

PROCESAREA ELECTROMAGNETICĂ A MATERIALELOR

Conf.dr.ing. Laurențiu Dumitran

Departamentul de Mașini, Materiale și Acționari electrice

Structura cursului

1. Procesarea electrotermică a materialelor (9 h);
2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei (2h);
3. Procesarea materialelor prin bombardament electronic (1 h);
4. Procesarea materialelor în câmpuri electromagnetice de înaltă frecvență și cu ajutorul microundelor (3 h);
5. Procesarea materialelor prin deformare electromagnetică (3 h);
6. Separarea magnetică a materialelor (3 h);
7. Separarea electrostatică a materialelor (3 h);
8. Filtrarea electrostatică a gazelor industriale; medii filtrante polimerice nețesute (4 h).

Structura cursului

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Conducția termică;

1.1.2. Transmisia căldurii prin convecție termică;

1.1.3. Transmisia căldurii prin radiație termică;

1.1.4. Aplicație numerică;

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.1. Noțiuni generale;

1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare conductoare în curent alternativ; corelația timp de încălzire – densitate de curent;

1.2.3. Aplicații industriale;

1.2.4. Aplicație numerică;

Structura cursului

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.1. Principiul metodei – aplicații practice;

1.3.2. Bazele teoretice; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive;

- pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor;
- difuzia uni și bilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare;
- difuzia câmpului electromagnetic în cilindri și țevi;

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp încălzit; indicatori energetici;

1.3.4. Surse statice de frecvență;

1.3.5. Aplicații industriale;

Structura cursului

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.1. Principiul metodei – aplicații practice;

1.3.2. Bazele teoretice; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive;

- pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor;
- difuzia uni și bilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare;
- difuzia câmpului electromagnetic în cilindri și țevi;

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp încălzit; indicatori energetici;

1.3.4. Surse statice de frecvență;

1.3.5. Aplicații industriale;

Structura cursului

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.1. Noțiuni generale

2.2. Procesarea materialelor în plasmă termică

2.2.1. Plasma de arc electric;

2.2.2. Generarea plasmei termice prin inducție electromagnetică;

2.3. Procesarea materialelor în plasmă rece

2.3.1. Plasma generată prin descărcări corona;

2.3.2. Plasma generată prin descărcări luminescente;

Structura cursului

3. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

3.1. Noțiuni generale – caracteristicile principale ale unui fascicul de electroni

3.2. Instalații pentru producerea fasciculelor de electroni;

3.3. Aplicații practice;

Structura cursului

4. Procesarea materialelor în câmpuri electrice de înalta frecventa si cu ajutorul microundelor

4.1. Principiul încălzirii dielectricilor în câmpuri electrice variabile în timp;

4.2. Procesarea materialelor dielectrice în campuri electrice de radio-frecventa;

4.3. Procesarea materialelor cu ajutorul microundelor;

4.3.1. Caracteristicile procesării materialelor cu microunde;

4.3.2. Surse de microunde;

4.3.3. Noțiuni referitoare la transmisia microundelor

Structura cursului

5. Procesarea materialelor prin deformare electromagnetica

5.1. Noțiuni generale – principiul metodei;

5.2. Câmpul electromagnetic tranzitoriu în cazul deformării electromagnetice;

5.3. Câmpul electromagnetic în aproximația pereților conductori subțiri;

5.3.1. Expresiile conductivității și permeabilității superficiale echivalente unui perete conductor plan;

5.3.2. Formele locale ale legilor câmpului electromagnetic în regim cvasistaționar pe suprafețe de discontinuitate;

5.3.3. Expresiile instantanee ale forței electromagnetice care se exercită asupra suprafeței conductoare;

Structura cursului

6. Separarea magnetică a materialelor

6.1. Noțiuni generale – principiul separării magnetice;

6.1.1. Acțiuni ponderomotoare în câmp magnetic

6.2. Separarea magnetică de ordinul I;

6.2.1. Separarea magnetică clasică;

6.2.2. Separarea în câmpuri magnetice de mare intensitate;

6.3. Separarea magnetica de ordinul al II-lea;

6.3.1. Separarea în funcție de conductivitatea electrică;

5.3.2. Separarea magnetodensimetrică;

6.4. Ferrofluide;

Structura cursului

7. Separarea electrostatică a materialelor

7.1. Noțiuni generale – principiul metodei;

7.2. Separatoare electrostatice industriale;

7.3. Câmpul electric și sarcina electrică spațială în zona activă a unui separator electrostatic;

7.3.1. Descărcări corona în aer în sisteme de electrozi duali;

7.3.2. Încărcarea cu sarcină electrică a particulelor în câmpuri electrice ionizate; triboelectrizarea;

7.3.3. Factori ce influențează eficiența de separare electrostatică;

Structura cursului

8. Filtrarea electrostatică a gazelor industriale

8.1. Noțiuni generale – principiul metodei;

8.2. Filtre electrostatice industriale;

8.3. Câmpul electric și sarcina electrică spațială în interiorul filtrelor electrostatice;

8.3.1. Descărcări corona;

8.3.2. Încărcarea cu sarcină electrică a particulelor în câmpuri electrice ionizate;

8.3.3. Factori ce influențează eficiența de filtrare electrostatică;

8.4. Medii polimerice nețesute pentru aplicații industriale;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

Procesarea electrotermica a materialelor = încălzirea materialelor prin conversia energiei electrice în energie termica

Fenomene de transfer termic: *conducție, convecție si radiație*



Necesitatea cunoașterii particularităților de transmisie a căldurii în procesele electrotermice:

- determinarea **variației în timp a câmpului termic** în materialul supus încălzirii;
- evaluarea celor două componente ale energiei termice: **energia utila** si **pierderile de energie asociate procesului**;

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Conducția termica

Def. Conducția termica = procesul de transmitere a căldurii în interiorul unui corp caracterizat printr-un câmp de temperatura neuniform.

- conducția termica în regim staționar $\theta(r)$;
- conducția termica în regim tranzitoriu (nestaționar) $\theta(r, t)$;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

Fluxul termic $\mathbf{P}_t$ = mărime asociata unei suprafețe S

Def. Fluxul termic reprezintă căldura care străbate suprafața S in unitatea de timp.

$$P_t = \int_S \vec{p}_s d\vec{A}$$

Local fluxul termic se exprima prin ***densitatea de flux termic*** sau ***fluxul specific p_s***

$$\vec{p}_s = -\lambda \cdot grad\theta$$

λ = constanta numita conductivitatea termica a mediului.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

Valori ale fluxului termic caracteristice diverselor procese electrotermice

Procedeul de incalzire	Densitatea de putere (kW/m ²)
Metoda rezistiva indirecta	5 - 60
Metoda rezistiva directa	$10^2 - 10^5$
Incalzirea prin inductie	$50 - 5 \cdot 10^4$
Arc electric	$10^3 - 10^6$
Incalzirea in campuri electrice de inalta frecventa (dielectrice)	30 - 100
Microunde	50 - 500
Plasma	$10^3 - 10^6$
Bombardament electronic	$10^4 - 10^{10}$
Laser	$10^5 - 10^{16}$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Conducția termică

Valori ale conductivității termice pentru diferite medii

Mediu	$\lambda(\text{W/m}^\circ\text{C})$
Gaze	0,005 – 0,2
Aer	0,025
Lichide	0,01 - 1
Materiale ceramice refractare	1 - 20
Materiale termoizolante	0,1 - 1
Metale	7 - 400

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Conducția termică

Ecuția conducției termice

Conform principiului I al termodinamicii variația energiei interne dU a unui sistem fizic între două stări este egală cu suma dintre cantitatea de căldură elementară δQ schimbată de sistem și lucrul mecanic elementar δL efectuat de sistem sau asupra sistemului.

$$dU = \delta Q + \delta L$$

$$\delta L = \sum_k F_k dx_k \quad \delta Q = dU - \sum_k F_k dx_k = d\left[U - \sum_k F_k x_k\right] + \sum_k x_k dF_k$$

Mărimea $H = U - \sum_k F_k x_k$ se numește entalpia sistemului.

În aplicațiile practice în care corpurile sunt imobile ($dx_k = 0$ și $dF_k = 0$) rezultă:

$$dU = dQ = dH$$

Căldura schimbată de sistem se poate exprima: $\delta Q = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_{p_k=ct.}$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

Ecuția de bilanț termic este:
$$dT + \sum_k \frac{\partial Q}{\partial p_k} dp_k = C \cdot dT + \sum \Lambda_k dp_k$$

C = capacitatea calorică a sistemului la parametrii de stare $p_k = \text{ct.}$

Λ_k = căldura latentă la variația parametrului de stare p_k .

Mărimile de mai sus se pot exprima astfel:

$$C = \int_{V_\Sigma} \gamma \cdot c \cdot dV \quad \Lambda_k = \int_{V_\Sigma} l_k \cdot dV \quad H = \int_{V_\Sigma} h \cdot dV \quad \text{in care } \gamma \text{ este densitatea mediului}$$

Din egalitatea $dH = dQ$ se poate obtine expresia derivatei entalpiei specifice (h)

$$\frac{dh}{dT} = \gamma \cdot c + \frac{d}{dT} \left(\sum_k l_k dp_k \right)$$

in care:

- c = căldura specifică a mediului;
- l_k = căldura latentă specifică corespunzătoare variației parametrului k ;
- h = entalpia specifică.

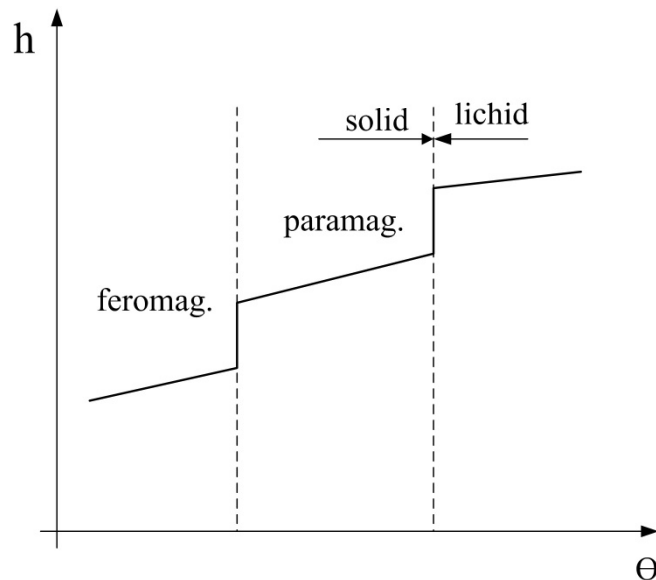
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

$$\frac{dh}{dT} = \gamma \cdot c + \frac{d}{dT} \left(\sum_k l_k dp_k \right)$$

Rezulta ca entalpia specifica este egala cu suma dintre căldura specifica impusa de variația temperaturii (produsul $c \cdot \gamma$) si energia latentă corespunzătoare transformărilor de faza.



In cele ce urmează considerăm o suprafață Σ care delimitează un sistem de corpuri imobile ($v = 0$). Presupunem ca in interiorul acestei suprafețe exista surse termice caracterizate prin densitate de volum a puterii p . Puterea totală corespunzătoare surselor este:

$$P_S = \int_{V_\Sigma} p \cdot dV$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

Fluxul termic ce străbate suprafața Σ este $P_{t\Sigma}$:
$$P_{t\Sigma} = \int_{\Sigma} [-(\lambda \text{grad} \theta)] d\vec{A}$$

Ecuția asociată bilanțului termic in intervalul de timp infinit scurt dt este:

$$dU = dQ = dH = (P_S - P_{t\Sigma})dt$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{\Sigma}} h \cdot dV = \int_{V_{\Sigma}} p \cdot dV + \int_{\Sigma} (\lambda \cdot \text{grad} \theta) d\vec{A}$$

$$\int_{V_{\Sigma}} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(h \cdot \vec{v}) \right] dV = \int_{V_{\Sigma}} p \cdot dV + \int_{V_{\Sigma}} \text{div}(\lambda \text{grad} \theta) dV$$

$$\boxed{\frac{\partial h}{\partial t} = p + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} \theta)}$$

sau

$$\boxed{\frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial \theta}{\partial t} = p + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} \theta)}$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

$$\frac{\partial h}{\partial t} = p + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}\theta)$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial \theta}{\partial t} = p + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}\theta)$$

CAZURI PARTICULARE:

- Nu se produc transformări de faza: $\frac{\partial h}{\partial T} = \gamma \cdot c \Rightarrow \gamma \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = p + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}\theta)$

- Cazul corpurilor omogene pentru care $\lambda(r) \neq \lambda$ si $\lambda(\theta) \neq \lambda$, rezulta ecuatia lui Fourier:

$$\frac{\gamma \cdot c}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\text{grad}\theta) + \frac{p}{\lambda}$$

$\alpha = \lambda / (\gamma c)$ se numeste *difuzivitate termica*

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

$$\frac{\partial h}{\partial t} = p + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \theta)$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} \frac{\partial \theta}{\partial t} = p + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \theta)$$

CAZURI PARTICULARE:

-Cazul corpurilor omogene pentru care $\lambda(r) \neq \lambda$ si $\lambda(\theta) = \lambda$ (conductivitatea depinde de temperatura) se pleacă de la funcția:

$$\varphi(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda(\theta) d\theta$$

care este monoton crescătoare (deci inversabila). Exista deci funcția inversa $\theta(\varphi) = \varphi^{-1}$. Ținând cont ca:

$$\operatorname{grad} \varphi = \operatorname{grad} \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda(\theta) d\theta = \lambda \operatorname{grad} \theta \quad \Rightarrow \quad \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \theta) = \operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi)$$

si ecuația transferului termic prin conducție devine:
(cu necunoscuta $\varphi(r,t)$)

$$\frac{\partial h[\theta(\varphi)]}{\partial t} = p + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \varphi)$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Conducția termica

CAZURI PARTICULARE:

$$\frac{\partial h[\theta(\varphi)]}{\partial t} = p + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \varphi)$$

In regim termic staționar, când $\theta \neq \theta(t)$ rezulta:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \theta) = -p \quad \text{sau} \quad \operatorname{div}(\operatorname{grad} \theta) = -\frac{p}{\lambda}$$

forme valabile pentru corpurile omogene cu surse.

Evident, pentru corpurile omogene fara surse ecuatia este:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \theta) = 0$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Conducția termică

CONDITII DE UNICITATE A SOLUTIEI ECUATIEI CONDUCTIEI TERMICE:

A) Condițiile inițiale:

Cunoașterea $\theta(\vec{r}, 0)$ sau $h(\vec{r}, 0) \quad \forall \quad \vec{r} \in V_{\Sigma}$

B) Condițiile la limita:

- de tip Dirichlet: $\theta(\vec{r}_{\Sigma}, t) \quad \forall \quad \vec{r}_{\Sigma} \in \Sigma$

-de tip Neumann: $\frac{\partial \theta(\vec{r}_{\Sigma}, t)}{\partial n}$ sau $p_{s\Sigma} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\vec{r}_{\Sigma}}$

-de tip mixt: cunoașterea valorilor unei funcții de forma:

$$a \cdot \theta(\vec{r}_{\Sigma}, t) + b \cdot \frac{\partial \theta(\vec{r}_{\Sigma}, t)}{\partial n} = f_{\Sigma}(t)$$

C) Cunoașterea surselor de căldura:

$$p(\vec{r}_{\Sigma}, t) \quad \forall \quad \vec{r}_{\Sigma} \in \Sigma$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.2. Convecția termica

Def. Convecția termica este procesul care se desfasoara la suprafata unui corp solid aflat in contact cu un mediu fluid (gaz sau lichid) atunci când exista o diferență de temperatura intre cele doua medii.

La suprafata de contact dintre corpul solid si mediul lichid se poate defini un flux termic a cui expresie este următoarea:

$$p_s = \alpha_c (\theta_c - \theta_f)$$

in care α_c se numește *coeficient de convecție termica* (sau *transmisivitate termica*) iar θ_f si θ_c este temperatura fluidului, respectiv a corpului.

Obs. Transmisivitatea termica α_c depinde de urmatorii factori:

- starea dinamica a sistemului (miscarea relativa intre solid si lichid);
- regimul de curgere a fluidului (laminar sau turbulent);
- proprietatile fizice ale fluidului (caldura specifica, densitate, vascozitate, conductivitate termica);
- forma, orientarea si dimensiunile suprafetei de schimb termic in raport cu curgerea;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.2. Convecția termica

Valori orientative ale transmisivitatii termice α_c :

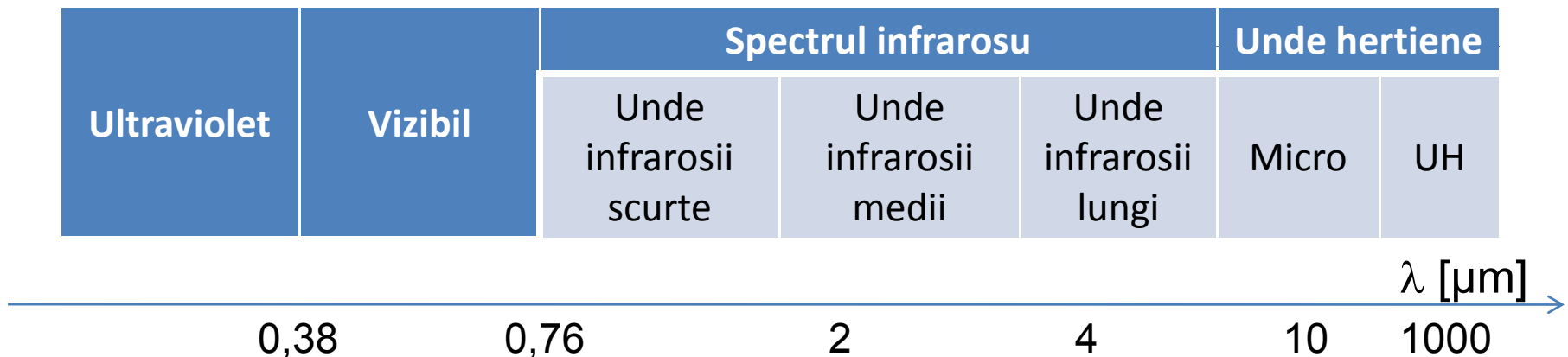
Mediu fluid	Transmisivitatea termica α_c (W/m ² .°C)
Convecția naturala a aerului	3 - 30
Convecția fortata a aerului	10 - 500
Convecția fortata a apei	200 - 40000
Convecția libera a metalelor topite	20000 - 50000

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

Def. Radiația termica reprezintă procesul de transmisie a căldurii prin radiații electromagnetice având lungimea de unda in intervalul 0,1 – 100 μm .



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

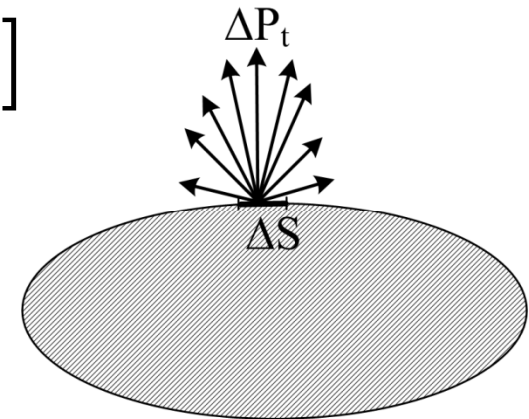
1.1.1. Radiația termica

A) Emisia radiațiilor:

Def. *Emisivitatea totala (radianta)* asociata unui punct aflat pe suprafața unui corp emitor de radiații reprezintă fluxul emis in toate direcțiile corespunzător unitatii de suprafața:

$$p_t = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P_t}{\Delta S} \left[\text{W/m}^2 \right]$$

Obs. Radianta depinde de valoarea temperaturii si de caracteristicile de emisie ale suprafeței.



1. Procesarea electrotermică a materialelor

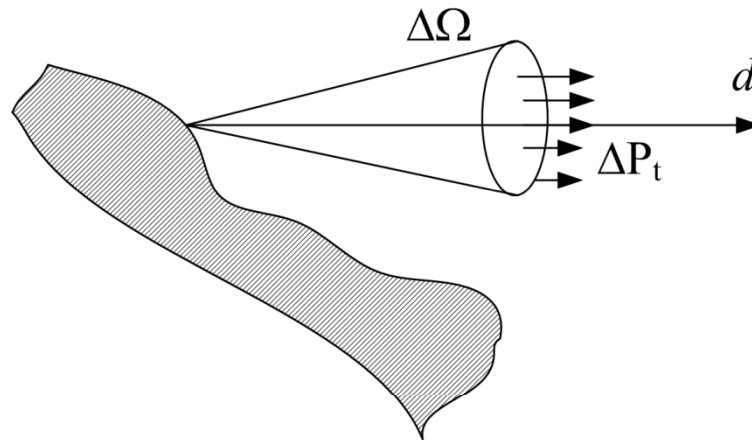
1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

A) Emisia radiațiilor:

Def. *Intensitatea totală a radiației* asociată unei direcții d date reprezintă fluxul radiat corespunzător unității de unghi solid în lungul acestei direcții:

$$I_d = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P_t}{\Delta \Omega} [\text{W/steradian}]$$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

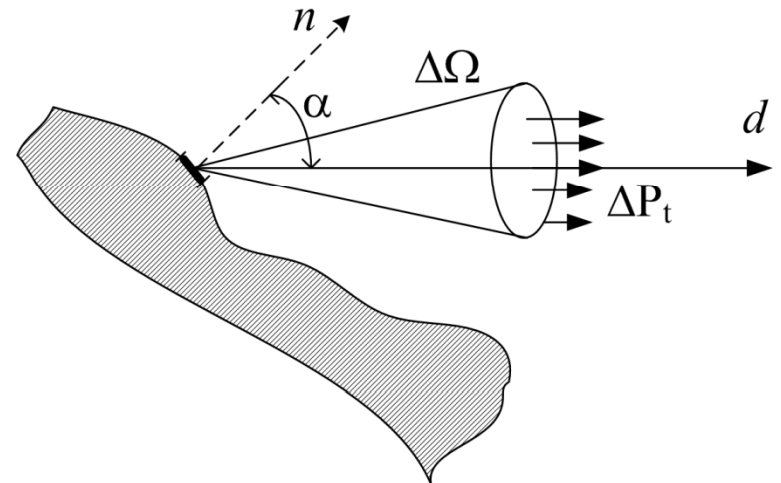
1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

A) Emisia radiațiilor:

Def. *Luminanța totală (strălucirea)* corespunzătoare unei surse într-o direcție data reprezintă raportul dintre intensitatea sursei corespunzătoare direcției date și aria aparentă în raport cu aceasta direcție:

$$L_d = \lim_{\Delta S \rightarrow 0, \Delta \Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P_t}{\Delta \Omega \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha}$$



Obs. *Radianța, Intensitatea și luminanța monocromatică* (sau spectrală) au aceleași semnificații ca și mai sus dar cu referire la o lungime de undă λ bine definită.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

A) Emisia radiațiilor:

Obs. Sursele a căror strălucire este independentă de direcție sunt numite surse izotropice sau surse cu emisie difuză. Pentru aceste surse este valabilă Legea lui LAMBERT:

Intensitatea radiată într-o direcție d oarecare este egală cu intensitatea radiată în direcția perpendiculară pe suprafața multiplicată cu cosinusul unghiului dintre această direcție și normala la suprafață.

$$L_d = \text{const.} \Rightarrow I_d = I_n \cos \alpha$$

Obs. Sursele cu emisie difuză satisfac următoarea relație:

$$p_t = \pi \cdot L_d$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

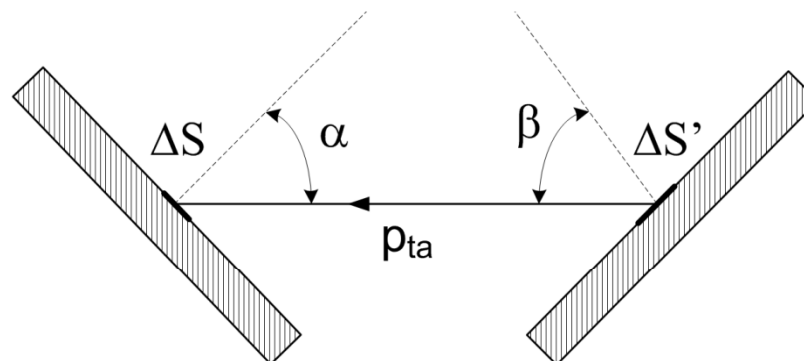
B) Absorbția radiației:

Def. *Iradianța totală* corespunzătoare unui punct de pe suprafața unui corp receptor de radiații reprezintă fluxul absorbit din toate direcțiile pe unitatea de suprafață:

$$p_{ta} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P_t}{\Delta S}$$

Obs. Intre luminanța sursei și iradianța receptorului există următoarea relație:

$$p_{ta} = L \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2} \Delta S'$$



$\Delta S'$ este suprafața de radiație a sursei

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

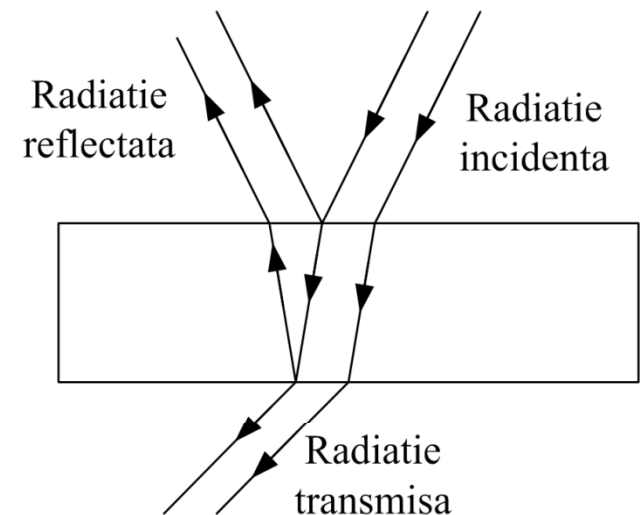
B) Absorbția radiației:

Def. *Capacitatea totala de absorbție a radiației (factorul de absorbție) α corespunzătoare unui punct data aflat pe o suprafața reprezintă raportul dintre fluxul absorbit si fluxul incident.*

Obs. Pentru toate corpurile $\alpha < 1$, deoarece o parte a radiației incidente este reflectata si (daca corpul nu este opac) o alta parte transmisa.

Fie: ν = factorul de reflexie;
 τ = factorul de transmisie;

Atunci se constata ca: $\alpha + \tau + \nu = 1$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

B) Absorbția radiației:

Obs. In funcție de valorile factorilor de absorbție, reflexie si transmisie se diferențiază următoarele tipuri de corpuri:

- corpul negru: $\alpha=1$, $\nu = \tau = 0$;
- corpul perfect reflectant: $\nu = 1$; $\alpha = \tau = 0$;
- corpul perfect transparent: $\tau = 1$; $\alpha = \nu = 0$;

Factorul de absorbție α depinde de :

- spectrul radiației incidente si direcția acesteia;
- caracteristicile corpului: starea suprafeței, natura chimica, culoarea, grosimea, temperatura;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

C) Radiația corpului negru:

Obs. Corpul negru este un corp ipotetic = o sursă de radiații și un absorbant ideal.

Factorul de absorbție al corpului negru ($\alpha = 1$) nu depinde de spectrul radiației incidente și nici de temperatura corpului. Emisia corpului negru satisface legea lui Lambert.

Legea lui Boltzmann:

Fluxul total radiat raportat la unitatea de arie este proporțional cu puterea a patra a temperaturii:

$$p_{tr} = \sigma \cdot T^4$$

în care $\sigma = 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

C) Radiația corpului negru:

Distribuția spectrala a fluxului termic radiat; emisivitatea monocromatica; *legea lui Planck*

Legea lui Planck stabilește funcția de variație a radiației monocromatice a corpului negru:

$$p_{tr\lambda} = C_1 \cdot \left[\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right) \right]^{-1} \quad [\text{W/cm}^2/\mu\text{m}]$$

in care $C_1 = 3,741 \cdot 10^8 [\text{W}(\mu\text{m})^4/\text{m}^2]$, $C_2 = 14388 [\mu\text{m}/\text{K}]$ si λ reprezintă lungimea de unda in μm .

Emisivitatea totala se exprima in funcție de distribuția spectrala cu ajutorul relației:

$$p_{tr} = \int_0^{\infty} p_{tr\lambda} d\lambda$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

C) Radiația corpului negru:

Distribuția spectrală a fluxului termic radiat; emisivitatea monocromatică; *legea lui Wien (Wilhem Wien – 1896)*

Legea lui Wien, denumită de fapt "legea repartiției spectrale a corpului negru, valabilă pentru lungimi de undă mici" stabilește de fapt relația dintre emisivitatea monocromatică maximă corespunzătoare unei temperaturi date T și lungimea de undă λ_m

$$\lambda_m = \frac{C}{T}$$

în care temperatura T se exprimă în K și constanta lui Wien $C = 2898 \mu\text{mK}$.

O formulare echivalentă a legii lui Wien:

Cu cât un corp este mai cald, cu atât lungimea de undă a radiației emise este mai redusă.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

D) Radiația corpurilor reale:

Obs. Fluxul radiat de corpurile reale la o temperatură T data este întotdeauna mai mic decât fluxul radiat la aceeași temperatură de corpul negru.

→ pentru un corp real puterea specifică radiată are expresia:

$$p_{tr} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

în care $\varepsilon < 1$ se numește factor de emisie.

Factorul de emisie depinde de:

- caracteristicile corpului;
- temperatura.

Obs. În multe aplicații se considera că factorul de emisie are o valoare medie corespunzătoare unui anumit interval de temperatură.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

D) Radiația corpurilor reale:

Valori ale factorului de emisie ϵ pentru diverse materiale

Material	Starea suprafetei	T [°C]	ϵ
Aluminiul	Lustruit	225 - 575	0,039-0,057
	Brut	26	0,055
	Oxidat	200 – 600	0,11 – 0,19
Cuprul	Polizat	80 - 115	0,018- 0,023
	Lustruit	22	0,072
	Oxidat	200 - 600	0,57 – 0,87
Otel	Lustruit	770-1040	0,52 – 0,56
	Oxidat	200 - 600	0,79
	Oxidat rugos	40 - 370	0,94 – 0,97

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

D) Radiația corpurilor reale:

Valori ale factorului de emisie ϵ pentru diverse materiale

Material	Starea suprafeței	T [°C]	ϵ
Fonta	Lustruită	200	0,21
	Oxidată	200-600	0,64 – 0,78
	Rugosă oxidată	40 – 250	0,95
Zinc	Lustruit	220 - 300	0,045- 0,052
	Mat	55 - 290	0,2
	Tabla zincată	28	0,227
Cauciuc		20	0,85 – 0,92
Sticlă		22	0,936
Portelan		20	0,92 – 0,94

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii în corpuri

1.1.1. Radiația termică

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

Fluxul termic transmis de la o sursă de radiații către un receptor depinde de temperaturile celor două corpuri (T_1 și T_2), de configurația celor două corpuri, de poziția lor relativă și de factorii de emisie.

Obs. Calculele efectuate pentru corpuri reale de diverse forme sunt extrem de complicate și de aceea, în cele ce urmează, vom prezenta câteva cazuri simple.

a) Fluxul termic emis de un corp de suprafață A , factor de emisie ε , având temperatura T_1 și aflat în mediul înconjurător a cărui temperatură este $T_2 < T_1$:

$$P_t = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) A$$

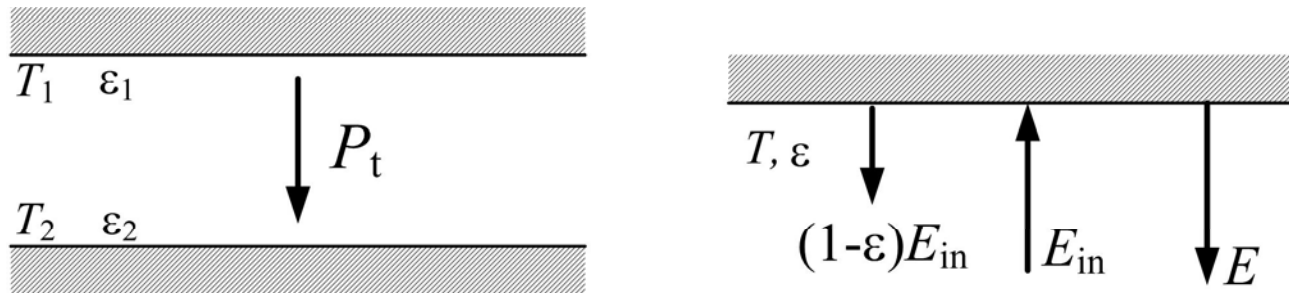
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

b) Fluxul termic specific între două suprafețe plane, paralele, infinite, având temperaturile T_1 și T_2 și factorii de emisie ε_1 și ε_2



E_{in} = radiația incidentă;

E = radiația emisă.

Există egalitatea: $E_{in} = E_{absorbita} + E_{reflectata} = \alpha E_{in} + E_{reflectata}$

și considerând cazul radiației monocromatice $\rightarrow E_{reflectata} = (1 - \alpha)E_{in} = (1 - \varepsilon)E_{in}$

Corpul emite radiația efectivă: $E_{ef} = E + (1 - \varepsilon)E_{in}$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

Radiatia neta este: $E_{net} = E_{ef} - E_{in} = E + (1 - \varepsilon)(E_{ef} - E_{net})$

de unde rezulta expresia radiatiei efective: $E_{ef} = \frac{E}{\varepsilon} + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} E_{net}$

Pentru radiatia intre cele doua suprafete se pot scrie astfel expresiile radiatiilor efective:

$$E_{ef1} = \frac{E_1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} E_{net1} = \sigma T_1^4 - \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} E_{net1}$$

$$E_{ef2} = \frac{E_2}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} E_{net2} = \sigma T_2^4 - \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} E_{net2}$$

Fluxul termic de la suprafata 1 catre suprafata 2 este: $P_t = E_{ef1} - E_{ef2} = E_{net1} = -E_{net2}$

$$\rightarrow P_t = \sigma(T_1^4 - T_2^4) - \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)P_t + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)(-P_t) \Rightarrow P_t = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \varepsilon_{12} \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \text{coeficient reciproc de radiatie}$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

c) Fluxul termic specific între două suprafețe plane, paralele, infinite, având interpus un ecran de radiație caracterizat de factorul de emisie ε , temperaturile T_1 și T_2 și factorii de emisie ε_1 și ε_2

Un calcul similar cu cel prezentat la punctul *b*) conduce la expresia:

$$P_t = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} (T_1^4 - T_2^4)$$

Obs. Se poate observa că în cazul în care $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$, ecranul termic asigură reducerea de $1/\varepsilon^2$ ori a fluxului termic între cele două suprafețe.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termica

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

d) Fluxul termic transmis prin radiație între două corpuri de forma oarecare, având suprafețele supuse radiației reciproce A_1 și A_2 , temperaturile $T_1 > T_2$ și factorii de emisie ε_1 și ε_2

Expresia generală a fluxului termic este: $P_t = \sigma_{12} (T_1^4 - T_2^4) A_{12}$

în care σ_{12} se numește coeficient redus de radiație și are următoarea expresie:

$$\sigma_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma = \frac{\sigma}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \varphi_{21}}$$

Mărimea $A_{12} = \varphi_{12} A_1 = \varphi_{21} A_2$ se numește suprafața reciprocă redusă iar φ_{12} și φ_{21} sunt parametri reprezentând fracțiunea din radiația primului corp care cade asupra celui de-al doilea și reciproc.

Obs. În literatura de specialitate se precizează expresiile $\varphi_{i,j}$ pentru configurații uzuale.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.1. Transmisia căldurii in corpuri

1.1.1. Radiația termică

E) Fluxul termic transmis prin radiație:

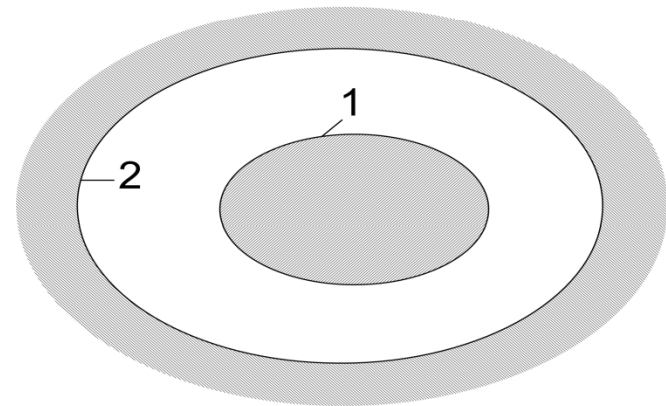
d) Fluxul termic transmis prin radiație între două corpuri de forma oarecare, având suprafețele supuse radiației reciproce A_1 și A_2 , temperaturile $T_1 > T_2$ și factorii de emisie ε_1 și ε_2

Cazul unui sistem format din două suprafețe fără concavități:

$$\varphi_{12} = 1; \varphi_{21} = \frac{A_1}{A_2}; A_{12} = A_1$$

Și ținând cont de cele stabilite mai sus, rezulta expresia fluxului termic:

$$P_t = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \sigma (T_1^4 - T_2^4) A_1$$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.1. Considerații generale

Încălzirea rezistivă directă este un procedeu aplicabil materialelor având conductivitatea electrică relativ ridicată ($\sigma \nearrow$).

Principiul de baza: *efectul Joule-Lentz* al curentului electric care se are loc chiar în interiorul corpului încălzit.

Avantaje:

- pot fi asigurate valori ridicate ale densității de putere;
- procedeul prezintă inerție termică redusă;
- consum specific de energie redus:

Exemplu: Încălzirea rezistivă directă a barelor de oțel: 200 – 350 kWh/tona (pentru raportare, încălzirea cu gaz metan necesită 1500 – 3500 kWh/tona);

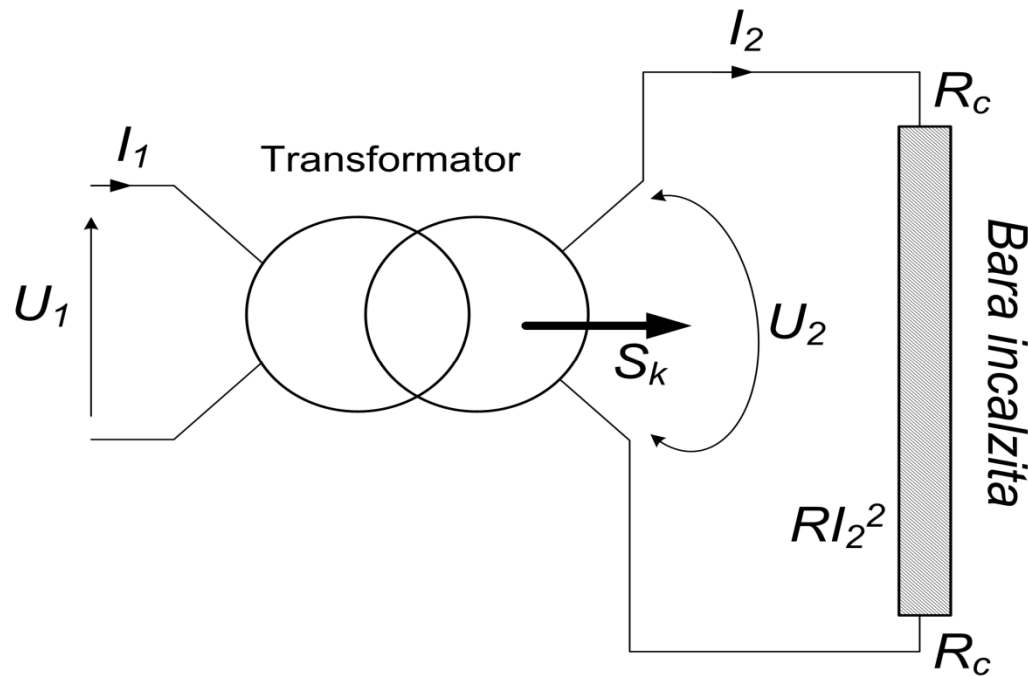
Dezavantaje:

- realizarea contactelor pentru aducțiunea curentului electric;
- încălzirea uniformă implică existența unei secțiuni constante a corpului;
- încălzirea în curent alternativ este relativ neuniformă în secțiune transversală datorită efectului de refulare a curentului.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.1. Considerații generale



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistiva directa

1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare in curent alternativ

Fie o bara metalica străbătuta de curent alternativ având valoarea efectiva I . Notând cu R_0 rezistenta electrica a barei in *curent continuu*, P si Q puterile activa, respectiv reactiva absorbite de bara, rezistenta si reactanța corespunzătoare au următoarele expresii:

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad X = \frac{Q}{I^2}; \quad k_r = \frac{R}{R_0}; \quad k_x = \frac{X}{R_0}$$

in care k_r si k_x reprezintă factorii de rezistenta, respectiv de reactanța ai barei in curent alternativ.

Obs. Valorile factorilor de rezistenta si reactanța depinde de:

- forma secțiunii transversale a barei;
- frecventa curentului;
- proprietățile de material specifice difuziei câmpului electromagnetic in material: rezistivitatea electrica ρ si permeabilitatea magnetica μ .

