

**MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI  
UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ TIMIȘOARA  
Facultatea de Mecanică**

**Ing. Ovidiu TĂTARU**

**CONTRIBUȚII PRIVIND CONSTRUCȚIA  
TUNULUI ELECTRONIC TRIODĂ PENTRU  
SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI**

**- TEZĂ DE DOCTORAT -**

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

**Conducător științific  
Prof.dr.doc.șt.ing. Aurel NANU**

**TIMIȘOARA**

**1995**

## PREFAȚĂ

Tehnologiile neconvenționale de prelucrare a materialelor au avut o extindere deosebită pe plan mondial în a doua jumătate a secolului nostru, cu aplicații în toate domeniile industriale. În acest context, au început și în România preocupări privind cunoașterea și aplicarea tehnologiilor neconvenționale, preocupări care, în momentul când amploarea lor s-a extins suficient, au dus la apariția firească a unor colective puternice de cercetători în unele universități și institute de cercetare din țară. Prin munca de pionerat, cercetările permanent ascendente și rezultatele deosebite obținute, Școala Timișoreană de Tehnologii Neconvenționale deține o poziție de frunte în acest domeniu, motiv pentru care la Timișoara s-au înființat și funcționează Comisia pentru Tehnologii Neconvenționale a Academiei României și Asociația Română pentru Tehnologii Neconvenționale.

În România, cercetările privind procedeul neconvențional de sudare cu fascicul de electroni au început în anii '60 la Institutul de Tehnologie Izotopică și Moleculară Cluj-Napoca, Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară București-Măgurele și Institutul de Sudură și Încercări de Materiale Timișoara. La Institutul de Tehnologie Izotopică și Moleculară Cluj-Napoca au fost proiectate și construite în ultimii 25 de ani mai multe utilaje pentru sudare cu fascicul de electroni, iar în colaborare cu Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca s-a urmărit, în ultimii 10 ani, aprofundarea calculului, proiectării și construcției tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

Prezenta teză de doctorat și-a propus să contribuie la aprofundarea unor aspecte privind calculul, proiectarea și construcția tunului electronic triodă pentru sudare cu fascicul de electroni. Ea reprezintă o parte din munca depusă de autor în acest domeniu începând cu anul 1982.

Lucrarea este structurată pe 6 capitole, cuprinzând 144 de pagini, cu 260 de figuri și 5 tabele, 79 de referințe bibliografice, din care 11 aparțin autorului (4 realizate singur și 5 ca prim autor).

Capitolul unu expune principiul și caracteristicile procedeeului de sudare cu fascicul de electroni. În capitolul doi se prezintă stadiul actual al procedeeului de sudare cu fascicul de electroni, cu trecerea în revistă a evoluției procedeeului, a echipamentelor de sudare cu fascicul de electroni cu diversele variante ale principalelor părți componente, precum și, mai detaliat, construcția tunului electronic. În capitolul trei sunt tratate unele aspecte privind interacțiunea fasciculului de electroni cu materialul piesei, aspecte ce influențează proiectarea tunului electronic. Capitolul patru propune un model fizico-matematic al tunului electronic, insistându-se pe modelarea zonei electrostatice a tunului, cu metodele și programele de modelare utilizate. În capitolul cinci se prezintă metoda de calcul și proiectare a tunului electronic, dezvoltând modelarea pe calculator a mai multor variante de configurații geometrice ale electrodului Wehnelt și anodului. Capitolul șase este destinat concluziilor, contribuțiilor originale precum și valenței aplicative și a direcțiilor ulterioare de dezvoltare a rezultatelor cercetărilor prezentate în teză.

Autorul își exprimă deosebitul respect și profundă recunoștință față de conducătorul

științific, **prof.dr.doc.șt.ing. Aurel NANU**, pentru îndrumarea competentă și sprijinul acordat la realizarea acestei lucrări, precum și pentru exemplul Domniei Sale, care a avut o contribuție majoră la formarea mea ca cercetător.

