustrovane su primerom na sl. 12. Njihovo dejstvo može se takođe porediti sa dejstvom transformatora, ako je šarža kratko spojeni sekundar, a magnetni tok nije vođen jezgrom.



Sl. 11. Princip indukcione peći sa kanalom (jezgom). 1 Elektročara za napajanje, 2 primarni namot, 3 jezgro, 4 žleb sa talinom (kao sekundarni namot), 5 metalno kupatilo



Sl. 12. Princip indukcione peći s tignjem. 1 Elektročara za napajanje, 2 pretvarač učestalosti, 3 kondenzator, 4 šarža, 5 tiganje, 6 namot

Indukciono grejanje može se, dakako, primeniti i na grejanje objekata od neprovodnika posredstvom nekog provodnika koji se greje indukciono, npr. uronjenih grejača, zidova aparata od provodnika. No, zapravo su ti provodnici objekti indukcionog zagrevanja, pa se ono naziva indirektnim indukcionim zagrevanjem (za razliku od ostalih postupaka indukcionog zagrevanja, koji se, kad je to potrebno istaknuti, nazivaju direktnim).

Osnovne karakteristike indukcionog zagrevanja. Gleđano nezavisno od mehanizma indukcije, razlika između tog načina zagrevanja i direktnog zagrevanja električnim otporom samo je u tome što ovde struje kroz grejani materijal imaju zatvoreni, kružni tok i što nastaju bez kontakta sa izvorom energije posredstvom elektroda. Zbog toga i ovde transformacija električne energije u toplotu, tj. nastajanje toplotnog fluksa, teče u skladu sa Jouleovim zakonom, pa su za toplotni fluks u tome slučaju izvedive općenite relacije:

$$P_i = R I^2 = \frac{E^2}{R} = \frac{k f^2 \Phi_m^2}{R},$$

gde je E inducirana elektromotorna sila, k faktor proporcionalnosti (zavisao od niza parametara), f učestalost električne struje u indukcionom namotaju, Φ_m magnetni fluks, a značenje ostalih simbola već je spomenuto.

Iz tih relacija, koje su tako uopštene da nemaju gotovo nikakvu praktičnu primenu, može se zaključiti da se toplotni fluks može povećavati povećanjem učestalosti struje izvora energije i povećanjem magnetskog fluksa. Već prema tome na koji se od ta dva načina postiže toplotni učinak i kakve su učestalosti struje kojom se napajaju, uređaji za indukciono zagrevanje dele se na nisko-, srednjo- i visokofrekventne.

Indukcioni namotaji (induktori) niskofrekventnih uređaja za indukciono zagrevanje obično se napajaju energijom izravno iz mreže, pa rade sa mrežnom učestalosti od 50 Hz ili 60 Hz i zbog toga često se nazivaju još i mrežnofrekventnim. Zbog toga im magnetni fluks mora imati vrlo velike vrednosti, što zahteva da se vodi kroz feromagnetski materijal, pa ti uređaji nužno sadrže magnetno jezgro. To ima za posledicu da se izrazi kao što su niskofrekventne, kanalne (žlebne), induksijske peći sa magnetnim jezgrom često upotrebljavaju bez diskriminacije, kao sinonimi. Ponekad se te peći napajaju i strujom niže učestalosti od mrežne posredstvom pretvarača učestalosti.

Induktori srednjo- i visokofrekventnih (VF) uređaja za indukciono zagrevanje priključeni su na mrežu posredstvom pretvarača (v. sl. 12) koji ih onda napajaju strujom srednje učestalosti (obično između 400 Hz i 10 kHz), odnosno visoke učestalosti (iznad 10 kHz).

Za rad VF-uređaja za zagrevanje iznad 10 kHz bilo induktivno bilo dielektričnim gubicima, u industriji, medicini i drugde propisane su frekvencije dane u tabl. 3. (Suzbijanje radio-smetnji od aparata i postrojenja koji zrače energiju visoke frekvencije — JUS - N. NO. 901. - VII - 1963.) Propis se osniva na otklanjanju smetnji svim vrstama elektrokomunikacija (v. *Telekomunikacije*). Unutar propisanog područja učestalosti ne postoje nikakva ograničenja u pogledu napona na vodovima i jačine ome-

tajućeg polja. Ipak se prilikom merenja na serijskim uređajima dozvoljava samo 70% odstupanja, kako bi se stvorio sigurnosni pojas od najmanje 15% sa svake strane.

Za pretvarače niskofrekventnih uređaja za indukciono zagrevanje upotrebljavaju se motogeneratori, a za pretvarače visokofrekventnih, elektronički generatori. U VF-uredajima za indukciono zagrevanje magnetno jezgro je nepotrebno, u njemu bi nastajali veliki gubici jer bi toplotni fluks u jezgru bio veći nego u šarži. Zbog toga su gotovo svi ti uređaji tiganjskog tipa.

Tablica 3

PROPISE FREKVENCije ZA RAD INDUKCIJONIH ELEKTROTERMIIJSKIH UREĐAJA ZA INDUSTRIJESKE, MEDICINSKE I DRUGE SVRHE

Nazivna frekvencija MHz	Opseg MHz
13,560 ± 0,05 %	13,55322...13,56678
27,120 ± 0,6 %	26,95728...27,28272
40,680 ± 0,05 %	40,66...40,70
433,92 ± 0,2 %*	433,05...434,79
2 450 ± 50 MHz	2 400...2 500
5 800 ± 75 MHz	5 725...5 875
22 125 ± 125 MHz	22 000...22 250

* Prema VDE propisima ograničeno samo na Nemačku, Jugoslaviju, Austriju, Portugaliju i Švajcarsku

Prenošenje energije u procesu indukcionog zagrevanja promatrano u celosti razlikuje se, međutim, od prenošenja energije pri direktnom zagrevanju električnim otporom time što je, namesto samo sa transformacijom električne energije u toplotu, skopčano još sa dve transformacije koje tome prethode: transformacijom električne u elektromagnetsku energiju i zatim elektromagnetske energije opet u električnu. Višestruka transformacija energije zapravo je najbitnija karakteristika indukcionog zagrevanja. Prema predodžbama te transformacije kao prenošenja energije elektromagnetskim valovima, apsorpcija te energije u telu koje se greje zavisi i od svojstava materijala tela (njegove specifične električne otpornosti ρ i magnetnog permeabilитета μ) i od učestalosti f struje u induktoru. Za meru te apsorpcije uzima se tzv. faktor apsorpcije β koji sledi iz Maxwellovih jednačina. Uopšte je apsorpcija energije pri električnoj indukciji neka kvadratna funkcija tog faktora. Ona je usled skin-efekta najizrazitija u tankim površinskim slojevima. Debljina tih slojeva od velike je važnosti za procese indukcionog grejanja. Za njenu meru uzima se tzv. dubina prodiranja, određena izrazom

$$\delta = \frac{1}{\beta} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}},$$

gdje je μ_r relativni magnetni permeabilitet materijala grejanog objekta.

Računom se dobija da je δ dubina na kojoj je apsorpcija energije u materijalu tela koje se greje nastupila već do te mere da je jakost indukcionog polja opala na vrednost od $100\% - e^{-\delta/\lambda} = 36,8\%$ od njene vrednosti na površini tela. Takođe se može izračunati da se u sloju debljine δ gotovo 90% električne energije pretvara u toplotu.

Prema tome lako se može izvesti zaključak da je dubina prodiranja to manja, tj. površinski efekt indukcionog grejanja to izrazitiji, što je učestalost struje veća. Zbog toga su srednjo- i visokofrekventni uređaji za indukciono grejanje vrlo prikladni za postupke površinske termičke obrade.

Za indukciono grejanje važan je dakako i stepen η_e korisnog električnog dejstva, tj. odnos električne snage induktora i snage

kojom se zagревa objekt u obradi. Za jedan od najvažnijih slučajeva, kad objekt ima cilindrični oblik, a δ je malo u poređenju sa prečnikom tog cilindra, uz pretpostavku da između relativnih magnetnih permeabilитета μ_1 i μ_2 , materijala induktora i grejanog tela vrla odnos $\mu_{1r} = \mu_{2r} = 1$ (npr. kad je induktor od bakra, a šarža čelik sa temperaturom iznad Curieove), iz kvocijenta tih snaga može se izvesti izraz

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \frac{D \cdot H}{d \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}},$$

gde su ρ_1 i ρ_2 specifične električne otpornosti materijala induktora odnosno šarže, a ostali simboli imaju značenje prikazano na sl. 13. Očigledno bi η_e postigao maksimalnu vrednost $\eta_{e\max}$ u idealnom slučaju kad bi šarža u potpunosti ispunjala prostor unutar cilindra sa prečnikom D i visinom H , tj. kad bi bilo $d = D$, $h = H$, pa bi onda bilo

$$\eta_{e\max} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}}.$$

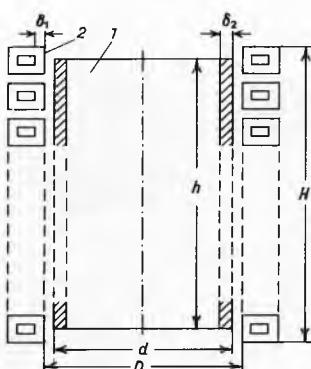
Uprkos tome što se netom navedeni uslov ne može ostvariti u praksi, pa su uticanjem na odnos dimenzije šarže i induktora ovde stvarno dosizive vrednosti maksimuma stepena korisnog električnog dejstva uvek manje od $\eta_{e\max}$, iz tog izraza može se izvući važan zaključak da one ni u najgorem slučaju, tj. kad bi bilo $\rho_1 = \rho_2$, ne mogu biti manje od $\sim 0,5$ i da su to veće što je električna otpornost materijala grejanog objekta veća od električne otpornosti materijala induktora. Kako je obično $\rho_2 > \rho_1$, to i stepen korisnog električnog dejstva uređaja za indukciono zagrevanje u celosti dosiže srazmerno veoma visoke vrednosti.