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare în curent alternativ

A) Placa cu extensie infinită cu $\rho=1/\sigma = \text{ct.}$ și $\mu = \text{ct.}$

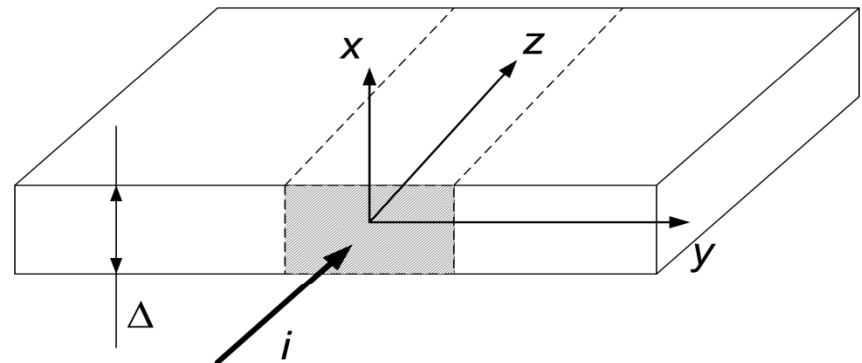
Curentul care străbate placa cu extensie infinită, raportat la unitatea de lățime (după direcția Oy): $i = I\sqrt{2} \sin \omega t$

Integrând ecuațiile lui Maxwell se obține variația densității de curent pe grosimea Δ a plăcii:

$$\underline{J}(x) = \frac{\underline{\gamma} I \cdot \cosh \underline{\gamma} x}{2 \cdot \sinh \frac{\underline{\gamma} \Delta}{2}}, \quad \text{în care} \quad \underline{\gamma} = (1 + j)\alpha, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \frac{1}{\delta}$$

Variația intensității câmpului magnetic pe grosimea plăcii:

$$\underline{H}(x) = \frac{I \cdot \sinh \underline{\gamma} x}{2 \cdot \sinh \frac{\underline{\gamma} \Delta}{2}}$$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare în curent alternativ

A) Placa cu extensie infinită cu $\rho=1/\sigma = \text{ct.}$ și $\mu = \text{ct.}$

Puterile activă și reactivă raportate la unitatea de lungime (după Oy și Oz):

$$P = \frac{\alpha I^2}{2\sigma} \cdot \frac{\sinh \alpha \Delta + \sin \alpha \Delta}{\cosh \alpha \Delta - \cos \alpha \Delta}, \quad Q = \frac{\alpha I^2}{2\sigma} \cdot \frac{\sinh \alpha \Delta - \sin \alpha \Delta}{\cosh \alpha \Delta - \cos \alpha \Delta}$$

Expresiile factorilor de rezistență (k_r) și de reactanță (k_x):

$$k_r = \frac{P}{R_0 I^2} = \frac{P}{\frac{1}{\sigma \Delta} I^2} = \frac{\alpha \Delta}{2} \cdot \frac{\sinh \alpha \Delta + \sin \alpha \Delta}{\cosh \alpha \Delta - \cos \alpha \Delta}; \quad k_x = \frac{Q}{R_0 I^2} = \frac{\alpha \Delta}{2} \cdot \frac{\sinh \alpha \Delta - \sin \alpha \Delta}{\cosh \alpha \Delta - \cos \alpha \Delta}$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

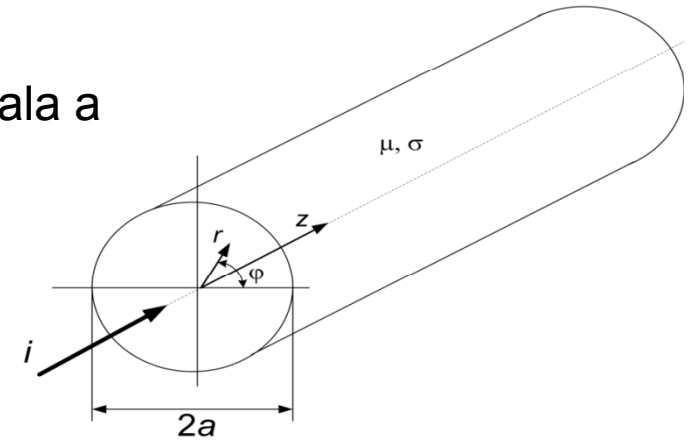
1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare în curent alternativ

B) Bara cilindrică cu $\rho=1/\sigma = \text{ct.}$ și $\mu = \text{ct.}$

Integrând ecuațiile lui Maxwell se obține variația radială a intensității câmpului magnetic:

$$\underline{H}_e(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{în exteriorul barei}$$

$$\underline{H}_i(r) = \frac{I}{2\pi a} \cdot \frac{I_1(\underline{\gamma} \cdot r)}{I_1(\underline{\gamma} \cdot a)} \quad \text{în interiorul barei.}$$



Variația radială a densității de curent: $\underline{J}(r) = \frac{\underline{\gamma} I}{2\pi a} \cdot \frac{I_0(\underline{\gamma} r)}{I_1(\underline{\gamma} a)}$

Puterile activă și reactivă raportate la unitatea de lungime a barei:

$$P = \frac{\alpha I^2}{2\pi a \sigma} \operatorname{Re} \left[(1 + j) \cdot \frac{I_0(\underline{\gamma} a)}{I_1(\underline{\gamma} a)} \right] \quad \text{și} \quad Q = \frac{\alpha I^2}{2\pi a \sigma} \operatorname{Im} \left[(1 + j) \cdot \frac{I_0(\underline{\gamma} a)}{I_1(\underline{\gamma} a)} \right]$$

Factorii de rezistență și de reactanță: $k_r = \frac{P}{P_0} = \frac{\alpha a}{2} \operatorname{Re} \left[(1 + j) \cdot \frac{I_0(\underline{\gamma} a)}{I_1(\underline{\gamma} a)} \right] = k_r(\alpha a) = k_r(a/\delta)$

$$k_x = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\alpha a}{2} \operatorname{Im} \left[(1 + j) \cdot \frac{I_0(\underline{\gamma} a)}{I_1(\underline{\gamma} a)} \right]$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.2. Parametrii electrici ai unei bare în curent alternativ

B) Bară cilindrică cu $\rho=1/\sigma = \text{ct.}$ și $\mu = \text{ct.}$

Valori numerice ale factorilor de rezistență k_r și reactanță k_x în funcție de parametrul adimensional $\alpha a = a/\delta$

a/δ	0	1	2	3	4	5	6	8	10
k_r	1	1,02	1,27	1,33	2,27	2,78	3.26	4,25	5,25
k_x	0	0,25	1,03	1,46	1,95	2,46	2,96	3,98	4,99

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Pentru stabilirea timpului de încălzire trebuie avute în vedere următoarele două aspecte:

- o valoare cât mai ridicată a randamentului energetic al încălzirii presupune un timp de încălzire cât mai scurt (astfel încât energia corespunzătoare pierderilor termice să fie cât mai redusă)
- asigurarea unui gradient cât mai redus al temperaturii reprezintă o condiție esențială în tehnologiile de prelucrare la cald.

Valori minime ale timpului de încălzire pentru bare de oțel încălzite la 1200 °C

Bara rotunda

Diametru [mm]	40	65	100
Timp [s]	30	60	120

Bara patrata

Latura [mm]	45	70	80	100
Timp [s]	65	100	120	160

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Plecând de la ecuația de bilanț termic: $P_u + P_t = RI^2$

în care P_u este puterea utilă și P_t sunt pierderile termice și făcând înlocuirile:

$$P_u = \frac{m\Delta i}{t} = \frac{\gamma l S \Delta i}{t}, \quad I = J \cdot S, \quad R = k_r \rho \frac{l}{S}$$

în care γ reprezintă densitatea, l și S lungimea și secțiunea transversală, t este timpul de încălzire, Δi reprezintă energia specifică de încălzire, J densitatea de curent, ρ este rezistivitatea și k_r factorul de majorare a rezistenței în curent alternativ.

Rezultă:
și J :

$$\gamma \frac{l S \Delta i}{t} + P_t = k_r \rho l S J^2 \quad \text{din care se obține corelația dintre } t$$

$$t = \frac{\gamma \Delta i}{k_r \rho J^2 - \frac{P_t}{l S}}$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Algoritm de calcul al încălzirii rezistive directe a unei bare metalice

Ipoteza de baza: la orice moment de timp câmpul termic în bară este omogen

Datele de calcul:

- dimensiunile geometrice ale barei (l și S);
- frecvența curentului f ;
- proprietățile fizice ale barei și variația acestora cu temperatura (densitatea γ , $\rho(\theta)$, căldura specifică $c(\theta)$, $\mu_r(H, \theta)$);
- mărimile specifice transferului termic de la bară în exterior (coeficientul global de transmitere a căldurii la suprafața barei $\alpha(\theta)$);
- valorile inițială și finală (θ_i și θ_f) ale temperaturi și variația corespunzătoare a entalpiei specifice Δi ;
- timpul impus al încălzirii t_f sau valoarea medie a densității curentului în bară J .

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Algoritm de calcul al încălzirii rezistive directe a unei bare metalice

Etapele calculului:

- pe baza valorilor ρ , P_t , k_r a densității de curent J cu ajutorul relației:

$$\gamma \frac{I S \Delta t}{t} + P_t = k_r \rho I S J^2$$

atunci când se impune timpul de încălzire t_f (de asemenea se poate proceda și invers atunci când se impune t_f se poate calcula J). Astfel, se poate determina o valoare de calcul a intensității curentului în bară:

$$I_2 = J \cdot S$$

- se pot configura contactele electrice în funcție de curentul ce trebuie injectat în bară; se evaluează valoarea rezistenței de contact R_c ;

- se stabilește configurația rețelei electrice scurte (locale): R_{rs} și X_{rs} ;

- Se consideră o serie de valori ale temperaturii barei θ_k ($k = 1, 2, 3 \dots n$) care aparțin intervalului $[\theta_i, \theta_f]$.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Algoritm de calcul al încălzirii rezistive directe a unei bare metalice

Etapele calculului:

Pentru fiecare stare termică considerată θ_k ($k = 1, 2, 3 \dots n$) se calculează:

- rezistivitatea $\rho(\theta_k)$;
- starea de magnetizare a barei corespunzătoare curentului I_2 ;
- factorii de rezistență și de reactanță (k_r și k_x);
- parametrii electrici: rezistența R_{sk} și reactanța X_{sk} ai barei la temperatura θ_k ;
- tensiunea secundară U_{2k} a transformatorului de alimentare care asigură curentul I_2 injectat în bară, precum și puterea aparentă corespunzătoare:

$$U_{2k} = \sqrt{(R_{sk} + R_c + R_{rs})^2 + (X_{sk} + X_{rs})^2} \cdot I_2 = Z_k I_2; \quad S_k = U_{2k} I_2$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Algoritm de calcul al încălzirii rezistive directe a unei bare metalice

Etapele calculului:

- definirea puterii nominale S_n precum și a treptelor de tensiune din secundarul transformatorului de alimentare pe baza seriilor de valori calculate mai sus (θ_k ($k = 1, 2, 3 \dots n$)); pentru fiecare treaptă de tensiune (de putere) a transformatorului se stabilește domeniul de temperatura corespunzător;

- pentru fiecare stare termică “k” se stabilește intensitatea curentului corespunzător care circula prin bară:

$I_{2k} = U_2 / Z_k$, în care U_2 este tensiunea nominală a treptei k

se calculează puterea electrică dezvoltată în bară $P_{sk} = R_{sk} I_{2k}^2$

- determinarea curbei de încălzire și a indicatorilor energetici ai procesului care necesită calculul valorii medii a puterii electrice în bară $P_{2k, k+1}$ corespunzătoare domeniului de temperatură $\theta_{k, k+1}$, fluxul termic către exteriorul barei $P_{t k, k+1}$ și intervalul de timp $\Delta t_{k, k+1}$ necesar încălzirii de la θ_k la θ_{k+1} pe baza bilanțului termic: $P_{2k, k+1} \cdot \Delta t_{k, k+1} = mc(\theta_{k+1} - \theta_k) + P_{t k, k+1} \cdot \Delta t_{k, k+1}$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Corelația timp de încălzire – densitate medie de curent

Algoritm de calcul al încălzirii rezistive directe a unei bare metalice

Etapele calculului:

-determinarea curbei de încălzire și a indicatorilor energetici ai procesului care necesită calculul valorii medii a puterii electrice în bară $P_{2k, k+1}$ corespunzătoare domeniului de temperatură $\theta_{k, k+1}$, fluxul termic către exteriorul barei $P_{t k, k+1}$ și intervalul de timp $\Delta t_{k, k+1}$ necesar încălzirii de la θ_k la θ_{k+1} pe baza bilanțului termic:

$$P_{2k, k+1} \cdot \Delta t_{k, k+1} = mc(\theta_{k+1} - \theta_k) + P_{t k, k+1} \cdot \Delta t_{k, k+1}$$

Prin însumarea intervalelor $\Delta t_{j, j+1}$, $j = 1, 2, \dots, k$ se obține curba de încălzire $\theta_k(t_k)$, respectiv timpul de încălzire de la θ_i la θ_f .

- prin însumarea energiilor acumulate în fiecare interval de timp în bară, a energiei disipate în contacte, în rețeaua scurtă și în transformator se calculează randamentul încălzirii și consumul specific de energie electrică.

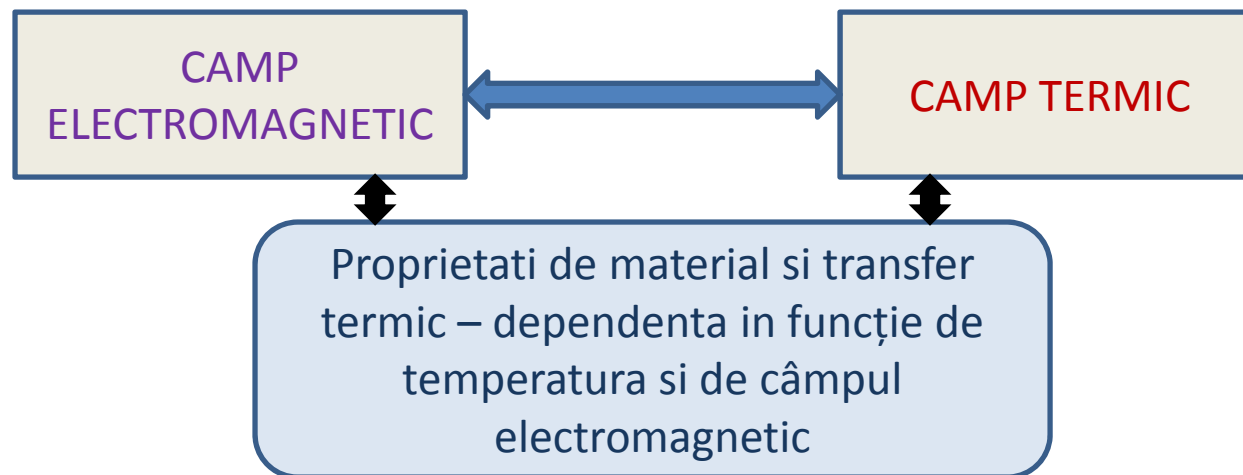
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Modelarea numerică a încălzirii unei bare prin metoda rezistivă directă

Modelarea numerică a încălzirii unei bare presupune studiul **interacțiunii electrotermice** = interdependența dintre câmpul electromagnetic și câmpul termic în bară.

Pentru exemplificare, în cele ce urmează cazul unei bare cu secțiunea transversală constantă parcursă de curent alternativ.



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistiva directa

1.2.3. Modelarea numerica a încălzirii unei bare prin metoda rezistiva directa

Se cunosc proprietățile materialului din care este realizata bara:

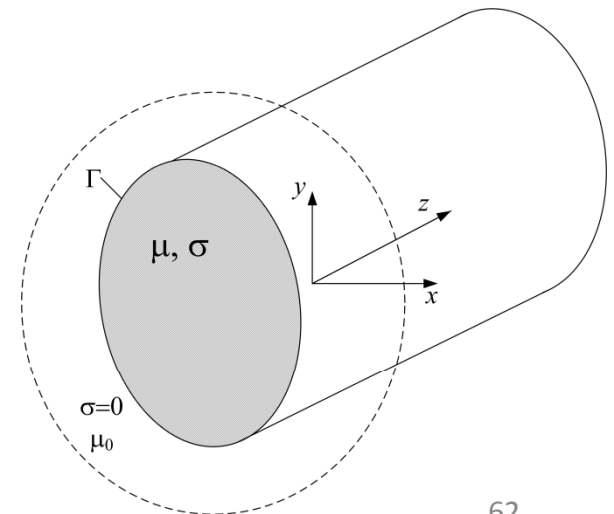
- densitatea γ ;
- legea de dependenta a conductivității electrice de temperatura $\sigma(\theta)$;
- permeabilitatea magnetica ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ pentru $\theta \leq \theta_{\text{Curie}}$ si $\mu = \mu_0$ pentru $\theta = \theta_{\text{Curie}}$;
- dependenta căldurii specifice de temperatura $c(\theta)$;
- dependenta conductivității termice de temperatura $\lambda(\theta)$;

Presupunem ca bara se găsește într-un mediu nemagnetic si neconductor (electric) si se cunoaște dependenta coeficientului global de transfer termic de temperatura pe suprafața de contur Γ : $\alpha(\theta)$.

Admitem ca lungimea barei (după Oz) este suficient de mare pentru a considera ca problema prezintă o simetrie plan – paralela.

Formularea problemei electrotermice:

Cunoscând gradientul de potențial pe directia longitudinala sa se determine câmpul termic tranzitoriu $\theta(r,t)$, cu $\theta(r,t=0) = \theta_0$.



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Modelarea numerică a încălzirii unei bare prin metoda rezistivă directă

A) Problema electrică:

Determinarea câmpului electromagnetic corespunzător unui câmp de temperatura cunoscut în orice punct al secțiunii transversale a barei.

În coordonate carteziene, în cazul modelului considerat:

$$\vec{J}[0,0,J(x,y)] \text{ și } \text{grad}V = \vec{k} \frac{dV}{dz}$$

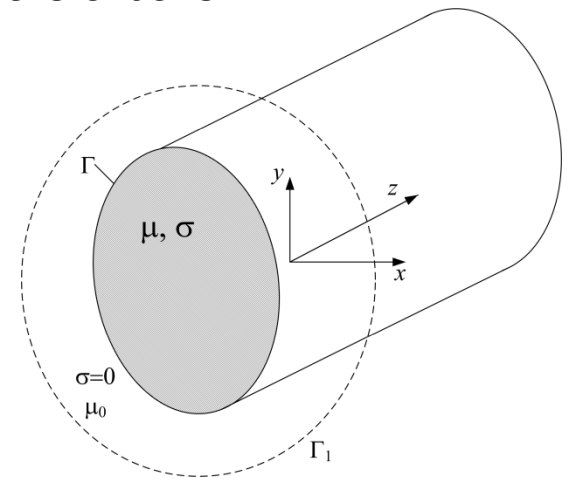
Din ecuațiile lui Maxwell rezulta: $\vec{E} = j\omega\vec{A} + \text{grad}V$

Potențialul magnetic vector este: $\vec{A}[0,0,A(x,y)]$
și funcția $A(x,y)$ satisface ecuația:

$$\text{div grad} \underline{A} - j\omega\mu\sigma \underline{A} + \mu\sigma \frac{dV}{dz} = 0$$

Ultimul termen al ecuației este termenul sursă.

Domeniul de calcul (2D) este cel mărginit de Γ_1 , contur care este suficient de îndepărtat de conturul Γ al secțiunii transversale a conductorului. Pe Γ_1 este satisfăcută condiția: $\underline{A}(x,y) = 0$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Modelarea numerică a încălzirii unei bare prin metoda rezistivă directă

A) Problema electrică:

Odată soluția $\underline{A}(x, y)$ determinată (cunoscută), se determină următoarele mărimi:

- curentul care circula în bară:
$$\underline{I} = \int_{S_\Gamma} \underline{J} dS$$

- puterea activă și reactivă pe unitatea de lungime (Re și Im):

$$\underline{S} = \frac{dV}{dz} \underline{I}^*$$

- valoarea locală a densității de putere dezvoltată prin efect Joule-Lentz:

$$p_J = \frac{1}{\sigma} J^2 = \sigma \left| -j\omega \underline{A} + \frac{dV}{dz} \right|^2$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistiva directa

1.2.3. Modelarea numerica a încălzirii unei bare prin metoda rezistiva directa

B) Problema termica:

Domeniul de calcul pentru câmpul termic este cel mărginit de conturul Γ (inclusiv conturul).

Formularea problemei termice:

Sa se calculeze câmpul termic $\theta(r,t)$, $r \in S_\Gamma$ la un moment de timp dat (t_{k+1}) cunoscând câmpul termic la momentul de timp anterior (t_k) si sursa încălzirii (densitatea de putere electrica in bara).

Formularea presupune o tratare numerica in raport cu variabila timp a ecuației de transfer a căldurii:

$$\gamma \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = p_j + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} \theta)$$

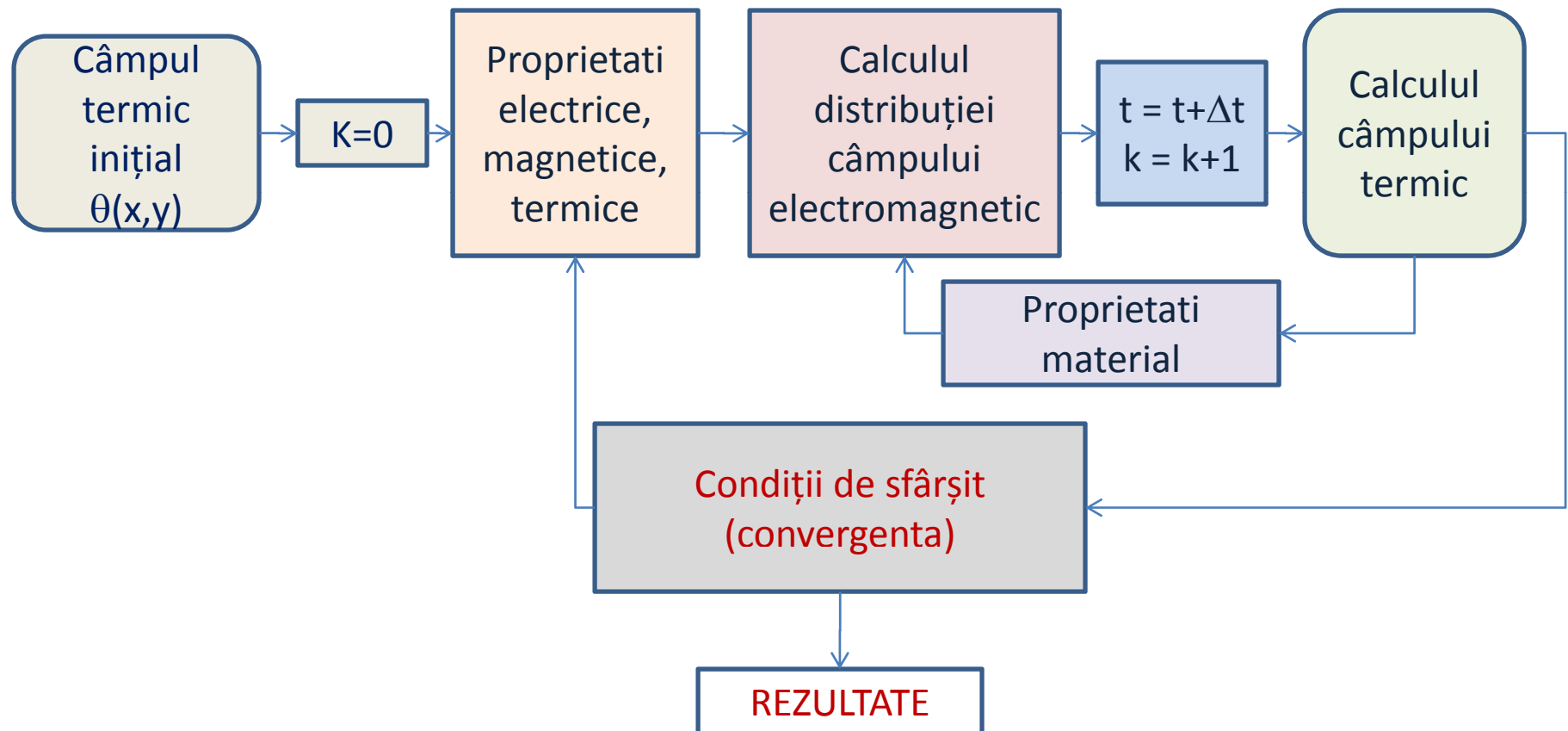
Exemplu, notând $\theta_k = \theta(r, t_k)$ si $\theta_{k+1} = \theta(r, t_{k+1})$, ecuația de transmisie a căldurii in diferențe finite are următoarea forma:

$$\gamma \cdot c \cdot \frac{\theta_{k+1} - \theta_k}{t_{k+1} - t_k} = p_{jk} + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} \theta_{k+1})$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.3. Organigrama unui program de studiu al interacțiunii electrotermice



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

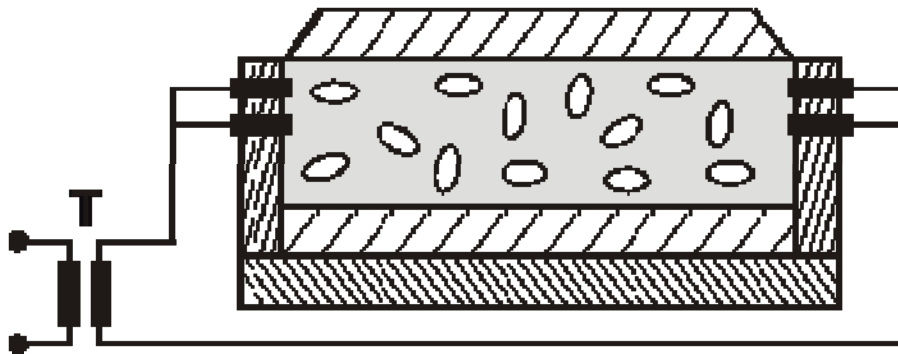
1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

A) Fabricarea produselor din grafit și a carburii de siliciu

Grafitarea produselor “carbonice” (electrozi, perii de grafit etc.) = încălzirea lentă a pieselor până în jurul valorii de $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ într-un amestec pulverulent (pulbere) de grafit și cocs.

Temperatura (câmpul termic) necesară este atinsă prin trecerea curentului electric între electrozii dispuși pe pereții frontali ai cuvei.

Consumul specific de energie: $4000 - 6000\text{ kWh/tona}$.



Cuptorul este realizat dintr-o cuva de șamota în pereții căreia sunt implantați electrozii pentru încălzirea directă a încărcăturii.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

A) Fabricarea produselor din grafit și a carburii de siliciu

Carbura de siliciu se obține în incinte asemănătoare cuvei de grafitare.

Amestecul supus încălzirii constă într-un amestec de cocs și nisip silicios care se încălzește după o diagramă specifică până în jurul valorii de 2700 °C (la această temperatură are loc reducerea oxidului de siliciu și combinarea carbonului cu siliciu).

Consumul specific: 6500 – 7500 kWh/tona;

Carbura de siliciu alfa (α -SiC) se fabrică la temperaturi de peste 2000°C și prezintă o structură de cristal hexagonală. Carbura de siliciu beta (β -SiC), prezintă o structură de cristal amestecată cu zinc asemănătoare diamantului; este fabricată la temperaturi sub 2000°C.

Aplicații: material abraziv (datorită gradului ridicat de duritate în diverse procese precum: măcinare, honuire, tăiere prin jet de apă și șlefuire);

aplicații la temperaturi ridicate - elemente de încălzire (topirea metalelor neferoase și a sticlei, la tratarea la cald a metalelor, fabricarea sticlei float, a produselor din ceramică și a componentelor electronice, fabricarea cuzinelor și a componentelor de cuptor)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

B) Topirea sticlei

Sticlele sunt materiale (electroizolante) care prezintă conducție ionică (purătorii de sarcină sunt ioni) - $\rho = 10^{13} \Omega\text{m}$ (la temperatura ambiantă).

La temperaturi ridicate rezistivitatea electrică a sticlelor scade sensibil astfel încât, în STARE LICHIDĂ, au o valoare suficient de mare a conductivității electrice (la $1300 - 1400^\circ\text{C}$ $\rho = 10^{-1} \Omega\text{m}$) pentru a putea fi încălzite prin metoda rezistivă directă (trecerea curentului electric).

Obs. Încălzirea directă a sticlei este posibilă începând de la $\theta = 700^\circ\text{C}$ (până la această temperatură se folosesc alte surse); cuptoarele funcționează câțiva ani fără întrerupere și pentru evitarea producerii electrolizei sunt alimentate în c.a.

Consumul specific: $900 - 2500 \text{ kWh/tona}$;

Variante cuptoare: cu electrozi orizontali și “tip booster” – cu două camere
Electrozii sunt realizați din grafit ($< 1 \text{ A/mm}^2$) sau molibden (3 A/mm^2)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

C) Electroliza termică a aluminei

Obținerea aluminiului tehnic (din alumina Al_2O_3) și rafinarea acestuia se realizează prin electroliza termică. Aceasta presupune:

- încălzirea directă în c.c. a unui electrolit pentru a fi topit și menținut în stare lichidă la aprox. 950°C ;
- procesul chimic de electroliza sau rafinare.

Obs. Electroliza termică a aluminei are loc într-o cuva, electrolitul fiind format din alumina dizolvată într-o sare topită (criolit – $\text{Na}_3(\text{AlF}_6)$).

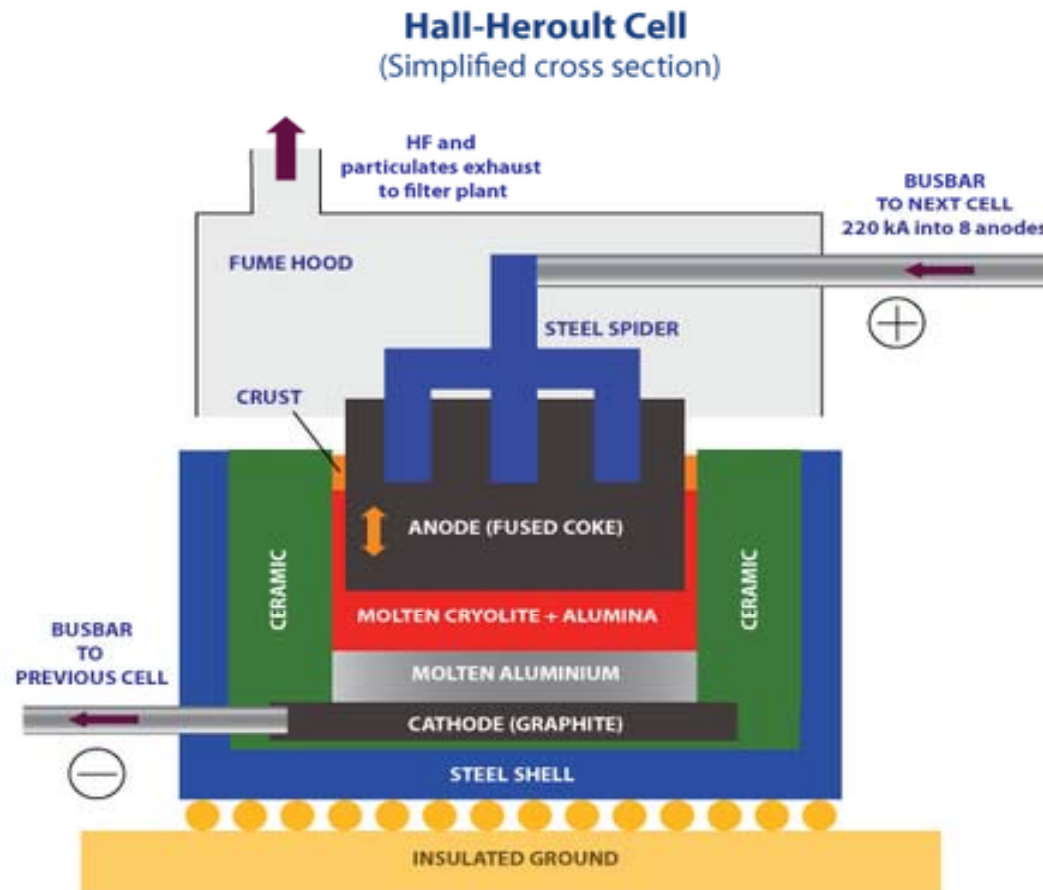
Consumul specific: $\sim 14.000 \text{ kWh/tona}$;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

C) Electroliza termică a aluminei



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

D) Încălzirea directă a apei și producerea aburului

Încălzirea prin metoda rezistivă directă a apei este posibilă în boilere cu construcție specială. Densitatea de putere caracteristică încălzirii directe are valori superioare raportat la încălzirea cu termoplonjoare (rezistente de încălzire).

Obs. Încălzirea apei prin trecerea curentului electric prin volumul de apă se face întotdeauna în c.a. pentru a elimina riscul de producere a exploziei datorate electrolizei apei.

Conductivitatea electrică a apei depinde puternic de conținutul de săruri și de temperatura (σ crește cu $\sim 1,5 - 2,5 \text{ \% / grad C}$).

Exemplu: pentru $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C}$,
apa de izvor are $\sigma = 6 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$;
apa bogată în săruri are $\sigma = 19 \cdot 10^{-2} \text{ S/m}$

Obs. Pentru controlul instalațiilor de încălzire directă se apă este tratată cu sulfit de sodiu Na_2SO_3 .

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.2. Procesarea materialelor prin încălzire rezistivă directă

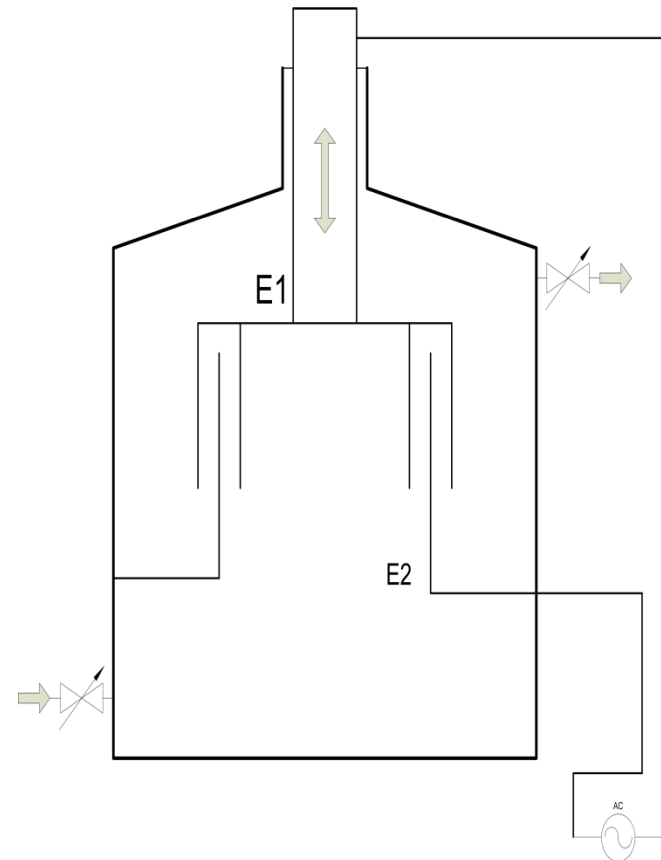
1.2.4. Aplicații tehnice ale încălzirii rezistive directe

D) Încălzirea directă a apei și producerea aburului

Într-un boiler cu încălzire directă apa circula într-un sistem de electrozi.

Pentru obținerea apei supraîncălzite (120 – 130 °C) se utilizează boilere cu puteri în gama 400 – 1000 kW alimentate cu joasă sau medie tensiune;

Cazanele electrice de abur pot fi: cu electrozi de imersie, cu electrozi tubulari de evaporare, cu jeturi multiple.



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.1. Principiul metodei si aplicații practice

Procesarea electrotermica a materialelor prin inducție electromagnetica se bazează pe efectul Joule-Lentz al curentului electric indus într-un material conductor situat în câmp magnetic variabil în timp (daca materialul supus încălzirii este magnetic, se adăuga și pierderile datorate fenomenului de histerezis magnetic).

INDUCTORUL = bobina care produce câmpul magnetic variabil în timp alimentata în c.a.

INDUSUL = corpul supus încălzirii (în care se induce curent prin fenomenul de inducție electromagnetica).

Obs. Datorita efectului pelicular, densitatea curentului indus în corpul de încălzit scade de la suprafața corpului în profunzimea acestuia; scăderea este dependenta de frecventa și de proprietățile corpului: rezistivitatea electrica ρ și permeabilitatea magnetica μ .

Una dintre cele mai dezvoltate aplicații de procesare electromagnetica a materialelor este TRATAMENTUL TERMIC SUPERFICIAL (CALIREA) – se bazează tocmai pe faptul ca densitatea de putere este maxima la suprafața corpului.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.1. Principiul metodei si aplicații practice

Daca materialul supus încălzirii este magnetic la *efectul Joule-Lentz al curentului indus* se adăuga si *pierderile datorate fenomenului de histerezis magnetic*

Raportul puterilor datorate curentului indus si fenomenului de histerezis este:

$$\frac{P_i}{P_h} = a \cdot f \cdot H^{0,4}$$

in care H reprezintă intensitatea câmpului magnetic si a este o constanta de material.

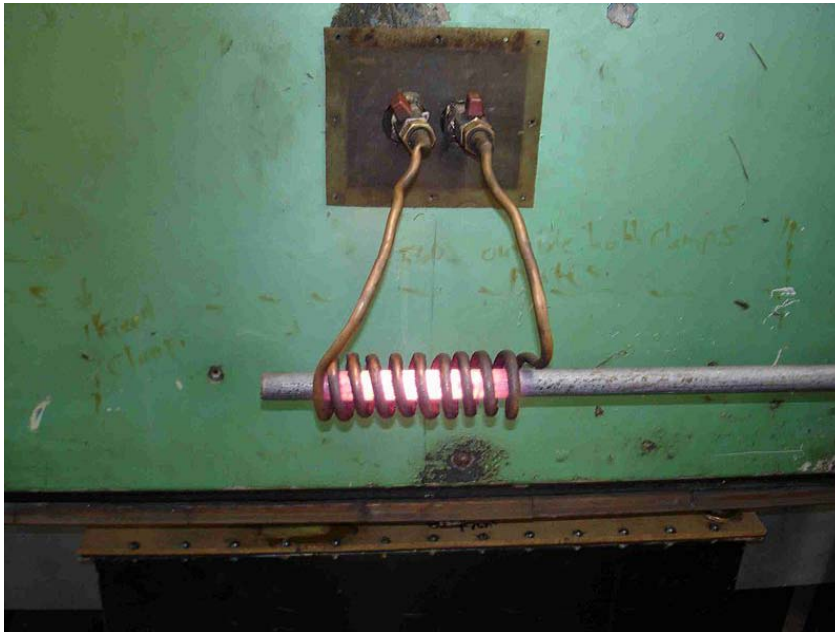
Obs. In general, puterea datorata fenomenului de histerezis reprezintă mai puțin de 10% din aceea generata prin efectul Joule-Lentz al curentului indus. Excepții: oțelurile dure cu histerezis puternic la care $P_h \sim 0,5 P_i$.

Avantajul încălzirii prin inducție electromagnetica consta in faptul ca producerea căldurii are loc chiar in interiorul corpului, existând astfel o *inertie termica redusa* si, deci, *pierderi de energie foarte reduse in timpul procesului de încălzire*.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.1. Principiul metodei si aplicații practice



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.1. Principiul metodei si aplicații practice

Încălzirea prin inducție electromagnetica prezintă si avantajele:

- sunt obținute valori ridicate ale densității superficiale de putere la nivelul suprafeței corpului încălzit $p_s > 1000 \text{ kW/m}^2$ (comparativ, puterea specifica poate fi de 1000 de ori mai mare decât aceea rezultata prin radiație într-o incinta încălzita la $1000 \text{ }^\circ\text{C}$).
- utilizarea vidului sau a atmosferelor de protecție este mult mai simpla in cazul încălzirii prin inducție.

Aplicații:

- topirea si menținerea in stare lichida a metalelor;
- încălzirea in profunzime in vederea prelucrărilor la cald;
- tratamentele termice;
- călirea superficiala.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

A) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor

Se considera domeniul $x > 0$ caracterizat de valori constante ale conductivității electrice σ și permeabilității magnetice μ .

