

Modul 4. Elemente generale de utilizare a energiei electrice

4.1 Introducere

Tehnologiile electrice sunt larg întâlnite în cele mai diverse domenii industriale: *industria metalurgică*, la topirea și rafinarea metalelor și la încălzirea semifabricatelor; *industria chimică*, la realizarea reacțiilor chimice, la încălzirea coloanelor și recipientilor, la producerea și prelucrarea materialelor plastice; *industria constructoare de mașini*, la matrițare, forjare, uscare, călire, lipire, sudare; *industria extractivă*, la reducerea minereurilor; *industria materialelor de construcții*, la topirea și tratamentul sticlei; *industria electronică*, la producerea semiconductoarelor; *industria lemnului*, la uscarea lemnului și a îmbinărilor încleiate; *industria alimentară*, la uscarea, prepararea și sterilizarea produselor etc.

Utilizarea tehnologiilor electrice este caracterizată de avantaje importante față de tehnologiile clasice de prelucrare [4.1]:

- se pot obține temperaturi de peste 2200 K; unele procese tehnologice din industria modernă necesită temperaturi de până la 20000 K care pot fi obținute numai în cuptoarele cu plasmă;
- temperatura poate fi reglată precis, existând posibilitatea dozării căldurii în funcție de necesitățile procesului tehnologic și a unui control permanent și precis al energiei electrice transformate în căldură,
- spațiul de lucru fiind închis, prelucrarea termică se poate realiza și în atmosferă controlată, cu gaze de protecție sau în vid;
- se poate asigura funcționarea intermitentă, instalația putând fi adusă repede în stare de funcționare la parametri nominali;
- funcționarea instalațiilor electrotermice se caracterizează prin valori relativ reduse ale consumurilor specifice de energie;
- prin introducerea calculatoarelor de proces există posibilitatea automatizării complete a tehnologiilor electrice;
- spațiul ocupat de instalațiile electrice este relativ redus, gama de puteri a acestor instalații este foarte largă, de la câteva sute de wați, la aparatele de uz casnic și de laborator, la zeci de megawați, în cazul echipamentelor industriale, iar durata proceselor electrice este relativ redusă.

Desigur că tehnologiile electrice prezintă și o serie de aspecte care trebuie luate în considerație la evaluarea tehnologiilor competitive:

a) Randamentul energetic η_{en} al tehnologiilor electrice este relativ redus (scăzut) și este puternic influențat de randamentul η_{CE} de producere a energiei electrice în centralele electrice

$$\eta_{en} = \eta_{el} \cdot \eta_{CE}, \quad (4.1)$$

în care η_{el} este randamentul procesului electric.

Analiza relației (4.1) pune în evidență faptul că randamentul energetic global al unei tehnologii electrice este cel mult egal cu randamentul de producere a energiei electrice η_{CE} (egal, la centralele electrice actuale, cu circa 0,4). Desigur că numai în cazuri izolate o tehnologie electrică poate fi superioară, din punctul de vedere al randamentului energetic, unei tehnologii clasice. Ca exemplu, în figura 4.1 [4.2] este prezentat comparativ bilanțul energetic al procesului de încălzire a unei bare din oțel, la încălzirea într-un cuptor cu gaz și la încălzirea electrică (prin trecerea unui curent electric de mare intensitate prin bară). În exemplul din figura

4.1 (În acest caz) randamentul de prelucrare electrică este superior randamentului de prelucrare pe cale termică. Această situație nu este întâlnită în mod obișnuit.

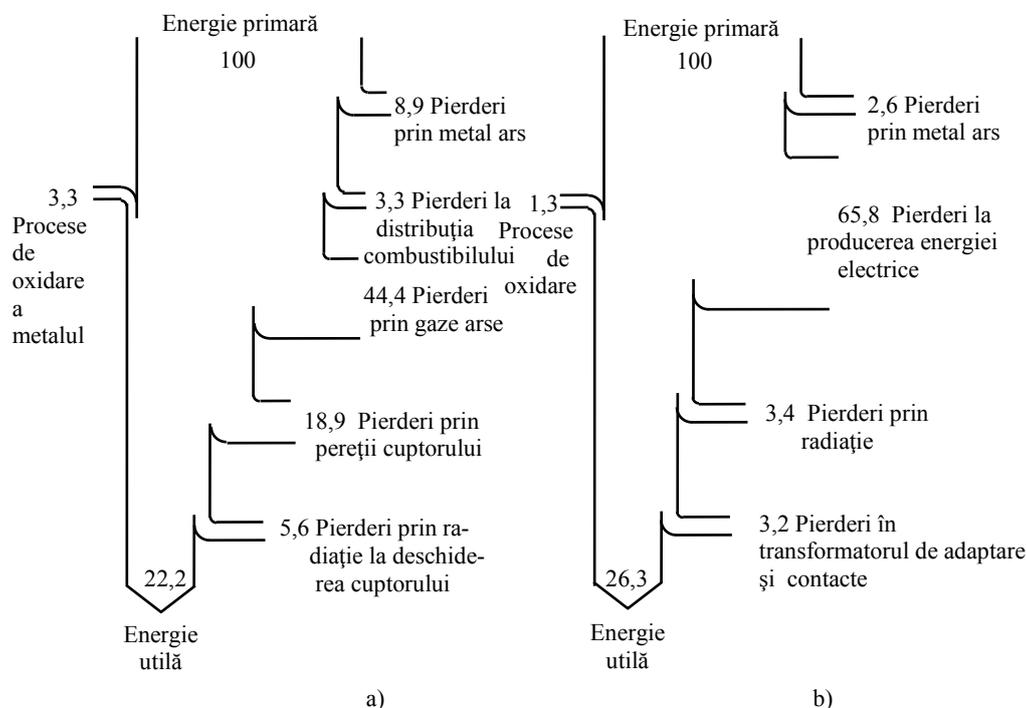


Fig. 4.1 – Bilanțul energetic la încălzirea unei bare:
a) încălzirea în cuptor cu combustibil gazos; b) încălzirea electrică directă.

Analiza introducerii sau înlocuirii unor procese industriale clasice prin tehnologii electrice, nu poate fi redusă numai la dimensiunea sa energetică. Studiile efectuate au arătat că economia de energie obținută prin introducerea tehnologiilor electrice, nu este totdeauna determinantă. O pondere importantă o au reducerea costurilor pentru depoluare, reducerea cheltuielilor pentru forța de muncă prin creșterea productivității la introducerea automatizărilor în procesul de producție, creșterea volumului producției, creșterea prețului de vânzare al produsului prin creșterea calității acestuia, reducerea consumului de materiale. De asemenea, trebuie luate în considerare îmbunătățirea condițiilor de muncă și reducerea nivelului de poluare tehnologică.

b) Costul unității de energie electrică este superior costului unității de energie obținută din gaze. Astfel, pentru costurile actuale ale purtătorilor de energie, circa 80 €/MWh energie electrică și circa 200 €/1000 m³ gaz metan cu 40000 kJ/m³, rezultă pentru gazul metan un preț de circa 18 €/MWh, inferior costului pentru energia electrică. Acest aspect prezintă un interes deosebit la analiza economică a soluțiilor. (Mai este valabila situația ?)

c) Utilizarea tehnologiilor electrice și, mai ales, procesele de reglare sunt însoțite de apariția unor importante perturbații electromagnetice în rețeaua electrică de alimentare. Costul echipamentelor pentru limitarea perturbațiilor electromagnetice trebuie luat în considerare la evaluarea economică a soluțiilor.

4.2 Procese electrotermice

Procesele electrotermice din industrie consumă circa 35% din energia produsă în centralele electrice. În figura 4.2 [4.3] sunt prezentate principalele procese de obținere a căldurii

necesară prelucrării la cald, în funcție de frecvența tensiunii de alimentare utilizată în proces.

Fiecare dintre procesele de încălzire indicate în figura 4.2 are un domeniu specific de utilizare.

4.2.1 Încălzirea rezistivă

Principalele procese de încălzire bazate pe disiparea căldurii în elemente rezistive sunt indicate în figura 4.3 [4.4].

4.2.1.1 Încălzirea rezistivă directă

La încălzirea rezistivă directă, materialul supus prelucrării este parcurs de curent electric, iar căldura disipată prin efect Joule asigură temperatura necesară. În cazul încălzirii indirecte sunt utilizate elemente încălzitoare speciale, parcurse de curent electric, care transmit energie termică obiectului supus prelucrării prin radiație, convecție sau conducție.

Într-o primă aproximație, temperatura θ a obiectului supus încălzirii poate fi determinată pe baza relației [4.2]

$$\theta = \theta_{\max} \cdot (1 - e^{-t/T_i}) + \theta_i \cdot e^{-t/T_i}, \quad (4.2)$$

în care θ_i este temperatura inițială a procesului de încălzire, T_i – constanta de timp, θ_{\max} – temperatura maximă a procesului.

Mărimile θ_{\max} și T_i sunt determinate experimental pentru fiecare configurație a procesului analizat.

Pentru un anumit obiect și o anumită configurație, creșterea vitezei de încălzire (creșterea productivității) până la temperatura de prelucrare este posibilă, practic, numai prin creșterea valorii θ_{\max} , direct proporțională cu puterea disipată în elementul încălzitor.

Procesul de răcire poate fi descris, într-o primă aproximație, de relația [4.2]

$$\theta = \theta_d \cdot e^{-t/T_r} + \theta_0 \cdot (1 - e^{-t/T_r}), \quad (4.3)$$

în care θ_d este temperatura obiectului în momentul începerii procesului de răcire, θ_0 – temperatura mediului ambiant, T_r – constanta de timp a procesului de răcire.

Constanta de timp T_r este determinată experimental pentru fiecare configurație în parte.

Creșterea vitezei de răcire (creșterea productivității) poate fi obținută practic numai prin reducerea constantei de timp T_r , ceea ce rezultă prin răcirea forțată a obiectului încălzit.

Instalațiile uzuale pentru încălzirea rezistivă, cu acțiune directă (fig.4.4) sunt conectate între două faze, ceea ce poate determina importante nesimetrii în rețeaua electrică de alimentare

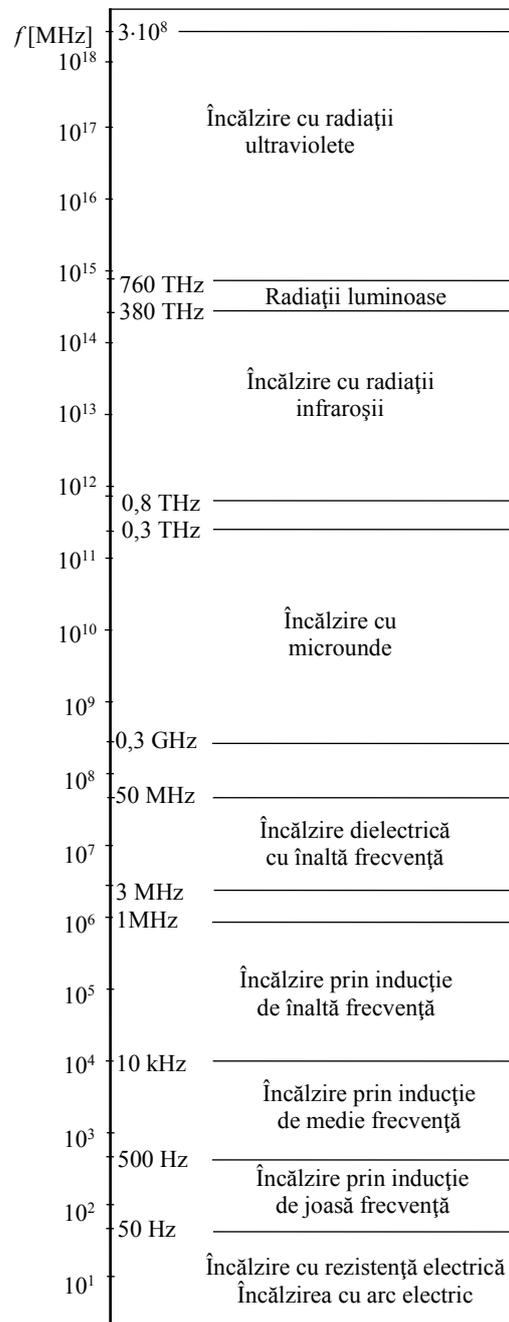


Fig. 4.2 – Domenii de frecvență ale proceselor electrotermice.

Pentru limitarea nesimetriilor, aceste instalații sunt conectate la rețeaua electrică prin intermediul unei scheme de simetrizare S. Condensatorul C conectat la bornele transformatorului T de curent mare asigură realizarea unui factor de putere unitar la bornele acestuia.

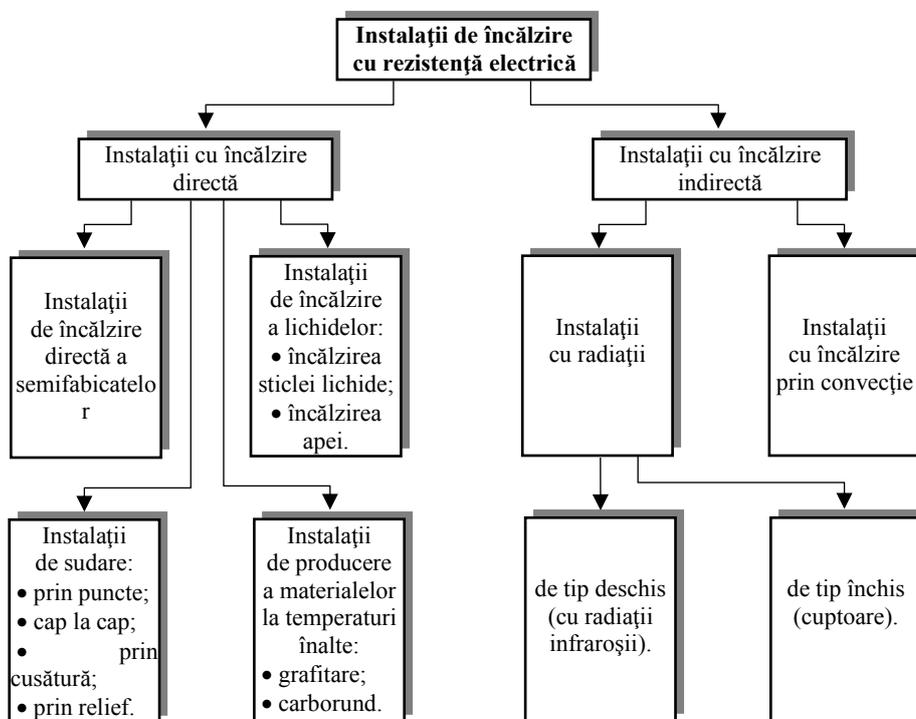


Fig. 4.3 – Instalații de încălzire cu rezistență electrică.

Realizarea unor contacte K_1 și K_2 corespunzătoare între corpul supus procesării și instalația electrică de alimentare are o influență importantă asupra randamentului procesului.

Utilizarea acestei tehnologii de încălzire, în cazul prelucrării la cald a unor obiecte în cadrul unui flux continuu, determină o eficiență ridicată procesului, dar conectările și deconectările rapide ale instalației pentru înlocuirea piesei încălzite poate (pot) conduce la variații importante ale tensiunii la barele de alimentare.

Realizarea bilanțului energetic pentru instalațiile de încălzire cu acțiune directă trebuie să includă și pierderile suplimentare care apar în schema de simetrizare, precum și cele datorate soluțiilor pentru limitarea variațiilor de tensiune la barele de alimentare.

În instalațiile uzuale, tensiunea din secundarul transformatorului are valori de 5 ... 150 V, puterea transformatorului de curent intens poate fi de 0,1 ... 10 MVA, curentul electric I poate atinge 40 kA, iar factorul de putere natural λ poate avea valori de 0,3 ... 0,9.

Pentru cazul cel mai întâlnit al încălzirii semifabricatelor din oțel, consumul specific de energie electrică este de 200 ... 350 kWh/t.