Tako se npr. u jednoj tiganjskoj, srednjofrekventnoj peći za topjenje čelika, koja ima snagu od 600 kW, za dobijanje korisne toplote troši 65% od toga (7% troši se u pretvaraču učestalosti, 3% u kondenzatorima za popravku faktora snage i priključnim vodovima, 18% u induktoru, a 7% za proizvodnju toplote koja se gubi zračenjem i konvekcijom).

Preimicstva i nedostaci indukcionog zagrevanja. Prema ranije rečenom može se zaključiti da tri transformacije energije pri indukcionom zagrevanju same po sebi nisu toliko velik nedostatak koliko bi se na prvi pogled moglo očekivati. S druge strane taj način zagrevanja ima u poređenju sa postupcima zagrevanja električnim otporom određena preimicstva, koja ga u nekim slučajevima čine i najpovoljnijim. Tako je u postupcima direktnog grejanja predmet koji se greje izvor topline, te se primenom tog zagrevanja izbegnu gubici topline prilikom prenošenja, a pošto je takvo zagrevanje beskontaktno, njegova primena za topjenje metala je jednostavna. Osim toga mogućnost da se pri takvom grejanju nastajanje toplotnog fluksa koncentriše u slojeve tačno određene debljine čine taj postupak u nekim slučajevima (npr. u površinskoj termičkoj obradi) jedinstvenim među ostalim postupcima zagrevanja. Tim postupkom se mogu postići vrlo velike specifične snage zagrevanja (i do 150 MW/m^2), može se omogućiti konstrukcija uređaja sa vrlo malo termičke tromosti i skratiti vreme zagrevanja na minimum, te time svesti gubitak topline na veoma malu meru. U preimicstva indukcionog zagrevanja ubraja se još i to što omogućava konstrukciju uređaja sa inertnom atmosferom, pa i za rad u vakuumu.

Primena i uređaji indukcionog zagrevanja. Najvažnije područje primene indukcionog zagrevanja jest topjenje metala. Uz već principijelno opisane procese u indukcionim pećima značajni su i indukcioni postupci lemljenja i zavarivanja (v. *Zavarivanje i lemljenje*). Osim toga važni su i postupci indukcionog zagrevanja bez promene agregatnog stanja grejanog objekta, a takođe i postupci indirektnog indukcionog grejanja. U te bi se postupke sa izvesnim opravdanjem mogli ubrojiti i oni postupci zagrevanja plazmom u kojima se ona proizvodi indukcionim zagrevanjem. No, zbog mnogih specifičnosti postupci zagrevanja plazmom obično se izdvajaju kao posebno područje (v. dalje).

Toplenje metala direktnim indukcionim zagrevanjem. Već prema tome za koju svrhu služi, to se toplenje izvodi kanalnim ili tiganjskim pećima.



Sl. 13. Dimenzije peći za indukciono zagrevanje cilindričnog tela (šarže) uz malu dubinu prodiranja. 1 Cilindar, 2 zavoj induktora, δ_1 debljina aktivnog dela induktora, δ_2 dubina prodiranja

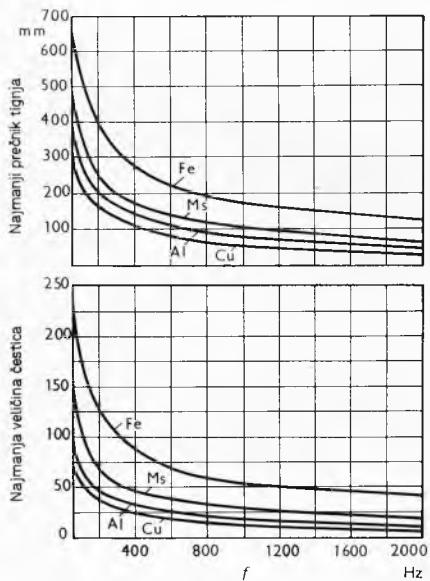
Zbog toga što njihov kanal mora okružavati magnetno jezgro, konstrukcija je *kanalnih indukcionih peći* komplikovana. Pri puštanju u rad moraju se napuniti rastopom. U stalnom pogonu to se rešava time što se šarže ne odlivaju do kraja. Po isključenju iz pogona u njihovim kanalima ne sme zaostajati materijal, jer bi to moglo imati za posledicu oštećivanje kako pri skrtnjavanju rastopa tako i pri ponovnom puštanju u rad usled tada neizbežnog lokalnog pregrevanja. Zbog složnosti tog dela peći njezini su popravci srazmerno vrlo skupi.

Najnepovoljnije u pogonu tih peći dejstvuje induktivni otpor metala u kanalu, smanjujući faktor snage to više što je specifična električna otpornost materijala koji se preraduje manja. Sem toga, toplotna izolacija kanala, koja ne može biti tanja od 80...100 mm, srazmerno mnogo prostorno odvaja sekundarni od primarnog strujnog kola, pa te peći rade u poređenju sa transformatorom sa srazmerno malim stepenom korisnog dejstva. Međutim, ti nepovoljni faktori radnog režima indukcionih peći dadu se srazmerno jeftino kompenzovati paralelno priključenim kondenzatorima. Time, i drugim merama, dadu se postići iznenađujući veliki toplotni stepeni dejstva peći. (Kao i u ranije prikazanom primeru i u tim pećima oko dve trećine utrošene energije dadu se pretvoriti u toplotu.)

Značajno preim秉tvo tih peći u poređenju sa drugima koje se upotrebljavaju za jednake svrhe jest što je u njima površina šarže njen najhladnije mesto. Preim秉tvo mrežofrekventnih kanalnih peći u poređenju sa tiganjskim indukcionim pećima jest što za njihov pogon nisu potrebni pretvarači učestalosti i što su faktori snage povoljniji.

Kanalne indukcione peći najviše se upotrebljavaju za pretapanja i održavanje u vrućem stanju rastopa u proizvodnji kvalitetnih pod pritiskom livenih legura, mjeđi, bakra, cinka i hroma. Takve velike peći (sa kapacitetom do 25 t) prikladne su i za livenje sivog liva i aluminijuma (v. Peći za livenje i topljenje, TE 1, str. 233, 234, u članku *Aluminijum*) u sprezi sa automatskim uređajima za doziranje.

Za topljenje metala indukcionim zagrevanjem u *tiganjskim indukcionim pećima* posebno je važna primerenost dubine prodiranja debljini sloja u kojem se generira korisna snaga. Za to je



Sl. 14. Zavisnost minimalnog prečnika tignja i minimalne veličine čestica šarže indukcione peći za topljenje metala od učestalosti f struje u induktoru

merodavna dimenzija prečnik tignja. Iz navedenih formula za debljinu prodiranja i stepen korisnog dejstva lako se može zaključiti da se najveće iskorištenje pri obradi određenog materijala indukcionim grejanjem strujem određene učestalosti postiže samo ako taj prečnik nije manji od izvesne vrednosti, tzv. minimalnog prečnika tignja. Očigledno se taj važni uslov može prikazati kao funkcija navedene učestalosti. Nekoliko kriva koje predstavljaju

te funkcije za različite materijale šarže prikazano je na sl. 14. Kako se, s druge strane, proporcije zapremine i minimalnog prečnika tignja a time i proporcije veličine šarže i tog prečnika uvek nalaze u manje ili više uskim granicama, iz tih se kriva takođe lako može zaključiti da za topljenje metala u tiganjskim indukcionim pećima u tehničkom merilu dolaze u obzir manje ili više samo njihove srednjofrekventne izvedbe. (Što je šarža manja, to učestalost struje kojom se napaja induktor tiganjske peći za topljenje metala mora biti veća. Zadovoljavajući taj zahtev obično se moraju primeniti visokofrekventne indukcione peći — sa frekvencijama iznad 10 kHz — pri smanjivanju kapaciteta na ispod ~ 30 kg u jednoj šarži.)

Jedno od najvažnijih preim秉tava tih peći u poređenju sa kanalnim jest da one (pod uslovom da dimenzije čestica šarže nisu manje od izvesnih minimalnih) ne zahtevaju punjenje rastopom pri puštanju u rad. Naime, kao što je toplotni učinak indukcionog grejanja šarže iz jednog komada zavisan od njenih dimenzija, tako je u tom slučaju on zavisan od toplotnog učinka u pojedinim česticama, a to zahteva primerenost njihovih dimenzija dubini prodiranja, odnosno učestalosti struje u induktoru. Zbog toga se i taj, ovde važan, uslov može predstaviti kao funkcija te učestalosti. Krive koje predstavljaju te funkcije za neki određeni materijal šarže prikazane su takođe na sl. 14. Tu se vidi da što je navedena učestalost veća, to čestice šarže smeju biti manje.

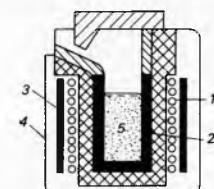
Zbog velikih gubitaka na magnetisanje i velikog rasipanja između primarnog i sekundarnog kola faktor snage tih peći još je niži nego kanalnih indukcionih peći, pa one zahtevaju još efikasniju kompenzaciju kondenzatorima, posebno kad se radi o topljenju metala sa vrlo malom specifičnom električnom otpornošću (npr. bakra, srebra, bronce). Kada ta kompenzacija postaje odviše skupa pribegava se postupcima topljenja indirektnim zagrevanjem.