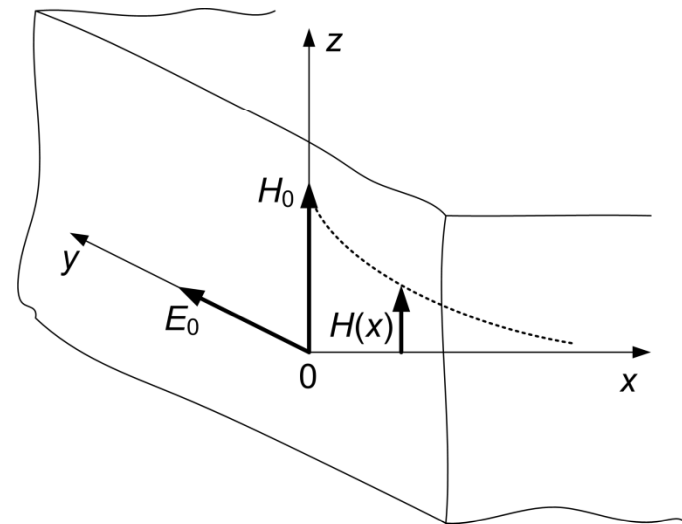
Câmpul magnetic orientat în lungul axei Oz la nivelul suprafeței $x = 0$ are următoarea expresie:

$$H(t) = H_0 \sqrt{2} \cos \omega t$$

Vectorul intensitate a câmpului magnetic $\vec{H}$ în semispațiul $x > 0$ are orientarea axei Oz:

$$\vec{H}[0, 0, H(x)]$$

Vectorul intensitate a câmpului electric $\vec{E}$ și vectorul densitate de curent $\vec{J}$ sunt orientate în lungul axei Oy: $\vec{E}[0, E(y), 0]$; $\vec{J}[0, J(y), 0]$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

A) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor

Din ecuațiile lui Maxwell rezulta relațiile de legătură între imaginile în complex ale mărimilor $\underline{H}$, $\underline{E}$, $\underline{J}$:

$$\frac{d\underline{E}}{dx} = -j\omega\mu\underline{H}; \quad \frac{d\underline{H}}{dx} = -\underline{J}; \quad \underline{J} = \sigma\underline{E}$$

Din aceste relații rezulta ecuația intensității câmpului magnetic:

$$\frac{d^2\underline{H}}{dx^2} = j\omega\mu\sigma\underline{H} = \lambda^2\underline{H}$$

care, impunând condițiile la limita $H(0) = H_0$ și $H(\infty) = 0$ are soluția:

$$\underline{H}(x) = H_0 \exp(-\lambda x)$$

în care mărimea complexă $\underline{\lambda}$ este: $\underline{\lambda} = (j\omega\mu\sigma)^{\frac{1}{2}} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{1+j}{\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}} = \frac{1+j}{\delta}$

Parametrul $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$ se numește *adâncime de pătrundere* a câmpului electromagnetic

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

A) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor

Rezultă expresia intensității câmpului magnetic: $H(x) = |\underline{H}(x)| = H_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right)$

Imaginea în complex și modulul densității curentului indus:

$$\underline{J} = -\frac{d\underline{H}}{dx} = \underline{\lambda} H_0 \exp(-\underline{\lambda} x) \quad \text{și} \quad J(x) = \frac{\sqrt{2}}{\delta} H_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right)$$

$$\text{și valoarea la suprafața conductorului } J_0 = J(0) = \frac{H_0 \sqrt{2}}{\delta}$$

Obs. Densitatea de volum a puterii produsă prin efect Joule-Lenz al curentului indus are următoarele proprietăți:

- prezintă un maxim la suprafața conductorului;
- valoarea maximă variază invers proporțional cu δ^2 ;
- scade exponențial în profunzimea conductorului $\sim \exp(-2x/\delta)$.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

A) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor

Puterea electromagnetică complexă specifică: reprezintă puterea difuzată în semispațiul conductor ($x > 0$) raportată la unitatea de suprafață în planul Oyz.

Pentru a exprima puterea electromagnetică specifică se poate utiliza vectorul Poynting $\vec{E}_0 \times \vec{H}_0$ care este orientat în lungul axei Ox.

Expresia puterii electromagnetice specifice:
$$\underline{S}_0 = \underline{E}_0 \underline{H}_0^* = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (1 + j)$$

Uzual se spune că pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor este însoțită de difuzia prin unitatea de suprafață a:

- puterii specifice active: $p_s = \frac{\rho H_0^2}{\delta} = \sqrt{\pi f \mu \rho} H_0^2 = k_a H_0^2$, k_a = factor de absorbție a puterii;
- puterii specifice reactive: $q_s = \frac{\rho H_0^2}{\delta}$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

A) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor

Un calcul simplu arată că în stratul superficial de grosime δ se transformă în căldură aproximativ 86,5 % din puterea activă difuzată (de unde și afirmația uzuală: prin inducție se încălzește un strat superficial având grosimea egală cu adâncimea de pătrundere a câmpului electromagnetic)

Valori ale adâncimii de pătrundere δ [mm]

f[Hz]\ Material	Oțel 20°C, $\mu_r = 40$	Oțel 20°C, $\mu_r = 100$	Cupru 20°C	Aluminiu 20°C
50	5,03	3,1	9,35	11,9
100	3,56	2,25	6,61	8,4
10^3	1,424	0,71	2,09	2,66
10^4	0,356	0,225	0,661	0,84
10^5	0,112	0,071	0,209	0,266

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

B) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de variația $\sigma(\theta)$

În cazul încălzirii prin inducție, în timpul procesului, conductivitatea corpului încălzit se modifică datorită variației conductivității electrice cu temperatura $\sigma(\theta)$

Pentru a funcția $\sigma(\theta)$ pornim de la ecuațiile câmpului electromagnetic în semispațiul $x > 0$:

$$\text{rot} \underline{\vec{H}} = \underline{\vec{J}}; \quad \text{rot} \underline{\vec{E}} = -j\omega \underline{\vec{B}}; \quad \underline{\vec{B}} = \mu \underline{\vec{H}}; \quad \underline{\vec{J}} = \sigma(x) \underline{\vec{E}}; \quad \text{div} \underline{\vec{B}} = 0$$

de unde rezulta:

$$\text{rot}(\text{rot} \underline{\vec{H}}) = \text{rot} \underline{\vec{J}} = \text{rot}[\sigma(x) \underline{\vec{E}}] = \text{grad} \sigma(x) \times \underline{\vec{E}} + \sigma(x) \cdot \text{rot} \underline{\vec{E}} = \text{grad} \sigma(x) \times \underline{\vec{E}} - j\omega \sigma(x) \underline{\vec{B}};$$

Și ținând cont de ipotezele semispațiului $x > 0$, rezulta ecuația imaginii complexe a câmpului magnetic:

$$\frac{d^2 \underline{H}}{dx^2} = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dx} \frac{d\underline{H}}{dx} + j\omega \mu \sigma \underline{H},$$

Integrarea ecuației cu condițiile la limita $H(0) = H_0$ și $H(\infty) = 0$ **necesită cunoașterea funcțiilor $\sigma(\theta)$ și $\theta(x) \Rightarrow$ problema elm. și problema termică = CUPLATE**

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

B) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de variația $\sigma(\theta)$

Formularea electrotermică a problemei pătrunderii câmpului electromagnetic în semispațiul conductor caracterizat prin $\sigma(\theta)$ și $\mu = \text{ct.}$ este:

Sa se determine variația mărimilor electromagnetice și a densității de putere produsă prin efectul Joule-Lentz al curentului indus în profunzimea semispațiului și variația temperaturii în profunzimea acestuia la un moment de timp dat, considerând următoarele condiții la limită:

$$\underline{H}(0) = H_0; \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \underline{H}(x) = 0, \quad \forall t \quad (1)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0 \text{ (condiția inițială la } t = 0); \quad (2)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = \alpha (\theta|_{x=0} - \theta_a) \quad (3)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (4)$$

Relația (3) reprezintă condiția de transfer termic către mediul ambiant la suprafața $x = 0$, α fiind coeficientul de transmisie a căldurii și θ_a temperatura mediului ambiant

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Obs. Materialele feromagnetice prezintă o dependență neliniară între inducția magnetică B și intensitatea câmpului magnetic H . Prin urmare permeabilitatea magnetică μ este o mărime variabilă în direcția pătrunderii câmpului electromagnetic în semispațiu conductor.

Metoda 1. Se bazează pe informațiile prezentate anterior: înlocuind expresia adâncimii de pătrundere δ în expresia puterii specifice active, rezulta:

$$\mu^{\frac{1}{4}} H_0 = \sqrt[4]{\frac{2 p_s^2}{\omega \rho}}$$

Astfel, pentru oțel magnetic (cu carbon redus), se obține relația (din reprezentările $\mu_r(H)$ și $\mu_r \cdot H = f(H)$):

$$\mu^{\frac{1}{4}} H_0 = 0,905 \cdot H_0^{0,77}$$



$$p_s = 0,579 \sqrt{\omega \rho} H_0^{1,54}$$

H_0 = valoarea efectivă a câmpului

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Metoda 2: Este o metodă verificată experimental care presupune multiplicarea expresiei puterii specifice active cu factorul 1,47 și folosirea dependenței $\mu_r(H)$.

Se obține astfel o altă expresie a puterii specifice active:

$$p_s = 0,609 \sqrt{\omega \rho} H_0^{1,566}$$

Se poate observa că diferențele dintre cele două relații sunt ne semnificative și de aceea, se admite următoarea expresie a puterii specifice active:

$$p_s = 0,6 \sqrt{\omega \rho} H_0^{1,55}$$

Obs. În domeniul valorilor intensității câmpului magnetic specifice aplicațiilor practice ($H > 200 \text{ A/cm}$), valorile permeabilității magnetice nu diferă semnificativ de la un oțel la altul și de aceea relația de mai sus poate fi folosită pentru o gamă foarte largă de oțeluri.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Metoda 3. Tratarea numerică a problemei neliniarității magnetice a semispațiului

Această metodă presupune, de asemenea, cunoașterea curbei de magnetizare $B(H)$ a corpului încălzit

Studiul pătrunderii câmpului electromagnetic armonic în semispațiul conductor magnetic NELINIAR, urmărind:

- variația $H(x)$;
- variația $\mu_r(x)$;
- variația densității de volum a puterii active induse $p_J(x)$ cunoscând curba de magnetizare $B(H)$.

Următorii parametrii pot fi considerați: $H_0 \in [100 - 2000] \text{ A/cm}$ și $f \in [50 - 10^5] \text{ Hz}$.

Puterile active și reactive se vor obține prin integrarea densităților de volum în domeniul de studiu.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Metoda 3. Tratarea numerică a problemei neliniarității magnetice a semispațiului

Se va exemplifica rezolvarea problemei utilizând *Metoda Diferențelor Finite*

Considerăm o rețea de discretizare cu pas variabil (în progresie geometrică de rație r și pas h) începând de la suprafața semispațiului. Ecuația câmpului magnetic:

$$\frac{d^2 \underline{H}}{dx^2} = j\omega\sigma\mu(H)\underline{H}$$

se scrie în diferențe finite într-un nod " i " al rețelei astfel:

$$-\underline{H}_{i-1} + \left[\frac{1+r}{r} + j\omega\sigma\mu(H_i) \cdot \frac{(1+r) \cdot r^{2i-2} \cdot h^2}{2} \right] \cdot \underline{H}_i - \frac{1}{r} \underline{H}_{i+1} = 0$$

cu precizarea că $H_{i-1} = H_0$, pentru $i = 1$ și $H_{i+1} = 0$ pentru $i = N_x$ (numărul de noduri pe Ox).

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Metoda 3. Tratarea numerică a problemei neliniarității magnetice a semispațiului

Se va exemplifica rezolvarea problemei utilizând *Metoda Diferențelor Finite*

Scriind ecuația pentru toate nodurile considerate, rezulta un sistem cu necunoscutele H_i . Se constată că matricea sistemului este tridiagonală, proprietate care face foarte simplă rezolvarea (de exemplu prin metoda factorizării).

Pentru tine seama de neliniaritatea magnetică a semispațiului, problema va fi rezolvată iterativ, prin parcurgerea etapelor descrise în ceea ce urmează.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

C) Pătrunderea câmpului electromagnetic în semispațiul conductor ținând seama de neliniaritatea magnetică

Metoda 3. Tratarea numerică a problemei neliniarității magnetice a semispațiului

ETAPE CALCUL ITERATIV:

- inițial se considera $\mu(H_i) = \mu^{(1)} = \mu_0$ în toate nodurile;
- se determină soluția $H_i^{(1)}$ la prima iterație;
- folosind curba de magnetizare, se determină valorile $\mu^{(2)}$ ale permeabilității magnetice corespunzătoare valorilor $H_i^{(1)}$;
- se determină soluția $H_i^{(2)}$ corespunzătoare celei de-a doua iterații; pe baza valorilor câmpului se determină $\mu^{(3)}$ din curba de magnetizare s.a.m.d. până la atingerea criteriului de sfârșit (convergenței).

Calculul primului pas al rețelei de discretizare:

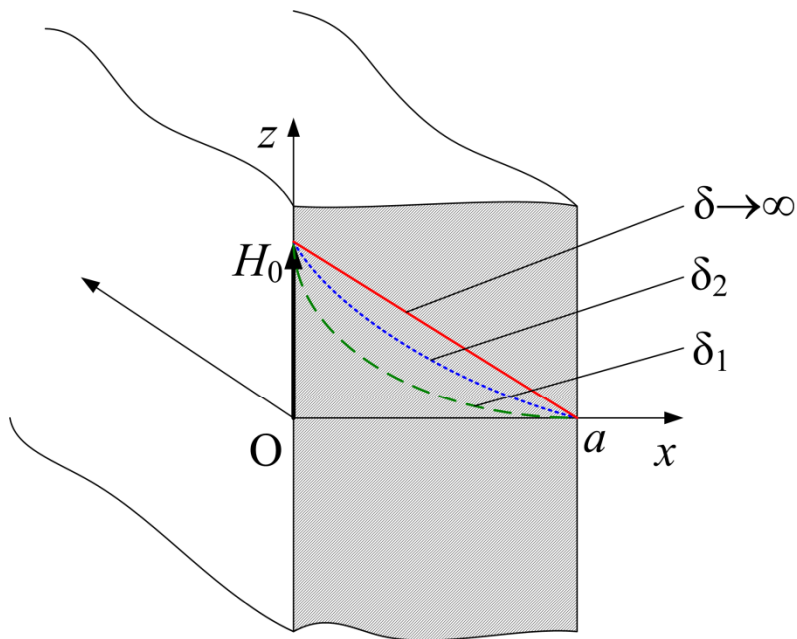
- se determină o valoare de calcul a permeabilității relative la suprafața semispațiului cu relația $\mu_r = 1,3B_s / \mu_0 H_0$ unde B_s este inducția magnetică de saturație;
- se calculează adâncimea de pătrundere δ și se impune ca să existe un anumit număr de pași (min. 3).

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

D) Difuzia unilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare



Configurația din figura, în care câmpul magnetic pe una din fețe are valoarea efectivă H_0 și este NUL pe fața opusă, modelează inductorul, respectiv indusul, în mai multe aplicații ale încălzirii prin inducție (în care se poate considera o simetrie plan-paralelă a câmpului magnetic).

Planul $x = 0$ reprezintă suprafața conductorului dinspre indus, respectiv inductor.

Condițiile la limita ale ecuației: $\frac{d^2 H}{dx^2} = j\omega\sigma\mu H$ sunt: $H(0) = H_0$ și $H(a) = 0$

În fig. este reprezentată variația intensității câmpului magnetic pentru mai multe valori ale adâncimii de pătrundere. Vectorul Poynting este nul pe fața $x = a$ ($H = 0$) $\Rightarrow$ **placa este încălzită pe una din fețe.**

1. Procesarea electrotermică a materialelor

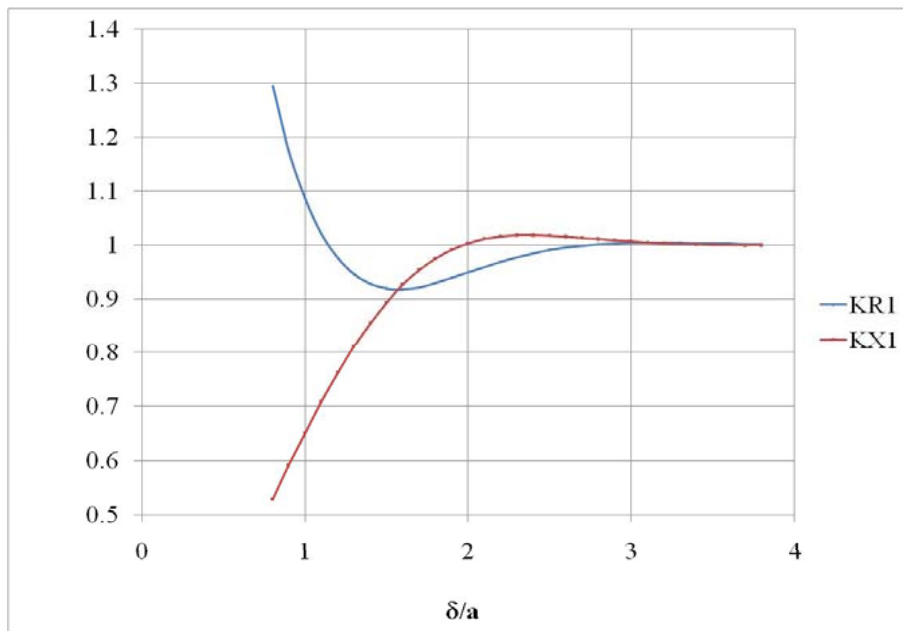
1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

D) Difuzia unilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare

Fluxul puterii aparente complexe pe unitatea de suprafață a fetei încălzite este:

$$S_1 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R1} + j \cdot K_{X1}) \quad \text{în care} \quad K_{R1} = \frac{\sinh(2a/\delta) + \sin(2a/\delta)}{\cosh(2a/\delta) - \cos(2a/\delta)} \quad K_{X1} = \frac{\sinh(2a/\delta) - \sin(2a/\delta)}{\cosh(2a/\delta) - \cos(2a/\delta)}$$



Obs. Din analiza curbelor de variație K_{R1} și K_{X1} rezulta:

-pentru $a/\delta > 3$ rezulta $K_{R1} = K_{X1} = 1$ (cu alte cuvinte fluxul puterilor activă și reactivă în placă au aceeași valoare ca în cazul semispațiului – grosimea plăcii nu mai influențează P și Q;

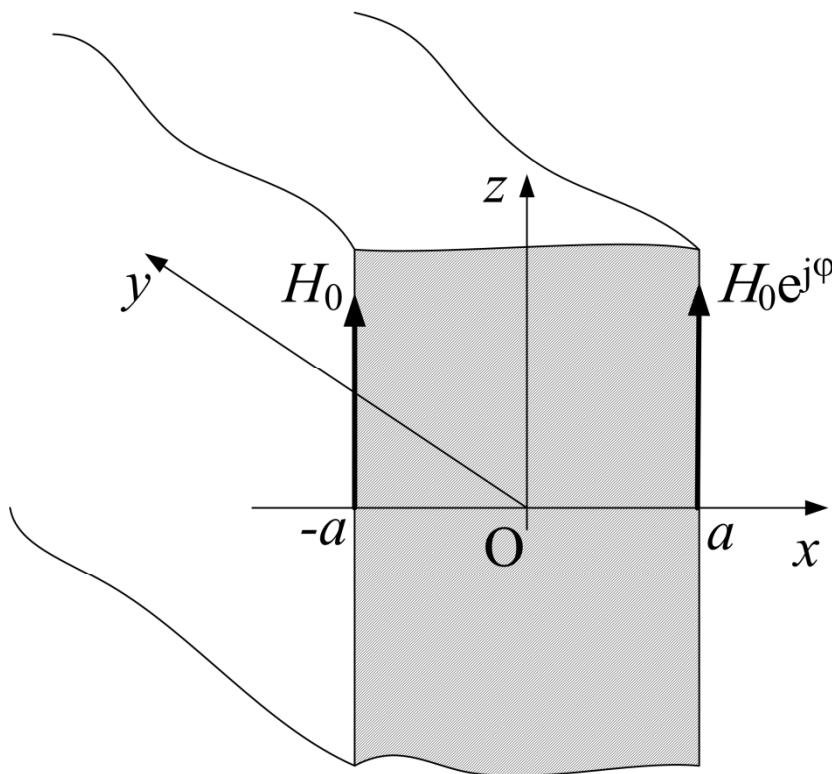
-puterea activă difuzată este minimă ($K_{R1} = \min.$) pentru $a/\delta = 1,57$ (condiția ca un inductor să fie corect dimensionat (pierderile de putere activă să fie minime)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

E) Difuzia bilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare



Fie o placă conductoare de lățime $2a$ încălzită pe ambele fețe. Câmpul magnetic satisface următoarele condiții:

$$\underline{H}(-a) = H_0 \quad \text{și} \quad \underline{H}(a) = H_0 \exp(j\varphi)$$

Obs. În cazul în care defazajul este nul ($\varphi = 0$) configurația modelează încălzirea unei plăci într-un inductor solenoidal.

Fluxul puterii aparente complexe este:

$$S_2 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R2} + j \cdot K_{X2})$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

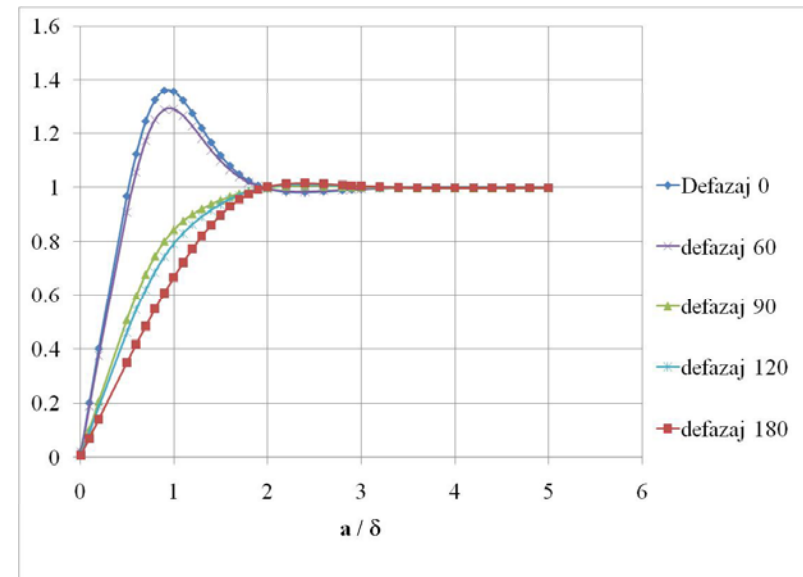
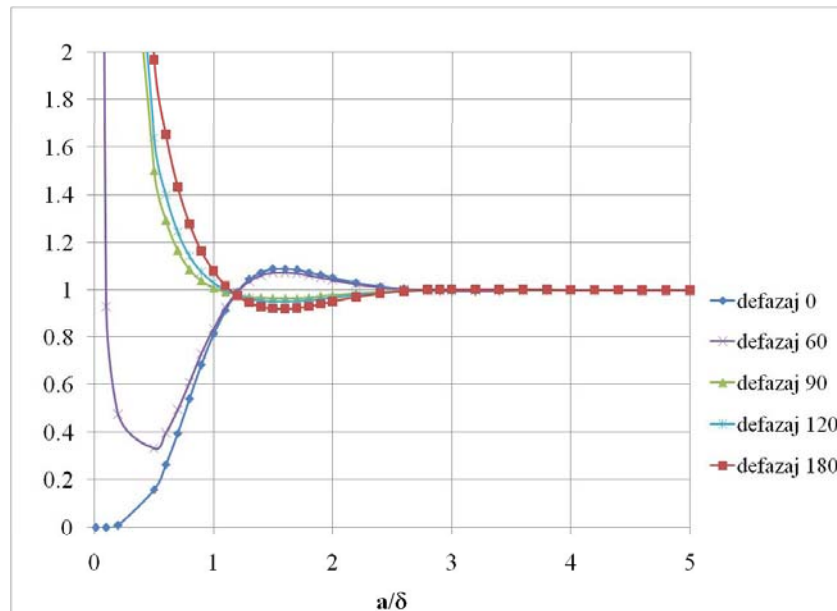
1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

E) Difuzia bilaterală a câmpului electromagnetic într-o placă conductoare

$$S_2 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R2} + j \cdot K_{X2})$$

$$K_{R2} = K_{R1} - (1 + \cos \varphi) \frac{\cos(2a/\delta) \cdot \sinh(2a/\delta) + \sin(2a/\delta) \cdot \cosh(2a/\delta)}{\cosh^2(2a/\delta) - \cos^2(2a/\delta)}$$

$$K_{X2} = K_{X1} - (1 + \cos \varphi) \frac{\cos(2a/\delta) \cdot \sinh(2a/\delta) - \sin(2a/\delta) \cdot \cosh(2a/\delta)}{\cosh^2(2a/\delta) - \cos^2(2a/\delta)}$$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

F) Difuzia câmpului electromagnetic în bare de secțiune rectangulară

$$S_3 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R3} + j \cdot K_{X3})$$

Obs. Factorii K_{R3} și K_{X3} se calculează cu relații asemănătoare

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

G) Difuzia câmpului electromagnetic într-un cilindru

În multe aplicații practice indusul este un cilindru situat într-un câmp magnetic uniform la periferie, orientat axial. Intensitatea câmpului magnetic în cilindru satisface ecuația următoare:

$$\frac{d^2 \underline{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\underline{H}}{dr} = \underline{\lambda}^2 \underline{H}$$

Soluția generală are forma: $\underline{H}(r) = \underline{A}I_0(\underline{\lambda}r) + BK_0(\underline{\lambda}r)$ în care

I_0 și K_0 sunt funcții Bessel modificate de prima și a doua speță de ordin zero.

Densitatea curentului indus este: $\underline{J}(r) = -\frac{d\underline{H}}{dr} = -\underline{\lambda}[\underline{A}I_1(\underline{\lambda}r) - BK_1(\underline{\lambda}r)]$

Impunând condițiile de limită: $\underline{J}(0) = 0$ și $\underline{H}(a) = H_0$

se obține soluția:

$$\underline{H}(r) = H_0 \frac{I_0(\underline{\lambda}r)}{I_0(\underline{\lambda}a)} = H_0 \frac{ber_0\left(\frac{r}{\delta}\right) + j \cdot bei_0\left(\frac{r}{\delta}\right)}{ber_0\left(\frac{a}{\delta}\right) + j \cdot bei_0\left(\frac{a}{\delta}\right)}$$

(**ber** și **bei** = funcțiile lui Kelvin)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

G) Difuzia câmpului electromagnetic într-un cilindru

Fluxul puterii aparente complexe $\underline{S}_4$ pe unitatea de suprafață încălzită ($r = a$):

$$\underline{S}_4 = \underline{E}(a) \cdot \underline{H}^*(a) = -\frac{\lambda H_0^2}{\sigma} \frac{I_1(\lambda a)}{I_0(\lambda a)}$$

sau, sub forma:
$$S_4 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R4} + j \cdot K_{X4})$$

în care
$$K_{R4} = \operatorname{Re} \left[(1 + j) \frac{I_1(\lambda a)}{I_0(\lambda a)} \right] \quad \text{și} \quad K_{X4} = \operatorname{Im} \left[(1 + j) \frac{I_1(\lambda a)}{I_0(\lambda a)} \right]$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.2. Bazele teoretice ale încălzirii prin inducție; difuzia câmpului electromagnetic în conductoare masive

H) Difuzia câmpului electromagnetic într-un cilindru

Puterea aparentă $\underline{S}_5$ la încălzirea prin inducție a unei țevi în câmp magnetic exterior uniform cu orientare axială se poate exprima:

$$\underline{S}_5 = \frac{\rho H_0^2}{\delta} (K_{R5} + j \cdot K_{X5})$$

în care mărimile K_{R5} și K_{X5} care definesc puterile activă și reactivă pe unitatea de suprafață au variațiile în funcție de a/δ cunoscute.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

Absorbția energiei electromagnetice de către corpul supus încălzirii (indus) precum și mărimea indicatorilor energetici ai procesului sunt condiționate de configurațiile geometrice și poziția reciprocă dintre inductor și indus.

Determinarea puterilor active și reactive în diverse părți ale ansamblului inductor – indus și, pe baza acestora, a indicatorilor energetici, necesită determinarea repartiției câmpului electromagnetic și calculul mărimilor integrale asociate.

Obs. În anumite cazuri (configurații) structurii reale i se poate asocia o schemă electrică echivalentă în raport cu bornele de alimentare, demers care facilitează evaluarea indicatorilor energetici.

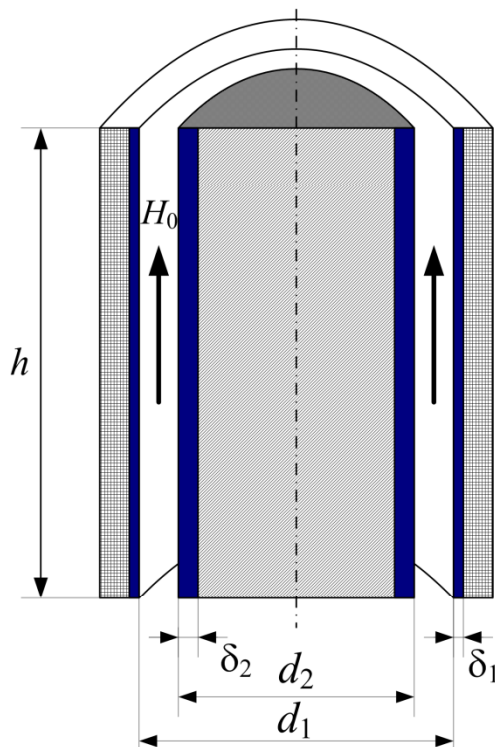
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Fie un segment de lungime h dintr-un ansamblu inductor cilindric care are diametrul interior d_1 și corpul încălzit (indusul), având forma cilindrică, de diametru d_2 , coaxial cu inductorul.



Curentul I_1 ce parcurge cele N spire pe înălțimea h produce în spațiul inductor – indus (“întrefier”) un câmp magnetic uniform de intensitate H_0 :

$$H_0 = \frac{N \cdot I_1}{h}$$

Notăm cu δ_1 și δ_2 adâncimile de pătrundere a câmpului magnetic în inductor și în piesă (indus). Pe baza celor arătate anterior, puterile aparente complexe în inductor și în piesă au expresiile:

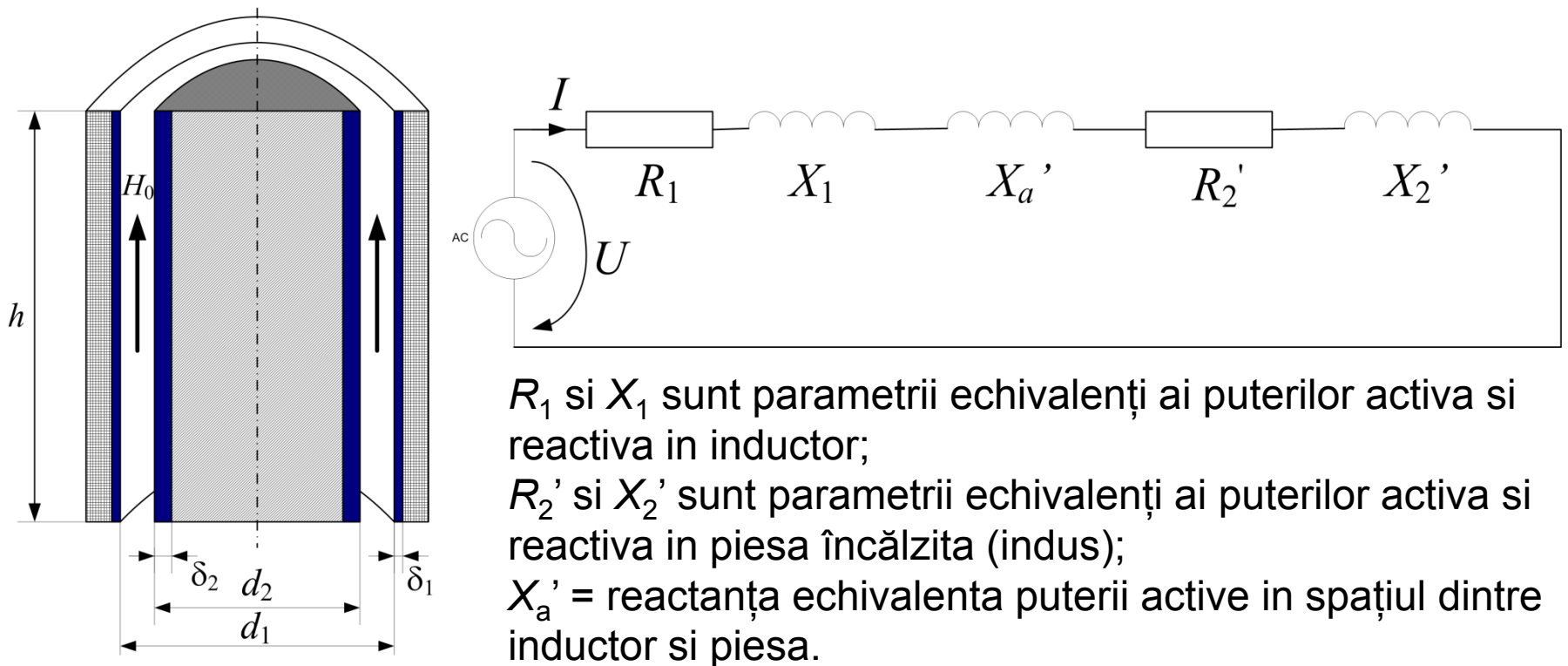
$$\underline{S}_1 = \frac{\rho_1 H_0^2}{\delta_1} (K_{R1} + j \cdot K_{X1}) \pi d_1 h \quad \text{și} \quad \underline{S}_2 = \frac{\rho_2 H_0^2}{\delta_2} (K_{R2} + j \cdot K_{X2}) \pi d_2 h$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială



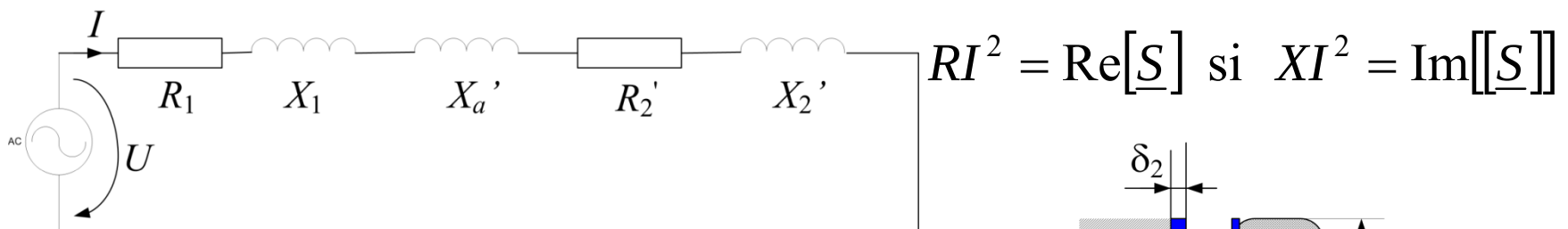
Din egalitățile: $RI^2 = \text{Re}[\underline{S}]$ și $XI^2 = \text{Im}[\underline{S}]$ rezulta expresiile elementelor de circuit

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială



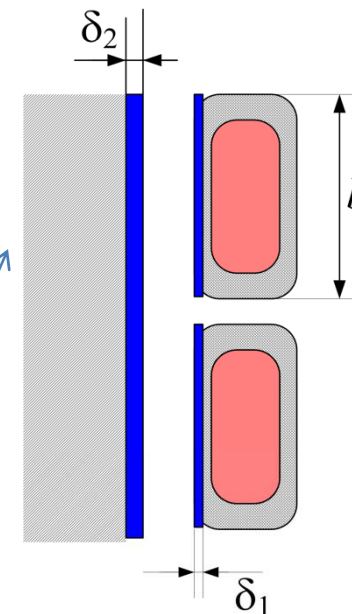
$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h} N^2 K_{R1}; \quad X_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h} N^2 K_{X1};$$

$$R_2' = \rho_2 \frac{\pi d_2}{\delta_2 h} N^2 K_{R2}; \quad X_2' = \rho_2 \frac{\pi d_2}{\delta_2 h} N^2 K_{X2};$$

$$X_a' = \omega L_a = \omega \frac{\Phi_a}{I} = \omega \frac{N \mu_0 H_0 \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)}{I} = \omega \mu_0 \frac{\pi (d_1^2 - d_2^2)}{4h} N^2$$

Obs. Dacă se ia în considerare izolația spirelor inductorului prin factorul de umplere axială $k_u = bN/h$ (b = înălțimea spirei), rezulta expresiile corectate:

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h \cdot k_u} N^2 K_{R1}; \quad X_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h \cdot k_u} N^2 K_{X1};$$



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Corecții impuse de considerarea extinderii axiale finite

Considerăm ca inductorul și piesa (indusul) au înălțimi diferite: h_1 și h_2 .

O aproximație bună a acestei configurații este aceea în care se consideră două țevi concentrice, având grosimile pereților δ_1 și δ_2 , care sunt parcurse de curentul inductor rezultat NI_1 și, respectiv, indus I_2 .

Obs. Aproximația rezultă din faptul că, în realitate, curentul în indus nu se repartizează cu densitatea constantă ca în model.

Ținând cont de adâncimile de pătrundere, diametrele medii ale celor două țevi sunt: $d_{m1} = d_1 + \delta_1$ și $d_{m2} = d_2 - \delta_2$

Rezistența inductorului: $R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h_1 \cdot k_u} N^2 K_{R1}$ rezistența indusului: $R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2}{\delta_2 h_2} K_{R2}$

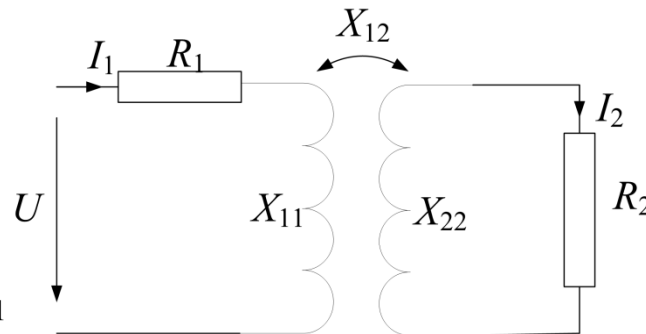
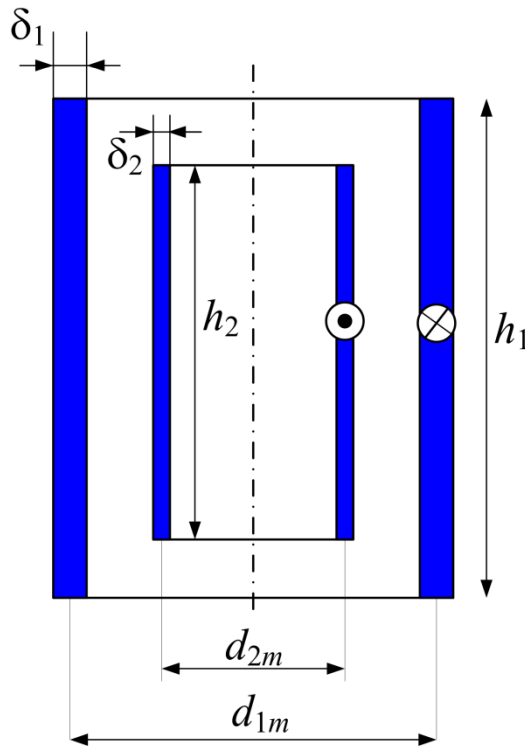
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Corecții impuse de considerarea extinderii axiale finite



$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{\delta_1 h_1 \cdot k_u} N^2 K_{R1}$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2}{\delta_2 h_2} K_{R2}$$

$$X_{11} = \omega \mu_0 \frac{\pi d_{1m}^2}{4 h_1} N^2 \alpha_1$$

$$X_{22} = \omega \mu_0 \frac{\pi d_{2m}^2}{4 h_2} N^2 \alpha_2$$

$$X_{12} = \omega X_{22} \frac{\alpha_{12}}{\alpha_2}$$

Obs. $\alpha_1(d_{1m}/h_1)$, $\alpha_2(d_{2m}/h_2)$ și $\alpha_1(d_{1m}/h_1, h_1/h_2)$ sunt funcții care țin seama de valoarea finită a extinderii axiale.

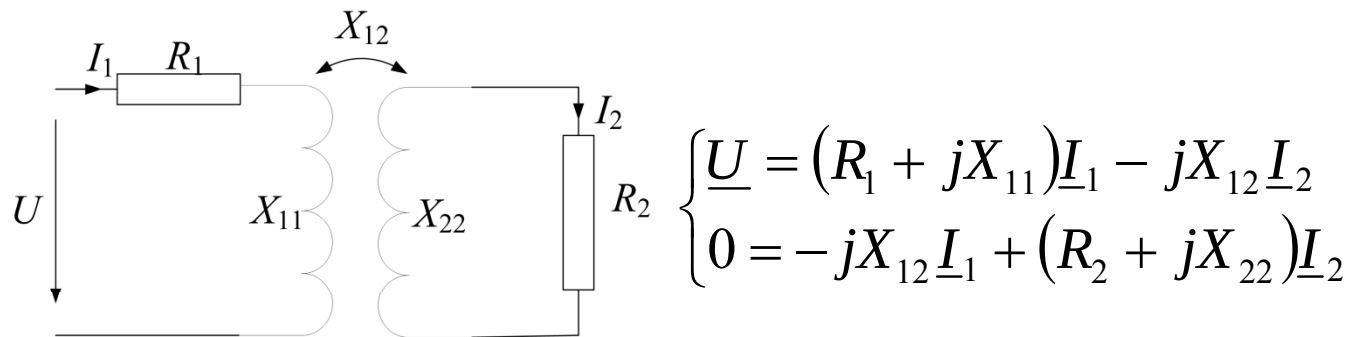
1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Corecții impuse de considerarea extinderii axiale finite



$$\begin{cases} \underline{U} = (R_1 + jX_{11})\underline{I}_1 - jX_{12}\underline{I}_2 \\ 0 = -jX_{12}\underline{I}_1 + (R_2 + jX_{22})\underline{I}_2 \end{cases}$$

$$\underline{U} = [R_1 + p^2 R_2 + j(X_{11} - p^2 X_{12})]\underline{I}_1, \quad \text{in care} \quad p^2 = \frac{X_{12}^2}{R_2^2 + X_{22}^2} = N^2 \xi \quad \text{reprezintă raportul de transformare al ansamblului inductor - piesă}$$

Obs. În cazul configurațiilor având lungimea mult mai mare decât diametrul $\alpha_{12} \cong \alpha_2 = 1$; dacă, în plus, $X_{22}^2 \gg R_2^2$ (caz foarte frecvent întâlnit în practică), rezultă $\xi = 1$ și, deci, $p^2 \cong N^2$.

