

CUPTOARE INDUSTRIALE

- Îndrumar de proiectare -

ing. MARIN GURGU

CUPTOARE INDUSTRIALE

- Îndrumar de proiectare -



EDITURA UNIVERSITARĂ
București

Colecția ȘTIINȚE EXACTE

Referenți științifici:

Prof. Univ. Dr. Ing. Hab. Victor GEANTĂ, Facultatea de Știință și Ingineria Materialelor, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București

Prof. Univ. Dr. Ing. Cristian PREDESCU, Facultatea de Știință și Ingineria Materialelor, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București

Prof. univ. dr. ing. Petrică VIZUREANU, Facultatea de Știință și Ingineria Materialelor, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Redactor: Laura Nicolescu

Tehnoredactor: Ameluța Vișan

Coperta: Monica Balaban

Foto copertă: Marin Gurgu

Editură recunoscută de Consiliul Național al Cercetării Științifice (C.N.C.S.) și inclusă de Consiliul Național de Atestare a Titlurilor, Diplomelor și Certificatelor Universitare (C.N.A.T.D.C.U.) în categoria editurilor de prestigiu recunoscut.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

GURGU, MARIN

Cuptoare industriale : îndrumar de proiectare / Marin Gurgu. -

București : Editura Universitară, 2025

Conține bibliografie

ISBN 978-606-28-1949-1

66.041

DOI: (Digital Object Identifier): 10.5682/9786062819491

© Toate drepturile asupra acestei lucrări sunt rezervate, nicio parte din această lucrare nu poate fi copiată fără acordul Editurii Universitare

Copyright © 2025

Editura Universitară

Editor: Vasile Muscalu

B-dul. N. Bălcescu nr. 27-33, Sector 1, București

Tel.: 021 – 315.32.47

www.editurauniversitara.ro

e-mail: redactia@editurauniversitara.ro

Distribuție: tel.: 021.315.32.47/ 0745 200 718/ 0745 200 357

comenzi@editurauniversitara.ro

www.editurauniversitara.ro

CUPRINS

Prefață	9
1. Cuptoare industriale echipate cu instalație de ardere a gazului natural	13
1.1. Cuptoare de temperatură joasă.	13
1.1.1. Cuptoare de tratamente termice la temperatură joasă utilizate în industria aluminiului.....	13
1.1.2. Cuptoare de tratamente termice la temperatură joasă utilizate în industria constructoare de mașini	110
1.1.3. Cuptoare fără agitatoare și mufla pentru tratamente termice la temperatură joasă.....	151
1.2. Cuptoare de temperatură înaltă.....	157
1.2.1. Cuptoare de forjă	162
1.2.2. Cuptoare de laminare.....	170
1.2.3. Cuptoare pentru topit deșeuri de aluminiu	171
2. Cuptoare industriale echipate cu rezistori electrici ..	183
2.1. Alegerea materialului pentru rezistori	185
2.1.1. Aliaje feritice (Fe-Cr-Al).....	185
2.1.2. Aliaje austenitice (Ni-Cr, Ni-Cr-Fe).....	186
2.1.3. Carbura de siliciu (SiC)	188
2.1.4. Bisiliciura de molibden (MoSi ₂).....	190

2.1.5. Grafite.....	192
2.1.6. Alte materiale	193
2.2. Alegerea tipului de suport pentru rezistori	196
2.2.1. Tuburi ceramice	198
2.2.2. Cărămizi profilate	199
2.2.3. Bucșe ceramice	201
2.2.4. Rezistori tubulari	203
2.3. Soluții constructive.....	205
3. Exemple de calcul	226
3.1. Exemplul nr. 1 - Cuptor de detensionare.....	226
3.1.1. Date de calcul	227
3.1.2. Calculul izolației termice.....	227
3.1.3. Calculul cantității orare de căldură acumulată în șarjă și suportii ei	234
3.1.4. Calculul cantității de căldură acumulată în muflă, agitatoare, ancore..	235
3.1.5. Calculul cantității de căldură acu- mulată în izolația termică	236
3.1.6. Calculul cantității orare de căldură necesară cuptorului	239
3.1.7. Puterea minimă a cuptorului.....	239
3.1.8. Calculul puterii cuptorului în cazul încălzirii electrice, cu rezistori.....	240
3.1.9. Calculul puterii cuptorului în cazul încălzirii cu gaz metan.....	240
3.1.10. Calculul agitatoarelor necesare	242
3.1.11. Calculul de dimensionare al structurii de rezistență a vetrei	246
3.1.12. Calculul roților de rulare	247
3.1.13. Calculul de dimensionare al structurii de rezistență a bolții.....	248

