

ELECTROTERMIE

1. CHESTIUNI GENERALE DE ELECTROTERMIE

Electrotermia este un domeniu al științei care definește conversia energiei electrice în energie termică și reprezintă unul din domeniile majore (principale) de utilizare ale energiei electrice, alături de acționările electrice și iluminatul electric. Este un domeniu fascinant prin varietatea aplicațiilor sale, de la prepararea alimentelor și a băuturilor până la produse industriale din metale, sticlă, ceramică, mase plastice, hârtie etc. Procesele electrotermice folosesc curenți sau unde electromagnetice ale căror domeniu de frecvențe se întinde de la c.c. la undele UV, puterile folosite variind de la câțiva wați la câțiva megawați.

Instalația electrotermică este un ansamblu funcțional constituit din "convertorul" electrotermic, sursa de alimentare și aparatajul de punere în funcțiune, reglare și control.

Comparativ cu încălzirea cu flacără, instalațiile de încălzire electrică au unele avantaje importante:

- posibilitatea concentrării energiei termice în spațiu restrâns, ceea ce permite obținerea de temperaturi foarte ridicate;
- reglare ușoară a regimului de încălzire și obținerea unui grad înalt de uniformitate și precizie a temperaturilor;
- inexistența produselor arderii, ceea ce permite protejarea spațiului de lucru prin vid sau atmosferă de gaze inerte;
- automatizarea fiabilă și relativ simplă a proceselor electrotermice;
- volum redus al echipamentului și îmbunătățirea condițiilor de lucru.

Table 9.1 Electric heating processes

Technique	Frequency range	Power range
Direct resistance	0–50 Hz	0.01–30 MW
Indirect resistance	50 Hz	0.5–5 kW
Oven, furnace	50 Hz	0.01–1 MW
Arc melting	50 Hz	1–100 MW
Induction heating	50 Hz–450 kHz	0.02–10 MW
Dielectric heating	1–100 MHz	1–5000 kW
Microwave heating	0.5–25 GHz	1–100 kW
Plasma torch	4 MHz	0.001–1 MW
Laser CO ₂	30 THz	0.1–60 kW
Infra-red	30–400 THz	1–500 kW
Ultraviolet (mercury arc)	750–1500 THz	1 kW

1.1 Clasificarea instalațiilor electrotermice

Din punct de vedere al conversiei energiei electrice în energie termică și al procedurii de transmitere al căldurii spre corpul supus încălzirii, denumit *șarjă* sau *încărcătură*, instalațiile electrotermice sunt de mai multe tipuri și anume:

- **cuptoare electrice cu rezistoare** la care degajarea căldurii are loc prin efectul Joule–Lenz al curenților ce parcurg conductoare solide sau lichide caracterizate prin rezistivități ridicate. Aceste elemente specializate de circuit se numesc *rezistoare*.

Dacă piesa de încălzit (fig. 1.1 – a) joacă și rol de rezistor, atunci avem un *cuptor electric cu rezistoare cu încălzire directă*.

În cazul în care (fig. 1.1 – b) energia degajată de rezistor se transmite prin convecție și radiație încărcăturii, *cuptorul* este de tipul cu *rezistoare cu încălzire indirectă*. De aici fac parte și cuptoarele cu băi de săruri, cuptoarele de încălzire cu strat pseudofluidizant, cuptoarele de topire sub strat de zgură, instalațiile de încălzire și uscare cu radiații infraroșii etc.

- **cuptoare și instalații electrice de inducție** la care încălzirea materialului se datorează efectului termic al curenților induși în metalele plasate într-un câmp magnetic alternativ. Din punct de vedere constructiv deosebim *cuptoare de inducție cu canal* (fig. 1.1 – c) și *creuzet* (fig. 1.1 – d), precum și *instalații de inducție pentru tratament termic și încălzire în volum* (fig. 1.1 – e). De precizat că bobina care generează fluxul magnetic variabil se numește *inductor*.

- **cuptoare și instalații de încălzire dielectrică** (fig. 1.1 – i) bazate pe efectul curenților de deplasare și histerezisului electric, fenomene ce apar în materialele dielectrice sau semiconductoare supuse acțiunii unui câmp electric de înaltă frecvență.

- **cuptoare electrice cu arc** la care conversia energetică are loc în arcul electric, fluxul termic transmițându-se prin radiație șarjei. În funcție de elementele între care apare arcul electric distingem:

- *cuptoare cu arc cu acțiune directă* (fig. 1.1 – f) la care arcul se stabilește între electrozi și șarjă. Arcul

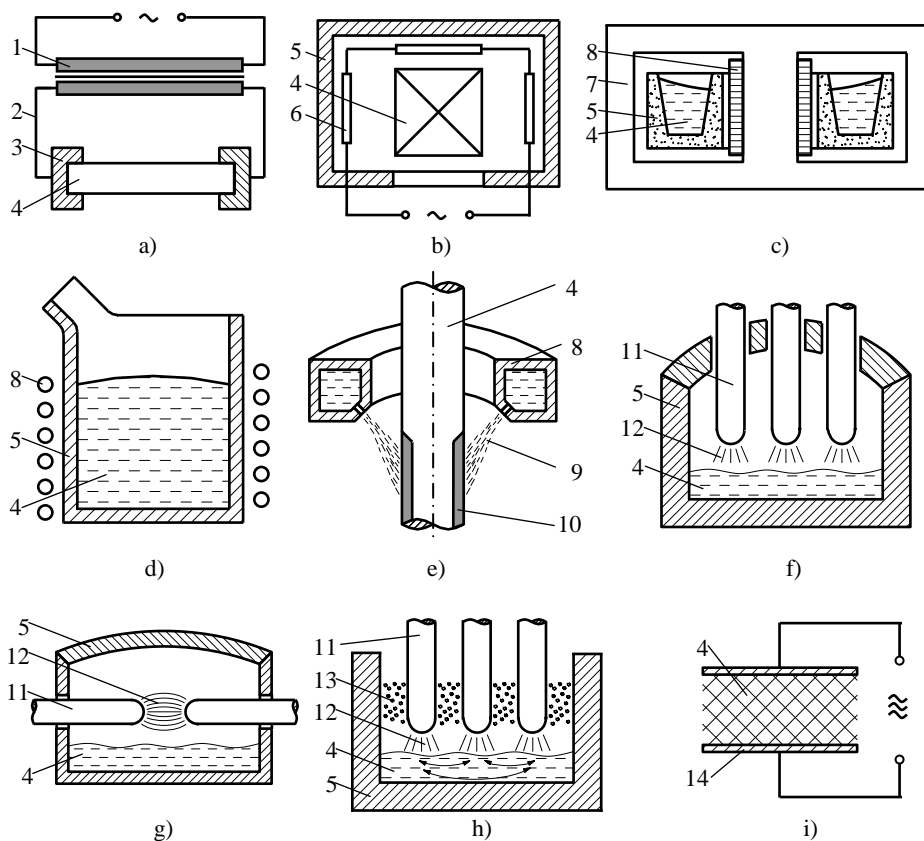


Figura 1.1

Tipuri de cuptoare electrice

1 – transformator alimentare; 2 – rețea scurtă; 3 – piesă contact; 4 – material de încălzit (șarjă); 5 – zidărie cuptor; 6 – rezistor; 7 – circuit magnetic; 8 – inductor; 9 – lichid răcire; 10 – zonă călită; 11 – electrod; 12 – arc electric; 13 – minereu; 14 – armătură condensator

este în contact cu suprafața încărcăturii, acesta încălzindu-se de la radiația directă a arcului. Cota parte a energiei ce se degajă prin efectul termic al curenților ce se închid prin șarjă este nesemnificativă, datorită rezistenței ohmice reduse a acesteia.

– *cuptoare cu arc cu acțiune indirectă* (fig. 1.1 – g) la care arc apare între doi electrozi orizontali, căldura transmițându-se încărcăturii prin radiația directă a arcului și a zidăriei libere a cuptorului.

– *cuptoare cu arc și rezistență* (fig. 1.1 – h) la care arc apare între electrozi și șarjă, fiind acoperit de minereu în stare pulverulentă. Încălzirea materialului are loc atât prin radiația directă a arcului, cât și prin efectul termic al curenților ce se închid prin topitura de rezistivitate ridicată.

– *cuptoare și instalații cu fascicul de electroni* bazate pe transformarea în căldură a energiei cinetice a electronilor rapizi ce bombardează suprafața materialului supus încălzirii.

– *cuptoare și instalații de încălzire cu plasmă* la care energia arcului electric ionizează complet un gaz a cărui temperatură ajunge la valori extrem de ridicate.

1.2 Indicatori energetici ai instalațiilor electrotermice

Eficiența energetică a proceselor electrotermice se estimează prin randament total, factor de putere, consum specific de energie electrică și productivitate. Definierea acestor mărimi, numite generic *indicatori energetici*, se face pe baza schemelor bloc (fig. 1.2 – a) și echivalentă monofazată (fig. 1.2 – b).

Randamentul total η_t reprezintă cota parte din puterea cerută P_c de la rețea ce se transformă în putere P_u utilă procesului considerat.

$$(1.1) \quad \eta_t = \frac{P_u}{P_c} = \eta_g \cdot \eta_{rs} \cdot \eta_e \cdot \eta_\theta = \eta_g \cdot \eta_{rs} \cdot \eta_l$$

în care:

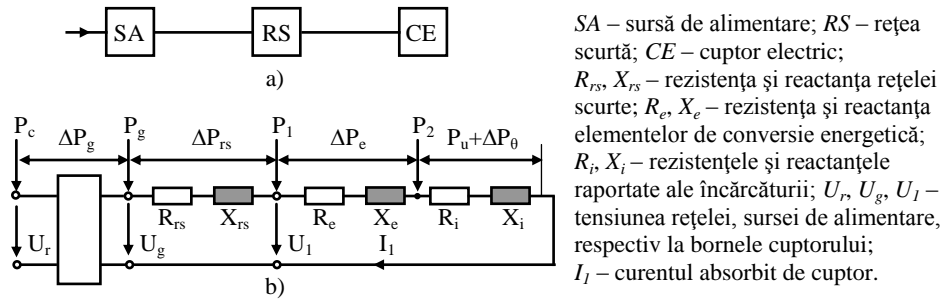


Figura 1.2

Schema bloc (a) și echivalentă (b) a unei instalații electrotermice

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_c} = \frac{P_g}{P_1 + \Delta P_g} \quad \text{– randamentul sursei (generatorului) de alimentare a cuptorului;}$$

P_g – puterea nominală a generatorului, [W];

$$\Delta P_g = P_g (1 - \eta_g) / \eta_g \quad \text{– pierderi de putere în sursa de alimentare, [W];}$$

$$\eta_{rs} = \frac{P_1}{P_g} = \frac{P_1}{P_1 + \Delta P_{rs}} \quad \text{– randamentul rețelei scurte (ansamblul căilor de curent dintre sursa de alimentare și cuptorul electric);}$$

P_1 – puterea la bornele cuptorului, [W];

$$\Delta P_{rs} = R_{rs} \cdot I_f^2 \quad \text{– pierderi de putere pe rețeaua scurtă, [W];}$$

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_e} \quad \text{– randamentul electric al cuptorului,}$$

$P_2 = R_i \cdot I_f^2$ – puterea transferată încărcăturii, [W];

$$\Delta P_e = R_e \cdot I_f^2 \quad \text{– pierderi de putere în elementele încălzitoare, [W];}$$

Randamentul electric are valori mai ridicate pentru cuptoarele cu rezistoare (80 .. 95%) și valori ceva mai scăzute pentru cuptoarele și instalațiile de încălzire prin inducție (60 .. 80%).

$$\eta_\theta = \frac{P_u}{P_2} = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_\theta} \quad \text{– randamentul termic al cuptorului}$$

$$P_u = \frac{m \cdot c(\theta_f - \theta_i) + mc_l}{t} = \frac{m \cdot i}{t}$$

– puterea utilă necesară încălzirii și topirii șarjei, [W];

m – masa încărcăturii, [kg];

c – căldura specifică a materialului, [J/kg·grad];

c_l – căldura latentă de topire, [J/kg];

θ_f, θ_i – temperaturile finală și inițială a încărcăturii, [grad];

i – energie specifică (entalpie masică) a materialului, [J/kg];

t – durata procesului, [sec];

$$\Delta P_\theta \quad \text{– pierderile termice ale cuptorului pe durata procesului, [W].}$$

Randamentul termic are valori cuprinse între 70 .. 95%, stabilite de mărimea pierderilor termice. Acestea depind de dimensiunile izolației, calitatea materialelor refractare și termoizolante, temperatura corpului de încălzit sau de timpul impuls procesului.

$$\eta_I = \eta_e \cdot \eta_\theta = \frac{P_u}{P_I} = \frac{P_u}{P_u + \Delta P_e + \Delta P_\theta} \quad - \text{randamentul cuptorului.}$$

Din cele de mai sus rezultă structura de principiu a puterii cerute:

$$(1.2) \quad P_c = P_u + \Delta P_g + \Delta P_{rs} + \Delta P_e + \Delta P_\theta = P_u + \sum \Delta P$$

Factorul de putere $\cos \varphi_t$ al instalației electrotermice, respectiv factorul de putere $\cos \varphi_I$ al cuptorului se definesc prin:

$$(1.3) \quad \cos \varphi_t = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}} \quad ; \quad \cos \varphi_I = \frac{P_I}{\sqrt{P_I^2 + Q_I^2}}$$

în care:

$Q_c = Q_g + Q_{rs} + Q_I - Q_C$ – puterea reactivă solicitată de instalație din rețea, [VAR];

Q_g – puterea reactivă aferentă sursei de alimentare, [VAR];

$Q_{rs} = X_{rs} \cdot I_I^2$ – puterea reactivă a rețelei scurte, [VAR];

$Q_I = (X_e + X_i) I_I^2$ – puterea reactivă solicitată de cuptor, [VAR];

Q_C – puterea reactivă furnizată de instalația de compensare a factorului de putere, în ipoteza existenței acesteia, [VAR].

Puterile reactive corespunzătoare altor instalații auxiliare se includ în Q_c .

Consumul specific de energie electrică la nivelul întregii instalații e_t sau numai la bornele cuptorului e_I se estimează cu:

$$(1.4) \quad e_t = \frac{P_c \cdot t}{m} = \frac{P_u \cdot t}{\eta_t \cdot m} = \frac{i}{\eta_t} \quad ; \quad e_I = \frac{i}{\eta_t} \quad [\text{J/kg; kWh/t}]$$

Productivitatea instalației g , numeric egală cu cea a cuptorului, reprezintă cantitatea de produse (măsurată în unități corespunzătoare) ce se pot încălzi simultan în unitatea de timp.

$$(1.5) \quad g = \frac{m}{t} \quad [\text{tone/oră}]$$

1.3 Materiale utilizate în construcția instalațiilor electrotermice

La construcția și exploatarea instalațiilor electrotermice se utilizează atât materiale întâlnite în construcția de mașini, cât și materiale specifice ale căror proprietăți corespund condițiilor de funcționare la temperaturi înalte. Din această categorie fac parte materialele: refractare și termoizolante, cele cu rezistență mecanică mare la temperaturi ridicate, precum și cele pentru rezistoare.

a – Materialele refractare, caracterizate prin capacitatea de a suporta temperaturi ridicate, trebuie să prezinte următoarele proprietăți:

- *refractaritatea* prin care se înțelege rezistența la temperaturi înalte, fără oxidări, topiri sau deformări;
- *rezistență mecanică la temperaturi înalte* prin care se precizează temperatura maximă de utilizare la care peste o presiune de $2 \cdot 10^5$ [N/m²] apare deformarea;
- *stabilitatea termică* (rezistența la șoc termic) prin care se înțelege capacitatea materialului refractar de a rezista la variații bruște și repetate de temperatură fără a se fisura, crăpa sau sparge;
- *stabilitatea chimică* la acțiunea chimică a topiturii, zgurei sau gazelor supraîncălzite;
- conductivitatea termică și căldura specifică reduse;
- constanta volumului la temperaturi înalte;

– compactitatea și permeabilitatea la gaze, corespunzătoare procesului tehnologic realizat în cuptor.

Materialele refractare se prezintă sub formă de cărămizi, piese fasonate sau praf și sunt realizate din bioxid de siliciu (SiO_2), oxid de magneziu (MgO) sau alumină (Al_2O_3)

Silica (dinasul) este un material refractar acid obținut din minereuri de cuarț prăjite și măcinate. Cărămizile și piesele fasonate din silica se utilizează la confecționarea bolților și pereților cuptoarelor cu arc cu acțiune directă pentru elaborarea oțelurilor după procedeul acid.

Magnezitul se obține prin calcinarea carbonatului de magneziu (MgCO_3) și sub forma de cărămizi se folosește la căptușirea vetrelor cuptoarelor cu arc cu acțiune directă destinate obținerii oțelului prin procedeul acid. Sub formă de praf se utilizează la stamparea creuzetelor cuptoarelor de inducție cu creuzet. Prin amestecarea magnezitului cu cromită nativă (Cr_2O_3) rezultă cromomagnezitul și magnezitocromitul utilizat la bolțile cuptoarelor cu arc.

Șamota este o argilă refractară arsă, neutră din punct de vedere chimic, cu un conținut de peste 38% oxid de aluminiu și siliciu. Este unul din cele mai uzuale materiale refractare și se realizează sub formă de cărămizi, plăci sau piese fasonate destinate, în special cuptoarelor electrice cu rezistoare. Cărămizile pot fi cu: adaosuri combustibile, șamote ușoare sau șamote spongioase.

Carborundul (carbură de siliciu artificială având ca liant argila) se utilizează la confecționarea unor piese (mufe, ghidaje) pentru cuptoarele electrice cu rezistoare ce lucrează la $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$.

În cazul cuptoarelor ce lucrează cu atmosfere protectoare, la temperaturi înalte sau au destinații speciale, materialele refractare se aleg din literatura de specialitate, suficient de vastă în acest domeniu.

b – Materialele termoizolante sunt destinate reducerii pierderilor termice prin zidăria cuptorului. În principiu aceste materiale nu suportă temperaturi prea mari, au rezistență mecanică și greutate specifică mici, conductivitate termică redusă. Ele nu vin în contact direct cu mediul din cuptor și nu sunt solicitate mecanic, termic sau chimic. Se prezintă sub formă de cărămizi, praf pentru umplutură, plăci, vată, cartoane etc.

Diatomita, cel mai ieftin material termoizolant, este o rocă organică sedimentară (bioxid de siliciu aproape pur) extrasă din carieră. Praful de diatomită servește ca material de umplutură, iar cărămizile și piesele fasonate se pot obține prin metoda adaosurilor combustibile.

Vata termoizolantă (de sticlă, zgură, minerală) se utilizează sub formă de saltele până la temperatura de cel mult 500°C .

Azbestul și produsele din azbest (zonolit, azbozurit, vulcanita, newelit, sovelit) se prezintă sub formă de plăci, cartoane, șnururi ce se utilizează în gama $350\text{--}1000^\circ\text{C}$ funcție de varianta constructivă.

Fibrele ceramice, de compoziție silico-aluminoasă, îmbină proprietățile materialelor refractare și termoizolante fiind ideale pentru construcția cuptoarelor cu rezistoare, în special. Se caracterizează prin densități ($180\text{--}200\text{ kg/m}^3$) și conductivități termice ($0,1\text{...}0,3\text{ W/m}\cdot\text{grad}$) reduse și temperaturi de utilizare de până la 1400°C .

c – Materiale refractare cu rezistență mecanică mare sunt destinate confecționării pieselor și elementelor de construcție aflate în zona temperaturilor ridicate și supuse frecvent la sarcini mecanice ridicate. Ele trebuie să satisfacă următoarele cerințe: oxidare redusă la temperaturi ridicate, rezistență mecanică la acțiunea combinată a solicitărilor mecanice și termice, prelucrabilitate mecanică, preț de cost scăzut, procurare ușoară.

Oțelurile aliate cu crom sunt stabilite la temperaturi ridicate, dar au o rezistență mecanică redusă, se deformează la cald și se prelucrează greu. Oțelurile aliate cu crom-nichel corespund practic tuturor cerințelor și sunt materialul de bază pentru construcția șinelor de ghidaj, benzilor transportoare, lanțurilor de conveiere etc. Oțelul de construcții poate deveni refractar ($\text{max. } 800^\circ\text{C}$) în urma procesului de alitare (saturarea superficială cu aluminiu)

În cazul cuptoarelor de înaltă temperatură (peste $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$) se recomandă folosirea metalelor cu punct de topire ridicat (wolfram, molibden, niobiu etc.) și atmosferă protectoare, sau materiale ceramice suprarefractare (oxid de aluminiu, dioxizi de zirconiu, thoriu, beriliu etc.)

d – Aliajele pentru rezistoare lucrează în zona temperaturilor maxime din cuptoarele electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă și trebuie să satisfacă la: lipsa transformărilor de fază la încălzirea și răcirea în timpul funcționării, temperatură de fuziune și refractaritate ridicate, rezistență electrică mare și coeficient redus de variație a rezistivității cu temperatura, rezistență mecanică la temperaturi înalte și coeficient de dilatare liniară scăzut, plasticitate și maleabilitate acceptabile.

După compoziția chimică deosebim:

- *aliaje cromnichel (Nikrothal) binare și ternare*. Aliajele binare conțin nichel (75 – 80%), crom (20%) și titan (5 – 20%) iar cele ternare crom (22 – 27%), nichel (17 – 20%) și fier (61 – 53%). În timpul funcționării pe suprafața metalului se formează un strat protector de oxid de crom, care nu se exfoliază. Temperatura maximă de lucru (800 – 1200°C) depinde de compoziția aliajului.