Partea imaginară a impedanței $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}_1$ reprezintă reactanța spațiului inductor piesă.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Indicatorii energetici ai încălzirii. Randamentul încălzirii

Randamentul încălzirii: reprezintă raportul dintre puterea activă indusă și puterea activă absorbită de inductor:

$$\eta_e = \frac{R'_2 I_1^2}{R'_2 I_1^2 + R_1 I_1^2} = \frac{1}{1 + R_1/R'_2} \quad \eta_e = \frac{1}{1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\delta_2}{\delta_1} \frac{d_1}{d_2} \frac{h_2}{h_1} \frac{K_{R1}}{K_{R2}} \frac{1}{k_u} \frac{1}{\xi}} \quad \text{sau} \quad \eta_e = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \frac{h_2}{h_1} \frac{K_{R1}}{K_{R2}} \frac{1}{k_u} \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_{r2} \rho_2}}}$$

Obs.

- se recomandă ca distanța dintre inductor și piesă să fie cât mai redusă (având în vedere că randamentul total este produsul dintre randamentul electric și cel termic, se impune ocuparea acestui spațiu cu materiale termoizolante);
- pentru aplicațiile în care piesă nu se deplasează în lungul inductorului se recomandă ca lungimea inductorului să fie superioară lungimii piesei;
- o grosime cât mai redusă a izolației dintre spire conduce la creșterea randamentului;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.3. Schema electrică echivalentă a ansamblului inductor – corp de încălzit și indicatorii energetici ai încălzirii

A) Schema electrică echivalentă a unei structuri cilindrice infinite în direcția axială

Indicatorii energetici ai încălzirii. Randamentul încălzirii

Valoarea ideală a randamentului se obține pentru $d_1 / d_2 = 1$, $h_2 / h_1 = 1$, $K_{R1} = K_{R2} = 1$, $k_u = 1$ și $\xi = 1$ și are expresia:

$$\eta_{ei} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_{r2}\rho_2}}}$$

Obs.

- randamentul de încălzire al materialelor rezistive este superior celui corespunzător încălzirii materialelor mai puțin rezistive; randamentul crește pe măsura creșterii temperaturii pentru că rezistivitatea crește cu T ;
- în cazul încălzirii materialelor feromagnetice randamentul se reduce considerabil pentru temperaturi superioare temperaturii Curie de paramagnetism (datorită scăderii permeabilității magnetice);
- în conformitate cu schema electrică echivalentă factorul de putere are expresia:

$$\cos \varphi = \frac{R_1 + R_2'}{Z} \cong \frac{R_1 + R_2'}{X_1 + X_a' + X_2'} \quad \text{sau, în cazul ideal (lungime infinită)} \quad \cos \varphi \cong \frac{\sqrt{2\rho_2\mu_r^2}}{\sqrt{\omega\mu_0(d_1 - d_2)}}$$

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A) Topirea metalelor

Reprezintă domeniul cu cea mai largă aplicare a încălzirii prin inducție. Există două tipuri de echipamente: *cuptoare de inducție cu creuzet* și *cuptoare de inducție cu canale*

A1) Cuptoare de inducție cu creuzet

Constau dintr-o bobina – inductor dispusă în jurul unui creuzet refractar, izolat electric, în care se plasează materialele metalice ce urmează a fi topite.

În anumite cazuri creuzetul poate fi din grafit sau din metal.

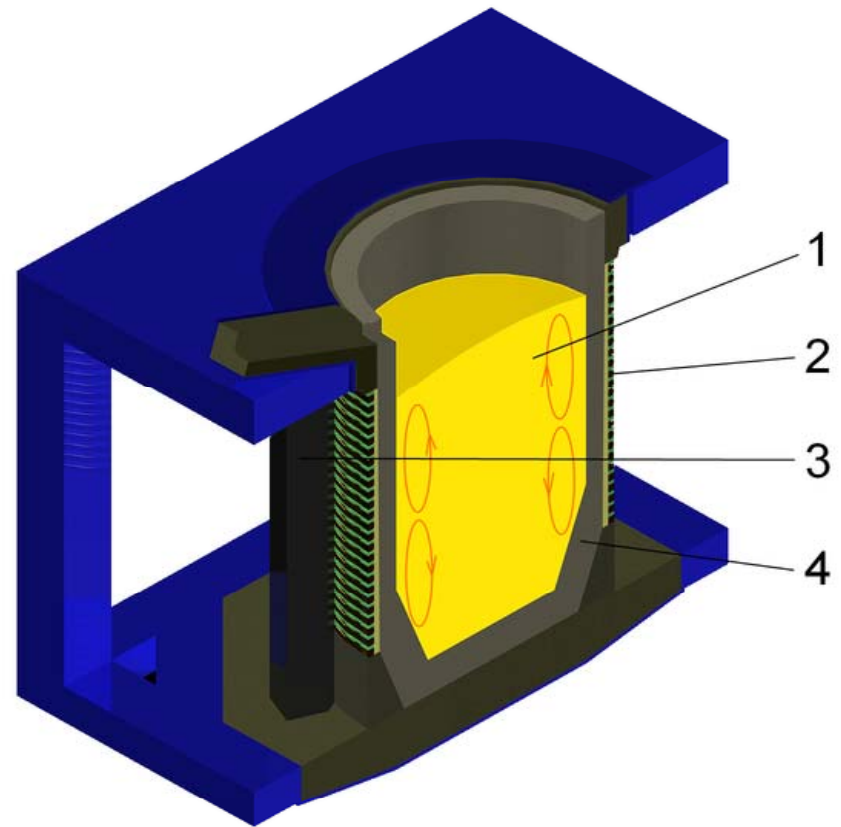
Obs. Interacțiunea câmp magnetic – curenți induși determină apariția unor forțe electromagnetice care acționează practic radial asupra suprafeței laterale a băii. Ca urmare a reducerii intensității câmpului magnetic la extremitățile superioară și inferioară a băii, presiunea electromagnetică este maximă în planul din mijloc. Ca urmare, baia lichidă este antrenată într-o mișcare specifică denumită agitare electromagnetică (favorabilă pentru omogenizare)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A1) Cuptoare de inducție cu creuzet

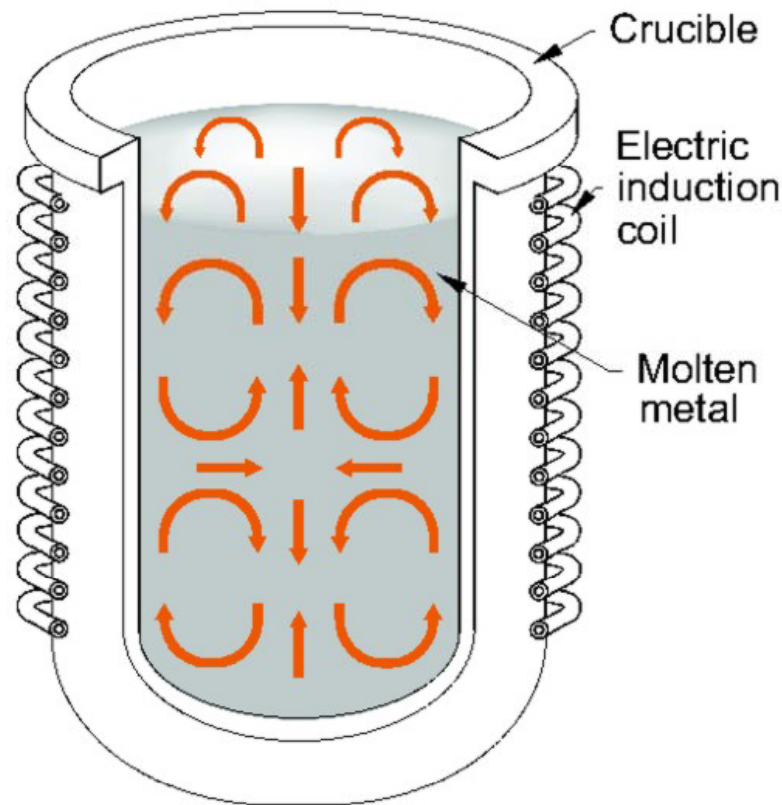


1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A1) Cuptoare de inducție cu creuzet



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A2) Cuptoare de inducție cu canale

Cuptoarele de inducție cu canale constau într-o baie de metal lichid care conectează cele două extremități ale unor canale care înconjoară miezul magnetic și bobina inductor.

Obs. Din punct de vedere electric acest cuptor este echivalent cu un transformator cu circuit electric închis în care canalele formează circuitul electric secundar care este conectat în scurtcircuit.

Conversia electrotermică a energiei se produce aproape în exclusivitate la nivelul canalelor.

Există două efecte care limitează puterea dezvoltată în circuitul secundar:

- supraîncălzirea (exagerată) a metalului din canale în comparație cu baia;
- efectul pinch* – contracția conductorului lichid efect care poate instabilitate în absorbția de putere.

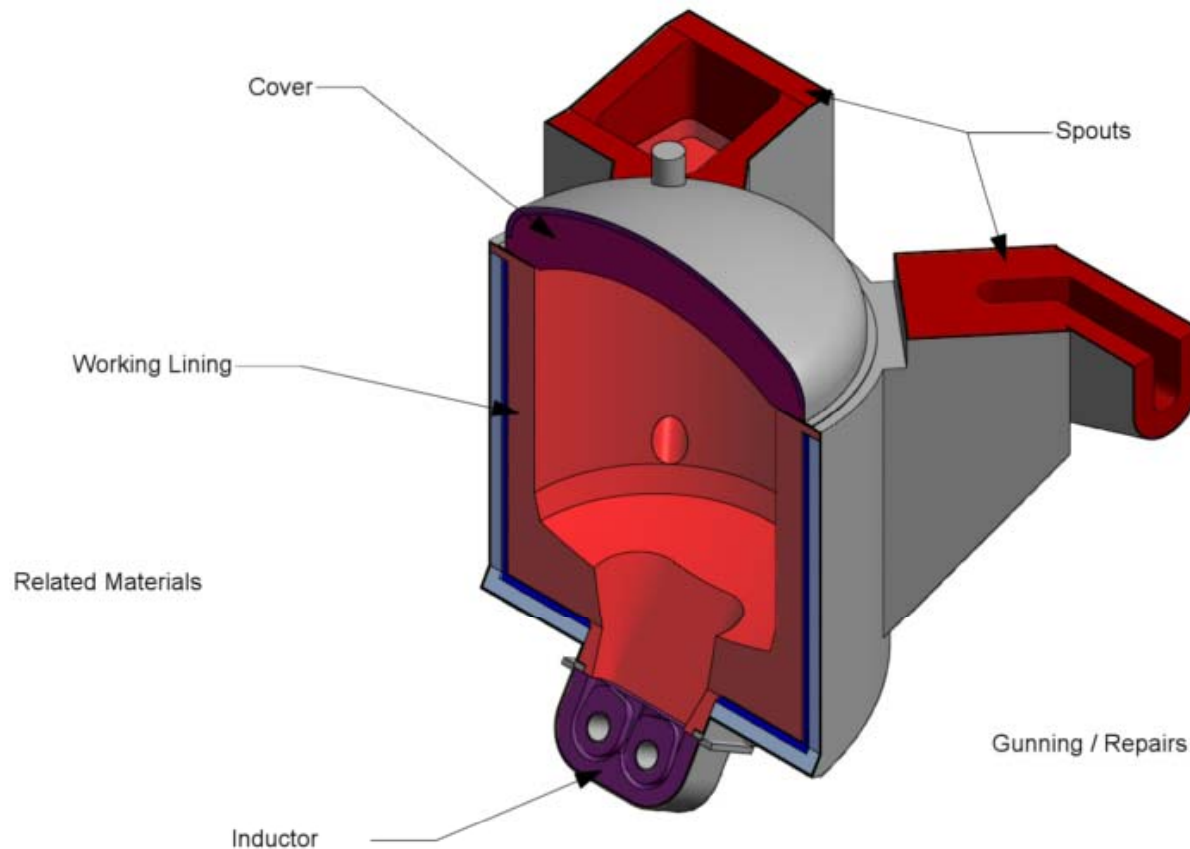
Valori ale densității admisibile de putere în canale: Cu (50-60 MW/m³), bronz, alama (20-30 MW/m³), Al (3-6 MW/m³), aliaje de Al (12-14 MW/m³), fonta (50-80 MW/m³)

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A2) Cuptoare de inducție cu canale

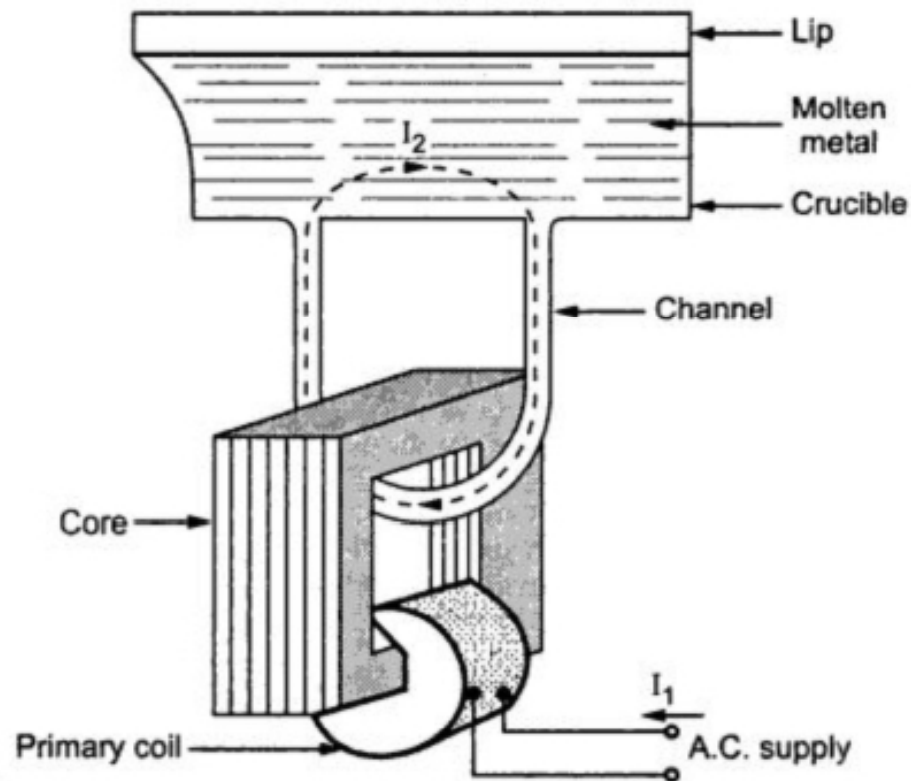


1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

A2) Cuptoare de inducție cu canale



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

B) Încălzirea in profunzime in vederea deformării plastice la cald

Utila pentru prelucrarea la cald a metalelor prin laminare, forjare, matrițare, presare etc.

Obs. Încălzirea trebuie sa asigure temperatura dorita intr-un timp cat mai scurt cu încălzire cat mai uniforma a semifabricatului. Aceste cerințe sunt contradictorii cu încălzirea prin inducție si de aceea corelarea frecventei cu dimensiunile si proprietățile este foarte importanta!!!

Trebuie avute in vedere următoarele aspecte:

- diferența de temperatura dintre suprafața si axa centrala sa nu depaseasca (la sfârșitul încălzirii) o valoare maxim admisibila ($\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pentru oteluri si 3 – 5 % din T de încălzire pentru neferoase);
- temperatura suprafeței sa nu depaseasca o valoare maxim admisibila;

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

B) Încălzirea in profunzime in vederea deformării plastice la cald

Pentru oteluri, pe baza rezultatelor experimentale, a fost stabilita următoarea relație pentru puterii specifice maxim admisibile si a timpului de încălzire pana la 1200 °C pentru o diferența de temperatura in secțiune de 40 °C (in funcție de diametrul barei d):

$$p_s = \frac{300}{d[\text{cm}]} [\text{W/cm}^2] \quad t = 910 \cdot d^2 [\text{min}]$$

Obs. Pentru asigurarea condiției de gradient termic minim in secțiunea transversala a barelor de otel se utilizează metoda modificării puterii specifice pe durata încălzirii:

-in cazul in care semifabricatul ramane in inductor pe toata durata încălzirii, se va utiliza o putere specifica aproape de limita superioara (5 kW/cm²) pana când temperatura suprafetei atinge valoarea admisibila, după care puterea specifica se reduce la nivelul necesar omogenizării termice;

-in cazul instalațiilor cu încălzire continua, in care piesa se deplasează in lungul inductorului, se folosesc inductoare cu pas variabil al bobinelor, cu număr mare de spire la început si apoi, din ce in ce mai redus spre ieșire.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

C) Tratament termic superficial prin inducție

Călirea superficiala a pieselor din otel = una dintre cele mai dezvoltate aplicații ale încălzirii prin inducție.

Călirea superficiala = încălzirea rapidă a unui strat superficial urmată de o răcire rapidă.

Adâncimea de călire = grosimea stratului superficial în care duritatea are o valoare impusă.

Călirea fara deplasare (simultana) = constă în încălzirea întregului strat ce urmează a fi durificat, folosindu-se o putere specifică de $0,2 - 2 \text{ kW/cm}^2$ urmată de răcire;

Călirea cu deplasare (continua sau succesiva) = se realizează prin deplasarea piesei sau inductorului cu $3 - 30 \text{ mm/s}$, răcirea având loc la ieșirea din inductor; puterea specifică are valori în gama $2 - 4 \text{ kW/cm}^2$.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

C) Tratament termic superficial prin inducție

În aplicațiile de tratament termic superficial se impun următorii parametri:

- adâncimea stratului călit Δ ;
- temperatura de călire θ_{Δ} ;
- valoarea temperaturii la adâncimea Δ ;
- valoarea admisibilă a temperaturii suprafeței θ_s ;

Dacă se admite că adâncimea stratului călit este aceea în care temperatura în finalul încălzirii este superioară temperaturii Curie de paramagnetism, se delimitează stratul superficial $x < \Delta$ NEMAGNETIC ($\mu_r' = 1$), de zona de profunzime care se află în stare magnetică (vezi figurile următoare).

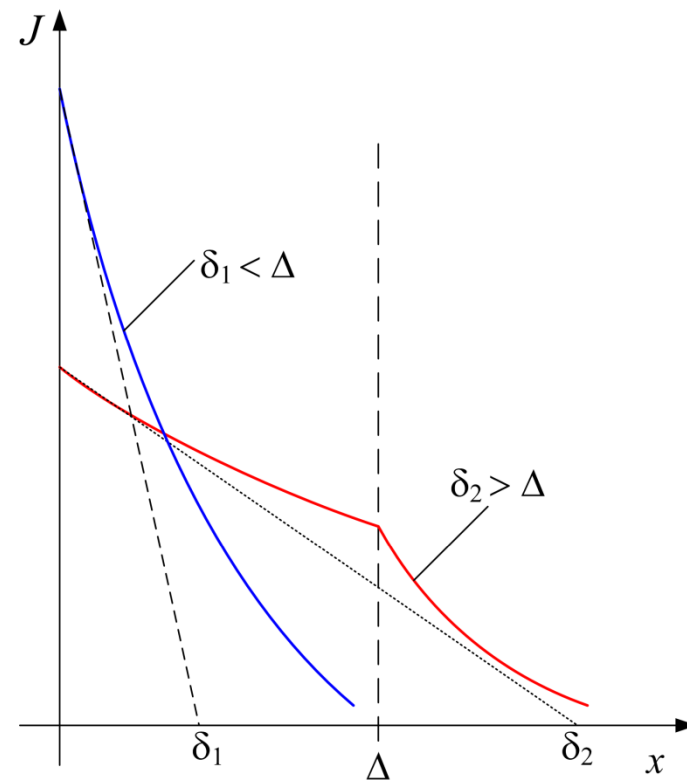
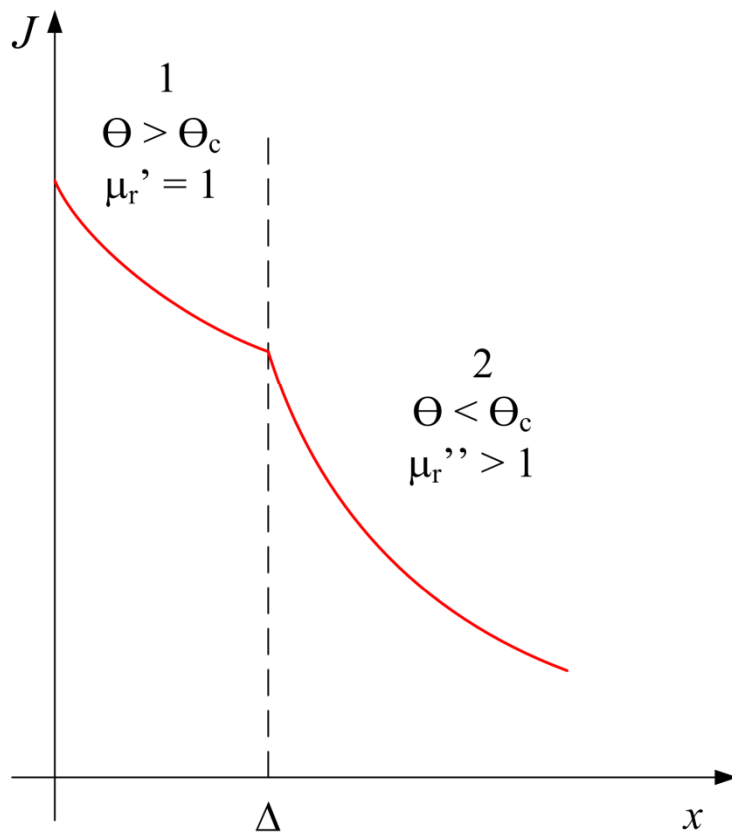
Pentru două valori ale frecvenței $f_1 > f_2$, respectiv pentru care $\delta_1 < \delta_2$, variația densității curentului indus are alura din figura.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

C) Tratament termic superficial prin inducție



1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

C) Tratament termic superficial prin inducție

Variația temperaturii în profunzimea piesei în finalul încălzirii depinde atât de modul de variație a densității de curent cât și de proprietățile de transfer termic ale materialului.

- a) Dacă puterea specifică are o valoare ridicată și timpul de încălzire este redus, temperatura suprafeței crește rapid. Acest caz corespunde unei valori a adâncimii de pătrundere δ_1 inferioară adâncimii de călire (curba 1). În acest caz densitatea superficială de putere este limitată superior la valoarea admisibilă a temperaturii θ_s .
- b) Dacă puterea indusă în stratul superficial depășește (puțin) fluxul termic spre interiorul piesei, timpul de încălzire trebuie să fie suficient de mare. Acest caz corespunde valorilor reduse ale densității superficiale de putere, respectiv la valori ale adâncimii de pătrundere $\delta_2 > \Delta$.

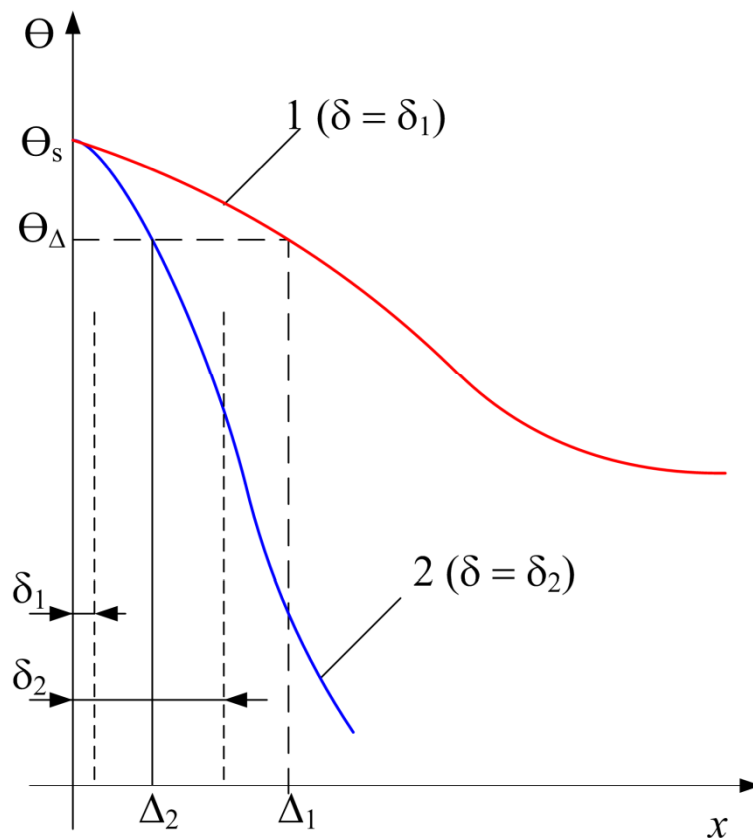
Figura următoare prezintă variația temperaturii în profunzime pentru o valoare θ_s a temperaturii suprafeței.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

C) Tratament termic superficial prin inducție



-Curba "1" corespunde unei adâncimi de pătrundere δ_1 reduse, respectiv unei frecvențe ridicate; limitarea temperaturii suprafeței impune un timp de încălzire ridicat și o densitate de putere redusă ($< 1 \text{ kW/cm}^2$). Se observa că adâncimea stratului Δ în care $\theta > \theta_\Delta$ este sensibil mai mare decât adâncimea de pătrundere ($\Delta \gg \delta_1$).

-Curba "2" corespunde unei adâncimi de pătrundere δ_2 mare, adică unor valori mai reduse ale frecvenței, caz în care pot fi utilizate puteri specifice mai mari ($5 - 10 \text{ kW/cm}^2$), fără riscul ca temperatura suprafeței să depășească valoarea admisibilă; timpul de încălzire este mai redus în acest caz, ceea ce face ca $\Delta_2 < \delta$.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

D) Încălzirea benzilor metalice subțiri in flux magnetic transversal

Este o aplicație foarte des întâlnita.

Puterea produsa intr-o placa de grosime a aflata intr-un inductor de tip solenoidal prin efect Joule al curenților induși, corespunzătoare unitatii de suprafață încălzita are expresia:

$$p_s = \frac{\rho H_0^2}{\delta} \cdot K_R(a/\delta)$$

Daca se tine seama de variatia factorului de absorbtie a puterii K_R in functie de a/δ , se constata ca o incalzire eficienta presupune indeplinirea urmatoarei conditii:

$$\frac{a}{\delta} > 2,4$$

Aceasta inegalitate arata ca, cu cat grosimea placii este mai redusa, cu atat sunt necesare valori mai ridicate ale frecventei.

Exemplu: benzi de Alcu grosimi cuprinse intre 1,5 si 6 mm, $K_R = 1$ pentru $f = 15 - 30$ kHz – PROBLEME!!!

1. Procesarea electrotermică a materialelor

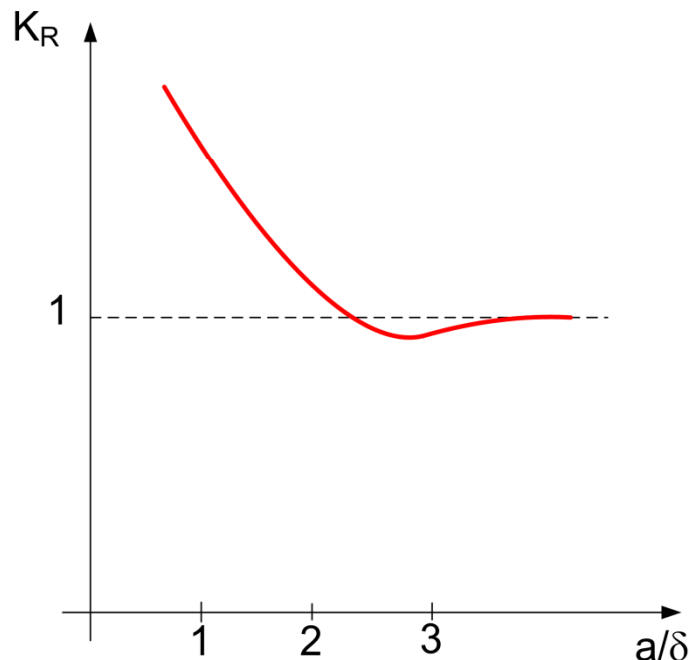
1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

D) Încălzirea benzilor metalice subțiri în flux magnetic transversal

Dacă se admite ca printr-o procedură oarecare se creează câmpuri inductoare H_0 de sensuri opuse pe cele două fețe ale plăcii, se constată că într-o astfel de situație factorul de absorbție a puterii variază ca în figura alăturată. Într-o astfel de situație, o încălzire eficientă presupune verificarea condiției:

$$\frac{a}{\delta} < 2,4$$



Această inegalitate evidențiază posibilitatea încălzirii benzilor la frecvențe mai reduse.

Condiția ca pe cele două fețe ale plăcii sensul câmpului magnetic să difere presupune ca sensul curentului în două conductoare simetrice în raport cu placa să aibă același sens. $\Rightarrow$ sunt necesare bobine separate pe fiecare față a plăcii $\Rightarrow$ **inductor dublu plan cu poli = inductor cu flux magnetic transversal**

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

E) Boiler tip transformator pentru încălzirea prin inducție indirecta sau directa a lichidelor



Boilerul tip transformator este destinat încălzirii indirecte a lichidelor si este alcătuit din:

- miez magnetic;
- infasurare primara (identica cu aceea a unui transformator);
- infasurare secundara alcătuita din “conduce spiralate” prin care circula lichidul ce trebuie încălzit.

Infasurarea secundara funcționează in scurtcircuit astfel ca puterea indusa in aceasta se transforma integral in căldura prin efect Joule al curentului indus.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetica

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

E) Boiler tip transformator pentru încălzirea prin inducție indirecta sau directa a lichidelor

Obs. In cazul încălzirii unor lichide cu conductivitate electrica bine definita si care manifesta o reactivitate crescuta fata de metale (acizi, baze etc.), se pot folosi boilere tip transformator cu *încălzire DIRECTA* prin inducție a lichidului (intr-un recipient nemetalic).

In acest caz (*boiler tip transformator cu încălzire directa*), circuitul electric secundar are caracterul de conductor masiv, puterea indusa in acesta având expresia:

$$P_2 = \frac{\rho_2 H_0^2}{\delta_2} \pi D_2 h_2 K_{R2}$$

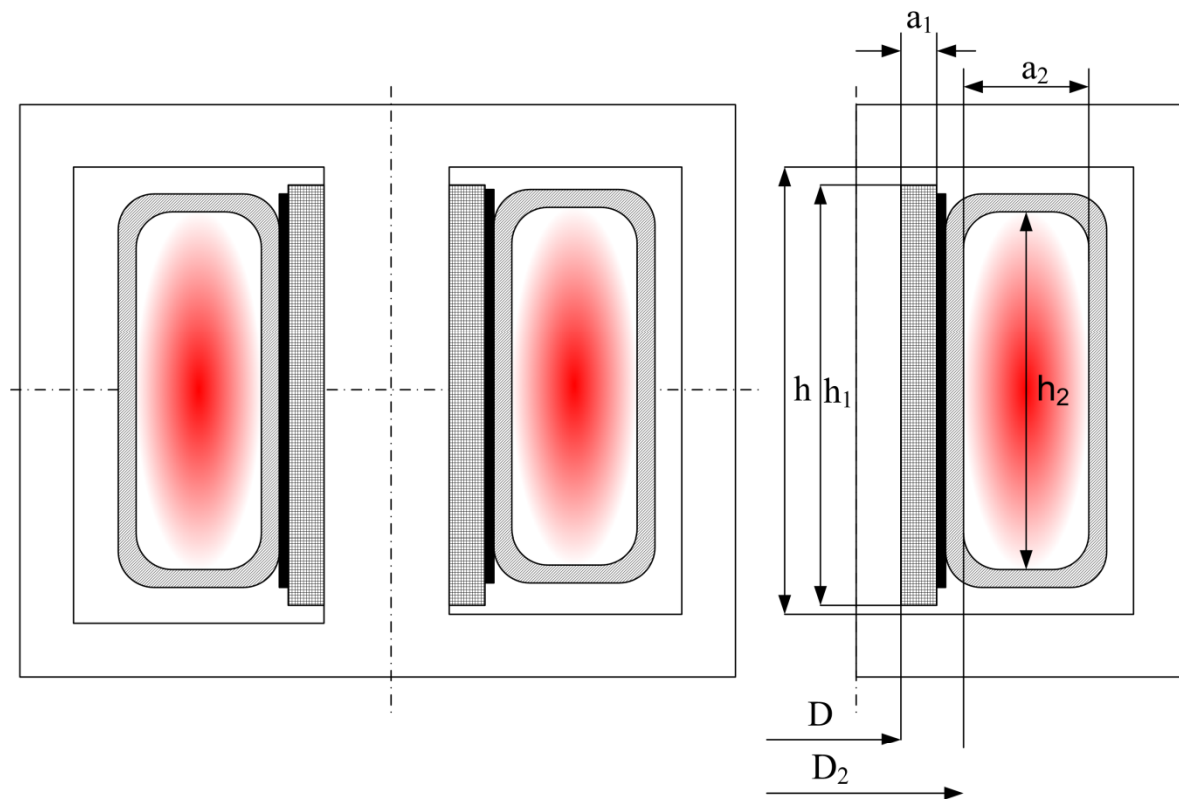
in care ρ_2 este rezistivitatea lichidului, δ_2 adâncimea de pătrundere a câmpului in lichid, H_0 intensitatea câmpului magnetic in spațiul dintre inductor si indus, K_{R2} factorul de difuzie a puterii active in indus.

1. Procesarea electrotermică a materialelor

1.3. Procesarea materialelor prin inducție electromagnetică

1.3.4. Aplicații practice ale încălzirii prin inducție

E) Boiler tip transformator pentru încălzirea prin inducție indirectă sau directă a lichidelor



2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.1. Noțiuni generale

Def. Plasma = stare fizica a materiei care consta dintr-un ansamblu de electroni liberi, ioni, particule neutre, cuante de radiație...

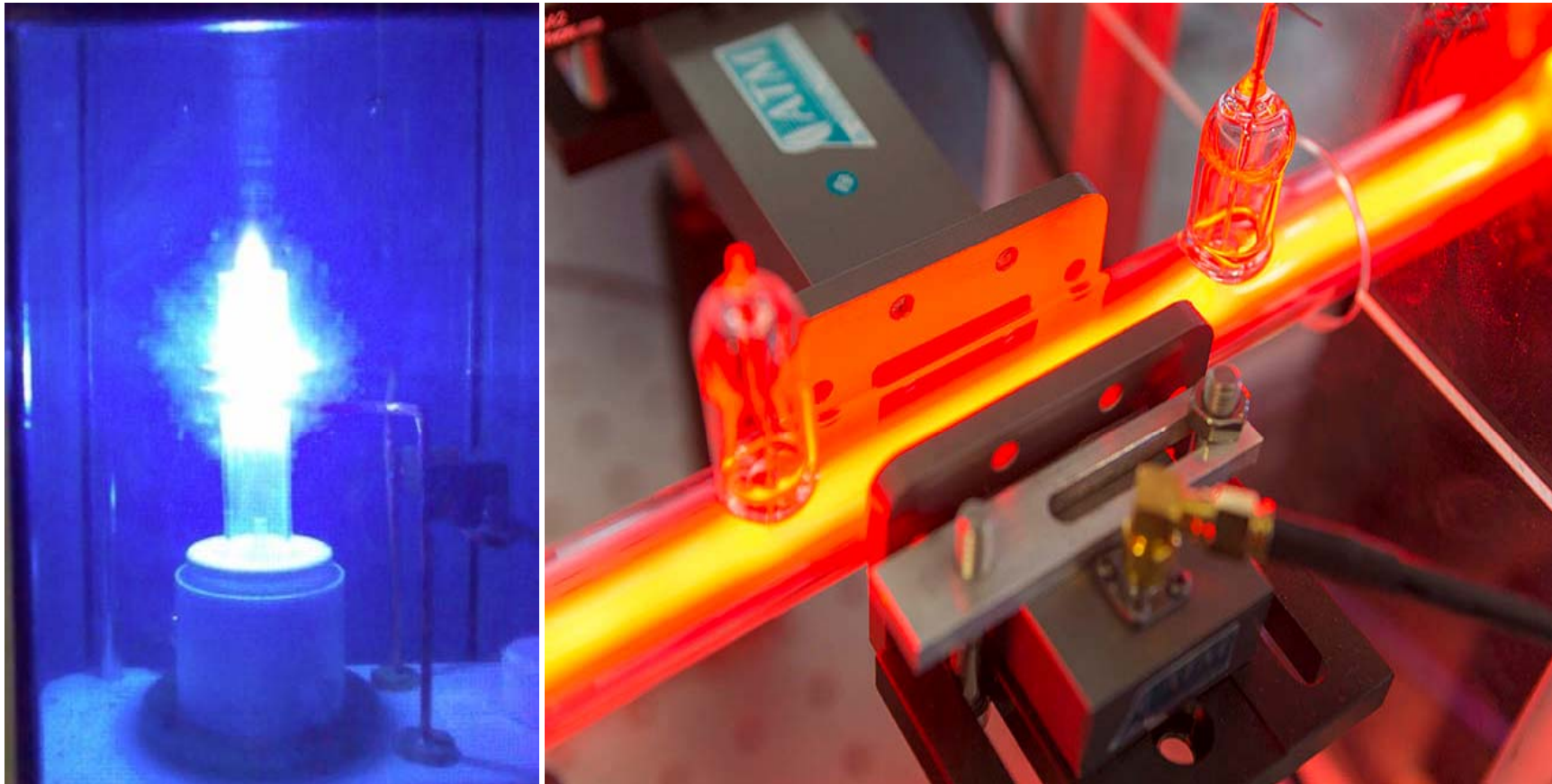
Caracteristici de baza: conductivitate termica si electrica ridicata (comparabila cu aceea a unui metal la temperatura ambianta).

Starea de plasma trebuie sa îndeplinească condițiile:

- particulele constitutive incarcate cu sarcina electrica interacționează prin intermediul câmpului electromagnetic;
- sa fie îndeplinita condiția de cvazineutralitate (concentrația sarcinilor pozitive sa fie egala cu aceea a sarcinilor negative);
- volumul plasmei sa fie suficient de mare astfel incat dimensiunea după o anumita direcție sa fie superioara unei lungimi caracteristice numite *lungime de ecranare Debye* (mărimă ce caracterizează ecranarea câmpului coulombian din jurul unui purtător de sarcina de către gazul particulelor de semn contrar).

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.1. Noțiuni generale



2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei

Obs. Caracteristicile termodinamice ale plasmei trebuie cunoscute pentru a putea înțelege cum pot fi procesate materialele cu ajutorul plasmei

Se definește *gradul de ionizare al plasmei*:
$$\chi = \frac{N_i}{N_i + N_n}$$

in care N_i reprezintă concentrația de ioni si N_n concentrația de particule neutre.

In funcție de gradul de ionizare χ se disting:

- plasma specifica fuziunii termonucleare cu gradul de ionizare apropiat de unitate, temperaturi de câteva milioane de grade (fara aplicații tehnice);

- plasmele naturale sau cele tehnice care sunt slab ionizate $\chi < 10^{-4}$ (descărcări in gaze rarefiate) sau mediu ionizate $10^{-4} < \chi < 10^{-2}$ (arcul electric) caracterizate prin temperaturi de ~ 50000 K.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei

Lungimea de ecranare Debye = distanta medie pe care se poate produce separarea sarcinilor pozitive de cele negative:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 kT}{Nq} \right)^{1/2} \cong 69 \sqrt{\frac{T}{N}}$$

Obs. Pe distante mai mici decât lungimea Debye este posibil ca concentrația sarcinilor pozitive sa fie diferita de aceea a sarcinilor negative. Rezulta ca numai volume care au dimensiunea dupa o anumita direcție mai mare decat λ_D satisfac condiția de cvazineutralitate electrica.