Najviše se te peći upotrebljavaju za pretapanje i legiranje u proizvodnji visokolegiranih čelika, legiranog sivog liva, tvrdog liva, bronce, nikla i plemenitih metala.

Indukciono zagrevanje bez promene agregatnog stanja grejanog objekta. Uz već spomenuto primenu u površinskoj termičkoj obradi (v. *Površinska obrada metala*), u toj skupini postupaka indukcionog zagrevanja nalaze se i neki postupci zagrevanja materijala kao što su metalni trupci, šipke, cevi u procesima preoblikovanja vrućom plastičnom deformacijom. Najvažnije preim秉tvo indukcionog zagrevanja jest što pruža mogućnost potpune automatizacije čitavog procesa preoblikovanja. Zbog toga se automati za izvođenje tih operacija sve više izrađuju sa ugrađenim uređajima za indukciono zagrevanje (v. *Plastična obrada metala*).

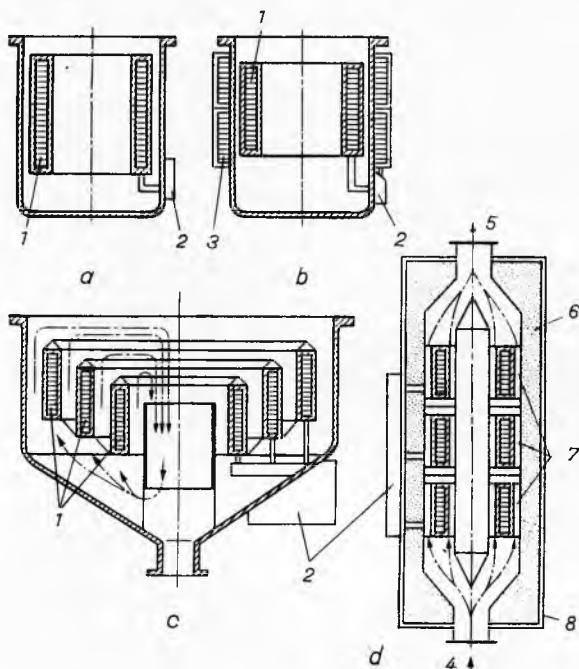
Indirektno indukciono zagrevanje neprovodnika posredstvom zidova aparata primenjuje se u nekim indukcionim pećima, u aparatima za preradu plastičnih masa za grejanje sapnica za izvlačenje i ubrizgavanje (v. *Plastične mase*), u aparatima i instalacijama u kojima se greju tečnosti, pa i gasovi (npr. u rezervoarima, autoklavima, isparivačima, aparatima za destilaciju, cevima). Uronjeni elementi za taj način zagrevanja upotrebljavaju se za grejanje tečnosti i gasova sami ili u kombinaciji sa uređajima za zagrevanje posredstvom zidova.

Peći za indirektno indukciono grejanje slične su već opisanim tiganjskim pećima za topljenje metala, samo što su još snabdevene i posudama od provodnika. Princip izvedbe jedne takve peći prikazan je na sl. 15. Ovde je tiganj od grafita ugrađen u vatrostalnu oblogu peći. S obzirom na to da je specifična električna otpornost materijala tignja ovde srazmerno velika, srazmerno je velik i stepen korisnog dejstva peći, dakako, pod uslovom da je, kao i u ostalim slučajevima indukcionog grejanja, dubina prodiranja primerena debljini grejanog sloja, što je ovde debljina zidova tignja. Zbog toga su takve peći obično visokofrekventne.



Sl. 15. Prikaz principa indukcione peći za indirektno zagrevanje, 1 Induktor, 2 grafitni tiganj, 3 magnetski ekran, 4 vanjski omotač, 5 šarža

Upotrebljavaju se ne samo za topljenje metala u već spomenutim slučajevima, nego i za topljenje neprovodnika. Stepen korisnog dejstva poboljšava im se i ugradnjom magnētnog ekrana za smanjenje rasipanja.



Sl. 16. Neki principi indirektnog indukcionog zagrevanja posredstvom uronjenih grejača i zidova aparata. 1. Uronjeni grejači, 2. priključne kutije, 3. vanjski namot, 4. ulaz i 5. izlaz pare, 6. toplotna izolacija, 7. limene vodilice, 8. vanjski omotač

Nekoliko principa indirektnog indukcionog zagrevanja tečnosti i para posredstvom uronjenih grejača i zidova različitih aparata shematski je prikazano na sl. 16.

ZAGREVANJE DIELEKTRIČNIM GUBICIMA

Pod zagrevanjem dielektričnim gubicima razumeva se zagrevanje dielektrika u naizmeničnom električnom polju toplotom koja pri tome nastaje u njima konverzijom apsorbovane elektromagnete energije (dielektrični gubitak). Procesi te apsorpcije i konverzije isti su kao u električnoj izolaciji. Oni, npr., pri prenošenju električne energije dejstvuju štetno, pa je odatle i potekao naziv dielektrični gubici (v. Polarizacija i ponašanje nevodiča u izmjeničnom električnom polju i Dielektrični gubici u članku Elektrotehnički materijali, str. 73 i 74).

Budući da u procesima takvog zagrevanja dielektrični gubici uopšte nisu gubici, već, naprotiv, korisna energija, naziv zagrevanje dielektričnim gubicima, iako uobičajan, nije sasvim prikladan. Zbog toga se u literaturi susreću i drugi nazivi za to zagrevanje kao što su zagrevanje elektromagnetskim talasima (zato što se pri tome energija prenosi elektromagnetskim talasima), elektroničko zagrevanje (zato što se pri tome upotrebljavaju elektronički uredaji) i drugi.

Osnovne karakteristike zagrevanja dielektričnim gubicima. Specifična toplotna snaga tog načina zagrevanja već je definisana kao specifični gubitak snage p_R (gubitak u jediničnom volumenu dielektrika). Upotrebljeni izraz lako se može transformisati u ovaj oblik:

$$p_R = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{U}{d}\right)^2 \tan \delta,$$

gde je ϵ_r relativna dielektričnost materijala grejanog tela, ϵ_0 električka konstanta (vakuma), U napon, a d razmak između elektroda. Kako je $\epsilon_r \tan \delta$ (efektivni faktor gubitaka) karakteristika materijala, a ϵ_0 konstanta, iz tog izraza može se zaključiti da pri zagrevanju određenog tela dielektričnim gubicima toplotni fluks koji nastaje zavisi samo od jačine i učestalosti dejstvujućeg polja, pa da se intenzitet zagrevanja dade regulisati podešavanjem tih dvaju faktora. Tamo gde je tome svrha povećavanje intenziteta

grejanja, moglo bi se to izvesti povećanjem ili jačine polja E ili učestalosti f , ili povećanjem obe te veličine zajedno. Međutim, kako jačina polja ne sme biti iznad vrednosti koje još osiguravaju od proboga i time oštećenja ili uništenja grejanog tela, maksimalne vrednosti jačine dejstvujućih polja pri takvom zagrevanju iznose od 100 do 200 kV/m, već prema tome kakva su svojstva (kao što su npr. porozitet, vlažnost) materijala tela koje treba grejati i do koje ih temperature treba zagrevati.

Izravna posledica tog ograničenja, dakako, jest ograničenje specifične snage uređaja za takvo grejanje, ali ni to još ne bi ogranicavalo njihovu specifičnu toplotnu snagu kad bi se učestalost mogla birati po volji. Međutim, i tu je izbor ograničen. Prvo, to je zbog toga što povećanje učestalosti dejstvujućeg polja iznad izvesne granice nije moguće iz prostog razloga što za to još nemaju potrebnih uređaja. Osim toga, to može biti ograničeno i drugim faktorima, kao što su dopušten rad samo unutar određenih pojaseva učestalosti, te zahtevi grejanja u pojedinim slučajevima.

Naime, kao i u drugim slučajevima zagrevanja uz prenošenje energije elektromagnetskim talasima, i ovde generisani toplotni fluks opada eksponencijalno sa dubinom, računatom od površine grejanih tela i sa dužinom tih talasa, odnosno učestalosti dejstvujućeg polja, pa od tih veličina i ovde zavisi da li će se toplotni fluks koncentrisati u površinskim slojevima ili će se ravnomerne generisati na većim dubinama. Mera za to je već opisana dubina prodiranja. Jedan od izraza koji se primenjuju za izračunavanje dubine prodiranja b pri tom grejanju jest:

$$b = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \tan \delta}},$$

gde je λ_0 dužina talasa polja, kad se ono nalazi u vakuumu, a ϵ_r relativna dielektričnost materijala grejanog tela. Odatle sledi da je za jednolično zagrevanje tela, tj. veću dubinu, potrebno birati veće vrednosti λ_0 , tj. manje učestalosti dejstvujućeg polja. Budući da je taj zahtev u suprotnosti sa opisanim merama za postizanje snage zagrevanja dielektričnim gubicima, obično u takvim slučajevima treba pristupiti kompromisnim rešenjima.

Zanemarujući gubitke u okolini za vreme zagrevanja na taj način, lako se može izvesti izraz za trajanje zagrevanja

$$t = \frac{cd\Delta\theta}{p_R},$$

gde je c specifična toplota, d gustoća grejanog tela, $\Delta\theta$ razlika temperatura za koju ga treba zagrijati, a p_R uložena specifična snaga.

