

Dr. ing. Dumitru NEAGU

APLICAȚII ALE FASCICULULUI DE ELECTRONI

București, 2007

CUPRINS:

1. DATE GENERALE	1
2. PRINCIPIUL PRELUCRĂRII CU FASCICUL DE ELECTRONI.....	1
3. FENOMENE FIZICE LA PRELUCRAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI	2
3.1. Densitatea de curent	2
3.2. Bombardarea cu fascicul de electroni	2
3.3. Încălzirea, topirea și vaporizarea la bombardarea cu fascicul de electroni.....	3
4. INSTALAȚII DE PRELUCRARE CU FASCICUL DE ELECTRONI	4
4.1. Tunul electronic.....	4
4.2. Tipuri constructiv-funcționale de tunuri electronice	5
5. SUDAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI	6
5.1. Principiul sudării cu fascicul de electroni	6
5.2. Principalii parametri de sudare	7
5.3. Instalații de sudură	7
5.4. Aplicații	8
6. GĂURIREA CU FASCICUL DE ELECTRONI	9
6.1. Principiul găuririi (perforării) cu fascicul de electroni	9
6.2. Principalii parametri de găurire	9
6.3. Instalații de găurire	10
6.4. Aplicații.....	11
7. TRATAMENTE TERMICE SUPERFICIALE CU FASCICUL DE ELECTRONI	11
7.1. Principiul tratamentelor termice superficiale cu fascicul de electroni	11
7.2. Determinarea izotermelor la tratamentele termice superficiale cu fascicul de electroni .	12
7.3. Instalații de tratament termic	15
7.4. Aplicații	16
8. DEpunerea de straturi subțiri cu fascicul de electroni	17
8.1. Principiul depunerii de straturi subțiri cu fascicul de electroni	17
8.2. Instalații de depunere de straturi subțiri	17
8.3. Aplicații	18
9. LITOGRAFIA CU FASCICUL DE ELECTRONI	18
9.1. Principiul litografiei cu fascicul de electroni	18
9.2. Instalații de litografiere	19
9.3. Aplicații	19
10. DOPAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI	19
10.1. Principiul dopării cu fascicul de electroni	19
10.2. Instalații de dopare	20
10.3. Aplicații.....	20
11. TOPIREA CU FASCICUL DE ELECTRONI	21
11.1. Principiul topirii cu fascicul de electroni	21
11.2. Instalații de topire.....	21
11.3. Aplicații.....	21
BIBLIOGRAFIE	21

APLICAȚII ALE FASCICULULUI DE ELECTRONI

1. DATE GENERALE

Un loc tot mai important în cadrul prelucrărilor prin *tehnologii neconvenționale* a început să-l ocupe *prelucrarea cu fascicul de electroni* (Electron Beam Machining – EBM), datorită în special, performanțelor obținute în cadrul proceselor precum: prelucrări în zone preselectate de pe piesa fără ca aceasta să sufere deformări din cauză că transferul de energie se face local și nu în toată masa metalului; prelucrarea oricărui fel de metal cât de dur ar fi acesta; prelucrarea în vid protejează zonele topite de a se oxida: prelucrările sunt rezistente, precise, fine și nu totdeauna necesită operații de execuție ulterioare.

Primele lucrări în domeniul teoretic, referitoare la posibilitatea utilizării electronilor, au apărut încă de la începutul secolului al XX-lea, dar adevărata dezvoltare a bazelor teoretice privitoare la utilizarea fascicului de electroni și ioni a fost elaborată după anul 1940, pe baza legilor formulate de Newton, Richardson, Dashman, și ca urmare a teoriei lui S. Shenland privind difuzia electronilor în metale, precum și a lucrărilor lui L.E. Popilov, R. Rene, H. Kluger etc.

Prima instalație industrială utilizată la sudarea cu flux de electroni, a fost realizată în anul 1957 în Franța. La ora actuală, firme din Franța (ALCATEL, și SCIAKY), SUA (Temescal), URSS (cu tipurile U86, A306), Germania (Steigerwald, Leybold – Heraeus) etc. Produc pe scară largă instalații industriale de tăiere, găurire, sudare, topire etc, existând în momentul de față, pe plan mondial, peste 6000 de instalații de flux de electroni sau ioni.

La noi în țară, primele instalații de prelucrare cu fascicul de electroni au fost realizate la IFE București în colaborare cu ISIM Timișoara, destinate în special sudării diferitelor materiale.

Ca urmare a caracteristicilor superioare de utilizare și dezvoltării în ultimii ani, fasciculul de electroni stă, în prezent, la baza realizării unui mare număr de prelucrări precum: sudarea (care constituie principala aplicație de prelucrare cu FE), găurirea (microgăurirea), litografia (scrierea directă, marcarea, litografia optică), topirea (metalelor refractare, elaborarea metalelor și aliajelor de puritate înaltă), depunerea de straturi subțiri, doparea, tratamente termice (durificarea, alierea, înobilarea prin retopire) etc.

2. PRINCIPIUL PRELUCRĂRII CU FASCICUL DE ELECTRONI

Prelucrarea cu fascicul de electroni face parte din categoria procedeelor de prelucrare termice. Sursa termică o constituie un fascicul de electroni concentrat, având o viteză și, ca urmare, o energie cinetică mare care **bombardează componentele de prelucrat**. La impactul fascicului de electroni cu componentele de prelucrat, energia acestuia se transformă în căldură și are loc o **încălzire locală, rapidă a materialului** prin conducție (fig. 1.a,b). Odată cu creșterea puterii specifice a fascicului profilul zonei se modifică (fig. 1.c), la puteri specifice până la valori de 10^6 W/cm², sub acțiunea vaporilor produși se formează un tub capilar, înconjurat de un înveliș subțire de material topit (fig. 1.d). La puteri specifice de 10^8 W/cm², se produce eliminarea explozivă a învelișului topit și o străpungere a materialului pe întreaga grosime a sa (fig. 1.e).

Cele mai multe procese se desfășoară în vid, deoarece atmosfera ar provoca o frânare și dispersie a fascicului.

Procedeul de prelucrare cu fascicul de electroni are și neajunsuri. Unul dintre acestea este generarea radiației X în timpul prelucrării, motiv pentru care se iau măsuri speciale de protecție.

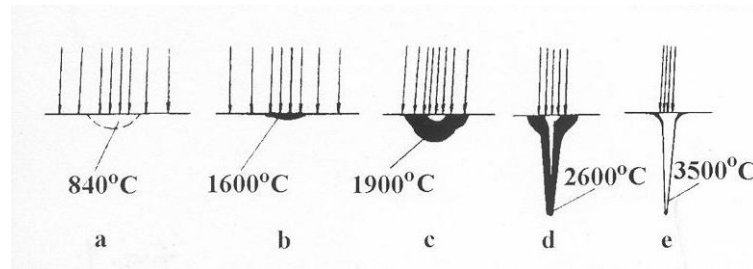


Fig. 1 – Fazele de încălzire ale materialului

a – încălzirea locală; b – încălzirea cu topirea materialului; c,d – modificarea profilului zonei topite; e – eliminarea explozivă a topirii.

3. FENOMENE FIZICE LA PRELUCRAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI

Elementul primar, care stă la baza fenomenelor fizice ce au loc la *prelucrarea cu fascicul de electroni*, este particula elementară cu sarcina negativă – electronul – caracterizat prin sarcina: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$; masa: $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{kg}$; raza: $r_e = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{m}$; sarcina specifică: $e/m_e = 1,759 \cdot 10^{11} \text{C/kg}$.

Numărul electronilor dintr-un atom depinde de elementul respectiv și este egal cu numărul atomic din tabelul periodic al lui Mendeleev.

Electronii liberi se pot obține prin încălzirea suprafeței unui metal cu o anumită cantitate de energie, care se transferă electronilor, și aceștia părăsesc suprafața metalului, având loc așa numita *emisie termo-electronică*.

Accelerarea electronilor se poate realiza pe două căi: prin aplicarea unui câmp electric sau prin aplicarea unui câmp magnetic.

1.1. Densitatea de curent

Densitatea de curent, q_e , realizată depinde de caracteristicile termofizice ale emițătorului respectiv (catod), temperatura de încălzire, proprietățile suprafeței catodului și se poate determina cu ajutorul relației Richardson – Dashmann:

$$q_e = AT^2 e^{-e\Phi_0/kT} \quad [\text{A/cm}^2] \quad (1)$$

unde : A – este constanta de emisie, care depinde de natura substanței emițătoare și are în general, valori de $40 \dots 70 \text{A/cm}^2 \text{T}^2$ pentru metalele pure; T – temperatura absolută a emițătorului [K]; $e\Phi_0$ – energia specifică a emițătorului [J]; k – constanta lui Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$).

Deși densitatea curentului se impune a fi de valori cât mai ridicate, totuși, datorită interdependenței dintre mărimea acesteia și temperatura de încălzire a emițătorului, este necesară delimitarea acestor valori, întrucât supraîncălzirea emițătorului duce la o evaporare accentuată a metalului de bază, și implicit, la scăderea duratei de funcționare a acesteia.

1.2. Bombardarea cu fascicul de electroni

Din punct de vedere fizic, bombardamentul cu fascicul de electroni este însoțit de fenomene secundare, care consumă o parte din puterea fasciculului.