3.1.14. Calculul de dimensionare al stâlpilor carcasei cuptorului	249
3.1.15. Calculul mecanismului de acționare al vetrei - varianta ușă pe vatră.....	251
3.1.16. Calculul instalației de răcire controlată.	256
3.2. Exemplul nr. 2 – Cuptor electric de recoacere ..	261
3.2.1. Date de calcul	261
3.2.2. Dimensiunile spațiului util de lucru:	262
3.2.3. Dimensiunile spațiului interior al cuptorului:.....	262
3.2.4. Calculul izolației termice.....	262
3.2.5. Calculul cantității de căldură acumu- lată în sarjă.....	266
3.2.6. Calculul cantității de căldură acumu- lată în izolația termică, muflă, ancore și agitatoare.....	266
3.2.7. Calculul puterii cuptorului.....	269
3.2.8. Calculul rezistorilor cuptorului.....	269
3.2.9. Calculul mecanismului de acționare al ușii	276
Bibliografie	282

PREFAȚĂ

Există o gamă foarte largă de tipodimensiuni de cuptoare utilizate în diferite industrii: industria metalurgică, industria constructoare de mașini, industria chimică, industria materialelor de construcții, industria materialelor ceramice, industria alimentară, s.a.

În literatura de specialitate, există mai multe lucrări, redactate în limba română, care tratează pe larg multe probleme de bază referitoare la calculul și proiectarea cuptoarelor industriale: întocmirea bilanțului termic, soluții tehnice de izolare termică a acestor cuptoare, soluții constructive pentru realizarea instalației de ardere a unui cuptor echipat cu arzătoare, pentru recuperarea căldurii gazelor arse și evacuarea acestor gaze la coșul de fum, calculul și proiectarea rezistorilor unui cuptor electric, soluții constructive de amplasare a rezistorilor într-un cuptor electric, etc. Informații foarte importante pot fi găsite și în prospectele materialelor și echipamentelor utilizate la execuția cuptoarelor industriale. Aceste prospecte sunt puse la dispoziție de producătorii materialelor și echipamentelor respective.

Lucrarea de față nu își propune să abordeze în detaliu problemele tratate deja în alte lucrări de specialitate. Cei interesați de aceste probleme, pot găsi ușor lucrările adecvate.

Prezenta lucrare își propune să abordeze doar câteva probleme legate de proiectarea și execuția unor tipuri de

cupatoare industriale de dimensiuni relativ mari, utilizate în țara noastră. Aceste probleme, deși importante, nu sunt tratate sau sunt tratate insuficient în literatura de specialitate din România. De asemenea, în lucrare sunt prezentate și soluții concrete de realizare a unor tipuri de cupatoare precum și exemple de calcul. Deși unele soluții sunt descrise la prezentarea unui anumit tip de cuptor, ele sunt aplicabile pentru multe alte tipuri de cupatoare.

Pentru majoritatea cuptoarelor industriale, o problemă foarte importantă este aceea a omogenității temperaturii din spațiul util de lucru. Modalitățile concrete de rezolvare ale acestei probleme sunt tratate foarte puțin în literatura de specialitate din România, deși este esențială pentru cuptoarele destinate tratamentelor termice dar este importantă și pentru alte tipuri de cupatoare cum sunt cele destinate încălzirii semifabricatelor în vederea deformării plastice, cuptoarelor utilizate în industria ceramică, chimică, s.a.