Randamentul electric η_{el} al instalației se determină din relația:

$$\eta_{el} = \frac{W_u}{W}, \quad (4.4)$$

în care energia activă W absorbită pe durata procesului de încălzire din rețeaua electrică de alimentare rezultă din:

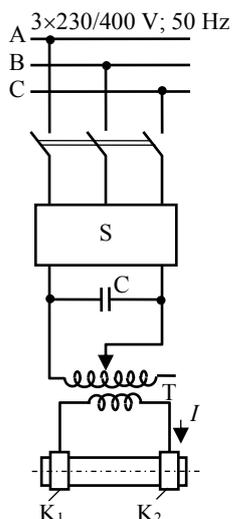


Fig. 4.4 – Instalație de încălzire directă.

$$W = \Delta W_0 + \Delta W_{tr} + \Delta W_{rs} + \Delta W_c + W_u. \quad (4.5)$$

În relația (4.5) au fost utilizate notațiile: unde

ΔW_0 este energia electrică activă disipată în transformatorul de curent intens, la funcționarea în gol,

ΔW_{tr} – pierderile active (de energie electrică activă) în înfășurarea transformatorului la funcționarea în sarcină,

ΔW_{rs} – pierderile active (de energie electrică activă) în rețeaua scurtă (legătura dintre transformatorul de curent mare și obiectul încălzit),

ΔW_c – pierderile active (de energie electrică activă) în contactele cu semifabricatul de încălzit,

W_u – energia activă utilizată pentru încălzirea corpului la temperatura necesară θ_d ; într-o primă aproximație poate fi determinată din relația

$$W_u = m \cdot c \cdot (\theta_d - \theta_i), \quad (4.6)$$

în care m este masa obiectului încălzit, c – căldura masică, iar θ_i – temperatura inițială a procesului de încălzire.

Pentru un calcul mai exact, în relația (4.6) se poate lua în considerație modificarea căldurii masice c odată cu creșterea temperaturii corpului.

4.2.1.2 Instalații de încălzire rezistivă indirectă

Instalațiile de încălzire cu acțiune indirectă cuprind o largă diversitate de echipamente funcționând cu randamente ridicate, productivitate mare, cu reducerea importantă a poluării mediului ambiant și asigurând posibilitatea automatizării și robotizării producției.

Cuptoarele electrice cu rezistoare cu încălzire indirectă au o largă utilizare în industria modernă, o mare varietate de tipuri constructive și o gamă foarte diversă a aplicațiilor.

Aceste tipuri de cuptoare sunt utilizate pentru efectuarea de tratamente termice, pentru producerea la cald a unor materiale plastice, tratamentul termic al pieselor din sticlă, uscarea produselor ceramice, a lemnului, hârtiei etc. În categoria acestor cuptoare intră și cuptoarele de laborator, aparatele electrocasnice, ca și numeroasele instalații de uscare din industria chimică și alimentară.

Unele dintre tipurile cele mai întâlnite de cuptoare cu acțiune intermitentă (proces discontinuu determinat de introducerea și scoaterea obiectelor supuse procesării la cald) sunt indicate în figura 4.5 [4.5].

Zidăria cuptorului, compusă în mod obișnuit din stratul interior 2, rezistent la temperatură înaltă și stratul exterior 1, un bun izolant termic, are o pondere importantă în bilanțul energetic al cuptorului. Căldura înmagazinată în zidărie, precum și pierderile termice prin zidărie, influențează în mare măsură eficiența procesului.

Transferul de căldură, de la elementul încălzitor 3 la obiectul încălzit 5, se face, practic, numai prin radiație în cazul cuptoarelor de medie temperatură ($\theta = 600 \dots 1200^\circ\text{C}$) și a celor de înaltă temperatură (peste 1200°C) și, practic, numai prin convecție în cazul cuptoarelor de joasă temperatură (sub 600°C).

Închiderea corectă a cuptorului (în fig. 4.5 c, închiderea ușii 5 a cuptorului se realizează cu sistemul hidraulic 6) permite limitarea pierderilor prin neetanșeități.

Dintre cuptoarele cu acțiune continuă, în figura 4.6, sunt indicate cele cu bandă transportoare (fig. 4.6 a), cu carusel (fig. 4.6 b) și cu monorai (fig. 4.6 c).

Pentru toate tipurile de cuptoare cu rezistență electrică, cu acțiune indirectă, reglarea temperaturii în cuptor, astfel încât să rezulte valoarea optimă pentru prelucrare, are un rol important în obținerea unor produse de calitate ridicată, în condițiile unui consum corespunzător de energie electrică. Temperatura necesară prelucrării și funcția de variație a acesteia pe durata

procesului de încălzire sunt mărimi care se înscriu în blocul de control automat al temperaturii. În funcție de caracteristicile obiectelor supuse încălzirii sunt utilizate sisteme de control bipozițional (fig. 4.7), de reglare continuă (fig. 4.8) sau de reglare cu controlul lățimii impulsului (*PWM – Pulse Width Modulation*) (fig. 4.9) [4.6, 4.7].

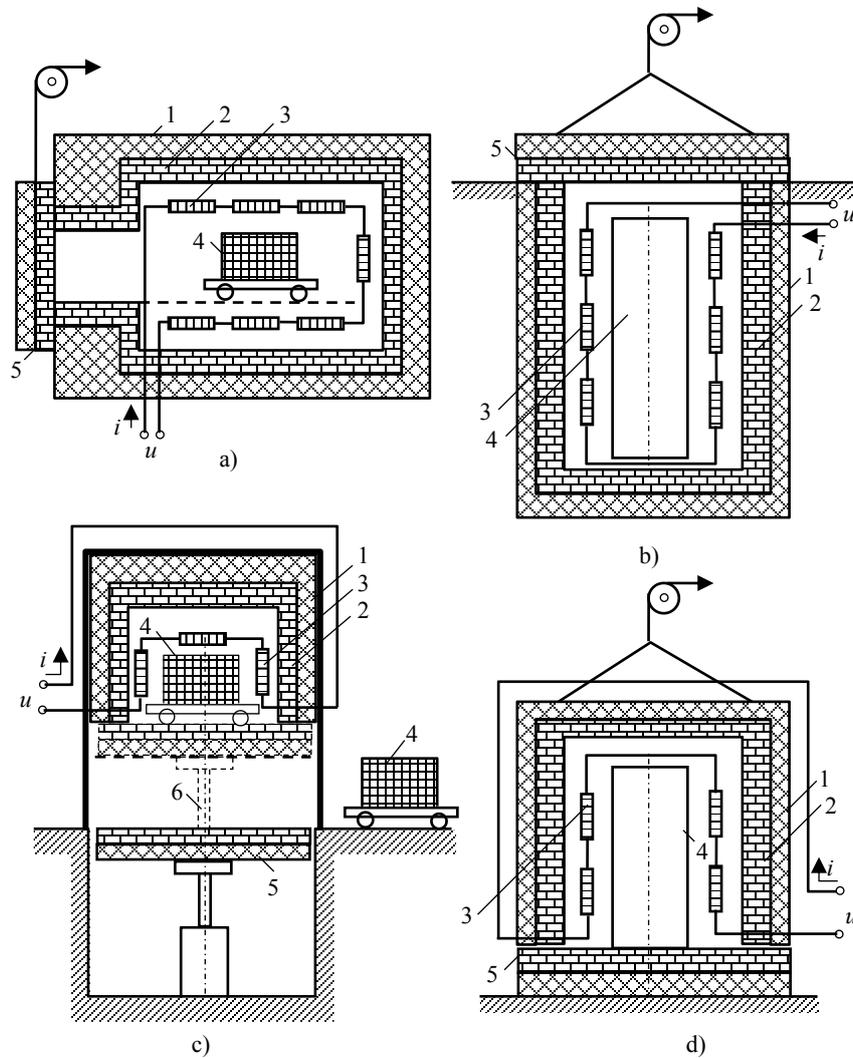


Fig. 4.5 – Cuptoare electrice cu rezistoare, cu încălzire indirectă și acțiune discontinuă: a) tip cameră; b) cuptor vertical; c) cuptor cu elevator; d) tip clopot.

Reglarea bipozițională (fig.4.7) este utilizată în cazul obiectelor „termic masive” caracterizate prin valori diferite, pe parcursul procesului de încălzire, între temperatura la suprafața corpului și temperatura din centrul corpului.

Temperatura corpului încălzitor din cuptorul cu rezistoare CR este urmărită de către traductorul T care, prin intermediul unui bloc de adaptare BA, transmite la comparatorul C o tensiune u_{θ_r} proporțională cu temperatura reală din cuptor. La comparator este transmisă și tensiunea de consemn u_{θ_d} care conține toate informațiile necesare pentru controlul procesului, incluse în blocul BVD. Regulatorul bipozițional RBP asigură comanda blocului de execuție BR (în mod obișnuit un contactor) pentru conectarea sau deconectarea sursei de alimentare cu energie electrică.

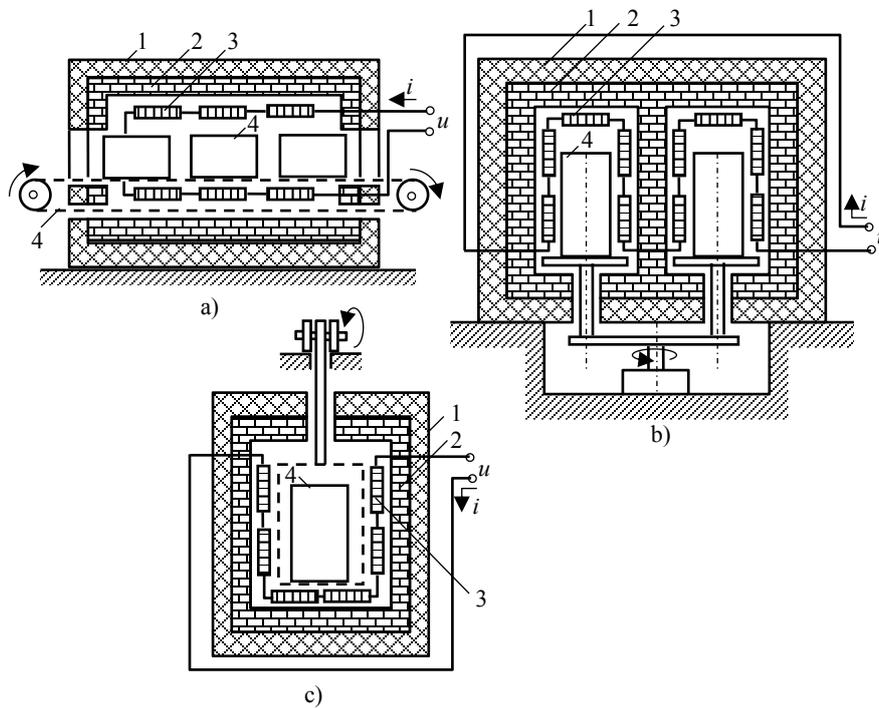


Fig. 4.6 – Cuptoare cu rezistoare, cu încălzire indirectă și acțiune continuă..

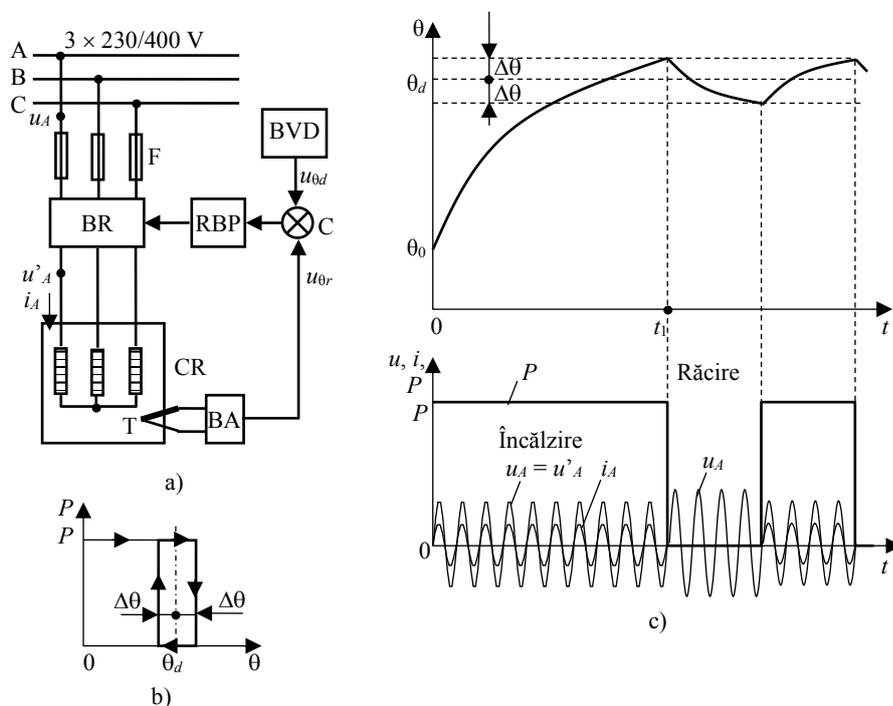


Fig. 4.7 – Reglajul bipozițional al temperaturii din cuptorul electric.

În figura 4.7 sunt indicate și caracteristica de reglare a sistemului automat (fig. 4.7 b), curba de variație a temperaturii în cuptor (fig. 4.7 c) și modul în care variază mărimile electrice din circuitul de alimentare (fig. 4.7 c).

Posibilitățile oferite de elementele semiconductoare performante permit modificarea valorii efective a curentului electric prin modificarea duratei active t_a din durata t_c a unui ciclu (fig. 4.9).

Aparatele electrocasnice reprezintă, în mod obișnuit, cazuri particulare de instalații de încălzire cu rezistoare, cu acțiune indirectă.

Utilizarea aparatelor electrocasnice pentru încălzit este determinată de avantajele importante față de alte sisteme de încălzire: reducerea efortului fizic, eliminarea emisiilor de CO și CO₂, reducerea pericolului de accidente, reducerea pericolului de incendiu, creșterea gradului de confort, ridicarea nivelului sanitar de preparare a hranei.

În funcție de modul de transfer al căldurii, aparatele electrocasnice sunt:

- cu conducție (de exemplu, plitele electrice),
- cu convecție (de exemplu, aparatele convective – aeroterme),
- cu radiație (de exemplu, cuptoare electrice pentru copt)

4.2.1.3 Încălzirea cu radiații infraroșii

Încălzirea cu radiații infraroșii (RI) este o variantă a încălzirii indirecte cu rezistoare, la care căldura este transmisă prin radiații electromagnetice aparținând unor benzi de lungimi de undă precis determinate. Corpul iradiat absoarbe o parte a radiațiilor și își ridică temperatura pe baza energiei acestora.

Domeniul lungimilor de undă utilizat pentru încălzirea cu radiații infraroșii este 0,76 ... 10 μm și este împărțit în trei benzi:

- RI scurte (A), cu $\lambda = 0,76 \dots 2 \mu\text{m}$ (1,4 μm);
- RI medii (B), cu $\lambda = 2 \dots 4 \mu\text{m}$ (1,4 ... 3 μm);
- RI lungi (C), cu $\lambda = 4 \dots 10 \mu\text{m}$ (3 ... 10 μm).

Încălzirea cu radiații infraroșii își găsește utilizarea în procese care necesită cantități precise de energie radiantă, de obicei cu lungimi de undă determinate și care pot fi direcționate spre obiectul de încălzit, evitându-se astfel încălzirea aerului sau a altor părți din echipament (tabelul 4.1) [4.2]. Se asigură astfel un randament ridicat, inerție termică redusă și viteză mare de creștere a temperaturii, posibilitatea obținerii unor densități de putere ridicate și deci a reducerii duratei procesului de încălzire și a pierderilor termice, încălzire omogenă datorită penetrării RI (deși aceasta este limitată la câteva zecimi de mm), productivitate ridicată.

Sursele de RI fabricate în prezent corespund celor 3 domenii de mai sus și sunt în exclusivitate radiatoare termice ce utilizează efectul Joule al curentului electric care parcurge un element rezistiv. Pentru o temperatură T a corpului încălzit emisivitatea maximă rezultă pentru o lungime de undă λ_m determinată din legea lui Wien (fig. 4.10) [4.8].

Există, în continuare, posibilități practice de reducere a consumurilor energetice în cazul încălzirii rezistive, în special prin:

- reducerea pierderilor în cuptor (limitarea pierderilor prin părțile deschise ale cuptorului, limitarea pierderilor prin acumulare de căldură în pereți – utilizarea de fibre ceramice pentru realizarea pereților – , limitarea temperaturii mantalei exterioare la 60 ... 80°C);
- recuperarea căldurii în procesul de răcire a pieselor (camere de răcire în care se introduc piesele care urmează a fi încălzite – camere cu flux dublu);

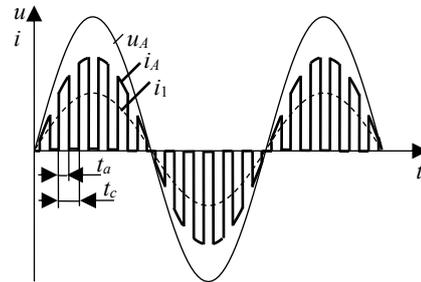


Fig. 4.9 – Reglarea cu durată variabilă a pulsurilor de curent electric (PWM).