Randamentul efectiv al sudării are valori de cca 60-95%. Într-un material de oțel-carbon s-au obținut următoarele valori ale pierderilor energetice (fig. 2): prin electronii retrodifuzati < 4%, prin vaporizare 0,5 – 2%, prin radiații X, 0,5%. Pentru cazul considerat, materialul de bază preia cca 93 – 95% din energia totală a fasciculului.

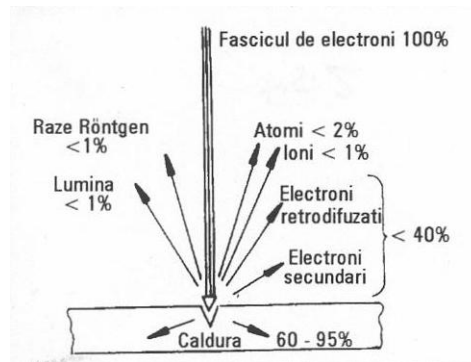


Fig. 2 – Fenomene secundare la bombardarea cu FE.

1.3. Încălzirea, topirea și vaporizarea la bombardarea cu fascicul de electroni

În momentul impactului electronilor accelerați cu suprafața piesei, energia cinetică a acestora este transferată atomilor de metal supuși bombardamentului electronic. Acest transfer de energie duce la creșterea temperaturii materialului, fapt ce are ca rezultat încălzirea și topirea rapidă (fig. 3.a) urmată de vaporizarea materialului.

Acest fenomen de încălzire, topire, vaporizare are loc în trei faze succesive (fig 3.b) astfel:

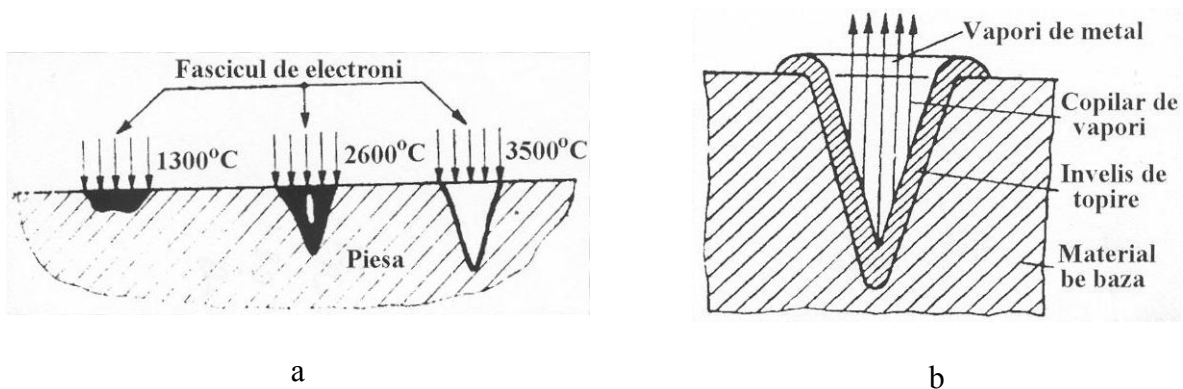


Fig. 3. – Fazele succesive de încălzire, topire și vaporizare a materialului
a – încălzirea rapidă și topirea materialului; b – vaporizarea – expulzarea materialului topit.

a) **În prima fază** la impactul cu piesa fasciculul electronic pătrunde în stratul superficial, până la adâncimea, δ , care poate fi calculată, în cazul unor tensiuni de accelerare de 10 – 82kV cu ajutorul relației:

$$d = 2,6 \cdot 10^{-11} U^2 / \rho \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

unde : U – este tensiunea de accelerare [V]; ρ – este densitatea materialului prelucrat [g/cm³].

b) **În faza a doua**, la adâncimea δ , circa 60 – 95% din energia cinetică a electronilor este cedată sub formă de căldură, ducând la încălzirea prin inducție a materialului metalic în zona respectivă.

Încălzirea materialului metalic se poate analiza cu ajutorul ecuației diferențiale a conductivității termice dată de relația:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{a \partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{C_0 e^{k_1 T}}{c\rho} \quad (3)$$

unde : T – este temperatura mediului ambiant; x – distanța măsurată de la suprafața piesei; t – timpul; a – coeficientul conductivității termice; c – căldura specifică a metalului de prelucrat; k_1 – coeficient de absorbție a energiei; C_0 – constanta procesului.

În general pentru a se realiza topirea metalului sunt necesare densități de putere de ordinul $10^5 \dots 10^8$ W/cm², care asigură – prin focalizarea spotului fasciculului de electroni – obținerea unor temperaturi de 5000 ... 6000°C.

c) **În faza a treia**, are loc o creștere a presiunii specifice a vaporilor de metal topit, care duce la expulzarea sub forma unei microexplozii a stratului de metal topit și evacuarea cu presiune a vaporilor de metal, piesa fiind străpunsă prin formarea unui crater pe suprafața acestuia.

Prelucrarea cu fascicul de electroni se poate face și în regim de impulsuri cu durata de $10^{-4} \dots 10^{-5}$ s.

4. INSTALAȚII DE PRELUCRARE CU FASCICUL DE ELECTRONI

Cele mai întâlnite instalații de prelucrare cu fascicul de electroni sunt cele la care accelerarea electronilor se face cu ajutorul câmpului electric.

Acestea sunt alcătuite, în general (fig. 4), din patru subansamble principale, și anume:

- 3 dispozitivul de producere și dirijare a fasciculului de electroni (tunul electronic);
- 4 instalația electrică de alimentare și producere a tensiunilor de accelerare;
- 5 instalația de realizare a vidului;
- 6 instalația electrică de comandă și reglare.

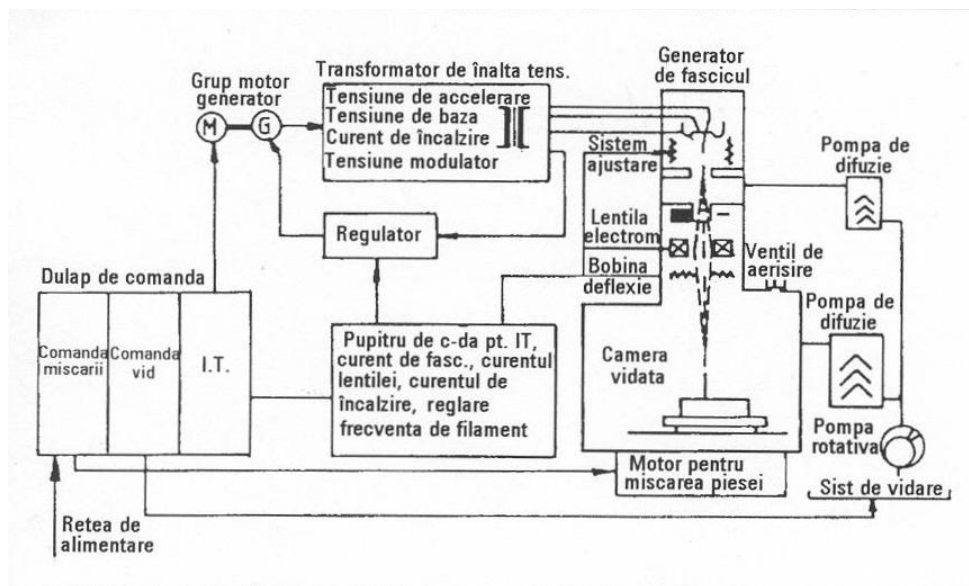


Fig. 4. – schema instalației cu fascicul de electroni

1.4. Tunul electronic

Turnul electronic este subansamblul principal al unei instalații de prelucrare cu fascicul de electroni, asigurând principalele funcțiuni: producerea electronilor liberi, formarea fasciculului de electroni, focalizarea și direcționarea acestuia, (fig. 5) în care: 1 – catodul termorezistiv; 2 – catod – cilindru Wehnelt; 3 – anodul de accelerare; 4 – lentila electromagnetică; 5 – sistemul de deflexie (deflectorul); 6 – piesa de prelucrat; 7 – sursa de tensiune înaltă, iar în fig. 6, se prezintă tunul tip Steigerwald, care echipează instalația T15 prezentată în fig. 8.

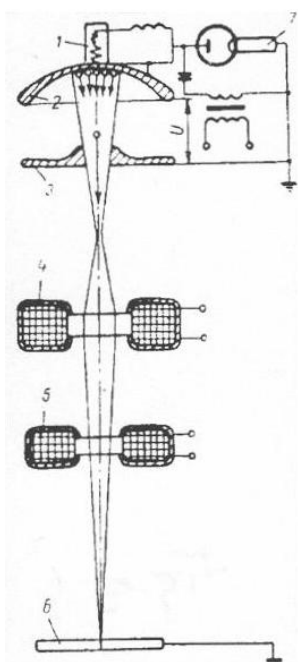


Fig. 5 – Schema unui tun electronic

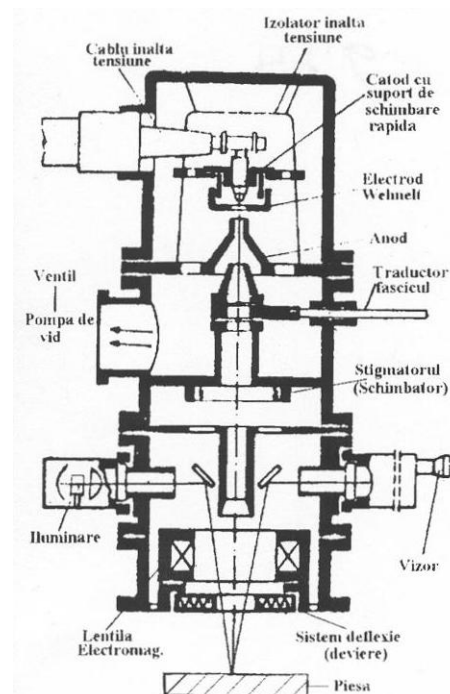


Fig. 6 – Secțiune prin tunul electronic

1.5. Tipuri constructiv – funcționale de tunuri electronice

Principalele tipuri de tunuri electronice (fig. 7) sunt:

a) **tunul diodă** (tunul Pierce) (fig. 7.a) prezintă dezavantajul că nu permite reglarea intensității curentului fasciculului electronic independent de tensiunea de accelerare și din această cauză sunt tot mai rar utilizate.