- *aliajele cromaluminii (Kanthal)* au ca principale adausuri de aliere cromul și aluminiul (restul fier), temperatura maximă de lucru (1200 – 1300°C) fiind direct proporțională cu procentul de crom.

- *aliaje fiercromaluminii (FECRAL)* stabile la temperaturi de până la 800°C sunt casante și prezintă o rezistență mecanică redusă. La temperaturi de lucru mai mari are loc exfolierea stratului de aluminiu format pe suprafața materialului.

La temperaturi de lucru ridicate, rezistoarele se confecționează fie din metale pure (platină – 1400°C, molibden – 2000°C, wolfram – 3000°C), fie din materiale nemetalice (carborund – 1400°C, cărbune și grafit 1400 – 1800°C, disiliciură de molibden 1700°C); cu precizarea că primele trebuie să lucreze numai în atmosfere protectoare fiind ușor oxidabile la temperaturi mari.

Rezistoarele nemetalice își modifică rezistivitatea cu timpul de unde necesitatea alimentării acestora prin transformatoare reglabile.

2. TRANSMISIA CĂLDURII ÎN INSTALAȚIILE ELECTROTHERMICE

2.1. Probleme generale

Căldura este forma de energie caracterizată de agitația dezordonată a particulelor ce compun materia, iar schimbul de căldură între două corpuri este guvernat de principiile termodinamicii, conform cărora:

– “într-un sistem izolat termic, în interiorul căruia au loc numai schimburi de energie sub formă termică, cantitatea de căldură este constantă” (primul principiu al termodinamicii);

– “într-un sistem izolat termic, în care distribuția inițială a temperaturilor a fost aleatorie, schimbul de căldură are loc de la sine, ireversibil, și întotdeauna de la corpurile cu temperatură mai ridicată la cele cu temperatură mai scăzută până ce sistemul ajunge la echilibru” (al doilea principiu al termodinamicii).

Se observă că primul principiu permite o apreciere cantitativă a schimbului de căldură, iar cel de al doilea conduce la o analiză calitativă a aceluiași fenomen.

Studiul transmisiei căldurii se face în ipoteza că mărimea scalară *temperatura* este o funcție de coordonatele spațiale și temporale ale punctului examinat. În acest context se definește:

– *câmpul de temperatură* θ care reprezintă mulțimea valorilor instantanee ale temperaturii din spațiul cercetat expresia sa analitică în coordonate carteziane, cilindrice sau sferice fiind de forma:

$$(2.1) \quad \theta = f(x, y, z, t) ; \quad \theta = f(r, \varphi, z, t) ; \quad \theta = f(r, \varphi, \psi, t)$$

Câmpul de temperatură este *continuu* dacă pentru deplasări infinitezimale corespund variații infinitezimale ale temperaturii și *discontinuu* dacă la aceleași deplasări corespund variații finite ale temperaturii.

Locul geometric al punctelor din spațiul cercetat care au aceeași temperatură la un moment dat poartă numele de *suprafață izotermă*. Deoarece unul și același punct nu poate avea concomitent temperaturi diferite rezultă că suprafețele izoterme nu se intersectează, se opresc la suprafața corpului sau se situează în interiorul acestuia.

Dacă valoarea temperaturii este constantă în timp, câmpul de temperatură este *staționar* sau *permanent*, iar suprafețele izoterme au poziții fixe în spațiu și pot fi descrise, de exemplu folosind coordonate carteziane, prin:

$$(2.2) \quad A = f(x, y, z)$$

La modificarea în timp a temperaturii câmpul examinat devine *nestaționar* sau *variabil*, iar suprafețele izoterme vor ocupa la momente diferite poziții distincte, deformate sau nu.

Variațiile de temperatură sunt nule de-a lungul suprafeței izoterme, dar ele apar pentru orice direcție ce intersectează această suprafață. În cazul a două suprafețe izoterme vecine (fig. 2.1) variația de temperatură este maximă după direcția normalei \vec{n} comună la cele două suprafețe. În concordanță cu aceste observații se definește:

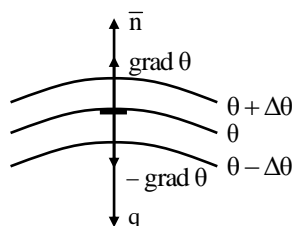


Figura 2.1

– “gradientul de temperatură *grad* θ este acel vector al câmpului de temperatură a căruia direcție coincide cu normala la două suprafețe izoterme vecine, are sensul creșterii temperaturii și modulul egal cu variația temperaturii pe unitatea de lungime a normalei”

$$(2.3) \quad \text{grad}\theta = \vec{n}_0 \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta n} = \vec{n}_0 \frac{\partial\theta}{\partial n} = \frac{\partial\theta}{\partial \vec{n}} \quad [\text{grad}/\text{m}]$$

cu \vec{n}_0 versorul normalei.

Valoarea negativă a gradientului de temperatură $-\text{grad}\theta$ se numește *cădere de temperatură* și mulțimea acestor vectori formează *câmpul căderilor de temperatură*.

Cantitatea de căldură δQ ce trece în timpul dt prin elementul de arie dA al suprafeței izoterme reprezintă *densitatea de flux termic*

$$(2.4) \quad \bar{q} = \frac{\delta \bar{Q}}{dA \cdot dt} = \vec{n}_0 \frac{\delta Q}{dA \cdot dt} \quad [W/m^2]$$

În medii omogene și izotrope, vectorul \vec{q} este orientat după normala la suprafața izotermă și sensul său pozitiv coincide cu sensul scăderii temperaturii (vectorii \vec{q} și $grad\theta$ sunt coliniari dar opuși).

Cantitatea de căldură ce trece prin elementul de suprafață izotermă într-un timp elementar definește *fluxul termic*

$$(2.5) \quad d\bar{\phi} = \frac{d\bar{Q}}{dt} = \bar{q} dA \quad \text{sau} \quad \bar{\phi} = \bar{q} \cdot A \quad [W]$$

În cele ce urmează, pentru simplitate, se va renunța la simbolul de vector, mărimile fiind scrise similar cu cele scalare indiferent de natura lor.

Procesul de propagare al căldurii este un fenomen complex și descompunerea sa în moduri mai simple de realizare (conducție, convecție, radiație) are drept scop facilitarea calculelor, dar fără neglijarea urmării fenomenului în toată amploarea sa.

2.2 Conducția termică

Conducția termică este procesul de transmitere a căldurii în interiorul unui corp cu o repartiție neuniformă a temperaturii sau între corpuri cu temperaturi diferite, aflate în contact direct.

Propagarea căldurii prin conducție se face cu o viteză determinată, care este maximă la metale și minimă la gazele ionizate în repaus mediu relativ. Conducția termică este caracteristică solidelor, la fluide intervenind numai în stratul limită sau în straturi de grosime foarte mică. În instalațiile electrotermice, conducția prezintă importanță la calculul căldurii pierdute prin pereții cuptoarelor și a căldurii transmise în interiorul materialelor ce se încălzesc.

Legea generală de transmitere a căldurii prin conducție termică, numită legea lui Fourier (stabilită experimental în 1882), are următorul enunț: *cantitatea de căldură transmisă în unitate de timp, prin unitate de suprafață a unui corp este proporțională cu căderea de temperatură:*

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{considerându-se } Ox \text{ direcția de propagare a căldurii)}$$

Factorul de proporționalitate " λ " se numește conductivitate termică (sau coeficient de conductivitate termică) și caracterizează proprietățile intrinseci ale corpurilor referitoare la conducția termică. Valoarea sa diferă de la corp la corp, tabelul X.x exemplificând pentru câteva materiale uzuale. Unitatea de măsură a conductivității termice este:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{W}{m \cdot grad}$$

Din punct de vedere electric și termic, metalele se comportă similar, ambele conductivități fiind determinate de capacitatea electronilor liberi de a conduce atât curentul electric cât și căldura. Dar această corelație electric-termic nu se păstrează și la alte materiale, întrucât poate crește importanța fotonilor ca purtători de energie în nemetale. Spre exemplu, diamantul care este un izolator electric are o conductivitate mult superioară unor materiale excelent conductiv electric precum Ag, Au sau Cu.

Conductivitatea termică a unui material depinde de mai mulți parametri precum densitate, umiditate, dar în principal de structură și temperatură. Substanțele cristaline pure prezintă conductivități termice diferite de-a lungul diferitelor axe ale cristalului, datorită diferențelor de comportare ale fotonilor pe direcția acestora. De exemplu, safirul are o conductivitate termică de 2.6 W/(m·K) perpendicular pe axa c la 373 K, și de 6000 W/(m·K) la 36 grade față de axa c și 35 K.

Aerul și celelalte gaze pot fi buni izolatori termici în absența convecției. De aceea multe materiale izolatoare nu sunt altceva decât o sumă de cavități (goluri) pline cu gaz care împiedică convecția. Spre exemplu polistirenul expandat sau extrudat, ori spuma poliuretanică.

Legea lui Fourier poate lua și alte forme atunci când se exprimă în funcție de fluxul termic sau

Material	Conductivitate termică, λ [W/m.K]
Aer	0,025
Lemn	0,4 .. 0,04
Alcooluri și uleiuri	0,1 .. 0,21
Pământ	0,15
Cauciuc	0,16
PVC	0,16
Epoxy (unfilled)	0,19
Epoxy(silica-filled)	0,30
Apă (lichid)	0,6
Lubrifiant termic	0,7 .. 3
Sticlă	1,1
Gheață	2
Piatră nisipoasă	2,4
Oțel inox	15
Plumb	35,3
Aluminiu	237
Aur	318
Cupru	401
Argint	429
Diamant	900 .. 2320

cantitatea de căldură:

$$d\phi = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot dA \quad \text{sau} \quad dQ = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot A \cdot dt$$

2.3 Convecția termică

Convecția este procesul de transmitere a căldurii între un fluid și un corp solid.

În cazul cuptoarelor electrice convecția prezintă importanță la calculul termic al cuptoarelor funcționând la temperatură joasă (sub 700°C), la determinarea pierderilor de căldură prin pereții cuptoarelor și a căldurii evacuate în instalațiile de răcire cu aer sau apă.

Convecția poate fi *naturală* sau *forțată*. Convecția naturală apare datorită circulației naturale a fluidului: straturile mai calde având greutate specifică mai mică se ridică, iar cele reci cu greutate specifică mai mare coboară. Convecția este forțată dacă se datorează unei acțiuni exterioare (ventilare, pompare).

Fluxul termic transmis prin convecție, între suprafața unui perete solid aflat la temperatura θ_1 și fluidul ce-l spală aflat la temperatura θ_2 , este dat de legea lui Newton:

$$\phi = \alpha_c \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot A \quad [\text{W}]$$

unde: α_c coeficient de transmitere a căldurii prin convecție, $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$, iar A este suprafața pe care are loc schimbul de căldură, $[\text{m}^2]$.

Valoarea lui α_c depinde de viteza de deplasare a fluidului, de temperaturile peretelui și ale fluidului, de dimensiunile geometrice și forma peretelui, de proprietățile fizice ale fluidului (conductivitate termică, căldură specifică, densitate, vâscozitate).

Determinarea coeficientului α_c este relativ dificilă. În literatură, fie se indică o serie de relații empirice, fie se dă un calcul mai exact bazat pe criteriile de similitudine. Domenii orientative pentru valorile transmisivității prin convecție pot fi: pentru convecția liberă a aerului $3 \dots 30 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, pentru convecția forțată a aerului $10 \dots 500 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, pentru convecția forțată a apei $200 \dots 5000 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

Raportul $\frac{1}{\alpha_c \cdot A}$, $[\text{K}/\text{W}]$, reprezintă rezistența termică de convecție.

2.4 Radiația termică

Dacă un corp este încălzit, o parte a energiei sale termice se transformă în energie radiantă, transportată de radiații electromagnetice de o anumită lungime de undă, numite radiații *infraroșii* sau *calorice*. Practic, orice corp care nu se află la temperatura 0K (0 absolut) emite radiații.

Radiația este singura formă de transfer a căldurii care poate avea loc în absența mediului material (deci inclusiv în vid). Ea este rezultatul direct al mișcării atomilor și moleculelor din material. Deoarece aceste particule conțin sarcini electrice, mișcarea acestora produce radiație electromagnetică care poartă cu ea energie. Totodată, suprafața corpului este bombardată de radiația altor corpuri. Fiindcă cantitatea de radiație emisă depinde de temperatura corpului, bilanțul energetic arată un transfer de căldură de la corpuri de temperaturi mai mari spre cele de temperaturi mai mici.

În instalațiile electrotermice, transmiterea căldurii prin radiație termică este primordială la încălzirea și uscarea IR și la cuptoarele de *temperatură înaltă* ($>700^\circ\text{C}$) cu acțiune indirectă. Ea are importanță la determinarea pierderilor de căldură prin ușile și capacele deschise ale cuptoarelor și a celor de la suprafața pieselor încălzite sau a băilor de metal topit.

Corpul emițător. Proprietățile radiante ale unei surse într-un punct sunt puse în evidență de *emisie specifică*, (*numită și radianță sau excitanță*) *energetică*:

$$M = \frac{d\phi}{dA}$$

adică raportul dintre fluxul energetic emis de un element al suprafeței ce conține punctul și aria acestui element. Prin raportare la un anumit interval de lungimi de undă se obține "emisie spectrală specifică"

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} = \frac{d\phi}{dA \cdot d\lambda}$$

Corpul receptor. Conform legii conservării energiei, pentru un corp receptor fluxurile termice incident

ϕ_i , absorbit ϕ_a , reflectat ϕ_r și transmis ϕ_t sunt legate prin relația:

$$\phi_i = \phi_a + \phi_r + \phi_t$$

Definind coeficienții de absorbție $\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$, de reflexie $\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$ și transmisie $\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$, această relație devine:

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

Radiația corpului negru. Corpul negru reprezintă un receptor și un radiator integral, adică un corp ipotetic ideal caracterizat printr-un coeficient de absorbție $\alpha = 1$.

Conform legii lui Stefan –Boltzmann, fluxul termic emis de radiatorul integral (corpul negru) de suprafață $A[m^2]$ aflat la temperatura $T_1 [K]$, în mediul ambiant aflat la temperatura $T_2 [K]$, este:

$$\phi = \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A \quad , [W]$$

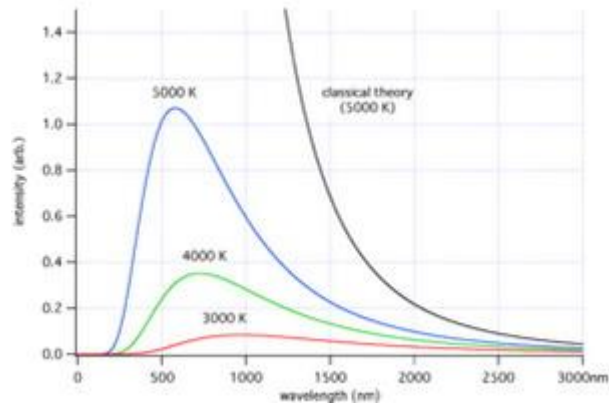
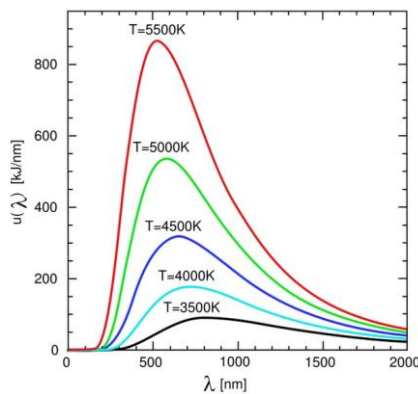
în care $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$ reprezintă constanta de radiație a corpului negru (constanta Stefan-Boltzman). Dacă $T_1 \gg T_2$, atunci emisia specifică totală a corpului negru depinde numai de temperatura sa absolută, adică

$$M = \sigma \cdot T^4$$

Emisia specifică spectrală a radiatorului integral, aflat la temperatura $T = ct.$, ce emite pe intervalul de lungime de undă $[\lambda, \lambda + \Delta\lambda]$, depinde pe lângă temperatura absolută a corpului și de lungimea de undă a radiației și este dată de Legea Wien –Plank:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

unde constantele de radiație au valorile: $c_1 = 3,7347 \cdot 10^{-2}, [W/m^2]$, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}, [W/m^2]$. Reprezentarea grafică din Fig. X.xx arată că maximum puterii radiate diferă în funcție de temperatură și că el se deplasează spre lungimi de undă mai mici λ_{max} odată ce temperatura radiatorului crește. Acest fapt este confirmat de legea lui Wien (legea deplasării maximumului): $\lambda_{max} T = 2897,8 [\mu m, K]$.



Radiația corpului real. Legile lui Kirchhoff se referă la absorbția corpurilor cenușii. Prima lege, dedusă pe cale termodinamică, precizează că orice corp absoarbe energie radiantă pe aceleași lungimi de undă pe care emite.

A doua lege permite determinarea emisie specifice M' a unui corp cenușiu aflat la o anumită temperatură și stabilește legătura dintre emisie și absorbție. Pentru un corp emițător, comparația cu corpul negru se realizează prin intermediul emisivității totale (numită și grad de înnegrire al corpului):

$$\varepsilon(T) = \frac{M'(T)}{M(T)} \quad \text{sau spectrale: } \varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{M_\lambda(\lambda, T)}$$

Altfel spus, pentru un corp real, emisia specifică este:

$$M' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Emisivitatea totală a corpului negru este $\varepsilon=1$, așa cum coeficientul de absorbție este $\alpha=1$. Legea a 2-a lui Kirchhoff arată că raportul dintre emisia specifică totală sau spectrală și coeficientul de absorbție α este același pentru toate corpurile. Raportul este egal cu emisia specifică totală sau spectrală a corpului negru și depinde numai de temperatură:

$$\frac{M'(T)}{\alpha} = M(T) \text{ sau } \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{\alpha_\lambda} = M_\lambda(\lambda, T)$$

Adică $\alpha(T) = \varepsilon(T)$ respectiv $\alpha_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T)$.

Emisivitatea (gradul de înnegrire) ε al corpurilor depinde de material și de calitatea suprafeței având valori ridicate pentru suprafețe mate, de culoare închisă și valori scăzute pentru suprafețe lucioase, de culoare deschisă. Așadar trebuie reținut că:

- culorile deschise împiedică transmiterea căldurii, iar cele închise o favorizează
- pentru a păstra căldura, cuptoarele se vopsesc în culori deschise (vopsea pe bază de Al)
- instalațiile și piesele ce trebuie să disipeze căldura se vor vopsi în culori închise și mate.

Totodată, legea Stefan – Boltzmann pentru corpul real devine:

$$\phi = \varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A \text{ , [W]}$$

în care *produsul* $\varepsilon \sigma$ se numește coeficient redus de radiație.

Fluxul termic transmis prin radiație între două suprafețe. Dacă fluxul termic este transmis prin radiație între două corpuri de suprafețe oarecare A_1 [m²] și A_2 [m²], aflate la temperaturile T_1 [K] și T_2 [K], atunci:

$$\phi = \varepsilon_{r12} \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A_{12} \text{ , [W]}$$

în care ε_{r12} : $\varepsilon_{r12} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}$ poartă numele de *coeficient reciproc de radiație*.

S-a notat cu $A_{12} = \varphi_{12} A_1 = \varphi_{21} A_2$ suprafața reciprocă redusă de radiație, [m²], și cu φ_{12} , φ_{21} coeficienții care reprezintă fracțiunea din radiația totală a unui corp care ajunge pe celălalt corp (pentru corpuri particulare valorile lor sunt date în literatură).

Spre exemplu, în cazurile particulare clasice avem:

a) *pereți plan-paraleli:*

$$\left. \begin{array}{l} A_{12} = A_1 = A_2 \\ \varphi_{12} = \varphi_{21} = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon_{12} = \frac{c_n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \text{ și } \phi_{12} = c_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A_1$$

b) *pereți cilindrici coaxiali:*

$$\left. \begin{array}{l} A_{12} = A_1 \\ \varphi_{12} = 1, \varphi_{21} = A_1 / A_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon_{12} = \frac{c_n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \text{ și } \phi_{12} = c_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot A_1$$

2.5 Transmiterea complexă a căldurii

În marea majoritate a proceselor termice, transmiterea căldurii se datorează acțiunii conjugate a propagării căldurii prin convecție, conducție și radiație. Cele 3 componente se desfășoară simultan și se influențează reciproc.

Fluxul termic complex transmis între un corp solid de suprafața A, de temperatură relativă θ_1 și un fluid

aflat la temperatura θ_2 , în ipoteza neglijării conductivității termice, este:

$$\phi = \phi_c + \phi_r$$

în care fluxul de convecție ϕ_c este dat de legea lui Newton, iar fluxul termic de radiație ϕ_r de legea lui Stefan-Boltzman, în care $A_{12} = A$.

În astfel de cazuri practice, fluxul termic complex poate fi calculat cu următoarea expresie :

$$\phi = \alpha \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot A, \text{ [W]}$$

în care α este un coeficient compus de transmitere a căldurii prin convecție și radiație,

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r = \alpha_c + \frac{C_r}{100} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^2 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{T_1}{100} + \frac{T_2}{100} \right), \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Valorile coeficientului α depind de material și de temperatură. Ultima relație permite reducerea transmiterii complexe a căldurii prin convecție și radiație la o transmitere simplă prin convecție.

Raportul $\frac{1}{\alpha \cdot A}$, [K/W], reprezintă rezistența termică complexă.