- modificări în procesul tehnologic pentru limitarea intervalelor de subîncărcare a cuptorului pe durata unui ciclu.

Tabelul 4.1

Domeniile de utilizare a încălzirii și uscării cu radiații infraroșii

Domeniul de utilizare	Puterea specifică necesară [kW/m^2] sau consumul specific de energie electrică [kWh/kg]
Uscarea suprafețelor vopsite	5 ... 15 kW/m^2
Uscarea hârtiei și cartonului	3 ... 20 kW/m^2
Uscarea materialelor textile	1,4 ... 1,8 kWh/kg , apă eliminată
Uscarea materialelor ceramice și minerale	0,2 ... 0,3 kWh/kg
Uscarea miezurilor de turnătorie	0,1 ... 0,25 kWh/kg
Uscarea produselor agricole (furaje, cereale, semințe)	0,15 ... 0,20 kWh/kg
Uscarea legumelor și fructelor	0,7 ... 2 kWh/kg
Uscarea făinii și a pastelor făinoase	0,28 ... 0,38 kWh/kg
Uscarea pielăriei și încălțămintei	0,7 ... 1 kWh/kg
Încălzirea cauciucului și a materialelor impregnate	0,5 ... 0,6 kWh/kg
Coacerea pâinii, biscuiților	5 ... 20 kW/m^2
Prăjirea cărnii	$\leq 40 \text{ kW/m}^2$

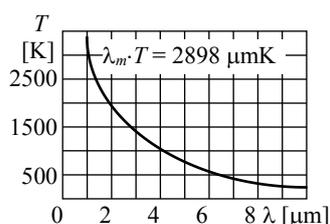


Fig. 4.10 – Legea lui Wien.

4.2.2 Încălzirea cu arc electric

Cuptoarele cu arc electric folosesc căldura dezvoltată în canalul arcului electric pentru încălzirea și topirea metalelor.

4.2.2.1 Cuptoare trifazate cu arc electric

Cuptoarele cu arc electric în construcție trifazată, cu acțiune directă (arcul electric se stabilește între electrozi și metal) sunt în prezent cele mai întâlnite soluții pentru elaborarea oțelurilor. Circa 1/3 din oțelul utilizat în prezent este obținut pe cale electrică, urmând ca în următorii ani ponderea să crească până la 50% odată cu necesitatea reciclării fierului vechi. Ca exemplu, în figura 4.11 este indicată dinamica necesarului de oțel pe plan mondial.

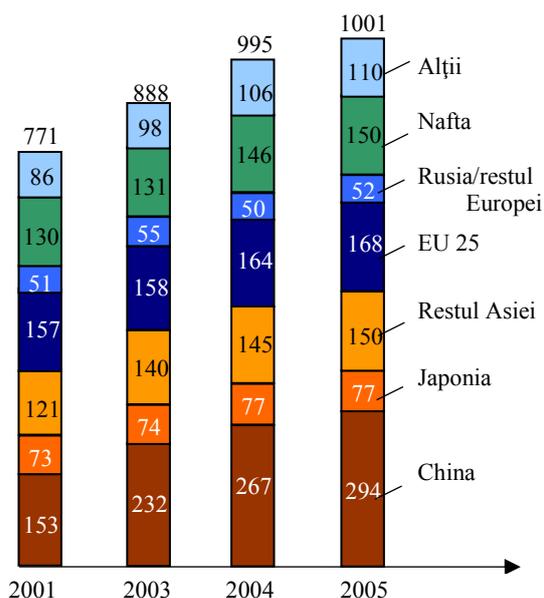


Fig. 4.11 – Consumul mondial de oțel, în milioane tone.

Capacitatea acestor cuptoare poate ajunge la 400 tone cu puteri unitare de 80 MW (120 MVA) și un consum specific de energie electrică de 500 ... 640 kWh/t .

Schema de principiu a unui cuptor trifazat cu arc electric este indicată în figura 4.12. Din punct de vedere constructiv cuptorul pentru topirea oțelului cuprinde cava de topire 1, coloana de pivotare 2, transformatorul de alimentare 3, rețeaua scurtă (legătura electrică dintre transformator și electrozi) 4, portelectrodul 5, dispozitivul de comandă hidraulică a electrozilor 6, electrozii 7 ai cuptorului, jgheabul de golire 8.

Transformatorul de cuptor este plasat într-o încăpere specială aflată în imediata apropiere a cuptorului.

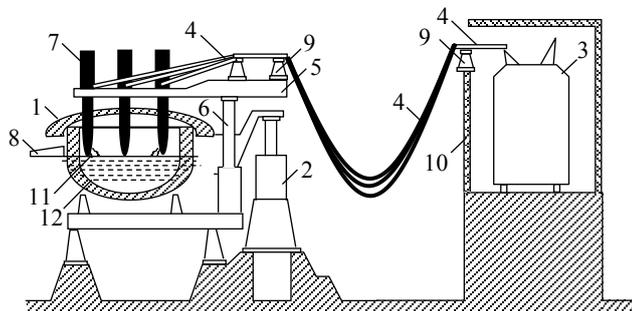


Fig. 4.12 – Construcția cuptorului cu arc electric trifazat pentru topirea oțelului.

Rețeaua scurtă cuprinde trei porțiuni. Prima porțiune este realizată sub forma unui pachet de bare și asigură legătura dintre bornele secundare ale transformatorului și ieșirea din încăperea unde este plasat acesta. Cea de a doua porțiune este realizată cu cabluri flexibile din cupru și preia variațiile datorate modificării poziției electrozilor pe durata elaborării șarjei. Cea de a treia porțiune, realizată din bare răcite cu apă, este solidară cu portelelectrodul 5 al fazei respective și izolată electric de acesta prin intermediul unor izolatoare 9. Transformatorul de cuptor 3 este plasat într-o încăpere 10 separată de zona de lucru a cuptorului. Arcul electric 11 apare între electrozii 7 și masa metalului 12 care urmează a fi procesat.

Sunt utilizați electrozi din cărbune (amestec de antracit, cărbune de retortă, cocs de petrol și smoală, sinterizate în forme speciale la circa 1000 °C) și electrozi din grafit (electrozi din cărbune grafitat la peste 2500 °C). La cuptoarele de putere mare HP (*High Power*) și de putere foarte mare UHP (*Ultra High Power*) sunt folosiți electrozi din grafit. Aceștia au diametrul de 100 ... 1000 mm, lungimi de 1 ... 3 m și sunt prevăzuți cu sisteme de îmbinare.

Bilanțul energetic al unui cuptor trifazat cu arc electric pentru topirea oțelului este indicat în figura 4.13 [4.3].

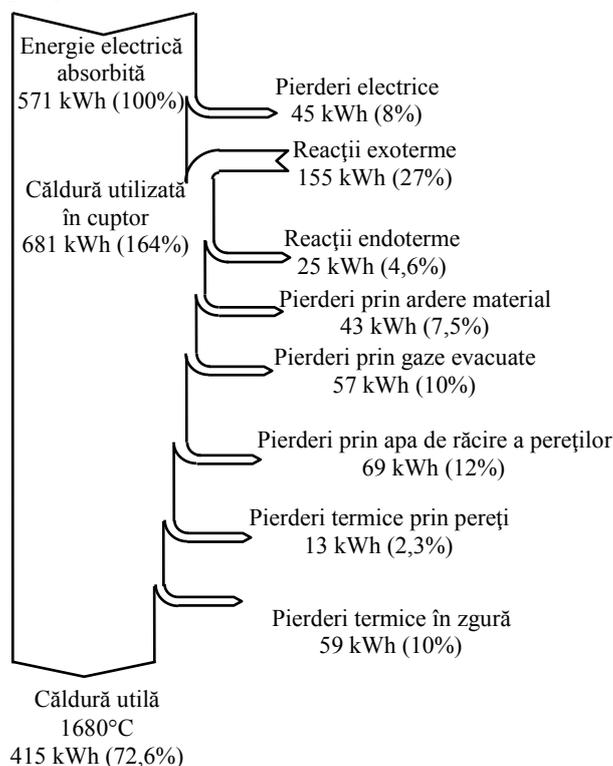


Fig. 4.13 –Bilanțul energetic al unui cuptor cu arc electric de 55 t (pe tona de oțel turnat); aria laterală 27 m², răcit cu apă.

Consumurile specifice ale cuptoarelor cu arc electric (tabelul 4.2) depind în mare măsură de capacitatea acestora. Pentru a asigura reducerea consumurilor de energie electrică, industria modernă utilizează în special cuptoare de capacitate mare (HP) și de capacitate foarte mare (UHP) [4.9]

Tabelul 4.2

Caracteristici ale cuptoarelor cu arc electric pentru topirea oțelurilor

Capacitatea cuptorului, t	0,5 1,5 3,0	5 ... 6 10 ... 12 20 ... 25	40 ... 50 80 ... 100 200
Consum specific w_0 de energie electrică, kWh/t	650 600 550	500 470 460	440 420 410
Durata t_t a topirii, ore	1,25 ... 1,75	1,5 ... 2	2,5 ... 3

Analiza bilanțului energetic al cuptorului se face pe baza informațiilor privind căldura totală necesară procesului Q , a pierderilor și a căldurii utile

$$Q = Q_u + Q_{pt} + Q_{pp}, \quad (4.7)$$

în care Q_{pt} sunt pierderile de căldură pe durata procesului de topire, Q_{pp} – pierderile termice pe durata pauzelor pentru reîncărcare (dacă topirea se face în mai multe etape), iar Q_u – căldura utilă, necesară încălzirii și topirii metalului.

Căldura utilă Q_u poate fi determinată pe baza masei cunoscute m a încărcăturii și a consumului specific de energie w_0 necesar procesului de topire

$$Q_u = w_0 \cdot m. \quad (4.8)$$

Pierderile de căldură Q_{pt} pe durata t_t a procesului de topire rezultă

$$Q_{pt} = \Phi_{pt} \cdot t_t, \quad (4.9)$$

în care fluxul termic Φ_{pt} corespunzător pierderilor de căldură pe durata procesului de topire cuprinde următoarele categorii de pierderi:

- *pierderi prin căptușeala cuptorului* (pierderi prin conducție termică) dependente de dimensiunile cuvei (caracterizată prin ariile laterale A_{ej} ale diferitelor părți ale cuptorului), precum și de caracteristicile fizice ale materialelor din căptușeală și de temperatura din cuptor

$$\Phi_c = \sum_{j=1}^n p_{sj} \cdot A_{ej}, \quad (4.10)$$

în care p_{sj} este densitatea fluxului termic care corespunde celor n componente ale suprafeței laterale a cuptorului. Valorile rezultate ale densităților de flux termic trebuie comparate cu capacitatea de transfer termic, prin convecție, de la suprafața exterioară a cuptorului (de temperatură θ_c) în mediul ambiant (de temperatură θ_0). Este necesar a fi verificată egalitatea:

$$\sum_{j=1}^n p_{sj} = \alpha_c \cdot (\theta_c - \theta_0); \quad (4.11)$$

- *pierderi prin ușa de lucru* (prin radiație) a cărei arie este A_{ul} , determinate din relația:

$$\Phi_{ul} = \varepsilon \cdot c_n \cdot (T_{ul}^4 - T_0^4) \cdot A_{ul}, \quad (4.12)$$

în care T_{ul} și T_0 sunt temperaturile în zona ușii de lucru și respectiv a mediului ambiant, c_n – coeficientul de radiație al corpului negru, ε – coeficient de radiație.

- *pierderi prin apa de răcire:*

$$\Phi_{ar} = \sum_{k=1}^s q_{ak} \cdot \Delta\theta_k, \quad (4.13)$$

în care q_{ak} este debitul de apă [l/s] prin cele s sisteme de răcire cu apă, iar $\Delta\theta_k$ – diferența de temperatură a apei de răcire la ieșirea din circuit față de intrare;

- pierderile Φ_{ma} prin părțile metalice răcite cu apă, aflate parțial sau total în interiorul cuptorului se calculează cu relațiile corespunzătoare transferului termic prin radiație având în vedere că temperatura maximă a acestor suprafețe este de circa 80 °C, iar materialele din cuptor au o temperatură mult mai ridicată.

Fluxul termic Φ_{pt} se determină din relația:

$$\Phi_{pt} = k_s \cdot (\Phi_c + \Phi_{ul} + \Phi_{ar} + \Phi_{ma}) , \quad (4.14)$$

în care $k_s = 1,2 \dots 1,4$ este un factor de siguranță.

Pierderile termice Φ_{pp} între topiri pot fi considerate ca fiind de 1,5 ori mai ridicate față de pierderile termice Φ_{pt} pe durata procesului de topire ($\Phi_{pp} \cong 1,5 \cdot \Phi_{pt}$) [4.5].

Cantitatea de căldură Q_{pp} pierdută pe duratele dintre topiri rezultă din relația:

$$Q_{pp} = \Phi_{pp} \cdot t_p , \quad (4.15)$$

în care t_p este durata pauzei dintre două topiri.

Căldura utilă este determinată de temperatura șarjei și este de 390 kWh/t la 1620°C și 425 kWh/t pentru o temperatură de 1750°C a oțelului lichid (necesară turnării).

Căldura pierdută în zgură depinde de temperatura băii. Cantitatea de zgură depinde de compoziția băii și poate reprezenta 5 ... 20% din greutatea băii lichide [4.3]. Cantitatea de căldură acumulată este între 30 ... 100 kWh/t de oțel lichid.

Pierderi prin suprafețele laterale ale cuptorului depind de pierderile specifice prin aria laterală a cuptorului și de durata șarjei. Pentru un cuptor de 100 t pot ajunge la 10 ... 25 kWh/t.

Pierderile în apa de răcire depind în special de durata șarjei. Pot avea valori de 55 ... 130 kWh/t.

Pierderi în gazele evacuate depind în principal de durata procesului și de eficiența sistemului de evacuare. Pot avea valori cuprinse între 50 ... 90 kWh [4.3].

Pierderi electrice cuprind:

- pierderi active în miezul magnetic al transformatorului;
- pierderi active în înfășurările transformatorului;
- pierderi active în rețeaua scurtă;
- pierderi active în electrozi.

Pentru o șarjă cu o durată sub 2 ore au valori de 30 ... 50 kWh/t.

Consumul util de energie pentru topire și tratare ulterioară în cuptoarele trifazate cu arc electric este de 500...700 kWh/t [4.3].

Randamentul η al cuptorului se determină din relația:

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{Q_u}{S \cdot t_t \cdot \lambda} \quad (4.16)$$

În relația (4.16) s-a notat cu $P_u = Q_u/t_t$ – puterea utilă disipată în cuptor, egală cu cantitatea de căldură utilă Q_u raportată la durata procesului de topire t_t . De asemenea, s-a notat cu S – puterea aparentă absorbită de instalație, iar λ este factorul de putere corespunzător.

Puterea aparentă S , în timpul funcționării, ajunge cel mult egală cu puterea aparentă nominală S_{Tn} a transformatorului de alimentare.

În mod uzual, cuptoarele cu arc electric funcționează, pe perioada de topire, cu un factor de putere natural $\lambda = 0,85$ și un randament $\eta \cong 0,6$.

În figura 4.14 sunt indicate valori uzuale ale parametrilor electrici ai cuptoarelor trifazate cu arc electric, în funcție de factorul de putere realizat λ [4.3].

Tensiunea secundară a transformatorului de cuptor U_2 (tensiune între faze) depinde de puterea transformatorului, de dimensiunile spațiului de topire, de caracterul procesului metalurgic și de calitatea materialelor refractare utilizate. La o tensiune secundară mai mare se obține o îmbunătățire a randamentului și factorului de putere ale cuptorului dar rezultă o reducere a duratei de viață a căptușelii refractare datorită lungimii mai mari a arcului electric.

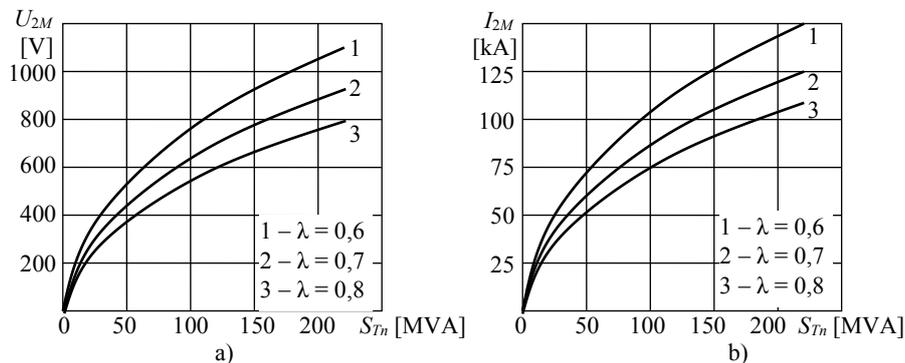


Fig. 4.14 – Tensiunea secundară a transformatorului de cuptor a) și curentul din arcul electric b), în funcție de puterea nominală.