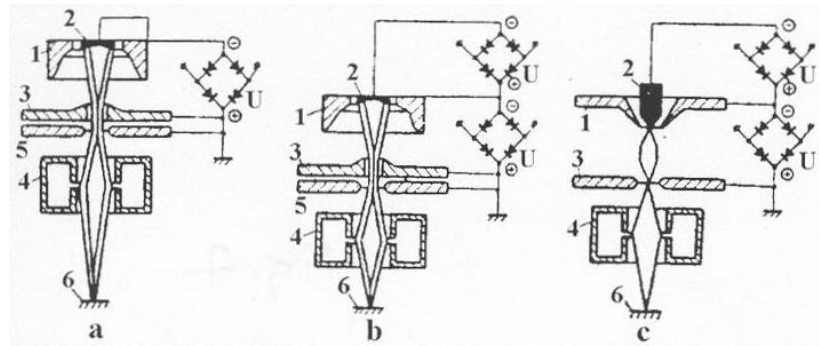


Fig. 7 – Tipuri de tunuri electronice

a – tunul diodă; b – tunul triodă; c – tunul triodă cu focalizare la distanță.

unde: 1 – catod – cilindru Wehnelt; 2 – catodul termorezistiv; 3 – anodul; 4 – sistemul de focalizare; 5 – anodul de accelerare; 6 – piesa de prelucrare.

b) **tunul triodă** (fig. 7.b) prezintă posibilitatea reglării independente a intensității curentului fasciculului electronic, datorită faptului că în construcția sa este prevăzută legarea în circuit separat de alimentare a electrodului de polarizare.

c) **tunul trioda cu focalizare la distanță** (tunul Steigerwald) (fig. 7.c) permite focalizarea la distanțe relativ mari (circa 1m) a spotului fasciculului electronic, datorită tensiunilor mari de accelerare utilizate.

În funcție de mărimea tensiunii de accelerare produsă de echipamentul electric corespunzător, tunurile electronice sunt de trei tipuri, și anume, tunuri electronice cu tensiuni mici de accelerare: $U=10 \dots 60V$; tunuri electronice cu tensiuni medii de accelerare: $U=20 \dots 100kV$; tunuri electronice cu tensiuni mari de accelerare: $U=80 \dots 175kV$.

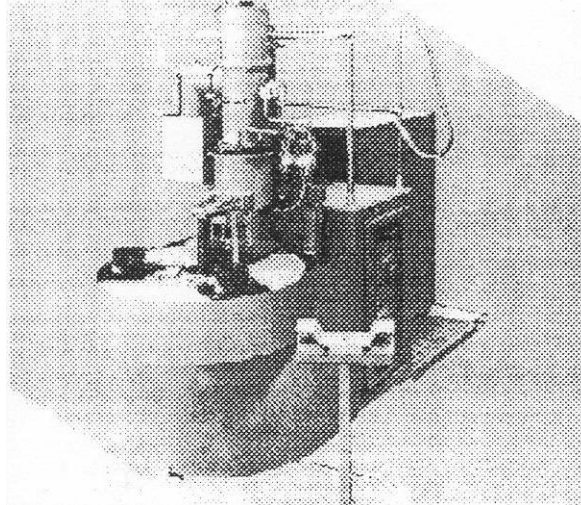


Fig. 8 – Instalație cu fascicul de electroni tip T15, Steigerwald.

În fig. 8 se prezintă o instalație de prelucrare cu fascicul de electroni tip T15, Steigerwald – Germania, având o tensiune de accelerare reglabilă în domeniul 3 ... 60kV, cu dimensiunile camerei de lucru de 250 x 300mm, la un vid de 10^{-2} torr.

În cazul utilizării unor tensiuni înalte de accelerare (peste 100kV), se impune conducerea, proceselor cu circuite închise de televiziune, din cauza puternicelor emisiuni de raze X.

5. SUDAREA CU FASCICUL DE ELECTRONI

1.6. Principiul sudării cu fascicul de electroni

Sudarea cu fascicul de electroni face parte din grupa procedeelor de sudare prin topire. Sursa termică o constituie un fascicul de electroni concentrat, având o viteză și, ca urmare, o energie cinetică mare care bombardează componentele de sudat. La impactul fascicului de electroni cu componentele de sudat, energia cinetică a acestuia se transformă în căldură și are loc o încălzire locală, rapidă a materialului.

În fig. 1, se arată mecanismul formării sudurii cu fascicul de electroni și fazele încălzirii materialului. La puteri specifice de 10^8 W/cm², se produce eliminarea explozivă a materialului topit și o străpungere a materialului pe întreaga grosime a sa, este specifică găuririi (perforării) și se evită la sudare.

Sudarea constituie principala aplicație tehnologică a procedeelor de prelucrare cu fascicul de electroni, cu largi aplicații în industria cosmică, aeronautică, nucleară, electronică, electrotehnică, a autovehiculelor etc. Se pot realiza în condițiile unor indici tehnico-economici superiori – îmbinările între diferite materiale refractare titan, wolfram, tantal, zirconiu etc, precum și a altor oțeluri înalt aliate, a unor aliaje de aluminiu și nichel, a cuplurilor de materiale cu temperaturi de topire și conductibilități termice diferite.

Procedeul de sudare cu fascicul de electroni permite realizarea într-o trecere a unor îmbinări cu grosimea de 0,05 – 300mm, funcție de puterea tunului electronic.

1.7. Principalii parametri la sudare

Principalii parametri electrotehnologici ai procesului de sudare sunt: tensiunea de accelerare U , curentul fasciculului de electroni I , curentul de focalizare I_f , frecvența oscilațiilor fasciculului de electroni f_i , diametrul fasciculului d , distanța de tir d_t , distanța focală d_f , unghiul de deflecție φ , presiunea în camera tunului P_t , presiunea în camera de lucru P_s și natura materialului de bază.

Caracteristicile tehnologice principale ale sudurii sunt: viteza de sudare V_s , pătrunderea sudurii p și lățimea sudurii b .

a) **viteza de sudare**, V_s , se determină prin cercetări experimentale. Obținerea acestor valori pe cale experimentală, sunt frecvente în tehnologia construcțiilor de mașini, satisfăcând necesitățile practice de proiectare a proceselor tehnologice.

În fig. 9 se arată, determinat experimental pentru diferite viteze de sudare, dependența pătrunderii sudurii de puterea fasciculului de electroni.

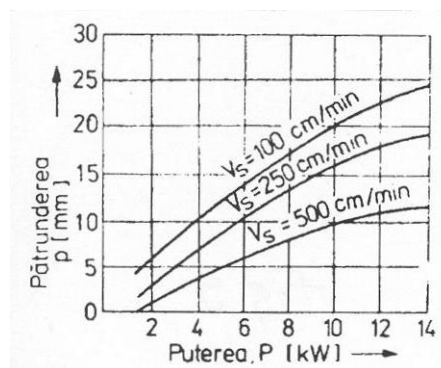


Fig. 9 – Dependența pătrunderii sudurii de puterea FE și viteza de sudare

b) **pătrunderea sudurii**, p , se poate determina (aproximativ) cu relația:

$$p = \frac{UI}{2,1 \cdot v_s \cdot d} \cdot \frac{1}{c \cdot \rho \cdot \theta_t + L} \cdot \frac{1}{1 + \frac{5\lambda}{d \cdot v_s} + 2,5c \cdot \rho} \approx U^{1,5} \cdot I \approx PU^{0,5} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

unde : U – este tensiunea de accelerare; I – intensitatea fasciculului de electroni; v_s – viteza de sudare; d – diametrul fasciculului de electroni; c – căldura specifică; ρ – densitatea materialului piesei; θ_t – temperatura de topire a materialului piesei; L – căldura latentă de topire și vaporizare; λ – conductibilitatea termică; P – puterea fasciculului electronic.

c) **lățimea sudurii**, b este influențată în măsură redusă de tensiunea de accelerare și crește cu mărirea curentului fasciculului. Lățimea sudurii la suprafața componentei este legată de diametrul fasciculului de electroni în focar prin relația aproximativă:

$$b \cong 8d \quad (5)$$

unde: d – diametrul fasciculului de electroni.

1.8. Instalații de sudură

Cele mai întâlnite instalații de prelucrare cu fascicul de electroni sunt cele la care accelerarea electronilor se face cu ajutorul câmpului electric.