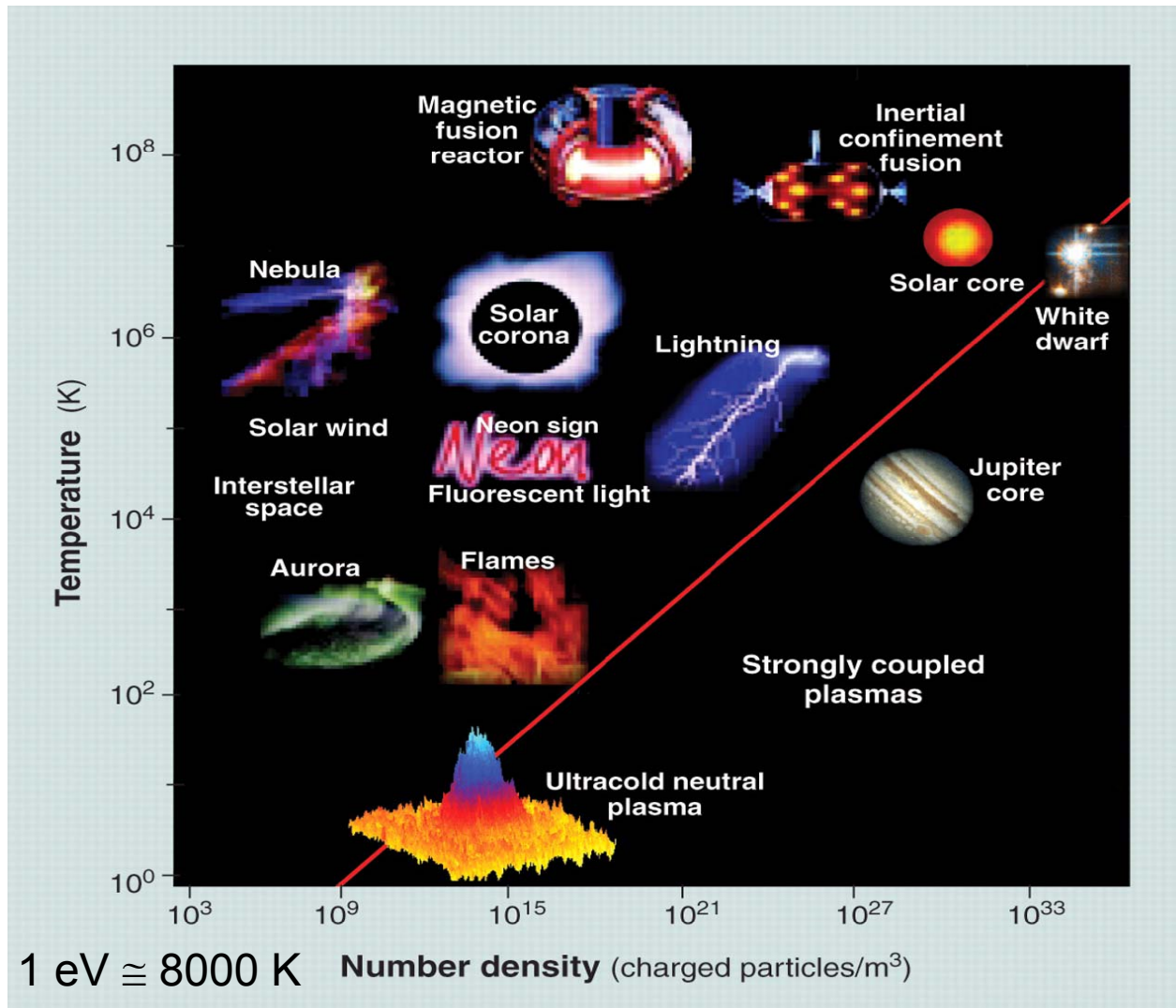
Lungimea Landau λ_L = se definește ca fiind distanta pentru care energia electrostatica a unui electron este egala cu energia sa cinetica. Atunci când distanta dintre electronii si ionii plasmei este mai mare decât lungimea Landau, nu se mai pot produce recombinații (electron – ion). De aici rezulta condiția necesara de existenta a stării de plasma:

$$\lambda_L \ll \lambda_D$$

Obs. Diversele tipuri de plasmă naturale sau tehnice pot fi diferențiate in diagrama dependentei temperaturii (sau energiei) electronilor in funcție de concentrația acestora.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei



2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei

În raport cu valorile temperaturii electronilor (energiei electronilor) T_e , respectiv a temperaturii particulelor grele T_g , se disting două tipuri de plasma:

- **PLASMELE DE ECHILIBRU** (numite și PLASME TERMICE sau de mare presiune – cu presiunea apropiată de cea atmosferică), a căror stare se apropie de echilibrul termodinamic local – temperatura electronilor nu se deosebește sensibil de aceea a particulelor grele (ioni, atomi, molecule). Pentru astfel de plasmă densitatea electronilor este de ordinul $10^{20} - 10^{28} \text{ m}^{-3}$ și temperatura peste 4000K. În această categorie se încadrează plasmăle de arc și cele de inducție (suportul energetic fiind în primul caz arcul electric și în cel de-al doilea caz un câmp electromagnetic de înaltă frecvență);

- **PLASMELE DE NEECHILIBRU**, cunoscute și sub denumirea de plasmă reci (sau de joasă presiune - $p < 100$ torri) sunt caracterizate prin abateri mari de la echilibrul termodinamic local, raportul dintre temperatura electronilor și temperatura particulelor grele fiind de 10...100.

Exemplu: plasmăle de descărcări luminescente au presiuni sub 0,1 atm, $T_e = 20000 - 30000 \text{ K}$ și $T_g = 300 \text{ K}$ și temperatura gazului foarte apropiată de temperatura ambiantă. Densitatea electronilor = $10^{14} - 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei

Principiul care sta la baza utilizării plasmelor reci in tehnica:

Aplicațiile tehnice ale plasmelor reci se bazează pe faptul ca electronii au o energie suficienta pentru a determina ruperea sau constituirea unor legături intermoleculare, pentru a produce modificări structurale in polimeri la temperaturi apropiate de temperatura ambianta etc.

Starea ideala a unei plasme = *starea de echilibru termodinamic complet*

Se atinge in următoarele condiții:

- fiecare componenta a plasmei (electroni, ioni, atomi, molecule) satisface distribuția Maxwell_Boltzman a energiei cinetice (echilibru cinetic)
- temperaturile de excitație ale componentelor plasmei sunt si ele identice (echilibru de excitație);
- temperaturile corespunzătoare tuturor componentelor ce produc radiații sunt identice (echilibru de radiație);
- temperaturile corespunzătoare tuturor reacțiilor chimice care au loc in plasma sunt identice (echilibru chimic);

Obs. Plasmele naturale si ele tehnice nu indeplinesc practic niciodata aceste conditii.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.2. Caracteristicile termodinamice ale plasmei

Principiul care sta la baza utilizării plasmelor reci in tehnica:

Intre T_e si T_g exista o relatie de proportionalitate bazata pe faptul ca electronii existenti in plasmă transmit energia obtinuta prin accelerarea in camp electric a particulelor grele. Rezulta:

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} \cong \left(\frac{q_0 \tilde{l} E}{(3/2)kT} \right)^2$$

in care $q_0 = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $\tilde{l}$ este drumul liber mijlociu al electronilor, E intensitatea campului electric si k este constanta lui Boltzmann. Tinand cont ca drumul liber mijlociu al electronilor variaza invers proportional cu p , rezulta:

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} \cong \left(\frac{E}{p} \right)^2$$

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

Conversia unui gaz in plasma presupune existenta unui suport energetic pentru disocierea, respectiv ionizarea moleculelor:

- *generator de plasma cu arc* – obținerea plasmelor de arc;
- *câmp electromagnetic de înalta frecventa* –obținerea plasmei de inducție.

Gazul	H ₂	N ₂	O ₂	CO	NO
Energia de ionizare [eV]	15,6	15,5	12,5	14,1	9,5
Energia de disociere [eV]	4,4	9,7	5,1	9,6	5,3

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

Avantajele încălzirii cu ajutorul plasmelor termice:

- densitati mari de putere de $\sim 10^5 \text{ kW/m}^3$, respectiv puteri specifice de $\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$;
- energia poate fi concentrata in volume foarte reduse; aria de impact minima a unui jet de plasma este $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2$;
- inerția termica este foarte redusa;

Aceste caracteristici permit dezvoltarea unor aplicații speciale:

- aplicații care necesita temperaturi foarte mari – topirea materialelor refractare;
- producerea unor reacții puternic endoterme;
- producerea unor reacții in care au loc excitări ale moleculelor si atomilor, ceea ce permite obținerea de noi materiale;
- producerea unor reacții care necesita o mare energie specifica (piroliza, volatilizarea);
- producerea unor procese de transformare de faza.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Plasma de arc electric este obținuta trecând un gaz sub presiune (argon, azot, heliu etc.) peste un arc electric (o descărcare electrica intr-un gaz între doi electrozi între care se aplica o tensiune continua sau alternativa).

Obs. Arcul electric utilizat este unul stabilizat în sensul că spațiul de dezvoltare a acestuia este unul limitat.

Căderea de tensiune între extremitățile arcului U_A exprimata în funcție de intensitatea curentului este:

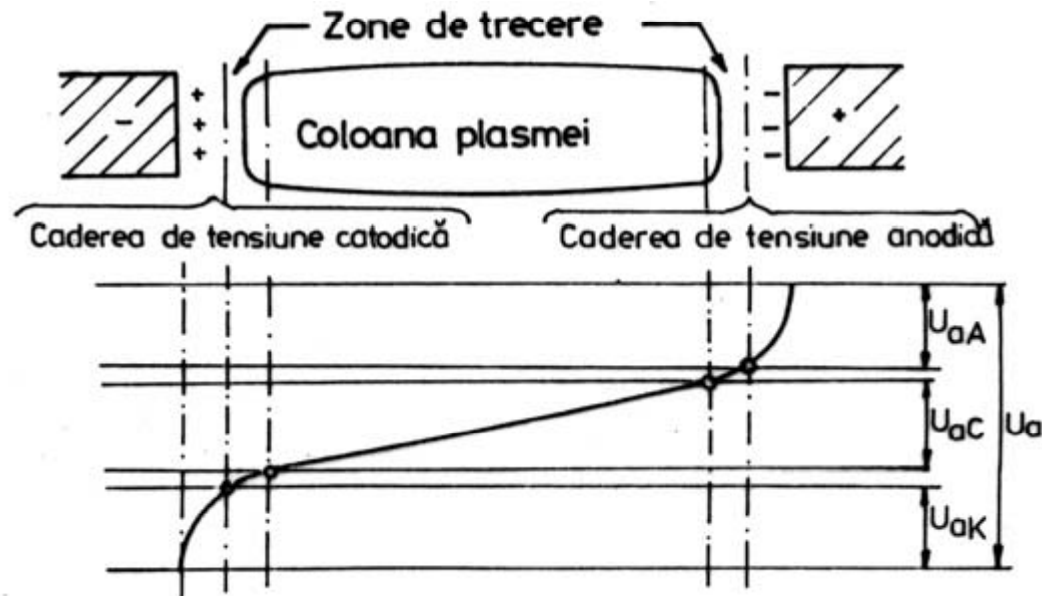
$$U_a = A + B \cdot l + (C + D \cdot l) / I^n$$

în care A , B , C , D , n sunt constante dependente de mediul gazos, de presiune și de natura electrozilor iar l este lungimea arcului electric.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric



Căderea de tensiune între electrozi conține trei zone: *zona catodica*, *coloana arcului* și *zona anodica*. Toate aceste trei componente depind de intensitatea curentului și de mediu. Tensiunea catodica și cea anodica depinde de natura materialului din care sunt confecționați electrozii.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Catodul:

- **de tip rece (Cu răcit cu apa)**: se caracterizează printr-o emisie termoelectronica redusa, dar se atinge totuși o densitate de curent (la interfața catod-arc) de 10^4 A/mm^2 ;
- **catod refractar (realizat din wolfram sau zirconiu, grafit etc.)**: este cel mai utilizat tip de catod; la temperaturi inferioare temperaturii de topire a wolframului se atinge o densitate de curent de $\sim 10 \text{ A/mm}^2$;

Obs.

- Catodul refractar din W nu poate fi utilizat in atmosfere oxidante (aer sau oxigen).
- Pentru scăderea lucrului mecanic de extracție a electronilor se adăuga elemente precum bariul sau toriul.
- Catodul refractar din zirconiu se acoperă cu o pelicula fina de oxid de zirconiu;
- Catozii din grafit produc “poluarea” plasmei.

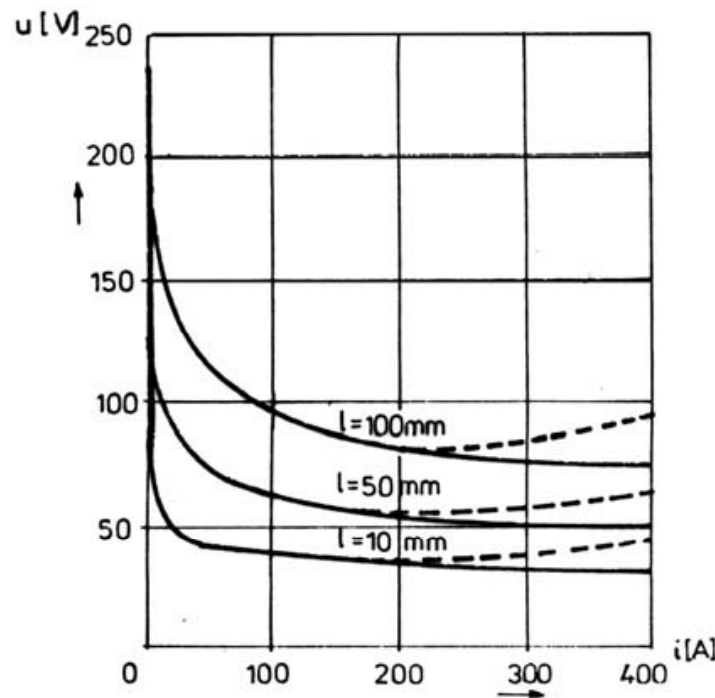
Anodul: ca urmare a bombardamentului electronic anodul suporta un flux termic intens si de aceea trebuie răcit. Pentru a crește durata de funcționare, din timp in timp se modifica zona de acroșaj a arcului.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

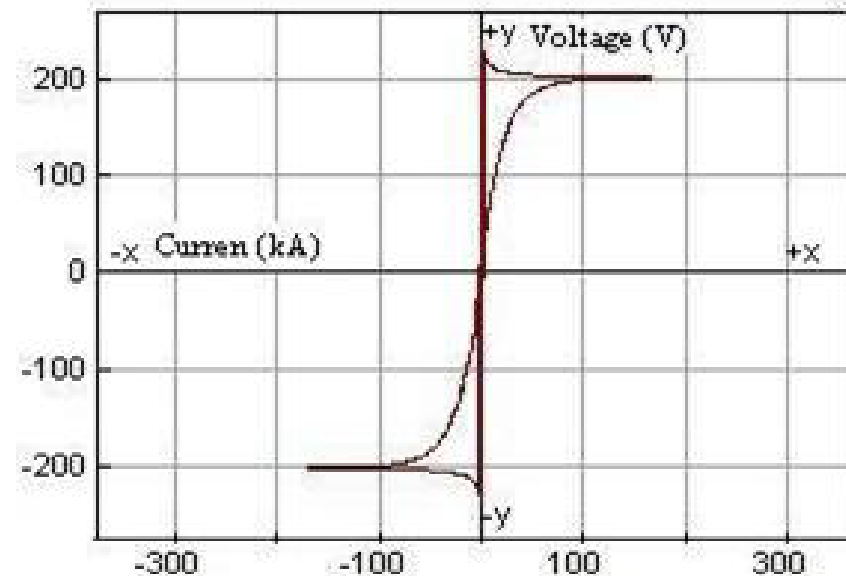
2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Caracteristica statica a arcului electric in DC



Caracteristica dinamica a arcului electric in AC



Obs. Se observa ca arcul se stinge la fiecare trecere prin zero a curentului. Inerția termica a electrozilor permite însă reaprinderea arcului după fiecare stingere.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Caracteristicile plasmei de arc:

Densitatea sarcinilor electrice (electroni, ioni) in plasma depinde de **temperatura** acesteia θ , *parametru care rezulta din echilibru dintre energia disipata prin efect Joule si pierderile de energie prin conducție, convecție si radiație termica.*

Condiția de stabilitate a arcului:

Pentru un arc electric de lungime data; daca intensitatea curentului creste ($I \uparrow$), temperatura θ creste si $E = - \text{grad } V$ scade. Creșterea curentului conduce la creșterea razei coloanei de plasma.

Exemplu: un arc in argon are $U_a = 30 \text{ V}$ pentru $I = 6 \text{ A}$ si $U_a = 7,5 \text{ V}$ pentru $I = 150 \text{ A}$.

Rezultatele experimentale au confirmat ca arcul funcționează la un gradient de potențial minim. Aceasta înseamnă ca într-un **arc stabil** sunt îndeplinite condițiile:

$$\frac{dE}{d\theta} = 0 \text{ sau } \frac{dE}{dr} = 0$$

Pentru un curent si condiții la limita date, coloana **arcului staționar** are o raza sau o temperatura care corespund unei valori minime a gradientului de tensiune.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasme termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Caracteristicile plasmei de arc – influenta naturii gazului

Natura gazului influențează sensibil valoarea tensiunii arcului:

- prin gradul de ionizare: temperatura este mai redusa in cazul gazelor diatonice decât in cazul acelor monoatomice (pentru aceeași energie furnizata);
- prin pierderile coloanei arcului datorate conducției termice: proprietățile termice ale gazului influențează mult mai mult tensiunea arcului decât potențialul de ionizare.

Obs.

- răcirea forțată a anodului este favorabila creșterii densității de energie disipata in arc, respectiv obținerii unor temperaturi mai ridicate;
- arcul electric poate fi privit precum un conductor ușor deformabil, astfel incat forțele magnetice pot acționa in doua moduri diferite: modifica poziția axei arcului in cazul in care câmpul magnetic este transversal sau stabilizează poziția arcului daca orientarea câmpului magnetic coincide cu axa câmpului.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

Configurația de baza: arcul electric se stabilește între un catod central și un anod tubular concentric. Curgerea gazului produce alungirea arcului electric ceea ce asigură un regim termic al anodului sub punctul de topire.

Curgerea gazului + răcirea anodului = confinarea gazului (deosebirea fundamentală față de arcul electric liber).

Presiunea gazului concentrează arcul electric într-un jet de diametru redus. Viteza gazului poate ajunge la ~ sute de m/s. Această “comprimare” a arcului se datorează, de asemenea, pereților răciți ai anodului dar și forței Lorentz datorată câmpului magnetic creat de curentul din arc.

Asigurarea unei funcționări stabile a unui plasmatron cu arc se bazează pe următoarele soluții:

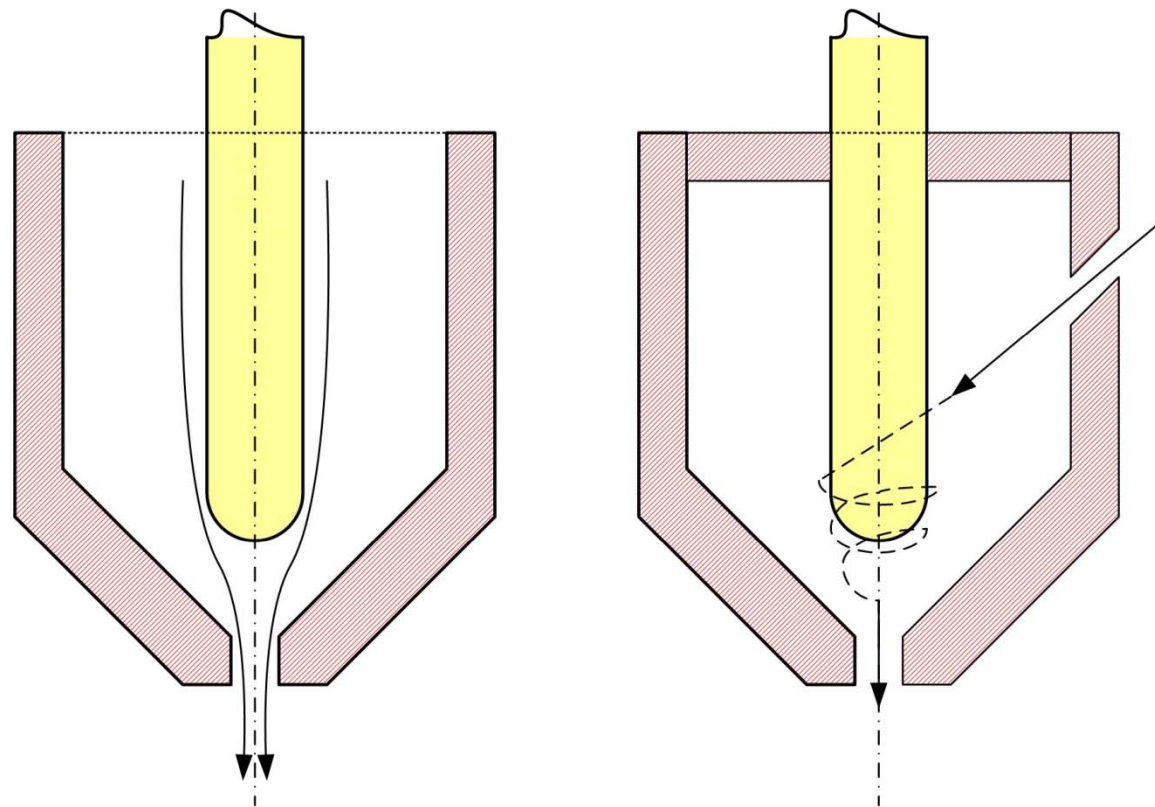
- injectarea gazului paralel cu pereții;
- injectarea centrifugă a gazului;
- antrenarea piciorului arcului într-o mișcare de rotație cu ajutorul unui câmp magnetic extern.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc



2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

a) *Plasmatron cu arc netransferat* este plasmatronul in construcția clasică și este folosit la operații de decupare a diverselor piese.

b) *Plasmatronul cu arc transferat* este destinat prelucrării metalelor; in acest caz piesa procesată joacă rolul de ANOD (tubul metalic din jurul catodului are rolul de confinare a arcului electric).

c) *Plasmatronul cu doi (sau trei) anodi*: este folosit pentru obținerea unor plasmе cu un grad de ionizare foarte ridicat.

d) *Plasmatroanele trifazate* sau cele cu ***jeturi de plasma suprapuse*** asigură densități de putere superioare.

e) *Plasmatroanele cu arc superstabilizat* asigură o stabilitate superioară a arcului electric. In cazul plasmelor netransferate există fluctuații ale tensiunii datorate unei variații ciclice a lungimii arcului, care la rândul său este determinată de curgerea gazului. Pentru stabilizare, in canalul plasmatronului se inserează un prim segment izolat electric față de anod (aflat deci la un potențial flotant)

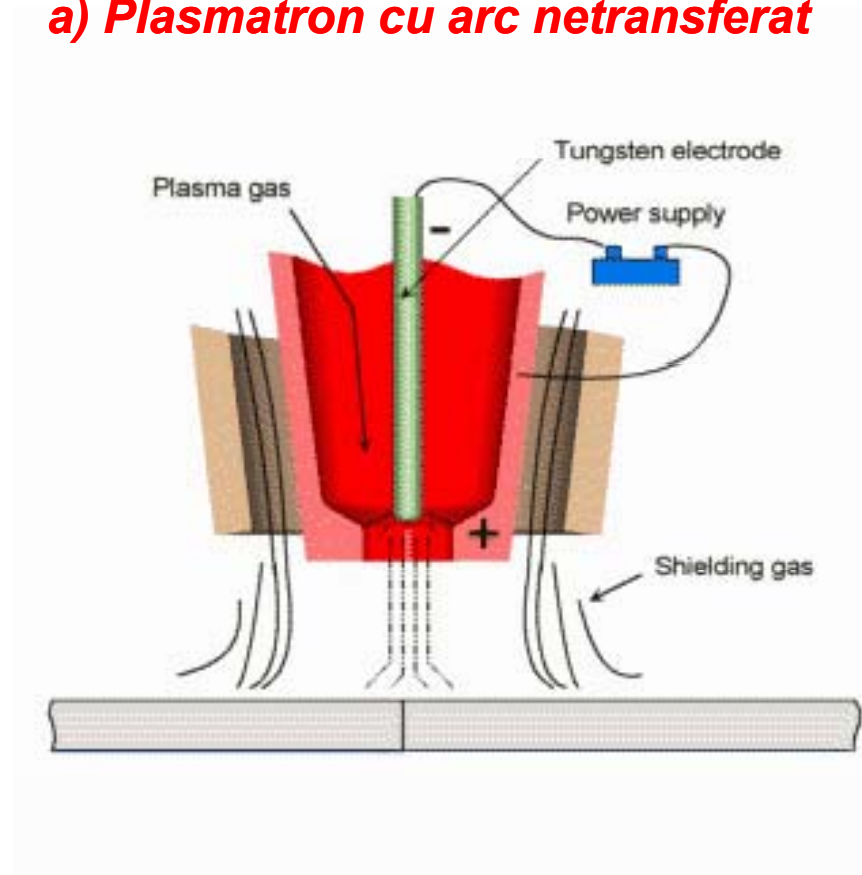
2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

a) Plasmatron cu arc netransferat



Procesarea electromagnetica a materialelor
Conf.dr.ing. L.M. Dumitran

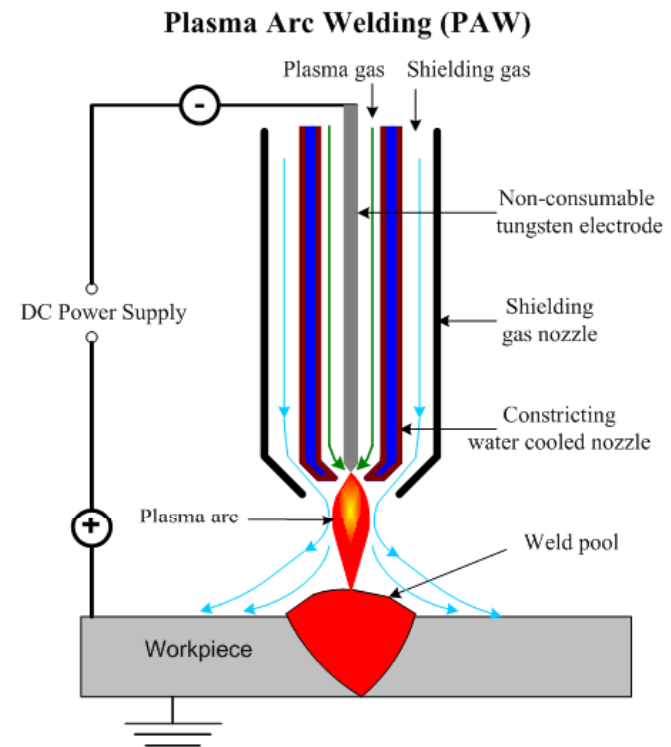
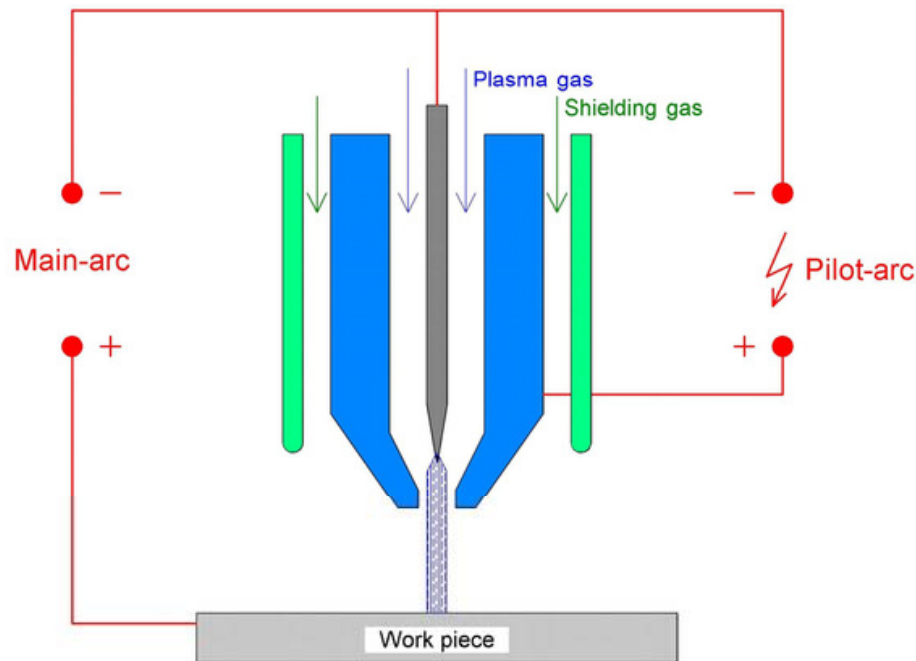
2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

b) Plasmatronul cu arc transferat



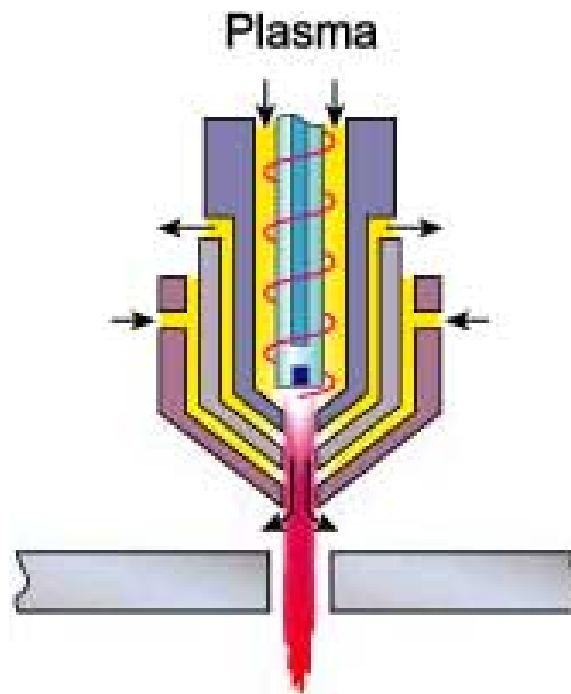
2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

c) Plasmatronul cu doi (sau trei) anodi



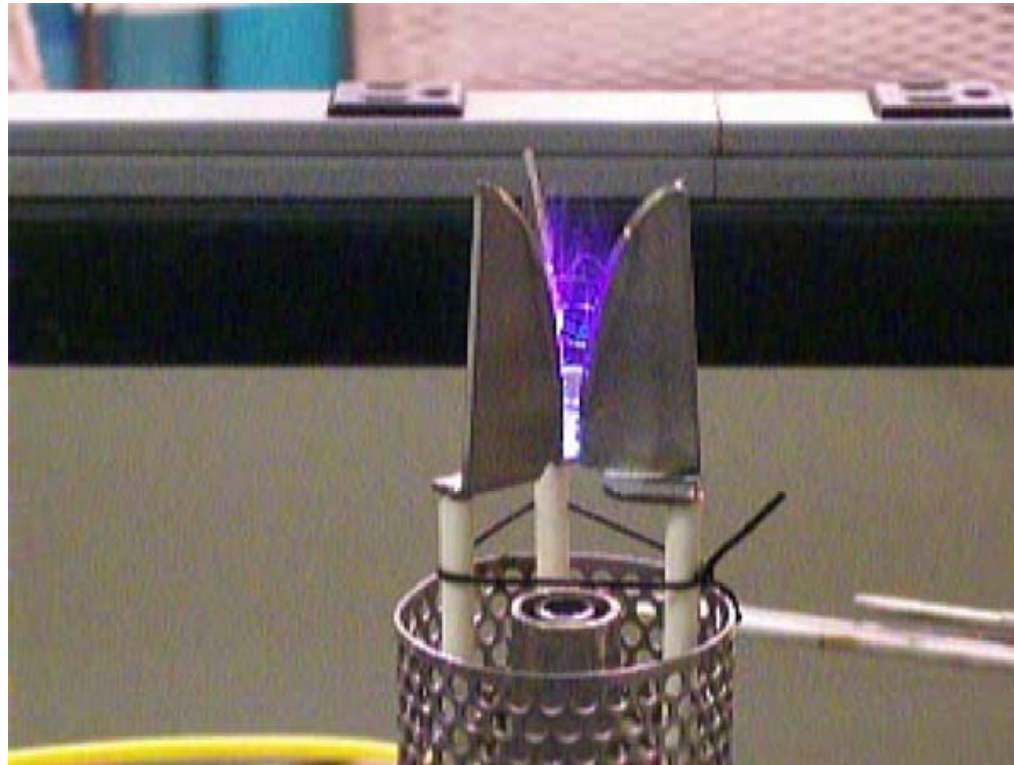
2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Generatoare de plasma – plasmatroane cu arc

d) Plasmatroanele trifazate



2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasme termice

2.3.1. Plasma de arc electric

Calculul razei arcului electric. Modelul Elenbaas – Heller.

Ecuatia corespunzatoare bilanțului energetic al arcului electric este:

$$\sigma E^2 - P_r + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{d\theta}{dr} \right) = 0$$

in care primul termen reprezintă densitatea de putere produsa prin efect Joule, cel de-al doilea reprezintă pierderile prin radiație termica, iar ultimul fluxul termic prin conducție (transferul axial, autoabsorbția radiației si convecția radiala sunt neglijate).

Condițiile la limita corespunzătoare ecuației de mai sus:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dr} &= 0 \text{ la } r = 0; \\ \theta(a) &= \theta_0 \end{aligned}$$

Daca se admite un profil laminar al temperaturii, de forma: $\theta(r) = \theta(0) \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right]$

raza a se obține prin integrarea ecuației de sus pentru E si $\theta(0)$ date.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.2. Generarea plasmei termice prin inducție electromagnetică

Generarea plasmei prin inducție electromagnetică se bazează pe încălzirea gazelor cu ajutorul unor inductoare in incinte speciale.

Obs. Rezistivitate electrică a plasmei depinde de temperatura dar și de natura gazului plasmogen. Se constată că în funcție de valoarea rezistivității există anumite valori ale frecvenței câmpului electromagnetic care asigură o absorbție de putere optimă ($f = \text{zeci de kHz} - \text{MHz}$).

Generatoare de plasma cu inducție:

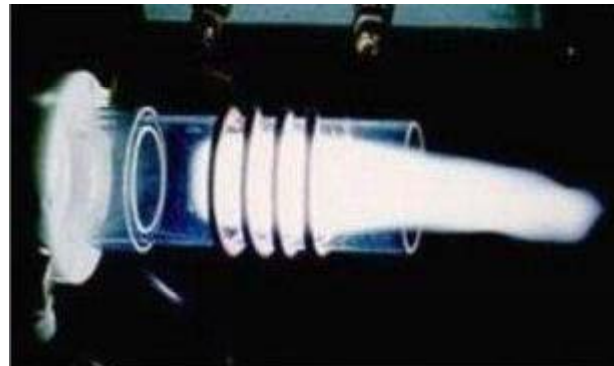
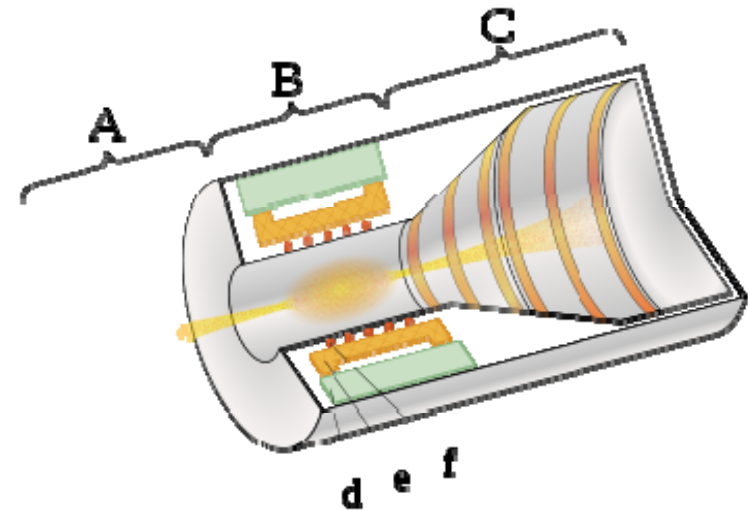
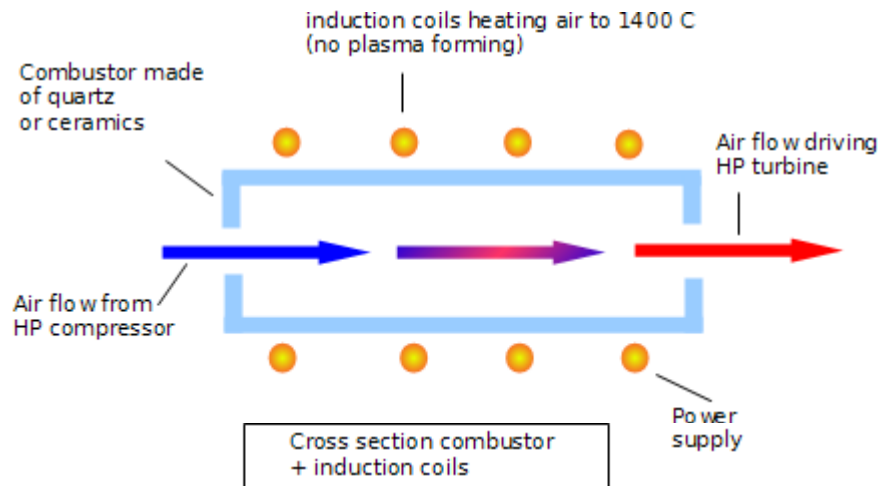
- modelul cu pereți de cuarț răciți cu apă, cu inductor integrat în pereți cu puteri termice până la 250 kW și diametrul jetului de plasma de 40 - 150 mm;
- Modelul cu incintă metalică de Cu de tip creuzet rece cu $P = 1 \text{ MW}$ și diametrul jetului de plasma 30 – 150 mm;

Obs. Deoarece în astfel de generatoare electrozii lipsesc, plasmеle obținute sunt sensibil mai pure.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasmе termice

2.3.2. Generarea plasmei termice prin inducție electromagnetică



Procesarea electromagnetica a materialelor
Conf.dr.ing. L.M. Dumitran

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.3. Procesarea materialelor in plasme termice

2.3.3. Aplicații ale plasmei termice

- Tăierea materialelor;
- Sudura metalelor;
- Elaborarea oțelurilor si aliajelor speciale;
- Producerea feroaliajelor prin reducerea termica a minereurilor;
- Tratamentul termic al pulberilor si zgurilor;
- Acoperiri prin vaporizare cu oxizi si metale;
- Topirea materialelor refractare nemetalice.

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.4. Procesarea materialelor in plasmе reci

1. Plasme reci la presiune atmosferica = PLASMA DE DESCARCARE CORONA;
2. Plasme reci la joasa presiune = PLASMA DE DESCARCARE LUMINISCENTA in gaze rarefiate.

Descarcare corona = ansamblul fenomenelor electrice care au loc in gaze (cu exceptia străpungerii) datorate câmpurilor electrice puternic divergente si suficient de intense pentru a determina ionizarea gazului.

2.4.1. Plasme generate prin descărcări corona

Sunt plasmе de neechilibru – mediu gazos conserva o temperatura apropiata de cea ambienta.

Plasmele corona sunt adaptate aplicațiilor din chimie (unde creșterea temperaturii trebuie evitata): sinteza ozonului si tratamentul superficial al polimerilor.

Sisteme de electrozi: ac – plan, fir – plan, lama – plan etc.

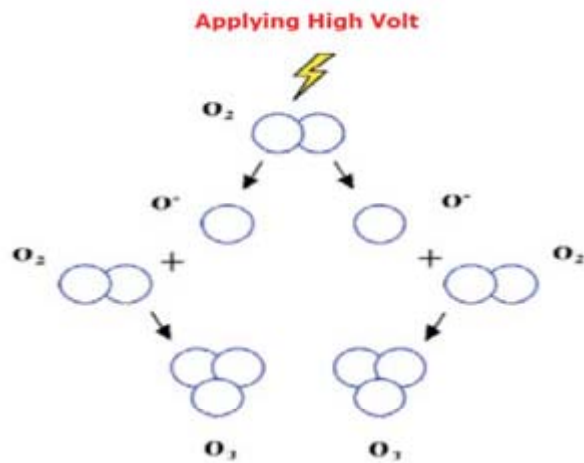
Aplicații practice: tratarea superficiala a foliilor izolante in vederea modificării proprietatilor (de aderenta, electrice, mecanice etc.), generatoare de ozon, aplicații electrostatice...

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.4. Procesarea materialelor in plasmе reci

Plasme generate prin descărcări corona - aplicatii

Generator de ozon



Tratamente superficiale ale polimerilor

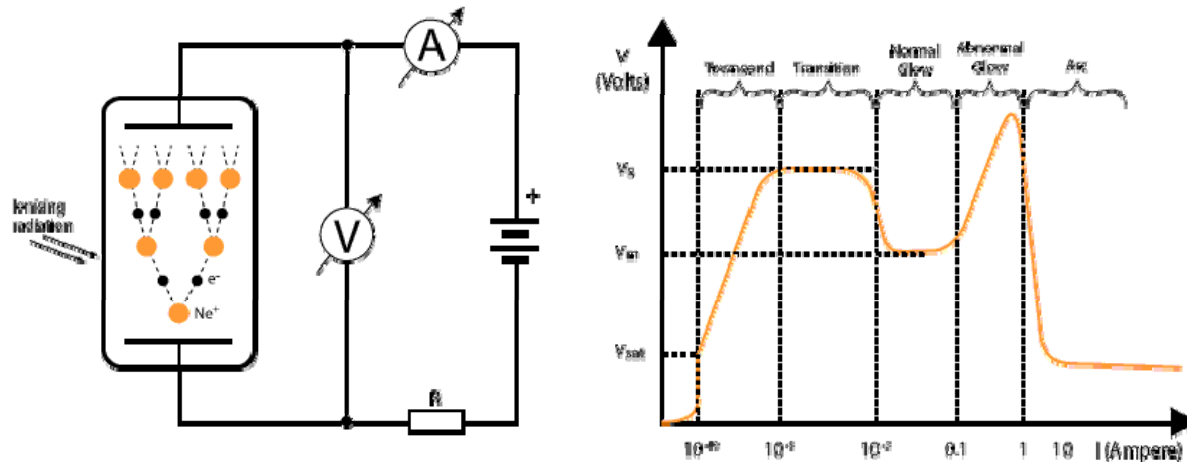


2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.4. Procesarea materialelor in plasme reci

2.4.2. Plasme generate prin descărcări luminiscente

Aceste plasme au la baza fenomenele care se produc in spațiul dintre electrozi (in cc) in gaze aflate la presiuni scăzute ($p < 20$ mbari) si sunt caracterizate de densitati ale curentului de $10^{-6} - 10^{-2}$ A/cm² si tensiuni de câteva sute de volți.



Plasma rece in gaze rarefiate poate fi obținuta si cu ajutorul câmpurilor electromagnetice de radio-frecventa (10 – 40 MHz) sau de microunde (2450 MHz).