Valoarea maximă U_{2M} a tensiunii secundare [V] a transformatorului (tensiune între faze) se calculează din relațiile empirice [4.5]:

$$U_{2M} = 15 \cdot \sqrt[3]{S_{Tn}}, \text{ pentru cuptoare cu căptușeala bazică,}$$

$$U_{2M} = 70 + 15 \cdot \sqrt[3]{S_{Tn}}, \text{ pentru cuptoare cu căptușeala acidă,}$$

unde puterea nominală S_{Tn} a transformatorului se introduce în [kVA].

În analiza bilanțului energetic al cuptorului este necesar a lua în considerație și elementele circuitului de alimentare al cuptorului. În tabelul 4.3 sunt indicate relațiile de calcul necesare determinării pierderilor în circuitul de alimentare.

Tabelul 4.3

Relații pentru analiza pierderilor în circuitul de alimentare a cuptorului cu arc electric

Mărimea sau parametrul de calcul	Raportare la primarul transformatorului (tensiune înaltă)	Raportare la secundarul transformatorului (joasă tensiune)
Tensiunea pe fază	$U_j = U_1$	$U_j = U_2$
Curentul în arcul electric	$I_j = I_1$	$I_j = I_2$
Rezistența electrică a bobinei de limitare	R_{Bl} (din fișa tehnică a echipamentului)	$R'_{Bl} = R_{Bl} \cdot (U_2/U_1)^2$
Reactanța bobinei de limitare, la 50 Hz	$X_{Bl} = \frac{x_{Bl}}{100} \cdot \frac{U_1}{I_1}$	$X'_{Bl} = X_{Bl} \cdot (U_2/U_1)^2$
Rezistența electrică pe fază a transformatorului	$R_T = \frac{3 \cdot \Delta P_{sc} \cdot U_1^2}{S_{Tn}}$	$R'_T = R_T \cdot (U_2/U_1)^2$
Reactanța pe fază a transformatorului, la 50 Hz	$X_T = \frac{3 \cdot u_{sc}}{100} \cdot \frac{U_1^2}{S_{Tn}}$	$X'_T = X_T \cdot (U_2/U_1)^2$
Rezistența electrică a rețelei scurte	$R'_{je} = R_j \cdot (U_1/U_2)^2$	R_{je} (determinată prin calcul pentru fiecare configurație concretă)
Reactanța rețelei scurte, la 50 Hz	$X'_{je} = X_{je} \cdot (U_1/U_2)^2$	X_{je} (determinată prin calcul pentru fiecare configurație concretă)
Rezistența electrică totală	$r_j = R_{Bl} + R_T + R'_{je}$	$r'_j = R'_{Bl} + R'_T + R_{je}$
Reactanța totală, la 50 Hz	$x_j = X_{Bl} + X_T + X'_{je}$	$x'_j = X'_{Bl} + X'_T + X_{je}$

În tabelul 4.3 au fost utilizate notațiile:

x_{Bl} [%] – reactanța procentuală a bobinei de limitare (indicată în fișa tehnică a echipamentului),

ΔP_{sc} – pierderile în scurtcircuit ale transformatorului de cuptor,

S_{Tn} – puterea aparentă nominală a transformatorului de cuptor,

u_{sc} [%] – tensiunea de scurtcircuit a transformatorului de cuptor.

Parametrii uzuali ai transformatoarelor de cuptor sunt indicate în tabelul 4.4 [4.5].

Tabelul 4.4

Principalele caracteristici ale transformatoarelor de cuptor

Puterea nominală, S_n [MVA]	1,25	2,0	2,8	4,0	9,0	15,0	25,0	45,0
Tensiunea primară, U_1 [kV]	6;10	6;10	6;10	6;10	6;10	35	35	35
Tensiunea secundară, U_2 [kV]	225...110	243...124	257...114	281...130	318...115	368...126	417...131	591...164
Curentul secundar, I [kA]	3,2	4,8	6,3	8,22	16,35	23,5	34,6	43,9
Tensiunea de scurtcircuit pe treapta maximă a tensiunii secundare u_{sc} (aportul bobinei serie) [%]	31,5 (25)	27,5 (20)	20,1 (14,9)	20,7 (10)	14,3 (7,5)	8,8	7,6	8,0
Pierderi de mers în gol, P_0 , [kW]	4,2	7,0	13,5	10	32,7	35	85,6	52,4
Pierderi în scurtcircuit, P_{sc} , kW	15	23	28	48	114,5	148	217	285
Număr de prize în secundar	12	12	12	12	12	23	23	23

Pentru limitarea nesimetriei în rețeaua electrică de alimentare, schema rețelei scurte (legătura dintre transformatorul de cuptor și electrozi) poate fi realizată în stea la electrozi (la cuptoarele până la 10 tone), cu triunghi nesimetric la electrozi (la cuptoare peste 10 tone) și cu triunghi simetric la electrozi (la cuptoarele foarte mari) – figura 4.15 [4.5].

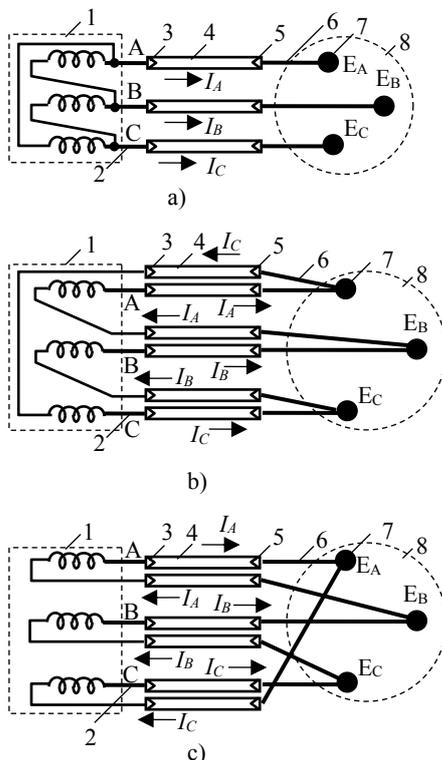


Fig. 4.15 – Scheme de legare a rețelei scurte:
 1 – înfășurări secundare ale transformatorului de cuptor; 2 – legătură cu bară rigidă; 3 – conexiune fixă; 4 – cablu flexibil; 5 – conexiune mobilă; 6 – legătură tubulară răcită cu apă; 7 – electrod; 8 – cuptor

Ca exemplu, în tabelul 4.5 [4.5] sunt indicate valori măsurate ale parametrilor electrici ai cuptorului cu capacitate de 200 tone pentru diferite variante de realizare a rețelei scurte. În calculele practice, valorile măsurate, cu ajutorul unor mărimi sinusoidale, ale reactanțelor circuitului de alimentare a cuptorului, trebuie înmulțite cu un factor egal cu 1,05 ... 1,15 pentru a lua în considerație faptul că în realitate curentul în arcul electric este nesinusoidal.

În tabelul 4.5 este indicat și factorul de nesimetrie k_a rezultat în diferitele configurații ale rețelei scurte

$$k_a = \frac{P_M - P_m}{P_{med}}, \quad (4.17)$$

în care P_M este puterea transmisă pe faza cea mai încărcată (numită în mod obișnuit faza „sălbatică”), P_m – puterea transmisă pe faza cea mai slab încărcată (numită în mod obișnuit faza „moartă”), iar P_{med} este puterea medie pe fază a cuptorului. Dacă nu se iau măsuri adecvate, factorul de asimetrie k_a poate ajunge la 0,28 la cuptoarele cu capacitate de 100 tone și 0,425 la cuptoarele cu capacitate de 200 tone.

Funcționarea cuptorului cu o asimetrie importantă conduce la o utilizare slabă a transformatorului de cuptor și importante perturbații în rețeaua electrică de alimentare.

Pe durata funcționării cuptorului cu arc electric și mai ales pe durata topirii, apar variații importante ale curentului electric în circuit, însoțite de variații importante și aleatorii ale tensiunii la barele de alimentare, determinând efect de flicker. Ca exemplu, în figura 4.16 sunt indicate curbele de variație ale tensiunii și puterii reactive la barele de alimentare, în absența și în prezența instalației de limitare a efectului de flicker.

Tabelul 4.5

Parametri ai cuptorului cu capacitate de 200 tone

Schema rețelei scurte	L μH	R $\text{m}\Omega$	k_a %
Stea la electrozi (fig.5.25 a))	10	0,411	35,7
Triunghi nesimetric la electrozi (fig.5.25 b))	7,8	0,409	29,2
Triunghi simetric la electrozi (fig.5.25 c))	6,4	0,401	6,2

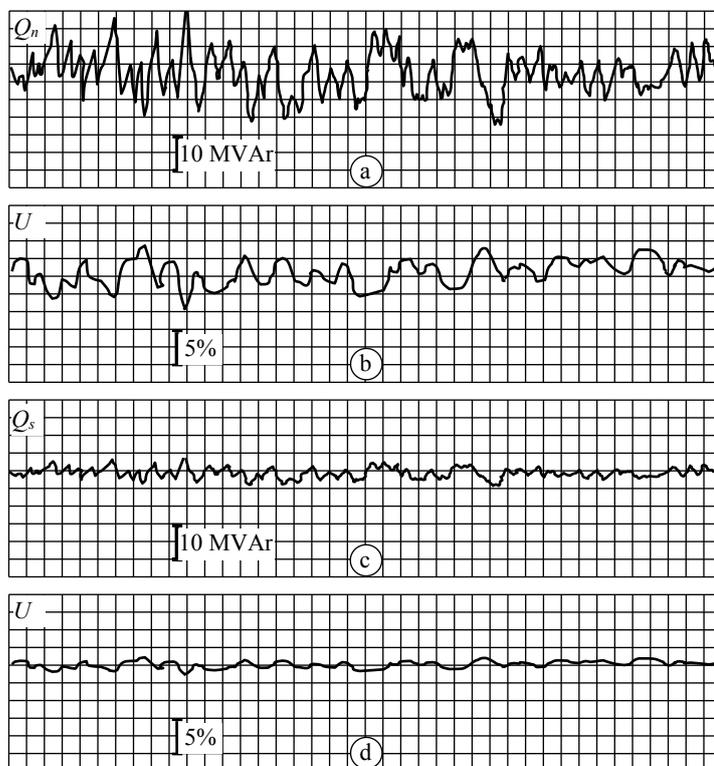


Fig. 4.16 – Variația puterii reactive a consumatorului perturbator (a), variația tensiunii pe bare în lipsa instalației de urmărire a puterii reactive (b), curba de variație a puterii reactive absorbită din rețeaua electrică, în prezența instalației de urmărire (c), variația tensiunii pe barele de alimentare, în prezența instalației de urmărire a puterii reactive (d).

4.2.2.2 Reducerea consumurilor de energie la cuptoarele trifazate cu arc electric

Consumurile ridicate de energie electrică pentru unitatea de produs, precum și cantitățile importante de oțel necesare industriei moderne impun o analiză atentă a bilanțului energetic al procesului și evaluarea măsurilor pentru limitarea consumurilor. Principalele mijloace pentru reducerea consumurilor specifice de energie electrică sunt:

- separarea proceselor de topire și de preparare a metalului topit; analiza diagramei de principiu (fig. 4.17) a funcționării cuptorului cu arc electric pune în evidență faptul că consumurile cele mai ridicate, dar și încărcarea completă și, deci, o utilizare eficientă a echipamentelor are au loc pe durata procesului de topire;

- limitarea numărului de reîncărcări ale cuptorului pe durata procesării unei șarje prin pregătirea corespunzătoare a fierului vechi și creșterea masei volumetrice a materialului introdus în cuptor (cel puțin $2,5 \text{ t/m}^3$);

- reducerea duratei procesului de preparare și, deci, reducerea pierderilor de căldură prin selectarea adecvată a tipului de fier vechi utilizat, în funcție de caracteristicile șarjei dorite;

- planificarea activităților astfel încât să se asigure încărcarea cuptorului la capacitatea sa proiectată;

- controlul automat al procesului astfel încât să se realizeze parametri cât mai apropiați de cei optimi.

Una dintre soluțiile cele mai eficiente pentru procesarea fierului vechi constă în utilizarea cuptoarelor alimentate cu tensiune continuă (fig. 4.18). Principalele caracteristici ale acestor cuptoare în raport cu cele clasice trifazate sunt indicate în tabelul 4.6.

Datorită procesului specific de topire, în cuptorul cu arc electric alimentat cu tensiune continuă, topirea metalului este mai rapidă, iar temperatura băii este mai uniformă.

Consumul redus de electrozi la cuptoarele alimentate cu tensiune continuă este datorat următoarelor condiții avantajoase față de cuptorul alimentat la tensiune alternativă:

- oxidare laterală redusă a electrodului central (datorită lipsei solicitărilor termice determinate de arcul electric al electrozilor din apropiere),

- electrodul central este tot timpul catod, nefiind bombardat cu electroni ca în cazul schimbării de polaritate.

Datorită condițiilor avantajoase în care lucrează electrodul central, acesta poate fi încărcat cu o densitate a curentului electric cu circa 30% mai mare ca în cazul cuptoarelor alimentate la tensiune alternativă.

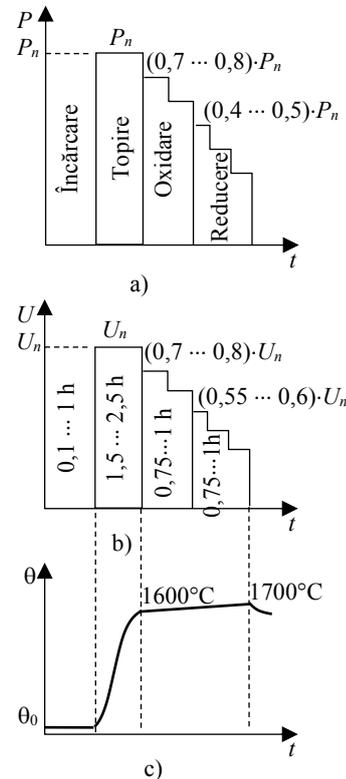
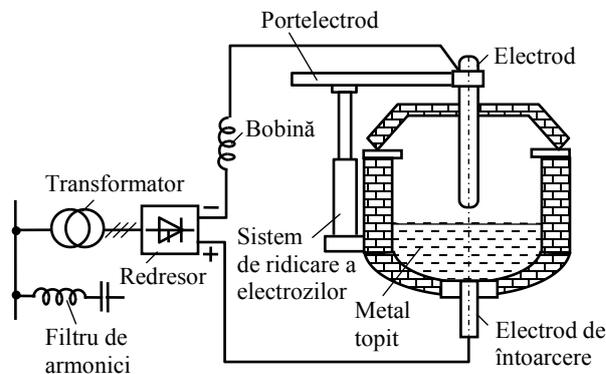


Fig. 4.17 – Procese pe durata elaborării șarjei într-un cuptor cu arc electric.



4.18 – Cuptor cu arc electric alimentat cu tensiune continuă.

Tabelul 4.6

Principalele caracteristici ale cuptoarelor cu arc electric

Caracteristici	Alimentare cu tensiune alternativă	Alimentare cu tensiune continuă	Observații
Număr de electrozi	3 electrozi în bolta superioară	un electrod central	
Diametrul uzual al electrozilor	3 x 350 mm	1 x 350 mm	
Intensitatea curentului în arcul electric	17 kA (circa 17 A/cm ²)	– la topire: 25 kA (circa 25 A/cm ²); – la încălzire: 40 kA (circa 40 A/cm ²)	Pentru cuptoare echivalente
Puterea nominală	10 MW	10 MW	
Tensiunea la bornele arcului electric	230 V	400 V	
Lungimea arcului electric	170 mm	370 mm	
Consum specific de electrozi	100%	35 ... 50%	Reducere de la circa 3,2 la 1,2 kg la tona de metal lichid
Consum specific de energie electrică	100%	90 ... 95%	
Nivel de flicker	100%	50%	
Nivel de zgomot	100 %	Practic același nivel în prima etapă de topire dar mult mai redus în restul timpului	În etapa inițială; 115 dBA iar apoi sub 90 dBA
Procesul de topire	Apar zone supra-încălzite și altele relativ reci	Topire practic uniformă	
Exploatare	Intervenția operatorului la întreruperea arcului electric	Nu apare necesară intervenția operatorului.	Tristoarele preiau controlul curentului în circuit

Arderea stabilă a arcului electric la cuptoarele alimentate cu tensiune continuă face ca nivelul de flicker să fie relativ redus (circa 50% față de cazul cuptoarelor alimentate cu tensiune alternativă).