Realizările prezentate în această teză nu ar fi fost posibile fără colaborarea, înțelegerea și sprijinul competent și permanent pe care le-am avut din partea tatălui meu **dr.ing. Eugen TĂTAR**, cercetător științific principal gradul I la ITIM Cluj-Napoca, care este cel ce a declanșat și dezvoltat timp de peste 25 de ani cercetările în domeniul tehnologiei neconvenționale cu fascicul de electroni la Cluj-Napoca. Nu găsesc cuvinte care să exprime recunoștința față de Domnia Sa, dar faptul că am ajuns aici i se datorește în mod esențial, ceea ce aș fi onorat să fie cea mai deosebită mulțumire.

Pe parcursul cercetărilor și a realizării tezei am beneficiat de sprijinul și înțelegerea conducerii Facultății Construcții de Mașini, a Domnului Decan **prof.dr.ing. Gheorghe ACHIMAȘ**, a șefei Catedrei de Organe de Mașini și Tribologie, Doamna **prof.dr.ing. Dorina Jichișan-Matieșan**, cărora doresc să le aduc calde mulțumiri. Am beneficiat de sfaturile și ajutorul colegilor de catedră și a altor colegi din facultatea mea cărora, de asemenea, le mulțumesc.

În diverse faze ale cercetărilor am primit un sprijin deosebit din partea colegului meu de liceu, Domnul fizician **dr. Valer TOȘA**, cercetător la ITIM Cluj-Napoca, a Doamnei **dr.ing. Emilia MOLDOVAN** și a Domnului **ing. Vasile SUCIU**, cercetători principali la UT Cluj-Napoca, pentru care le mulțumesc.

Autorul mulțumește pe această cale conducerii Catedrei de Tehnologie Mecanică precum și tuturor colegilor din Facultatea de Mecanică din Timișoara care, în orice ocazie, l-au sfătuit și sprijinit necondiționat și cu foarte multă înțelegere.

Mulțumesc din suflet Doamnei **Atena COMAN** și Domnului **profesor Octavian COMAN** care au făcut ca, de 15 ani, toate vizitele mele la Timișoara să fie extrem de plăcute, ca în familie.

Mulțumesc în mod deosebit și rămân profund îndatorat bunilor mei prieteni, Doamna director **ing. Mihaela Grozav** și Domnul șef lucrări **dr.ing. Sorin GROZAV**, care prin sfaturile și sprijinul total pe care mi le-au acordat, mai ales în ultimul an, m-au ajutat să duc la bun sfârșit această lucrare.

Cele mai calde mulțumiri și gânduri de recunoștință le datorez celor mai apropiați mie. Mamei mele, care nu mai e printre noi, dar care, cât a fost, a făcut orice sacrificiu pentru noi, tatălui meu care a fost și-mi este sprijin la orice încercare, fratelui meu care m-a înțeles când n-am avut timp destul pentru el, fetelor mele **Anca** și **Raluca** la care "n-am să le scot dinții și nici n-am să le dau injecții" ca doctor și, la urmă dar nu în ultimul rând, soției **Mihaela** care "bucuroasă le-a dus pe toate" în spate de peste 16 ani și câți au mai rămas.

În final, îmi cer scuze celor față de care am greșit și le mulțumesc dacă m-au înțeles.

# CUPRINS

Capitolul 1.....	9
------------------	---

## INTRODUCERE

1.1. Principiul procedurii de sudare cu fascicul de electroni.....	11
1.2. Caracteristicile procedurii de sudare cu fascicul de electroni.....	13

Capitolul 2.....	17
------------------	----

## STADIUL ACTUAL AL PROCEDURELUI DE SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI

2.1. Evoluția procedurii de sudare cu fascicul de electroni.....	19
2.2. Echipamentul de sudare cu fascicul de electroni.....	23
2.2.1. Tunul electronic.....	23
2.2.2. Camera de sudare.....	24
2.2.3. Sistemul de antrenare a piesei.....	27
2.2.4. Sistemul de vid.....	27
2.2.5. Sursele de alimentare electrică și comandă a tunului electronic.....	30
2.3. Aspecte constructive privind tunurile electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.....	36
2.3.1. Aspecte privind construcția de ansamblu.....	37
2.3.2. Construcția catodului.....	38
2.3.3. Construcția electrodului de comandă Wehnelt.....	40
2.3.4. Construcția anodului.....	41
2.3.5. Construcția lentilei magnetice.....	42
2.3.6. Sistemul de deflexie.....	45