Fluxul termic transmis, printr-un perete plan format din n straturi și spălat în interior de un fluid (gaz încălzit, metal topit) aflat la temperatura θ_i iar în exterior de aerul aflat la temperatura θ_c , este :

$$\phi = \frac{\theta_i - \theta_c}{\sum R_t} = \frac{\theta_i - \theta_c}{\frac{1}{\alpha_i \cdot A_i} + \sum_1^n \frac{s_k}{\lambda_k \cdot A_{mk}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot A_e}}$$

unde: $\sum R_t$ = suma rezistențelor termice; A_i , A_e = suprafața interioră, exterioară a peretelui; A_{mk} = suprafața de calcul a stratului k; α_i , α_e = coeficient interior, respectiv exterior de transmitere a căldurii prin convecție și radiație; λ_k = conductivitatea termică medie a stratului k.

În cazul peretelui cilindric neomogen, format din n straturi, fluxul termic este:

$$\phi = \frac{(\theta_i - \theta_c) \pi \cdot L}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_k} \cdot \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} + \frac{1}{\alpha_e \cdot A_e}}, \text{ [W]}$$

3. ÎNCĂLZIREA PRIN REZISTENȚĂ ELECTRICĂ

Instalațiile de încălzire cu rezistență electrică cuprind o gamă largă de echipamente bazate pe încălzirea determinată de trecerea curentului electric printr-un element rezistiv.

Cantitatea de căldură dQ care apare într-un interval de timp dt în elementul rezistiv de rezistență R , parcurs de curentul electric de intensitate I , este dată de legea lui Joule-Lenz:

$$dQ = RI^2 dt$$

În funcție de modul de transfer al căldurii către materialul care urmează a fi încălzit instalațiile cu încălzire prin rezistență pot fi clasificate după cum urmează:

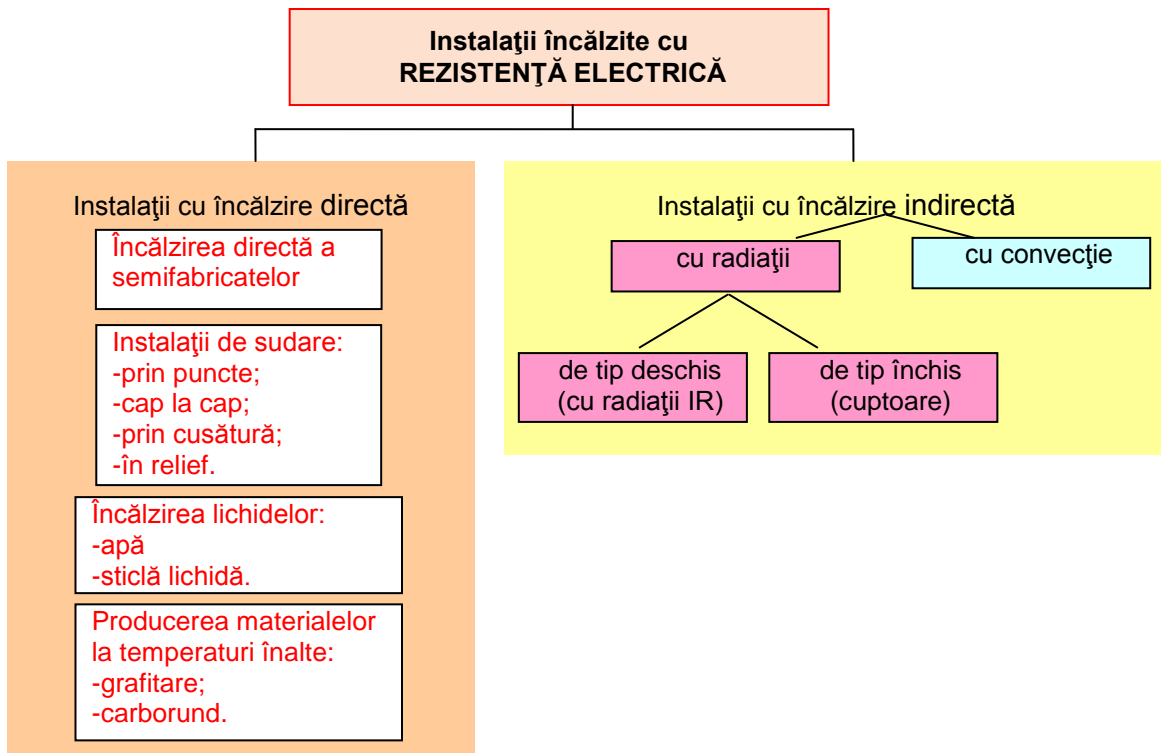


Fig.3.1 Tipuri de încălzire cu rezistență electrică

În instalațiile de încălzire cu *acțiune directă*, căldura se dezvoltă prin trecerea curentului prin materialul ce urmează a fi încălzit.

În instalațiile cu *încălzire indirectă*, căldura se dezvoltă într-un element încălzitor special, de la care se transmite spre materialul ce urmează a fi încălzit. Transferul de căldură de la elementul încălzitor spre material se face printr-o combinație de convecție și radiație. Dacă diferența de temperatură între elementul încălzitor și material este sub 400-450 °C procesul predominant este *convecția*, iar dacă sunt diferențe de temperatură mai mari, atunci predomină *radiația*.

3.1 Cuptorul electric cu rezistoare

Este, fără îndoială, cel mai răspândit și cel mai cunoscut dintre instalațiile electrotermice industriale. În concordanță cu clasificarea făcută anterior denumirea "cuptor cu rezistoare" acoperă instalații foarte diverse atât ca principiu de transmitere a căldurii cât și ca structură, ele depinzând de operația tehnologică pe care o realizează. Astfel se disting:

-*cuptoare cu radiație în ambianță caldă* (cuptoare pentru tratamente termice, cuptoare de coacere, ș.a.);

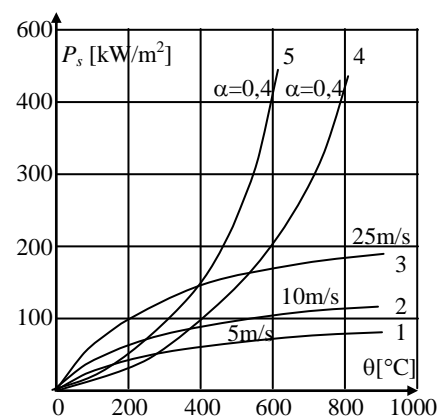


Fig.3.2 Puterea specifică P_s transmisă prin radiație și convecție; 1,2,3 – transmiterea prin convecție; 4,5 – transmiterea prin radiație

-*cuptoare cu radiație în ambianță rece*, numite și cuptoare cu infraroșu (uscare, coacere, tratamente termice de suprafață);

-*cuptoare cu conducție termică*, adaptate la încălzirea lichidelor (băi de tratamente termice de suprafață, reîncălzirea și stocarea apei calde);

-*cuptoare cu convecție termică pentru încălzirea gazelor* (uscare);

-*cuptoare cu conducție electrică pentru topire* (metale neferoase, sticlă) și *reîncălzirea apei* (cazane cu electrozi) etc.

Descriere și funcționare. Cuptoarele cu rezistoare sunt constituite în principal din:

-o cameră de încălzire în care se află șarja și care este constituită din materiale refractare sau semirefractare. Stratul (sau straturile) de materiale izolante asigură izolația termică;

-o carcasă, de obicei metalică, care asigură rigiditatea construcției;

-rezistoarele electrice + sistemul de alimentare;

-sistemul de reglare a temperaturii;

-dispozitive auxiliare, turbine de reciclare a aerului pentru cuptoarele cu convecție forțată sau ventilatoare, sisteme de răcire a unor părți ale cuptorului generatoare de atmosfere particulare.

Cantitatea de căldură dQ disipată în elementul rezistiv determină atât încălzirea acestuia prin dQ_1 , cât și disiparea în mediul ambiant a unei cantități de căldură dQ_2 .

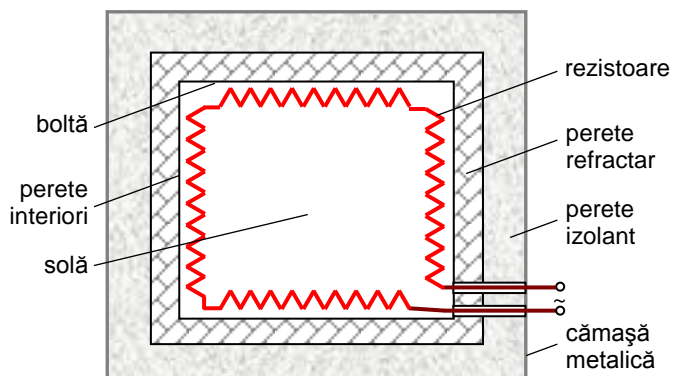
Ecuția de bilanț termic va fi:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2,$$

unde: $dQ_1 = m \cdot c \cdot d\theta$

$dQ_2 = \alpha \cdot A_l \cdot (\theta - \theta_0) \cdot dt$

și Fig.3.3 Schema simplificată a unui cuptor electric cu rezistoare



notațiile m - masa elementului rezistiv, c -căldura masică (specifică) a materialului rezistiv, $d\theta$ -variația de temperatură, θ - temperatura materialului rezistiv, θ_0 - temperatura mediului ambiant, A_l -aria laterală a elementului rezistiv, dt -variația de timp, α -transmisivitatea termică complexă.

Ecuțiile de încălzire și răcire ale rezistorului

Dacă notăm cu P puterea electrică absorbită de elementul rezistiv, ecuația de bilanț devine:

$$P \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta + \alpha \cdot A_l \cdot (\theta - \theta_0) \cdot dt \quad (*)$$

care poate fi integrată, în ipoteza că P , c și α sunt constante, în funcție de temperatură.

În mod uzual, $C = c \cdot m$ definește capacitatea termică a materialului rezistiv, iar $A = \alpha \cdot A_l$ definește capacitatea de transmisie a fluxului termic. Atunci când temperatura ajunge la valoarea maximă θ_{max} și deci $d\theta = 0$ (regim stabilizat), se obține:

$$P \cdot dt = A \cdot (\theta_{max} - \theta_0) \cdot dt$$

sau, mai simplu,

$$\frac{P}{A} = \theta_{max} - \theta_0$$

Dacă ecuația de bilanț (*) se împarte prin $A \cdot dt$ se obține:

$$\frac{P}{A} = \frac{C}{A} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta - \theta_0$$

și, folosind penultima relație, obținem:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_{max} - \theta}{\frac{C}{A}}$$

Raportul C/A din punct de vedere dimensional este timp și se definește ca fiind constanta de timp T_i a procesului de încălzire. Atunci :

$$\frac{dt}{T_i} = \frac{d\theta}{\theta_{max} - \theta}$$

Integrând, pentru o variație a temperaturii de la valoarea inițială θ_i la o temperatură oarecare θ într-un interval de timp $[0, t]$, se obține:

$$\frac{t}{T_i} = -\ln(\theta_{max} - \theta) \Big|_{\theta_i}^{\theta} = -\ln \frac{\theta_{max} - \theta}{\theta_{max} - \theta_i}$$

Rezultă că ecuația de încălzire este:

$$\theta = \theta_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right) + \theta_i \cdot e^{-\frac{t}{T_i}}$$

Dacă în momentul în care corpul (rezistorul) parcurs de curent electric atinge temperatura dorită θ_d se întrerupe alimentarea cu energie electrică, atunci începe procesul de răcire. În acest caz ecuația de bilanț energetic se scrie:

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta - \theta_0 = 0,$$

deoarece puterea disipată în material e nulă ($P = 0$).

Dacă se notează cu T_r constanta de timp a procesului de răcire, atunci:

$$\frac{d\theta}{\theta - \theta_0} = -\frac{dt}{T_r}$$

Integrând pentru o descreștere a temperaturii de la θ_d la o valoare θ în intervalul $[0, t]$, se obține :

$$\ln(\theta - \theta_0) \Big|_{\theta_d}^{\theta} = -\frac{t}{T_r}, \text{ sau:}$$

$$\theta = \theta_d \cdot e^{-t/T_r} + \theta_0 \cdot \left(1 - e^{-t/T_r} \right) \quad (2)$$

Analizând ecuația de încălzire (1) se observă că, pentru un material dat aflat la o temperatură inițială θ_i fixată, procesul de încălzire va depinde de parametrii T_i și θ_{max} . Dar, pentru un material dat, constanta de timp T_i nu este practic posibil de modificat. Deci un reglaj al procesului de încălzire poate fi făcut doar prin valori diferite ale lui θ_{max} .

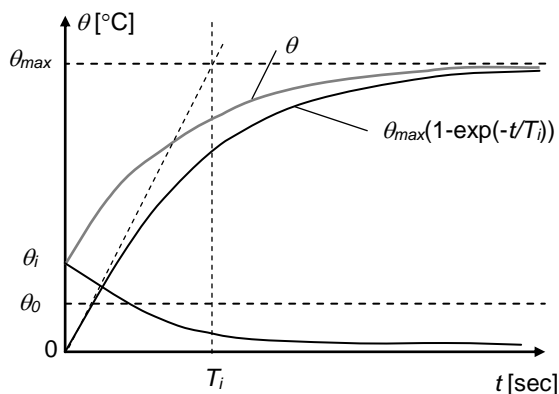


Fig.3.4 Curbe de încălzire ale rezistorului

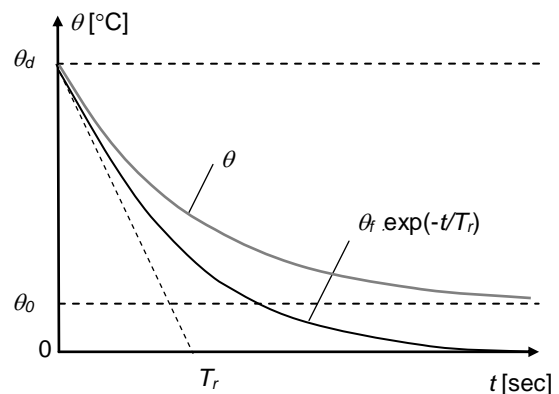


Fig.3.5 Curbe de răcire ale rezistorului aflat la temperatura inițială θ_d

Într-un proces de încălzire cazul ideal este atunci când procesul are loc instantaneu, astfel încât pierderile termice să fie nule și deci randamentul termic al procesului se obține maxim. Cu cât procesul de încălzire este mai lung, cu atât pierderile vor crește și randamentul procesului se va diminua.

Rezultă că, creșterea randamentului și a productivității pot fi făcute prin reducerea duratei procesului de încălzire a corpului (rezistorului) până la temperatura dorită θ_d . Astfel, la început se disipă în material puterea P_1 pentru care s-ar obține θ_{max1} , după care, la momentul t_1 , puterea disipată în material devine P_2 careia îi corespunde θ_{max2} . Rezultă o scurtare a procesului cu timpul $\Delta t = t_2 - t_1$, și deci o reducere a pierderilor de căldură spre exterior.

Analizând ecuația de răcire (2) se observă că procesul de răcire la temperatura θ_d , atunci când temperatura mediului ambiant este θ_0 , este determinat numai de constanta de timp T_r . Deoarece $T_r = \frac{C}{A}$, rezultă că o creștere a vitezei de răcire este posibilă numai prin creșterea coeficientului global α de transmisie termică. Acest lucru este realizabil prin răcirea forțată a materialului.

Dimensionarea rezistoarelor cuptorului

Dimensionarea rezistoarelor are ca scop determinarea secțiunii transversale și a lungimii încălzitorului. Calculele pornesc de la ipoteza că puterea P dezvoltată de rezistor prin efect Joule-Lenz se transmite integral, prin radiație, piesei și căptușelii, adică:

$$P = P_s A \quad \text{- ecuația de echilibru termic [W]}$$

în care A este suprafața laterală a încălzitorului, iar P_s puterea specifică admisibilă a încălzitorului (putere specifică radiată) care se determină cu

$$P_s = \alpha_{ef} \varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_p^4) \quad , [W/m^2]$$

unde: ε_r - grad redus de înnegrire al rezistorului; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - constanta Stefan-Boltzmann; α_{ef} - coeficient de eficiență a radiației încălzitorului, folosit în calcule practice, care depinde de coeficienții și suprafețele reciproce de radiație; θ_r , θ_p - temperaturile de lucru ale rezistorului și piesei, [°C], temperaturile absolute fiind $T_r = \theta_r + 273$; $T_p = \theta_p + 273$, [K];

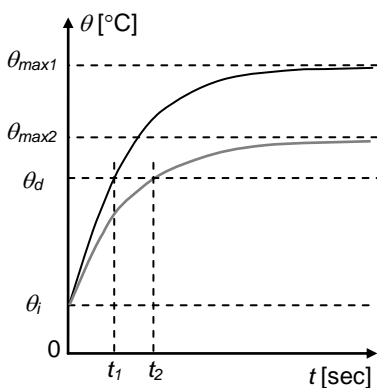


Fig.3.6 Creșterea vitezei de încălzire prin creșterea puterii disipate

Temperatura elementului încălzitor trebuie să fie superioară temperaturii de lucru din incinta cuptorului, de obicei respectându-se

relația: $\theta_r = \theta_p + (50 \dots 150)^\circ\text{C}$.

Încălzitoarele se pot conecta după scheme mono- sau trifazate diverse, dar tensiunea de lucru nu poate depăși $U \leq 500$ V din considerente de tehnică a securității muncii. Puterea disipată pe un rezistor se limitează la 20 kW din considerente constructive. La puteri mai mari, secțiunile transversale rezultate fac dificilă sau imposibilă montarea încălzitorului în cuptor.

Ca putere electrică, puterea P transformată în căldură de rezistor este:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{s U^2}{L \rho} \quad \text{- ecuația de echilibru electric [W]}$$

unde: ρ - rezistivitatea materialului încălzitorului la temperatura de lucru, [Ω]; L - lungimea pe fază a încălzitorului, [m]; s - aria secțiunii transversale a încălzitorului, [m^2];

Rezistoarele sunt fie circulare (sârmă, bară) de secțiune $s = \pi d^2/4$ (d - diametrul rezistorului) și arie laterală $A = \pi d L$, fie dreptunghiulare (bandă) când secțiunea este $s = a \cdot b = mb^2$ (se impune raportul dintre lungimea a și lățimea b a laturilor dreptunghiului să fie $m = a/b = 5 \dots 12$) iar aria laterală $A = 2(a+b)L$.

Pentru rezistorul de secțiune circulară, sistemul celor două ecuații de echilibru poate fi scris:

$$\begin{cases} P = P_s \pi d L \\ P = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho L} \end{cases}$$

și are două necunoscute: d și L . Rezolvând sistemul rezultă:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho P^2}{\pi^2 U^2 P_s}} \quad [\text{m}]; \quad L = \sqrt[3]{\frac{U^2 P^2}{4\pi\rho P_s^2}} \quad [\text{m}]$$

Printr-un calcul similar, pentru rezistorul de secțiune rectangulară se obține:

$$b = \sqrt[3]{\frac{\rho P_f^2}{2m(m+1)U_f^2 P_s}} \quad [\text{m}]; \quad L = \sqrt[3]{\frac{mU_f^2 P_f}{4(m+1)^2 \rho P_f^2}} \quad [\text{m}];$$

Particularități ale transmisiei căldurii într-un cuptor cu rezistoare

Într-un cuptor cu rezistoare transmisia căldurii se face printr-o îmbinare a legilor cunoscute: conducție și, mai ales, convecție și radiație.

Transmisia prin *conducție* nu intervine în transferul căldurii între perete și piesă ci numai la:

- transmisia căldurii în interiorul piesei și egalizarea temperaturilor;
- pierderile termice în interiorul cuptorului.

Transmisia prin *radiație* este preponderentă la cuptoarele care funcționează la temperaturi mai mari de 500°C și este singurul mod de transmitere a căldurii la cuptoare cu temperaturi peste 700°C.

Transmisia prin convecție are loc prin:

- *convecție naturală*, datorată diferențelor de temperatură din camera de încălzire care provoacă o mișcare a fluidului din zonele calde (rezistoare) spre cele mai reci (piesă);
- *convecție forțată*, când mișcarea fluidului e obținută printr-un procedeu mecanic.

Convecția joacă un rol important îndeosebi la cuptoarele de temperaturi joase.

Utilizarea convecției forțate poate asigura o densitate de putere ridicată și o omogenizare a temperaturilor.

În realitate transferul de căldură se face simultan prin radiație și convecție, fluidul care asigură convecția fiind aerul sau atmosfera particulară din interiorul cuptorului.

La cuptoarele de medie și joasă temperatură, atunci când se dorește o reglare precisă a temperaturii sau o creștere rapidă a acesteia, se recurge la convecția forțată.

În domeniul de medie și joasă temperatură se întrebuițează băi de săruri sau metale topite în care sunt imersate prize ce trebuie încălzite rapid, deoarece coeficientul de convecție (deci transferul de căldură) este mult mai mare la lichide decât la gaze.

La cuptoarele de înaltă temperatură radiația rămâne preponderentă și asigură o densitate de putere ridicată.

Din punct de vedere al transferului termic există deci 2 mari familii de cuptoare cu rezistoare:

- cuptoare cu radiație pentru temperaturi înalte (> 600°C);
- cuptoare cu convecție forțată pentru temperaturi joase și medii (până la 700-750°C).

Convecția naturală este folosită pentru cuptoare de joasă temperatură (între 100 și 150°C) care se mai numesc *etuve*.

Puterea totală dezvoltată de elementele încălzitoare este transmisă pe de o parte șarjei și, pe de altă parte, pereților cuptorului. Puterea utilă este cea primită de către șarjă, cealaltă constituind pierderile:

- pierderi de căldură acumulate în pereți, suport, rezistențe etc. Q_a ;
- pierderi de căldură conductive prin pereții cuptorului (transmisie), Q_b ;
- pierderi de căldură radiative prin ușa cuptorului, punctele de măsură, Q_r , etc.