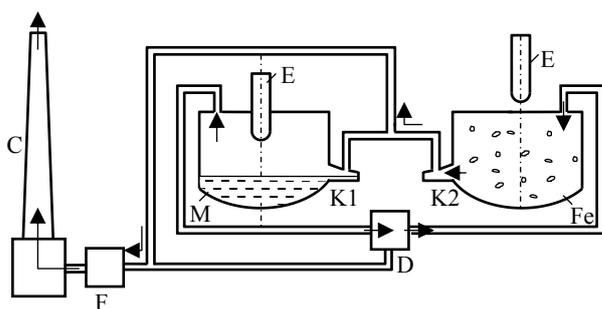


Fig. 4.19 – Sistem de recuperare a căldurii la cuptoare cu arc electric, alimentate la tensiune continuă.

O soluție deosebit de eficientă pentru recuperarea energiei gazelor de ardere este prezentată în figura 4.19 pentru cazul cuptoarelor cu arc electric alimentate la tensiune continuă [4.11].

Cele două cuptoare gemene K_1 și K_2 sunt alimentate de la aceeași sursă de tensiune continuă. Dacă, de exemplu, în cuptorul K_1 are loc procesul de preparare a metalului M , gazele evacuate ajung în cuptorul K_2 (prin intermediul elementului de deviere D care poate asigura eventuala

deviere a gazelor spre coș) unde încălzesc încărcătura Fe (fier vechi) ce urmează a fi procesată. Gazele răcite, ieșite din cuptorul K_2 sunt dirijate spre coșul de evacuare C prin intermediul sistemului de filtrare F .

După terminarea procesului de preparare în cuptorul K_1 , este conectat la sursa de alimentare cuptorul K_2 și, după evacuarea metalului topit din cuptorul K_1 , se trece la încălzirea acestuia pentru o nouă șarjă.

4.2.3 Încălzirea cu inducție electromagnetică

Încălzirea în cuptoarele și instalațiile cu inducție electromagnetică se bazează pe pătrunderea câmpului electromagnetic în materiale conductoare aflate într-un câmp magnetic variabil în timp. Curenții electrici turbionari determinați de tensiunile electromotoare induse conduc la încălzirea acestuia prin efect Joule. Lanțul transformărilor energetice care au loc într-o instalație de inducție electromagnetică este indicat în fig. 4.20 [4.10].

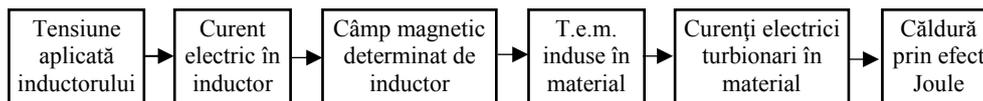


Fig. 4.20 – Lanțul transformărilor energetice într-o instalație cu inducție electromagnetică

Principalele caracteristici ale încălzirii prin inducție electromagnetică sunt:

- căldura se dezvoltă în corpul care urmează a fi încălzit, obținându-se un transfer important de energie ($> 1000 \text{ kW/m}^2$) și deci o viteză mare de încălzire [4.9];
- instalații relativ simple, fiind posibil lucrul în vid sau atmosferă controlată;
- posibilitate de automatizare și funcționare în flux continuu;
- se asigură condiții îmbunătățite de muncă, cu o poluare redusă a mediului ambiant.

Principalele tipuri de instalații de încălzire prin inducție electromagnetică sunt indicate în figura 4.21 [4.5].

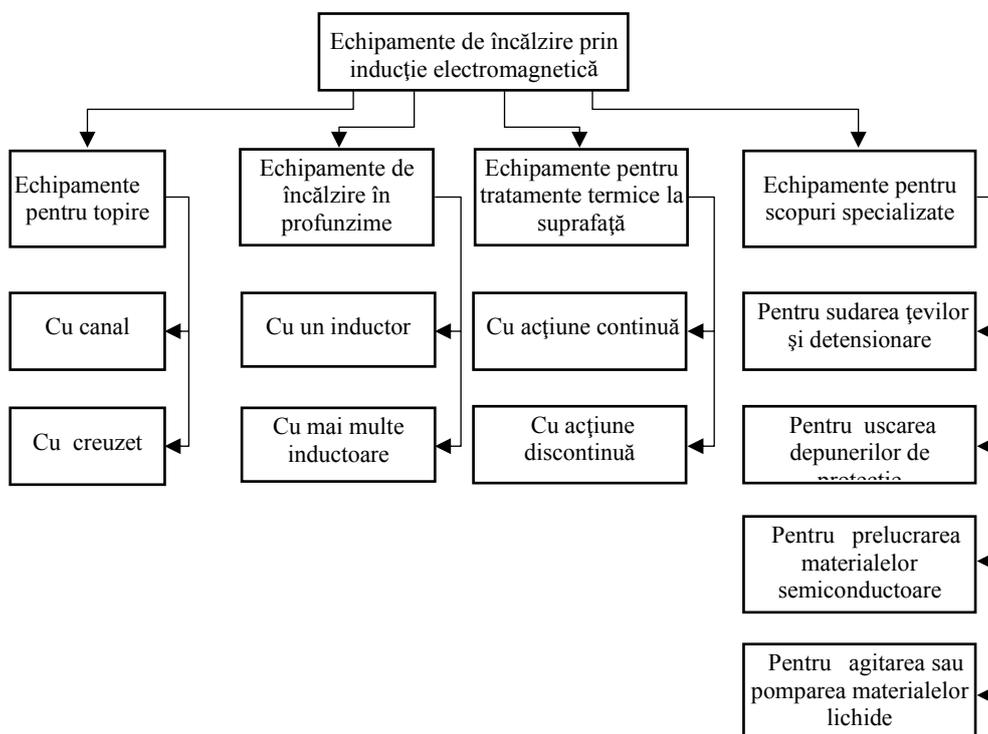


Fig. 4.21 – Principalele tipuri de echipamente de încălzire prin inducție electromagnetică.

Mărimea principală care caracterizează procesele de încălzire prin inducție electromagnetică este adâncimea de pătrundere δ [4.11]

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (4.18)$$

în care $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ este pulsația câmpului electric inductor, μ – permeabilitatea materialului procesat, σ – conductivitatea materialului.

Adâncimea de pătrundere corespunde distanței de la suprafața corpului în care se disipă practic 86% din întreaga putere care pătrunde în material.

Procesele de tratare termică la suprafață sunt caracterizate de o adâncime de pătrundere redusă, în funcție de tratamentul urmărit. Mărimea reglată este frecvența câmpului magnetic inductor

În cazul instalațiilor de topire, pentru a realiza temperatura necesară este concentrată energia pe o adâncime de pătrundere $\delta/d < 0,1$, în care d este diametrul masei de metal din cuptor [4.9]

În cazul încălzirii în profunzime se operează cu $\delta/d = 0,15 \dots 0,3$.

4.2.3.1 Încălzirea la suprafață

Pentru a asigura o încălzire eficientă a produsului, bobina inductoare trebuie să fie adecvată formei reale a corpului procesat. Cazul cel mai simplu este cel al procesării unor bare cilindrice (fig. 4.22). Alegerea corectă a frecvenței, a puterii și a duratei procesului de încălzire asigură condițiile necesare procesării optime a pieselor încălzite.

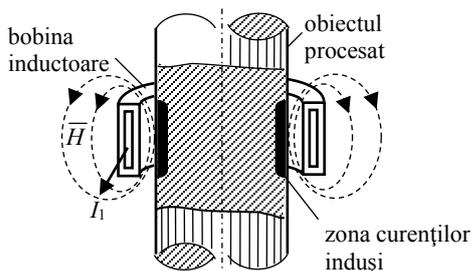


Fig. 4.22 – Încălzirea la suprafață a unei bare cilindrice.

Procedul de tratare termică utilizând inducția electromagnetică asigură viteze mari de încălzire care pot ajunge la 100 K/s, fiind necesare densități mari de putere prin suprafața piesei, cuprinse uzual între 10 și 30 MW/m² [4.10].

Pentru cea mai mare parte a aplicațiilor în domeniul 300 ... 400 kHz, puterea variază între 10 și 50 kW.

Frecvențele mai joase, pentru adâncimi de tratare mai mari, sunt asociate unor puteri de 40 ... 300 kW.

În cazul *pieselor mici*, frecvența utilizată este de 300 ... 500 kHz la o putere de 25 ... 50 kW, iar pentru mecanisme mai mari, $f = 3 \dots 25$ kHz la o putere care poate depăși 1500 kW.

Ca exemplu, în tabelul 4.7 sunt indicate, pentru oțel, adâncimile de călire în funcție de frecvența câmpului inductor [4.10].

Tabelul 4.7

Adâncimi de călire în cazul frecvențelor uzuale, la oțel

Frecvența, kHz	450	300	25	10	3	1
Adâncimea de călire *, mm	0,5 ... 2	0,75 ... 2,5	1,5 ... 3	2 ... 5	3,5 ... 7	5 ... 9

* Adâncimea de călire este definită ca distanța măsurată de la suprafață până în punctul în care duritatea scade la 50 HRC.

4.2.3.2 Topirea cu inducție electromagnetică

Topirea materialelor cu inducție electromagnetică se realizează în principal în două tipuri de cuptoare: cu canal (fig. 4.23 a) și cu creuzet (fig. 4.23 b)).

În tabelul 4.8 sunt indicate caracteristici ale cuptoarelor cu inducție electromagnetică cu canal, funcționând la frecvența de 50 Hz și domeniul lor de utilizare [4.5].

Tabelul 4.8

Puteri specifice limită la cuptoarele de inducție electromagnetică cu canal

Nr. crt.	Metalul încălzit	Capacitatea cuptorului, t	Puterea specifică limită, W/cm ³	Puteri uzuale ale cuptorului, kW	Consum specific de energie electrică la topire, kWh/t
1	Cupru	5 ... 35	50 ... 60	50 ... 6300	270 ... 340
2	Alamă (67,5 % Cu + 32,5 % Zn)	5 ... 35	26 ... 32	50 ... 6300	200 ... 250
3	Bronz (93 % Cu + 3% Zn + 4 % Sn)	5 ... 35	20 ... 25	50 ... 6300	300 ... 330
4	Aluminiu	5 ... 70	3 ... 6	40 ... 3600	400 ... 520
5	Aliaje de aluminiu	5 ... 70	12 ... 14	40 ... 3600	400 ... 520
6	Zinc	10 ... 100	30 ... 50	30 ... 3000	95 ... 130
7	Nichel		50 ... 80		470 ... 500
8	Fontă	10 ... 135	50 ... 80	50 ... 6400	450 ... 700

Canalul cuptorului este zona cea mai solicitată din punct de vedere termic și mecanic. Grosimea izolației termice a canalului trebuie să fie cât mai redusă pentru a limita fluxul de scăpări, dar trebuie să reziste și solicitărilor termice corespunzătoare (circa 200 K/cm). În mod uzual, grosimea izolației refractare a canalului este de 50 ... 70 cm.

Randamentul cuptorului cu canal este relativ ridicat (60...95%, în funcție de tipul materialului și procesului tehnologic). Factorul de putere natural al cuptorului este de 0,2 ... 0,7, ceea ce impune utilizarea unor echipamente de compensare a puterii reactive.

Unitățile de topire conectate între două faze determină nesimetrii importante în circuitul de alimentare, astfel încât este necesară, de cele mai multe ori, conectarea instalației prin intermediul unei scheme de simetrizare Steinmetz.

În analiza energetică a procesului este necesar a lua în considerație și echipamentele auxiliare necesare compensării puterii reactive și a simetrizării sarcinii.

Cuptoarele de topire cu creuzet (fig. 4.23 b)) sunt folosite la elaborarea oțelului de calitate superioară, a fontei, a metalelor neferoase și a aliajelor acestora. Cuptoarele cu creuzet pot fi de frecvență industrială (50 Hz) sau de medie frecvență (50 ... 10000 Hz). Liniile de câmp magnetic traversează materialul refractar al cuptorului și grosimea izolației termice, zone fără fier, astfel încât acest tip de cuptor se mai numește „cu circuit magnetic deschis”.

Grosimea peretelui creuzetului prezintă o importanță deosebită asupra parametrilor de funcționare ai cuptorului. Pentru grosimi reduse, scade fluxul magnetic de scăpări și deci crește randamentul electric al instalației. La o grosime redusă a peretelui, rezultă însă pierderi termice mari și solicitări termice importante ale materialului refractar din care este realizat peretele.

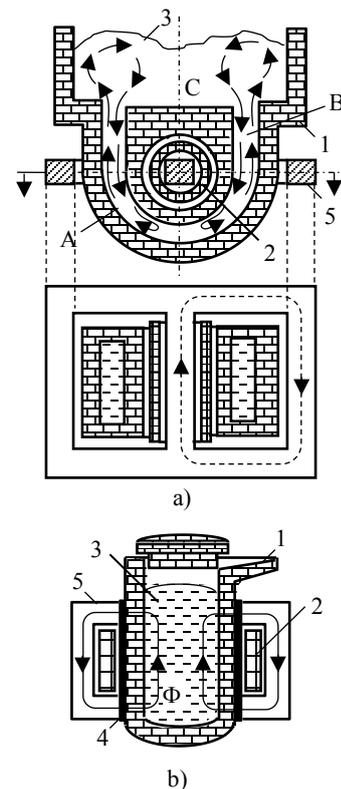


Fig. 4.23 – Cuptor cu canal a) și cu creuzet b):

- A – partea circulară a cuptorului;
- B, C – partea dreaptă a cuptorului;
- 1 – corpul cuptorului; 2 – bobina inductoare; 3 – încărcătura cuptorului;
- 4 – izolație termică; 5 – circuitul magnetic.

În tabelul 4.9 sunt indicate principalele caracteristici ale cuptoarelor cu inducție electromagnetică cu creuzet [4.5].

Tabelul 4.9

Caracteristici ale cuptoarelor cu inducție electromagnetică

Materialul topit	Capacitate, t	Putere, MW	Consum specific de energie electrică, kWh/t
<i>Joasă frecvență</i>			
Fontă, oțel	0,3 ... 100	0,5 ... 21	550 ... 750
Metale ușoare	0,5 ... 15	0,2 ... 4	
Metale grele			
<i>Medie frecvență</i>			
Fontă, oțel	0,25 ... 30	0,3 ... 16	600 ... 2000
Metale ușoare	0,1 ... 10	0,2 ... 4	550 ... 620
Metale grele	0,3 ... 35	0,3 ... 8	

Ca urmare a realizării convertoarelor de frecvență cu semiconductoare, cu puteri până la 12 MW, la prețuri accesibile, în prezent se constată tendința de a utiliza cuptoare cu creuzet, funcționând la medie frecvență (fig. 4.24) cu puteri mari și având o eficiență energetică superioară cuptoarelor de joasă frecvență [4.9]

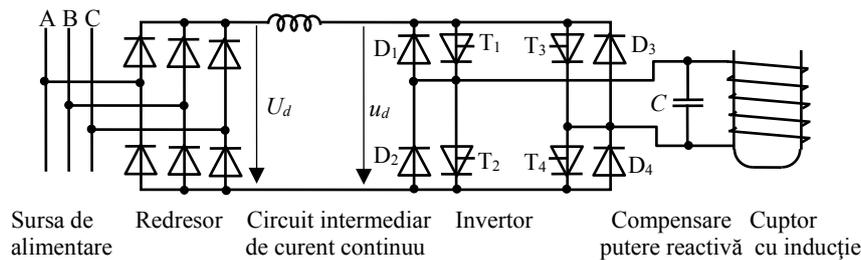


Fig. 4.24 – Circuit de alimentare a unui cuptor cu inducție electromagnetică de medie frecvență.

Randamentul electric al cuptorului de inducție electromagnetică cu creuzet este $\eta_{el} = 0,5 \dots 0,8$. Valorile reduse corespund topirii materialelor cu conductivitate electrică relativ ridicată (la topirea aluminiului $\eta_{el} = 0,5 \dots 0,6$), iar valorile ridicate corespund topirii materialelor feroase cu conductivitate relativ coborâtă (la topirea oțelului rezultă $\eta_{el} = 0,7 \dots 0,8$). Randamentul termic al cuptorului depinde de tipul izolației termice ca și de temperatura materialului din cuptor și are valori $\eta_t = 0,8 \dots 0,85$. În acest fel, randamentul cuptorului cu creuzet este $\eta_c = 0,4 \dots 0,68$ [4.2].