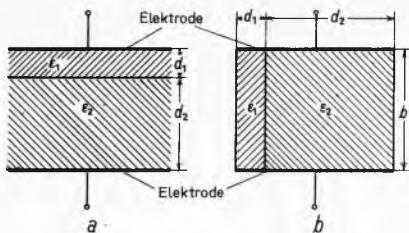
Podela zagrevanja dielektričnim gubicima. Zbog razlika izvođenja tog zagrevanja u praksi pri nižim i višim učestalostima dejstvujućeg polja, zagrevanje dielektričnim gubicima običava se deliti na zagrevanje visokim učestalostima ispod 50 MHz i na zagrevanje mikrotalasima, iznad 500 MHz (v. tabl. 3). Prvo se običava nazivati zagrevanje u visokofrekventnom električnom polju, a drugo, zagrevanje u mikrotalasnem električnom polju. Prema međunarodnoj raspodeli radio-frekvencija (v. Elektronika, uredaji, radio-veze, TE 4, str. 645, 646), pod prvim treba razumevati zagrevanje u električnim poljima s učestalostima VF 3...30 MHz, tj. sa dekameterskim talasima i VVF 30...3000 MHz tj. sa metarskim talasima, a pod drugim UVF 300...3000 MHz, tj. sa decimetarskim talasima i SVF 3...30 GHz, tj. sa santimetarskim talasima.

Zagrevanje dielektričnim gubicima u visokofrekventnom električnom polju. U principu se ni praktično izvođenje tog zagrevanja ne razlikuje od zagrevanja električnog izolatora dielektričnim gubicima, ako se sistem provodnika, izolatora i okoline promatra kao kondenzator. Razlika između ta dva slučaja samo je u tome što je, kako je prikazano na sl. 17, radni deo uređaja za zagrevanje na taj način pravi kondenzator sa elektrodama, kojemu je dielektrik grejano telo. Zbog toga se taj način zagrevanja često naziva i kondenzatorskim, ili kapacitivnim.

Kad se u tim kondenzatorima izvodi kontinualno zagrevanje ili zagrevanje radi sušenja, između njihovih elektroda i površine grejanog tela mora postojati izvesni zazor. Taj ne sme biti manji

od 10 mm, a električno polje u njemu ne jače od 300...500 kV/m, a ako se tu razvijaju vodene pare, ne jače od 100...150 kV/m.

Dakako, pri tom zagrevanju nije svejedno, da li je telo koje se greje dielektrički homogeno ili, kao što je to u praksi gotovo redovito, nehomogeno. U slučaju nehomogenosti na raspored toplotnog fluksa u njemu dejstvuju još i drugi faktori, pa predviđanje toplotnog režima grejanja postaje veoma komplikovano.



Sl. 17. Zagrevanje dvoslojnog dielektrika u VF električnom polju: a smer polja normalan, b paralelan sa graničnim plohama između različitih dielektrika

Tada se mora računati sa srednjom vrednošću ϵ_s dielektričnosti materijala grejanog tela, toplotnom snagom i dejstvujućim električnim poljem u pojedinim njegovim zonama koje se mogu smatrati dielektrički homogenim. Tako se, npr., pri zagrevanju dielektričnim gubicima tela od slojevitih materijala razlikuje slučaj kad se greje u polju smera normalnog na granične površine slojeva i kad je on njima paralelan. U najnedostavnjem takvom primeru, kad je, kao na sl. 17, grejano telo dvoslojno, može se za odnos dejstvujućih polja E_1 i E_2 u slojevima u prvom slučaju (sl. 17 a) izvesti izraz

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1},$$

gde su ϵ_1 i ϵ_2 odgovarajuće relativne dielektričnosti materijala slojeva, a u drugom (sl. 17 b) je očigledno

$$E_1 = E_2 = E.$$

Prema tome može se zaključiti da je grejanje slojeva nejednolично. (Specifična snaga je veća u slojevima sa većim efektivnim faktorom gubitaka.)

U uređajima za zagrevanje dielektričnim gubicima u visokofrekventnom električnom polju kolo radnih delova uključeno je u oscilatorno kolo koaksijalnim kabelom preko podesivog induktivnog spoja. Generatori visoke učestalosti u oscilatornom kolu normalno su cevni (elektronke, v. Aktivni elektronički sastavni dijelovi, TE 4, str. 460, u članku *Elektronika, sastavni dijelovi*). Prilagodavanje režima rada generatora kapacitetu grejanog tela promenama induktivnosti izvodi se ručno, a u većim se uređajima i automatski regulira.

U poređenju sa postupcima zagrevanja opisanim u prethodnim poglavljima, preim秉tva tog načina zagrevanja jesu minimalni gubici toplote, koncentracija zagrevanja u određeni sloj prilagođavanjem razmeštaja i oblika elektroda obliku grejanog tela, jednostavnina i zgodna regulacija i automatizacija, trenutno stapanje u dejstvo i prekid rada. Time se izbegava pregrevanje koje inače lako nastaje usled velikog temperaturnog gradijenta pri zagrevanju kroz spoljnu površinu, jer su materijali tela o kojima se tu radi ujedno i loši provodnici topline.

Zbog tih preim秉tava zagrevanje dielektričnim gubicima u visokofrekventnom električnom polju upotrebljava se u nizu industrija, npr. tekstilnoj (za sušenje sintetskih vlakana), prehrabbenoj (npr. za dehidrataciju, sterilizaciju, odleđivanje hrane), topionicama (za sušenje jezgara i kalupa), proizvodnji stakla i zalivanju metala u staklo, preradi plastičnih masa (za predgrevanje pri oblikovanju, za zavarivanje) i gume (pri vulkanizaciji), drva (za sušenje, lepljenje i u izradi šperploča i iverica) i u medicini (za terapiju i za sterilizaciju predmeta od nemetalra).

Zagrevanje dielektričnim gubicima u mikrotalasnom polju zasniva se na okolnosti da se energija može privoditi telima od dielektrika i mikrotalasima koje zrači neki antenski sistem, ili u rezonantnim prostorima (šupljinama). Zbog velike učestalosti mikro-

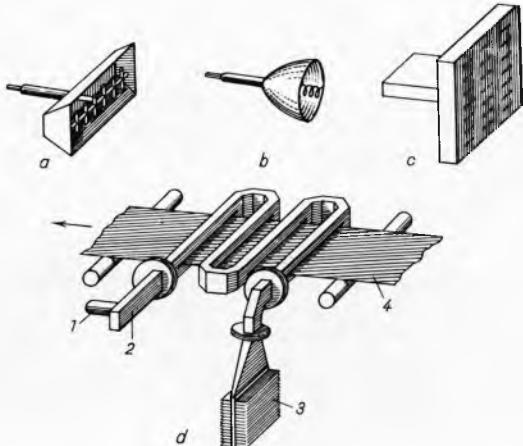
talasnog polja pri tome se i uz njegove male jačine mogu u grejanim telima postići visoki stepeni konverzije energije, čak i onda kad su ona od dielektrika sa srazmerno malim faktorom gubitaka (kao što su npr. staklo, oksidi, plastične mase). Konstrukciju uređaja za taj način grejanja olakšava okolnost što metali gotovo potpuno reflektiraju mikrotalase.

Zbog toga što je učestalost polja pri tom grejanju najčešće oko 2450 MHz (v. tabl. 3), generatori napona visoke učestalosti u zato potrebnim uređajima obično su magnetroni (v. Magnetron, TE 4, str. 465, u članku *Elektronika, sastavni dijelovi* i TE 4, str. 575 u članku *Elektronika, sklopovi za mikrovalnu tehniku*).

Radni deo tih uređaja može biti nekim koaksijalnim kabelom sa magnetronom spojeni talasovod (v. Valovodi, TE 4, str. 232 i 263, u članku *Električni vodovi* i TE 4, str. 570...574, u članku *Elektronika, sklopovi za mikrovalnu tehniku*), ili rezonator (v. Mikrovalni rezonator, TE 4, str. 575, takođe u poslednjem članku) ili mikrotalasni radijator (v. Reflektor-antena, TE 4, str. 614, u članku *Elektronika, uređaji. Antene*). S obzirom na dejstvujuće polje u tim delovima, zagrevanja na taj način se dele na zagrevanje poljem sa putujućim talasom, sa stojećim talasima i sa usmerenim progresivnim talasima (pomoću radijatora).

Zbog toga što se pri tom načinu zagrevanja energija prenosi istim talasima kojima se služi i radarska tehnika i što se za njeg upotrebljavaju isti elektronički uređaji, često se o zagrevanju dielektričnim gubicima u mikrotalasnem polju govori kao o radarskom zagrevanju.

Mikrotalasno zagrevanje poljem sa putujućim talasom može se izvoditi u talasovodima ma kakvog preseka, ali najzgodnije u talasovodima sa pravougaonim preseccima. Naime, talasovodi pravougaonog preseka dopuštaju da se na njihovim bokovima izrade procepi kroz koje se mogu kontinualno provlačiti uzane trake. To omogućava izradu za mikrotalasno zagrevanje izvesnih materijala u talasovodima presavijenim na način prikazan na sl. 18, u kojima grejano telo više puta prolazi kroz dejstvujuće polje, tako da se može postići gotovo potpuna apsorpcija elektromagnete energije. Zbog toga se takvi uređaji uspešno upotrebljavaju, npr., za sušenje lepka na etiketama, premaza, tekstilnih traka, papira i plastičnih masa. Pri tome se postižu stepeni korisnog dejstva i do 80%.