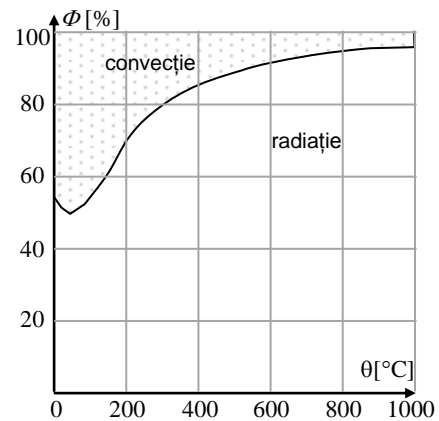


Fig.3.7 Repartiția fluxului termic Φ între radiație și convecție

Dacă Q_u este căldura utilă, atunci bilanțul termic, pe ciclu, al unui cuptor cu regim de lucru intermitent poate fi scris:

$$P \cdot t = Q_u + (Q_a + Q_t + Q_r)$$

Mărimea pierderilor depinde de terminarea sau nu a ciclului de funcționare. În cazul cuptoarelor cu regim de funcționare continuu, puterile se determină neglijând căldura acumulată de zidărie, Q_a .

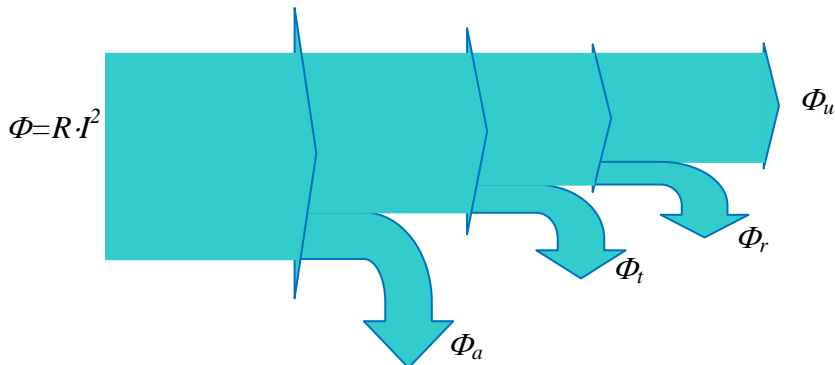


Fig. 3.8 Repartiția fluxului termic într-un cuptor cu rezistoare

Un randament bun al cuptorului poate fi obținut în 3 condiții:

- izolându-l la maximum pentru a minimiza pierderile și, dacă este vorba de un cuptor în funcționare discontinuă, reducând la maxim masa cuptorului (fibrele ceramice fac posibilă obținerea unui astfel de obiectiv);
- utilizând rezistoare care pot să lucreze la înaltă temperatură și care permit fluxuri termice intense;
- controlând puterea de alimentare printr-o reglaj fin (de ex: prin modularea puterii cu module electronice de putere).

Condiții constructive ale unui cuptor cu rezistoare. Construcția cuptorului va depinde de destinația sa (de reîncălzire, de tratament termic, de coacere, de polimerizare, de topire, de uscare), de modul de manipulare (bandă rulantă, vibrații), de natura atmosferei și a mediului (aer, atmosferă controlată, vid, mediu lichid, baie fluidă), de forma dorită (cu cameră, cu creuzet, cu tambur, cu clopot) etc.

Camera de încălzire trebuie să asigure realizarea unei atmosfere corespunzătoare și împiedicarea dispersiei căldurii spre exterior, rezistența mecanică necesară, dar și o rezervă termică cu scopul de:

- a menține un flux de căldură ridicat către șarjă;
- o mai bună repartiție a căldurii datorită reemisiai termice a pereților către șarjă.

Aceste ultime condiții impun ca incinta să absoarbă o anumită cantitate de căldură, ceea ce vine în contradicție cu asigurarea unui randament termic ridicat. Aici este necesară stabilirea unui optim..

3.2 Instalații de încălzire și uscare cu radiații infraroșii

Principii fizice

Utilizarea radiațiilor infraroșii este unul dintre cele mai răspândite procese în industrie. Acestea aparțin spectrului radiațiilor electromagnetice fiind amplasate între radiațiile vizibile și microunde, domeniul lungimilor de undă fiind 0,76...1000 μm . Dar în aplicațiile tehnice prezintă interes doar domeniul 0,76..10 μm , iar acesta este descompus la rândul lui în:

- radiații IR scurte: 0,76 – 2 μm
- radiații IR medii: 2 – 4 μm
- radiații IR lungi: 4 – 10 μm

Radiațiile infraroșii nu sunt absorbite integral de corpul radiat. Factorul de absorbție, $\alpha < 1$, este dependent de lungimea de undă a radiației incidente și de proprietățile suprafeței iradiate (rugozitate, proprietăți chimice, culoare, grosime, temperatură etc). Numai radiația absorbită este transformată în căldură. Spectrele de absorbție pentru corpurile opace sau semi-transparente solide sau lichide sunt în general curbe continue și pun în evidență vârfuri de absorbție pentru anumite lungimi de undă sau benzi de lungimi de undă. Variația factorului de absorbție pentru o peliculă de apă în funcție de lungimea de undă și de grosimea stratului este dată în Fig.3.9.

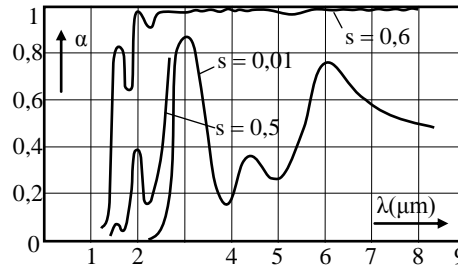
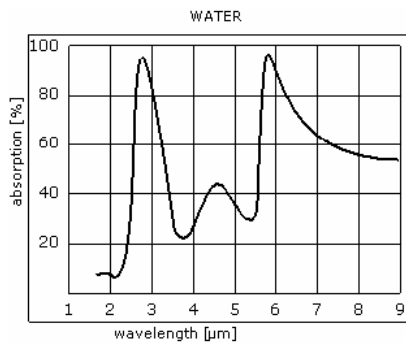


Figura 3.9

Spectrul de absorbție în infraroșu al apei în straturi de grosimi diferite

Obs. Pentru calculul încălzirii și uscării cu radiații infraroșii a materialelor pe bază de celuloză se admite o grosime aproximativă pentru pelicula de apă de 0,6 mm. Radiațiile infraroșii de lungime de undă mai mică de 1,3 mm vor fi transmise în totalitate de pelicula de apă, care nu se va încălzi. În schimb, materialul suport le va absorbi și se va încălzi. Datorită faptului că în majoritatea cazurilor apa se află legată chimic cu corpul care trebuie uscat, la calculul lungimii de undă a maximului de absorbție care definește tipul sursei de radiații se va ține seama de coeficienții de absorbție ai tuturor elementelor componente.

Transferul de căldură prin radiație IR se supune totodată celor două legi ale iluminării: legea pătratului distanțelor și legea cosinusului unghiului de incidență.

Eficiența încălzirii cu radiații infraroșii poate fi bună numai atunci când sursa va emite pe lungimi de undă cât mai apropiate de acelea pentru care factorul de absorbție al corpului este maxim. Dar lungimea de undă este dependentă de temperatura sursei, conform legii lui Wien (legea deplasării maximului)

$$\lambda_{max}T = const.$$

Rezultă că prin alegerea potrivită a surselor ori prin modificarea temperaturii lor de funcționare se poate obține o potrivire între sursă și materialul tratat.

Adâncimea de pătrundere

Atenuarea radiației de intensitate I la străbaterea unui strat de grosime elementară dx este

$$\Delta I = -k \cdot I \cdot dx$$

în care

- ΔI este diferența dintre intensitatea radiației incidente și absorbite de corp I_0 și intensitatea radiației la ieșirea din corp I_e , iar

- k este numit constantă de absorbție (dacă se face abstracție de fenomenele de difuziune).

Dacă d este grosimea corpului, prin integrare între limitele 0 și d , se obține *Legea absorbției* (Lambert-Bouguer):

$$\frac{I_e}{I'_0} = e^{-kd}$$

Raportul

$$\tau' = \frac{I_e}{I'_0}$$

reprezintă factorul de transmisie totală sau factorul de transparență, iar mărimea

$$\alpha' = \frac{I'_0 - I_e}{I'_0} = 1 - e^{-kd}$$

reprezintă factorul de absorbție globală pură. Fiindcă s-au considerat doar radiațiile incidente pătrunse în corp (fără pierderile datorate reflexiei), conform principiului conservării energiei: $\alpha' + \tau' = 1$

Adâncimea de pătrundere δ a radiațiilor IR se consideră acea distanță de la suprafața spre interiorul materialului până la care intensitatea radiațiilor care îl străbat scade la 1% din valoarea inițială. Adică, la adâncimea δ , intensitatea radiației este

$$I_\delta = 0,01 \cdot I'_0$$

și atunci, conform legii Lambert-Bouguer (prin integrare între limitele 0 și d)

$$\frac{I_\delta}{I'_0} = 0,01 = e^{-k\delta}$$

de unde:

$$\delta = \frac{4,6}{k}$$

sau:

$$\delta = 4,6 \cdot d \cdot \left(\ln \frac{1}{1 - \alpha'} \right)^{-1}$$

Adâncimea de pătrundere crește pe măsură ce lungimea de undă λ scade, dar nu depășește mărimea câtorva μm . De aceea încălzirea cu radiații IR este considerată un procedeu de încălzire de suprafață.

Surse de radiații infraroșii

Toate sursele electrice de radiații infraroșii folosesc efectul Joule-Lenz, adică sunt elemente rezistive parcurse de curent electric. În funcție de domeniul lungimilor de undă emise se deosebesc:

- Sursele luminoase (surse de radiații infraroșii scurte) sunt lămpi cu incandescență ce lucrează la temperaturi de 2000 – 2600 K și emit radiații în domeniul vizibil și infraroșu, în intervalul 0,5-3 μm , cu un maxim situat în intervalul 1,1-1,8 μm . *Lămpile cu incandescență* pentru radiații infraroșii (fig. 3.11) diferă de cele pentru iluminat normal prin existența unui reflector din aluminiu depus în vid pe partea interioară a balonului. De asemenea, în vederea uniformizării fluxului energetic radiat, calota balonului se mătuiește prin procedee chimice sau mecanice.

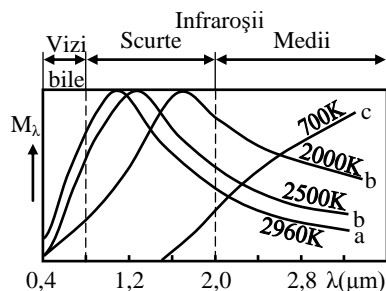


Fig. 3.10 Curbe cu repartiție spectrală pentru unele surse de radiații infraroșii. a – lampă incandescentă normală
b – lampă incandescentă pentru radiații infraroșii
c – radiator ceramic sau metalic tubular

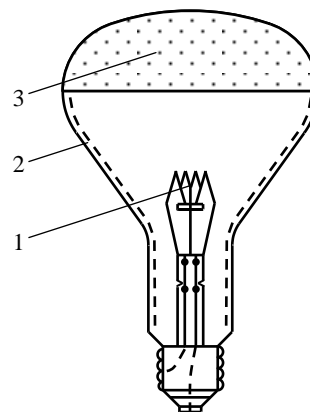


Fig. 3.11 Sursă luminoasă de radiații infraroșii
1 – filament wolfram; 2 – reflector aluminiu;
3 – calotă mătușită.

- b. *surse incandescente (neluminoase – doar 1% din energia emisă aparține spectrului vizibil) sau surse de radiații infraroșii medii (2-4μm)* sunt filamente metalice precum crom-nichel (temperatura de lucru: 1300-1400K) sau wolfram (temperatura de lucru: 1100 – 1700K), plasate în tuburi și panouri de sticlă, cuarț opac sau metal. Se întâlnesc lămpi cu puterea între 100 și 7500W. Atunci când se utilizează cuarț, filamentul este înfășurat pe o bară de cuarț și introdus într-un tub protector de sticlă de cuarț, care are factor de transmisie mare pentru lungimi de undă mai mici de 4 mm. Prin utilizarea cuarțului opac (rotosil – produs ceramic din cuarț), care absoarbe radiațiile de lungime de undă mare, tubul protector se încălzește și devine un radiator secundar.
- c. *surse întunecate (surse de radiații infraroșii lungi)* sunt construite din ceramică sau sticlă electroconductivă încălzite electric de un rezistor din crom-nichel, kantal la temperaturi de 600 – 1100 K și emit radiații cu lungimi de undă cuprinse în banda 1,8-10 μm. Sursele întunecate *cu corp tubular metallic* se impun tot mai mult în instalațiile industriale, datorită rezistenței lor termice și mecanice ridicate. Ele constau dintr-un tub de oțel refractar în interiorul căruia se află o spirală de crom-nichel, izolată electric față de tubul de crom-nichel prin praf de oxid de magneziu. Funcționează la o temperatură a filamentului de 700-900 K și sunt uzual în reflectoare parabolice din aluminiu.

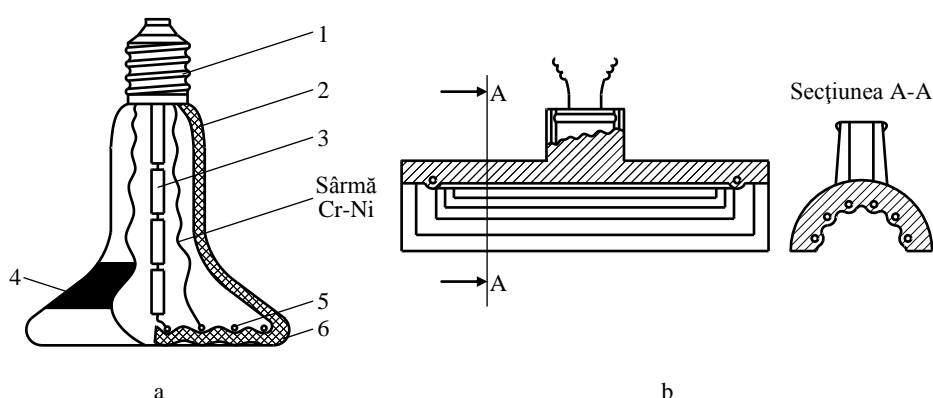


Figura 3.12

Radiatoare ceramice disc (a) și concave (b) pentru radiații infraroșii.

1 – soclu E 27; 2 – corp ceramic; 3 – izolator ceramic; 4 – reflector; 5 – rezistor; 6 – glazură

Reflectoare de radiații infraroșii

Radiatoarele au rolul de a dirija sau concentra razele IR asupra materialului în mod optim. Reflexia radiațiilor IR respectă aceleași legi valabile pentru toate radiațiile electromagnetice. Factorul de reflexie al unei suprafețe a unui corp se definește ca raportul dintre intensitatea fascicolului de radiații reflectat I_r și intensitatea fascicolului de radiații incident I_0 la acea suprafață:

$$\rho = \frac{I_r}{I_0}$$

și în consecință

$$I'_0 = I_0 - I_r$$

Având în vedere că factorului de reflexie al unui material - în mod obișnuit - variază în funcție de lungimea de undă, corpurile nu reflectă în aceeași măsură radiațiile infraroșii și cele vizibile. Pentru majoritatea metalelor, factorul de reflexie spectral $\rho(\lambda, T)$ crește cu lungimea de undă și tinde asimptotic către 1. Astfel, argintul, aurul, cuprul și aluminiul au factor de reflexie mare în infraroșu. Datorită acestui fapt argintul se folosește ca oglindă în vasele termoizolante (termosuri, vase Dewar), iar cuprul și aluminiul ca reflectoare la lămpile cu radiații infraroșii.

Pentru lungimi mici de undă, factorul de reflexie este dependent de starea suprafeței. Valoarea factorului de reflexie scade la depunerea prafului pe suprafețele reflectante metalice, dar mai ales prin umezirea acestora. În acest caz, trebuie efectuate curățări periodice. La lungimi mari de undă starea suprafeței nu mai prezintă importanță.

Chiar dacă factorul de absorbție al reflectoarelor este redus, atunci când densitatea de putere este mare, trebuie prevăzute canale de ventilare/răcire.

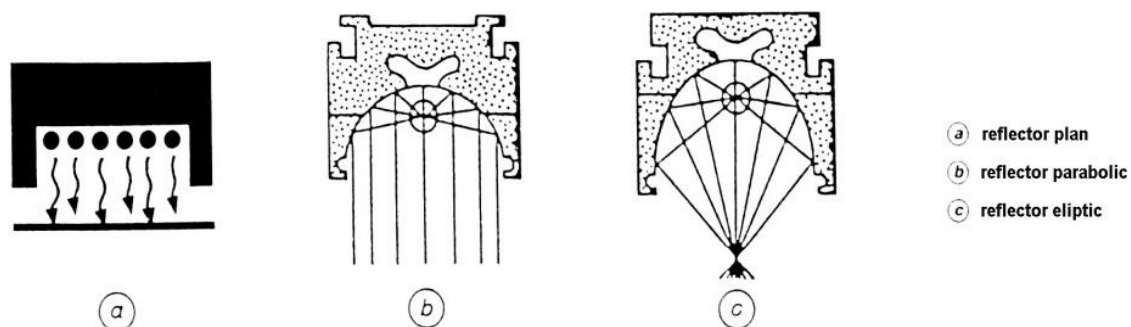


Figura 3.12 Forme diferite de reflectoare de radiații IR

Panouri radiante și cuptoare cu radiație infraroșie

Emitătorii pot fi dispuși individual (spre exemplu, pentru încălziri locale), dar cel mai adesea sunt grupați pentru a forma un panou radiant. Aceste panouri sunt constituite din lămpi, tuburi de cuarț, rezistențe metalice sau elemente ceramice plasate în fața reflectorilor adaptați.

Densitățile de putere posibile cu panourile radiante sunt foarte variabile după emițătorii aleși și după dispunerea lor: de regulă $20-140\text{kW/m}^2$ în tuburi la infraroșu scurt, $10-60\text{kW/m}^2$ în emițătorii de infraroșu mediu, $5-50\text{kW/m}^2$ în infraroșu lung. În cazul încălzirii produșilor în mișcare, sursele tubulare pot fi dispuse transversal, longitudinal sau în diagonală pentru a asigura un flux omogen, oricare ar fi dimensiunile tuburilor și lungimea de încălzit.

Dacă produsele tratate nu sunt buni absorbanți iar fenomenele de reflexie la suprafața lor devin importante, folosirea panourilor radiante nu mai este eficientă. Atunci e interesantă tratarea produșilor în incintă închisă, reflectantă sau calorifugă, în care schimburile termice prin radiație și prin convecție sunt bine controlate și în care puterea e des reglată: acest ansamblu constituie un cuptor infraroșu.

Acest sistem permite utilizarea surselor de infraroșu scurt, deci o radiație penetrantă și de ușoară inerție termică, chiar și pe produșii relativ puțin absorbanți în infraroșu scurt. În infraroșu mediu sau lung, reflexia radiației este relativ limitată și nu necesită deci luarea de măsuri particulare. În schimb, convecția e importantă și o incintă închisă, calorifugă, este dorită.

În funcție de aplicații cuptoarele cu IR pot fi:

- cuptoare cu pereți reflectori, în general din aluminiu lustruit, ce permite conservarea specificității radiației relativ la spectrul său de emisie;

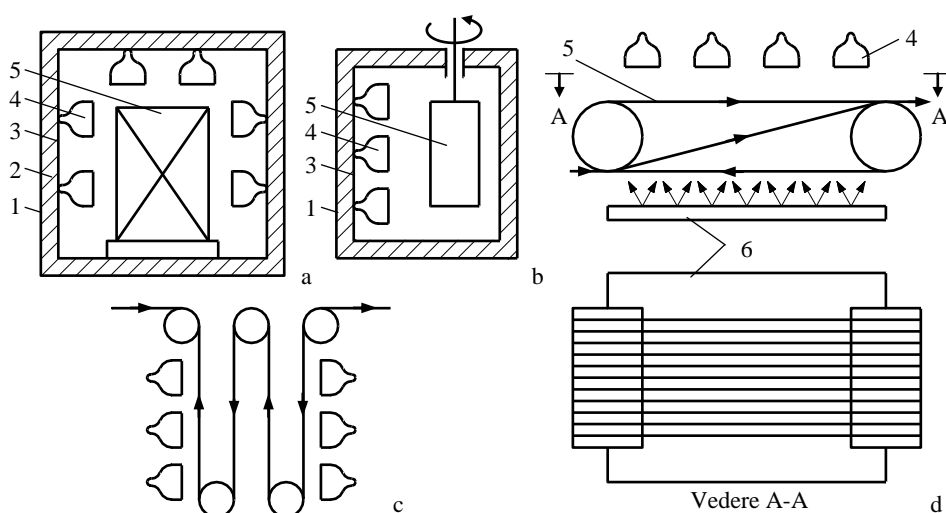


Figura 3.14

Cuptoare cu radiații infraroșii pentru tratarea materialelor voluminoase sau filiforme
 1 – carcasă exterioară, 2 – material termoizolant, 3 – carcasă interioară, 4 – sursă luminoasă de radiații infraroșii, 5 – material de încălzit și uscat, 6 – reflector din tablă de aluminiu

- *cuptoare calorifuge* ce permit suprapunerea unei emisii secundare datorate pereților laterali peste spectrul de emisie primară al emițătorilor.