Consumul specific al cuptoarelor cu creuzet depinde în mare măsură de capacitatea cuptorului și de tipul materialului procesat. Pentru un proces de topire a oțelului, în figura 4.25 [4.4] sunt indicate valori medii ale consumurilor înregistrate ale cuptoarelor cu inducție electromagnetică cu creuzet.

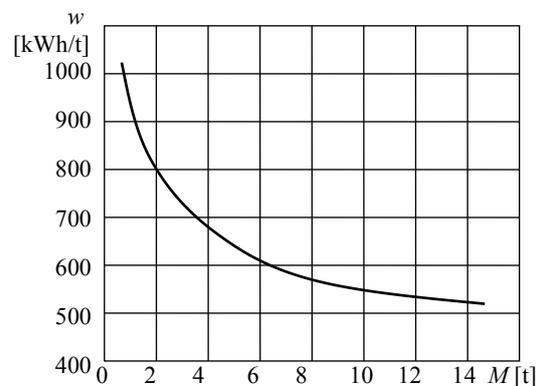


Fig.4.25 – Valori medii ale consumurilor de energie electrică la cuptoarele cu creuzet cu inducție electromagnetică în funcție de capacitatea cuptorului.

Bilanțul de energie, tipic pentru un cuptor cu inducție electromagnetică cu creuzet, este indicat în figura 4.26.

În analiza bilanțului de energie electrică al unui cuptor cu inducție electromagnetică cu creuzet este necesar a lua în considerație și pierderile care apar în echipamentele destinate simetrizării sarcinii (în cazul instalațiilor funcționând la frecvența rețelei de alimentare) sau limitării distorsiunii curbei tensiunii de alimentare (în cazul instalațiilor funcționând la medie frecvență).

Utilizarea convertoarelor statice pentru alimentarea cuptoarelor cu inducție cu creuzet determină economii de energie electrică de 12 ... 20% [4.9] față de alte tipuri de surse. Frecvența de ieșire a convertorului se adaptează pe durata procesului de încălzire astfel încât se elimină necesitatea variației bateriei de compensare.

Utilizarea căldurii reziduale a apei pentru răcirea inductorului (fig. 4.27) în scopul încălzirii încărcăturii care urmează a fi topită permite creșterea randamentului întregului proces.

4.2.3.2 Încălzirea în volum

Încălzirea în volum se realizează în mod obișnuit la frecvențe mici, cu un bun randament al procesului. Alegerea frecvenței este un factor important în funcționarea instalațiilor de încălzire. Profilul de temperatură cerut necesită o frecvență la care adâncimea de pătrundere δ ajunge la $1/4 \dots 1/3$ din diametrul piesei. Frecvența necesară încălzirii de volum este cu atât mai mică cu cât piesa este mai voluminoasă. Totuși, se poate lucra la frecvențe mai mari cu condiția ca durata de încălzire să fie mai mare, astfel încât căldura să se poată propaga în interiorul piesei. Există, totuși, pentru un diametru dat și un anumit material, o frecvență recomandată, astfel încât regimul obținut să fie un regim economic.

Bilanțul energetic la încălzirea unui corp pentru tratarea termică este indicat în figura 4.28.

Principalele procese de prelucrare termică și temperaturile necesare sunt

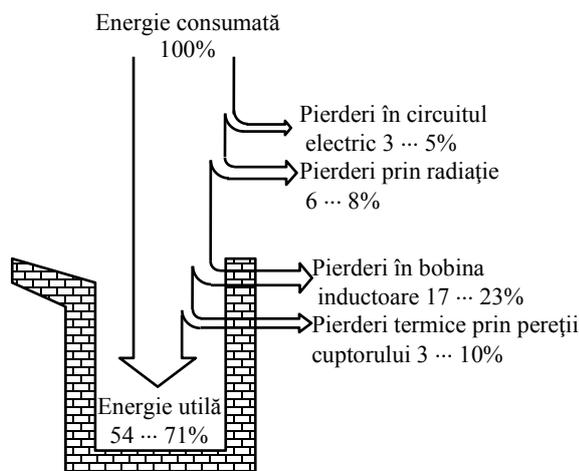


Fig. 4.26 – Bilanțul energetic al unui cuptor cu inducție electromagnetică cu creuzet.

se adaptează pe durata procesului de încălzire astfel încât se elimină necesitatea variației bateriei de compensare.

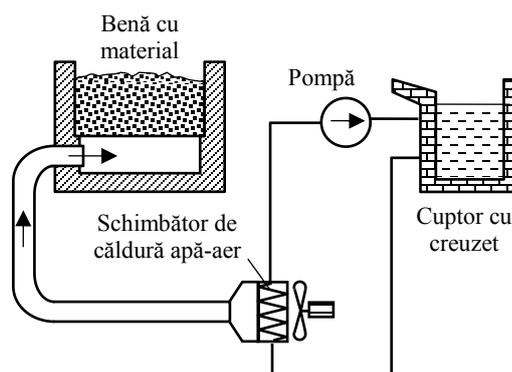


Fig. 4.27 – Utilizarea căldurii reziduale pentru încălzirea încărcăturii.

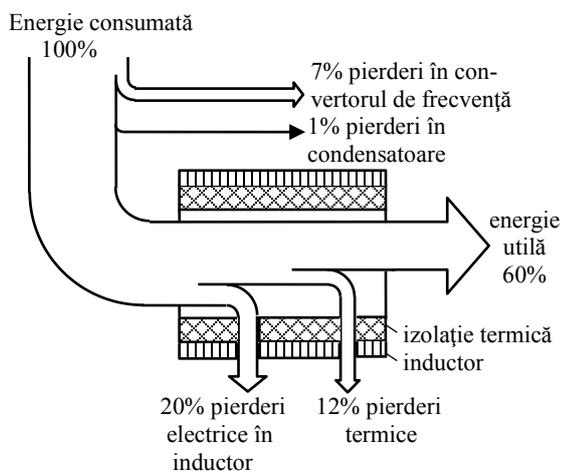


Fig. 4.28 – Bilanțul energetic pentru încălzirea prin inducție electromagnetică a unor piese din oțel, la 1200°C.

indicate în tabelul 4.10 [4.10].

Tabelul 4.10

Temperaturile de încălzire (°C) pentru diferite procese tehnologice

Procedeul de prelucrare la cald	Oțel carbon	Oțel	Cupru	Aluminiu	Titan
Forjare	1230 ... 1300	1230 ... 1300	870	450	930
Laminare	1260	1260	760...870	450 ... 540	930
Extrudare	1230	1300	870	480	950

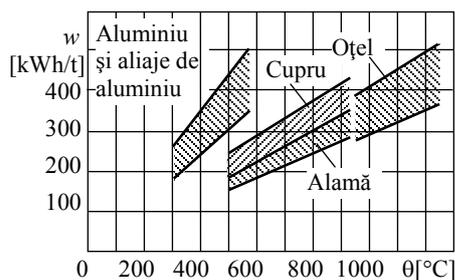


Fig. 4.29 – Dependența consumului specific de energie în funcție de temperatura de încălzire înaintea forjării.

Consumul specific de energie w în funcție de temperatura θ de încălzire în vederea forjării, pentru diferite materiale este indicat în figura 4.29 [4.4]. Calitatea produsului realizat prin procesare la cald depinde în mare măsură de asigurarea încălzirii uniforme în secțiunea materialului. În acest sens, durata procesului de încălzire este corelată cu puterea disipată în obiect și conductivitatea sa termică.

Consumul specific de energie w necesar încălzirii lingourilor în vederea extrudării, în funcție de diametrul d al acestora este indicat în figura 4.30.

Pentru frecvențe mai mici de 50 Hz, necesare încălzirii în volum prin inducție electromagnetică sunt utilizate cicloconvertoare. Funcționarea acestora este însoțită de apariția de armonici și interarmonici (componente sinusoidale cu frecvență diferită de un multiplu întreg al armonicii fundamentale). Pierderile în echipamentele pentru limitarea acestor perturbații trebuie să fie luate în analiza bilanțului energetic al procesului.

În cazul instalațiilor alimentare direct din rețeaua electrică de alimentare, factorul de putere depinde în cea mai mare parte de fluzul de scăpări datorită spațiului dintre bobina inductoare și corpul supus încălzirii. Ca exemplu, în figura 4.31 [4.4] sunt indicate valori ale factorului de putere în funcție de diametrul interior al bobinei inductoare d_1 , diametrul exterior d_2 și adâncimea de pătrundere δ .

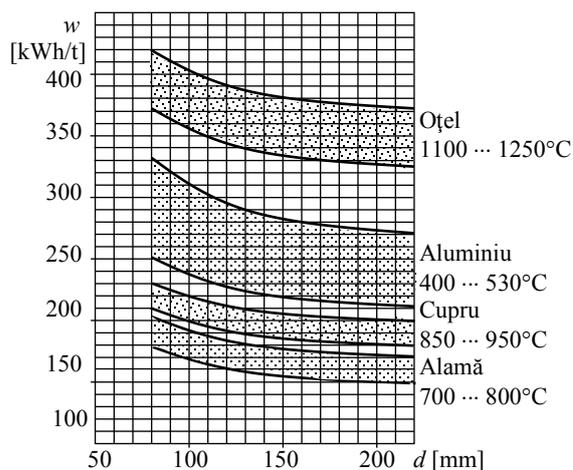


Fig. 4.30 – Dependența consumului specific de energie w de diametrul d al lingourilor pentru operația de extrudare.

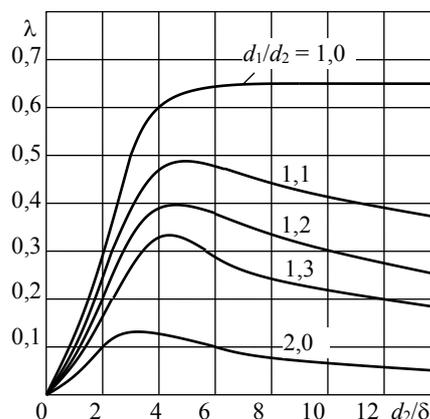


Fig. 4.31 – Dependența $\lambda = f(d_1/d_2 ; d_2/\delta)$.

4.2.3 Încălzirea materialelor dielectrice

Caracteristic procesării materialelor dielectrice în câmpuri de înaltă frecvență este faptul că degajarea de căldură apare chiar în interiorul materialului care urmează a fi încălzit.

Dezvoltarea căldurii într-un corp dielectric este determinată de două fenomene diferite: încălzirea directă prin rezistență datorită curentului de conducție prin rezistența de izolație a corpului și încălzirea asociată fenomenului de histerezis dielectric și polarizare electrică în câmpuri electrice variabile în timp.

Câmpul electromagnetic variabil armonic în timp, determină apariția în dielectric a unui curent electric total \underline{J} (de conducție \underline{J}_c și de deplasare \underline{J}_p) având densitatea:

$$\underline{J} = \underline{J}_c + \underline{J}_p = \sigma \cdot \underline{E} + j\omega \cdot \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r - j\epsilon'') \cdot \underline{E}, \quad (4.19)$$

în care σ este conductivitatea electrică a materialului, \underline{E} – intensitatea câmpului electric în corpul de încălzit, ω – pulsația câmpului electric ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$), ϵ_0 – permitivitatea vidului ($\epsilon_0 = 1/(4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9)$ F/m), ϵ_r – permitivitatea relativă a materialului dielectric, ϵ'' – factorul de pierderi prin histerezis al materialului.

Diagrama fazorială a mărimilor electrice asociate procesului este indicată în figura 4.32. Pe baza diagramei din figura 4.32 se poate defini tangenta unghiului de pierderi dielectrice $\tan \delta$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0}}{\epsilon_r} \quad (4.20)$$

și densitatea de volum a puterii p_v într-un dielectric real

$$p_v = (\sigma + \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'') \cdot E^2 = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \cdot E^2. \quad (4.21)$$

În funcție de ponderea fenomenului care stă la baza procesului de încălzire sunt utilizate două procedee de încălzire a corpurilor dielectrice.

- încălzirea cu înaltă frecvență (capacitivă);
- încălzirea cu microunde.

4.2.3.1 Încălzirea cu înaltă frecvență

Încălzirea capacitivă este specifică materialelor dielectrice cu un factor de pierderi mai mare de 0,01 ... 0,02 și care trebuie încălzite uniform în întregul volum, acolo unde alte metode nu satisfac condițiile impuse de viteză de încălzire și uniformitate a temperaturii în produs

La încălzirea cu înaltă frecvență disiparea de căldură determinată de fenomenele de polarizație este practic nulă ($\epsilon'' \cong 0$), astfel încât căldura rezultată este determinată practic numai de conducția materialului aflat în câmp electric. Din relația (4.21) rezultă că puterea dezvoltată în material depinde de pulsația ω a câmpului aplicat, de factorul de pierderi $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ și de intensitatea câmpului electric E .

Frecvențele ISM (*Industrial, Medical and Scientific*) alocate de Uniunea Internațională pentru Telecomunicații în cazul aplicațiilor industriale în domeniul încălzirii cu înaltă frecvență sunt indicate în tabelul 4.11.

Intensitatea câmpului electric aplicat nu poate depăși 300 kV/m pentru a evita eventualele descărcări electrice pe suprafața corpului procesat. În aceste condiții, procesarea termică eficientă a corpurilor dielectrice rezultă pentru valori ale factorului de pierderi $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ cuprinse între 0,01 și 1.

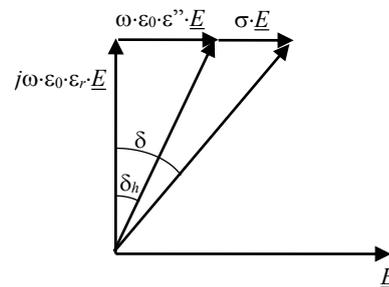


Fig. 4.32 – Densitatea curentului electric într-un corp solid, determinată de o undă electromagnetică plană.

Tabelul 4.11

Frecvențe utilizate la încălzirea în radiofrecvență

Frecvența, MHz	Lungimea de undă în vid, m	Toleranța, %
13,560	22,12	$\pm 0,05$
27,120	11,16	$\pm 0,6$
40,680	7,37	$\pm 0,05$

Pentru realizarea încălzirii unui corp dielectric de formă regulată, acesta este plasat între doi sau mai mulți electrozi numiți aplicator și este aplicată o tensiune înaltă, obținută de la o sursă de înaltă frecvență (fig. 4.33).

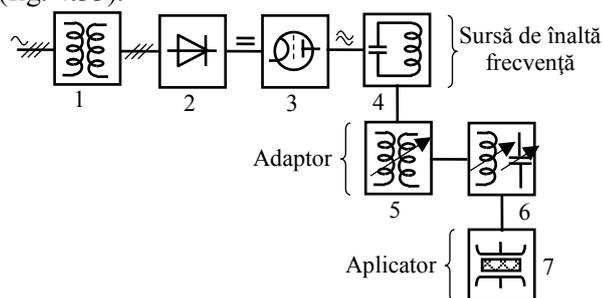


Fig. 4.33 – Schema bloc a unei instalații de încălzire capacitivă; 1 – transformator de înaltă tensiune; 2 – redresor; 3 – oscilator; 4 – circuit acordat; 5 – circuit de cuplare;

În funcție de natura și forma produsului de procesat precum și de varianta de încălzire (continuă sau discontinuă), există o mare diversitate de aplicatoare.

Sursele de radiofrecvență utilizate pentru încălzirea capacitivă constau din oscilatoare autoexcitate cu una sau mai multe triode având tensiunea anodică de 5 ... 15 kV furnizată de un redresor de înaltă tensiune (fig. 4.33). Unitățile actuale furnizează până la 600 kW lucrând cu un randament de 55 ... 70%.

Deoarece temperaturile de lucru sunt relativ scăzute și conductivitatea termică a materialelor dielectrice este relativ mică, pierderile termice sunt reduse, iar randamentul general al procesului este determinat în mare măsură de randamentul, încă redus, al sursei de alimentare de înaltă tensiune și înaltă frecvență.

Bilanțul energetic al procesului de încălzire este indicat în figura 4.34, iar în figura 4.35 este indicată puterea necesară uscării lemnului prin încălzire cu înaltă frecvență [4.4].