Sl. 18. Zagrevanje mikrotalasovima: a dipolni radijator sa reflektorom, b spiralni radijator sa paraboličnim reflektorom, c radijator s otvorima, d sistem za jednolično zagrevanje folije. 1 Priklučak za magnetron, 2 šupljni talasovod (rezonator) sa prezimima za prolaz trake, 3 zaključni otpor, 4 traka koja se greje

Da bi se sprečila refleksija neapsorbovanih talasa od kraja talasovoda, posebno pri promenljivim uslovima sušenja i za vreme praznog hoda, i time vraćanje energije u magnetron, koje bi tamo moglo uzrokovati oštećenja, ti krajevi moraju biti provideni nekim zaključnim otporom, npr. za apsorpciju u tečnoj vodi.

Mikrotalasno zagrevanje poljem sa stojećim talasima primenjuje se za zagrevanje hrane (v. Kuhanje s pomoću elektromagnetičkih valova, TE 4, str. 93 u članku *Električni kućanski strojevi*). Oblikom se pećnice za tu svrhu gotovo ne razlikuju od drugih pećница za pripremanje hrane. Međutim, da bi njihov radni pro-

stor mogao dejstvovati kao rezonator u kojem nastaju talasi rezonantne učestalosti prikladne za određenu svrhu, njegove dimenzije moraju biti dobro uskladene (v. već spomenuti Mikrovalni rezonator u članku *Elektronika, sklopori za mikrovalnu tehniku*), a njegovi zidovi od materijala koji dobro reflektira te talase (npr. čelika).

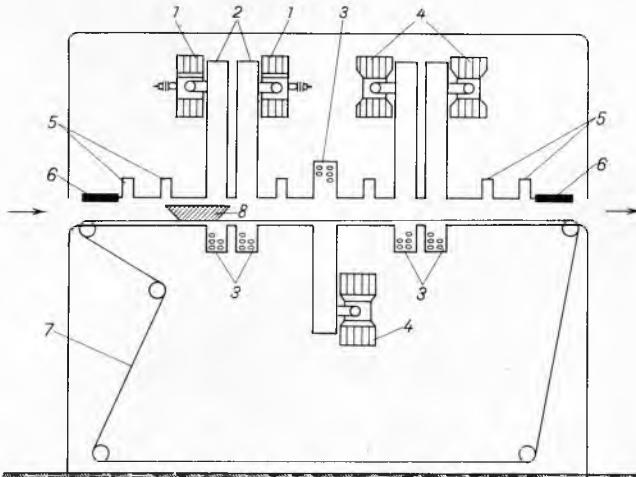
Pored primene u domaćinskim aparatom za pripremanje hrane, taj način zagrevanja upotrebljava se i za stvarnjavanje poliuretanske pene, predgrevanje gume pri vulkanizaciji, sušenje gipsanih odlivaka itd. Zanimljiv je i postupak zagrevanja keramike na taj način. U uredajima za to sa magnetronima snage svega 200 W može se zagrevati masa keramike od 5 g do 2000 K uz brzinu rasta temperature od 50 K/s.

Kao i sva ostala elektromagnetna zračenja, i mikrotalasno polje može se usmeriti prikladnim reflektorima. Za ravnomerno

zagrevanje na taj način usmjerjenim poljem prikladni su paraboloidni *radijatori* sa mikrotalasnom antenom smeštenom u njihovom geometrijskom fokusu, kako je shematski prikazano na sl. 19, jer oni gotovo ravnomerno ozračuju površinu prikazanu dužinom *AB*.

Preim秉stvo tog načina zagrevanja u poređenju sa ostalim načinima mikrotalasnog zagrevanja jest što za to nisu potrebni zatvoreni prostori, pa se vrlo lako dade kontinualizovati i automatizovati. Ta odlika mikrotalasnog zagrevanja pomoću radijatora čini se posebno zanimljivim za odmrzavanje i zagrevanje pretprirednih i zamrznutih jela, kojega važnost naglo raste zbog sve većih potreba, npr. u automatskim restoranima i restoranima sa samoposluživanjem, u mobilnim kuhinjama i u avionima, brodovima, vagon-restoranima.

Jedan kontinualni uredaj za takvo zagrevanje shematski je prikazan na sl. 20. Od njegovih pet radijatora četiri zagrevaju



Sl. 20. Princip rada uređaja za zagrevanje jela usmerenim mikrotalasnim poljem sa pet radijatora (magnetrona). 1) Magnetron ($f = 2,45 \text{ GHz}$, $N = 4 \text{ kW}$), 2) parabolični radijatori, 3) voda kao zaključni otpor, 4) magnetron ($f = 2,45 \text{ GHz}$, $N = 2 \text{ kW}$), 5) zaporni filter $1/4$, 6) prigušni filter, 7) transportna traka, 8) posuda sa jelom

jela na beskonačnoj traci odozgo, a jedan odozdo. I ovde je potrebno na kraju radijatora apsorbovati za grejanje neiskorišćene talase. Za tu svrhu služi voda. Takode je, zbog zaštite od izražavanja iz radnog prostora u okolinu, u tim uredajima potrebno apsorbovati raspršene talase. To se izvodi pomoću različitih filtera. Uredajima takve vrste sa magnetronima snage od po 2 kW moguće je zagrevati 200 obroka na čas od -18°C na $+75^{\circ}\text{C}$. Postoje i konstrukcije sa magnetronima od 5 kW.

ZAGREVANJE SLOBODNIM ELEKTRONIMA I JONIMA

Elektroni, joni i druge nanelektrisane čestice mogu se ubrzati u električnim, promenljivim magnetnim ili elektromagnetskim poljima, te tada njima bombardovati objekte. One većinu energije (u kinetičkom obliku) predaju objektu u obliku topline. Te čestice mogu nastati ionizacijom gasa u električnom polju, termoelektronskom emisijom iz užarenih provodnika ili ionizacijom gasa na visokim temperaturama. Od niza mogućnosti u praksi se primenjuje zagrevanje električnim lukom, plazmom ili snopom brzih, usmerenih elektrona.

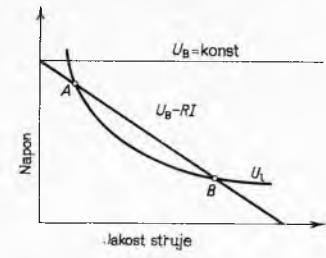
Zagrevanje električnim lukom. U širem smislu pod zagrevanjem električnim lukom razumeva se svako zagrevanje u kojem je električni luk izvor toplote. Kako to sledi iz već rečenog o električnom luku u kolu jednosmerne struje (v. poglavlje Električni luk članka *Električna pražnjenja u plinovima*, TE 3, str. 686), održavanje stalnog radnog režima pri tome čini izvesne teškoće. Te teškoće nastaju zato što je gotovo nemoguće snagom električnog luka (produktom jačine struje i napona luka) proizvedenu toplotu održavati jednakom toploti koja se od njega odvodi, što je uslov za stalno održavanje provodljivosti plazme u stupu luka.

Za razliku od strujno-naponske karakteristike pri zagrevanju električnim otporum, strujno-naponska karakteristika električnog luka (v. sl. 29 b u TE 3, str. 686) jest negativna. Međusobno dejstvo tih dvaju faktora može imati dve različite posledice. Prva od njih je gašenje luka. Ona nastupa pri opadanju temperature luka, kad se on ohladi odvodenjem veće količine toplote iz njega nego što se u njemu proizvodi, a pri tome provodljivost plazme i sa njome jačina struje I luka opadaju uz sve jači rast napona U_L luka, sve dok se ne uspostavi stanje u kojem je $I = 0$, a $U_L = U_P$, gde je U_P napon potreban za paljenje luka. (Odgovara proporcionalnom naponu gasne sredine među elektrodama.) Druga posledica, koja je zbog velike koncentracije snage luka pri grejanju češći slučaj, nastupa pri suprotnim uslovima. Tada provodljivost plazme i sa njome jačina struje luka raste, a napon luka opada, dok konačno ne nastupi stanje kratkog spoja.

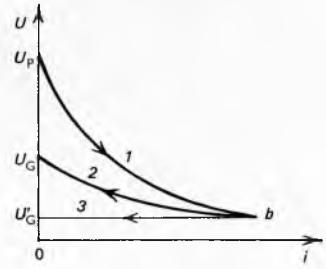
Zbog toga je za svako zagrevanje stabilnim električnim lukom potrebna regulacija njegovog napona. Tamo gde se on napaja jednosmernom strujom iz nekog generatora sa konstantnim naponom U_B , to se postiže pomoću predotpornika sa električnom otpornošću R , uključenog u strujno kolo. Iz linije prikazane na sl. 21, koja predstavlja tu funkciju uz strujno-naponske karakteristike luka i generatora, može se zaključiti da su onda jedina ravnotežna stanja sistema u tačkama *A* i *B*, a može se pokazati da je ta ravnoteža stabilna zapravo samo u tački *B*. U praksi se to ispoljuje time što se pri promenama faktora radnog režima koji uzrokuju ne odviše velika kolebanja stanja oko tačke *B* sistem vraća u to stanje, dok se pri kolebanjima stanja oko tačke *A* ne može vratiti u to stanje.

Savremeni stepen razvoja usmeračkih postrojenja dopušta da se sistemi zagrevanja električnim lukom sa opisanim svojstvima ekonomično primene u praksi samo dotele dok snage aparata za to ne prelaze izvesne granice. Inače, kao što je to npr. kod elektrolučnih peći, koje mogu imati snage i iznad 50 MW, mora se pribeti napajanju luka naizmeničnom strujom.