Deoarece temperaturile de lucru depășesc rareori 400°C, cuptoarele cu radiații infraroșii sunt instalații electrotehnice de construcție ușoară prevăzute cu manta interioară și exterioară din tablă de aluminiu, prinsă pe stelaje metalice. Spațiul dintre mantale poate rămâne liber sau se umple cu materiale termoizolante ce au conductibilitate termică și căldură specifică reduse (vată minerală sau de zgură etc.).

În aplicațiile industriale de încălzire și uscare cu radiații infraroșii se utilizează cuptoare cu radiații infraroșii ce au un regim de lucru intermitent (static) sau continuu (dinamic). În instalațiile statice materialul plasat în fața surselor este iradiat pe una sau ambele fețe, iar în cele dinamice se deplasează fie piesa, fie panoul de radiatoare.

În cazul materialelor filiforme, acestea fie că trec de mai multe ori prin zona încălzită (fig. 3.14c), fie formează o suprafață expusă radiației. În ultima variantă se recomandă dispunerea radiatoarelor în același plan și utilizarea de reflectoare, din tablă de aluminiu, plasate sub material.

Materialele granulare sau pulverulente (cereale, făină, medicamente) trebuie expuse radiației pe întreaga lor suprafață, motiv pentru care se folosesc mese vibrante, cuve rotative sau benzi transportoare cu racleți, montate în cascadă (fig. 3.15).

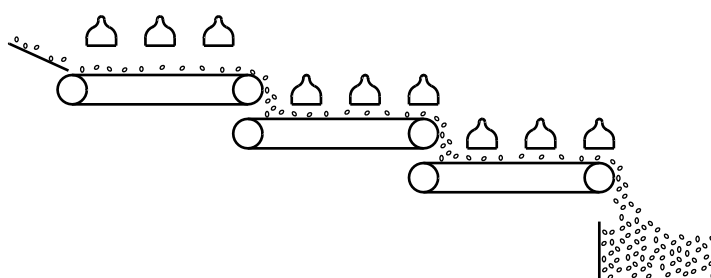


Figura 3.15
Instalație de uscare cu bandă transportoare

Caracteristici	Instalații			Cuptoare calorifuge IR scurte
	IR scurte	IR medii	IR lungi	
Penetrația radiației	Bună	Medie	Slabă	Bună pt. radiația primară
Reflexia prin produse	Importantă	Slabă	Slabă	În ansamblu slabă
Randamentul	Mediu dacă energia reflectată este prost recuperată	Bun pt. majoritatea produselor	Bun în special pt. produsele transparente la alte radiații	Bun în toate cazurile
Inerția termică	Slabă	Medie	Mare	Slabă pt. emițătorii înșiși Mare pt. pereți
Risc la oprirea produsului	Risc de degradare, în general, foarte slab	Risc de degradare slab pt. produsele destul de încărcate de umiditate	Risc important de degradare	Dispozitive de protecție pt. a lua măsuri de precauție
Tipuri de aplicații interesante și avantaje particulare	Încălzire omogenă a produselor cele mai compacte Finalul uscării produselor termosensibile Densități de putere ridicate necesare Timp de tratament foarte scurt	Preîncălziri Preuscări Încălzirea corpurilor organice de mică grosime Necesitatea surselor puțin fragile	Tratamente superficiale Reîncălzirea plasticului de mică grosime(termoformare) Densități de putere foarte slabe și omogene	Avantajele infraroșului scurt cu randament ameliorat, atenuarea sensibilității la culori
Costul instalației	Panouri: 1000 până la 3000 F/kW Cuptoare : 2500 până la 4500 F/kW			
Durata de viață a surselor	5000 până la 10000 h	10000 h și mai mult	5000 până la 10000 h	5000 h în medie
Greutatea întreținerii (surse-conexiuni electrice)	Întreținere regulată necesară	Cele mai puține surse Durate de viață ridicate	Probleme de comportare a instalațiilor cu densitățile de putere cele mai ridicate	Întreținere regulată necesară

Avantajele încălzirii cu radiații IR. Domenii de utilizare

Încălzirea cu radiații infraroșii are ca principale avantaje:

- timpi reduși de încălzire (energia primită de corp este practic independentă de temperatura ambiantă, datorită temperaturii ridicate a sursei);
- instalațiile sunt simple, cu preț de cost redus și reglaj precis al temperaturii;
- încălzirea se poate face superficial sau în profunzime;
- sursele de radiații IR sunt ecologice, nepoluante.

Având în vedere că temperatura corpului de încălzit nu poate depăși 300°C, aceste instalații pot servi la:

- încălzirea în profunzime a materialelor plastice (polistiren, polietilenă, stiplax, policlorură de vinil) în vederea prelucrării prin deformare la cald;
- iradierea plantelor și animalelor în scopul obținerii unui anumit efect biologic;
- transformări fizico-chimice de material (polimerizarea rășinilor, vulcanizarea cauciucului)
- uscarea materialelor selectiv absorbante în straturi relativ subțiri (legume, fructe, semințe);
- uscarea vopselelor și a lacurilor în industria constructoare de mașini și aparate;
- uscarea materialelor textile (lână, bumbac, pânzeturi, tricotaje);
- uscarea produselor din lemn (hârtie, carton, placaje, furnire etc.);
- uscarea pieselor din porțelan, argilă, șamotă;
- încălzirea încăperilor;
- tratamente medicale;
- coacerea produselor de panificație (biscuiți).

Totuși, există situații în care încălzirea cu radiații infraroșii nu poate fi aplicată, cum ar fi de exemplu: aplicarea la corpuri foarte voluminoase, la suprafețe cu factor de reflexie ridicat, la materiale cu umiditate peste 50% etc.

Dimensionarea instalațiilor de încălzire cu radiații infraroșii

Dimensionarea unei instalații de uscare cu radiații infraroșii presupune parcurgerea următoarelor etape:

- un calcul de predimensionare, având drept scop determinarea cantității de căldură necesare încălzirii sau uscării,
- se experimentează uscarea/încălzirea pe o instalație de probă,
- apoi – pe baza unui calcul mai detaliat – se trece la executarea instalației industriale.

Calculul de predimensionare pleacă de la observația că totalul cantității de căldură necesar pentru procesul de uscare se consumă pentru:

- încălzirea lichidului ce trebuie eliminat, de la temperatura inițială θ_0 la temperatura de evaporare θ_e (Q_l)
- evaporarea lichidului (Q_e);
- încălzirea corpului umed la temperatura de evaporare a lichidului (Q_s).

Ținând cont de randamentul instalației η (în general, 0,2÷0,7), cantitatea de căldură necesară este dată de

$$Q = \frac{1}{\eta}(Q_l + Q_e + Q_s),$$

$$\text{unde } Q_l = \frac{m_l \cdot C_l (\theta_e - \theta_0)}{\alpha_l} \quad Q_e = \frac{m_l \cdot C_v}{\alpha_l} \quad Q_s = \frac{m_s \cdot C_s (\theta_e - \theta_0)}{\alpha_s}$$

în care m_s este masa corpului solid anhidru; m_l – masa lichidului de evaporat; C_s – căldura specifică a corpului solid anhidru; C_l – căldura specifică a lichidului; C_v – căldura de vaporizare a lichidului; α_s – factorul de absorbție totală în infraroșii a corpului solid.

Caracteristicile materialelor și factorii de absorbție în infraroșu sunt redați în literatura de specialitate. Timpul de încălzire t depinde de temperatura mediului înconjurător, de tipul ventilației și viteza aerului de ventilației, de temperatura finală, de masa și grosimea corpului încălzit. Dacă se cunoaște acest timp t și puterea P a tipului de sursă ales, rezultă numărul de surse necesare:

$$n = \frac{Q}{P \cdot t}$$

Așezarea surselor de radiații infraroșii se face în funcție de nivelul de uniformitate impus temperaturilor

$$\left(\frac{\theta_{min.}}{\theta_{max.}} = 0,6 \div 0,8 \right)$$

urmărindu-se un randament al instalației cât mai ridicat. Similar instalațiilor de iluminat, uniformitatea ridicată se obține prin dispunerea surselor (de obicei identice ca tip, formă, putere radiantă) în vârfurile unor forme geometrice regulate, obișnuit în vârfurile unor pătrate sau triunghiuri echilaterale.

Modificând distanța d dintre surse și distanța dintre planul surselor și suprafața corpului de încălzit se obțin curbele de temperatură ale panoului radiant

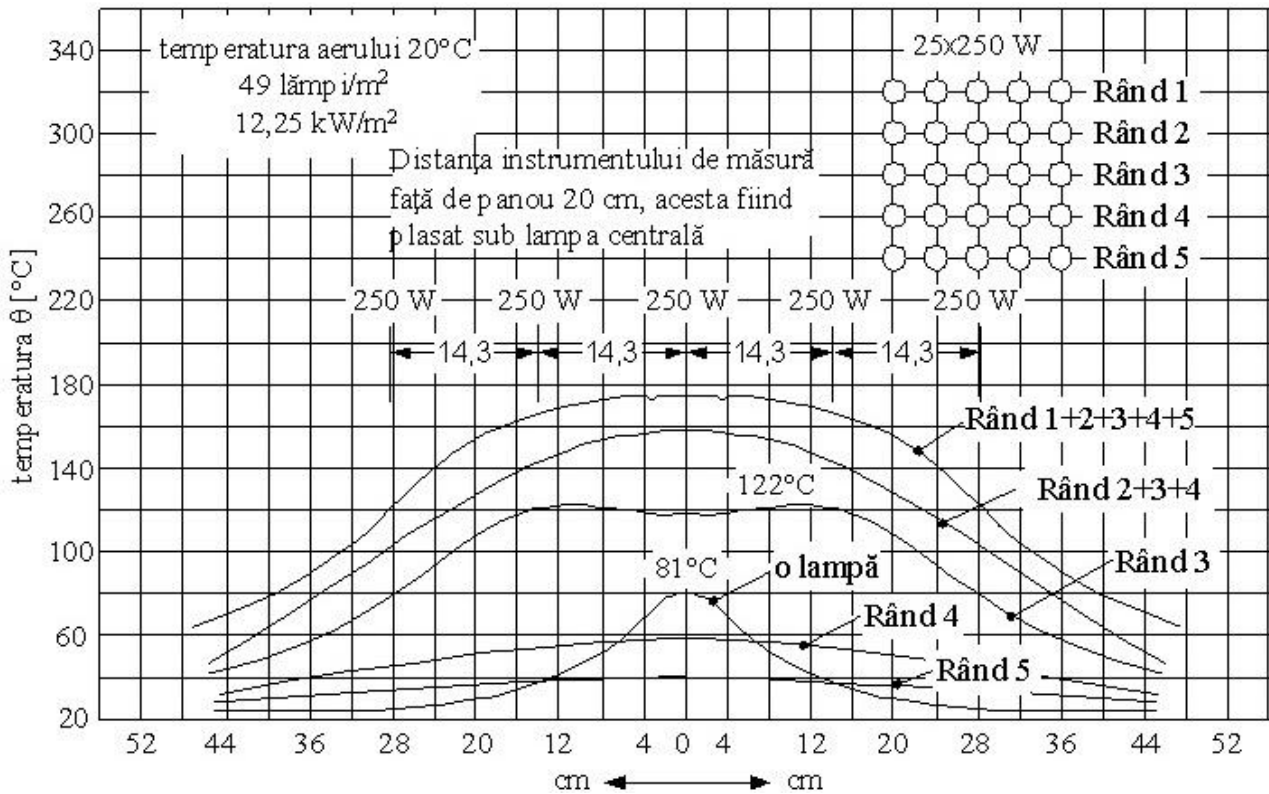


Fig.3.16 Curbele de temperatură în diferite secțiuni longitudinale ale unui panou radiant compus din 5x5 lămpi IR de 250W [v. cursul CEE-2, ...]

ÎNCĂLZIREA PRIN INDUCȚIE

Principii fizice

La încălzirea prin inducție, o bobină numită inductor fiind parcursă de curent electric alternativ produce un câmp magnetic variabil în timp. Introducând în inductor un corp conductor din punct de vedere electric (piesă, șarjă topită), în acesta se vor induce curenți turbionari, iar aceștia prin efect Joule-Lenz vor determina încălzirea directă sau topirea corpului respectiv.

În sistemul inductor - piesă (șarjă), curenții turbionari sunt refuțați spre exteriorul conductoarelor (efect pelicular) și suportă influența curenților din conductoarele învecinate (efect de proximitate).

Adâncimea de pătrundere

Cu cât frecvența curentului care parcurge corpul încălzit este mai mare, cu atât curentul are tendința să se concentreze la suprafață. Densitatea de curent scade de la suprafața corpului spre interiorul său (efect skin sau efect pelicular).

Se poate arăta în baza legilor lui Maxwell ca densitatea de curent J scade exponențial spre interiorul piesei și are expresia:

$$J(x) = J_0 e^{-x/\delta}$$

unde $J(x)$ este densitatea de curent la distanța x de la suprafață, J_0 este densitatea de curent la suprafață ($x=0$), iar δ este o constantă care depinde în mod deosebit de frecvență și este numită "adâncime de pătrundere".

Curentul I_2 care parcurge piesa se poate determina ca integrală a densității de curent și atunci va fi egal numeric cu suprafața $0J_0D$, adică:

$$I_2 = \int_0^{\infty} J_0 e^{-x/\delta} dx = \dots = J_0 \delta$$

De aici rezultă semnificația lui δ : curentul total I_2 este produsul dintre densitatea de curent la suprafață J_0 și adâncimea δ , numită de aceea *adâncime de pătrundere*. Astfel, curentul indus care are o repartiție neuniformă, poate fi înlocuit cu un curent fictiv echivalent, repartizat uniform într-o zonă de grosime δ . Pentru această zonă:

$$J(\delta) = J_0 e^{-x/\delta} = J_0 / e = 0,368 \cdot J_0$$

Intensitatea curentului care parcurge zona adâncimii de pătrundere:

$$I_2(\delta) = \int_0^{\delta} J_0 e^{-x/\delta} dx = -\delta J_0 e^{-x/\delta} \Big|_0^{\delta} = J_0 \delta \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0,632 \cdot I$$

deci 63,2% din curent este concentrat în zona adâncimii de pătrundere.

Puterea dezvoltată în aceeași zonă va fi proporțională cu pătratul densității curentului:

$$P(\delta) = 0,865 \cdot P_2$$

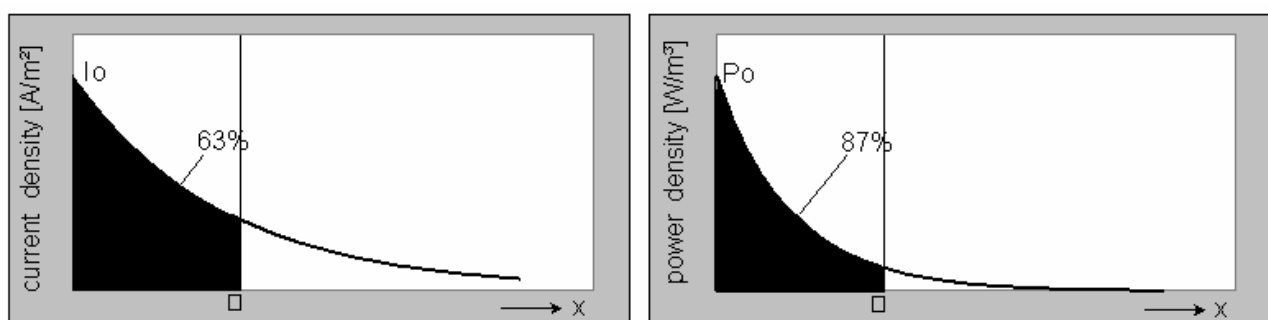


Fig.4.1 Explicativă pentru adâncimea de pătrundere

Obs. Concentrarea puterii în adâncimea de pătrundere condiționează cea mai mare parte a aplicațiilor electrotermice industriale ale inducției

Expresia adâncimii de pătrundere poate fi stabilită aplicând ecuațiile lui Maxwell unui semiconductor simplan infinit. Dacă la suprafața de separație infinit extinsă a unui bloc de material conductor omogen și izotrop, ce ocupă întreg semispațiul drept, se aplică un câmp magnetic uniform $H(t) = \sqrt{2} H_0 \sin \omega t$ cu o variație sinusoidală în timp, atunci toate mărimile de stare locală ale câmpului examinat vor fi funcție de timp și coordonata curentă, x în cazul de față.

În aceste condiții se poate trece de la mărimile vectoriale la cele fazoriale, caz în care avem:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \underline{H}}{dx^2} = j \omega \mu \gamma \underline{H} \\ \underline{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{d \underline{H}}{dx} \\ \underline{S} = \underline{E} \underline{H}^* \end{cases} \quad (4.5)$$

în care: $\underline{H} = H e^{j\omega t}$ și $H(x,t) = \sqrt{2} I \{ \underline{H} \}$, $\underline{H}^* = H e^{-j\omega t}$ - mărimea complex conjugată a fazorului câmp magnetic

Soluția ecuației diferențiale aferentă câmpului magnetic va fi:

$$\underline{H} = \underline{A} e^{\alpha x} + \underline{B} e^{-\alpha x} \quad (4.6)$$

cu: $\underline{A}, \underline{B}$ - constante complexe de integrare; $\alpha = \sqrt{j \omega \mu \gamma} = (1 + j)k$ - constanta complexă de propagare a undei; $k = \sqrt{(\omega \mu \gamma) / 2}$ - constanta de atenuare a undei.

Din condițiile la limită: $x=0, \underline{H} = \underline{H}_0$ și $x \rightarrow \infty, A=0$ (pentru a avea câmp finit la infinit unda inversă trebuie să se anuleze), rezultă $\underline{B} = \underline{H}_0$ ceea ce conduce la:

$$\begin{cases} \underline{H} = \underline{H}_0 e^{-\alpha x} = \underline{H}_0 e^{-kx} e^{-jkx} \\ H(x,t) = \sqrt{2} H_0 e^{-kx} \sin(\omega t - kx) \end{cases} \quad (4.7)$$

ceea ce denotă că mărimea câmp magnetic variază ca undă în timp și spațiu.

Pe baza acestei observații se definește *adâncimea de pătrundere a undelor electromagnetice* în materialul conductor ca fiind acea distanță δ măsurată de la suprafața de separație de-a lungul căreia amplitudinea undei scade de $1/e$ ori.

În cazul de față vom avea: $x = \delta$ și deci $\sqrt{2} H_0 e^{-k\delta} = \sqrt{2} H_0 e^{-1}$ de unde obținem:

$$\delta = \frac{1}{k} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \text{ [m]} \quad (4.8)$$

Se observă că adâncimea de pătrundere depinde pe de o parte de caracteristicile materialului ce urmează să fie încălzit (prin ρ și μ_r), iar pe de altă parte de frecvență:

a) Întrucât δ este invers proporțional cu $\sqrt{\mu_r}$, la o frecvență dată, la materialele neferoase (pentru care $\mu_r \approx 1$) încălzirea este mai în profunzime decât la materialele feromagnetice a căror permeabilitate relativă aparține domeniului $\mu_r = 10 \dots 1000$). Pentru materialele feromagnetice, permeabilitatea magnetică relativă depinde atât de compoziția materialului cât și de alți parametri precum temperatura, intensitatea câmpului magnetic, gradul de saturație etc., iar peste punctul Curie ($\theta = 768^\circ\text{C}$) valoarea acesteia devine brusc 1 ceea ce determină o rapidă creștere a adâncimii de pătrundere.

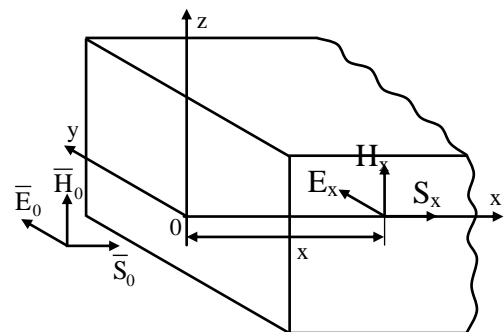


Figura 4.2
Semispațiul conductor infinit

b) Dependența de frecvență ne oferă posibilitatea de a regla adâncimea de pătrundere, iar pentru asta va fi nevoie de o sursă de frecvență variabilă. Dependența $\delta=f(f)$ este invers proporțională și de aceea, pentru o încălzire "în profunzime" se vor folosi frecvențe cât mai scăzute, iar pentru o încălzire „superficială (la suprafață)” se vor folosi frecvențe atât de mari pe cât de subțire vrem să fie stratul superficial încălzit (v. Tabelul 4.1).