Capitolul 3.....	47
------------------	----

## INTERACȚIUNEA FASCICULULUI DE ELECTRONI CU MATERIALUL PIESEI

3.1. Aspecte generale privind procesul de sudare cu fascicul de electroni.....	49
3.2. Surse termice pentru sudare.....	54
3.3. Câmpul termic.....	55
3.4. Mecanismul topirii și vaporizării materialului.....	59
3.5. Alegerea poziției planului focal al fascicului față de suprafața piesei.....	60

3.6. Efectul distanței de lucru a tunului electronic asupra configurației sudurii.....	61
3.7. Randamentul termic al sudării.....	62
3.8. Determinarea adâncimii de pătrundere și a lățimii sudurii.....	64
Capitolul 4.....	67
<b>MODELUL FIZICO-MATEMATIC AL TUNULUI ELECTRONIC</b>	
4.1. Zona electrostatică.....	69
4.2. Zona electromagnetică.....	71
4.3. Abateri de la modelul teoretic.....	72
4.4. Etape în modelarea zonei electrostatice a tunurilor electronice pentru sudare.....	72
4.5. Metode numerice folosite în modelarea tunurilor electronice.....	73
4.6. Programe de calcul utilizate pentru modelarea tunurilor electronice.....	73
4.7. Relații de calcul utilizate.....	75
Capitolul 5.....	79
<b>CALCULUL ȘI PROIECTAREA TUNULUI ELECTRONIC TRIODĂ PENTRU SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI</b>	
5.1. Considerații generale.....	81
5.2. Calculul și proiectarea sistemului electronoptic cu simetrie axială.....	84
5.2.1. Calculul și proiectarea tunului electronic propriu-zis.....	84
5.2.2. Calculul și proiectarea lentilei magnetice.....	86
5.2.3. Exemplu de calcul.....	88
5.3. Modelarea pe calculator a tunului electronic propriu-zis.....	90
5.3.1. Considerații generale.....	90
5.3.2. Configurații de electrozi Wehnelt studiate.....	91
5.3.3. Configurații ale anodului studiate.....	95
5.3.4. Aspecte privind traiectoriile electronilor.....	98
5.4. Proiectarea constructivă a tunului electronic triodă pentru sudare cu fascicul de electroni.....	120
5.4.1. Considerații generale.....	120
5.4.2. Tunul electronic propriu-zis.....	120
5.4.3. Vana de izolare.....	121
5.4.4. Lentila magnetică.....	121

<b>CUPRINS</b>	<b>7</b>
<b>Capitolul 6</b> .....	<b>123</b>
<b>CONCLUZII</b>	
<b>6.1. Contribuții originale</b> .....	<b>129</b>
<b>6.2. Valoarea aplicativă și direcții de dezvoltare în continuare</b> .....	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	<b>133</b>
<b>ANEXĂ</b> .....	<b>139</b>



---

# Capitolul 1

---

## INTRODUCERE



1

# 1. INTRODUCERE

## 1.1. Principiul procedurii de sudare cu fasciculul de electroni

Părțile componente principale ale unui echipament de sudare cu fasciculul de electroni, figura 1.1, sunt:

1. Tunul electronic.
2. Camera de sudare (incinta de lucru).
3. Sistemul de antrenare a piesei.
4. Sistemul de vid.
5. Sursa de tensiune înaltă cu partea de comandă și control.