Svojstva električnog luka samog za sebe, o kojima pri zagrevanju naizmeničnom strujom treba voditi računa, znatno se razlikuju od opisanih, jer tada elektrode ne zadržavaju isti pola-



Sl. 21. Određivanje radne tačke električnog luka. *A* Labilna i *B* stabilna radna tačka



Sl. 22. Dinamička strujno-naponska karakteristika električnog luka. 1) Jačanje struje pri paljenju, 2) slabljenje struje pri gašenju, 3) gašenje uz beskonačno veliku brzinu opadanja struje

ritet, već im se on stalno menja između maksimalno pozitivnog i maksimalno negativnog polariteta. Kako na kraju svake poluperiode tih promena jakost struje mora opasti na nulu, luk se stalno gasi i pali. Strujno-naponske karakteristike takvih lukova imaju jednak tok kao opisane samo ako je učestalost struje luka vrlo mala. Te su karakteristike prikazane na sl. 22. One se, kad ih treba razlikovati od prvih, tada zvanih stacionarnim, nazivaju dinamičkim.

Kako je prikazano, dinamička strujno-naponska karakteristika električnog luka ima dve grane. Prva (I) prikazuje zavisnost napona od struje luka u četvrtperiodi između paljenja luka (pod uticajem napona U_p) i stanja kad je struja luka najjača (stanje pri naponu luka U_L). Međutim, zbog toga što luk ipak ima izvesnu termičku inerciju, slabljenje struje u njemu praćeno je slabijim opadanjem provodljivosti plazme u njegovom stubu nego što bi to sledilo iz statičke karakteristike. To ima za posledicu da je kriva koja ovde prikazuje promenu napona u zavisnosti od jakosti struje luka u četvrtperiodi njenog slabljenja (grana 2 dinamičke strujno-naponske karakteristike) položitija nego u četvrtperiodi njenog jačanja, tako da je pri vrednosti $I = 0$, kad se luk gasi, napon U_L , manji od napona paljenja luka. (Kad bi brzina opadanja struje bila beskonačno velika, luk bi se gasio uz napon U_L , tj. jačina njegove struje opadala bi od maksimuma do nule bez promene napona.)

Promatranjem tih promena napona električnog luka naizmenične struje u jednoj njihovoj poluperiodi u zavisnosti od vremena dobijaju se krive, kao što je prikazano na sl. 23.

Zbog tih njegovih svojstava, stabilizacija električnog luka naizmenične struje radi njegove primene u praksi predstavlja složeniji problem. Kako se može pokazati da se stabilizacija ne može postići kad je induktivna otpornost X u poređenju sa omskom otpornošću R kola zanemarljivo mala i da će prekidi luka tada biti to veći što je iznos napona U_L bliži maksimalnom iznosu U_M napona napajanja luka. Isto tako se može pokazati da je u suprotnom slučaju (kad je R u poređenju sa X zanemarljivo mala) moguće postići neprekidno gorjenje luka pod uslovom $U_L/U_M \leq 0,54$. Stabilizacija električnog luka naizmenične struje pod tim uslovima prihvataljiva je za praksu još i iz razloga što se zbog svojstava luka, usprkos velikog induktiviteta kola, pri tome mogu postići srazmerno veliki faktori snage (do $\cos \varphi = 0,85$). Takođe se može pokazati da je u najopštijem slučaju, kad ni R ni X nisu zanemarljivo mali, ovde moguće postići neprekidno gorjenje električnog luka u uslovima određenim parametrima u području ispod krive na sl. 24.

Iz tih razloga aparati za zagrevanje električnim lukom naizmenične struje napajaju se energijom iz transformatora sa velikom reaktansom i malom omskom otpornošću. Navedene veličine faktora snage koje se mogu postići u takvim sistemima obično zadovoljavaju, ali dolazi u obzir i kompenzacija jalove snage, naročito u sistemima sa velikim instalisanim snagama.

Primena zagrevanja električnim lukom. Za primenu tog zagrevanja najvažnija karakteristika električnog luka jest što omogućava velike koncentracije snage. Tako se njime mogu postići toliko veliki specifični toplotni fluksovi da omogućavaju dosiranje radnih temperatura reda veličine 10^4 K. (Najviše merene tempe-

rature električnog luka nalaze se negde oko 50 000 K. Međutim, u normalnim uslovima gorenja luka retko se dospeva iznad 15 000 K, što je sasvim dovoljno za potrebe gotovo u svim područjima njegove primene, jer se tu uglavnom radi o temperaturama 3 000...11 000 K.)

U primeni zagrevanja električnim lukom obično se razlikuju dva osnovna područja. Jedno je elektrolučno zavarivanje (v. u članku *Zavarivanje*), a drugo elektrolučno zagrevanje. Načelna je razlika zagrevanja u tim područjima što su za elektrolučno zavarivanje potrebne ogromne koncentracije energije (specifične snage i do 10^6 kW/m²), ali dostaju srazmerno male instalisane snage, a za elektrolučno zagrevanje su potrebne ne toliko velike specifične, ali zato ogromne instalisane snage.

Područje zagrevanja električnim lukom obuhvaća uglavnom zagrevanje u elektrolučnim pećima, ali i na drugim mestima gde električni luk služi kao izvor za indirektno zagrevanje, kao što je zagrevanje plazmom, IC-zračenjem u optičkim pećima i drugim.

Zagrevanje elektrolučnim pećima. Elektrolučne peći mogu se podeliti na peći za direktno, za indirektno i za mešovito zagrevanje lukom.

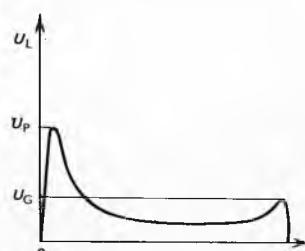
Elektrolučne peći za direktno zagrevanje samo su one koje služe za izvođenje gasnih reakcija pomoću termičkih i ionizacionih procesa izazvanih električnim lukom, jer je samo tada zagrevanje gasne sredine u kojoj gori luk samo sebi svrha.

Procesi koji se mogu izvoditi tim pećima nekada su bili doista značajni za tehniku. Najznačajniji među njima bio je početkom stoljeća postupak proizvodnje azotne kiseline oksidacijom atmosferskog azota (v. Proizvodnja dušične kiseline oksidacijom atmosferskog dušika, TE 3, str. 509 u članku *Dušik*). Zbog neekonomičnosti značenje je tih procesa u novije vreme nezнатно.

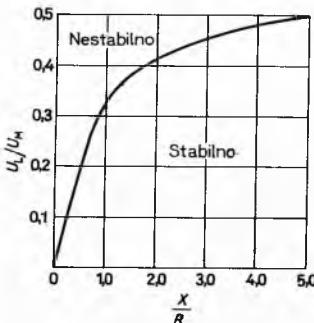
U praksi se danas pod pećima za direktno zagrevanje električnim lukom razumevaju metalurške peći u kojima luk gori između elektroda i šarže, pa on pretežno služi samo kao izvor toplotnog zračenja, tj. za indirektno grejanje. Izvesno opravdavanje za nazivanje tog načina grejanja direktnim jest što se u izvesnoj meri šarža i direktno zagreva električnim otporom, kao što je to uostalom kod već spomenutih peći za mešovito zagrevanje.

Peći za direktno zagrevanje električnim lukom prikladne su za topljenje metala sa visokom temperaturom isparavanja. Najviše se upotrebljavaju u proizvodnji čelika, naročito visokokvalitetnih legiranih (v. Elektrolučni procesi, TE 3, str. 63, u članku *Čelik*, gde su podrobnejše opisane). Sve više zamenjuju Siemens-Martinove peći, tako da se računa da će ih do 1980 sasvim istisnuti iz upotrebe.

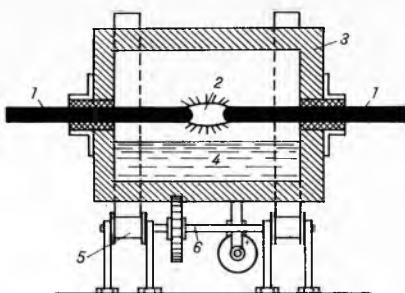
Elektrolučne peći za indirektno zagrevanje poznate su i kao ozibne peći. Najviše se upotrebljavaju za topljenje bakra i njegovih legura i za proizvodnju perlitnog liva u malim livačkim postrojenjima. Shematski su prikazane na sl. 25. Očigledno se ovde radi o manje-više čistom zagrevanju šarže toplotnim zračenjem, a električni luk služi kao njegov izvor. Nedostaci tih



Sl. 23. Promene napona električnog luka pri toku izmenične struje u zavisnosti od vremena u jednoj poluperiodi. Posebno su istaknuti vrhovi napona pri paljenju i gašenju



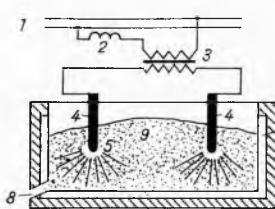
Sl. 24. Područje stabilnog gorenja električnog luka napajanog izmeničnom strujom ako se u krugu nalaze omski i induktivni otpor



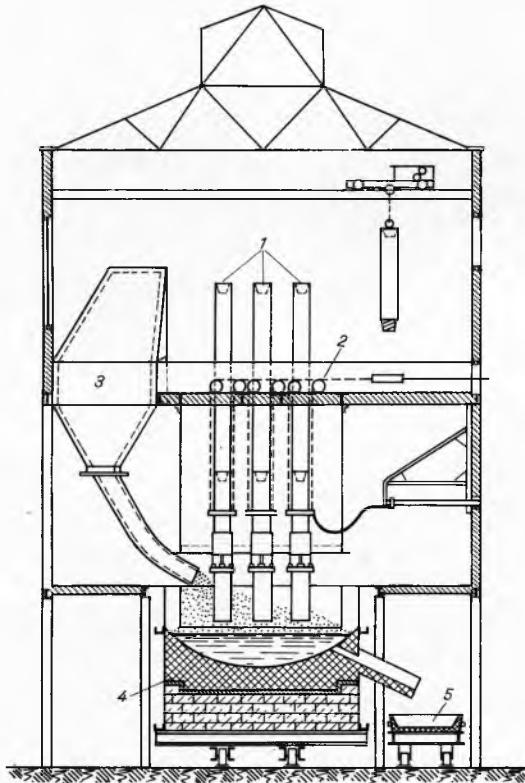
Sl. 25. Elektrolučna peć za indirektno zagrevanje.
1 Elektroda, 2 električni luk, 3 obloga, 4 šarža,
5 osloni valjci, 6 uređaj za njihanje

peći jesu što su im elektrode nepovoljno opterećene na savijanje i ograničavaju dimenzije peći, tako da su maksimalni kapaciteti šaržiranja tih peći oko 1200 kg, a snage do 450 kW. Kod tih peći nepovoljno je i termičko opterećenje svoda, jer se od njega reflekira i do 50% toplotnog zračenja. Nedostatke tih peći ublažuje stalno zibanje do 180° u vreme pogona. Time se postiže ravnomernije trošenje obloge i zagrevanje šarže, te ubrzavanje procesa.