Tabel 4.1

δ [mm]	Oțel, 20°C	Oțel, 20°C	Oțel, 1200°C	Cupru, 20°C	Cupru, 900°C
ρ [$\mu\Omega\cdot m$]	0,16	0,16	0,16	0,017	0,086
μ_r	40	100	1	1	1
50Hz	4,5	2,85	28,5	9,31	20,87
100Hz	3,18	2,01	20,1	6,58	14,76
1kHz	1,01	0,64	6,4	2,08	4,67
10kHz	0,32	0,2	2	0,66	1,48
100kHz	1,1	0,06	0,6	0,21	0,47
1MHz	0,03	0,02	0,2	0,07	0,15

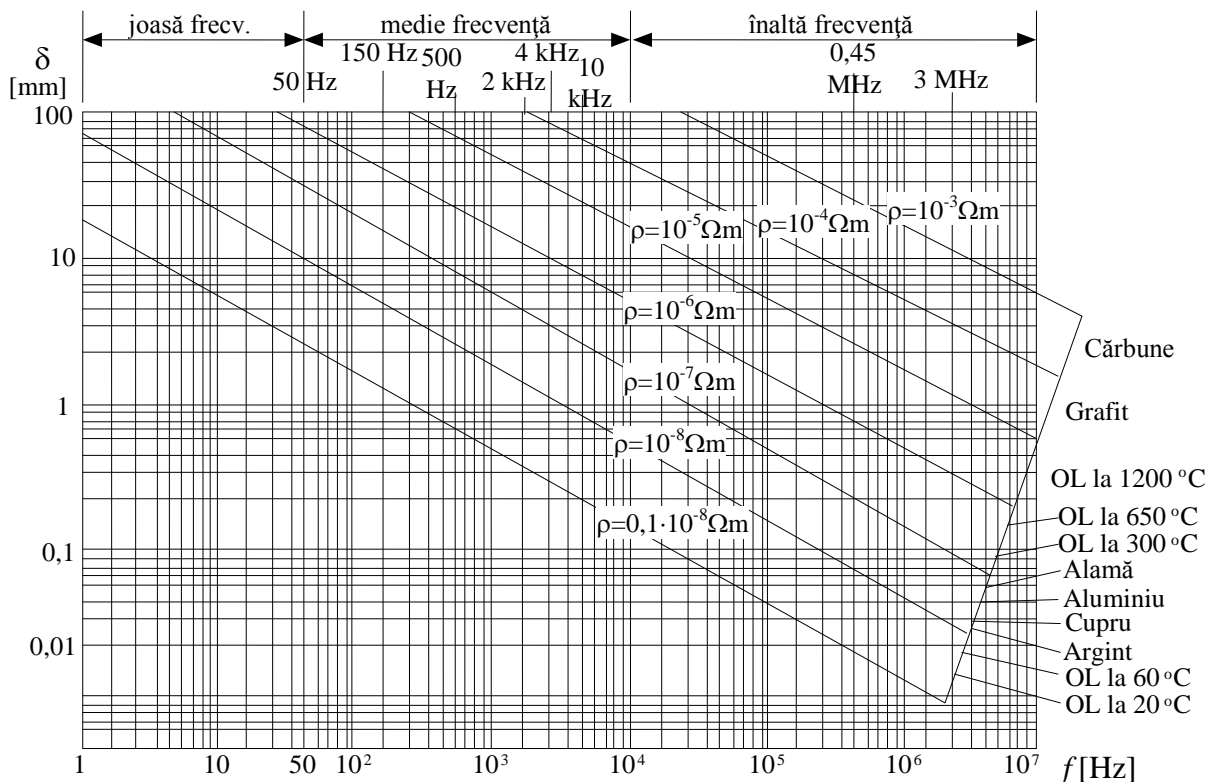


Fig.4.3 Adâncimea de pătrundere în funcție de frecvență, pentru diferite metale

Calculul simplificat al puterii transmise piesei

Un calcul exact al puterii disipate în piesă se poate face pornind de la ecuațiile lui Maxwell. Dar atunci când raportul dintre diametrul piesei și adâncimea de pătrundere este mai mare ca 10, calculul simplificat prezentat mai jos conduce la o eroare de maxim 10%.

Se presupune că piesa de încălzit este un cilindru de diametru d și înălțime h , iar întreaga energie transmisă prin inducție electromagnetică se regăsește la suprafața cilindrului, într-o „coajă” de grosime δ . Altfel spus, curentul indus în piesă circulă printr-un conductor care formează o spirală în scurtcircuit la suprafața cilindrului și care are lungimea egală cu πd și secțiunea egală cu $h\delta$. Atunci, rezistența electrică a acestui conductor va fi:

$$R = \rho \frac{\pi d}{h\delta} \quad (*)$$

Ansamblul inductor – piesă poate fi asimilat cu un transformator al cărui primar este constituit din inductorul cu N_1 spire și parcurs de curentul I_1 , iar secundarul este constituit din conductorul „spiră în scurtcircuit” ($N_2=1$) de la suprafața piesei care este parcurs de curentul I_2 . Atunci se poate scrie:

$$I_2 = N_1 I_1 \quad (**)$$

Pierderile de putere în piesă au loc prin efect Joule-Lenz, adică

$$P_2 = R I_2^2$$

care se poate scrie folosind (*) și (**)

$$P_2 = \rho \frac{\pi d}{h\delta} (N_1 I_1)^2$$

Totodată, aplicând legea circuitului magnetic a lui Ampere, rezultă că câmpul magnetic creat de bobină în interiorul său este:

$$H_0 = \frac{N_1 I_1}{h}$$

și atunci

$$P_2 = \rho \frac{\pi d}{h\delta} (H_0 h)^2 = \frac{\rho}{\delta} \pi d h H_0^2$$

Ținând cont că expresia adâncimii de pătrundere dedusă anterior se poate scrie

$$\delta = \frac{1}{K} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

expresia puterii transmise șarjei este

$$P_2 = \pi d h H_0^2 \sqrt{\pi \mu_0 \mu_r f \rho}$$

Această formulă obținută pe cale simplificată poate coincide cu formula exactă de calcul dacă este corectată cu factorii F și C , adică:

$$P_2 = \pi d h H_0^2 \sqrt{\pi \mu_0 \mu_r f \rho} F C$$

Factorul de corecție F (numit și factor de transmisie) depinde de geometria piesei (sarcinii) și este o funcție ce are ca variabilă raportul dintre diametrul piesei și adâncimea de pătrundere ($\varepsilon=d/\delta$):

$$F = \frac{sh2\varepsilon + \sin 2\varepsilon}{ch2\varepsilon - \cos 2\varepsilon}$$

Factorul de corecție C (numit și factor de cuplare) ține cont de dimensiunile relative dintre inductor și piesă (are valori cu atât mai mici cu cât inductorul este mai lung și întrefierul dintre inductor și piesă este mai mic, v. Fig.4.6).

Analizând expresia puterii disipate în sarcină rezultă următoarele concluzii:

- puterea disipată poate fi mărită prin creșterea intensității câmpului magnetic al inductorului, adică prin creșterea numărului de amper-spire ale acestuia. Creșterea numărului de spire ar putea fi limitată de spațiul disponibil, iar cea a curentului din criterii de încălzire (de aceea se folosesc inductoare din țevă de cupru răcite prin interior cu apă, care permit densități mari de curent de 50 - 75 A/mm², de cca. 10 ori mai mari decât în cazul conductoarelor pline și răcite naturală).
- creșterea frecvenței nu conduce la o creștere semnificativă a puterii disipate și, în plus, aduce și unele efecte negative: crește inductanța inductorului și astfel poate apare o limitare a puterii, cresc pierderile în bateria de condensatoare, în suporturi etc.
- proprietățile materialului încălzit joacă un rol important: mai ales în cazul materialelor feromagnetice

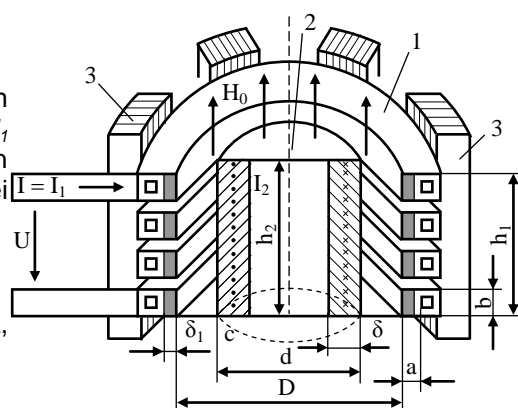


Fig.4.4 Sistemul inductor-piesă ($h_1 \gg h_2$)
1 – inductor, 2 – piesă, 3 – ecran magnetic

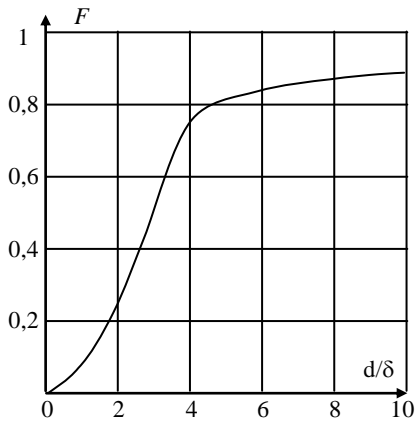


Fig.4.5 Dependenta factorului de transmisie F functie de raportul $\epsilon = d/\delta$

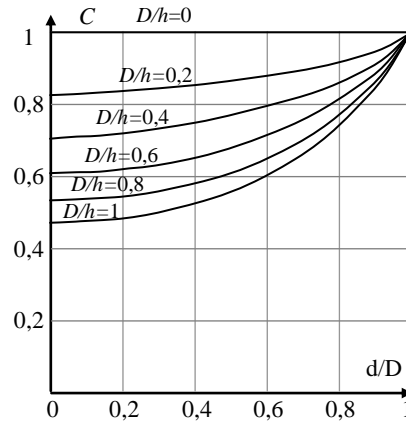


Fig.4.6 Coeficientul de cuplaj C

trebuie ținut cont de saturație și de punctul Curie:

- la atingerea saturației, în ciuda creșterii câmpului magnetic, inducția magnetică în material va rămâne limitată și astfel, deși are loc o creștere a densității de putere transferată din inductor, randamentul sistemului scade;
- fiindcă la depășirea punctului Curie permeabilitatea relativă devine brusc 1, pentru a păstra o densitate de putere constantă, unele sisteme folosesc frecvențe diferite înainte și după depășirea punctului Curie.

În pofida limitărilor menționate, puterea de suprafață ce poate fi transmisă prin inducție este considerabil mai mare decât în cazul altor procedee (de exp., este de 1000 de ori mai mare decât încălzirea prin radiații infraroșii funcționând la 1000°C). Oricum, densitățile de putere aplicate materialelor feromagnetice depind de tipul încălzirii:

- la încălzirea superficială ($f > 10\text{kHz}$): $2 - 3 \text{ kW/cm}^2$
- la încălzirea în volum (profunzime): $< 100\text{W/cm}^2$.

Surse de putere

Tip sursă	Transformator	Convertor de frecvență cu tiristoare	Convertor de frecvență cu tranzistoare	Convertor de frecvență cu tuburi electronice
Domeniu frecvențe	50 Hz	100Hz – 10kHz	~ 500kHz	< 3000 Hz
Domeniu puteri		< 10 MW	< 500kW	< 1200kW
Randament		90 – 97%	75 – 90%	55 – 70%

Caracteristici ale încălzirii prin inducție

Comparativ cu alte metode de încălzire, acest procedeu prezintă următoarele avantaje:

- energia electrică se transmite direct încălzătorii, cu densități mari de putere ($>1000 \text{ kW/m}^2$) rezultând viteze de încălzire mai mari decât la cuptoarele cu încălzire indirectă ($>1000\text{K/sec}$).
- construcția este mai simplă
- permite funcționarea în atmosfere normale, controlate sau vid, obținându-se produse de mare puritate
- procesul poate fi automatizat (în regim automat sau flux continuu), încălzirea putând fi reglată precis;
- încălzirea prin inducție poate fi aplicată foarte local, locul de încălzit fiind determinat cu precizie
- randamentul instalațiilor este în general bun, dar depinde de caracteristicile materialului de încălzit
- puterea maximă se degajă la suprafața materialului, în straturi a căror grosime depinde de frecvența de

lucru și de caracteristicile fizice ale corpului;

- productivitate ridicată, condiții igienico-sanitare foarte bune, poluare redusă.

Dezavantajele încălzirii prin inducție sunt, în general, de natură tehnico-economică și anume:

- majoritatea aplicațiilor necesită surse de alimentare la o frecvență diferită de 50Hz, cu preț de cost ridicat;
- personal de întreținere și deservire de înaltă calificare;
- factor de putere scăzut, ce implică costuri de compensare.

Aplicații industriale

Încălzirea prin inducție este utilizată pentru:

- topirea sau menținerea în stare caldă a metalelor (oțel, fontă, Cu, Al, Zn și aliajele lor)
- încălzirea în volum (în profunzime) a semifabricatelor (oțel, Cu, Al) ce urmează a fi prelucrate la cald prin forjare, matrișare, presare, laminare etc.
- tratamentul termic (călire) superficial al pieselor din oțel și fontă, utilizate în construcția de mașini;
- agitarea inductivă și transportul electromagnetic al topiturilor;
- sudarea și lipirea metalelor, încălzirea superficială sau în volum pentru tratament termic la cald etc.

1. Topirea metalelor are de obicei loc în cuptoare cu inducție cu creuzet sau cu canal.

Cuptoarele de inducție cu creuzet servesc la topirea metalelor feroase (fontă, oțel) și neferoase, datorită următoarelor avantaje:

- viteze de încălzire ridicate, fapt ce permite topirea materialelor cu punct ridicat de fuziune;

- amestec intens al topiturii sub influența eforturilor electrodinamice. În felul acesta se evită supraîncălzirile locale sau pierderile de metal prin ardere, iar omogenitatea termică și chimică a șarjei se îmbunătățește;

- procesul tehnologic poate decurge în vid sau atmosferă controlată;
- construcție simplă, cu fiabilitate bună și ușor de automatizat.

Dintre dezavantaje trebuie de menționat antrenarea zgurei în șarjă și solicitarea intensă a căptușelii cauzată de agitația băii de metal topit.

Principalele elemente constructive sunt: carcasa, inductorul, creuzetul, conductoarele de alimentare (rețeaua scurtă), mecanismul de lucru. la frecvențe industriale, pentru a evita aruncarea metalului din creuzet (datorită agitației băii) și a reduce înălțimea meniscului, nivelul superior al inductorului se dispune cu 20 ... 30% sub cel al topiturii. Soluția conduce și la un randament mai bun pe durata topirii.

Agitația topiturii (fig. 4.7) este generată de eforturile electrodinamice care apar ca urmare a interacțiunii dintre câmpul magnetic inductor și curenții induși în șarjă. Efortul electrodinamic p are o direcție radială (spre axa creuzetului) și conduce la amestecarea intensă a șarjei, la suprafața căreia va apărea un menisc de înălțimea h_r . Presiunea hidrostatică aferentă meniscului echilibrează efortul electrodinamic p , de unde se poate deduce valoarea h_r la care se ridică topitura în timpul funcționării.

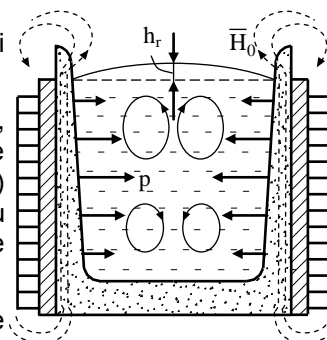


Figura 4.7

Eforturi electrodinamice în topitură

Cuptoarele electrice de inducție cu canal (fig. 4.8) funcționează pe principiul transformatorului cu miez de fier și prezintă un circuit magnetic 1 în coloană sau manta, o înfășurare primară 2 numită *inductor* și una secundară 3 constituită din metalul de topit plasat într-un canal 4 din material refractar.

Deosebirile dintre un transformator clasic și un cuptor cu canal constau în:

- înfășurarea secundară este în același timp și sarcină, fiind constituită dintr-o singură spiră de înălțime relativ redusă comparativ cu inductorul. Dacă sunt mai multe canale în paralel înălțimea totală a șarjei este dată de suma înălțimii canalelor;

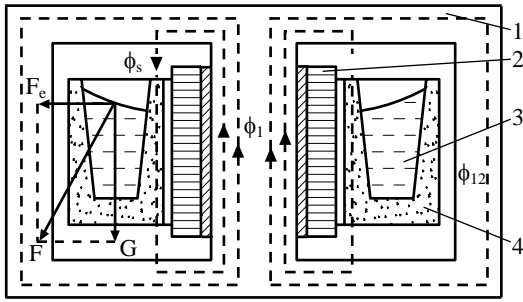


Figura 4.8

Explicativă la cuptorul de inducție cu canal

- existența efectului pelicular, deoarece adâncimea de pătrundere a câmpului electro-magnetic este comparabilă cu grosimea canalului, întrucât tensiunile de alimentare sunt de frecvență industrială;

- factor de putere scăzut, cauzat de un flux de dispersie ϕ_s apreciabil ce reprezintă circa 20 ... 30% din fluxul inductor ϕ_1 , fluxul util ϕ_{12} fiind: $\bar{\phi}_{12} = \bar{\phi}_1 - \bar{\phi}_s$;

- asupra băii de metal lichid acționează atât eforturile electrodinamice F_e , cât și cele datorate presiunii hidrostatice G , rezultanta acestora F conducând la înclinarea suprafeței libere a topiturii.

Cuptoarele de inducție cu canal se utilizează la topirea metalelor neferoase și a aliajelor acestora, precum și la supraîncalzirea sau menținerea în stare caldă a fontei și oțelului. În cazul oțelului, instalațiile sunt cunoscute sub numele de *melanjoare de inducție* și lucrează după procedeul duplex, împreună cu un alt cuptor de topire.

Din punct de vedere constructiv, mai precis al poziției canalului, deosebim:

- *cuptoare cu canal orizontal* acoperit sau descoperit (fig. 4.8), utilizate numai ca melanjoare de inducție deoarece au ca dezavantaje: dimensiuni mari ale canalului impuse de capacitatea cuptorului, factor de putere scăzut, agitație intensă a topiturii ce uzează rapid canalul;

- *cuptoare cu canal vertical sau înclinat* acoperit, folosite ca unități de topire sau melanjoare de inducție. Au o largă răspândire datorită factorului de putere mai ridicat, uzură moderată a căptușelii, volumul canalului este mai puțin dependent de capacitatea cuptorului.

Cuptoarele de inducție cu canal, comparativ cu cele cu creuzet, au ca principale avantaje: randament total și factor de putere mai ridicat, consum specific de energie electrică mai redus și productivitate mai ridicată, durabilitate crescută a căptușelii cuvei și canalului, cheltuieli de investiție mai mici.

Dintre dezavantaje trebuie menționate:

- după evacuarea șarjei, în canal trebuie să rămână metal ce se menține în stare caldă până la următoarea încărcare a cuptorului;

- dificultatea utilizării aceluiași cuptor pentru aliaje de mărci diferite;

- canalul se confecționează din materiale refractare de calitate, care să suporte valori ridicate ale gradientului de temperatură și să reziste la uzura mecanică produsă de agitația topiturii. Acestea sunt motivele pentru care nu se recomandă topirea fontei și oțelului în aceste cuptoare.

Funcționarea cuptoarelor de inducție cu canal se caracterizează prin **eforturi electrodinamice** care apar în topitură. Ele sunt generate de interacțiunea curentului din canal cu câmpurile magnetice inductor și propriu, și anume:

a) *efortul de contracție* (fig.4.9 -a) se manifestă prin reducerea secțiunii transversale a topiturii din canal și este provocat de: *forțele electrodinamice de respingere* F_{c1} generate de interacțiunea dintre câmpul magnetic inductor H_1 și curentul din canal I_2 , și *forța electrodinamică de atracție* F_{c2} între curenții elementari I_2^* din care se presupune a fi format curentul din canal $I_2 = \sum I_{2j}^*$. Valoarea maximă a acestui efort este în axa canalului și se observă mai ales la cuptoarele de inducție cu canal orizontal.

b) *efortul turbionar* (fig. 4.9 -b) este generat de interacțiunea curentului de densități diferite J_2 din canal cu propriul câmp magnetic H_2 . Forța F_t ce apare imprimă topiturii o mișcare de-a lungul axei canalului, deplasarea fiind cu atât mai accentuată cu cât secțiunea canalului este mai neuniformă. Fenomenul este caracteristic cuptoarelor cu canal acoperit, de secțiune variabilă, a căror extremități se găsesc într-o cuvă care se lărgește.

c) *efortul motor sau centrifugal* apare ca urmare a interacțiunii curentului din canal cu fluxul de scăpări Φ_s și este specific cuptoarelor cu canal orizontal descoperit (fig....). Sub acțiunea forțelor F_m ce apar, metalul lichid este respins de la suprafața interioară spre cea exterioară a canalului. Deoarece asupra topiturii acționează și greutatea proprie G , suprafața liberă a metalului se va orienta pe direcția rezultantei acestei forțe.

d) *efortul termic convectiv* apare ca o consecință a densităților diferite ale topiturii din canal și cuvă. La cuptoarele cu canal vertical metalul din cuvă are o temperatură mai scăzută, deci o densitate mai mare, și

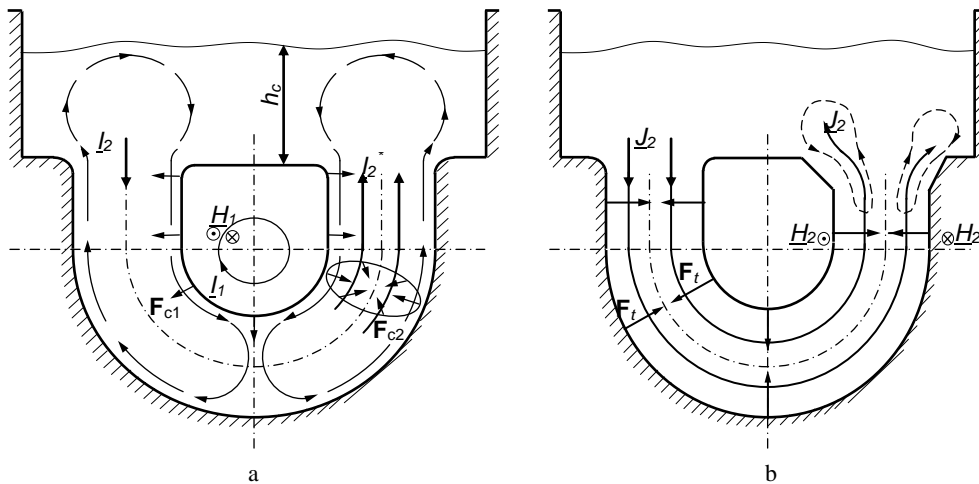


Fig. 4.9 Eforturi electrodinamice în canalul cuptorului

trece în zonele inferioare ale canalului, iar metalul de aici se va ridica spre cuvă prin convecție naturală. La cuptoarele cu canal orizontal acoperit, pentru a accelera omogenizarea topiturii prin convecție termică, gurile canalului se dispun la cote diferite, iar axa acestuia se înclină față de orizontală.