Problema omogenității temperaturii în spațiul util de lucru al unui cuptor este una majoră, în special în cazul cuptoarelor de temperatură joasă cu înălțimi mari și foarte mari, care au volumul spațiului util de lucru de la câțiva metri cubi până la zeci sau sute de metri cubi.

Densitatea aerului scade pe măsură ce crește temperatura sa. De aceea, în mod natural, aerul cald se ridică în bolta cuptorului și provoacă neomogenitate de temperatură în spațiul util de lucru. Această neomogenitate este cu atât mai accentuată cu cât înălțimea spațiului interior al cuptorului este mai mare.

Neomogenitatea mare de temperatură într-un cuptor, poate provoca pagube majore în exploatare: rebutarea șarjei, avarierea utilajelor destinate deformării plastice, creșterea consumului specific de energie, pierderi mari de

material datorită supraoxidării semifabricatelor încălzite la temperaturi prea mari, s.a.

Alte probleme abordate în prezenta lucrare sunt:

- precizia de reglare a temperaturii în spațiul util de lucru al cuptoarelor
- îmbunătățirea izolării termice a cuptoarelor industriale
- îmbunătățirea izolării și etanșării termice a ușilor cuptoarelor
- îmbunătățirea etanșării vetrelor cuptoarelor industriale cu vatră mobilă
- proiectarea instalațiilor de ardere a gazului metan care echipează cuptoarele industriale
- proiectarea rezistorilor și instalațiilor electrice și de automatizare pentru cuptoarele electrice, s.a.

În prezenta lucrare, sunt prezentate succint unele considerente teoretice referitoare la problemele abordate dar sunt prezentate mai detaliat soluții concrete, practice, care pot fi adoptate la proiectarea sau modernizarea unui cuptor pentru a preveni apariția problemelor în exploatare. Majoritatea soluțiilor menționate au fost verificate în practica, pe mai multe cuptoare.

La întocmirea lucrării au fost avute în vedere câteva dintre tipurile de cuptoare întâlnite frecvent în industria din România:

- cuptoare echipate cu instalație de ardere a gazului natural
- cuptoare echipate cu rezistori electrici

Din punct de vedere constructiv, cele mai utilizate cuptoare industriale, care sunt abordate în această lucrare, sunt:

- cuptoare tip cameră, cu vatră fixă, cu ușă tip ghilotină, destinate tratamentelor termice sau încălzirii în vederea deformării plastice

- cuptoare tip cameră, cu vatră mobilă, cu ușă tip ghilotină sau ușă suspendată pe vatră, destinate tratamentelor termice sau încălzirii în vederea deformării plastice.

- cuptoare tip tunel, cu funcționare continuă sau discontinuă (fără uși sau cu uși la ambele capete).

Lucrarea de față se adresează studenților de la facultățile și specializările care au profil termotehnic și metalurgic precum și tinerilor ingineri care proiectează cuptoare industriale noi sau proiectează modernizarea unor cuptoare vechi. De asemenea, lucrarea este utilă și celor care se ocupă de execuția, montajul, punerea în funcțiune și exploatarea cuptoarelor industriale.

1. CUPTOARE INDUSTRIALE ECHIPATE CU INSTALAȚIE DE ARDERE A GAZULUI NATURAL

1.1. Cuptoare de temperatură joasă

Cuptoarele avute în vedere în acest capitol au temperatura de funcționare de până la $\sim 700^{\circ}\text{C}$ și spațiul util de lucru de dimensiuni mari: lungime de până la 13000 mm, lățime de până la 3500 mm și înălțime de până la 2500 mm. Este important de reținut că spațiul util de lucru al unui cuptor este cel care poate fi ocupat efectiv de șarjă, în care se garantează parametrii de funcționare ai cuptorului (temperatura și omogenitatea ei). Acest spațiu nu trebuie confundat cu spațiul interior al cuptorului, care este mai mare și este limitat de izolația termică de la pereți, boltă, vatră și ușă.

Masa șarjei unui astfel de cuptor poate atinge 140 tone sau chiar mai mult. Astfel de cuptoare se utilizează în mai multe industrii.