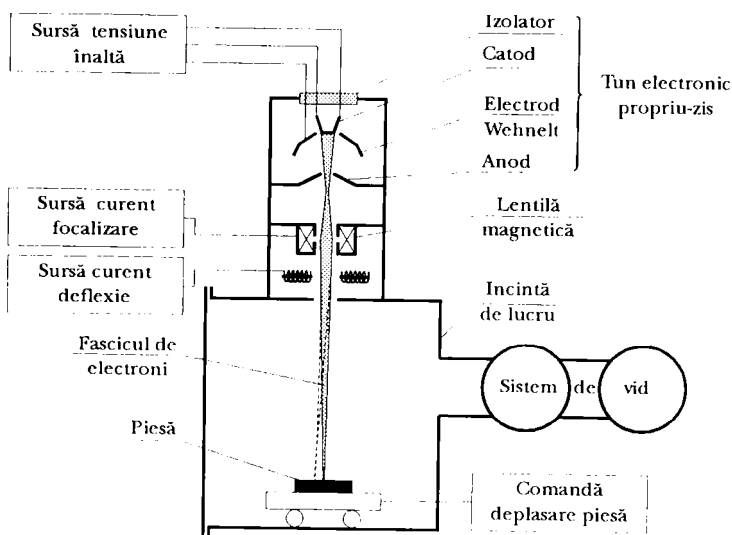


Fig. 1.1.

Electronii emiși în vid înalt (sub  $10^{-4}$  mbar) de catodul tunului electronic sunt accelerați și focalizați sub o diferență de potențial de 15-175 kV, datorită căreia energia cinetică a electronilor,  $E = (nmv^2)/2$ , este foarte mare, astfel că, în momentul ciocnirii lor cu materialul piesei, energia lor cinetică se transformă instantaneu în căldură. La impactul electronilor cu materialul piesei, puterea fasciculului electronic  $W$  se repartizează - prin focalizare - pe o suprafață  $S$  foarte mică, raportul  $w = W/S$  reprezentând densitatea de putere a fasciculului de electroni, în  $W/cm^2$ .

În funcție de gradul de focalizare, în planul piesei, pot fi realizate procese de topire cu o densitate de putere de  $10^3$ - $10^4$  W/cm<sup>2</sup>, procese de sudare cu o densitate de putere de  $10^5$ - $10^7$  W/cm<sup>2</sup>, sau procese de prelucrare dimensională printr-un proces de evaporare succesivă, cu o densitate de putere de  $10^8$ - $10^9$  W/cm<sup>2</sup>, procesul de prelucrare având loc în impulsuri.

Din teoria ciocnirii electronilor cu suprafața unui solid, adâncimea de pătrundere a electronilor în piesă se determină, după M. von Ardenne, cu relația :

$$\delta = \frac{m_e \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot e^2 \cdot B \cdot n_z} \cdot \frac{U^2}{\rho} \quad (1.1)$$

unde:  $m_e$  este masa de repaus a electronului ;

$M$  - masa moleculară a materialului piesei ;

$U$  - tensiunea de accelerare a electronilor ;

$e$  - sarcina electronului ;

$B$  - constantă ce ține cont de proprietățile de frânare ale materialului piesei;

$n_z$  - numărul atomilor din molecula materialului piesei ;

$\rho$  - densitatea materialului piesei .

Pentru metale se utilizează o relație aproximativă, stabilită de Schonland :

$$\delta \approx 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{U^2}{\rho} \quad [mm] \quad (1.2)$$

în care tensiunea  $U$  este în kV, iar densitatea în kg/m<sup>3</sup>.

Din relația (1.2), cu  $U = 150$  kV și  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup> pentru oțel, se obține o adâncime de pătrundere în oțel  $\delta = 0,06$  mm, ceea ce se abate considerabil de la rezultatele experimentale care, pentru tensiunea considerată, indică adâncimi de pătrundere de peste 50 mm. Pătrunderea foarte mare a fasciculului de electroni nu se datorește fenomenului de impact a electronilor cu solidul, ci, așa cum se va prezenta în capitolul 3, densității de putere foarte mari a fasciculului de electroni - de aproximativ 1000 de ori superioară sudării cu arc electric. Fasciculul de electroni produce sublimarea instantanee a materialului piesei, apărând astfel un tub capilar cu adâncime mare în comparație cu diametrul său. Tubul capilar conține vapori de material sublimat și este înconjurat de un înveliș subțire de material topit. Această cavitate se menține într-un echilibru sub acțiunea presiunii fasciculului de electroni, a presiunii vaporilor produși, a presiunii de evaporare a materialului, a tensiunii superficiale a lichidului din învelișul de material topit ce înconjoară tubul capilar și a greutateii acestui lichid. În acest fel energia fasciculului de electroni este transferată pieselor ce se sudează pe toată înălțimea tubului capilar, spre deosebire de procedeele clasice de sudare prin topire la care energia este transferată prin conducție termică de la suprafață.