Descrierea precum și schema unei instalații de sudare cu fascicul de electroni, este prezentată în materialul de față la pct. 4.

a) **Echipamentul cu cameră și post fix**, fig. 10.a, constituie echipamentul standard de sudură cu fascicul de electroni, cu acesta se pot executa și alte tipuri de procese de prelucrare cu fascicul de electroni. Se realizează și în variante pentru piese de dimensiuni relativ mari, camera de lucru având un volum de la 1m^3 până la 100m^3 . Camera de lucru este prevăzută cu mecanisme de deplasare liniară pe axele X – Y și de rotire controlată a pieselor. Timpul de vidare 2 – 20 minute.

b) **Echipamentul cu masa având regim ciclic**, fig. 10.b, este specializat, camera de lucru este de dimensiuni relativ reduse, fiind adaptată pentru piese mici care se sudează, într-o producție de până la 2000 bucăți în 8 ore.

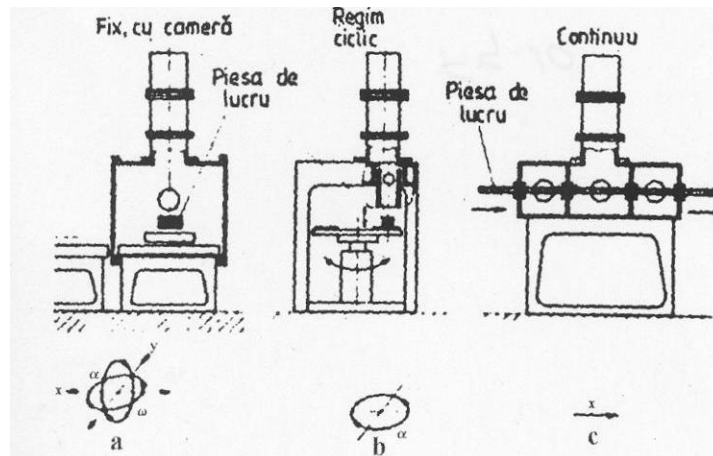


Fig. 10 – Tipuri de echipamente de sudură în funcție de regimul de lucru
a – fix cu cameră; b – regim ciclic; c – continuu.

c) **Echipamentul de sudat cu regim continuu**, fig. 10.c, este destinat lucrărilor de sudură continuă pe piese de lungime mare, spre exemplu benzi sau bare. Camera de lucru este intercalată între camera de prevădare (de trecere la presiunea atmosferică). Procesul de sudare decurge continuu, piesele trecând prin camerele cu diferite trepte de vidare, cu viteză relativ ridicată (până la 20m/min).

1.9. Aplicații

Sudarea cu fascicul de electroni are o serie de avantaje față de procesele convenționale de sudare s.a.: piesele nu se deformează, cordonul de sudură este de forma unei cusături fine, sudura nu oxidează deoarece procesul în cele mai multe cazuri se desfășoară în vid, se poate suda aproape orice material, se poate suda de la table foarte subțiri până la materiale groase de 200 – 300mm, se poate face, în general, orice combinație de material spre exemplu: se poate suda coroana unor roți dințate din oțel înalt aliat de butucul din oțel obișnuit, sudarea rotoarelor de turbină din oțel special, toate acestea realizând economii importante de materiale.

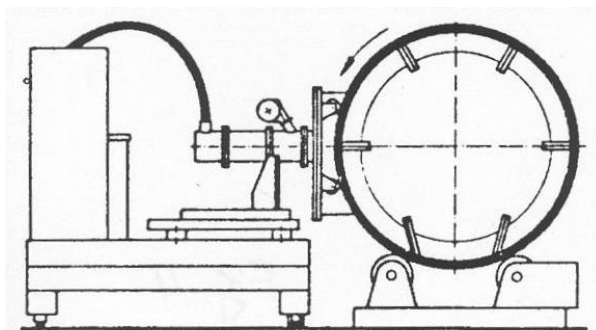


Fig. 11 – Echipament de sudare cu fascicul de electroni pentru sudarea unor recipienți de dimensiuni mari.

În ultimul timp, pe plan mondial, echipamentele de sudare cu fascicul de electroni au cunoscut o continuă diversificare. Astfel, în cazul sudării componentelor cu dimensiuni mari sau contururi complicate, se folosesc echipamente de sudare cu vid local și vid mobil. În fig. 11 se prezintă un echipament de sudare cu fascicul de electroni cu vid local și mobil, pentru sudarea unor recipienți de dimensiuni mari.

6. GĂURIREA CU FASCICUL DE ELECTRONI

1.10. Principiul găuririi (perforării) cu fascicul de electroni

Procedeul de găurire a materialelor are la bază fenomenele de topire și vaporizare, cu desfășurarea acestora extrem de rapidă.

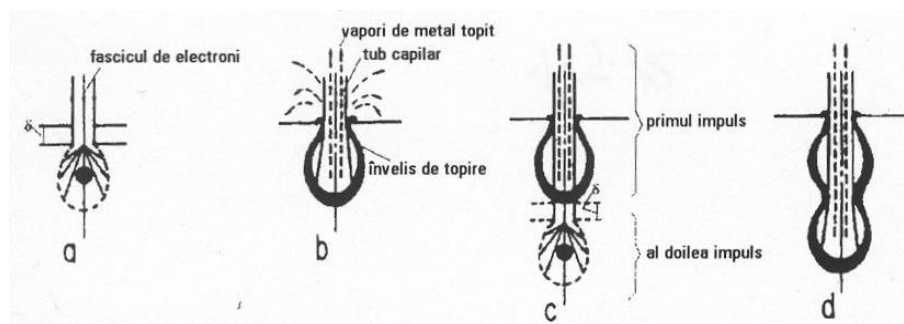


Fig. 12 – Mecanismul de formare a găurii în impulsuri.

Dacă forma și dimensiunile dorite ale găurii nu pot fi realizate printr-un singur impuls, se aplică tehnica de găurire prin mai multe impulsuri. În fig. 12, se prezintă mecanismul de formare a găurii cu fascicul de electroni, în mai multe impulsuri.

1.11. Principalii parametri la găurire

Principalii parametri electrotehnologici ai procesului de găurire sunt aceiași ca și la procesul de sudare cu deosebirea că, în locul frecvenței oscilațiilor fascicului de electroni este vorba, în cazul găuririi, despre durata impulsului și pauza dintre impulsurile fascicului de electroni.

Caracteristicile tehnologice principale ale găurii sunt: volumul de material îndepărtat, G , diametrul găurii, d_g și adâncimea găurii, D .

a) **volumul de material îndepărtat**, este o funcție raport între puterea aplicată și materialul piesei. În fig. 13 se arată cum variază raportul materialului îndepărtat odată cu schimbarea puterii pentru diferite materiale ale piesei. Penetrarea se face la 0,25mm/s.

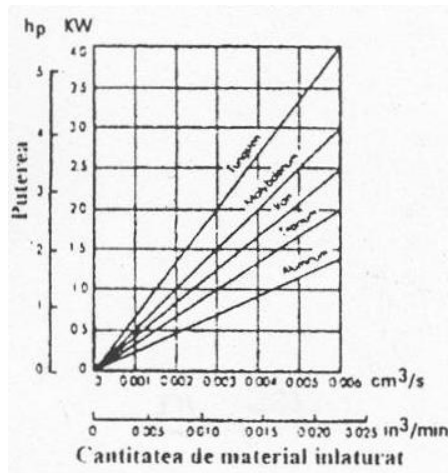


Fig. 13 – Cantitatea de material îndepărtat funcție de puterea FE și de materialul de prelucrat.

b) **diametrul găurii** este

În funcție de mărimea timpului de impuls, diametrul găurii prelucrate poate fi determinat cu ajutorul relației:

$$d_s = a \cdot m_g \cdot l_n \cdot t_i \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

unde: a – constantă funcție de înclinarea fasciculului; m_g – constantă funcție de înclinarea materialului prelucrat; t_i – timpul de impuls [μs].

c) **adâncimea găurii**, obținută de un singur impuls (pulsăție) este dată de relația:

$$D = \alpha \cdot \tau \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

$$\text{în care: } \alpha = \frac{Q}{\pi R^2 \rho (L_m + c T_b)}$$

α – mărimea creșterii adâncimii; Q – puterea fasciculului; R – raza fasciculului; ρ – densitatea materialului piesei; L_m – căldura latentă a fuziunii; c – căldura specifică; T_b – temperatura la care metalul topit este „deplasat” față de piesă; τ – durata pulsației.

Adâncimea de găurire obținută dintr-un număr de impulsuri (pulsății), este dată de relația:

$$D = \frac{\tau}{k} - e^{-\alpha kn} \quad (8)$$

unde: n – numărul de impulsuri pulsații; α , k sunt date în tabelul 1; τ – durata impulsului (pulsăției).

Tabelul 1

Piesa	Oțel moale	Cupru	Molibden
k (s/mm)	$1,2 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$
α (mm/s)	$1,1 \times 10^3$	$0,8 \times 10^2$	$4,7 \times 10^2$

1.12. Instalații de găurire

Instalațiile de găurire cu fascicul de electroni sunt, în general, aceleași instalații ca și la sudarea cu fascicul de electroni. Descrierea și schema unei instalații de sudare cu fascicul de electroni este prezentată în materialul de față la pct. 4.