Elektrolučne peći za mešovito zagrevanje (ili, kako se često kaže, za zagrevanje zatvorenim lukom, što s obzirom na princip dejstva ima izvesno opravdavanje) prikazane su principijelnom shemom na sl. 26. Zagrevanje u tim pećima razlikuje se od zagrevanja u pećima za direktno zagrevanje električnim lukom samo udelom direktnog grejanja električnim otporom. Taj je ovde mnogo veći zbog toga što su elektrode urednjene u šaržu od materijala sa visokom električnom otpornošću, tako da se proticanjem struje kroz nju proizvodi velika količina toplote. (Isto se može postići i kad je provodljivost produkta procesa srazmerno velika, ako se pri tome, kao što obično i jest slučaj, radi sa slabo provodljivom troskom. Tada luk gori između troske i elektroda.) Zbog toga su te peći u metalurgiji prikladne za dobijanje sirovog železa i legura železa kao što su ferosilicijum, ferohrom, ferovanadijum, feromolibden, ferovolfram, a u anorganskoj hemijskoj industriji u proizvodnji kalcijum-karbida (v. Karbid i cijanamid u članku *Kalcijum*), fosfora (v. *Fosfor*), troske za staklenu vunu, aluminatnog (boksitnog) cementa (v. *Cementi*, TE 2, str. 585). Jedno takvo postrojenje shematski je prikazano na sl. 27. Tako veliko područje primene čini te peći najraširenijim od svih elektrolučnih peći, a zbog toga one po instalisanoj snazi elektrolučnih peći u industriji zauzimaju prvo mesto.



Sl. 26. Shema električne peći za mešovito zagrevanje. 1 Električna mreža, 2 prigušnica, 3 transformator, 4 elektrode, 5 električni luk, 6 i 7 obloge, 8 izliv, 9 šarža



Sl. 27. Shematski prikaz postrojenja za proizvodnju aluminatnog cementa. 1 Elektrode, 2 delovi uređaja za regulaciju položaja elektroda, 3 peć, 4 kola za kokile, 5 levak za šaržiranje

Elektrode i regulacija elektrolučnih peći. Za sve vrste tih peći upotrebljive su preoblikovane elektrode, koje mogu biti ugljene ili grafite. Tamo gde su elektrode uspravne obično su prikladnije Söderbergove elektrode (v. *Čelik*, TE 3, str. 63).

Za stabilitet električnog luka uz ostalo je merodavan i položaj njegove karakteristike, zavisan od razmaka među elektrodama, a to je kod elektrolučnih peći razmak među elektrodama i šaržom. Za dovoljno miran rad tih peći, bez odviše jakih strujnih udara,

nužan da se zadovolje uslovi napajanja energijom, neophodna je kompenzacija faktora koji taj razmak mogu menjati (kao što je npr. nepovoljni razmeštaj čestica šarže pri topljenju, ključanje, izgaranje materijala elektroda). Zbog toga su regulacioni sistemi položaja elektroda neophodni delovi postrojenja elektrolučnih peći.

Parametar koji se reguliše u tim sistemima obično je impedansa kola električnog luka. Izvršni organ tih sistema može biti elektromotor ili neki hidraulički uređaj. Kvalitetnim sistemima za tu svrhu može se postići vreme odziva ≤ 100 ms i brzina pomjeranja elektroda ≤ 150 mm/s. Ipak ni uz pomoć najefikasnijih regulacionih mera nije moguće bezudarno opteretiti mrežu elektrolučnom peći.

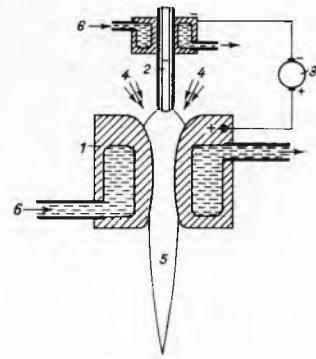
Zagrevanje plazmom. Pod zagrevanjem plazmom razumevaju se postupci grejanja u kojima je plazma prenosilac topline od izvora do grejnog tela (v. *Plazma*). Plazma se pri tome obično proizvodi pomoću električnog luka u uredajima koji se nazivaju *plazmenim gorionicima*, shematski prikazanim na sl. 28. U tim gorionicima električni luk (ovde zvan plazmenim) između anode 1 od bakra i katode 2 od volframa napaja se iz generatora 3. U zonu luka pod pritiskom se dovodi gas 4 koji se ovde ionizuje, te tako nastaje plazma. Ona zatim izlazi iz otvora anode golemom brzinom (nekoliko stotina metara u sekundi) kao plazmeni plamen 5. Elektrode se hlade vodom koja protiče sistemima za cirkulaciju 6.

Primena zagrevanja plazmom. Za primenu zagrevanja plazmom najvažnije karakteristike ovih gorionika jesu da oni omogućavaju velike koncentracije toplotnih fluksova u mehanički koncentrisanim mlazevima plazme, tako da su u njima dosisive temperature i do $20\ 000$ K i goleme specifične snage (i do 10^8 kW/m²), te što su pri tome, uz upotrebu inertnih gasova za proizvodnju plazme (obično argona), ostvarljive inertne radne atmosfere. Pored toga, preim秉tvo tih gorionika jest i to što omogućavaju jednostavnu regulaciju grejanja podešavanjem brzine strujanja plazme (promenama protoka gasa od kojega nastaje plazma) i snage luka, kao i prilagodavanje oblika plazmenog plamena (oblikom elektroda) površini koju treba grejati. Nemalo preim秉tvo tog načina zagrevanja električnim lukom jest što je režim goreњa plazmenog luka postojaniji, pa je i njegovo održavanje mnogo jednostavnije.

Ta preim秉tva zagrevanja plazmom naročito dolaze do izražaja u tehnici sećenja i zavarivanja metala (v. *Zavarivanje*). Takođe je taj način zagrevanja vrlo zanimljiv u tehnici metalizovanja. Velike brzine strujanja plazme u tom području dejstvuju nepovoljno. Taj nedostatak zagrevanja plazmom može se ublažiti ako se za njenu proizvodnju namesto plazmenih gorionika upotrebe visokofrekventni plazmotroni, a sasvim izbeći pomoću optičkih peći (v. *Metaliziranje*).

Sem u tim područjima opisana preim秉tva zagrevanja plazmom dolaze do izražaja i u pretapanju metala. Konstrukcija peći za tu svrhu vrlo je slična konstrukciji elektrolučnih peći. U poređenju sa elektrolučnim pećima, preim秉tva peći za zagrevanje plazmom jesu što one ravnomernije opterećuju mrežu, što se proces u njima odvija brže, što omogućavaju rad ne samo u inertnoj atmosferi nego i pod pritiskom i što su za njihovu primenu investicioni troškovi manji.

Međutim, plazmene peći za pretapanje metala imaju i svojih nedostataka, kao što su dosta velika, stalna potrošnja skupog inertnog gase i potrebe prinudnog hlađenja elektroda, zbog čega je stepen korisnog toplotnog dejstva srazmerno malen. Ti nedostaci imaju za posledicu srazmerno visoke eksplatacione troškove. Zbog toga upotreba tih peći manje-više je ograničena na preradu skupljih materijala, kao što su npr. proizvodnja visoko-



Sl. 28. Shema plazmenog gorionika. 1 Bakrena anoda, 2 volframova katoda, 3 generator, 4 gas pod pritiskom, 5 plazmeni plamen, 6 sistem za hlađenje

legiranih plemenitih čelika. Glavna tehnološka preim秉tva legiranja tim postupkom jesu: zaštićenost od oksidacije pa svi legirani elementi u celosti ostaju u proizvodu (ne propadaju sa troškom) i ostvarenje izvesnog rafinacionog učinka (uklanjanje štetnih sastojaka slično kao i u vakuumskim elektrolučnim pećima).

Zagrevanje elektronskim mlazom. Princip tog zagrevanja jest konverzija kinetičke energije elektrona u toplotu prilikom sudara sa telom koje treba grijati. Mlaz za tu svrhu dovoljno brzih elektrona proizvodi se uređajima sa principom rada jednakim principu na kojem se zasniva rad transmisionog elektronskog mikroskopa (v. članak *Elektronski mikroskop*, str. 6). Kako je prikazano na sl. 29, i tu se elektronski mlaz proizvodi elektronskim topom, koji se sastoji od užarene katode, upravljačke rešetke (Wehneltovog cilindra) i anode za ubrzavanje elektrona, i fokusira se elektronskim sočivom (v. Elektronske leće, str. 3, u članku *Elektronska optika*), a čitav uređaj radi u visokom vakuumu (pod apsolutnim pritiskom od $1,3 \cdot 10^{-2}$... $1,3 \cdot 10^{-3}$ Pa odn. $(10^{-4} \dots 10^{-5}$ mm Hg).