La sudare, fasciculul de electroni se deplasează față de piese, metalul topit ce înconjoară

tubul capilar deplasându-se în rost și prin solidificarea acestuia în partea opusă deplasării fasciculului se formează îmbinarea sudată.

## 1.2. Caracteristicile procedului de sudare cu fascicul de electroni

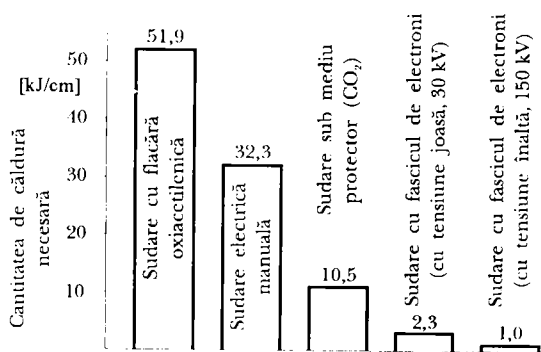


Fig. 1.2.

Fasciculul electronic posedă o serie de proprietăți caracteristice care îl fac potrivit pentru a putea fi utilizat în procese de sudare. Proprietățile mai importante și avantajele utilizării fasciculului electronic în procese tehnologice industriale de sudare sunt următoarele :

- Datorită posibilităților de focalizare pe o suprafață foarte mică ( $10^{-7}$  cm<sup>2</sup>), fasciculul electronic acționează foarte localizat, astfel că și

cantitatea de căldură necesară la sudare este mult mai mică în comparație cu procedeele convenționale, așa cum rezultă din repartiția cantității de căldură pe unitatea de lungime în cazul fiecărui procedeu, atunci când se sudează oțel carbon cu 4 mm grosime, figura 1.2.

- Sudurile obținute prin bombardament electronic, sunt caracterizate prin lățime mică și adâncime mare de pătrundere, figurile 1.3 și 1.4, raportul între acești parametri fiind cuprins între 1/20 și 1/25, în comparație cu îmbinările sudate cu procedeele convenționale, la care acest raport este de circa 1/1.

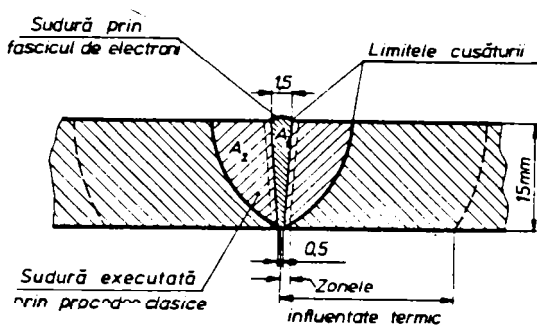


Fig. 1.3.

- Ca urmare a acestor proprietăți, deformările produse prin sudarea cu fascicul de electroni sunt foarte reduse.

- Metalul din cordonul sudat este purificat în vid prin dezoxidare și eliminarea gazelor incluse, producându-se o asivizare a zonei sudate și o protejare împotriva coroziunii.

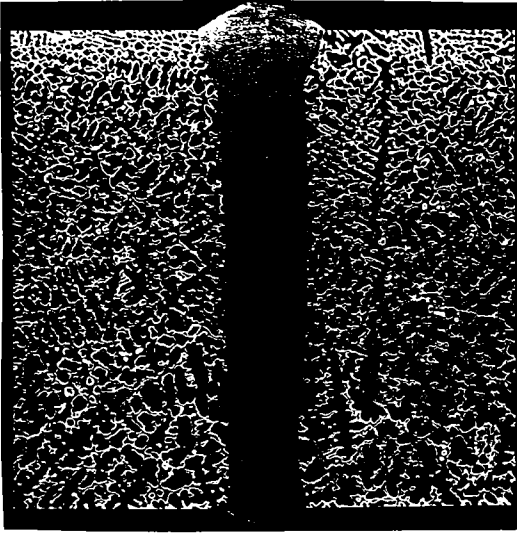


Fig. 1.4.