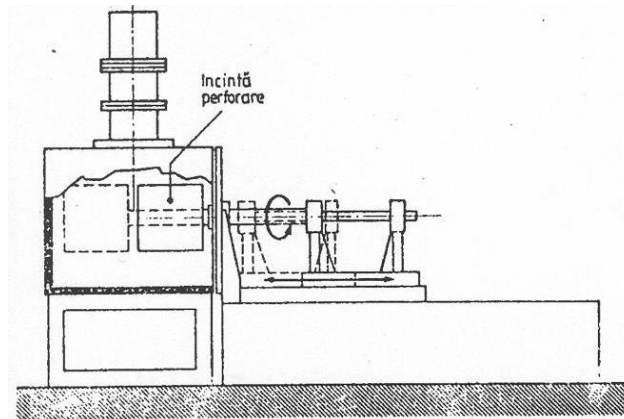


Fig. 14 – Echipament de găurire cu fascicul de electroni cu tambur rotitor.

La instalațiile de găurire, se iau unele măsuri constructive, pe de o parte la nivelul tunului de electroni pentru asigurarea posibilității de comandă în impulsuri a fascicului (curentului de fascicul), iar pe de altă parte la nivelul camerei de lucru pentru ca sistemul de vidare să fie capabil să elimine vaporii de material care se degajă în timpul procesului. De asemenea, la găurire, sistemul adecvat pentru a ține sub control procesul este comanda numerică.

În ultimul timp, pe plan mondial echipamentele de găurire de fascicul de electroni, precum și metodele de găurire au cunoscut o continuă diversificare. În continuare, se prezintă una din acestea, astfel:

În fig. 14 se prezintă un echipament de găurire cu fascicul de electroni cu tambur rotitor, la care găurirea se face în mișcare de rotație continuă, există pericolul apariției unor forme eliptice ale orificiilor, datorită deplasării piesei față de fasciculul de electroni. Pentru a elimina acest neajuns, fasciculul de electroni se deviază simultan, corelat sincron cu viteza de rotație la suprafața piesei pe durata impulsului, iar pentru perforarea orificiului următor se readuce în poziția inițială.

1.13. Aplicații

Dintre cele mai importante aplicații ale găuririi (perforării) cu fascicul de electroni, sunt de menționat: realizarea perforațiilor pentru site și filtre, fiind singurul procedeu care asigură o transparență corespunzătoare la grosimi relativ mari; realizarea prin perforarea duzelor; realizarea orificiilor cu unghiuri variabile în piesele active ale turbinelor de gaz, pentru răcire, injecție și pentru absorbție de zgomot, realizarea de orificii în materialele superrezistente la temperatură și rezistență mecanică, spre exemplu capetele de filiere pentru fibrele de sticlă.

7. TRATAMENTE TERMICE SUPERFICIALE CU FASCICUL DE ELECTRONI

1.14. Principiul tratamentelor termice superficiale cu fascicul de electroni

Tratamentele termice superficiale cu fascicul de electroni sunt procese industriale moderne care se utilizează, în principal pentru a obține o duritate superioară pe zona bombardată, față de restul materialului netratat, motiv pentru care sunt numite de autor

DURIFICĂRI [1, 2, 3]. Pe lângă creșterea rezistenței la uzură, obținută pe suprafața durificată se mai obține și creșterea rezistenței la oboseală.

Din cercetările întreprinse în domeniul tratării termice a suprafețelor metalice [1, 2, 3], rezultă că procesul se desfășoară în două faze distincte, și anume:

Faza I, fig. 15, fără topirea materialului. Are loc atunci când un fascicul de electroni cu densitatea puterii înalte de aproximativ 10^3 la 10^4 W/cm², bombardează suprafața unui material într-un timp de 1 la 3 secunde. Valoarea răcirii poate atinge 10.000°C/sec, care va induce precipitarea *martensitei* și tratamentul termic de suprafață poartă numele de călire superficială sau *durificare la suprafață* (DFE).

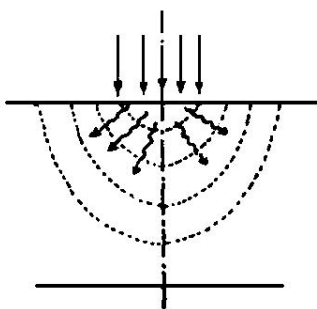


Fig. 15 – Durificarea cu fascicul de electroni fără topirea materialului

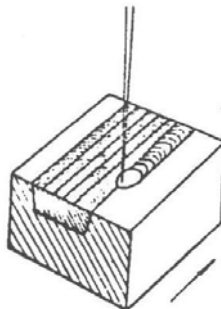


Fig. 16 – Durificarea prin retopire cu fascicul de electroni.

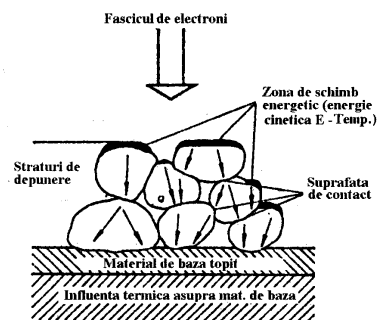


Fig. 17 – Durificarea prin aliere, prin topirea materialului pe o anumită adâncime cât și a celui de adaos.

Faza a II-a, fig. 16 și fig. 17, cu topirea și solidificarea rapidă a materialului. Are loc atunci când un fascicul de electroni cu densitatea puterii înalte de aproximativ, 10^6 până la 10^7 W/cm², bombardează suprafața unui material într-un timp de 10^{-2} la 10^{-1} secunde. Trecerea materialului din solid în lichid și apoi în solid printr-o solidificare extrem de rapidă, creează o structura îmbunătățită sau chiar o compoziție modificată la suprafață, prin materialul de adaos.

Răcirea foarte rapidă va induce precipitarea *martensitei* și tratamentul termic de suprafață poartă numele de *durificare prin retopire* (DRFE).

În cazul modificării compoziției la suprafață, tratamentul se numește, durificarea prin aliere (DAFE).

În cazul pieselor a căror suprafață nu a fost topită (faza I) tratamentul termic urmează a fi ultima prelucrare, iar în cazul topirii la suprafață (faza a II-a) după tratamentul termic urmează o rectificare și în acest caz se lasă un adaos de prelucrare.

1.15. Determinarea izotermelor la tratamentele termice superficiale cu fascicul de electroni

În procesul de durificare unul dintre cel mai important lucru care trebuie făcut, la începutul procesului, este de a afla temperatura dezvoltată de fasciculul de electroni la suprafața piesei în corelație cu temperatura la care materialul se durifică, adică, când au loc transformări în structura materialului la martensită. Aceasta se poate face prin rezolvarea modelului termic, problemă tratată și în lucrările [1, 3, 4], care permite obținerea

izotermelor de suprafață cu mai multe nivele de temperatură, printre care și temperatura de durificare.

Stabilirea și rezolvarea modelului termic cuprinde mai multe etape de rezolvare, după cum urmează:

a) Bilanțul termic

În procesul de încălzire, topire sau teoretic de evaporare a materialului, se poate admite faptul că fasciculul de electroni mobil (sau deviat) pierde complet energia sa în canalul termic și prin urmare în multe lucrări sursa se aproximează cu o sursă liniară q_2 sau punctiformă q_1 . În acest caz repartiția câmpului se obține din soluția staționară de conductibilitate termică într-un mediu mobil după axa OX, neglijând fenomenele tranzitorii la începutul și la sfârșitul procesului, astfel:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) - \rho \cdot c \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -q_1(x, y, z) - q_2(x, y, z) \quad (9)$$

unde termenii ecuației pentru OLC45 respectiv 42MoCr11 au următoarele semnificații: $\lambda=0,54 \text{ J/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$, respectiv $\lambda=0,49 \text{ J/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ este coeficientul de conductibilitate termică, $\rho=7,87 \text{ g/cm}^3$, respectiv $\rho=7,87 \text{ g/cm}^3$ este densitatea materialului, $c=0,46 \text{ J/g} \cdot \text{K}$, respectiv $c=0,50 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ este căldura specifică a materialului, iar v exprimat în cm/s este viteza relativă fascicul – material.

Pentru procesul de încălzire caracteristic durificării cu fascicul de electroni, sursele q_1 și q_2 nu se iau combinat. Se consideră caracteristic sursa punctiformă q_1 , iar sursa $q_2=0$.

b) Determinarea randamentului termic η_t

Zona încălzită în cazul unui fascicul având viteza relativă v (la viteza de deplasare a piesei V_m) față de metalul țintă s-a reprezentat în fig. 18.

Exprimând L_{HV} în coordonate cilindrice va avea forma:

$$\frac{L_{HV}}{2}(r \cdot \varphi) = r \cdot \sin(\alpha) \quad (10)$$

Randamentul termic η_t , definit de raportul dintre p_n – puterea nominalizată, adică, cât ajunge din puterea incidentă P_w ca distribuție liniară în adâncimea zonei încălzite și conținutul de energie în această zonă a benzii durificate, P_t , este dat de relația:

$$\eta_t(u) = 4u \cdot r \frac{\sqrt{1+4u \cdot r}}{(1+2u \cdot r) \cdot 2 \cdot \sqrt{2\pi \cdot u \cdot r}} \exp\left(-\frac{u \cdot r}{1+2u \cdot r}\right) \quad (11)$$

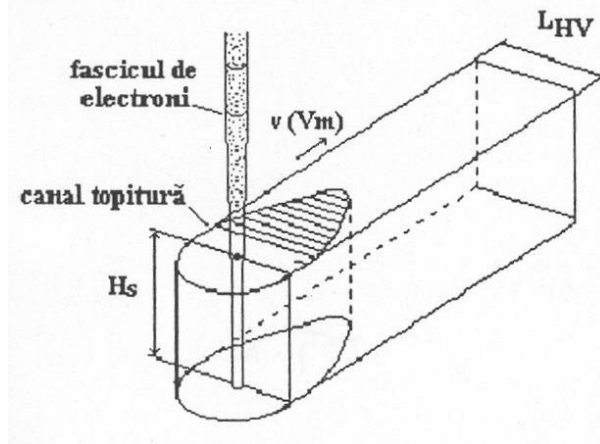


Fig. 18 – Zona încălzită cu un fascicul având viteza relativă v (la viteza de deplasare a piesei V_m).