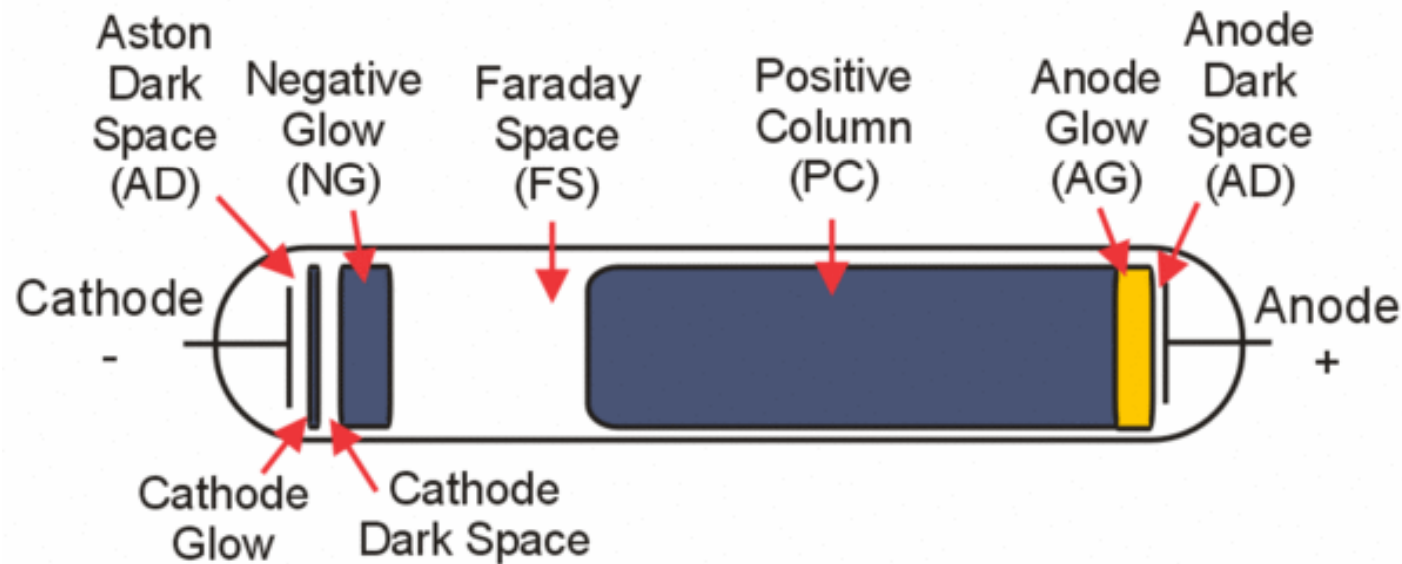
Aplicatii: depunerea vaporilor metalici pe suprafețe (vaporii metalici sunt produși prin bombardarea catodului cu ionii de argon ai unei descărcări luminiscente; vaporii metalici sunt condensați pe suprafața cere trebuie metalizata).

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.4. Procesarea materialelor in plasmе reci

2.4.2. Plasme generate prin descărcări luminiscente

Plasme generate prin descărcări luminiscente in curent continuu



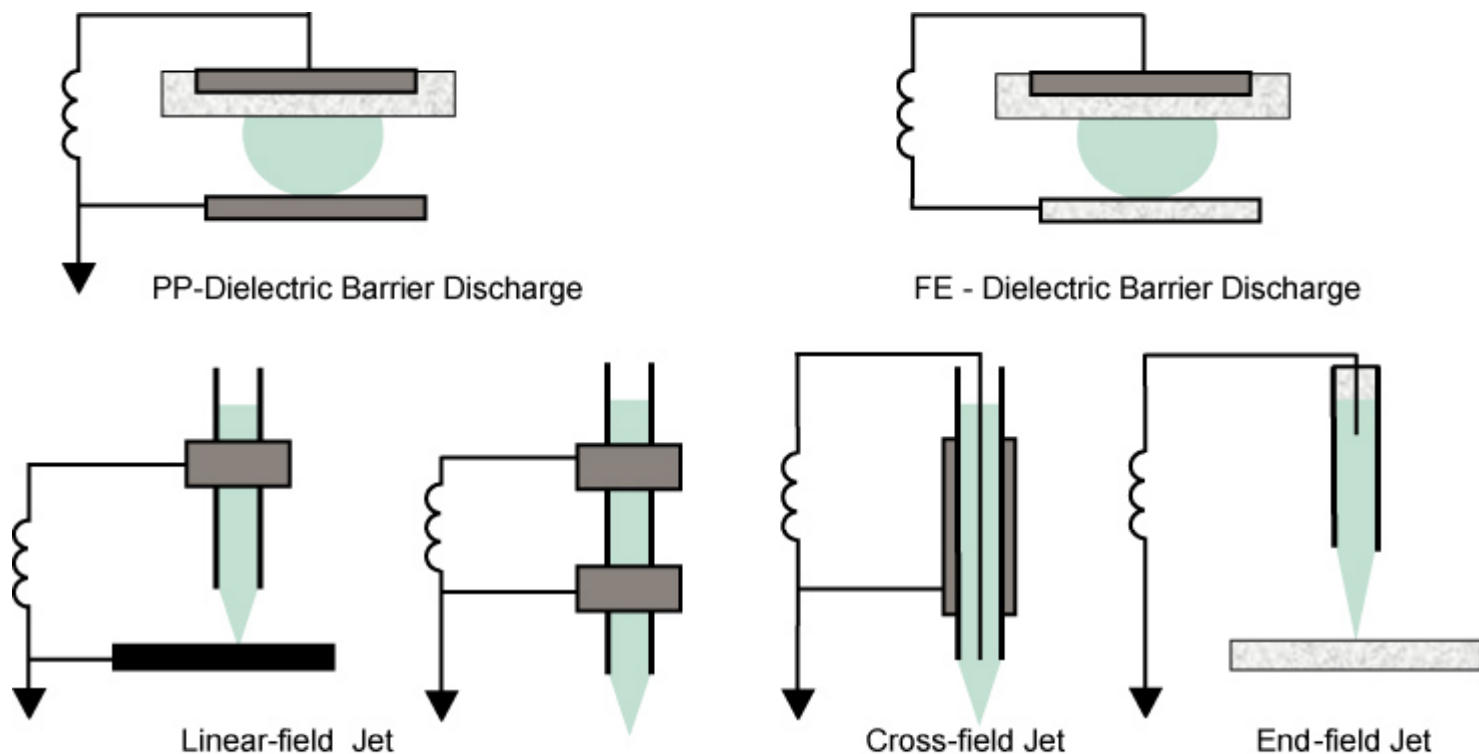
- Regiunea catodica (cea mai mare cădere de tensiune);
- Zona de licărire negativa;
- Zona întunecata Faraday;
- Coloana pozitiva (neutralitate electrica si grad redus de ionizare)

2. Procesarea materialelor cu ajutorul plasmei

2.4. Procesarea materialelor in plasmе reci

2.4.2. Plasme generate prin descărcări luminescente

Plasme generate prin descărcări luminescente in campuri de radio-frecventa



3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

Principiul de baza:

Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa are la baza conversia unei părți din energia câmpului electric in căldura, fenomen ce are loc datorita pierderilor dielectrice care se produc in dielectric:

- pierderi dielectrice prin conducție electrica (se produc in câmpuri electrice variabile si invariabile in timp);
- pierderi dielectrice prin polarizare (histerezis dielectric) – se produc numai in câmpuri electrice variabile in timp.

Mecanisme de polarizare:

- polarizarea de deformare electronica (in toate corpurile pana la frecvente din spectrul optic);
- polarizare de deformare ionica (in corpurile cu structura ionica pana la frecvente din spectrul infraroșu);
- polarizarea de orientare (numai in corpurile polare);
- polarizarea de neomogenitate (interfaciala);

Obs. Încălzirea dielectrica este un procedeu strâns legat de proprietățile electrice ale materialului procesat.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Def. Polarizația reprezintă suma momentelor electrice elementare din unitatea de volum a unui corp.

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i (\vec{p}_i)_{\Delta V}}{\Delta V}$$

Polarizația electrică poate fi **temporară** sau **permanentă**. Polarizația temporară se anulează odată cu încetarea acțiunii câmpului electric, în timp ce polarizația permanentă este independentă de câmp. Prin urmare, polarizația totală a unui corp se exprimă prin relația:

$$\vec{P} = \vec{P}_p + \vec{P}_t$$

Legea polarizației temporare constituie relația de legătură dintre și intensitatea câmpului electric aplicat dielectricului:

$$\vec{P}_t = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$$

în care χ_e reprezintă **susceptivitatea electrică** a materialului (mărime scalară și adimensională în cazul corpurilor izotrope și tensorială, de ordinul II pentru cele anizotrope).

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_t + \vec{P}_p = \varepsilon \vec{E} + \vec{P}_p$$

în care $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ este permitivitatea absolută a materialului și $\varepsilon_r = \chi_e + 1$ este permitivitatea relativă.

Materialele electroizolante se împart în două clase: polare și nepolare după cum particulele lor constituente (moleculele) sunt polare, adică au moment electric permanent nenul, respectiv nepolare.

Câmpul electric care se exercită la nivel microscopic asupra unui atom, ion sau molecule se numește **câmp interior** (sau *activ*) și diferă de câmpul macroscopic aplicat din exterior. Expresia cu ajutorul căreia se poate calcula este:

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \frac{\gamma}{\varepsilon_0} \vec{P}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizatie

A) Polarizarea de deformare electronică:

Acest mecanism de polarizare este prezent în toate sistemele de izolație și constă în inducerea unor momente electrice atomice ca urmare a deformării orbitalilor electronici ai atomilor corpurilor sub acțiunea câmpului electric. Corpurile care prezintă numai polarizație electronică sunt cele constituite dintr-un singur tip de atomi cum sunt cristalele atomice, gazele și lichidele monoatomice.

Momentele atomice induse de câmpul electric în aceste corpuri se pot exprima cu ajutorul expresiei:

$$\vec{p}_e = \alpha_e \vec{E}_0$$

in α_e se numește polarizabilitate electronică și are expresia:

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 R^3$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizatie

A) Polarizarea de deformare electronică:

Conform relației de definiție a polarizației electrice, expresia polarizației electronice este:

$$\vec{P}_e = N_e \vec{p}_e = \alpha_e N_e \vec{E}_0$$

Permitivitatea relativă ϵ_{re} corespunzătoare polarizării de deformare electronică are următoare expresie:

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\alpha_e N_e}{\epsilon_0 - \gamma \alpha_e N_e}$$

Obs.

Polarizația electronică (polarizabilitatea α_e) nu este influențată de temperatură pentru valori uzuale ale acesteia (polarizarea electronică se referă la deformarea învelișurilor electronice ale atomilor, adică la deplasarea electronilor legați, care sunt stabili și a căror stare este puțin influențată de temperatură). Prin urmare și ϵ_{re} , respectiv $\chi_{e,e}$ sunt practic independente de temperatură.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizare

B) Polarizarea de deformare ionică:

Polarizarea ionică se produce în *corpurile care au o structură ionică* și constă în deplasarea relativă a ionilor pozitivi și negativi sub acțiunea câmpului electric. În izolațiile în care se produce o polarizare ionică este, de asemenea, prezentă și polarizarea de deformare electronică datorită deformării învelișurilor electronice ale ionilor.

Polarizabilitatea ionică α_i are următoarea expresie: $\alpha_i = 8\pi\epsilon_0 a^3$

$$\vec{P}_i = N_i \vec{p}_i = \alpha_i N_i \vec{E}_0$$

Permitivitatea relativă corespunzătoare fenomenului de polarizare ionică ϵ_{ri} are următoarea expresie:

$$\epsilon_{ri} = 1 + \frac{\alpha_i N_i}{\epsilon_0 - \gamma \alpha_i N_i}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizatie

B) Polarizarea de deformare ionică:

Obs.

Polarizația ionică nu variază semnificativ cu temperatura.

Polarizabilitatea ionică α_i poate prezenta *creșteri ne semnificative* cu temperatura ca urmare a faptului că mișcarea de agitație termică intensă favorizează deplasările ionilor sub acțiunea câmpului electric.

Rezultă că și ε_{ri} , respectiv $\chi_{e,i}$ cresc foarte ușor cu temperatura. Polarizația ionică este predominantă în raport cu polarizația electronică (care, așa cum s-a spus, este prezentă în toate corpurile). Prin urmare rezultă că $\varepsilon_{ri} > \varepsilon_{re}$.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizație

C) Polarizarea de orientare:

Polarizarea de orientare are loc numai în cazul corpurilor care conțin **molecule polare** (molecule asimetrice – care posedă moment electric spontan) și constă în rotirea acestora sub acțiunea forțelor electrice exercitate de câmp. În cazul anumitor corpuri, câmpul electric determină numai o orientare a radicalilor polari ai moleculelor; se spune că are loc o **polarizare structurală** a corpului respectiv. Polarizația de orientare are expresia:

$$\vec{P}_o = N_o \vec{p}_p = \alpha_o N_o \vec{E}_o$$

în care N_o reprezintă concentrația dipolilor electrici permanenți și α_o **polarizabilitatea de orientare**.

Obs. Polarizația de orientare crește odată cu intensificarea câmpului electric și tinde asimptotic către o valoare maximă, care se obține atunci când toate momentele electrice elementare sunt orientate în sensul câmpului electric aplicat.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizație

C) Polarizarea de orientare:

Atât în cazul lichidelor cât și al corpurilor solide polare, polarizarea de orientare este puternic influențată de temperatură. Polarizabilitatea de orientare α_o are următoarele expresii:

- lichide polare:
$$\alpha_o = \frac{p_p^2}{3kT}$$

- solide polare:
$$\alpha_o = \frac{p_p^2 \cos \beta}{3kT}$$

în care β reprezintă unghiul dintre direcția câmpului electric activ și direcția preferențială de orientare a momentelor electrice elementare , în absența câmpului electric.

Expresia permitivității relative corespunzătoare polarizației de orientare:

$$\epsilon_{ro} = 1 + \frac{\alpha_o N_o}{\epsilon_0 - \gamma \alpha_o N_o}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizație

C) Polarizarea de orientare:

Obs.

- La temperaturi uzuale polarizabilitatea de orientare (și polarizația de orientare și ϵ_{ro}) scad hiperbolic cu temperatura;
- La unele lichide aflate la temperaturi mai scăzute, se constată că, într-o primă etapă, permitivitatea ϵ_{ro} crește cu temperatura (la $T < T_{critic}$). Acest lucru se datorează faptului că la temperaturi scăzute lichidele în cauză prezintă viscozități mari și orientarea moleculelor în câmp este mai dificilă. Creșterea temperaturii determină o slăbire a legăturilor chimice dintre molecule, acestea rotindu-se mai ușor după direcția câmpului electric. Pentru $T > T_{critic}$ creșterea agitației termice conduce la scăderea lui ϵ_{ro} .

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizație

C) Polarizarea de orientare:

Obs.

În cazul solidelor polare, se constată că la temperaturi joase, moleculele polare sunt practic imobile, ele neputând fi orientate de câmpul electric. Creșterea temperaturii determină (ca și în cazul gazelor și lichidelor polare), o slăbire a legăturilor dintre molecule.

Dacă temperatura depășește valoarea corespunzătoare temperaturii de tranziție de fază de ordinul al II-lea, moleculele polare încep să se orienteze în câmp și permitivitatea ϵ_{ro} crește. Și în acest caz, dacă $T > T_{critic}$ agitația termică se intensifică și conduce la scăderea lui ϵ_{ro} .

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Clase de polarizație

D) Polarizarea de neomogenitate:

Polarizația de neomogenitate sau *interfacială* P_n este prezentă în corpurile neomogene (izolațiile stratificate) ale căror suprafețe de trecere de la o regiune la alta (de la un material la altul) se încarcă cu sarcină electrică atunci când corpul respectiv este supus acțiunii unui câmp electric.

Datorită sarcinii electrice separate pe aceste suprafețe **câmpul electric în interiorul corpului se intensifică și mecanismele de polarizare prezentate mai sus sunt favorizate**. Prin urmare, polarizația de neomogenitate este o polarizație suplimentară care se manifestă în corpurile neomogene prin creșterea, după caz, a polarizației de deformare electronică și ionică sau a polarizației de orientare.

$$P_n = P_q - P_0$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp

Câmpuri electrice armonice: $E(t) = E_m \sin \omega t$

⇒ inducția electrică D și polarizația P sunt mărimi armonice defazate în urma intensității câmpului electric:

$$D(t) = D_m \sin(\omega t - \varphi_1) \quad P(t) = P_m \sin(\omega t - \varphi_2)$$

în care φ_1 și φ_2 sunt unghiurile de defazaj.

Reprezentând în complex simplificat mărimile armonice E , D și P și ținând cont de legea polarizației temporare rezultă că susceptivitatea electrică χ_e , permitivitatea ε și permitivitatea relativă ε_r sunt *mărimi complexe*:

$$\underline{\chi}_e = \frac{\underline{P}}{\varepsilon_0 \underline{E}} \quad \underline{\varepsilon}_r = 1 + \underline{\chi}_e = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad \underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp

$$\underline{\varepsilon}_r = 1 + \underline{\chi}_e = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad \underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

Obs.

- **partea reală a permitivității relative** ε_r' are aceeași semnificație fizică ca mărimea ε_r în câmpuri electrice invariabile în timp, fiind permitivitatea relativă care intră în calculul capacității condensatoarelor;

- **partea imaginară** ε_r'' caracterizează pierderile dielectrice prin polarizare care se produc în izolații.

În materialele dielectrice supuse acțiunii câmpurilor electrice variabile, se constată existența unor fenomene specifice astfel încât ε_r' și ε_r'' depind de frecvența câmpului electric aplicat:

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp

Obs.

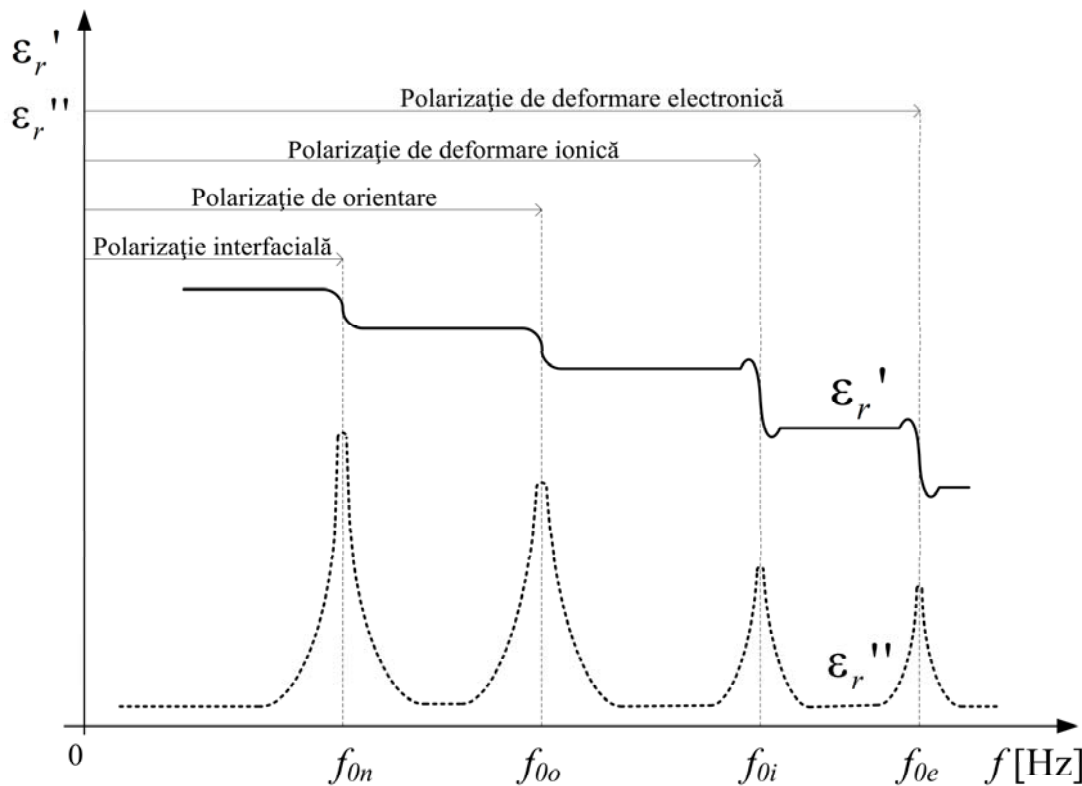
În materialele dielectrice supuse acțiunii câmpurilor electrice variabile, se constată existența unor fenomene specifice astfel încât ϵ_r' și ϵ_r'' depind de frecvența câmpului electric aplicat:

- în câmpuri electrice cu frecvențe de $10^{13} - 10^{15}$ Hz se produc fenomene de rezonanță datorită deplasării sarcinilor electrice (electroni și ioni) sub acțiunea câmpului electric $\Rightarrow$ variații bruște ale permitivității și chiar anularea sau schimbarea semnului acesteia;
- în câmpuri electrice cu frecvențe de $10^7 - 10^{10}$ Hz apar fenomene de relaxare datorate oscilațiilor dipolilor electrice, care determină scăderea permitivității relative ϵ_r' ;
- în cazul câmpuri electrice cu *frecvențe industriale* au loc anumite fenomene care influențează valorile permitivității printre care cel mai important este cel de relaxare a sarcinii spațiale.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp



Daca $f \neq f_{0n}, f_{0o}, f_{0i}, \text{ și } f_{0e}$,
 $\Rightarrow \epsilon_r'$ și ϵ_r'' nu prezintă variații semnificative.

$\Rightarrow$ atunci când frecvența câmpului electric crește dincolo de o anumită valoare, numită **frecvență proprie**, dipolii caracteristici unei anumite clase de polarizație nu pot să mai urmărească variația rapidă a câmpului electric, orientarea lor devenind aleatoare $\Rightarrow$ **polarizația corespunzătoare nulă** $\Rightarrow$ **pierderile prin polarizare sunt NULE** (in corp nu se dezvoltă caldura)

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de deformare în câmpuri electrice armonice

În cazul câmpurilor electrice armonice, deplasarea învelișurilor electronice ale atomilor (la polarizarea electronică) și a ionilor (la polarizarea ionică) sunt, de asemenea, procese sinusoidale care se produc cu o frecvență egală cu cea a câmpului electric ($f = \omega/2\pi$). Obținerea expresiilor matematice ale mărimilor ε_r' și ε_r'' se poate face considerând că electronii, respectiv ionii, oscilează în jurul unor poziții fixe și că această mișcare poate fi asimilată cu cea a unui *oscilator armonic liniar*.

Considerăm cazul polarizației de deformare electronice; mișcarea de oscilație a unui electron în jurul nucleului este descrisă de ecuația:

$$m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} = q_0 E_0(t) - F_f - F_k$$

în care x reprezintă deplasarea electronului cu masa $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg și sarcina $q_0 = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $F_k = k \cdot x$ = forță cuasielastice care tinde să readucă electronul în poziția inițială (k = constantă de material) și F_f = forță de frânare a electronului (se ține seama de faptul că electronul aflat în mișcare radiază energie electromagnetică și, prin urmare, energia lui scade).

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de deformare în câmpuri electrice armonice

Expresia forței F_f este de forma: $F_f = \varphi \frac{dx}{dt}$ în care φ este o mărime de material.

Dacă se notează cu N concentrația de atomi ai corpului în care s-a stabilit câmpul electric activ E_0 și ținând cont de:

$$\vec{P}_t = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad \vec{E}_0 = \vec{E} + \frac{\gamma}{\varepsilon_0} \vec{P}$$

în care $\chi_e = \varepsilon_r - 1$, înmulțind ecuația de mișcare: $m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} = q_0 E_0(t) - F_f - F_k$

cu $Nq_0 Z$ și trecând-o în complex simplificat se obține:

$$\omega^2 (Nq_0 Zx) = -\frac{Nq_0^2 Z}{m_0} [1 + \gamma(\varepsilon_r - 1)] \underline{E} + \frac{k}{m_0} (Nq_0 Zx) + j\omega \frac{\varphi}{m_0} (Nq_0 Zx),$$

în care Z reprezintă numărul de ordine (numărul de electroni ai atomului).

Produsul $Nq_0 Zx$ reprezintă polarizația electronică complexă $\underline{P}_e$.

3. Procesarea materialelor dielectrice în câmpuri electrice de înalta frecvență

3.1. Încălzirea dielectricilor în câmpuri electrice variabile în timp

Polarizarea de deformare în câmpuri electrice armonice

$$\varepsilon_r' = 1 + \frac{Nq_0^2 Z}{m_0 \varepsilon_0} \cdot \frac{\omega_0'^2 - \omega^2}{(\omega_0'^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\varphi/m_0)^2} \quad \varepsilon_r'' = \frac{Nq_0^2 Z}{m_0 \varepsilon_0} \cdot \frac{\omega(\varphi/m_0)}{(\omega_0'^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\varphi/m_0)^2}$$

în care s-au făcut notațiile $\omega_0'^2 = \frac{k}{m_0} - \gamma \frac{Nq_0^2 Z}{m_0 \varepsilon_0}$ $k/m_0 = \omega_0^2$

Mărimea ω_0' se numește *pulsație proprie* sau *pulsație de rezonanță* și este practic egală cu pulsația proprie de oscilație a electronilor (sau a ionilor, în cazul polarizației de deformare ionică).

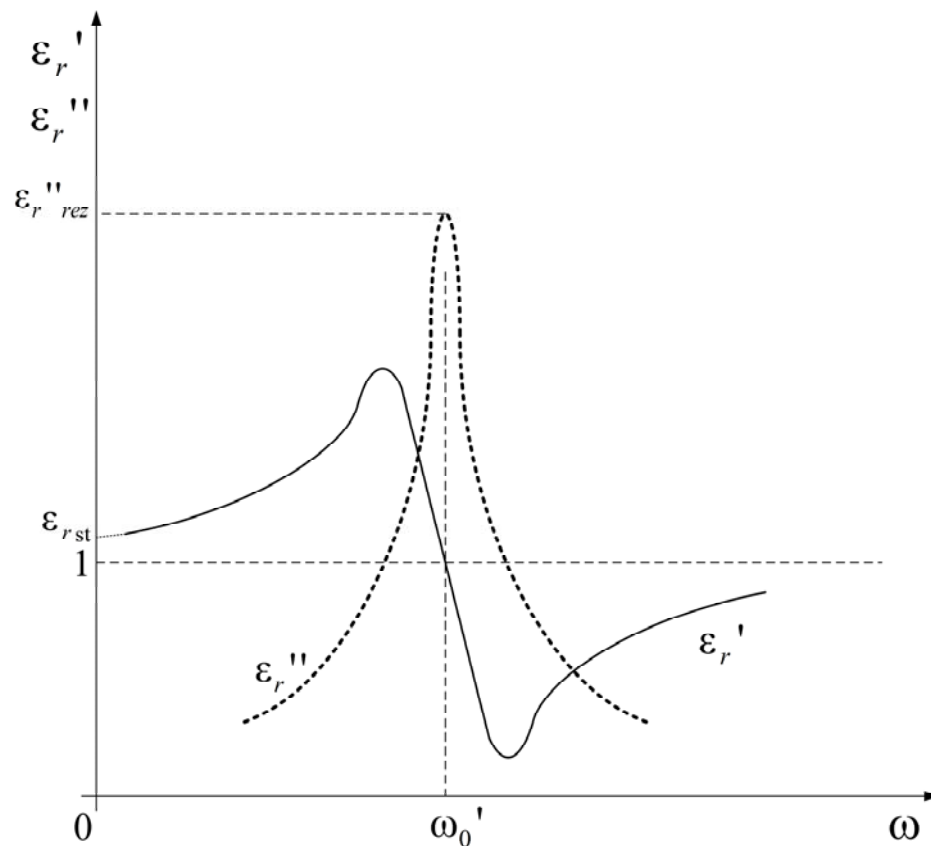
Pentru câmpuri electrice invariabile în timp ($\omega = 0$), rezultă $\varepsilon_r'(0)$ care reprezintă valoarea statică ε_{rst} (permitivitatea care intervine în calculul capacității condensatoarelor):

$$\varepsilon_{rst} = 1 + \frac{Nq_0^2 Z}{m_0 \varepsilon_0}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de deformare în câmpuri electrice armonice



-din curbele $\epsilon_r'(\omega)$ și $\epsilon_r''(\omega) \Rightarrow$ numai pentru valori ale pulsației câmpului electric situate în imediata vecinătate a pulsației proprii ω_0 , ϵ_r' și ϵ_r'' prezintă variații importante;

- se observă că pentru valori mari ale pulsației $\epsilon_r' \rightarrow 1$, ceea ce înseamnă că dielectricul nu mai este polarizat (la frecvențe foarte înalte electronii, respectiv ionii, nu mai pot urmări oscilațiile câmpului electric).

Obs. Rezultatele obținute mai sus sunt valabile și în cazul polarizației de deformare ionică însă cu alte valori ale constantelor k și φ .

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de orientare în câmpuri electrice armonice

Caracterizarea polarizării de orientare în câmpuri electrice armonice se face cu modelul *Pellat-Debye*, în care se consideră că *orientarea dipolilor este un proces pur vâscos, în care nu intervin forțe elastice*.

Ecuția de mișcare a unei molecule polare aflate într-un câmp electric armonic poate fi caracterizată cu ajutorul unei relații asemănătoare cu aceea de la polarizarea de deformare *din care lipsește forța* F_k .

Notând cu m și q masa și respectiv sarcina unei molecule polare, rezultă ecuația diferențială:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{qE_0}{m} - \frac{\varphi}{m}v$$

a cărei soluție arată că *viteza de mișcare a moleculei crește exponențial în timp până la atingerea unei valori maxime qE/φ , cu constanta de timp $\tau = m/\varphi$* .

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de orientare în câmpuri electrice armonice

In modelul *Pellat-Debye* se consideră că valoarea polarizației de orientare la un moment de timp dat $P_o(t)$ tinde la o valoare de echilibru P_o , cu o viteză proporțională cu diferența $P_o - P_o(t)$. Conform acestei ipoteze, rezultă:

$$\frac{dP_o(t)}{dt} = C[P_o - P_o(t)] \quad \text{cu solutia:} \quad P_o(t) = P_o[1 - \exp(-Ct)],$$

unde constanta C reprezintă inversul duratei de relaxare $\tau = 1/C$.

Fie un dielectric polar supus acțiunii unui câmp electric invariabil în timp (static). Dipolii se orientează după direcția câmpului electric, permitivitatea relativă luând valoarea ε_{rs} , iar polarizația valoarea P_s .

În cazul unor câmpuri electrice variabile de frecvență foarte înaltă, moleculele polare nu mai pot urmări variația câmpului și contribuția mecanismului de polarizare de orientare este neglijabilă. În acest caz numai polarizațiile de deformare electronică, respectiv ionică intervin, acestea prezentând răspunsuri foarte rapide la acțiunea câmpului electric $\Rightarrow \varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty}$ si $P = P_{\infty}$.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de orientare în câmpuri electrice armonice

Dacă se aplică un câmp treaptă unui dielectric polar, polarizația totală se poate exprima astfel:

$$P = P_o + P_{def} = P_o + P_{\infty}$$

Cu $\vec{P}_t = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$ rezulta: $P_o = \epsilon_0 (\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty}) E_0$

Daca materialul electroizolant polar este supus acțiunii unui câmp electric sinusoidal . Polarizația corpului va fi o mărime complexă:

$$\underline{P}(t) = \underline{P}_o(t) + \underline{P}_{\infty}(t)$$

Din care, impreuna cu $P_o = \epsilon_0 (\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty}) E_0$ si $\frac{dP_o(t)}{dt} = C[P_o - P_o(t)]$, reprezentand in complex simplificat rezulta:

$$\underline{P}_o(t) = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty})}{1 + j\omega\tau} \underline{E}(t) \text{ si tinand cont de } \underline{D}(t) = \epsilon_0 \underline{E}(t) + \underline{P}(t)$$

Rezulta: $\underline{D}(t) = \epsilon_0 \underline{E}(t) + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty})}{1 + j\omega\tau} \underline{E}(t) + \epsilon_0 (\epsilon_{\infty} - 1) \underline{E}(t) \Rightarrow \underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}$

3. Procesarea materialelor dielectrice în câmpuri electrice de înalta frecvență

3.1. Încălzirea dielectricilor în câmpuri electrice variabile în timp

Polarizarea de orientare în câmpuri electrice armonice

Componentele permitivității complexe corespunzătoare polarizării de orientare sunt:

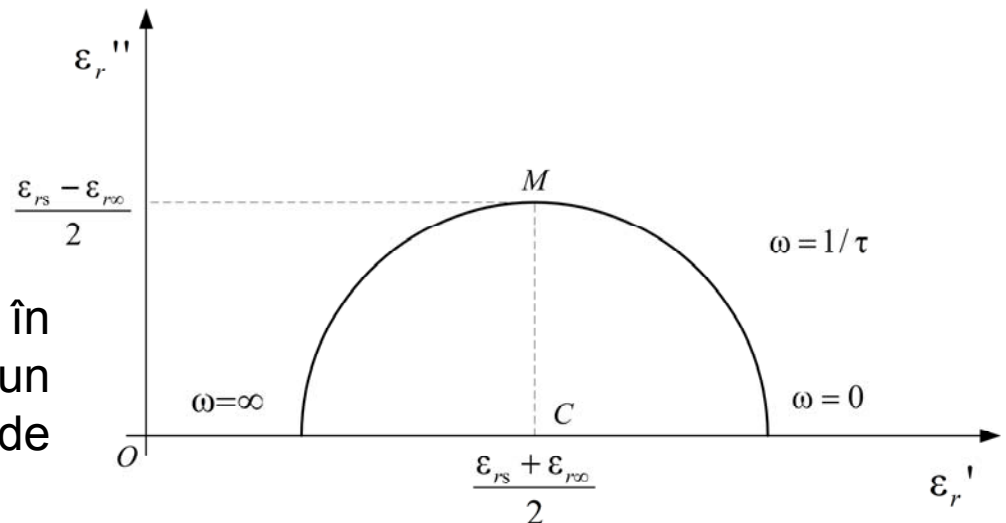
$$\epsilon_r' = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \epsilon_r'' = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

Dependența permitivității relative complexe de frecvența câmpului electric este pusă în vedere prin trasarea diagramelor *Cole-Cole* $\epsilon_r''(\epsilon_r')$

$$(\epsilon_r' - \epsilon_{r\infty})^2 + \epsilon_r''^2 = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$(\epsilon_r')^2 - (\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})\epsilon_r' + \epsilon_{rs}\epsilon_{r\infty} + (\epsilon_r'')^2 = 0$$

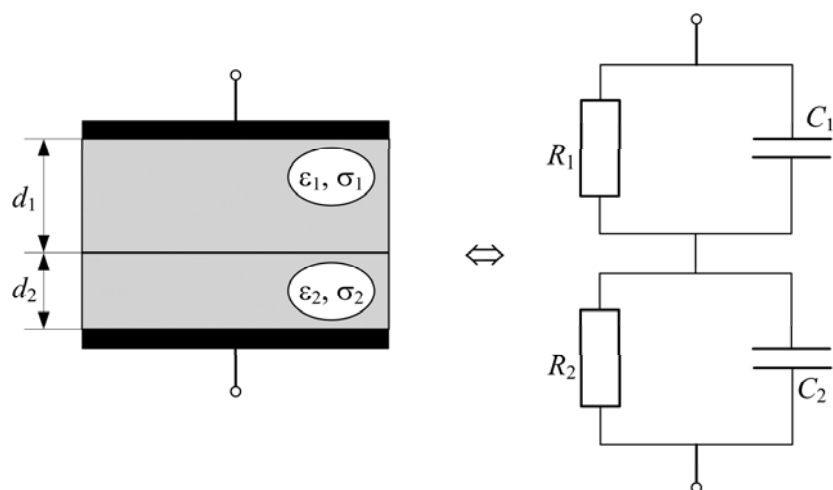
Reprezentarea permitivității complexe în planul complex $(\epsilon_r', \epsilon_r'')$ este un semicerc cu centrul în punctul C de coordonate $(\epsilon_{r\infty} + \epsilon_{rs})/2$ și $(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})/2$



3. Procesarea materialelor dielectrice în câmpuri electrice de înalta frecvență

3.1. Încălzirea dielectricilor în câmpuri electrice variabile în timp

Polarizarea de neomogenitate în câmpuri electrice armonice



Model simplu al unui dielectric alcătuit din două straturi omogene cu grosimile d_1 și d_2 și permitivitățile ϵ_1 , și ϵ_2 , respectiv conductivitățile σ_1 și σ_2 (modelul lui *Maxwell – Wagner*).

Mărimile care intervin în schema echivalentă sunt: $R_1 = d_1/\sigma_1$, $R_2 = d_2/\sigma_2$, $C_1 = \epsilon_1/d_1$ și $C_2 = \epsilon_2/d_2$. Dacă constantele de timp ale celor două condensatoare $\tau_1 = R_1 C_1$ și $\tau_2 = R_2 C_2$ (care reprezintă și duratele de relaxare ale celor două izolatoare $\tau_1 = \epsilon_1/\sigma_1$, respectiv $\tau_2 = \epsilon_2/\sigma_2$) sunt egale, pe suprafața de separație dintre cele două straturi **nu se acumulează sarcină electrică** $\Rightarrow$ **nu apar fenomene de relaxare**

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Polarizarea de neomogenitate în câmpuri electrice armonice

Dacă se aplică o tensiune armonică cu pulsația ω , admitanța circuitului echivalent al primului strat este:

$$\underline{Y}_1 = \frac{\sigma_1}{d_1} + j\omega \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \frac{\sigma_1}{d_1} + j\omega \frac{\epsilon_1}{d_1} = j\omega \frac{\underline{\epsilon}_1}{d_1} \quad \underline{\epsilon}_1 = \frac{1 + j\omega\tau_1}{j\omega\tau_1} \epsilon_1$$

$$\frac{d}{\underline{\epsilon}} = \frac{j\omega\tau_1}{1 + j\omega\tau_1} \cdot \frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_2} \cdot \frac{d_2}{\epsilon_2}$$

$$\underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\epsilon_0}{\omega\tau_0} \quad \epsilon_\infty = \frac{d_1\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad \epsilon_s = d \frac{d_1\epsilon_1\sigma_2^2 + d_2\epsilon_2\sigma_1^2}{(d_2\sigma_1 + d_1\sigma_2)^2}$$

$$\tau = \frac{d_1\epsilon_2 + d_2\epsilon_1}{d_2\sigma_1 + d_1\sigma_2} \quad \tau_0 = \frac{\epsilon_0}{d} \frac{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}{\sigma_1\sigma_2} \quad \underline{\epsilon}(\omega) = \frac{d\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} - j \frac{\epsilon_0}{\omega\tau_0}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Pierderi dielectrice in izolanți

Intr-un izolator real care are $\sigma \neq 0$ situat într-un câmp electric armonic, densitatea curentului electric total (de conducție și de deplasare) are expresia:

$$\underline{J}_t = \underline{J} + j\omega \underline{D} = \underline{J} + j\omega \underline{\epsilon} \underline{E} = \sigma \underline{E} + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\underline{E} = (\sigma + \omega\epsilon'' + j\omega\epsilon')\underline{E}$$

Densitatea de volum a puterii aparente complexe are expresia:

$$\underline{s} = \underline{E} \cdot \underline{J}_t^* = (\sigma + \omega\epsilon'')E^2 + j\omega\epsilon'E^2 = p + jq$$

Componenta activa p reprezintă pierderile in dielectric și este suma pierderilor prin conducție σE^2 și prin polarizare $\omega\epsilon''E^2$.

Factorul de pierderi dielectrice:
$$\operatorname{tg}\delta = \frac{p}{q} = \frac{\sigma + \omega\epsilon''}{\omega\epsilon'} = \frac{\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}}{\epsilon'} = \frac{\epsilon''_{ef}}{\epsilon'}$$

Factorul de pierderi prin histerezis dielectric:
$$\operatorname{tg}\delta_h = \frac{p_h}{q} = \frac{\omega\epsilon''}{\omega\epsilon'} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Pierderi dielectrice in izolanți

Densitatea de volum a puterii ce determina încălzirea unui dielectric real este:

$$p = \omega \varepsilon' \cdot \tan \delta E^2 = \omega \varepsilon_{ef}'' E^2$$

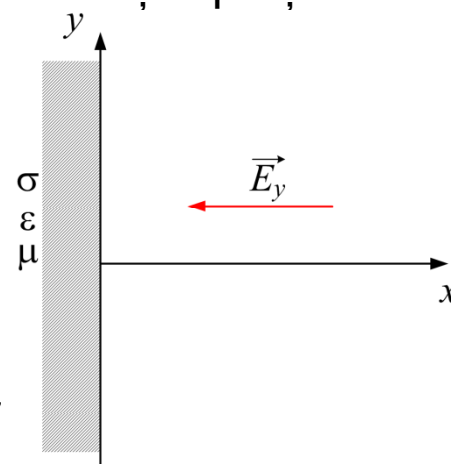
Unda plana in dielectrice cu pierderi

Fie o unda plana incidenta, normala pe suprafata de separatie vid – semispațiu material caracterizat prin proprietățile ε , μ si σ . Unda suferă o refracție: parțial este reflectata si parțial pătrunde in semispațiu.

$$E_y = E_0 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x\right) = E_0 \cos(\omega t + \beta x)$$

Pentru o unda plana liniar polarizata care se propaga in lungul axei Ox, având vectorul $\mathbf{E}$ orientat ca in fig., legea circuitului magnetic conduce la relația:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y + j\omega \varepsilon E_y$$



primul termen este densitatea curentului de conducție si al doilea densitatea curentului de deplasare.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Unda plana in dielectrici cu pierderi

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y + j\omega\epsilon E_y \quad \sigma = \text{conductivitatea electrica globala a materialului}$$

In funcție de raportul $\sigma/\omega\epsilon$ se diferențiază următoarele tipuri de materiale:

- dielectrici: $\sigma/\omega\epsilon < 10^{-2}$;
- semiconductori: $\sigma/\omega\epsilon = 10^{-2} - 10^2$;
- conductori: $\sigma/\omega\epsilon > 10^2$;

Obs. Frecventa f reprezintă un factor important pentru caracterizarea unui material (ca fiind dielectric sau conductor). De exemplu, un material solid cu $\epsilon/\epsilon_0 = 14$ si $\sigma = 10^{-2}$ S/m se comporta astfel: la $f = 1$ kHz se comporta ca un conductor având $\sigma/\omega\epsilon = 1,3 \cdot 10^4$ si la $f = 1$ GHz se comporta ca un dielectric având $\sigma/\omega\epsilon = 4,3 \cdot 10^{-4}$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Unda plana in dielectrics cu pierderi

Ecuatia unde $E_y(x,t)$ intr-un mediu material are urmatoarea expresie:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial E_y}{\partial t} = 0$$

In cazul in care câmpul electric are o variație armonica: $E_y = E_0 \cdot \exp(j\omega t)$

ecuația unde ia forma: $\frac{d^2 E_y}{dx^2} = \gamma^2 E_y$, $\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon + j\omega \mu \sigma = \omega^2 \mu \epsilon (-1 + j \tan \delta)$

Parametrul $\gamma^2 = \alpha + j\beta$ se numește constanta de propagare. Se observa ca in cazul in care $\sigma \gg \omega \epsilon$ (materiale conductoare), $\gamma^2 \cong \omega \mu \sigma$.