2. Tratamentul termic de suprafață prin inducție

Călirea metalelor urmărește mărirea durității materialului la suprafață și într-un strat superficial de grosime oarecare, menținându-se maleabilitatea zonelor centrale. În acest fel piesa va suporta bine șocurile dinamice, concomitent cu o uzură redusă a suprafețelor în contact. Călirea poate fi aplicată oțelurilor cu un conținut minim de 0,3% carbon, prin încălzirea piesei la cca. 900°C urmată de răcirea forțată a acesteia.

Tratamentul termic de suprafață prin inducție este superior altor procedee. Prin alegerea corectă a frecvenței și a densității de putere, pătrunderea energiei electromagnetice în piesă poate fi controlată astfel încât încălzirea să fie limitată la adâncimea dorită. Mai mult, timpii reduși de încălzire (de ordinul secundelor) permite încălzirea separată ale diferitelor părți ale unei piese, tratamentul termic prin inducție putând fi localizat cu mare precizie. De asemenea, timpii reduși de încălzire înseamnă pierderi termice mai reduse și deci un randament superior tehnicilor de călire convenționale. Mai mult, compoziția chimică a stratului superficial al piesei rămâne neschimbată, spre deosebire de cazul când se aplică alte procedee de călire.

Alte avantaje ale tratamentului termic de suprafață prin inducție, precum excelența reproductibilitate a operațiilor, o mare flexibilitate de utilizare, deformarea limitată și reversibilă a piesei de încălzit, încadrarea cu ușurință în fluxuri complete de fabricație, o recomandă definitiv ca fiind cea mai eficientă metodă de tratament de suprafață.

Valori tipice pentru tratamentul termic de suprafață prin inducție sunt: viteze mari de încălzire ce pot ajunge la 100°C/s, densități de putere ridicate (1,5 – 5kW/cm²) și timpii scurți de tratament (~2 secunde). Dar piesele cu grosimi de sub 3 mm nu pot fi călite, întrucât conductivitatea termică ridicată a materialului conduce la aceeași temperatură pe toată secțiunea transversală a piesei.

Încălzirea prin inducție pentru călire este de preferat altor procedee de încălzire destinate aceluiași scop, deoarece prezintă următoarele avantaje: timp de călire redus și productivitate ridicată, adâncime de călire controlată indiferent de forma piesei, instalație nepoluantă cu gabarit relativ redus.

Călirea superficială se aplică la roți dințate, arbori cotiți, lame de ferăstrău, scule, șine, etc.

3. Brazarea

Este o tehnică de îmbinare a două piese prin intermediul unui al treilea material care este adus în stare de topire. Piesele sunt încălzite în zona de îmbinare la o temperatură superioară decât temperatura de topire a materialului trei. Procedeu prin inducție se aplică adesea datorită posibilității de localizare precisă a încălzirii, a posibilității de lucru în gaz inert sau vid sau a producției în linii automatizate.

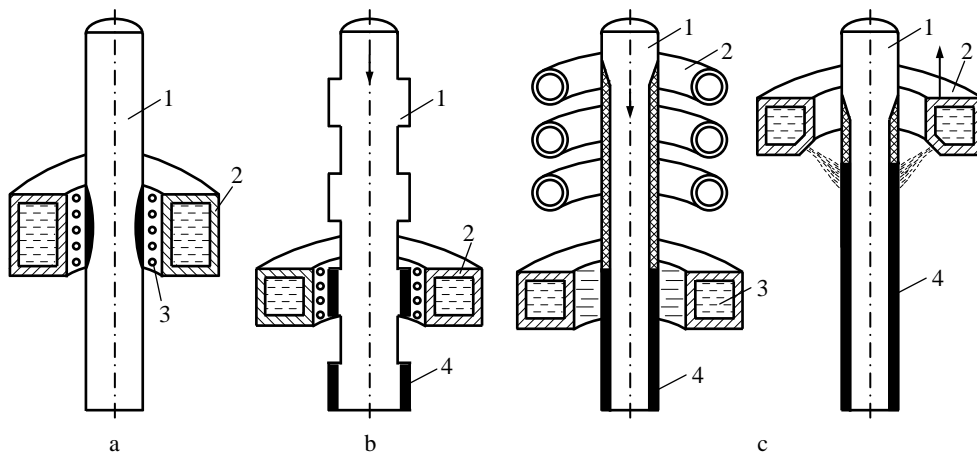


Fig. 4.10

Procedee de călire

1 – piesă, 2 – inductor, 3 – fluid de răcire, 4 – zonă călită

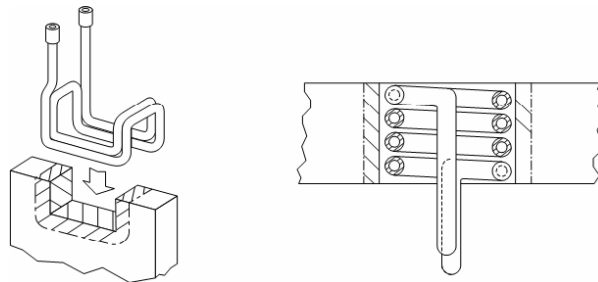


Fig. 4.11

Diferiți inductori adaptați formei piesei de încălzit

ÎNCĂLZIREA MATERIALELOR DIELECTRICE ÎN CÂMP ELECTROMAGNETIC

1. Principii fizice

Materialele dielectrice (izolatoare) introduse în câmp electromagnetic variabil în timp se încălzesc datorită fenomenului de histerezis dielectric și polarizare electrică în câmpuri electrice variabile în timp.

Polarizarea dielectricilor are loc la nivel atomic sau molecular. Există cel puțin 4 mecanisme de polarizare care devin semnificative pentru generarea de căldură la anumite frecvențe.

(i)- *polarizarea electronică* = distorsionarea orbitelor electronilor datorată aplicării câmpului electromagnetic; apare la frecvențe ale radiațiilor din domeniul vizibil și UV.

(ii)- *polarizarea atomică (ionică)* = distorsionarea atomilor din cadrul moleculelor datorită câmpului electromagnetic ; apare în cazul frecvențelor din IR.

(iii)- *polarizarea de orientare* - orientarea prin aplicarea câmpului electromagnetic a moleculelor deja polarizate permanent , datorită legăturilor lor chimice (exp. molecula de apă); este semnificativă la frecvențe radio și la hiperfrecvență ;

(iiii)-*polarizarea sarcinii spațiale* (de relaxare sau interfacială) = acumularea de sarcină la nivelul discontinuităților din material, datorită migrărilor unor purtători de sarcină sub acțiunea câmpului electromagnetic; nu este semnificativă la hiperfrecvență , dar este deosebit de accentuată la frecvențe radio și pentru materiale reprezentând o anumită conductibilitate.

Polarizarea electrică a unui corp poate fi temporară dacă depinde de intensitatea câmpului electric în care este plasat corpul și este permanentă dacă nu depinde de intensitatea locală a câmpului electric.

Așadar, orice material izolant (cu excepția vidului) se polarizează sub acțiunea câmpului electric, iar dacă câmpul este alternativ atunci dipolii existenți sau formați se orientează la fiecare modificare a amplitudinii . Această orientare a moleculelor și atomilor în sensul câmpului conduce la producerea căldurii în interiorul materialului.

2. Puterea disipată în dielectric

Unui câmp electric omogen de intensitate E , îi corespunde o inducție electrică D dată de:

$$D = \varepsilon \cdot E$$

unde: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ este permitivitatea materialului (considerat omogen și izotrop), ε_0 -permitivitatea dielectrică a vidului = $\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ F/m, ε_r -permitivitatea relativă a materialului.

În cazul unui condensator plan constituit din două plăci de arie S și aflate la distanța d , prin aplicarea unei tensiuni U se obține un câmp electric uniform $E=U/d$ sau $U=E \cdot d$

În cazul în care se aplică câmpul electric, fluxul electric va fi

$$\Phi = S \cdot D$$

iar în prezența acestuia are loc polarizarea dielectricului, ai cărui dipoli se orientează în sensul câmpului electric, asemănător unui ac magnetic aflat în câmp magnetic.

Sarcina totală va fi $Q = C \cdot U = \Phi$ unde $C = \varepsilon \cdot S/d$ este capacitatea condensatorului.

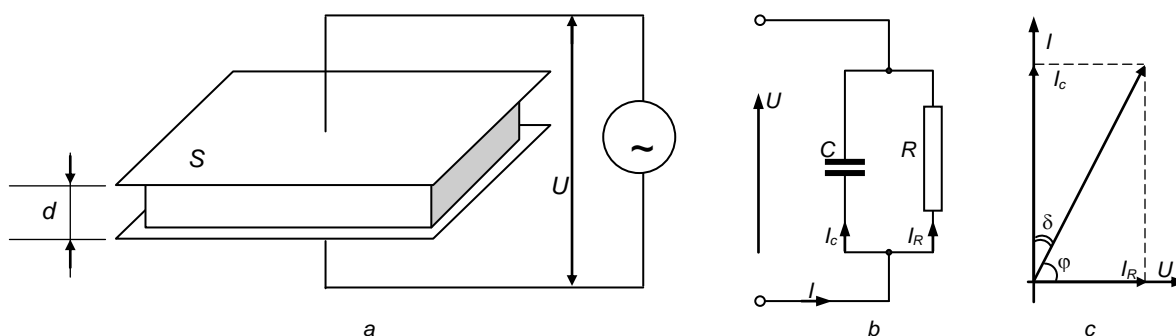


Fig.5.1 Schema simplificată a unei instalații de încălzire dielectrică (a), schema echivalentă (b) și diagrama fazorială (c) a unui condensator real

Dacă dielectricul este ideal precum vidul, care este un dielectric perfect, curentul din circuitul exterior este dat de relația clasică:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

Dacă tensiunea aplicată este: $u = \sqrt{2}U \sin \omega t$, atunci

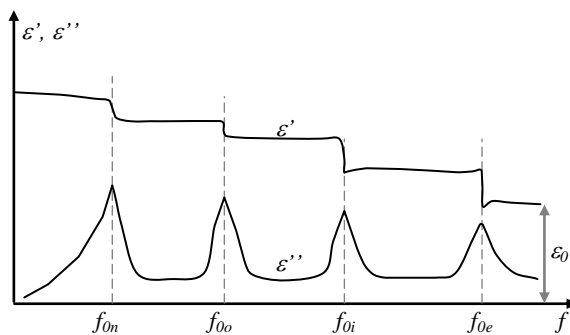
$$i = C\omega U \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Curentul va fi înaintea tensiunii cu $\pi/2$, intensitatea fiind $I = \omega CU$. În cazul dielectricilor reali, polarizarea își schimbă sensul odată cu sensul câmpului electric, dar cu o oarecare întârziere datorată "vâscozității dielectrice", numită histerezis electric, prin analogie cu fenomenul magnetic.

Permitivitatea dielectrică se poate considera o mărime complexă

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' + j\varepsilon''$$

în care ε' reprezintă influența dielectricului asupra capacității și de aceea $\varepsilon' \approx \varepsilon_r$, iar ε'' corespunde pierderilor datorate vâscozității dielectrice (factor de pierderi prin histerezis al materialului). Cele două componente prezintă o puternică dependență față de frecvența de variație a câmpului electric (v. Fig. X.x).



Frecvențele proprii diferitelor moduri de polarizare:

$f_{0e} = 10^{14} \dots 10^{15}$ Hz pentru polarizare electrică;

$f_{0i} = 10^{13} \dots 10^{14}$ Hz pentru polarizare ionică;

$f_{0o} = 10^8$ Hz pentru polarizare de orientare;

$f_{0r} = 10 \dots 10^3$ Hz pentru polarizare de relaxare

Fig.5.2 Dependența de frecvență a permitivității relative și a factorului de pierderi

Se definește tangenta unghiului de pierderi dielectrice prin histerezis ca raportul:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_r}$$

curentul electric, numit curent de deplasare, este defazat cu unghiul δ față de unghiul său de defazaj normal de $\pi/2$, iar puterea activă care se dezvoltă în condensator este

$$P = UI \sin \delta$$

Întrucât $\underline{\varepsilon} = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon' \left(1 + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right) = \varepsilon' (1 + j \operatorname{tg} \delta)$ se obține:

$$|\underline{\varepsilon}| = \varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} = \frac{\varepsilon'}{\cos \delta}$$

$$\text{Avem: } I = C\omega U = \varepsilon \frac{S}{d} \omega U = \varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \frac{S}{d} \omega U = \frac{\varepsilon'}{\cos \delta} \frac{S}{d} \omega U$$

$$P = UI \sin \delta = \frac{\varepsilon'}{\cos \delta} \frac{S}{d} \omega U^2 \sin \delta = \varepsilon' S d \frac{U^2}{d^2} \omega \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = 2\pi f E^2 S d \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$$

Pentru un dielectric de volum $S \cdot d$ dat, mărimea puterii disipate depinde de proprietățile materialului reflectate în produsul $\varepsilon'' = \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$ numit și factor de pierderi și de parametrii electrici ai instalației de încălzire f , E . Fiindcă pentru un material dielectric considerat factorul de pierderi este un dat, rezultă că reglarea puterii disipate se poate face modificând frecvența și tensiunea transmise aplicatorului. (Sistemul de electrozi reprezintă partea cea mai însemnată a unei instalații industriale de încălzire de înaltă frecvență și este cunoscut sub denumirea de "aplicator".)

3. Parametrii care influențează puterea dezvoltată în dielectric

În practică se operează cu densitatea de volum a puterii:

$$P_V = 2\pi f E^2 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$$

Densitatea de putere dezvoltată în materialul încălzit crește proporțional cu frecvența. La frecvențe ridicate însă, sursele de putere sunt greu de realizat.

Densitatea de putere poate fi crescută și prin mărirea câmpului electric de care depinde cu puterea a doua. Creșterea tensiunii crește în același timp și riscul străpungerii. Tensiunea de străpungere a aerului uscat este 3kV/mm și de aceea acest tip de echipamente lucrează la valori ale câmpului electric de 80..300V/mm. Tensiunea dintre electrozi depășește rar 15kV.

Factorii ϵ_r și $\operatorname{tg} \delta$ nu reprezintă niște constante ci diferă mult de la un material la altul. Pentru un material dat, factorul de pierderi $\epsilon'' = \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$ depinde puternic de mai mulți factori precum frecvența (v. Fig.X.x anterioară), temperatura, umiditatea sau direcția câmpului electric. Tabelul următor exemplifică proprietățile dielectrice al unor materiale uzuale.

Table 1: Dielectric properties of some materials

Material	Temperatur	30 MHz		2500 MHz	
		ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
water	-12 °C	3.8	0.7	3.2	0.003
	+25 °C	78	0.4	77	13
	+85 °C	58	0.3	56	3
salt solution 0.1 0.5 molar	+25 °C	76	480	76	20
	+25 °C	75	2400	68	54
alumina ceramic	+25 °C	8.9	0.0013	8.9	0.009
quartz glass	+25 °C	3.78	<0.001	3.78	<0.001
nylon66	+25 °C	3.2	0.072	3.02	0.041
polyethylene	+25 °C	2.25	<0.0004	2.25	0.0007
Teflon	+25 °C			2.05	<0.0005
PVC	+20 °C	2.86	0.029	2.85	0.016

Dacă factorul de pierderi $\epsilon'' = \epsilon_r \operatorname{tg} \delta$ este mic, încălzirea se face lent și va fi dificil să se obțină temperatura dorită. Dacă factorul de pierderi este foarte ridicat, ia naștere un curent de fugă și utilizarea tensiunii înalte nu mai este posibilă. Astfel, pentru ca încălzirea prin histerezis dielectric să fie utilizată cu succes, este nevoie ca $0,01 < \epsilon'' = \epsilon_r \operatorname{tg} \delta < 1$.

Majoritatea materialelor încălzite în industrie au un factor de pierderi crescut cu temperatura. Pentru apă, factorul de pierderi crește cu temperatura până la 100, ca apoi să scadă. Dacă factorul de pierderi crește cu temperatura, odată atinsă o temperatură critică T_c va avea loc o concentrare a densității de putere în zonele mai fierbinți, ceea ce riscă să producă o încălzire locală. Fenomenul se numește "ambalare termică" și poate duce la distrugerea produsului. În acest caz trebuie, fie să se reducă densitatea de putere, fie să se facă o injecție de putere în impulsuri, astfel încât să poată avea loc o egalizare a temperaturii prin conducție.

Valoarea temperaturii critice se găsește de obicei în apropierea temperaturilor de schimbare de fază. În Fig.5.4 se exemplifică modificările tipice ale factorului de pierderi cu temperatura în cazul alimentelor, unde se înregistrează o tranziție bruscă la trecerea de temperatura de 0°C. Odată cu formarea primelor bule

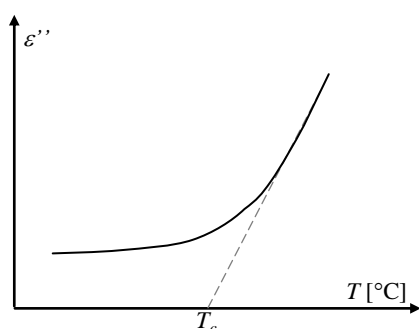


Fig.5.3 Factor de pierderi dielectrice cu coeficient pozitiv de variație cu temperatura

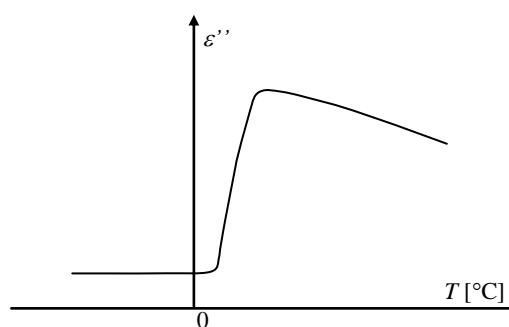


Fig.5.4 Variația tipică a factorului de pierderi dielectrice al alimentelor cu temperatura

de lichid, energia va fi disipată preferențial în acestea iar dezghețarea va fi neuniformă. De aceea, în cazul alimentelor, în prezent încălzirea dielectrică la decongelare se limitează superior la -2°C .

Umiditatea influențează la rândul ei mult valoarea factorului de pierderi, căci apa este un izolant aparte, care printre alte proprietăți remarcabile, o are și pe aceea că factorul de pierderi este foarte ridicat. Factorul de pierderi în înaltă frecvență variază de la valoarea 3 la 20°C la valoarea 6 la 100°C .

Iată în tabelul următor câteva valori pentru $f=3\text{MHz}$.

$\theta(^{\circ}\text{C})$	0	20	40	60	80	100
ϵ_r	88	80	73	67	61	55
$\epsilon'' = \epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$	2,7	3	3,7	4,6	5,5	5,7

Toate materialele dielectrice supuse uscării au factorul de pierderi mult inferior apei. De exemplu, celuloza are un factor de pierderi de $2 \cdot 10^{-2}$ la 50°C , adică de 200 ori mai mic decât al apei. Deci apa se încălzește de 200 ori mai repede ca hârtia sau bumbacul (produse pe bază de celuloză).

Factorul de pierderi crește ușor cu frecvența. Pentru a obține o densitate de volum suficient de ridicată, frecvența câmpului electric trebuie să fie $>1\text{MHz}$ și, în acest caz, factorul de pierderi al dielectricului este aproape independent de frecvență. Pentru apă, factorul de pierderi scade ușor când frecvența crește la 100 MHz ca apoi să crească.

4. Ecuația încălzirii

Energia acumulată la dielectric în cazul încălzirii este: $W = m \cdot c \cdot \Delta\theta$

unde m - masa dielectricului; c - căldura specifică; $\Delta\theta$ - variația de temperatură;

Raportând această relație la durata încălzirii t și la volumul V al dielectricului se obține o putere specifică de volum:

$$P_v = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\theta}{V \cdot t} = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta\theta}{t}$$

ρ fiind densitatea (sau masa specifică) a dielectricului.

Dacă se consideră că întreaga căldură dezvoltată în dielectric servește pentru ridicarea temperaturii acestuia, atunci:

$$2\pi f E^2 \epsilon_r \text{tg}\delta = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta\theta}{t} \quad \Rightarrow \quad \Delta\theta = \frac{2\pi \epsilon_r \text{tg}\delta}{\rho \cdot c} f \cdot E^2 \cdot t$$

Ultima relație se numește "ecuația de încălzire a dielectricului". Pentru un dielectric dat, caracterizat prin parametrii ϵ , $\text{tg}\delta$, ρ și c , creșterea rapidă a temperaturii se va obține prin mărirea lui f , E sau t . Dar totodată trebuie ținut cont de următoarele limitări:

- Mărirea frecvenței câmpului electric este limitată de apariția fenomenelor de propagare de-a lungul armăturilor condensatorului. Dacă fenomenul de propagare apare, încălzirea dielectricului va fi neuniformă.
- Mărirea intensității câmpului electric este limitată de pericolul străpungerii dielectricului.
- Mărirea duratei de încălzire nu este convenabilă, din cauza scăderii productivității pe de o parte, iar pe de altă parte, pierderile de căldură, care nu au fost luate în seamă la stabilirea ecuației de încălzire a dielectricului, cresc o dată cu creșterea duratei de încălzire, rezultând o scădere a randamentului încălzirii. După trecerea unui anumit timp, are loc stabilirea echilibrului termic în dielectricul încălzit. Atunci puterea utilă dezvoltată este egală cu puterea pierdută (regim staționar) și ridicarea temperaturii dielectricului încetează.