1.1.1. Cuptoare de tratamente termice la temperatură joasă utilizate în industria aluminiului

Principalele tipuri de cuptoare de tratamente termice care există în această industrie sunt:

- cuptoare de îmbătrânire pentru table laminate și profile extrudate
- cuptoare de omogenizare pentru sleburi și bare turnate semicontinuu

1.1.1.1. Cuptoare de îmbătrânire

În funcție de destinația materialelor tratate termic în aceste cuptoare, trebuiesc respectate anumite cerințe tehnice prevăzute de normele specifice.

Spre exemplu, tablele laminate și profilele extrudate destinate industriei aeronautice, trebuiesc supuse tratamentului termic de îmbătrânire în cuptoare în care temperatura de lucru să poată fi setată între $\sim 100 \dots 250^{\circ}\text{C}$ iar omogenitatea de temperatură în spațiul util de lucru trebuie să se încadreze în $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Această omogenitate de temperatură reprezintă una dintre cele mai importante exigențe referitoare la acest tip de cuptor. Deoarece aceste cuptoare au de regulă un spațiu util de lucru de mari dimensiuni, pentru îndeplinirea cerinței de omogenitate de temperatură este necesar ca, încă din faza de proiectare, proiectantul să aibă în vedere anumite soluții tehnice. Unele dintre multiplele soluții posibile sunt prezentate în continuare.

Pentru un cuptor nou, respectarea cerinței de omogenitate a temperaturii se verifică obligatoriu înainte de darea cuptorului în exploatare. Ulterior, verificarea se face conform unor norme specifice, cel puțin o dată pe an. Pentru aceasta, se apelează la un laborator de metrologie specializat. În vederea verificării, trebuie executat un cadru suport pentru termocupluri. Cadrul se execută din profile

sau țevi laminate din oțel carbon și are forma și dimensiunile spațiului util de lucru.

De acest cadru se fixează termocupluri cu diametrul mic, de ordinul a 3...5 mm și lungime mare, astfel încât capetele cu conectori ale termocuplurilor să poată fi scoase din cuptor și conectate la un înregistrator de temperatură adecvat. Numărul și amplasamentul acestor termocupluri depinde de volumul spațiului util de lucru și norma aplicabilă pentru produsul care urmează a se trata termic în cuptor. În cazul cuptorului de îmbătrânire este aplicabilă norma AMS 2750. Atunci când se face această verificare, trebuie avut în vedere că aceste norme se revizuiesc periodic și trebuie respectată norma în vigoare.

Încă din etapa de proiectare a cuptorului, proiectantul trebuie să aibă în vedere că, soluțiile constructive aplicate, trebuie să permită ajustarea temperaturii în diverse zone ale spațiului util de lucru, astfel încât să se obțină omogenitatea de temperatură necesară.

Câteva dintre aceste soluții sunt:

- împărțirea cuptorului în mai multe zone de reglare termică
- împărțirea cuptorului în mai multe zone de recirculare a atmosferei din interiorul lui
- amplasarea adecvată a arzătoarelor sau a rezisto-rilor precum și amplasarea adecvată a termocuplurilor și a agitatoarelor
- alimentarea agitatoarelor prin convertizoare de frecvență care permit variația turației agitatoarelor în funcție de necesități
- dirijarea adecvată a atmosferei recirculate în cuptor cu ajutorul unei mufle adecvate

- montarea unor defletoare cu poziție reglabilă, care să forțeze recircularea atmosferei cuptorului și prin zonele critice, ș.a.

O altă cerință importantă pentru aceste cuptoare este aceea că atmosfera din cuptor trebuie să fie aer atmosferic, nu gaze arse. Această cerință este foarte importantă în special pentru produsele din aluminiu și aliaje de aluminiu destinate industriei aeronautice.

Chiar dacă schema instalației de ardere a unui cuptor este corect întocmită, chiar dacă se utilizează arzătoare și echipamente de reglare a raportului aer-gaz de cea mai bună calitate, chiar dacă instalația electrică și de automatizare este corect proiectată și executată, chiar dacă softul instalat în PLC-ul care comandă cuptorul este corect, gazele arse vor conține mereu și noxe (CO, NO_x , s.a.).