Soluția ecuației $\frac{d^2 E_y}{dx^2} = \gamma^2 E_y$ are forma: $E_y = E_0 \cdot \exp(-x/\delta) \cdot \exp(-jx/\delta)$

in care $\delta = \sqrt{2/\omega \mu \sigma}$ se numește adâncimea de pătrundere a câmpului electromagnetic in material (distanța x la care câmpul se reduce de $e = 2,71$ ori in raport cu valoarea la suprafața $x = 0$).

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

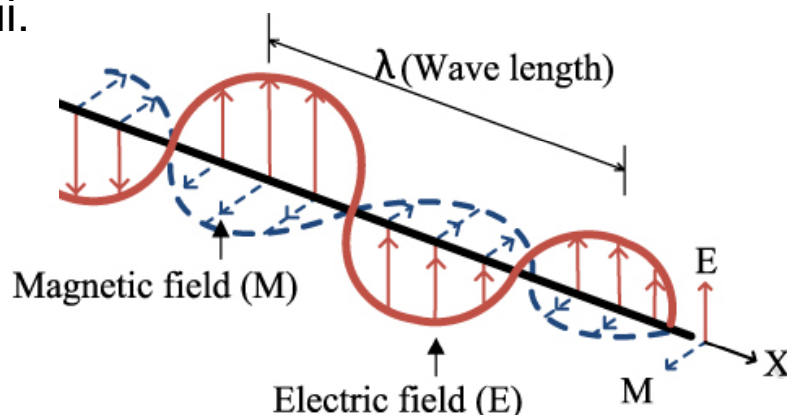
Unda plana in dielectrici cu pierderi

Obs. Se observa ca adâncimea de pătrundere variază invers proporțional cu $f^{0,5}$ ceea ce înseamnă ca *o placa subțire din material conductor* acționează ca un *filtru trece-jos pentru undele electromagnetice*.

Pentru medii dielectrice, ecuația de propagare a undelor are soluția:

$$E_y = E_0 \cdot \exp(-\alpha x) \cdot \exp(-j\beta x)$$

expresie ce evidențiază atenuarea câmpului electromagnetic in profunzimea materialului.



Procesarea electromagnetica a materialelor
Conf.dr.ing. L.M. Dumitran

Constanta de atenuare:

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \cdot \sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \delta) - 1}{2}}$$

Daca $\tan \delta \ll 1$:

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\mu \epsilon}}{2} \tan \delta = \frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \tan \delta$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \text{lungimea de unda in vid}$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Unda plana in dielectrici cu pierderi

Obs. Inversul constantei de atenuare α reprezintă adâncimea de pătrundere a câmpului electric, respectiv distanta la care densitatea de putere scade de $1/e$ din valoarea la suprafața materialului:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \tan \delta}$$

Daca E_0 reprezintă amplitudinea câmpului electric la suprafața unui semispațiu cu pierderi, expresia densității de volum a puterii asociate propagării undei este:

$$p(x) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta E_0^2 \cdot \exp(-2x\alpha)$$

Obs. Trebuie avut in vedere si fenomenul de reflexie al unei unde incidente pe suprafața unui corp. Indicele de reflexie are expresia: $R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$

si densitatea de volum a puterii asociate undei incidente (de amplitudine E_{0i}) ce patrunde in corp este:

$$p_t(x) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r (1 - |R|^2) \tan \delta E_{0i}^2 \cdot \exp(-2x\alpha)$$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.1. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp

Valorile *constantei de atenuare* α , respectiv ala *adâncimii de pătrundere* δ diferențiază sensibil *domeniul frecventelor radio* de acela al *microundelor*:

- domeniul frecventelor radio: 13,56 MHz; 27,12 MHz; 40,68 MHz (respectiv lungimile de unda in vid $\lambda_0 = 22,2$ m; 11,1 m si 7,4 m);
- microunde: 915 MHz; 2,45 GHz; 5,8 GHz (respectiv lungimile de unda in vid $\lambda_0 = 32,8$ cm; 12,2 cm si 5,2 cm);

Obs.

1. Deoarece dimensiunile tipice ale corpurilor încălzite pe baza efectului de histerezis dielectric au dimensiuni de ordinul zeci – sute de cm, rezulta ca încălzirea in câmpuri de frecvente radio este practic **uniforma in întreg volumul**. Încălzirea cu ajutorul microundelor poate fi utilizata pentru **încălziri superficiale**.

2. Caracteristica particulara a încălzirii in câmpuri de radiofrecvența a dielectricilor este aceea ca puterea necesara este produsa in interiorul corpului ceea ce reprezintă un mare avantaj (raportat la metodele convenționale care presupun transfer de energie termica prin convecție si radiație ceea ce reprezintă o problema in cazul izolatoarelor care, in general, au conductivitate termica scăzuta).

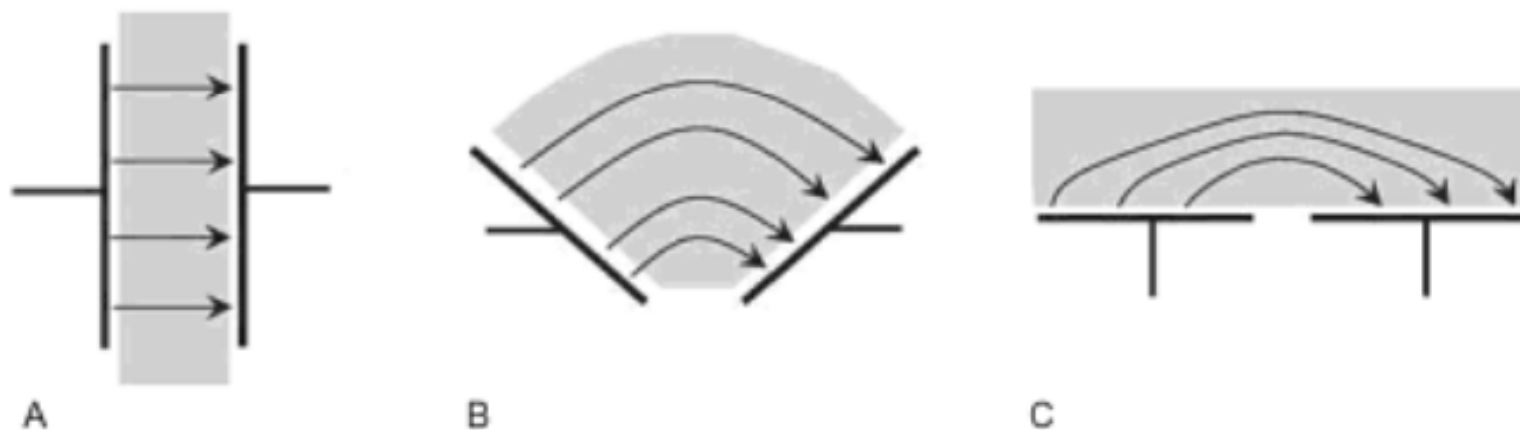
3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.2. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp – tipuri de aplicatoare

- A) *Aplicatoare cu electrozi plati fara spatii cu aer* – utilizate pentru lipirea materialelor termoplastice sub presiune;
- B) *Aplicatoare cu electrozi cu spatiu de aer* – utilizate pentru operatii de uscare continua;
- C) *Aplicatoare cu electrozi strayfield (din loc in loc)* = succesiune de bare in acelasi plan cu alimentare alternanta. Se folosesc pentru prelucrarea materialelor in benzi subtiri (hartie, pelicule adezive, materiale textile etc.);
- D) *Aplicatoare cu electrozi ghirlanda;*

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

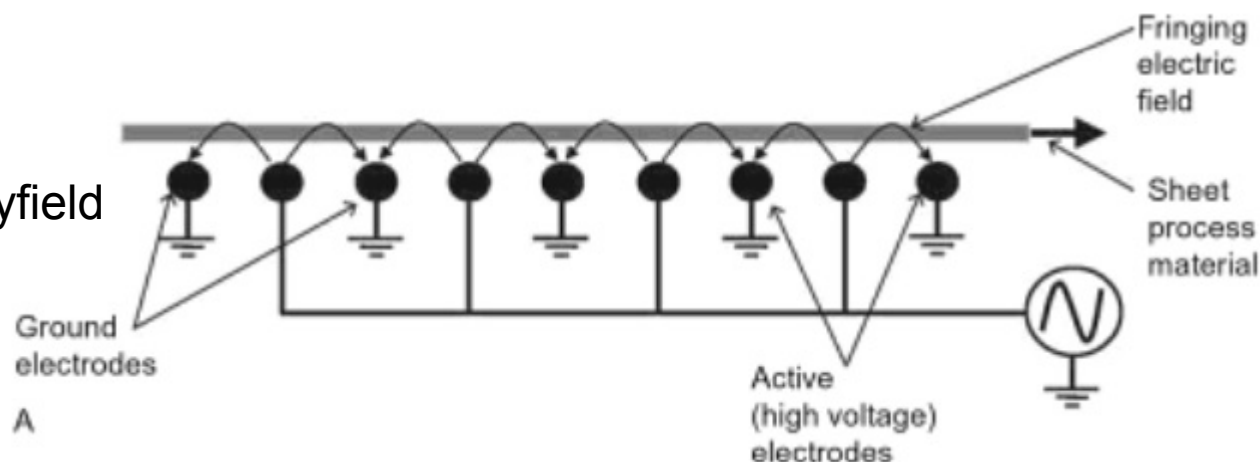
3.2. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp – tipuri de aplicatoare



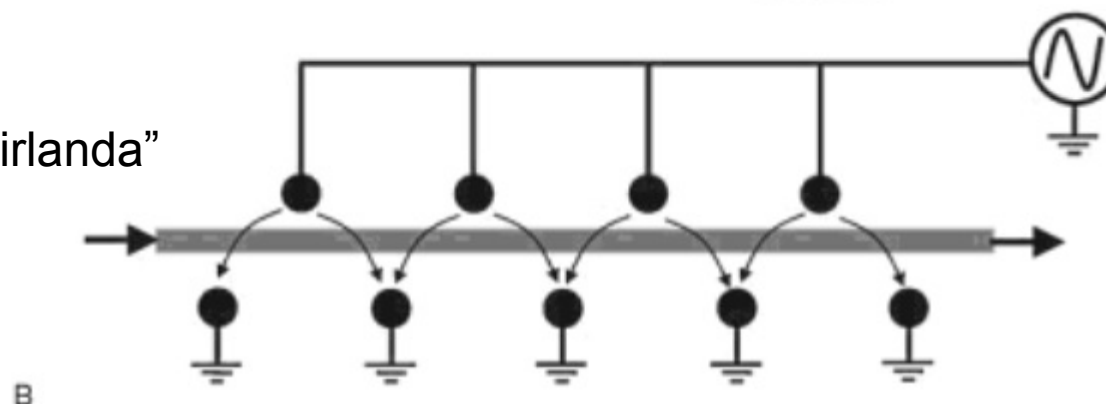
3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.2. Încălzirea dielectricilor in câmpuri electrice variabile in timp – tipuri de aplicatoare

B) Electrozi strayfield



C) Electrozi “ghirlanda”



3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

Principiul procesării materialelor dielectrice cu ajutorul microundelor este același ca cel descris la procesarea in câmpuri de RF (absorbția energiei electromagnetice de către corpul supus încălzirii).

Benzi de frecventa destinate pentru procesarea industrială a materialelor (pentru a evita perturbarea telecomunicațiilor):

- 915 $\pm$ 25 MHz ($\lambda \cong 33$ cm);
- 2450 $\pm$ 50 MHz ($\lambda \cong 12$ cm);
- 5800 $\pm$ 75 MHz ($\lambda \cong 5$ cm);
- 22125 $\pm$ 125 MHz ($\lambda \cong 1,35$ cm);

Obs.

- adâncimea de pătrundere a microundelor este mult mai mica decât in cazul câmpurilor RF;
- valorile densității de volum a puterii sunt sensibil mai mari (~50 ori) decât in cazul câmpurilor RF – pana la 300 W/cm³.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

Un echipament de încălzire cu microunde are 3 componente esențiale:

1. Generatorul de microunde;
2. Ghid de unde necesar transferului eficient al energiei de la sursa la aplicator;
3. Aplicator microunde – in care energia microundelor interacționează cu corpul;

Obs. Caracteristica specifica microundelor - energie asociata frecventei microundelor este radiata liber in spațiu de către un sistem electrod (denumit de obicei antena) si din acest motiv trebuie aplicate soluții de ghidare si concentrare a acestei energii pentru a interacționa optim cu corpul care trebuie procesat.

!!!! Deoarece corpul uman absoarbe microunde este necesar ca nivelul de scapari al radiațiilor in instalațiile cu microunde sa fie foarte redus ($< 1 \text{ mW}$ la distanta de 1 m de instalație)



3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

Se realizează cel mai adesea in gama de puteri 0,5 – 1 kW cu un randament de ~ 50 – 60 % si o durata de funcționare de pana la 6000 – 8000 h. Se pot realiza si pentru puteri mari de pana la 6 kW.

Construcție: magnetronul este un dispozitiv in vid alcătuit dintr-un ANOD si un CATOD. Catodul este cilindric si prin încălzirea lui se produce emisia termoelectronica . Anodul, tot de forma cilindrica, este dispus in jurul catodului si are prevăzute cavitati (crestături longitudinale). Cavitățile anodului au o inductivitate si o capacitate proprie, îndeplinind rolul de circuite rezonante la o frecventa precisa determinata de dimensiunile geometrice.

Funcționare: anodul este conectat la un potențial ridicat ceea ce permite obținerea unui câmp electric ridicat in spațiul interelectrodic. De asemenea, se aplica un câmp magnetic pe direcția axei catodului. Electronii emiși de catod au traiectorii helicoidale in câmpul electric si magnetic.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

Funcționare: anodul este conectat la un potențial ridicat ceea ce permite obținerea unui câmp electric ridicat in spațiul interelectroodic. De asemenea, se aplica un câmp magnetic pe direcția axei catodului. Electronii emiși de catod au traiectorii helicoidale in câmpul electric si magnetic.

Principiul de funcționare: preluarea de către electroni a energiei din spațiul anod – catod si transferarea acesteia in cavitati. Energia este “extrasa” din una din cavitati prin intermediul unei bucle de cuplaj si transmisa spre sarcina.

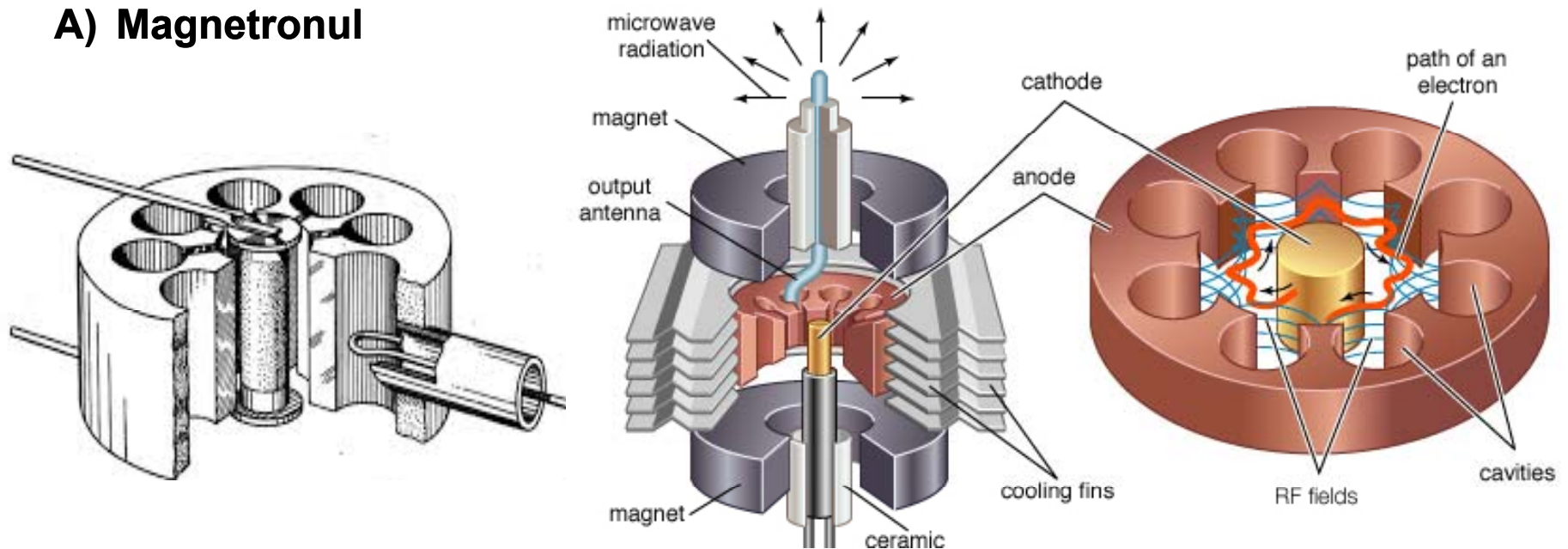
Explicație: când norul electronic străbate o cavitate, atunci electronii transfera o parte din energia lor câmpului electromagnetic. Când electronii trec prin dreptul unui dinte dintre cavitati, atunci aceștia primesc energie fiind accelerați (de câmpul continuu intens).

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

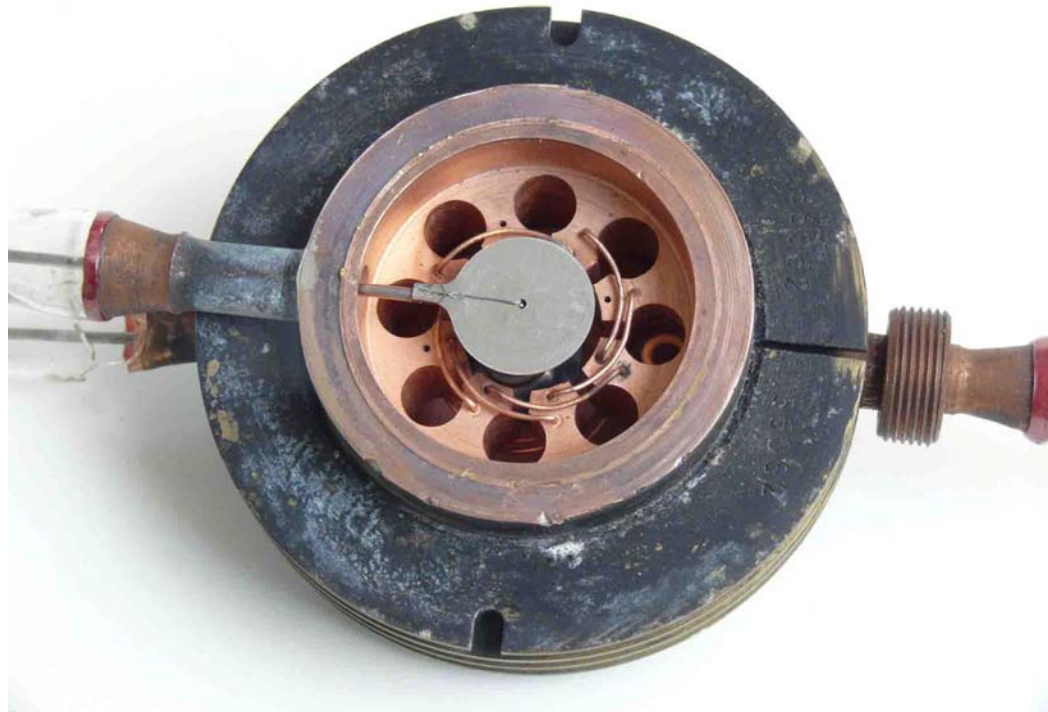


3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

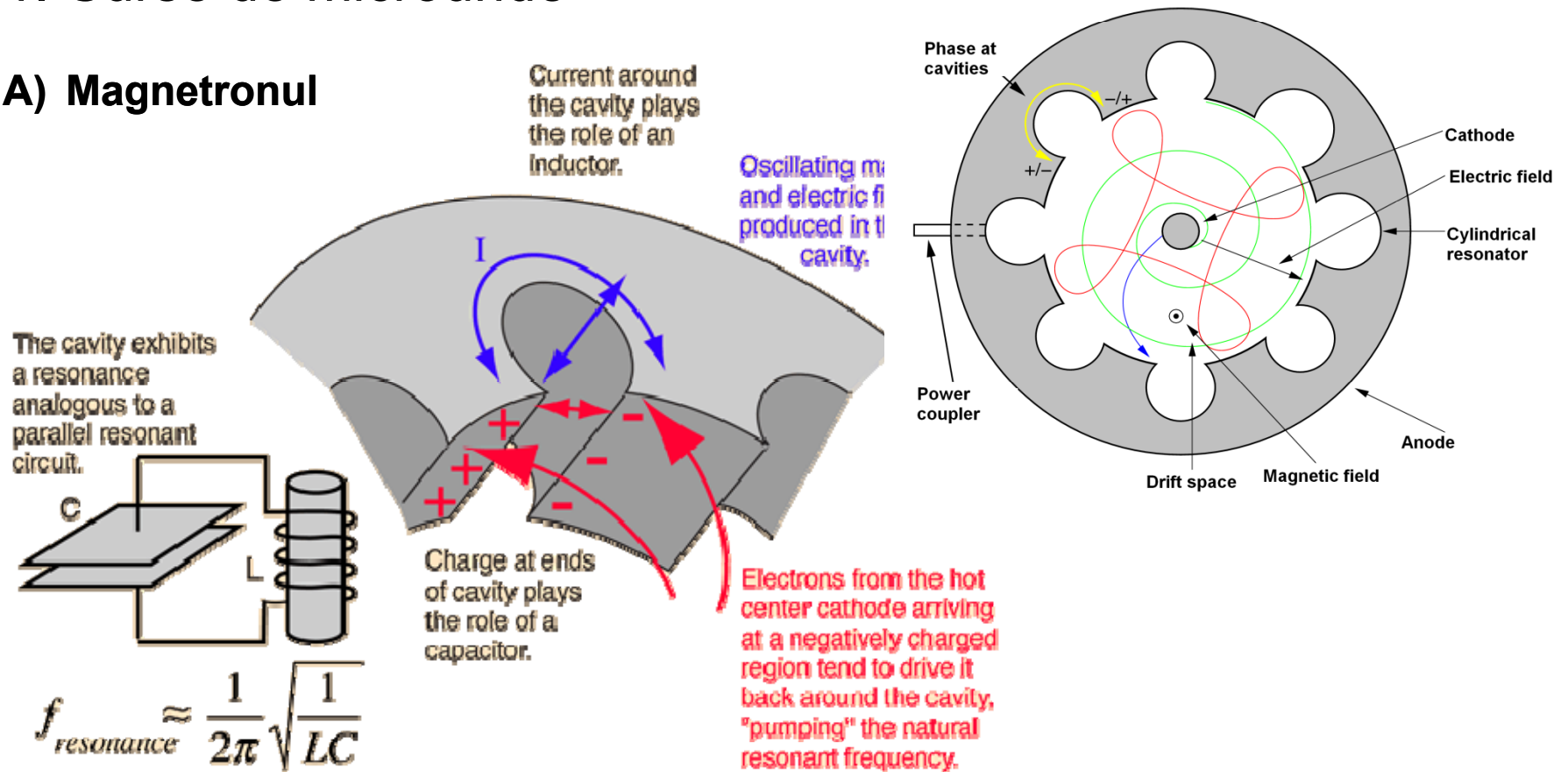


3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

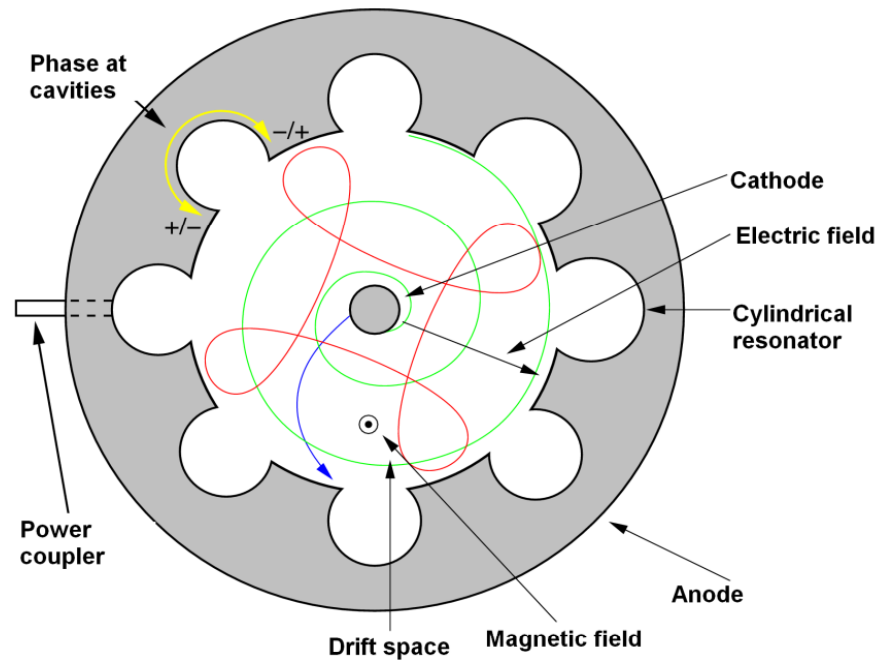


3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul

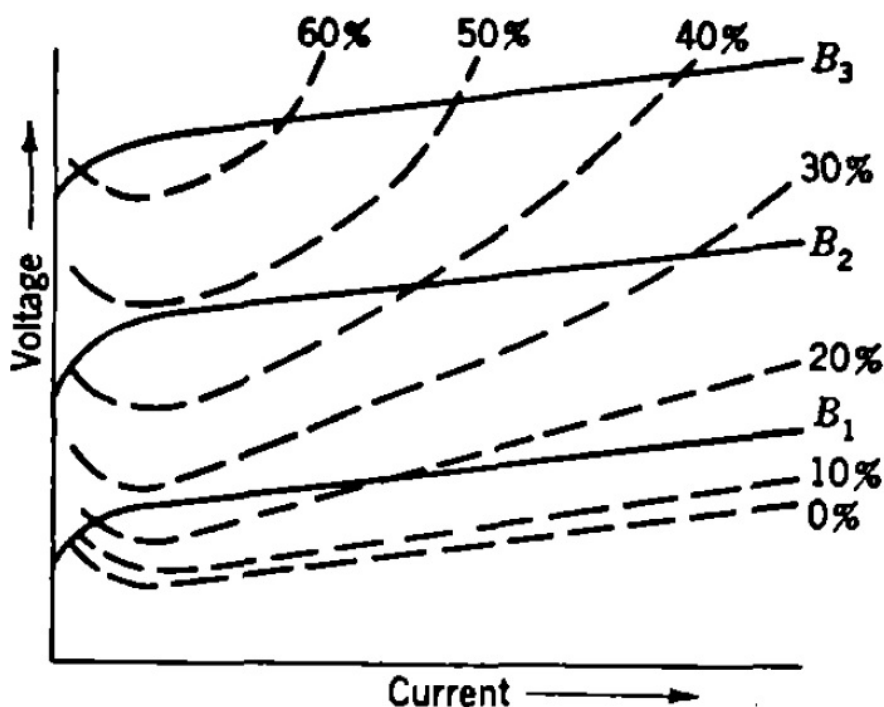


3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

A) Magnetronul



-Dependenta aproape orizontala a tensiunii anodice in funcție de curent la $B = \text{const.} \Rightarrow$ necesitatea unei bune stabilizări a sursei de alimentare a anodului in scopul unui control eficient al puterii;

- Reglajul puterii prin modificarea inducției magnetice B este mai eficient dar necesita utilizarea unui electromagnet.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

1. Surse de microunde

B) Klystronul

In comparație cu magnetronul, **klystronul** are o construcție liniara.

Principiul de funcționare: Electronii sunt produși de un *tun electronic* (ansamblu catod emisiv – anod) si străbat o cavitate rezonanta in care este injectat un semnal de mica putere la frecventa de lucru. Fasciculul de electroni este modulat de semnalul injectat (*aceștia sunt accelerați sau frânați in funcție de faza semnalului*).

Fasciculul de electronii pătrunde intr-un prim tub de “drift”; aici iau naștere zone de mare, respectiv mica concentrație de electroni (*electronii puternic accelerați “ii ajung din urma” pe cei încetiniți...*).

Astfel, viteza electronilor este modulata si convertita intr-o modulare de curent (electronic).

Fasciculul de electroni modulat pătrunde intr-o cavitate in care, câmpul magnetic asociat curentului induce un câmp electric. Fluxul de electroni este apoi modulat intr-un al doilea tub de drift. Energia este “extrasa” intr-o cavitate finala in care ajung *nori electronici foarte denși*, printr-un **sistem de cuplaj**.

⇒ **Puterile generate cu ajutorul Klystronului sunt sensibil mai mari decat cele obtinute cu Magnetronul.**

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

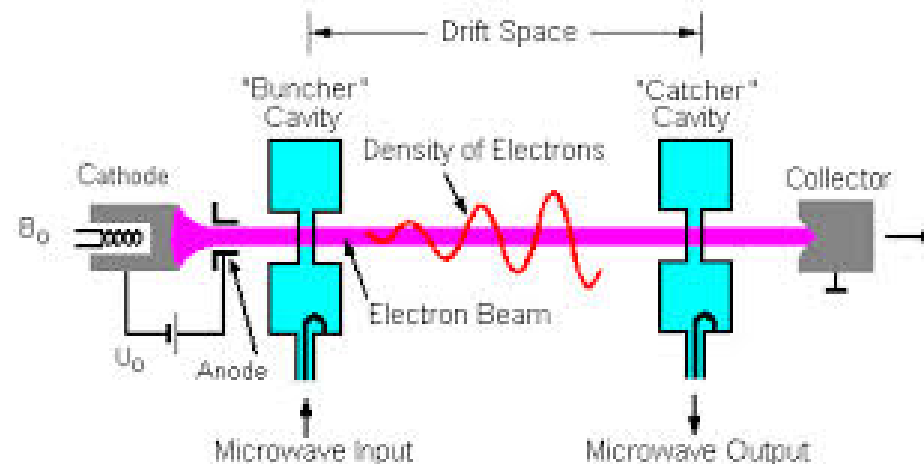
1. Surse de microunde

B) Klystronul

⇒ Puterile generate cu ajutorul Klystronului sunt sensibil mai mari decât cele obținute cu Magnetronul.

Exemplu: klystron cu 5 cavitati, $U = 2,5 \text{ kV}$ si $f = 2450 \text{ MHz}$ are $P = 50 \text{ kW}$ (tubul de drift are o lungime de $\sim 1 \text{ m}$ si $\eta \cong 60 \%$).

Obs. Klystronul are o durata de viață mai mare decât magnetronul ($\sim 15000 \text{ h}$).



3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

Obs. Propagarea energiei electromagnetice in interiorul unui tub metalic nu poate fi descrisa cu ajutorul teoriei circuitelor pentru ca este necesara cunoaşterea structurii câmpurilor magnetic si electric in întreg volumul interior.

In funcţie de configuraţiile vectorului undei asociate câmpului electromagnetic se diferenţiază:

-linii pentru transmiterea undelor electromagnetice transversale (*moduri TEM*), in care ***E*** si ***H*** sunt vectori perpendiculari pe direcţia de propagare (toate liniile cu doua conductoare paralele sau coaxiale);

-linii pentru transmiterea undelor care au cel puțin o componenta a câmpului (***E*** si ***H***) in lungul direcţiei de propagare (de exemplu **conductorul tubular unic denumit ghid de unda**).

Teoria liniei TEM (linie bifilara) uniforma si infinita: propagarea unei unde plane transversale in lungul liniei. Definirea constantei de propagare a liniei, a constantei de atenuare a undei...

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

Ghiduri de unda

Prezentarea problemei se poate face, pentru început, in cazul unei structuri simple: ***unda de mod TE intre doua plane paralele infinite***

Pentru o unda de tip TE (transversal electric) care se propaga in lungul axei Ox intre doua plane paralele pentru care $\mathbf{E}$ este orientat după Oy si $\mathbf{H}$ are si componenta transversala si longitudinala, condițiile la limita (in cazul in care cele doua plane sunt conductoare) presupun ca la nivelul acestora $E_y = 0$.

Daca se considera doua unde de mod TEM care se propaga dupa anumite directii care fac un anumit unghi intre ele, se observa ca acestea strabat spatiul dintre cele doua plane prin reflexii succesive. Se constata ca unda rezultanta (compunand cele doua unde de mod TEM) este o unda de mod TE. Aceasta nu poate exista decat daca lungimea de unda este mai mica decat o valoare critica numita ***lungime de unda de taiere***.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

Ghiduri de unda

Se analizează unda TE in ghidul de unda tubular de secțiune rectangulara ($a \times b$).

Astfel de unde sunt caracterizate prin: $E_x = 0$ si $H_x \neq 0$. Daca se considera E_y (care se propaga in sensul axei Ox) de forma:

$$E_y = E_0 \exp(j\omega t - \gamma x)$$

Poate fi scris sistemul de ecuatii in care intervin E_y , E_z , H_x , H_y , H_z .

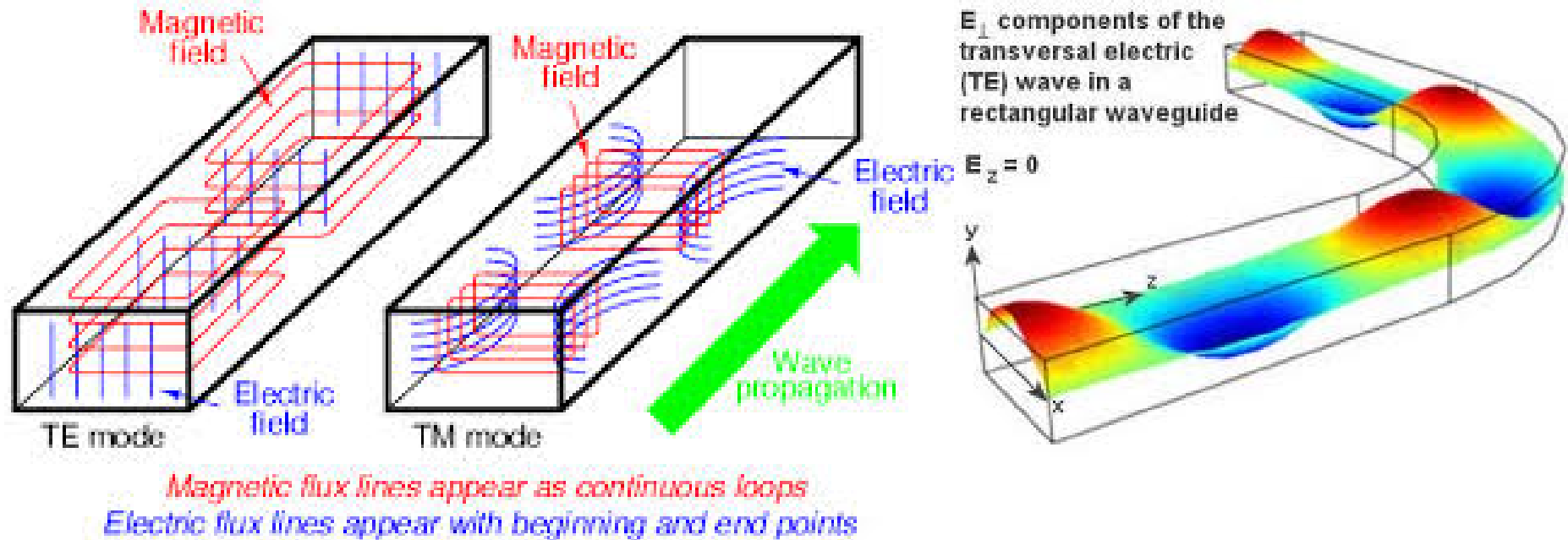
Se obtin expresiile acestor marimi, frecventa de taiere si lungimea de unda corespunzatoare.

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

Ghiduri de unda



3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

Cavitati rezonante

Rezonator = dispozitiv acumulator de energie electromagnetica.

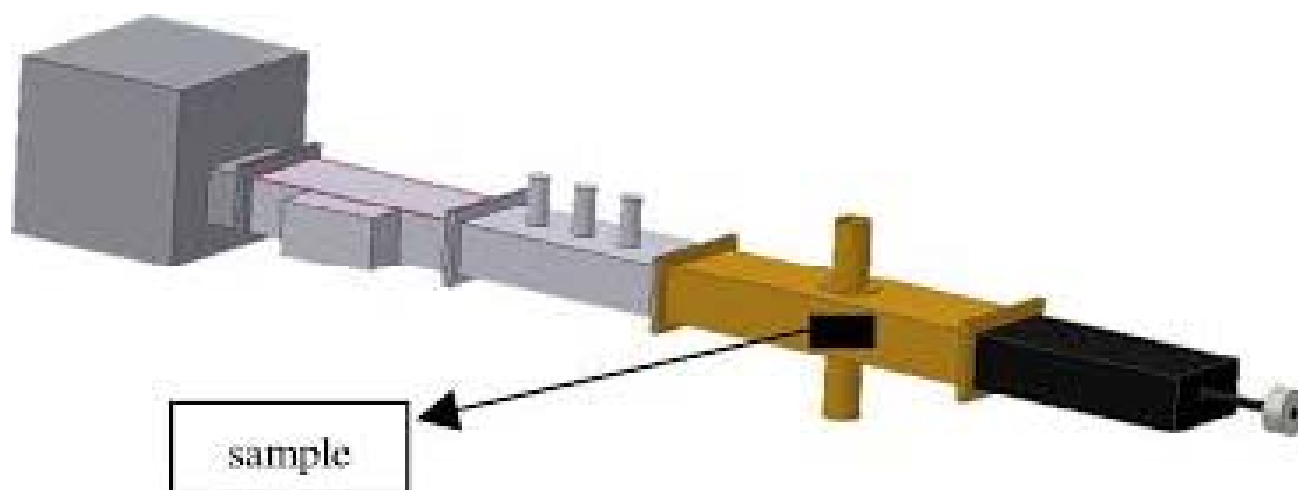
Pentru o *cavitate rezonanta* se determina *frecventa de rezonanta* si *factorul de calitate*.

Factorul de calitate: $Q = 2\pi \cdot \frac{\text{energia totala}}{\text{scaderea energiei intr - o perioada}}$

3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

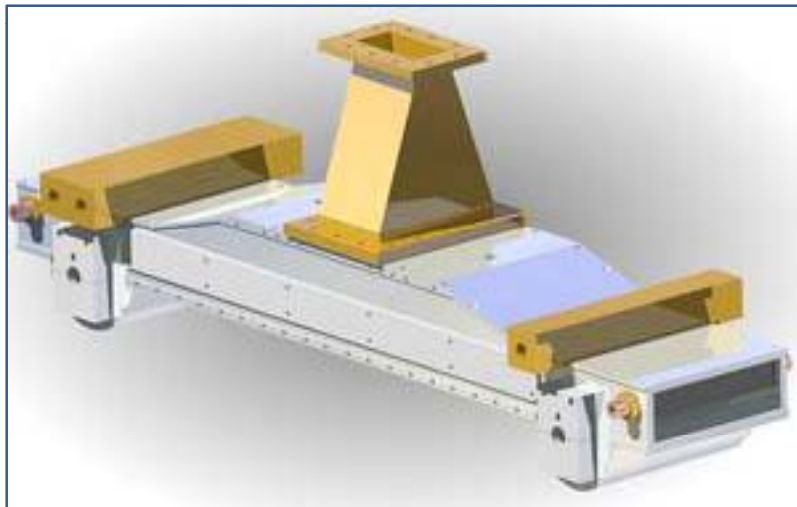


3. Procesarea materialelor dielectrice in câmpuri electrice de înalta frecventa

3.3. Încălzirea dielectricilor cu ajutorul microundelor

2. Transmisia microundelor. Ghiduri de unda. Cavitati rezonante

C) Aplicatoare



Aplicații ale procesării cu microunde:

- vulcanizarea cauciucului;
- polimerizarea rasinilor sintetice;
- uscarea si sterilizarea produselor farmaceutice;



4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

Tehnologiile de procesare a materialelor bazate pe interacțiunea unui fascicol de electroni cu materialul de procesat au la baza două efecte: transformarea energiei cinetice a fascicolului de electroni în căldură și utilizarea efectului radiochimic al iradierii cu fascicolul de electroni.

4.1. Caracteristicile unui fascicol de electroni

Cum se obține un fascicol de electroni?

Electronii sunt extrași din catod, sunt puternic accelerați în câmp electric și apoi sunt focalizați asupra materialului de prelucrat.