Prin urmare eficacitatea prelucrării prin acțiunea cu fascicul de electroni accelerați, crește cu creșterea puterii și a vitezei de prelucrare. Valoarea maximă teoretic determinată a randamentului termic este $\eta_t=0,484$.

c) Determinarea lățimii maxime a izotermei L_{HV}

În figura 19 este prezentată izoterma de durificare sub forma unei elipsoide de pe suprafața piesei în care lățimea L_{HV} a benzii durificate se poate determina ca lățime maximă a elipsoidei.

Plecând de la raportul $L_{HV}/2$ (r) în care se păstrează condiția $u \cdot r > 1$, se deduce semilățimea maximă aproximativă sub forma:

$$L_{HV} \cong 2 \cdot r \frac{\sqrt{1+4u \cdot r}}{1+2u \cdot r} \quad (12)$$

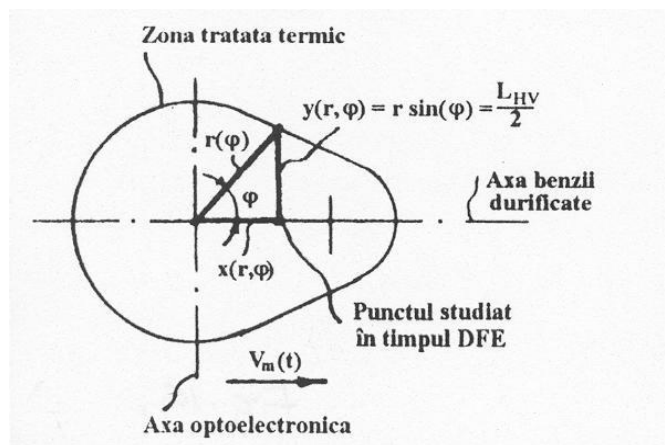


Fig. 19 – Izoterma de durificare de la suprafața piesei cu lățimea benzii de durificare L_{HV} .

Relația 12 permite determinarea lățimii maxime a benzii durificate incluzând și corecția potrivit căreia izoterma de suprafață are lățimea maximă în urma FE, față de direcția de avans a acestuia (fig. 19), caz în care trebuie cunoscut forma izotermei din funcția $r(\varphi)$.

Legătura parametrilor electrotehnologici cu caracteristicile încălzirii este dată de relația 13:

$$2r_0 \cdot \frac{I_{FE} \cdot U_a \cdot \eta_l \cdot \eta_t}{V_m} = \pi \left(\frac{L_{HV}}{2} \right) \cdot H_s [\rho \cdot c \cdot (T_s - 273)] \quad (13)$$

Relația 13 este semiempirică, în care erorile de estimare a parametrilor benzii durificate sunt mai mici de 10% [3] și în care:

$$\eta_t = \frac{\text{puterea indusa in material}}{\text{puterea FE}} = 0,345\%$$

determinat experimental de autori.

d) Determinarea adâncimii maxime a izotermei H_s

Ținând seama de cele arătate mai sus, explicitarea separată a fiecărei valori L_{HV} și H_s , necesită o evaluare separată a uneia dintre caracteristicile geometrice. Dacă se utilizează modelul elaborat de Hashimoto și Matsuda [3] adâncimea H_s se obține cu relația:

$$H_s = \frac{I_{FE} \cdot U_a}{V_m \cdot r_0 \cdot [c \cdot \rho \cdot (T_t - 273)]} \cdot \frac{1}{1 + 0,6 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{r_0 \cdot V_m} + \frac{1}{a} \right)} \quad (14)$$

e) Rezolvarea numerică a modelului termic

În rezolvarea numerică a modelului termic se pleacă de la bilanțul termic prin rezolvarea ecuației căldurii prezentată în relația 9, în care $q_2=0$.

Folosind substituția:

$$T(x, y, z) = \exp\left(\frac{a \cdot x}{2}\right) \cdot \theta(x, y, z) \quad (15)$$

unde parametrul „a” se exprimă ca:

$$a = \frac{\rho \cdot c}{\lambda} \cdot v \quad (16)$$

Se obține următoarea ecuație pentru distribuția de temperatură:

$$\text{div}(\text{grad}(\theta(x, y, z))) - \left(\frac{a}{2}\right)^2 \cdot \theta(x, y, z) = -\frac{1}{\lambda} \cdot q(x, y, z) \cdot \exp\left(-\frac{a \cdot x}{2}\right) \quad (17)$$

în variabile adimensionale u, v, h:

$$u = \frac{x}{w} + \frac{a \cdot w}{4} \quad v = \frac{z}{w} \quad h = \frac{y}{w} \quad (18)$$

Distribuția de temperatură în banda durificată se obține cu ajutorul relației 18, care reprezintă soluția ecuației 17, obținută aplicând transformata Fourier-Bessel.

$$T(x, y, z) = \exp\left(\frac{a}{2} \cdot x\right) \cdot \theta \left[\frac{\sqrt{\left(x - \frac{a \cdot w^2}{4}\right) + y^2}}{w} \cdot \frac{z}{w} \right] \quad (19)$$

Pe baza programului numeric se rezolvă ecuația transcendentă $T_{DEF} = T(x, y, z)$ relația 18 de unde se obțin valorile x, y, z specifice izotermei de durificare.

Din relația 18 se obține L_{HV} ca fiind lățimea maximă a izotermei de suprafață și H_s ca fiind adâncimea maximă a izotermei caracterizate cu coordonatele x,y,z . Acestea se obțin cu ajutorul unui algoritm de căutare numeric.

Programul utilizat este IZOTERME SUPERFICIALE în mediul MATLAB, conține funcții matematice înglobate care permit atât utilizarea unor funcții transformate speciale precum funcțiile Bessel, Fourier cât și aproximarea soluțiilor izotermelor prin determinarea valorilor extreme ale acestora.

Date de intrare: parametri electrotehnologici utilizați: L_1 – distanța de lucru; I_{FE} – intensitatea FE; U_a – tensiunea de accelerare; v_m – viteza de lucru; $2r_0$ – diametrul FE, η_t – randamentul termic la care se adaugă valorile din relația (9) și T_{DFE} – temperatura de durificare; T_t – temperatura de topire pentru materialul procesat.

Date de ieșire: valorile calculate pentru H_s – adâncimea stratului durificat și L_{HV} – lățimea petei durificate sunt trecute pe izoterme (fig. 20 și 21), care reprezintă o parte din izotermele obținute în cadrul lucrărilor [1, 3, 4].

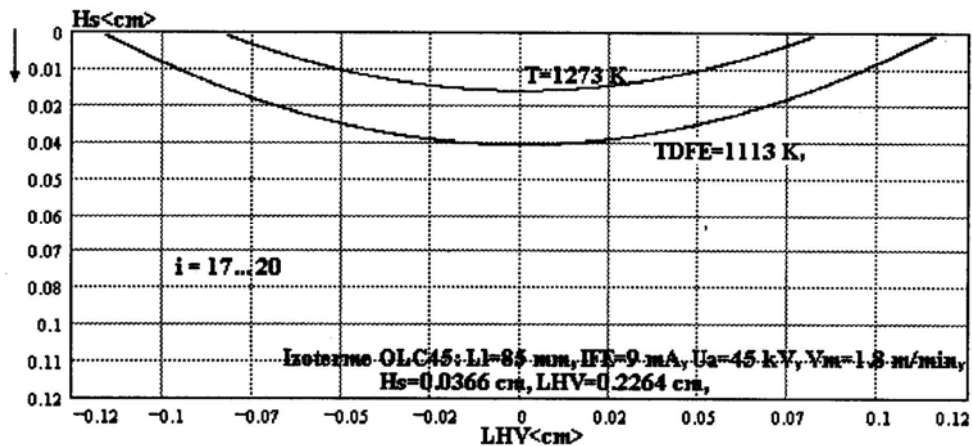


Fig. 20 – Izoterme pentru experimentul $i=17 \dots 20$, pentru materialul OLC45

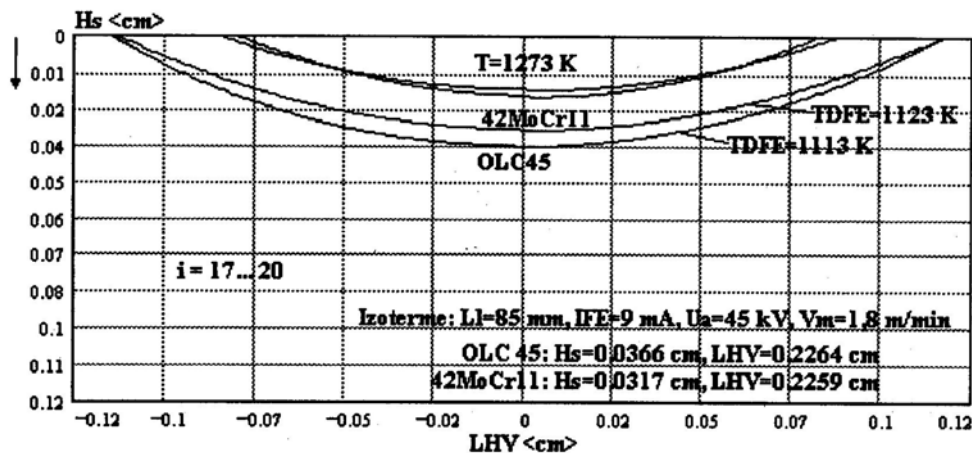


Fig. 21 – Izoterme pentru experimentul $i=17 \dots 20$, pentru materialul OLC45 și 42MoCr11.