Osnovne karakteristike zagrevanja elektronskim mlazom. Pri tom zagrevanju nastajanje elektronskog mlaza započinje termojonskom emisijom elektrona sa katode (v. Termionska pražnjenja u plinovima, TE 4, str. 461, u članku *Elektronika, sastavni dijelovi*), pri čemu nastaje emisiona struja jakosti odredene Dushman-Richardsonovom jednačinom i površinom katode, a njihovo kretanje pod uticajem anodnog napona jednako kao u vakuumskim diodama (v. Vakuumska dioda, TE 4, str. 461, 462), tj. u skladu sa zakonima kretanja elektrona u električnom i magnetnom polju (v. Gibanje elektrona u električnom polju i Gibanje elektrona u magnetskom polju, TE 4, str. 460, u članku *Elektronika, sastavni dijelovi*; v. Gibanje elektrona u električnom i magnetskom polju i Utjecaj prostornog naboja, u članku *Elektronska optika*, str. 1...3), tako da je jakost struje mlaza elektrona odredena tropolovinskim (Langmuir-Childovim) zakonom.

Zbog toga je i toplotna snaga pojedinačnih uređaja za zagrevanje elektronskim mlazom na analogan način zavisna od napona između njihove emisione katode i akceleracione anode, te se u praksi u konstrukciji uređaja teži postizanju mogućnosti da se taj napon učini što većim. Tako danas već postoje konstrukcije tih uređaja za rad sa naponima 10...150 kV. Zbog ogromnih brzina koje elektroni postižu (iz formula izvedenih u netom citiranim člancima lako se može izračunati da one već pri naponima ~ 65 kV dosiju polovicu brzine svjetlosti) njihove kinetičke energije su velike. Sa druge strane, za postizanje što većih specifičnih toplotnih snaga u praksi se teži fokusiranju mlaza elektrona tih uređaja na što manju površinu. Danas je već moguće površinu dejstva elektronskog mlaza ograničiti na svega $0,001$ cm², pa time postići specifične toplotne snage od 10^{13} W/m², tj. toliko velike da se veće mogu postići još samo laserima. Veće snage uređaja za zagrevanje elektronskim mlazom mogu se postići slaganjem više elektronskih topova u aparate sa zajedničkim elektronskim sočivom.

Jedan je od najkrupnijih nedostataka tog načina zagrevanja što je, različito nego u elektronkama, dosta teško proizvoditi i održavati za njegovo izvođenje nužni ne samo visoki, već i stalni vakuum, jer gasovi koji se pri tome razvijaju iz izratka neprekidno uzrokuju nepravilne oscitacije pritiska. Zbog toga su za taj način zagrevanja potrebiti kvalitetni uređaji za proizvodnju vakuuma, visokog odsisnog kapaciteta i sa efikasnim uređajima za regulaciju. (Tako je npr. u nekim slučajevima upotrebe kapacitet uređaja

za zagrevanje elektronskim mlazom izravno zavisan od kapaciteta njegovih vakuum-pumpi.)

Primena zagrevanja elektronskim mlazom. I pored velikih nedostataka tog načina zagrevanja njegova primena sve je češća jer su njegova preim秉tva u operacijama topljenja i isparavanja teško topljivih i isparljivih materijala, koje naročito zbog razvoja nuklearne i raketne tehnike postaju sve značajnije, toliko velika, da se u izvesnim slučajevima smatra nezamenljivim. Tako npr. zagrevanje elektronskim mlazom otvara nove mogućnosti u tehnici zavarivanja, metalizovanja i proizvodnje intrinsektnih poluprovodnika, o čemu će biti govora u posebnim člancima (v. članke *Zavarivanje, Metaliziranje, Poluvodiči*). Osim toga, zagrevanje elektronskim mlazom važno je i za neke specijalne postupke topjenja metala.

Tako je topljenje metala elektronskim mlazom jedini postupak koji se upotrebljava za pretapanje tzv. vatrostalnih metala, kao što su volfram, molibden, cirkonijum, tantal, niobijum, hafnijum i njihove legure, posebno kad se od proizvoda traži izvanredno velika čistoća. To je ovde osigurano time što je koncentracija kiseonika u atmosferi peći vrlo mala. Kolika je ta čistoća atmosfere može se oceniti, npr., na osnovu okolnosti da je koncentracija kiseonika u nekoj peći za zagrevanje elektronskim mlazom pod apsolutnim pritiskom od 10^{-5} mmHg jednaka onoj koja bi postojala u nekoj plazmenoj peći sa normalnom atmosferom argona čistoće 99,999 999%, kad bi se takav argon mogao proizvoditi, što je isključeno.

Osim toga, preim秉tvo peći za topljenje metala zagrevanjem elektronskim mlazom, npr. u poređenju sa elektrolučnim pećima, jest što se ovde brzina odvijanja procesa može regulisati.

TENDENCIJE DALJEG RAZVOJA ELEKTROTERMIIJE

U budućnosti će se sve više prelaziti na upotrebu nuklearnih goriva (pa i drugih primarnih izvora energije) koji se najbolje mogu iskoriscavati pretvorbom u električnu energiju, te se može očekivati da će se povećati i ideo električne energije u ukupnoj energiji koju će iskoriscavati potrošači.

Dalji razvoj elektrotermije ovisiće o mogućnostima i ekonomičnosti pretvaranja drugih oblika energije u električnu, o mogućnostima distribucije, te o pronaalaženju još prikladnijih načina za primenu toplotne energije dobijene iz električne.

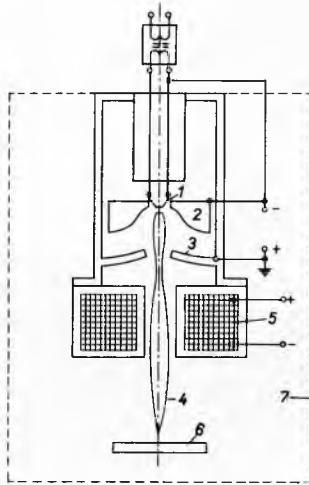
Povećanje udela električne energije u snabdevanju energijom uslovjavaće i veću upotrebu elektrotermijskih postupaka, a povećanjem udela termoenergije u elektroenergetskom sistemu porasće neiskorištene snage elektrana u razdobljima malih opterećenja, pa će sve više biti ekonomski opravданo korišćenje elektrotermijskih postrojenja koja neće biti u pogonu u vreme maksimalnog opterećenja elektroenergetskog sistema.

Nadalje, mogu se očekivati rešenja koja bi povoljno dejstvovala na razvoj elektrotermije. Tako se npr. očekuje pronaalaženje jefтинijih materijala za otpornike koji će biti trajni i na vrlo visokim temperaturama (iznad 2300 K), kvalitetnijih vatrostalnih materijala koji će biti znatno bolji toplotni izolatori od danas poznatih, usavršavanje ispravljača koji će omogućiti zagrevanje jednosmernom strujom i time jednoličnije električno grijanje sa sigurnijom regulacijom, usavršavanje lasera, razvoj novih postupaka kombinovanog električnog zagrevanja (npr. indukcionog sa različitim učestanostima, elektrolučnog sa visokofrekventnim strujama i sl.).

Iz svega ovoga može se zaključiti da će elektrotermijski postupci u skoroj budućnosti postati glavni načini za dobijanje toplote.

LIT.: V. Paschis, *Les fours électriques industriels*, Paris 1952. — W. Trinks, *Les fours industriels*, Paris 1957. — A. D. Свешчанский, М. Я. Смелянский, *Электрические промышленные печи, часть I*, Москва 1958. — R. Bakish (edit.), *Introduction to electron beam technology*, New-York 1962. — F. Lauster, *Elektrowärmetechnik*, Stuttgart 1963. — H. Sobotka, *Générateurs électroniques de chauffage haute fréquence*, Paris 1963. — K. Hinkel, *Les magnétrons*, Paris 1963. — E. Langer, *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Praha 1964. — T. Schwartz, *Termokinetyka układów elektrotermicznych*, Warszawa 1966. — H. J. A. Püschnner, *Chaudage H. F. par ondes décimétriques*, Paris 1966. — P. Borstelmann, *Chaudage électrique des locaux*, Paris 1966. — M. Pirani, *Elektrothermie*, Berlin 1967. — M. C. Лейканд, *Вакуумные электрические печи*, Москва 1968. — C. A. Farbman, И. Ф. Колобов, *Индукционные печи для плавки металлов и сплавов*, Москва 1968. — Л. В. Глебов, Н. А. Пескаров, Д. С. Файзенбаум, *Расчет и конструирование машин контактной сварки*, Ленинград 1968. — E. Okress, *Microwave power engineering, Vol. II Applications*, New York 1968. — С. Чундев, *Электротермия*, Скопје 1969. — A. D. Свешчанский, М. Я. Смелянский, *Электрические промышленные печи, часть II*, Москва 1970.

S. Čundev



Sl. 29. Shematski prikaz uređaja za zagrevanje elektronskim mlazom. 1. Užarena katoda, 2. upravljačka elektroda, 3. anoda s otvorom, 4. elektronski mlaz, 5. elektronska leća, 6. objekt koji se greje, 7. zidovi vakuumske komore