În timpul tratamentului termic, aceste noxe pot difuza în stratul superficial al șarjei, ceea ce este strict interzis de normele specifice. În plus, dacă apare o problemă majoră și raportul aer-gaz scade foarte mult, necontrolat, șarja poate fi rebutată parțial sau total deoarece este afumată.

De aceea, un astfel de cuptor, trebuie să fie prevăzut cu un sistem care separă gazele arse de atmosfera cuptorului care intră în contact cu șarja.

Pentru a realiza această separare, se pot utiliza tuburi radiante atașate arzătoarelor sau se poate utiliza un generator de aer cald atașat cuptorului. Șarja în cuptor este încălzită de aerul cald livrat de un generator de aer cald amplasat pe sau lângă cuptor. De regulă, un generator de aer cald este echipat cu un arzător. Totuși, soluția aplicată cel mai frecvent este utilizarea unor tuburi radiante. Acestea

pot avea diverse forme: țeavă dreaptă simplă sau în forma literelor U, W, P sau dublu P. Cele cu forma de țeavă dreaptă simplă precum și cele în formă de U și W, de regulă, se montează vertical, lângă pereții cuptorului. În cazul cuptoarelor cu lățime relativ mică, tuburile radiante se pot monta și orizontal. Capetele tubului radiant străpung izolația termică a cuptorului.

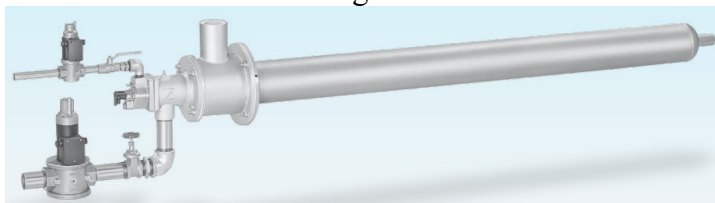
În cazul tuburilor radiante sub formă de țeavă dreaptă simplă precum și a celor în formă de U și W, la un capăt al tubului radiant este montat arzătorul, iar prin celălalt capăt sunt evacuate gazele arse. Aceste gaze sunt colectate cu tubulaturi speciale de gaze arse și apoi sunt evacuate la coșul de fum, de regula cu ajutorul unui ventilator special, numit exhaustor.

Pentru scăderea consumului specific de gaz metan, se recomandă recuperarea căldurii gazelor arse, pentru preîncălzirea aerului de combustie. Pentru realizarea acestei recuperări de căldură, există mai multe posibilități.

Una dintre aceste posibilități este cea a utilizării unor arzătoare prevăzute cu recuperarea individuală a căldurii.

În fig. 1 se prezintă un arzător echipat cu un tub radiant sub formă de țeavă dreaptă cu perete dublu, cu preîncălzirea aerului de combustie în interiorul corpului arzătorului.

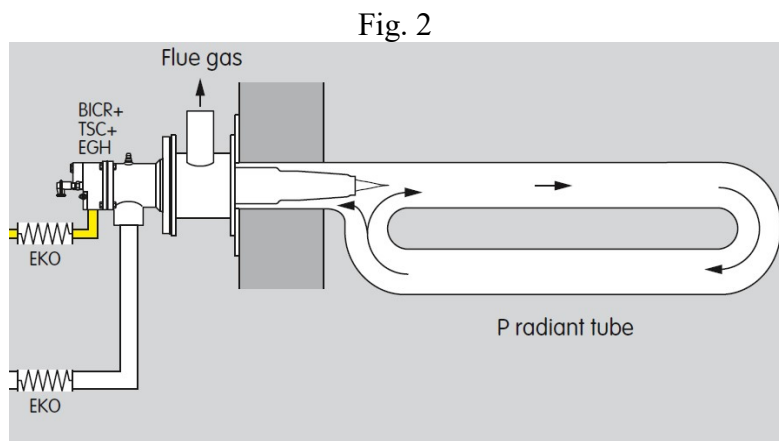
Fig. 1



Această poză împreună cu multe alte informații tehnice poate fi găsită în [42] dar și la alte companii producătoare.