1.16. Instalații de tratament termic

Pentru tratamentul termic al suprafețelor metalelor cu fascicul de electroni se folosesc instalații de tipul celor prezentate la procesul de sudură și găurire. În ultimul timp, pe plan mondial echipamentele de tratament cu fascicul de electroni au cunoscut o continuă diversificare.

În fig. 22 se prezintă o instalație pentru tratamentul termic cu fascicul de electroni sub controlul unui calculator.

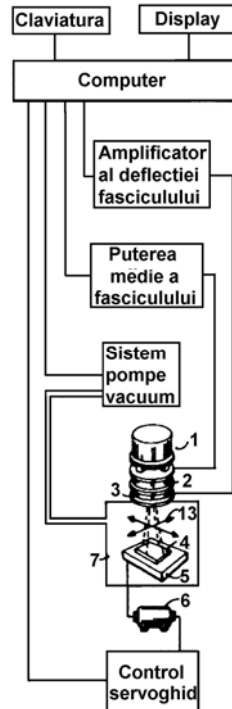


Fig. 22 – Instalații pentru tratament termic superficial cu fascicul de electroni sub controlul unui calculator.

Calculatorul controlează nu numai programul de deflexie al fasciculului, curentul bobinei de focalizare cât și sistemul pompei de vacuum precum și deplasarea mesei suport piesă (5) pe direcția x,y prin comanda unui servomotor (6).

1.17. Aplicații

Aplicațiile durificării superficiale DFE sunt: în *domeniul electrotehnic și de mecanică fină*: roți dințate, roți de clichet, durificate numai pe dantură, came, durificate numai pe contur pe o lățime de max. 3mm; în *domeniul aparaturii de comutație*: zăvor, piese înglobate în rășină, durificate numai pe zona de contact, închizătoare, pârghii în contact, opritoare, etc; în *domeniul SDV-uri*: gura de tăiere de la matrițele de decupat, coloane de ghidare, poansoane, cuțite de strung, burghie, freze etc; în *domeniul automobilelor*, tacheți, inele canelate, roți dințate, fig. 23, durificate numai în zona intens solicitată la uzură; în *domeniul mașinilor agricole*: cuțite de tăiere, fig. 24, durificate numai în zona de tăiere.

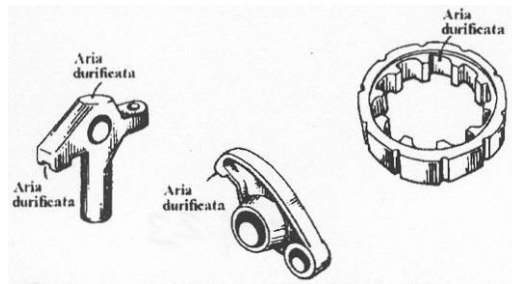


Fig. 23. Tacheți și inel durificați numai în zonele intens solicitate

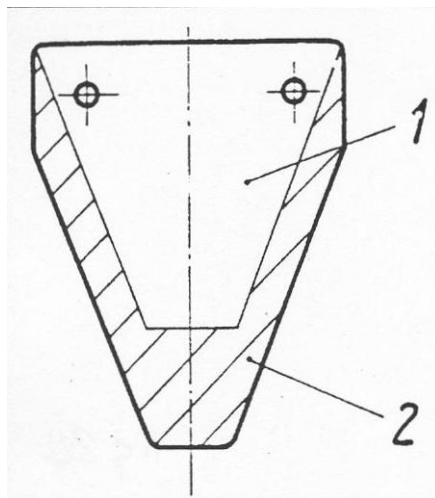


Fig. 24. Cuțite de la mașinile agricole durificate numai în zona de tăiere.
unde: 1- corpul cuțitului netratat; 2- zona durificată.

Aplicații ale durificării prin aliere, DAFE, sunt: piese din materiale necălibile care pe o anumită zonă sunt solicitate la uzură, care trebuie să aibă o duritate mare, aceste piese sunt în special: contactele electrice, pârgăniile de la întreruptoarele ultrarapide de curent continuu tip IUCC (ICPE).

Aplicații ale durificării prin retopire DRFE sunt: piesele la care se cere să reziste la solicitări variabile și să aibă rezistență mare la oboseală precum; rotoarele motoarelor electrice, rotoarele turbinelor, rotoarele morilor, a mașinilor agricole și toate axele care se rotesc în lagăre și pe care sunt montate organe de mașini care le solicită axial.

8. DEPUNEREA DE STRATURI SUBȚIRI CU FASCICUL DE ELECTRONI 1.18. Principiul depunerii de straturi subțiri cu fascicul de electroni

Fasciculul de electroni și-a găsit o largă utilizare în acoperirea suprafețelor, prin depunerea de straturi subțiri în vid.

Prin bombardarea suprafeței unui metal cu fascicul de electroni are loc o creștere a temperaturii până la vaporizare, cu trecerea materialului în timp foarte scurt prin fazele topire – vaporizare. În practică, bombardamentul cu electroni este superior oricărei alte metode ce are ca sursă de încălzire vaporizarea, deoarece zona cu temperatura cea mai înaltă este suprafața emisivă a vaporilor și nu cum se întâmplă de obicei când se vaporizează materialul suport. Procesul având loc în vid, vaporii de metal se depun pe piesa

– suport care se află la catod și materialul de topit la anod. De obicei, deplasarea vaporilor de metal topit se face de jos în sus.

Problema principală care se pune la depunerea de straturi subțiri este aceea că metalul topit în straturi subțiri să fie controlată, adică să se poată stabili în timpul procesului, grosimea stratului depus. Unele instalații, precum cele produse de firma BALZERS AG, sunt prevăzute cu soluții constructive care facilitează măsurarea stratului depus precum și evitarea reacțiilor de creuzet, datorită răcirii intensive a acestuia.

1.19. Instalația de depunere de straturi subțiri

Pentru depunerea de straturi subțiri cu fascicul de electroni se folosesc instalații specializate, uneori tunul electronic ca parte componentă a instalației, este la fel ca cel folosit la sudură și găurire. În ultimul timp, pe plan mondial, instalațiile de depunere cu fascicul de electroni au cunoscut o continuă diversificare.

În fig. 25 se prezintă instalația ESQ 300V produsă de firma BALZERS A.G, având o tensiune de accelerare de 5 ... 11kV și o temperatură de încălzire admisibilă de 400°C.

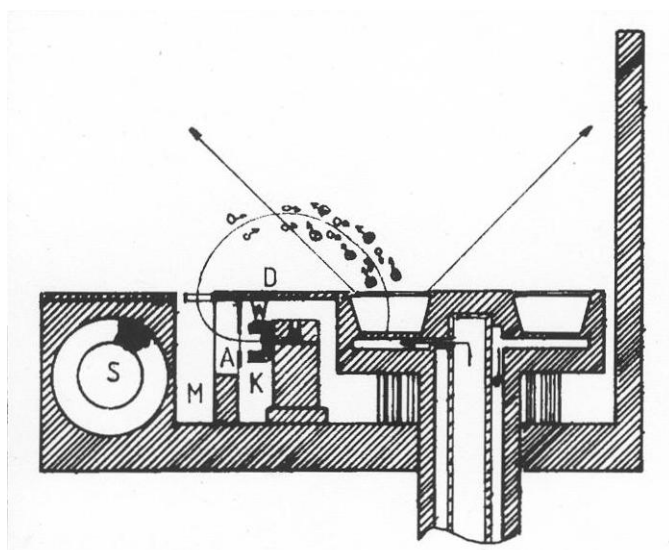


Fig. 25. Instalație de evaporare cu fascicul de electroni ESQ - Balzers.
unde: A - anod; K – catod; W – deschiderea Wehnelt; S – bobina; M – piciorul polului; D – placa, (platou) punte.

Se observă că elementele componente ale tunului electronic sunt protejate de metalul topit. Soluția adoptată este aceea că fasciculul de electroni este deflecat pe o traiectorie curbilinie, de către o bobină.

1.20. Aplicații

Aplicațiile depunerii de straturi subțiri sunt centrate pe trei domenii principale:

7 depunerea straturilor subțiri decorative;

8 depunerea straturilor subțiri dure, lubrifiante și rezistente la uzură precum: acoperirea sculelor așchietoare (burghie, freze, cuțite de strung, plăcuțe așchietoare etc), acoperirea dornurilor și matrițelor de tragere, acoperirea căilor de rulare pentru rulmenți,

acoperirea unor organe de mașini cu uzură ridicată (tacheți, supape, axe cu came, segmenti, pivoți etc);

9 dispunerea straturilor subțiri anticorozive, protecția anticorozivă a oțelului slab aliat, prin depunerea de pelicule anticorozive de Cu sau Cu-Zn; Zn, Cd, Sn-Zn și Sn-Cd; Al-Zn; Ni, Cr și aliaje cu Ni și Cr; pelicule anticorozive și antioxidante de nitruri și carburi ale metalelor tranziționale.