- Randamentul procesului de sudare cu fascicul de electroni este superior celui prin fascicul laser precum și tuturor celorlalte procedee de sudare. În timp ce randamentul procesului de sudare cu fascicul de electroni este de circa 92-95% , procedeele similare prin fascicul laser se efectuează cu un randament de numai 15-20% datorită faptului că metalul topit reflectă cea mai mare parte a radiației laser.

- Toți parametrii fasciculului electronic sunt parametri electrici și ca atare el poate fi poziționat rapid în spațiu și timp, fiind foarte potrivit pentru a fi utilizat în

procese tehnologice complet automatizate.

- Faptul că procesele de sudare cu fascicul de electroni au loc în vid, nu constituie un inconvenient, ci din contră, un avantaj pentru calitatea sudurii. În plus, datorită posibilităților de poziționare și dirijare cu precizie, cât și a randamentului foarte mare cu care se execută sudura, acest procedeu se situează pe un plan superior celui prin fascicul laser, precum și prin celelalte procedee de sudare.

Toate aceste proprietăți caracteristice conferă acestui procedeu mai multe avantaje particulare, care îl fac să fie acceptabil la o serie de aplicații industriale. Printre aceste avantaje pot fi menționate :

- Se pot suda cele mai refractare metale (W, Ta, Mo, etc.), ceea ce este greu sau imposibil de realizat cu procedeele convenționale.

- Marginile pieselor sunt simplu apropiate și fasciculul electronic acționează în planul de contact.

- Procedeu se pretează foarte bine la sudarea pieselor cu pereți foarte subțiri, sau la sudarea unor piese cu grosime foarte diferită.

- Se pot suda direct metale diferite.

- Sudurile se execută cu viteze foarte mari, pînă la 15 m/min, și timpi foarte scurți.

- Se pot executa piese foarte complicate prin sudarea părților componente simple, a căror fabricație este mai economicoasă deoarece nu sunt necesare alte operații de prelucrare după sudare, datorită deformațiilor foarte mici.

Procedeu de sudare cu fascicul de electroni prezintă și dezavantaje, din care se menționează:

- Echipamentele de sudare au costuri relativ ridicate datorită complexității construcției și

automatizării lor.

- Sunt generate radiații X la impactul fasciculului de electroni cu piesa, ceea ce necesită măsuri suplimentare de protecție la tensiuni de accelerare peste 60 kV.

- Fasciculul de electroni este deviat și defocalizat în câmp magnetic, ceea ce îl face impropriu sudării pieselor magnetizate.



---

## Capitolul 2

---

# STADIUL ACTUAL AL PROCEDEULUI DE SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI





## 2. STADIUL ACTUAL AL PROCEDEULUI DE SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI

### 2.1. Evoluția procedurii de sudare cu fascicul de electroni

În 1879 W. Crookes a fost primul care a demonstrat topirea cu fascicul de electroni topind anodul de platină al tubului catodic pe care-l inventase. M. Pirani în SUA în 1907 este autorul primului patent ce se referă la topirea cu fascicul de electroni a unor metale cu temperaturi de topire ridicate. Apoi, în 1911, C.D. Child prin studiile sale asupra emisie electronilor a stabilit legea sarcinii spațiale pentru electrozi plan-paraleli :

$$j_{sp} = 0,0233 \cdot \frac{U^{\frac{3}{2}}}{D^2} \left[ \frac{A}{cm^2} \right] \quad (2.1)$$

Aproape în aceeași perioadă de timp (1913), J. Langmuir a publicat importantele sale concluzii asupra formării fasciculului de electroni demonstrând că, pentru electrozi de formă oarecare, curentul maxim de electroni este direct proporțional cu tensiunea de accelerare la puterea 3/2. În 1924, Langmuir și Blodgett au dat soluțiile ecuațiilor Child-Laplace, care permit calculul principalelor elemente ale unui tun electronic. În 1938, M. von Ardenne publică rezultatele utilizării ca sculă tăietoare a fasciculului de electroni, iar în 1939 J. Pierce publică concluziile sale asupra obținerii unui fascicul conic convergent în tunul electronic diodă care îi poartă numele.