5. Efectul pelicular. Adâncimea de pătrundere

La încălzirea de înaltă frecvență și hiperfrecvență, câmpul electric pătrunde în materialul de încălzit cu atât mai puțin cu cât frecvența crește, la fel cum se petrec lucrurile și la încălzirea prin inducție magnetică.

Adâncimea de pătrundere se definește ca adâncimea pentru care densitatea de putere se reduce în interiorul materialului la $1/e$ din valoarea de la suprafața acestuia, ceea ce corespunde unei valori procentuale de 37%.

Dacă, câmpul electric și densitatea de putere au la suprafață valorile E_0 și P_0 , iar la distanța x de la suprafață valorile E_x și P_x , atunci:

$$E_x = E_0 e^{-\alpha x} \quad P_x = P_0 e^{-2\alpha x}$$

Constanta de atenuare α depinde de proprietățile dielectricului și de lungimea de undă λ_0 a radiației incidente

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\varepsilon_r \sqrt{1 + tg^2 \delta}}{2}}$$

Conform definiției de mai sus a adâncimii de pătrundere, aceasta va fi :

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} \quad \text{sau} \quad \Delta = \frac{\lambda_0}{4\pi} \left(\frac{\varepsilon_r \sqrt{1 + tg^2 \delta}}{2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

În cele mai multe dintre cazurile practice $tg\delta < 1$ și chiar $\ll 1$, și se folosește o relație simplificată pentru Δ

$$\Delta = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi f \sqrt{\varepsilon_r} tg\delta}$$

În încălzirea dielectrică de înaltă frecvență adâncimea de pătrundere este în general $> 1m$ și poate atinge câțiva zeci de metri. Noțiunea de adâncime de pătrundere are, pentru cea mai mare parte a aplicațiilor, un interes redus și degajarea de căldură poate fi considerată omogenă în întregul dielectric.

În încălzirea dielectrică de hiperfrecvență (cu microunde) această noțiune capătă însă o importanță deosebită. În cazul apei, datorită unei valori foarte mici pentru $tg\delta$, adâncimea de pătrundere este deosebit de redusă (exp: la 2450 MHz, $\Delta=12$ mm la $15^\circ C$ și $\Delta=1200$ mm pentru gheață)

6. Caracteristici ale încălzirii capacitive

Încălzirea capacitivă se aplică acolo unde alte metode nu satisfac condițiile impuse de viteză de încălzire și uniformitate a temperaturii în produs. Avantajele metodei sunt:

- transferul direct al energiei în produs, ceea ce reduce timpul de încălzire, asigurându-se astfel o bună uniformitate și o productivitate ridicată a procesului
- încălzirea omogenă a produsului, atunci c/nd produsul este omogen și de formă regulată
- încălzirea selectivă a materialelor complexe (stratificate); de exemplu, în procesele de uscare, apa absoarbe mai multă energie fapt care conduce la încălzirea rapidă a zonelor umede și la evitarea arderii sau deshidratării totale a zonelor uscate
- densități de putere ridicate ($300 - 5000 \text{ kW/m}^3$ sau până la 100 kW/m^2) care asigură productivități ridicate ale procesului
- timpul scurt de încălzire și temperaturile de lucru relativ scăzute fac ca pierderile termice să fie scăzute
- randamentul global este relativ ridicat ($50 - 60\%$) chiar dacă el este afectat de randamentul mai scăzut al generatorului ($55 - 70\%$); randamentul global este în general superior altor sisteme de încălzire, în special în cazul încălzirilor selective
- se poate aplica unor materiale speciale (pulberi, materiale fragile, materiale groase, materiale sandwich etc)

Încălzirea capacitivă prezintă totuși unele limitări economice și dificultăți tehnologice:

- costul inițial al instalației este de 4 .. 6 ori mai mare decât al unui cuptor cu rezistoare de aceeași putere, randamentele fiind comparabile; atunci celelalte avantaje ale încălzirii capacitive trebuie să justifice diferența de preț
- în cazul materialelor de formă neregulată sau neomogene procedeul se aplică cu dificultate
- apariția fenomenului de propagare de-a lungul armăturilor condensatorului de lucru în cazul sarcinilor plane de dimensiuni mari, ceea ce duce la modificarea câmpului electric și implicit, la neuniformitatea încălzirii (se recurge la alimentarea în mai multe puncte)

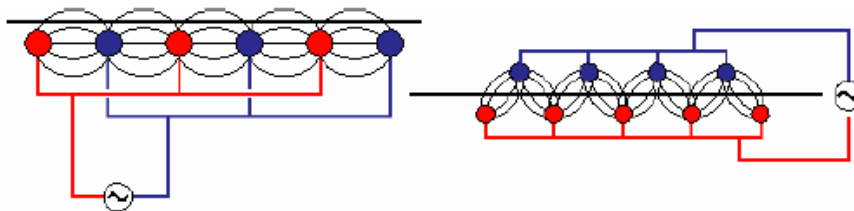
7. Aplicații industriale

Datorită costului inițial mare al instalației și a unui consum de energie relativ ridicat, încălzirea dielectrică se combină de multe ori cu alte procedee clasice și mai economice (încălzirea prin radiație, prin convecție cu aer cald etc.). Datorită temperaturii de uscare scăzută și continuu controlată, uscarea capacitivă se recomandă pentru toate materialele pentru care parametrii de calitate sunt afectați de temperaturile înalte.

Principalele aplicații industriale ale încălzirii capacitive sunt:

- uscarea materialelor textile:

Materialele textile sunt izolatoare termice foarte bune și de aceea încălzirea acestora în volum este dificilă prin alte procedee. De exemplu, încălzirea la 30 - 35°C a baloturilor de lână de volum 2m³ și greutate 200 – 400 Kg poate dura 2 – 3 zile în cuptoarele cu convecție. Același proces poate fi realizat prin încălzire capacitivă într-un timp de numai 5 - 8 minute, cu un consum specific de 20 – 25 kWh/t.



- uscarea hârtiei

Cea mai utilizată aplicație o reprezintă corectarea profilului de umiditate. La terminarea procesului de uscare, hârtia poate prezenta variații importante ale gradului de umiditate în secțiune, ceea ce îi poate afecta proprietățile. Încălzirea capacitivă este cea mai potrivită acestui proces de corecție datorită capacității de a încălzi selectiv (apa are un factor de pierderi de cca 20 de ori mai mare ca hârtia uscată).

- lipirea lemnului

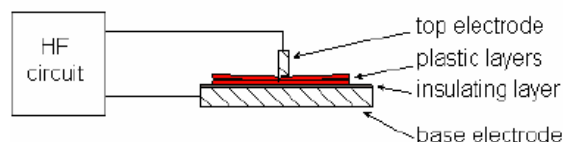
Datorită proprietăților sale selective, încălzirea capacitivă se folosește cu succes în polimerizarea adezivilor pentru lemn. Aceștia au conținut ridicat de apă și se vor încălzi mai repede și mai tare decât restul masei lemnoase. Se aplică cu succes în furniruirea plăcilor de PAL, obținerea de placaje multistrat, a plăcilor de tip OSB etc.

- tratarea alimentelor

Utilizarea încălzirii capacitive în panificație la uscarea finală a biscuiților evită apariția crustei care împiedică evaporarea apei. O instalație capacitivă de 5 m lungime poate înlocui un cuptor clasic de 30m, eliminând cca 80l apă pe oră, cu un consum specific de 1,2 – 1,4 kWh / Kg de apă evaporată. Față de cuptorul pe gaz, consumul de energie este mai mic cu 30%.

- prelucrarea maselor plastice

Încălzirea capacitivă se folosește la preîncălzirea materialelor plastice cu factor de pierderi ridicat, înainte de mulare, turnare sau lipire. Unele materiale ca polietilena sau polistirenul nu pot fi prelucrate capacitiv din cauza factorului de pierderi foarte scăzut (sub 0,001). Avantajul metodei este că elimină cu ușurință apa din materiale cu conductivitate termică scăzută, lucru dificil prin metode clasice.



TEHNOLOGII CU MICROUNDURILE

Încălzirea prin intermediul microundurilor, la fel ca cea la înaltă (radio-) frecvență, este datorată transformării în căldură prin histerezis dielectric a unei părți din energia conținută în unda electromagnetică.

Domeniul de frecvențe al microundurilor este cuprins între $3 \cdot 10^8 \dots 3 \cdot 10^{10}$ Hz și se suprapune peste benzile de telecomunicații. Pentru a evita fenomenele de bruij, s-au alocat la nivel internațional anumite benzi de frecvență pentru aplicațiile industriale, științifice și medicale, numite și frecvențe ISM (Industrial, Medical and Scientific). Pentru Europa aceste frecvențe sunt: 2450 MHz (cea mai folosită), 5800 MHz și 22125 MHz (ultimele mai des folosite în SUA).

În domeniul microundurilor lungimile de undă sunt inferioare dimensiunilor instalațiilor (de exemplu, pentru 2450 MHz, $\lambda = 12,2$ cm) și respectă legile fundamentale de propagare a undelor electromagnetice. În domeniul frecvențelor radio lungimile de undă sunt superioare dimensiunilor instalației și, mai mult, se pot încă aplica legile electromagnetismului în regim cvasistaționar.

La încălzirea dielectricilor la înaltă frecvență sau în hiperfrecvență, adâncimea de pătrundere se definește ca fiind adâncimea pentru care densitatea de putere se reduce de e ori față de valoarea de la suprafața materialului supus încălzirii.

Dacă E_0 și P_0 reprezintă câmpul electric și densitatea de putere la suprafața materialului, iar E_x și P_x sunt valorile la distanța x față de suprafață, atunci:

$$E_x = E_0 e^{-kx} \quad P_x = P_0 e^{-kx}$$

și deci, adâncimea de pătrundere va fi: $\Delta = \frac{1}{2} k$.

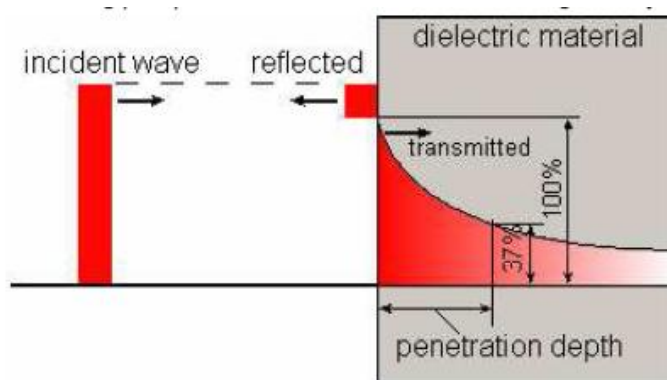
Constanta de atenuare k depinde de proprietățile dielectricului și de lungimea de undă a radiației incidente λ_0 :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{\epsilon_r \sqrt{(tg^2 \delta - 1)}}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Deoarece, pentru majoritatea cazurilor practice, valorile lui $tg \delta$ sunt mult mai mici decât 1, pentru calculul lui Δ se folosește formula simplificată:

$$\Delta = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r} tg \delta}$$

În încălzirea dielectrică la radiofrecvență, adâncimea de pătrundere este mai mare de 1 m și poate ajunge la câțiva zeci de metri, încălzirea fiind considerată omogenă în întreg materialul. În schimb, în cazul microundurilor adâncimea de pătrundere are valori mult mai reduse (pentru 2450 MHz, $\Delta = 12$ mm pentru apă cu temperatură de 12°C și 1200 mm pentru gheață) și de aceea devine o noțiune importantă.



În funcție de natura lor, materialele aflate în câmp de microunduri se manifestă diferit, deosebindu-se în trei categorii:

- Metalele, a căror suprafață se comportă ca un reflector sau ca un receptor și reemițător. Reflexia are loc

cu pierderi de energie mai mici la metalele nemagnetice și cu o bună conductivitate electrică și de aceea, alumiul, alama, și oțelurile inoxidabile sunt folosite la construcția "containerelor" de microunde.

- Dielectrici cu pierderi mici, prin care undele trec fără o atenuare semnificativă și deci cu pierderi reduse de energie (polietilenă, sticla, teflonul etc.).
- Dielectrici cu pierderi mari (factori de pierderi mari) în care energia microundelor se transformă în bună parte în căldură.

Microundele sunt radiate liber în spațiu de către un electrod numit antenă și, pentru ca ele să interacționeze cât mai eficient cu materialul de încălzit, trebuie să fie ghidate și concentrate. Un echipament de încălzire cu microunde va avea de aceea trei componente principale: generatorul de microunde, ghidul de undă și aplicatorul.

a) **Generatoare de microunde**

La frecvențele ridicate de care este nevoie, oscilatoarele cu triode folosite la încălzitoarele în radiofrecvență nu mai sunt eficiente și trebuie utilizate dispozitive speciale precum magnetronul și klystronul.

Magnetronul este un tub cu vid care are rol de oscilator și este constituit din doi electrozi: un catod cilindric central înconjurat de un anod circular prevăzut cu cavități oscilante (Fig.5.7). Între anod și catod există un spațiu de interacțiune. Anodul este circular și conține mai multe cavități rezonante care sunt circuitate acordate ce determină frecvența de ieșire a tubului. Catodul și filamentul sunt plasate în centrul cilindrului ce reprezintă anodul. Antena este conectată la anod și permite cuplarea externă la ghidul de undă pentru a transmite energia de radiofrecvență generată de magnetron.

Magneții permanenți generează un câmp magnetic intens B paralel cu axa catodului. Tubului i se aplică totodată, un câmp electric intens E datorat unei tensiuni continue de valoare ridicată pe electrozi.

Funcționarea magnetronului se bazează pe mișcarea electronilor, generați de filament, către anod, sub influența simultană a două câmpuri: câmpul electric generat de tensiunea anodică aplicată tubului și câmpul magnetic generat de magneții permanenți. Sub influența câmpului electric electronii tind să se deplaseze liniar de la catod la anod. Sub influența câmpului magnetic axial traiectoria electronilor va fi una circulară de la catod spre anod.

Prin acțiunea combinată a celor două câmpuri rezultă, practic, un nor electronic care se rotește în spațiul cuprins între catod și cavitățile rezonante ale anodului. Electronii emiși de catodul încălzit aflați sub influența celor două câmpuri vor descrie o serie de cicloide și pierd treptat energia lor cinetică către cavitățile rezonante pe care le întâlnesc în calea lor. Frecvența de rezonanță este determinată de dimensiunile cavității și fantei. Electronii ajung pe anod cu viteze reduse și excedentul de energie care se creează în tub se poate recupera la nivelul unei cavități cu ajutorul unei bucle.

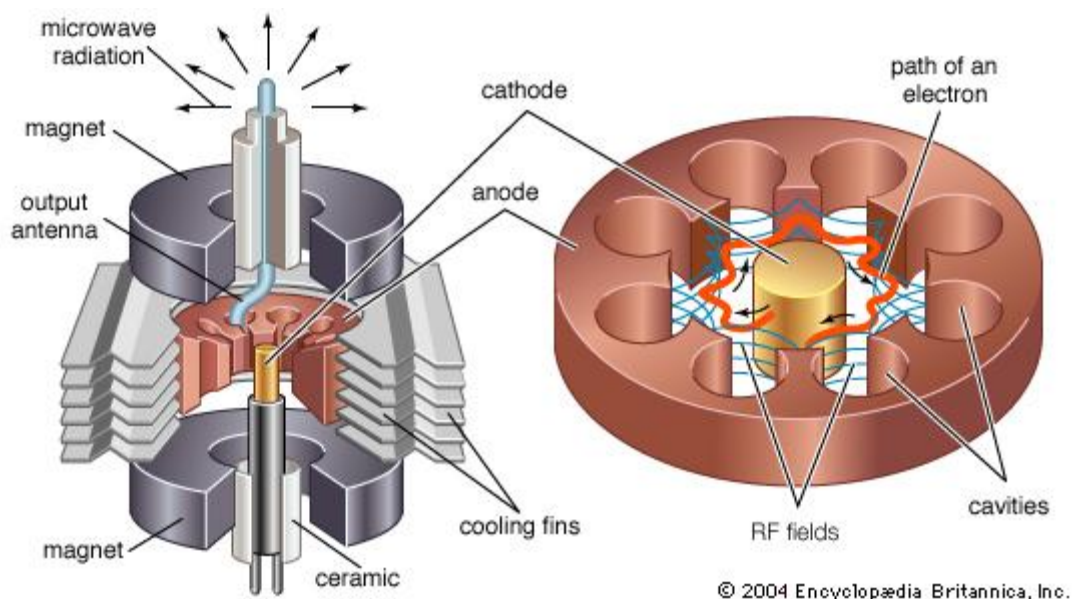
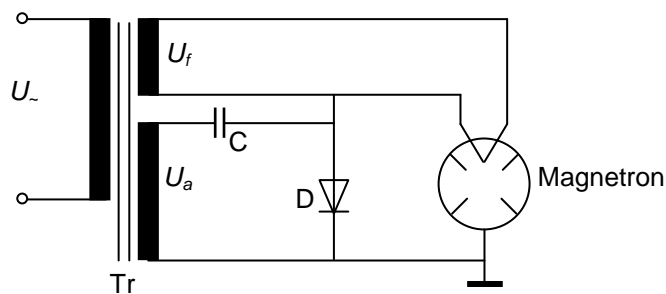


Fig.5.7 Magnetronul a-principul constructiv b- traiectoriile electronilor.

În regimul critic, obținut pentru anumite valori ale tensiunii anod-catod (U_a) și ale inducției magnetice (B) traiectoria electronului este circulară și tangentă la anod, iar curentul anodic se anulează. Dar odată ce

se depășește puțin regimul critic, magnetronul va genera oscilații de foarte înaltă frecvență.



- Exemplu: Magnetronul 2M137**
- Tensiune de filament 4,4 V
 - Curent de filament 14 A
 - Tensiune anodică de vârf: 4,5 kV
 - Curent anodic mediu: 400mA_{cc}
 - Putere medie de ieșire: 1260W
 - Frecvența: 2460 MHz

Fig.5.8 Schema unui generator continuu de microunde cu magnetron

Tr - transformator înaltă tensiune
 U_{\sim} - tensiune alimentare
 U_f - tensiune filament

U_a - tensiune anodică
 C - condensator înaltă tensiune
 D - diodă înaltă tensiune

Câmpul electric este generat de tensiunea anodică ce are o valoare de câteva mii de volți curent cotinuu, tensiune ce se obține cu ajutorul transformatorului de înaltă tensiune împreună cu dublorul realizat cu dioda și condensatorul de înaltă tensiune. Puterea la ieșirea din acest sistem poate fi reglată prin tensiunea continuă aplicată între anod și catod, fie prin modificarea câmpului magnetic între electrozi.

b) Ghidul de undă

Constă dintr-un domeniu conductor sau dielectric, situat în lungul unei axe, delimitat de suprafețe de discontinuitate a parametrilor electrici și magnetici, astfel încât câmpul (de hiperfrecvență) se propagă pe direcția axei sale.

Ghidurile de undă sunt neuniforme sau uniforme. În ultimul caz, secțiunea lor care poate fi cilindrică, dreptunghiulară sau eliptică, se păstrează identică în orice punct de pe axa longitudinală.

Cele mai folosite sunt ghidurile de undă a căror mod de propagare este denumit TEM (Transversal Electro-Magnetic), ca exemple putându-se menționa: plăci metalice paralele, linia bifilară, cablu coaxial etc.

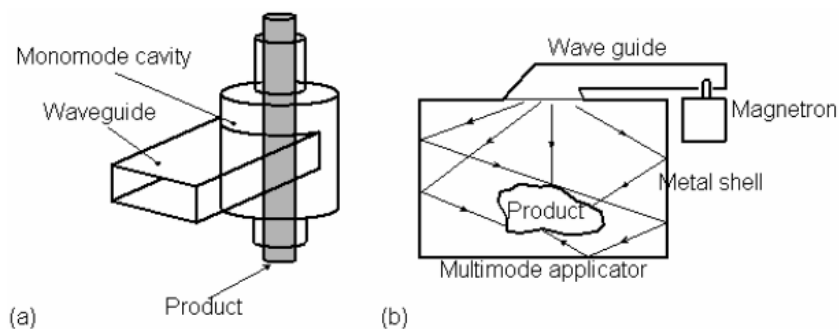


Figure 3:(a) monomode applicator; (b) multimode applicator

Fig.5.9

c) Aplicatori

Aplicatorul are rolul de a transfera energia electromagnetică venită de la sursă către produsul încălzit. Forma sa depinde de aplicația propriu-zisă. El trebuie să fie eficient (transferul de energie să fie optim) și sigur (fără pierderi sau radiații). De aceea, toți aplicatorii sunt incinte închise, cu forme mai mult sau mai puțin complexe.

Există două forme de bază pentru aplicații de microunde: ghidul de undă sau aplicatorul "monomod" și aplicatorul cavitare "multimod". În cavitatea multimod au loc reflexii multiple pe pereții metalici și undele se vor "țese" în întreg interiorul cavității. Pot apare însă distribuții neuniforme ale câmpului electric din cauza cărora se pot produce distribuții neuniforme de temperatură (încălzire neuniformă). Pentru a evita încălzirea neuniformă a produsului fie se folosește un ventilator electromagnetic, fie se imprimă produsului o mișcare de rotație.

Aplicații industriale

- sudarea maselor plastice (în special PVC sau poliamidă)
- uscare (cherestea, ceramică, cereale, furnir, elemente de mobilier etc.)
- vulcanizarea cauciucului
- preucrarea produselor alimentare etc.