9. LITOGRAFIA CU FASCICUL DE ELECTRONI

1.21. Principiul litografiei cu fascicul de electroni

Litografierea cu fascicul de electroni (EBL) se întâlnește în general, sub forma a două tehnologii, și anume:

a) **Litografia scrierii directe**, pentru care se folosește un singur fascicul de electroni care este deflectat (scanat) după o matrice pe suprafața unui material.

b) **Litografia optică**, pentru care se folosește proiecția optică a fasciculului pe suprafața de prelucrat, fie prin lentile obișnuite, fie prin lentile speciale sub forma unei plăci conductive, anume și lentile imersibile, realizând o expunere de mare precizie și de mare productivitate.

1.22. Instalații de litografiere

Pentru unele prelucrări în domeniul scrierii directe și a gravării se folosesc instalații cu fascicul de electroni clasice, folosite și la găurire, tratamente termice, care sunt prevăzute cu posibilități de deflexie a fasciculului de electroni după o matrice, pe suprafața de prelucrat.

În general, pentru litografia scrierii directe și litografia optică se folosesc instalații specializate având posibilități de concentrare a fasciculului de electroni în domeniul micrometrilor, fig. 26, iar cu ajutorul unor sisteme optice se poate ajunge la concentrarea fasciculului în domeniul submicrometrilor.

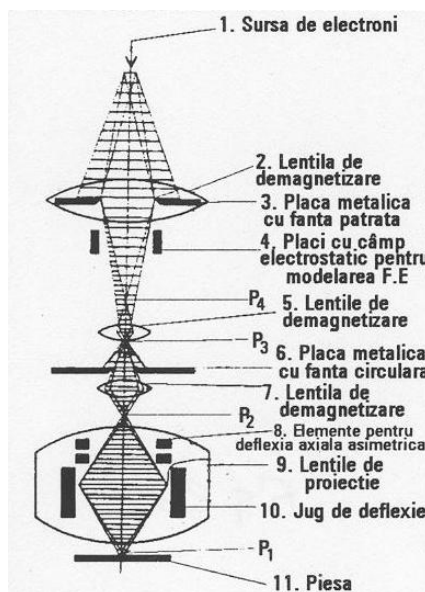


Fig. 26. Instalație de litografiere cu spot de fascicul de electroni variabil.

1.23. Aplicații

Aplicații ale litografiei scrierii directe sunt: fabricația de măști folosite în cadrul litografiei optice pentru producția circuitelor integrate, gravarea, marcarea pentru descrierea circuitelor electronice hibride, realizarea de straturi de circuite fine în industria electronică, în special pentru calculatoare.

Aplicația de bază a litografiei optice o reprezintă fabricația industrială a chip-urilor, datorită prețului scăzut de fabricație și a volumului mare de producție realizat prin expunerea materialelor după principiul cu mască.

10. DOPAREA CU FASCICUL DE ELECTRON

1.24. Principiul dopării cu fascicul de electroni

Doparea este un procedeu de implantare de ioni ce se desfășoară în vid, prin topirea locală a celor două materiale, a materialului de dopare (stratul de impurități) și materialul de bază (substrat).

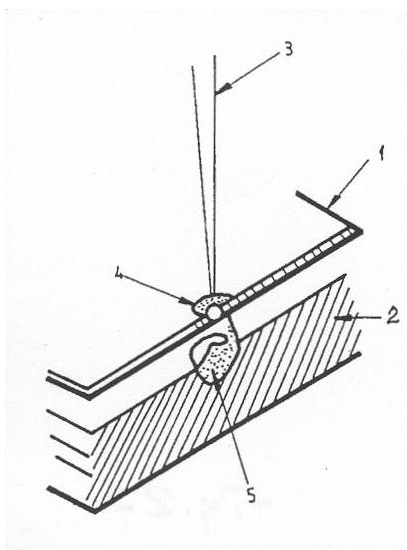


Fig. 27. Implantarea de ioni, utilizând FE.

În fig. 27, se prezintă în detaliu un procedeu de imprimare de ioni, utilizând materialul de dopare sub formă de folie metalică. Folia 1 este presată în imediata apropiere a cristalului 2, fasciculul de electroni 3 este focalizat pe folia de dopare formând prin topire o plasmă în punctul de impact. Această plasmă de dopare introduce ioni dopați din craterul 5, realizând zone diferite. Fasciculul de electroni poate fi modulată funcție de dimensiunile dorite pentru zona de dopare și de tipul materialului de dopare.

1.25. Instalații de dopare

Procesul de dopare se poate desfășura în instalații cu fascicul de electroni clasice, folosite la găurire și tratamente termice.

În general, pentru producția de serie a dopării semiconductoarelor se folosesc instalații similare cu cele folosite pentru litografia optică cu fascicul de electroni.

1.26. Aplicații

Doparea este un procedeu caracteristic dopării semiconductoarelor care permit producerea unei joncțiuni p-n la adâncimea dorită, prin alegerea convenabilă a energiei de accelerare și a dozei ionilor de impurități. Doparea din domeniul semiconductoarelor cu fascicul de electroni, este precisă și economică, nemaifiind necesare o serie de operații de uscare și fără o încălzire a substratului.

11. TOPIREA CU FASCICUL DE ELECTRONI

1.27. Principiul topirii cu fascicul de electroni

Topirea materialelor metalice cu fascicul de electroni se întâlnește sub două forme, și anume: topirea zonală (locală) și topirea masei de metal.

a) **topirea zonală**, reprezintă o tehnică ce se aplică materialelor refractare (materiale cu $T_{\text{topire}} > T_{\text{Fe}} = 1539^{\circ}\text{C}$), în scopul purificării lor chimice sau în scopul ca dintr-un material policristalin, n, să se obțină un singur cristal de dimensiuni mari sau pentru ambele scopuri simultan;

b) **topirea masei de metal**, reprezintă tehnica prin care masa de metal este topită, în niște cuptoare speciale folosind drept sursă unul sau mai multe tunuri electronice, în vederea obținerii de lingouri sau semifabricate.

Datorită faptului că procedeul de topire cu fascicul de electroni are loc în vid, metalele obținute au un procent de impurități foarte scăzut, randamentul energetic fiind mult superior celui realizat prin metodele clasice (cuptoare cu arc sau inducție).

1.28. Instalații de topire

Instalațiile de topire cu fascicul de electroni pot fi în diferite variante, folosind tunuri clasice sau tunuri specializate, în incinte vidate clasice sau cuptoare speciale.

În fig. 28, se prezintă o instalație cu două tunuri pentru turnare de lingouri, în care unul din tunuri este folosit pentru topire, iar celălalt pentru încălzirea în volum a masei de metal, în care: 1 – tun axial pentru topire; 2 – tun axial pentru încălzire; 3 – bară de metal; 4 – cuvă.

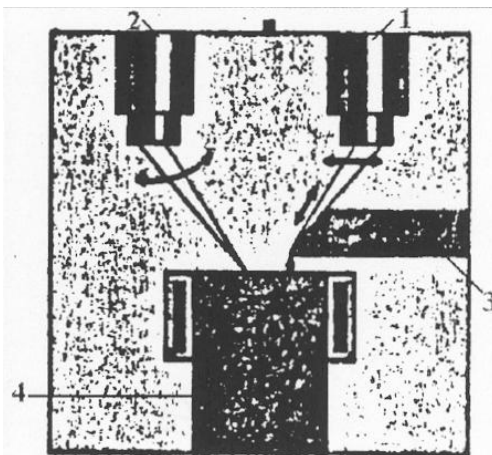


Fig. 28. Instalație de topire cu două tunuri pentru turnarea de lingouri.

Aceste cuptoare au puteri de 30 – 1200kW, iar tunurile cu care sunt echipate sunt de 50-600kW. Se folosesc cu predilecție pentru obținerea metalelor greu fuzibile și active din punct de vedere chimic (zirconi, molibden, wolfram, tantal, niobiu s.a.) la un grad mai ridicat de puritate decât cel asigurat cu alte procedee (precum cuptoarele electrice cu arc în vid).

1.29. Aplicații

Topirea cu fascicul de electroni este utilizată cu deosebit succes la topirea materialelor refractare, a aliajelor cu punct înalt de fuziune, a metalelor reactive (tantal, wolfram, tungsten, titan etc) precum și la obținerea unor oțeluri speciale în tehnice aeronautică. Dintre cele mai reprezentative performanțe ale ultimilor ani se poate menționa lingouri de titan sau oțeluri speciale, de greutate până la 10t și lungime până la 1200mm.

BIBLIOGRAFIE

1. NEAGU, D., (2001, 2002), *Durificarea cu fascicul de electroni*, Editura Printech, București.
2. NEAGU, D., (2006), *Tratamente termice superficiale cu fascicul de electroni*, Editura Curtea Veche, București.
3. NEAGU, D., (1999), *Contribuții la studiul proceselor de prelucrare cu fascicul de electroni*, Teza de doctorat, Catedra TCM, UPBucurești.
4. NEAGU, D., TĂNĂSESCU, F.T.,(2001), *Establishment and numerical determination of the technical model for the superficial isotherm at durification with electron beam*, Revista de tehnologii neconvenționale Nr.3, Ed. Augusta, Timișoara, pag. 60÷65.