Energia cinetică a unui fascicol cu n electroni:

$$W_{FE} = \frac{1}{2} n \cdot m_0 v^2 = n q_0 U$$

în care $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg (masa electronului), $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C (sarcina electronului) și U este tensiunea aplicată.

Dacă n_s reprezintă numărul de electroni emisi în unitatea de timp (1 s), puterea maximă a fascicolului de electroni are expresia:

$$P = n_s \cdot q_0 \cdot U = U \cdot I$$

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.1. Caracteristicile unui fascicol de electroni

Densitatea de putere corespunzătoare unui fascicol de electroni

În aplicațiile practice fascicolul de electroni este focalizat cu ajutorul unor câmpuri electrostatice. În funcție de aplicație, energia fascicolului poate fi puternic localizată (*fascicolul este puternic focalizat*), ca de exemplu în sudura sau prelucrări cu fascicol de electroni sau **uniform distribuită**, așa cum se procedează în cazul topirii metalelor, tratamentelor termice superficiale etc...

Aplicatii	Topirea metalelor	Sudura	Evaporare	Durificare superficiala	Microprelucrari
Densitatea de putere [W/cm ²]	$10^3 - 10^4$	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^5$	$10^6 - 10^8$	$10^7 - 10^9$

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.1. Caracteristicile unui fascicol de electroni

Efecte ale bombardamentului electronic. Adâncimea de pătrundere

Energia pierdută de un fascicol de electroni în urma difuziei într-un metal este dată de *legea Thomson – Whiddington*:

$$W_0^2 - W_x^2 = k \cdot d \cdot \frac{N}{A} x$$

în care W_x reprezintă energia în eV la distanța x [cm] față de suprafața metalului, d este densitatea metalului, $k = 7,75 \cdot 10^{11}$ este o constantă, N este numărul atomic și A este masa atomică a metalului.

Principalele efecte ale impactului fascicolului de electroni:

- încălzirea (chiar topirea) materialului;
- extracția de particule din material (evaporarea locală);
- emisia termoelectronică în zona încălzită;
- emisia de raze X și fotoni;
- penetrarea materialului (exemplu: un fascicol de electroni având puterea specifică 10^7 W/cm² poate traversa o placă de oțel cu grosimea de ~ 10 cm).

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.2. Instalații cu fascicol de electroni

Componentele unei instalații cu fascicol de electroni:

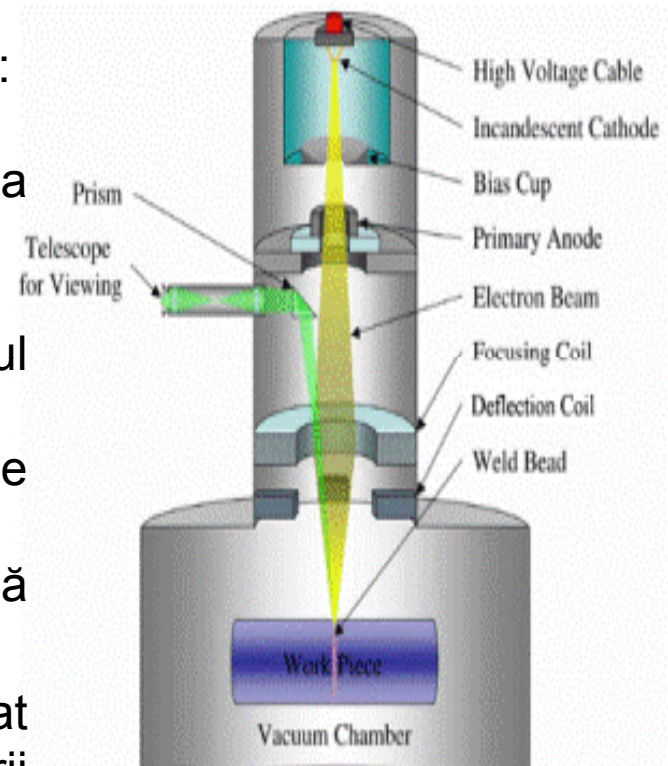
1. Sursa de electroni (tubul electronic) care conține:

- catodul la nivelul căruia se realizează emisia electronica;
- anodul (numit si electrod de accelerare);
- electrodul de formare a fascicolului (electrodul Wehnelt);
- bobina de focalizare (pentru concentrare fluxului de electroni in anumite zone ale materialului);
- bobina de deflexie electromagnetica (reglează traiectoria dorita a FE);

2. Sistem de control (computerizat) destinat controlului si monitorizării funcționarii echipamentului;

3. Camera de lucru (in care se plasează materialul procesat);

4. Echipamentul de vidare a tunului de electroni si a camerei de lucru;



4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.2. Instalații cu fascicol de electroni

Emisia electronica:

- Electronii liberi într-un metal au energia apropiată de W_F ;
- Energia necesară pentru extragerea electronilor este denumită lucru mecanic de extracție (depinde de natura materialului și de temperatura). La T = suficient de mari, energia electronilor de conducție > lucrul mecanic de extracție și astfel electronii părăsesc metalul formând o zonă de sarcină spațială negativă în jurul catodului. Dacă între catod și anod se aplică U , sub acțiunea câmpului electric electronii sunt accelerați și rezulta un curent electric între catod și anod.

Expresia densității de curent J în zona sarcini spațiale

Se considera spațiul dintre două plăci metalice plane și paralele. Ecuația lui Poisson:

$$\Delta V = \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon_0}$$

Densitatea de curent are expresia: $\vec{J} = \rho_v \cdot \vec{v}$ și cu condiția $\frac{m_0 v^2}{2} = q_0 V$

rezulta ecuația: $\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot J \sqrt{\frac{m_0}{2q_0}} V^{-0,5}$ cu: $J = \frac{9\epsilon_0}{4} \sqrt{\frac{2q_0}{m_0}} \frac{1}{d^2} U^{\frac{3}{2}} = C U^{\frac{3}{2}}$

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.2. Instalații cu fascicol de electroni

Emisia electronica:

Expresia densității de curent J in zona sarcini spațiale

Rezulta ca puterea tunului de electroni este: $P = C \cdot U^{\frac{5}{2}}$

Densitatea curentului de saturație termica depinde de temperatura catodului după legea:

$$J_s = AT^2 \exp\left(-\frac{w}{kT}\right)$$

in care w este lucrul mecanic de extracție.

Catodul se realizează din tantal, wolfram etc. pentru ca lucrul mecanic de extracție sa fie cat mai redus. Pentru a produce emisia termoelectronica, catodul se incalzeste la ~ 1600 °C intr-un vid de $\sim 10^{-5}$ tori.

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.2. Instalații cu fascicol de electroni

Emisia electronica:

Anodul se realizează sub forma unei diafragme. Anodul este conectat la un potențial electric (+) astfel încât electronii să fie puternic accelerați. Orificiul central permite trecerea fascicolului de electroni înspre materialul de prelucrat.

Obs. Cu cât puterea este mai mare cu atât potențialul electric aplicat anodului este mai mare.

Electrodul Vehnelt este situat în apropierea catodului și asigură modificarea câmpului electric în această zonă și, prin aceasta, curentul și puterea tunului de electroni.

Tipuri de tunuri electronice:

- tunurile cu simetrie axială (tip Pierce) – $U = 60 \text{ kV}$ și $P = 1 - 30 \text{ kW}$;
- tunurile multicamera;
- tunuri transversale (tip *Stauffer – Temescal*)

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.3. Aplicații practice ale procesării cu fascicol de electroni

A) Topirea cu ajutorul fascicolului de electroni: se realizează topirea metalelor refractare: tantal, niobiul, wolfram, molibden, zirconiu, titanul etc.

B) Metalizarea si depunerea in vid: metalizarea = tratament de acoperire superficiala prin care vaporii de metal se depun pe un substrat. Fascicolul de electroni este folosit pentru a produce evaporarea metalului.

Exista doua tehnologii:

- a) depunerea prin evaporare: se realizează într-o incinta vidata ($10^{-4} - 10^{-3}$ tori) sau cu presiune scăzuta de argon ($\sim 10^{-2}$ tori). Se metalizează suprafața substratului dinspre sursa de vaporii (de aceea procedeul nu este adecvat suprafețelor complexe);
- b) depunerea ionica: substratului I se aplica un potențial electric negativ ($\sim$ kV) in raport cu metalul vaporizat într-o incinta care conține gaz inert la joasa presiune (argon).

Obs. Materialele de acoperire sunt in general metale prețioase sau nobile: cupru, aluminiu, nichel, molibden, tantal, oxizi de titan, magneziu etc.

4. Procesarea materialelor prin bombardament electronic

4.3. Aplicații practice ale procesării cu fascicol de electroni

C) Microprelucrări cu fascicol de electroni: are la baza faptul ca diametrul unui fascicol de electroni puternic focalizat este de $\sim 10 - 30 \mu\text{m}$, având totodată un contur bine definit. Datorita densității de putere foarte mari ($10^5 - 10^9 \text{ W/cm}^2$), la impactul dintre fascicol si material se produce evaporarea materialului, rezultând astfel perforări si tăieri foarte fine si precise (cu aplicații in nanotehnologii).

D) Sudura cu fascicol de electroni: este utilizata pentru sudura metalelor cu oxidabilitate mare. De asemenea, se utilizează pentru asamblarea unor componente deosebite (turbine, reactoare nucleare etc).

E) Tratamente de durificare superficiala: aceasta tehnica are avantajul (fata de durificarea prin inducție) unei încălziri mult mai rapide si a unei localizări mult mai precise.

F) Iradierea cu fascicol de electroni a materialelor organice in vederea modificării proprietatilor: in aceasta tehnica sunt folosite fascicule de electroni accelerați in potențiale foarte înalte ($\sim 150 \text{ kV}$). Electronii de înalta energie produc ionizarea si excitarea atomilor si moleculelor suportului. Astfel sunt favorizate fenomenele de polimerizare, copolimerizare a diverșilor monomeri, difuzia anumitor substanțe etc.

5. Procesarea materialelor prin deformare electromagnetica

5.1. Noțiuni generale

Def. Deformarea electromagnetica reprezintă un procedeu de modificare a formei geometrice a unor piese din materiale conductoare prin acțiunea forțelor electromagnetice.

Schema de principiu a unei instalații de procesare prin deformare electromagnetica: redresor, baterie de condensatoare (sursa de înmagazinare a energiei), bobina de deformare (in interiorul căreia se plasează piesa de procesat) si comanda descărcării bateriei (bobina de inducție si eclator).

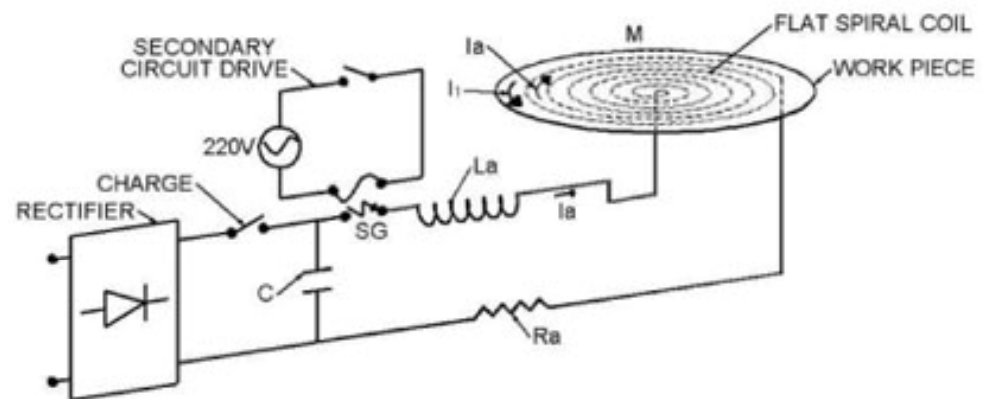
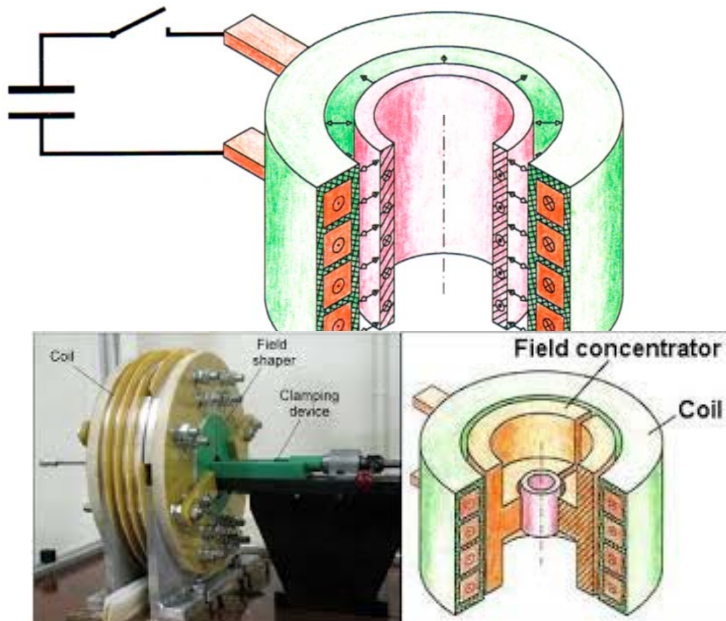


Figure 1. Scheme of the electromagnetic forming system.

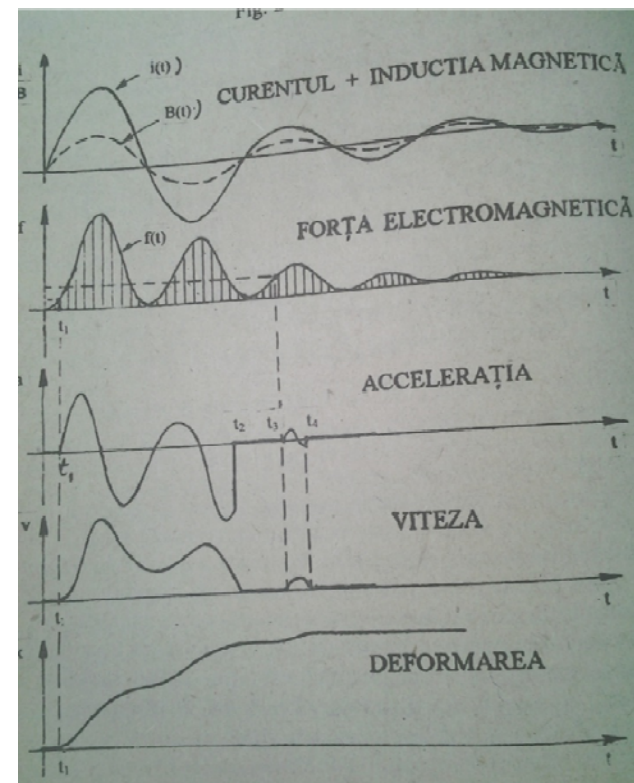
5. Procesarea materialelor prin deformare electromagnetica

5.1. Noțiuni generale

Principiu. Prin interacțiunea dintre câmpul magnetic produs de curentul prin bobina și curentul indus în piesa conductoare rezulta forțe de interacțiune (electromagnetice) de respingere între bobina și piesa.

Analiza fenomenologică pune în vedere că pentru evaluarea cantitativă a procesului este necesară soluționarea problemelor:

- regimul tranzitoriu al descărcării bateriei de condensatoare pe o sarcină de tip R-L pentru determinarea variației în timp a curentului electric în bobina de lucru;
- câmpul electromagnetic în dispozitivul de formare electromagnetica în scopul determinării variației în timp a forțelor electromagnetice;
- dinamica deformării piesei în condițiile solicitărilor cunoscute.



6. Separarea magnetica a materialelor

6.1. Noțiuni generale

Principiul de baza al separării magnetice: acțiunea diferita a forțelor magnetice asupra componentelor unui amestec. Forțele magnetice sunt determinate de prezenta câmpurilor magnetice si sunt in concurenta cu forte de alta natura (greutate, centrifuga...).

1. Separarea cu acțiune magnetica directa: acțiunea directa asupra componentelor unui amestec (sunt separate materialele care se magnetizează diferit in funcție de valoarea susceptivitatii magnetice).
2. Separarea cu acțiune magnetica indirecta: acțiunea câmpului magnetic se exercita asupra mediului in care sunt imersate particulele amestecului (se pot separa, in funcție de densitate, materiale nemagnetice imersate in lichide magnetizate).

Obs. Separarea in funcție de valoarea susceptivitatii magnetice este denumita separare magnetica de ordinul I. Separarea prin acțiunea directa in funcție de conductivitatea electrica este denumita separare magnetica de ordinul II.

6. Separarea magnetica a materialelor

6.2. Forțe implicate în procesul separării magnetice

A) Actiuni ponderomotoare de natura magnetica

1. **Forța Lorentz**: acțiunea câmpului magnetic de inducție $\vec{B}$ asupra unei sarcini electrice punctiforme q , care se deplasează cu viteza $\vec{v}$:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

2. **Forța electromagnetica**: $\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B}$

3. **Forța care se exercita asupra unui mic corp magnetizat** (de moment $\vec{m}$) aflat în câmp magnetic neuniform (sau într-un punct al unui corp caracterizat prin magnetizația $\vec{M}$): $\vec{F}_m = \text{grad}(\vec{m} \cdot \vec{B}) = (\vec{m} \cdot \text{grad})\vec{B}$ $\vec{F}_m = \text{grad}(\vec{M} \cdot \vec{B}) = (\vec{M} \cdot \text{grad})\vec{B}$

4. **Forța de neomogenitate magnetica** datorată variației locale a permeabilității magnetice μ :

$$\vec{F}_{nm} = -\frac{1}{2} H^2 \text{grad} \mu$$

5. **Forța de magnetostricțiune** datorată variației permeabilității cu concentrația-densitatea amestecului (d):

$$\vec{F}_{ms} = \frac{1}{2} \text{grad} \left(d \cdot H^2 \frac{\partial \mu}{\partial d} \right)$$

6. Separarea magnetica a materialelor

6.2. Forțe implicate in procesul separarii magnetice

B) Efecte hidrodinamice

Obs. Unele procedee de separare magnetica presupun dispersarea componentelor amestecului intr-un mediu lichid, car in care forțele hidrodinamice intervin, pe langa cele magnetice, in procesul de separare.

Forțele care acționează asupra unui lichid pot fi:

- **forte de volum** (proportionale cu volumul): forța de greutate, forța centrifuga, forța electromagnetica ce se exercita asupra unui lichid conductor ...
- **forte de suprafata** = tensiuni superficiale care se exercita intr-un strat foarte subtire (de întindere sau compresie când sunt orientate pe direcția normalei la suprafata sau tangențiale – de forfecare, când sunt tangente la suprafata).

Obs. Intr-un lichid aflat in repaos, tensiunile de forfecare sunt nule iar tensiunea normala (la suprafata) este egala cu presiunea luata cu semn schimbat.

Conditia necesara si suficienta ca un lichid sa fie in echilibru mecanic este:

in care $\vec{f}$ reprezinta densitatea volumica a fortei.
$$\vec{f} = -\text{grad}p$$

6. Separarea magnetica a materialelor

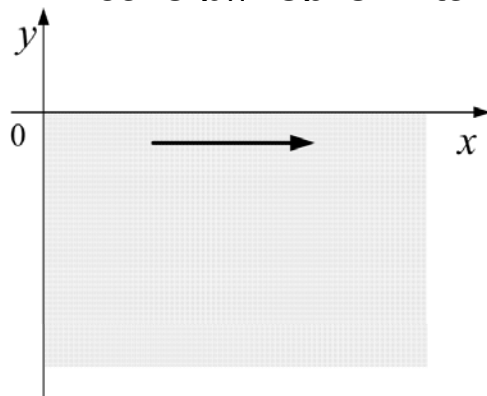
6.2. Forțe implicate in procesul separarii magnetice

B) Efecte hidrodinamice

In cazul unui lichid de densitate d aflat in câmp gravitațional (acelerația gravitațională g), condiția de echilibru mecanic este:

$$\vec{f} = d \cdot \vec{g} \quad \frac{\partial p}{\partial y} = d \cdot g \quad \Rightarrow \quad p = p_0 + d \cdot g \cdot y$$

in care p_0 reprezintă valoarea presiunii la $y = 0$ (coordonata verticala).



Consideram un lichid aflat in mișcare lenta, unidimensională, uniformă, in lungul axei Ox: $\vec{v}[v(y), 0, 0]$

Tensiunea de forfecare σ la o coordonata y este proporțională cu derivata dv/dy a vitezei:

$$\sigma = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$$

η fiind denumita viscozitate dinamica.

Raportul $\nu = \frac{\eta}{d}$ se numeste viscozitate cinematica si reprezinta capacitatea transportului molecular de a anula gradientul de viteza.

6. Separarea magnetica a materialelor

6.2. Forțe implicate in procesul separarii magnetice

B) Efecte hidrodinamice

Linia de curent = curba la care vitezele sunt tangente in fiecare punct.

Mișcarea laminara = caracterizează valori relativ reduse ale vitezei, traiectoriile particulelor fiind curbe continui (particulele fluide isi conserva individualitatea si liniile de curent au o distribuție bine definita);

Mișcare turbulentă = mișcare dezordonata si aleatorie a particulelor cu deplasări si in sens transversal direcției principale de curgere. In curgerea turbulentă viteza locala prezintă pulsații in jurul unei valori medii.

Se constata ca parametrii determinanți ai regimului de curgere (in conducte cilindrice) sunt: viteza lichidului; diametrul jetului si vâscozitatea cinematica. Acești parametri se reunesc in criteriul adimensional numit numărul Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot d_j}{\nu}$$

Pentru conducte cilindrice, trecerea de la curgere laminara la curgere turbulentă se face pentru $Re > 2300$.

6. Separarea magnetica a materialelor

6.2. Forțe implicate in procesul separarii magnetice

B) Efecte hidrodinamice

Antrenarea hidrodinamica: un lichid in mișcare relativa fata de o particula imersata exercita asupra acesteia o forța de antrenare (dragare):

$$F_d = C_d \pi R^2 \frac{d \cdot v^2}{2}$$

in care v reprezintă viteza relativa, R raza particulei, C_d este coeficientul de dragare (funcție de Re) si d densitatea lichidului.

Asupra unei particule sferice de raza R aflata intr-un punct al unui jet de fluid caracterizat prin gradientul de viteza dv/dy se exercita forța transversala (perpendiculara pe direcția de curgere):

$$F_t = 81,2 \cdot R^2 (d \cdot \eta)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot v$$

Atunci când intr-un lichid exista un gradient de presiune dp/dx , forța care se exercita asupra unei particule sferice este:

$$F_p = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{4\pi R^3}{3}$$

6. Separarea magnetica a materialelor

6.3. Separarea magnetica de ordinul I

Făcând ipoteza ca prezenta unei particule magnetizate nu modifica semnificativ repartiția câmpului magnetic in spațiul înconjurător, forța magnetica care se exercita asupra particulei este:

$$\vec{F}_m = (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{B} = \mu_0 (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{H}$$

in care **M** reprezintă magnetizația locala a particulei.

Daca particula este liniara din punct de vedere magnetic (**M** = $\chi_m \mathbf{H}$), rezulta:

$$\vec{F}_m = \mu_0 \chi_m H \cdot \text{grad} H = \frac{1}{2} \mu_0 \chi_m \text{grad} H^2$$

Obs. Rezulta, deci, ca sensul forței magnetice coincide cu cel al gradientului de câmp magnetic pentru particulele paramagnetice ($\chi_m > 0$) si este opus pentru particulele diamagnetice ($\chi_m < 0$).

Cei trei parametri care determina modulul forței magnetice sunt: susceptivitatea magnetica a particulei, intensitatea câmpului magnetic si gradientul câmpului magnetic.

⇒ Separatoarele magnetice clasice (de ordinul I) asigura extragerea particulelor feromagnetice din amestecurile care au componente paramagnetice si diamagnetice (slab magnetice)

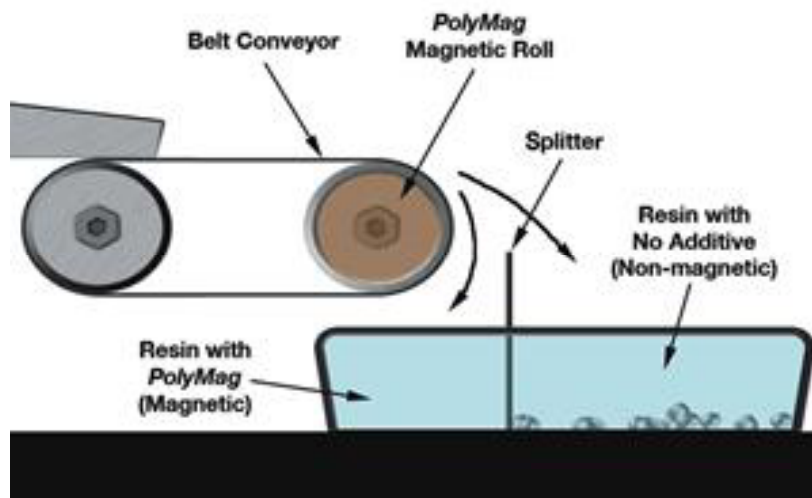
6. Separarea magnetica a materialelor

6.3. Separarea magnetica de ordinul I

A) Separarea magnetica clasica

Se realizează în câmpuri magnetice de intensitate redusă și se aplică amestecurilor în care fracția magnetică este constituită din componente feromagnetice de dimensiuni relativ mari ($> 100 \mu\text{m}$).

Separarea uscata convențională: se realizează în separatoare cu tambur (particulele magnetice sunt reținute pe tamburul cilindric iar cele nemagnetice sunt îndepărtate de forțele gravitaționale și centrifuge).

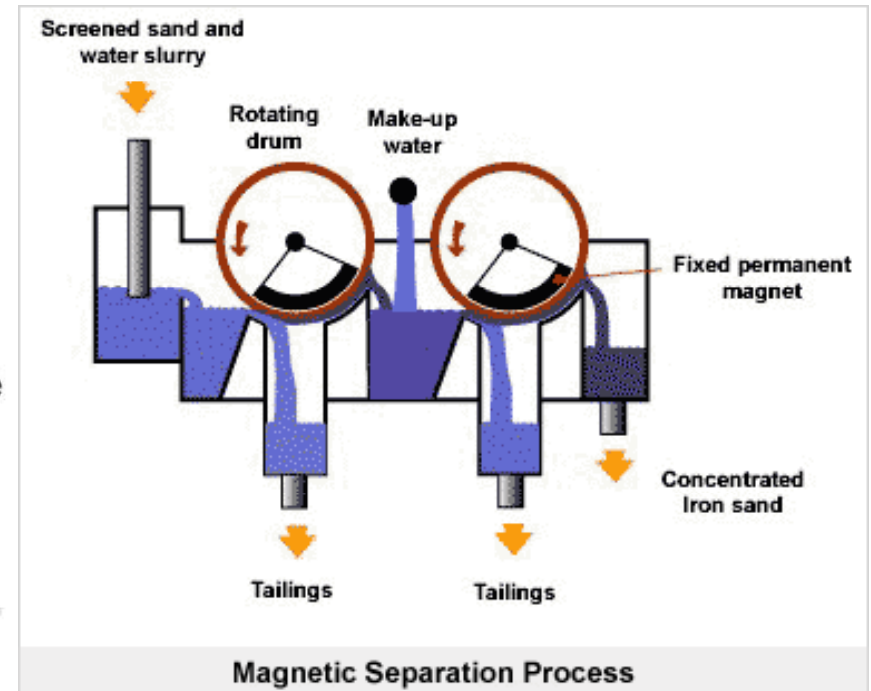
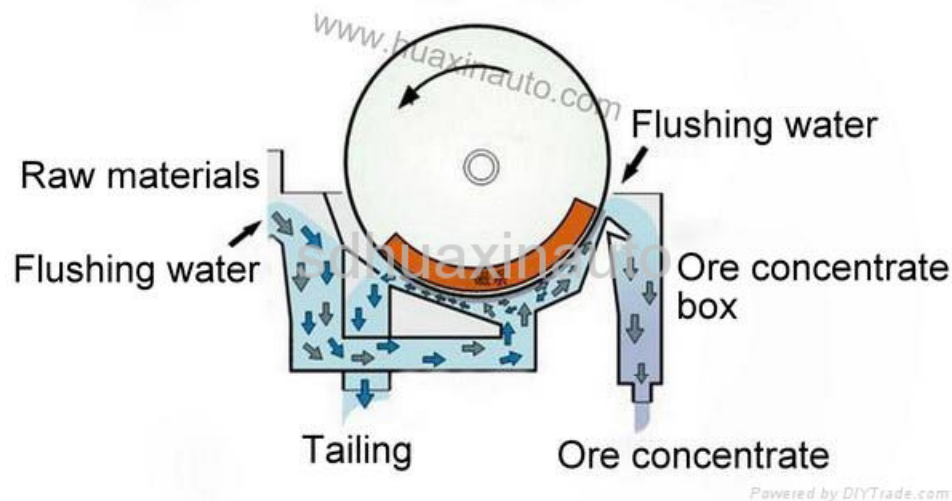


6. Separarea magnetica a materialelor

6.3. Separarea magnetica de ordinul I

A) Separarea magnetica clasica

Separarea magnetica umeda: se practica in cazul amestecurilor cu granulatie fina. In aceasta intervin si forte de actiune hidrodinamica a mediului lichid.



6. Separarea magnetica a materialelor

6.3. Separarea magnetica de ordinul I

A) Separarea magnetica clasica umeda



Procesarea electromagnetica a materialelor
Conf.dr.ing. L.M. Dumitran

6. Separarea magnetica a materialelor

6.3. Separarea magnetica de ordinul I

B) Separarea magnetica in câmpuri magnetice de mare intensitate

Cu cât susceptivitatea magnetica a particulelor unui amestec este mai mica, cu atât câmpul magnetic necesar sortării trebuie să fie mai intens. O soluție adoptată care permite obținerea unor câmpuri magnetice intense se bazează pe utilizarea unui circuit magnetic cu întrefier cât mai redus.

Așa cum rezulta din expresia forței magnetice, pe lângă valori ridicate ale câmpului este și un gradient de câmp ridicat.

SOLUȚIE = introducerea unor elemente feromagnetice în întrefier (cu cât elementele feromagnetice sunt mai mici cu atât gradientul de câmp este mai mare!).

Separatorul de tip FRANTZ: are plasate în interiorul unui solenoid grile din benzi feromagnetice care constituie suprafețele colectoare.

Separatorul de tip JONES: în interiorul unui electromagnet sunt dispuse plăci canelate cu distanțe între vârfurile canelurilor de 250 – 1500 μm .

7. Separarea electrostatica a amestecurilor granulare

Amestecuri de materiale electroizolante cu proprietati electrice diferite sau amestecuri de materiale izolante si conductoare (metalice).

7.1. Principiul separării electrostatice

Incarcarea cu sarcina electrica a particulelor prin trecerea amestecului printr-o zona in care campul electric este intens si sarcina spatiala (ionica) are o densitate de volum importanta (DESCARCARE CORONA)



Sub acțiunea forțelor electrostatice (intre particulele electrizate si imaginile lor) particulele raman atașate pe suprafața tamburului. In funcție de proprietățile electrice (conductivitate), acestea se descărca intr-un timp mai lung sau mai scurt

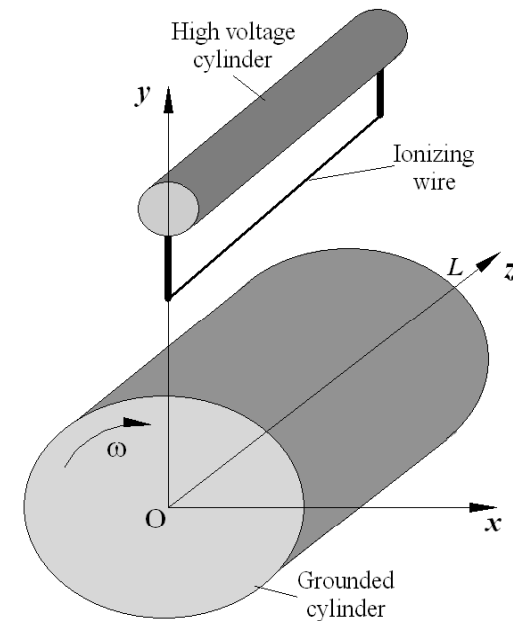
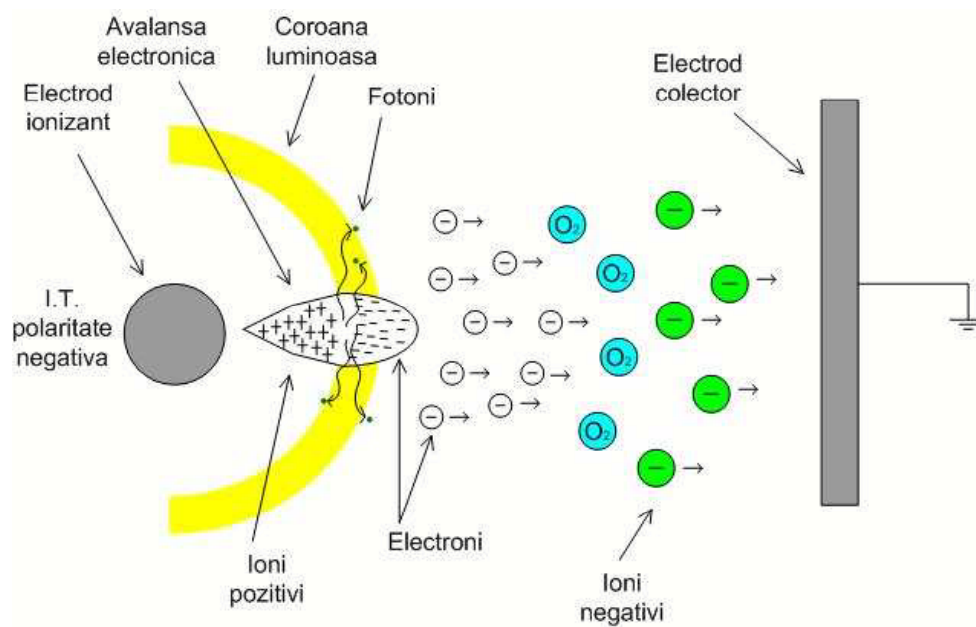


Particulele izolatoare raman atașate pe tambur iar cele conductoare (care isi pierd sarcina foarte repede) cad, sub acțiunea propriei greutate si a forței centrifuge. Astfel particulele metalice si cele izolatoare au traiectorii diferite si pot fi colectate separat.

7. Separarea electrostatica a amestecurilor granulare

7.2. Incarcarea cu sarcina electrica a particulelor

A) Descarcarea corona



7. Separarea electrostatica a amestecurilor granulare

7.2. Incarcarea cu sarcina electrica a particulelor

B) Incarcarea cu sarcina electrica a particulelor

Particule dielectrice sferice

$$\frac{dQ_p}{dt} = \frac{1}{\tau} Q_p^s \left(1 - \frac{Q_p}{Q_p^s} \right)^2$$

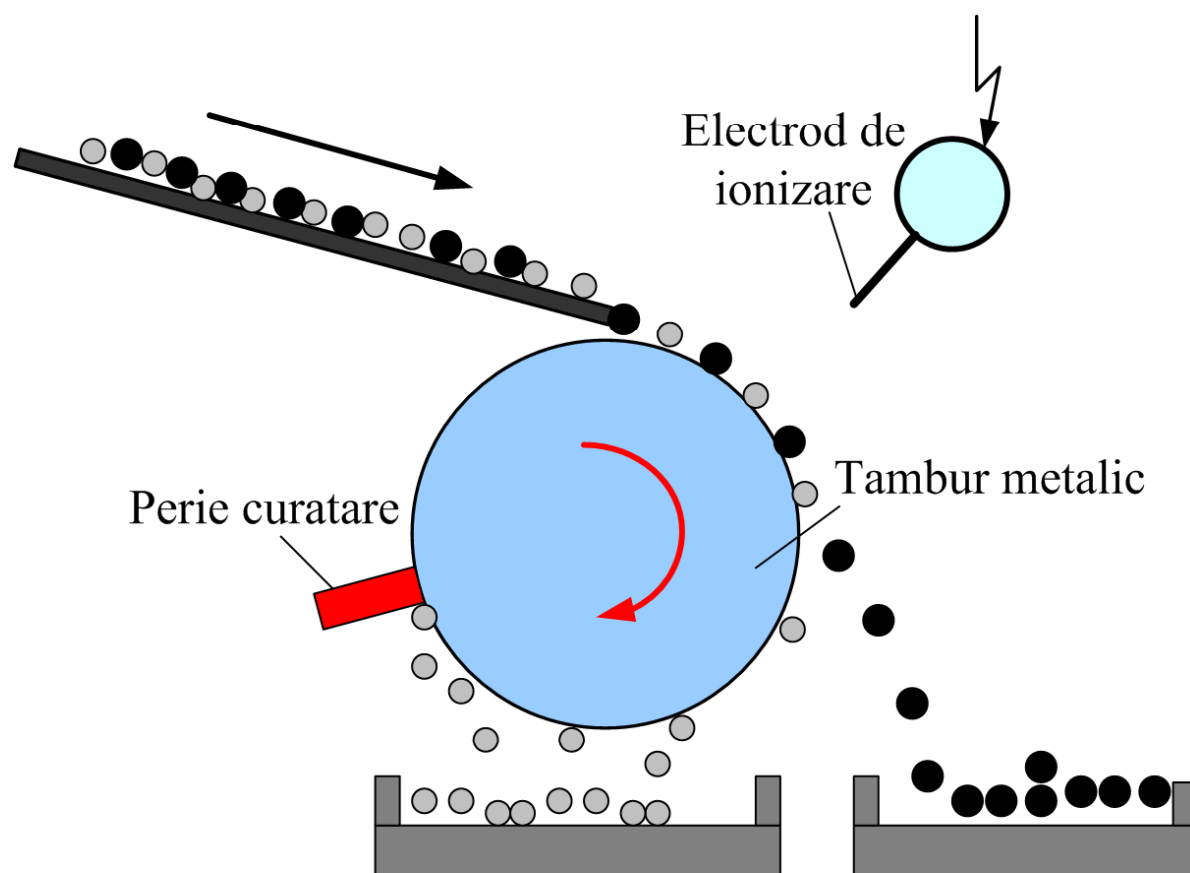
$$Q_p^s = 3\pi\epsilon_0 d_p^2 E \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}$$

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{\rho K_i} \quad \begin{array}{l} \rho[\text{C/m}^3] - \text{densitatea de volum a sarcinii spatiale} \\ \epsilon_r = \text{permitivitatea relativa} \end{array}$$

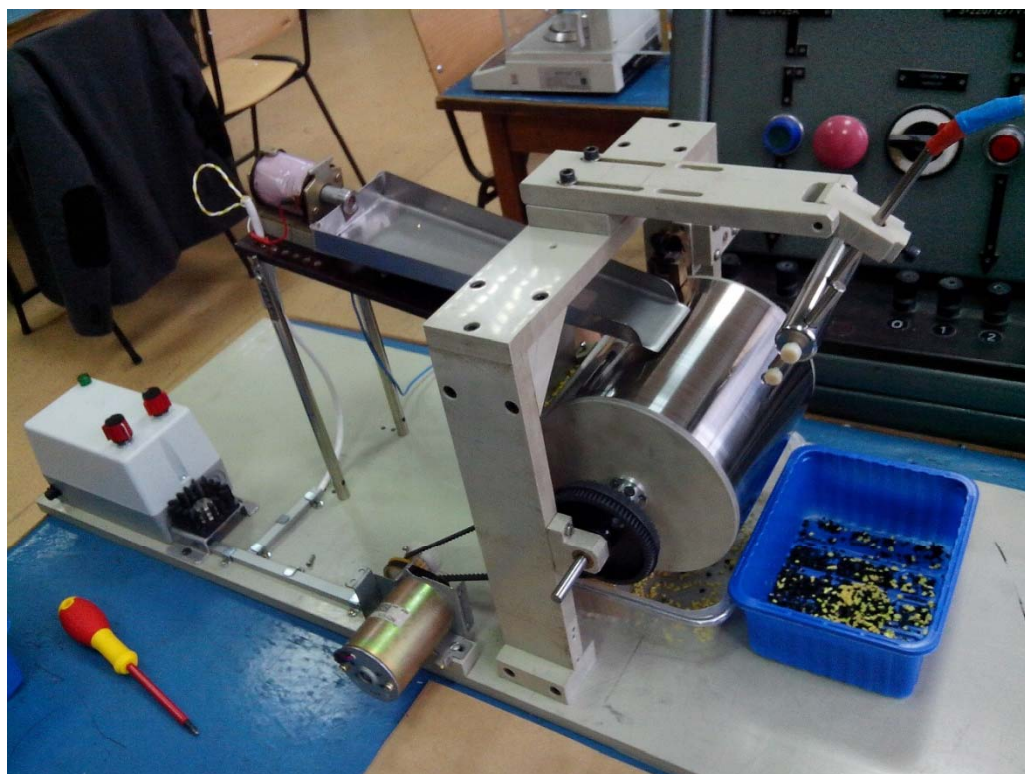
Particule conductoare
(incarcare prin inductie)

$$Q_{pc} = \frac{1}{6} \pi^3 \epsilon_0 d_p^2 E$$

7. Separarea electrostatica a amestecurilor granulare



7. Separarea electrostatica a amestecurilor granulare



Elementele componente ale separatorului electrostatic cu tambur

- 1 - electrod de ionizare (corona) dual de tip fir-cilindru;
- 2 – tambur conectat la pamant;
- 3 - cutii colectoare;
- 4 - sursă de înaltă tensiune 40 kV, curent continuu, reversibilă;
- 5– perie dublă de stergere
- 7- vibrotransportor;