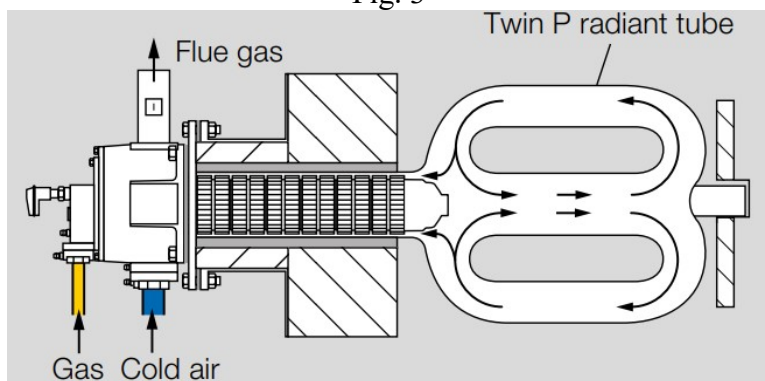
Arzătorul propriu-zis se montează la capătul unui tub radiant special, cu pereți dubli, tubul exterior fiind închis la capătul opus celui pe care se montează arzătorul. Flacăra se dezvoltă în tubul radiant interior. Gazele arse se întorc prin spațiul dintre cele două tuburi, ies prin arzător unde preîncălzesc aerul de combustie și apoi sunt evacuate spre coș.

În fig. 2 se poate vedea un arzător echipat cu un tub tip P. Aceasta poza împreună cu multe alte informații tehnice poate fi găsită în [42].



În fig. 3 se poate vedea un arzător echipat cu tub radiant dublu P. Aceasta poza împreună cu multe alte informații tehnice poate fi găsită în [42].

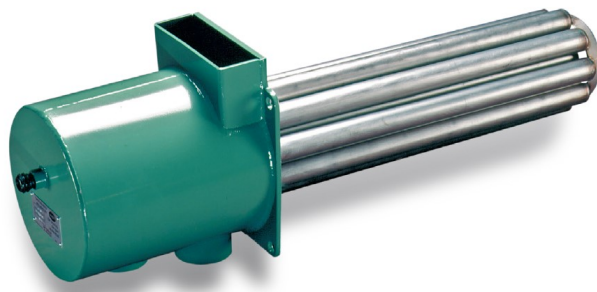
Fig. 3



Tuburile radiante în forma literei P sau dublu P permit realizarea unui randament mai bun deoarece suprafața de schimb de căldură dintre tubul radiant și atmosfera cuptorului este mai mare. În plus, deoarece sunt recirculate în tub, gazele arse evacuate la coș conțin un procent mai mic de noxe. Utilizarea acestor tuburi radiante implică însă și un dezavantaj: prețul acestor tuburi radiante este substanțial mai mare.

Pentru recuperarea căldurii gazelor arse, există și posibilitatea utilizării unor recuperatoare de căldură tipizate, de mici dimensiuni. Un astfel de recuperator se poate atașa pe capătul de evacuare a gazelor arse din tubul radiant drept, simplu sau de tip U sau W. Gazele arse sunt evacuate prin recuperator. Acesta preîncălzește aerul de combustie care intra în arzător. În fig. 4 se prezintă un astfel de recuperator. Această poza împreună cu multe alte informații tehnice poate fi găsită în [43].

Fig. 4



Există și arzătoare autorecuperative din care gazele arse intră în spațiul de lucru al cuptorului și apoi se întorc prin corpul arzătorului unde preîncălzesc aerul de combustie. Din corpul arzătorului, gazele arse sunt evacuate la coș. Un astfel de arzător nu se utilizează pentru echiparea cuptoarelor de îmbătrânire deoarece gazele arse intră în contact cu șarja.

În fig. 5 se prezintă un arzător autorecuperativ.

Această poză împreună cu multe alte informații tehnice poate fi găsită în [44].

Pentru separarea atmosferei cuptorului de gazele arse, arzătorului i se poate atașa un tub radiant simplu (țeavă dreaptă) sau în forma literelor P sau dublu P.

Fig. 5