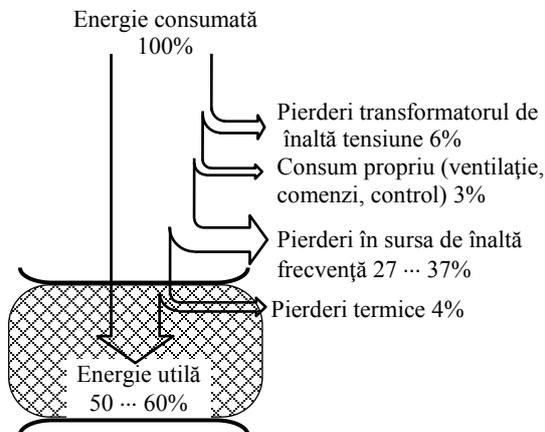


Fig. 4.34 – Bilanțul energetic al unei instalații de încălzire cu înaltă frecvență.

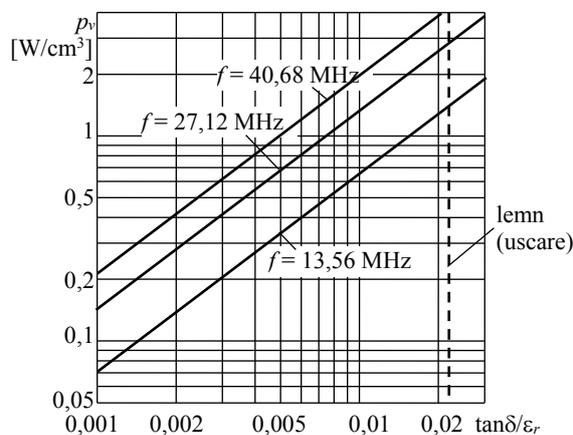


Fig. 4.35 – Încălzirea cu înaltă frecvență a lemnului

Principalul avantaj al acestui sistem de încălzire constă în densități ridicate de putere în material ($300 \dots 5000 \text{ kW/m}^3$ sau până la 100 kW/m^2 la încălzirea materialelor plane) și posibilitatea unei încălziri selective a corpurilor dielectrice.

Principalele aplicații ale încălzirii cu înaltă frecvență a corpurilor dielectrice sunt în industria textilă (un balot cu lână cu volum de $1,2 \dots 2 \text{ m}^3$ și masă de $150 \dots 400 \text{ kg}$ poate fi încălzit în 3 minute într-o instalație cu puterea nominală de 30 kW , cu un consum de $20 \dots 25 \text{ kWh}$); industria lemnului (uscarea uniformă a lemnului pentru evita crăparea acestuia); industria alimentară (asigură eliminarea a circa 80 kg apă/oră cu un consum de $1,2 \dots 1,4 \text{ kWh/kg}$ apă evaporată); industria maselor plastice; industria hârtiei (corectarea umidității la hârtia de calitate superioară) [4.9].

4.2.3.2 Încălzirea cu microunde

Încălzirea prin intermediul microundelor (sau în foarte înaltă frecvență) este datorată fenomenului de histeresis dielectric în câmpuri electrice variabile în timp, care are ca efect transformarea energiei electromagnetice în căldură.

Benzile de frecvențe ISM, pentru domeniul microundelor sunt indicate în tabelul 4.12.

Tabelul 4.12

Benzile de frecvențe ISM

Banda	Frecvența centrală	Regiunea	Nota
433,05 ... 434,79 MHz	433,92 MHz	1 fără D, A, P, CH, YU	a) b)
866 ... 906 MHz	896 MHz	GB	b)
902 ... 928 MHz	915 MHz	2	b)
2400 ... 2500 MHz	2450 MHz	1, 2, 3	b)
2325 ... 2425 MHz	2375 MHz	A, BI, CS, H, P, RO	
5275 ... 5875 MHz	5800 MHz	1, 2, 3	b)
24 ... 24,25 GHz	24,125 GHz	1, 2, 3	a)
61 ... 61,5 GHz	61,25 GHz	1, 2, 3	a)
122 ... 123 GHz	122,5 GHz	1, 2, 3	a)
244 ... 246 GHz	245 GHz	1, 2, 3	a)

Notă:

- Utilizarea acestei benzi este condiționată de obținerea unei autorizații;
- Serviciile de radiocomunicații care funcționează în aceasta bandă trebuie să accepte perturbații determinate de aplicațiile ISM;
- Regiunile sunt:
 - Europa, Africa, peninsula Arabică, Turcia, Orientul Mijlociu, Mongolia;
 - America de Nord, America de Sud;
 - celelalte țări.

În general în țările europene sunt autorizate benzile de 2450 MHz , 5800 MHz și 22125 MHz . Ca urmare a costurilor ridicate și a puterilor mai reduse ale echipamentelor la 5800 MHz și 22125 MHz , frecvența de 2450 MHz este cea mai folosită.

În principiu, un echipament de încălzire cu microunde (fig. 4.36) are trei componente principale: generatorul de microunde (magnetron sau klistron) care transformă energia electrică absorbită de la rețea în energie de microunde; ghidul de unde, pentru transferul eficient al energiei electromagnetice de la antenă la locul unde are loc transformarea în căldură; aplicatorul, în care energia microundelor interacționează cu materialul de procesat.

Schema de principiu a unui magnetron, ca principala

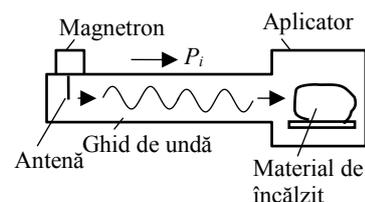


Fig. 4.36 – Schema de principiu a unei instalații cu microunde.

sursă de microunde (klistronul este de fapt un amplificator de microunde) este indicată în figura 4.37. Cavitățile rezonante din blocul anodic A determină oscilații electromagnetice și un câmp de foarte înaltă frecvență, care împreună cu câmpul electrostatic electric dintre anod și catodul C

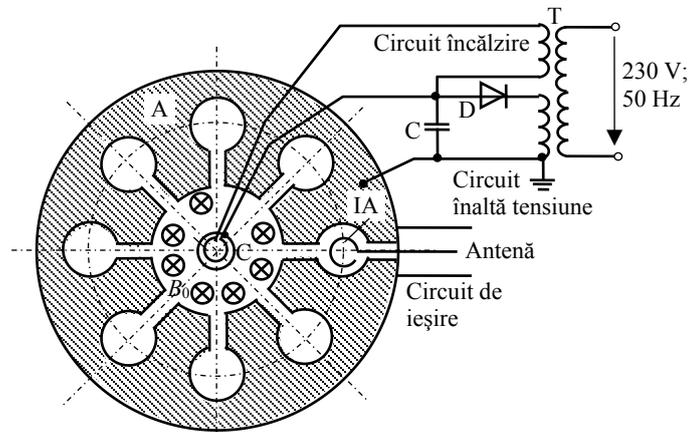


Fig. 4.37 – Schema de principiu a unui magnetron de 1300 W.

precum și cu câmpul magnetic axial B_0 , determină ca deplasarea electronilor în spațiul de interacțiune (dintre anod și catod) să se realizeze pe un traseu complex. Pe parcursul deplasării, electronii transmit energia lor cinetică (acumulată în câmp electrostatic) câmpului de foarte înaltă frecvență (microunde). Energia corespunzătoare este extrasă din una dintre cavitățile rezonante cu ajutorul unei bucle de cuplaj IA conectată cu antena aflată la începutul ghidului de undă. Apariția electronilor la catod este realizată prin încălzirea acestuia cu ajutorul unui filament.

Aplicatorul poate avea diferite forme, în funcție de obiectul supus procesării: tip cameră pentru procese staționare, cu fante radiante pentru procese de defilare.

Bilanțul energetic al unei instalații de încălzire cu microunde este indicat în figura 4.38.

Principalele aplicații industriale actuale ale microundelor sunt decongelarea și prepararea cărnii, vulcanizarea cauciucurilor extrudate, preîncălzirea polimerilor și uscarea prin microunde și vid a medicamentelor și a produselor chimice fine.

O comparație între sistemele de încălzire a corpurilor dielectrice cu înaltă frecvență și cu microunde este indicată în tabelul 4.13.

În tabelul 4.14 sunt prezentați comparativ indicatorii ai procesului de uscare, pentru același produs, în cazul diferitelor tehnologii.

În tabelul 4.15 sunt indicate

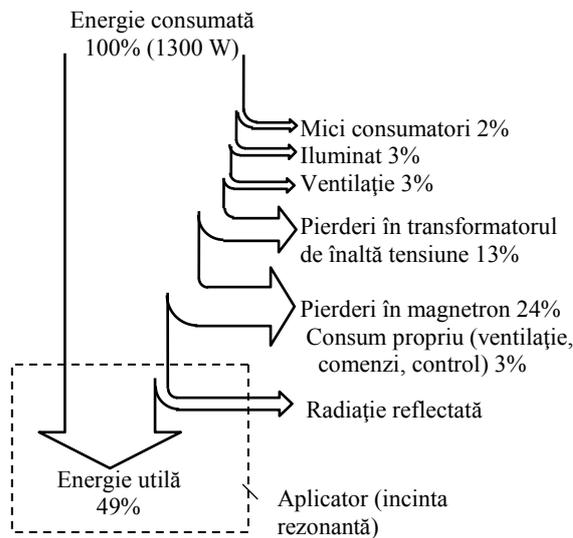


Fig. 4.38 – Bilanțul energetic al unei instalații de încălzire cu microunde.

comparativ valori ale puterilor specifice caracteristice principalelor procese electrotermice.

Tabelul 4.13

Caracteristici ale încălzirii în înaltă frecvență și în microunde

Nr. crt.	Caracteristica	Încălzirea dielectrică în înaltă frecvență	Încălzirea în microunde
1	Frecvența	13,56 MHz ($\lambda = 22,2$ m) 27,12 MHz ($\lambda = 11,1$ m) 40,68 MHz ($\lambda = 7,4$ m)	915 MHz ($\lambda = 32,8$ cm) 2450 MHz ($\lambda = 12,2$ cm) 5800 MHz ($\lambda = 5,2$ cm) 22125 MHz ($\lambda = 1,4$ cm)
2	ϵ_r și $\tan\delta$	trebuie să fie relativ mari	pot fi de valori reduse
3	Fenomenul care determină încălzirea	conducția ionică	vibrația dipolilor sub acțiunea câmpului electric
4	Adâncimea de pătrundere	mare	mică sau medie
5	Dimensiunile produsului	pot fi relativ mari sau variabile	mici sau medii
6	Forma geometrică a produsului	regulată	oarecare
7	Investiții	60% în sursa de alimentare, 40 % în instalația de încălzire	De 1,5 ... 2 ori mai mari ca în cazul instalațiilor cu înaltă frecvență 40 % în sursa de alimentare, 60 % în instalația de încălzire
8	Durata de viață a sursei	5.000 ... 10.000 ore	– magnetron 2.000 ... 5.000 ore – klystron 15.000 ore
9	Puterea unitară maximă a sursei	900 kW pe înaltă frecvență	– magnetron (2450 MHz) 10 kW în microunde – klystron (2450 MHz) 50 kW în microunde

Tabelul 4.14

Comparație între diferite tehnologii de uscare pentru materiale dielectrice

Tehnologia de uscare	Puterea nominală a echipamentului, kVA	Viteza de deplasare a produsului [m/min]	Cantitatea de apă eliminată [kg/oră]	Spațiul ocupat de echipament [m ²]
Rezistență electrică exterioară	10	35	1,5	6,5
Radiații infraroșii	18	38	1,65	0,45
Înaltă frecvență	7,2	38	1,65	1,5
Microunde	6	55	2,45	0,55

Tabelul 4.15

Puteri specifice caracteristice proceselor electrotermice

Nr. crt.	Tehnologii de încălzire	Fluxul termic specific kW/m ²
1	Încălzire indirectă cu rezistoare electrice	5 ... 60
2	Încălzirea materialelor dielectrice cu înaltă frecvență	30 ... 100
3	Încălzirea cu radiații infraroșii	10 ... 300
4	Încălzirea materialelor dielectrice cu microunde	50 ... 500
5	Încălzirea cu inducție electromagnetică	50 ... 5·10 ⁴
6	Încălzirea directă cu rezistență electrică	100 ... 10 ⁵
7	Încălzirea cu arc electric	10 ³ ... 5·10 ⁵
8	Încălzirea cu jet de plasmă	10 ³ ... 5·10 ⁶
9	Încălzirea cu fascicul de electroni	10 ⁴ ... 10 ¹⁰
10	Încălzirea cu laser	10 ⁵ ... 10 ¹⁶

4.3 Procese electrochimice

Utilizarea industrială a proceselor electrochimice a fost posibilă odată cu apariția electronicii de putere, a surselor statice de tensiune continuă de putere ridicată. În industria modernă, consumul energetic al proceselor electrochimice poate atinge 25 ... 30% din energia electrică consumată [4.2].

Principalele domenii de utilizare în industrie a proceselor electrochimice sunt [4.3]:

- prelucrarea dimensională;
- producerea metalelor (extragerea și rafinarea);
- obținerea oxigenului, hidrogenului, clorului, sodiului, fluorului, unor săruri metalice și nemetalice etc.;
- sinteza electrochimică a unor substanțe organice și anorganice;
- depunerea de straturi (pelicule) metalice pe suprafața unor corpuri;
- tratarea suprafețelor (decapare, polizare, degresare etc.);
- realizarea de surse chimice de tensiune continuă (elemente galvanice, acumuloare electrice).

Extragerea aluminiului prin electroliză este unul dintre marii consumatori de energie electrică și va este analizat în continuare, din punctul de vedere al eficienței energetice.

În principiu, extragerea aluminiului este un proces de descompunere electrochimică a aluminei (oxid de aluminiu Al_2O_3) obținută, în cele mai multe cazuri, din bauxită, cu depunerea aluminiului la catod și eliminarea unor compuși ai oxigenului cu carbonul din electrozi.

Schema de principiu a unei cuve electrolitice pentru extragerea aluminiului este indicată prezentată în figura 4.39.

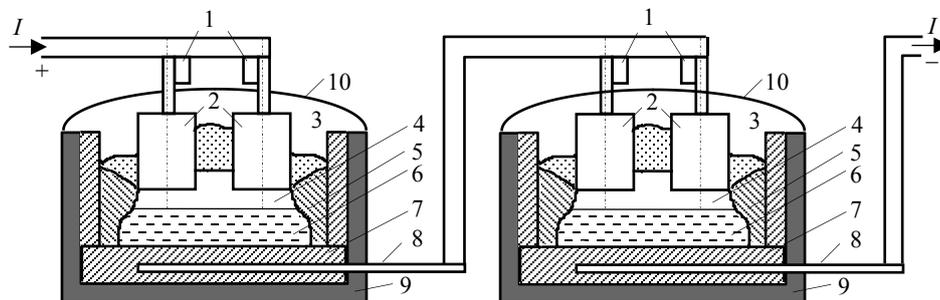


Fig. 4.39 – Electrolizoare pentru extragerea aluminiului.

Pentru reducerea temperaturii de topire a aluminei, aceasta se dizolvă în criolit (Na_3AlF_6). Tehnologiile actuale performante de producere a aluminiului se bazează pe electroliza aluminei într-o baie de criolit. Topirea criolitului pur are loc la o temperatură de $1200^{\circ}C$, dar utilizarea de aditivi (AlF_3 ; CaF_2 ; LiF) și o concentrație a aluminei de 2 ... 7% permit reducerea temperaturii de topire la $940 \dots 980^{\circ}C$.

Criolitul, este singurul solvent pentru alumină, are însă dezavantajul că este foarte corosiv, atacând toate materialele refractare uzuale. Din această cauză, interiorul electrolizoarelor pentru aluminiu este placat cu grafit, care realizează și catodul configurației, conectat la polul negativ al sursei de alimentare.

Anozii 2 ai cuvei electrolitice (în fig. 4.39 este reprezentată o „serie” de două electrolizoare, fiecare cu un șir dublu de anozii) sunt conectați la polul pozitiv I al sursei de alimentare.

Alumina 3 sub formă de pulbere este introdusă prin partea superioară a cuvei și se dizolvă treptat în soluția 4. Electrolitul 4 este supus câmpului electric dintre anod și catod, realizându-se astfel separarea electrică a ionilor și dirijarea lor către electrodul de semn opus.

Interiorul cuvei este placat cu grafit 7, iar pierderile termice sunt limitate cu ajutorul izolației termice 9. Pentru a asigura limitarea proceselor de poluare a mediului ambiant cuvele electrolitice sunt închise cu capacul 10, iar gazele rezultate sunt filtrate și evacuate.

Necesitatea reducerii consumurilor specifice de energie electrică a condus la utilizarea de cuve electrolitice parcurse de curenți din ce în ce mai intensi, astfel că tehnologiile actuale ajung la 300.000 A, fiind folosite cuve paralelipipedice, cu lungime de 9 ... 12 m, lățime de 3 ... 4 m și o înălțime de 1 ... 1,2 m, din oțel placat cu grafit [4.12]. Densitatea de curent electric prin anodul din cărbune este limitată la valori sub 1 A/cm² (pentru a limita pierderile de energie electrică în anodi), astfel încât, în mod obișnuit, fiecare baie cuprinde un șir dublu de anodi conectați în paralel.

Sub acțiunea câmpului electric dintre anod și catod are loc descompunerea:



Ionul de aluminiu se deplasează spre catod unde se neutralizează electric, iar metalul topit 6 se depune pe fundul băii, de unde este extras periodic cu ajutorul unei instalații cu vid.

Ionul negativ ajungând la anodul din grafit se neutralizează electric și determină apariția oxidului de aluminiu și degajarea de oxigen:



Oxidul de aluminiu reintră în baia topită, iar oxigenul reacționează cu carbonul din anod, rezultând un amestec de oxid și dioxid de carbon.

În același timp cu separarea oxidului de aluminiu, sub acțiunea câmpului electric, în baia lichidă mai au loc o serie de reacții secundare, care determină reducerea randamentului procesului și formarea pe părțile laterale ale băii a unei cruste solide 5 numită taluz.

Sarcina electrică teoretică Q necesară pentru a depune la catod o masă m de substanță este dată de legea electrolizei (Faraday)

$$Q = m / k, \quad (4.22)$$

în care echivalentul electrolitic k pentru aluminiu are valoarea de 0,3356 g/Ah.

Masa reală depusă m_r , pentru o sarcină electrică Q rezultă prin înmulțirea masei teoretice m cu randamentul de curent η_{CE} , în %, (*current efficiency*):

$$m_r = \frac{\eta_{CE}}{100} \cdot m. \quad (4.23)$$

Pentru electrolizoarele uzuale randamentul η_{CE} are valori de 82 ... 92%.

Deoarece în funcționarea electrolizorului poate să apară periodic efectul anodic, pe durata căruia nu are loc proces de depunere de aluminiu, se introduce un randament de timp η_{TE} (*time efficiency*) având valori peste 0,9. În mod uzual se poate considera o valoare uzuală $\eta_{TE} = 0,95$.

Tensiunea la bornele electrolizorului este egală cu suma dintre tensiunea teoretică de descompunere $e = 1,65$ V a soluției la temperatura de lucru, căderea de tensiune în electrolit 1,5 ... 1,6 V și căderea de tensiune la electrozi, la contacte și în circuitul de alimentare 0,9 ... 1,1 V. În acest fel, rezultă că tensiunea U la bornele unui electrolizor este de 4,05 ... 4,25 V, iar consumul real de energie W_r , pentru obținerea unui kilogram de aluminiu rezultă:

$$W_r = \frac{U \cdot Q_t}{\eta_{CE} \cdot \eta_{TE}}. \quad (4.24)$$

Randamentul energetic al unui electrolizor η_{EE} [%] (*energy efficiency*) rezultă din relația:

$$\eta_{EE} = \frac{W_u}{W_t} \cdot 100 = \frac{e \cdot I \cdot t \cdot \eta_{CE} \cdot \eta_{TE}}{U \cdot I \cdot t} = \frac{e \cdot \eta_{CE} \cdot \eta_{TE}}{U} \quad [\%]. \quad (4.25)$$

Cu valorile indicate mai sus, rezultă $\eta_{EE} \cong 31\%$.

În relația (4.25), W_u este energia utilă, iar W_t – energia totală utilizată pentru obținerea unei cantități de aluminiu.

Pentru obținerea unei tone de aluminiu, în instalațiile actuale de electroliză, se consumă circa 15000 MWh energie electrică, 1,9 ... 2,0 t alumină, 50 ... 70 kg criolit, 20 ... 30 kg florid de aluminiu, 0,55 ... 0,6 t de masă anodică și alți diferiți fondanți. În instalațiile actuale de extragere a aluminiului, consumul specific de energie electrică poate fi redus până la 12,5 MWh/t [4.12].

În analiza energetică a tehnologiilor actuale de producere a aluminiului, ca mărime de referință se consideră energia electrică necesară obținerii aluminiului în procesul de electroliză. Pentru o analiză energetică completă este necesar însă a lua în considerație, atât procesele anterioare, de producere a aluminei, cât și procesele ulterioare, de rafinare și turnare a aluminiului.

În figura 4.40 este prezentat bilanțul de energie al unui electrolizor. Se observă faptul că o parte de energie (24,1%) este preluată datorită reacțiilor exoterme la anozii din cărbune ai instalației.

Sursele de alimentare trebuie să asigure valorile necesare ale curentului electric, în condițiile unei durate de funcționare anuală de peste 8000 ore. Este necesară o fiabilitate ridicată

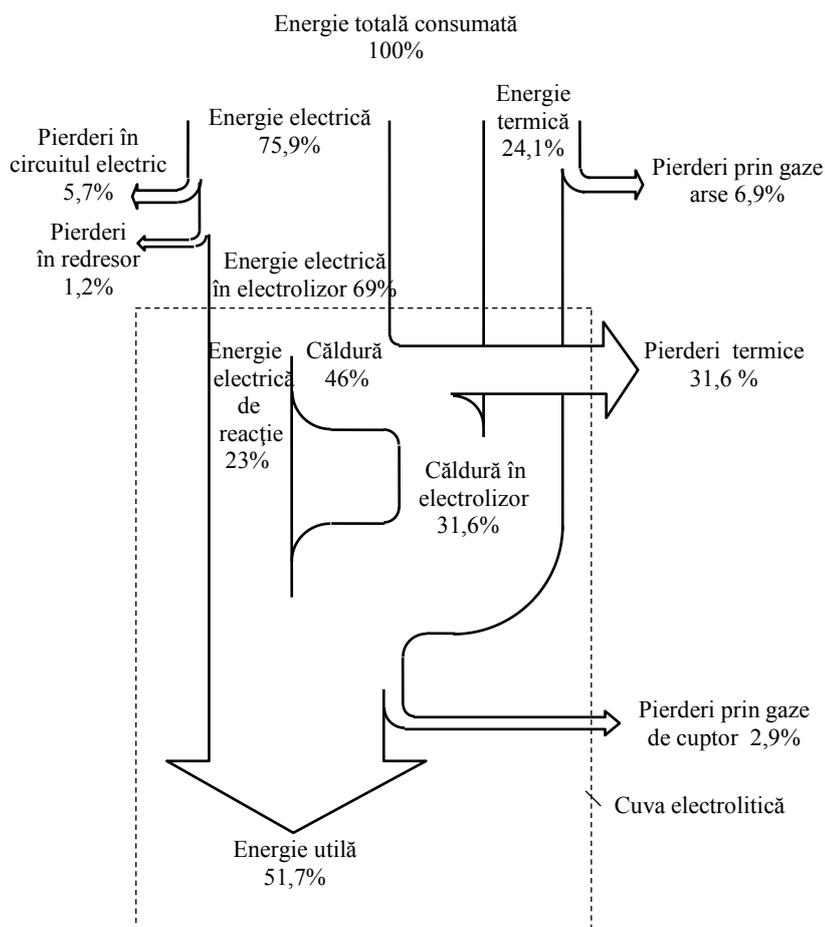


Fig. 4.40 – Bilanțul energetic simplificat al unui electrolizor pentru extragerea aluminiului.

a componentelor instalației de alimentare (transformatoare coborâtoare, redresoare, sisteme de reglaj etc.) și posibilitatea reglajului în limite largi a tensiunii de ieșire. Pentru limitarea nivelului armonicilor sunt utilizate sisteme de redresare cu 12, 24, 48, 60 sau 72 pulsuri.

Principalele direcții privind reducerea consumurilor specifice de energie electrică în instalațiile actuale de producere a aluminiului sunt:

- creșterea intensității curentului în circuitul tehnologic peste 300 kA;
- creșterea randamentului de curent η_{CE} până la circa 0,96;
- reducerea tensiunii la bornele electrolizorului până la 3,8 V.

Cu aceste măsuri se consideră că în instalațiile pentru producerea aluminiului, în procesul de electroliză, consumul specific poate fi de circa 11,9 kWh/kg.

În afara aluminiului, procesele de electroliză sunt utilizate și pentru producerea hidrogenului, oxigenului, clorului, nichelului, cuprului rafinat, magneziului, titanului, plumbului, zincului. O serie de date privind procesele pentru obținerea unor materiale prin electroliză sunt indicate în tabelul 4.16 [4.13].

Tabelul 4.16

Caracteristici ale proceselor de electroliză pentru obținerea unor materiale

Material	Electrolit	Temperatura de procesare °C	Tensiunea la bornele băii V	Consum specific de energie electrică kWh/kg
Ca	CaCl ₂	800	20 ... 30	45
Li	LiCl + KCl	420 ... 430	6	28 ... 30
Mg	MgCl ₂	670 ... 730	5 ... 6	14 ... 16
Na	NaCl + CaCl ₂	570 ... 590	6 ... 7	10 ... 11
Cl				1,8 ... 2,2
Ti				24 ... 26
Pb				0,115
Zn	ZnSO ₄ + H ₂ SO ₄	35...40		3,5
Ni				4,0
Cu (rafinare)	CuSO ₄ + H ₂ SO ₄	60	0,3 ... 0,35	0,2 ... 0,38
O și H (se procesează împreună)				pentru 1 m ³ de H și 0,5 m ³ de O; 5,5 kWh

4.4 Tehnologii electrice speciale

Tehnologiile electrice speciale se referă la un grup de procese în care energia electrică participă nemijlocit și se transformă în alte forme de energie, la locul realizării procesului tehnologic. Fenomenele fizice care stau la baza acestor procese sunt cele care apar la trecerea curentului electric prin metale, materiale dielectrice și semiconductoare, gaze și lichide.

În urma proceselor electrotehnologice se pot obține produse metalice și nemetalice, cu forme și dimensiuni comandate, pot fi realizate procese de tăiere și sudare a materialelor, schimbarea proprietăților fizico-mecanice a suprafeței pieselor etc.

Principalele tehnologii cuprinse în această categorie sunt indicate în figura 4.41 [4.14].

4.5 Concluzii

Tehnologiile electrice sunt larg întâlnite în industria modernă, determinând în principal a calitate ridicată a produselor realizate, efecte reduse asupra mediului ambiant și condiții corespunzătoare de muncă pentru personalul de deservire.

Eficiența energetică a proceselor electrice, comparativ cu alte tipuri de procese, în special a celor utilizând gaze naturale, trebuie făcută plecând de la combustibil. În acest sens,

randamentul energetic al tehnologiilor electrice este afectat de randamentul de producere a energiei electrice în centrale. Odată cu implementarea noilor tipuri de centrale electrice, cu randamente care pot depăși 50% , tehnologiile electrice devin competitive și din punct de vedere energetic. Alegerea tehnologiilor electrice în multe cazuri nu este determinată numai de dimensiunea energetică a problemei ci de avantajele legate de utilizarea acestora.

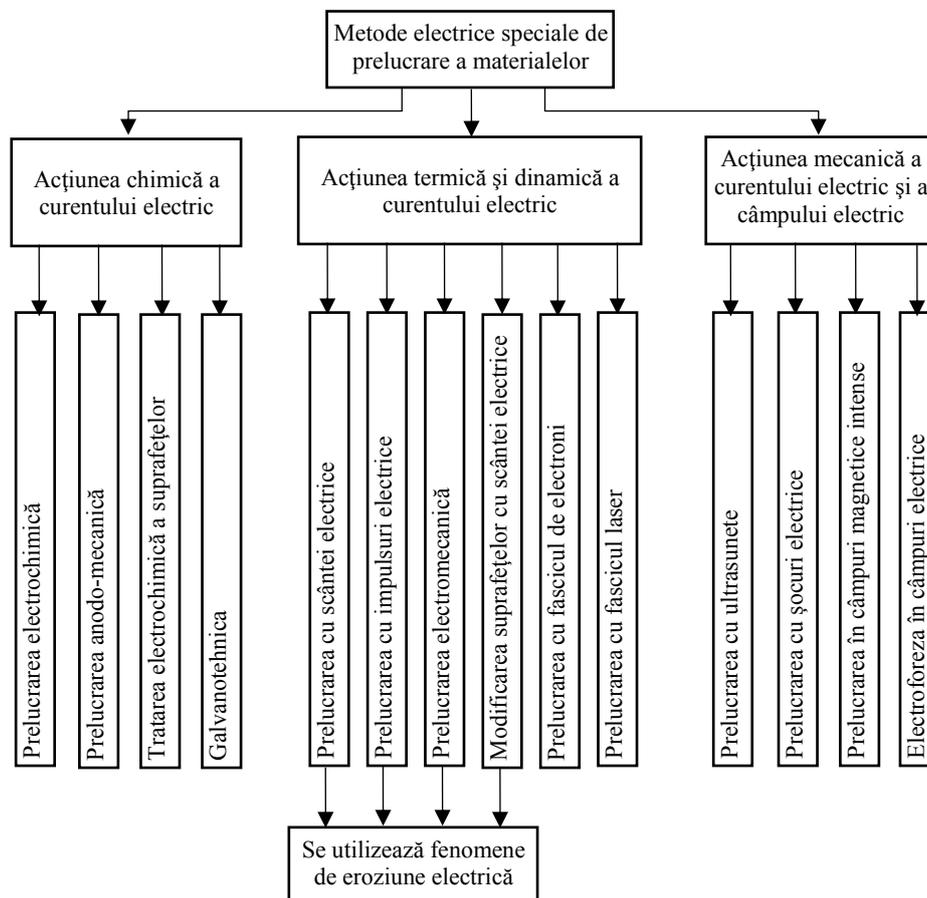


Fig. 4.41 – Tehnologii electrice speciale.

Obținerea parametrilor optimi ai procesului electric necesită a calitate ridicată a energiei electrice. În același timp, cele mai multe dintre echipamentele destinate tehnologiilor electrice, în principal datorită circuitelor de reglare și adaptare optimală la procese, determină perturbații electromagnetice (deformarea curbelor curentului electric și a ale tensiunilor de alimentare, factor de putere redus, goluri de tensiune, nesimetrii, flicker). Limitarea acestor perturbații, pentru a nu afecta calitatea energiei electrice furnizată altor consumatori impune prezența unor echipamente specializate. În analiza energetică a procesului electric este necesar a lua în considerație și pierderile determinate de prezența acestor echipamente.

Bibliografie

- [4.1] Metaxas A.C., *Foundations of Electroheat*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, 1996.
- [4.2] Golovanov N., Șora I., *Electrotermie și electrotehnologii*, vol. I – *Electrotermie*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [4.3] Rudolf M., Schaefer H., *Elektrothermische Verfahren – Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin 1989.
- [4.4] Comșa, D. *Instalații electrotermice industriale*. Vol.I și II. Editura Tehnică, București, 1986.
- [4.5] Altgauzen, A., P. ș.a. *Elektrotremiceskoe oborudovanie. Spravocinik*. Energia, Moscova, 1980.

- [4.6] Falotă H., *Electrotermii și Electrotehologii industriale*, vol I și vol. II, Editura Universității „Lucian Blaga”, Sibiu, 2002.
- [4.7] Falotă H., *Ghid de proiectare. Aplicații electrotehnologice industriale*, Editura Universității „Lucian Blaga”, Sibiu, 2002.
- [4.8] Prisăcaru, V. și Ponomarev, B. *Radiații infraroșii și aplicații industriale*. Editura Tehnică, București, 1972.
- [4.9] Orfeu, M. *Electric Process Heating. Technologies. Equipment. Applications*. Battelle Press, Columbus USA, 1987.
- [4.10] Davies E.J., Simpson P. *Induction Heating Handbook*, McGraw Hill Book Co UK 1979.
- [4.11] Mocanu C.I., *Bazele electrotehnicii. Teoria câmpului electromagnetic*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1991.
- [4.12] Bailleux C. *Approche d'un bilan énergétique global de l'aluminium*. CNE, Neptun, 1994, pg.81 ... 89.
- [4.13] Gavrițaș I., Marinescu N.I. *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*. Editura Tehnică, București, 1991.
- [4.14] Șora I., Golovanov N., *Electrotermie și electrotehologii*, vol. II – *Electrotehologii*, Editura Tehnică, București, 1997.