După al doilea război mondial, tehnologia neconvențională de prelucrare cu fascicul de electroni devine o preocupare preponderentă a cercetărilor cu aplicație industrială în Europa (Franța, Germania, Anglia) și SUA. Astfel K.H. Steigerwald publică în 1949 realizarea tunului electronic triodă, construiește în 1950 o mașină de frezare cu fascicul de electroni și în 1957 brevetează în SUA tunul electronic triodă. J.A. Stohr brevetează în 1954 un tun diodă cu geometrie Pierce, folosit în cercetările din domeniul tehnicii nucleare la Saclay - Franța, iar în 1964 își susține teza de doctorat în acest domeniu. E.B. Bas publică în 1959 rezultatele cercetărilor sale privind utilizarea fasciculului de electroni în procese de topire, sudare și prelucrare dimensională.

În perioada anilor '50, domeniul de utilizare a acestui procedeu era cel nuclear, la sudarea metalelor și aliajelor refractare, greu fuzibile și reactive. J.Stohr a fost primul care în 1954 a realizat în cadrul Centrului de Studii Nucleare din Saclay - Franța, sudura cu fascicul de electroni a tecilor cu combustibil nuclear, confecționate din aliaje pe bază de zirconiu. În aceeași perioadă, în Germania, K.H.Steigerwald cercetează și dezvoltă această tehnologie pentru aplicarea ei în domenii diferite de cel nuclear, cele privind prelucrarea metalelor cu fascicul de electroni.

În anii '60, tehnologia cu fascicul de electroni este aplicată în domeniul construcțiilor aerospațiale și la recondiționarea pieselor complexe și costisitoare din industria aeronautică.

Începând cu anii '70, tehnologia cu fascicul de electroni este aplicată la scară industrială, cum ar fi :

- Îmbinarea pieselor confecționate din metale refractare (W, Ta, Mo, etc), precum și aliajele acestora.

- Uzinarea pieselor cu configurații complexe, prin sudarea cu fascicul de electroni a părților componente, uzinate separat mai simplu, ca de exemplu : roțile dințate baladoare de sincronizare din cutiile de viteze ale automobilelor, rulmenți, carcasa de diferențial auto, etc.

- Sudarea părților active ale sculelor pe suporturi confecționați din oțeluri de construcție obișnuite (burghie, freze, benzi de ferăstrău, etc.).

- Sudarea țevilor cu pereți subțiri.

- Sudarea țevilor în plăci tubulare pentru schimbătoare de căldură.

- Sudarea tablelor groase (30-200 mm) într-o singură trecere.

- Sudarea pieselor cu gabarit foarte mare cu instalații (agregate) tip ventuză sau cu camere de sudare mobile.

- În industria aeronautică, aerospațială și industria de automobile.

- În electronică și microelectronică.

În construcția de utilaje de sudare cu fascicul de electroni s-au remarcat firmele : Clover, SAF și Languelin din Franța, Sciaky în Franța și SUA, Steigerwald, Messer-Griesheim, Heraeus și Leybold în Germania, Hamilton Standard și Hawker Siddeley în SUA, British Oxigen Company în Anglia, Jeol în Japonia.

Utilaje pentru sudare cu fascicul de electroni se realizează în Ucraina la Institutul Patton din

Kiev, în China, din fabricile din Moscova și Leningrad, până în prezent, este mai puțin cunoscută.

În prezent, multe firme dezvoltă aplicații ale sudării cu fascicul de electroni, fără ca să producă ele însele tunuri electronice și surse de alimentare, acestea fiind procurate - sub licență - de la firme cu experiență în acest domeniu, cum ar fi : Leybold AG, PTR Präzisionstechnik GmbH, Messer-Griesheim, BOC, Sciaky.

În România, la ITIM Cluj-Napoca, începând cu anul 1967 au fost demarate cercetările în domeniul tehnologiei cu fascicul de electroni de dr.ing. Eugen Tătar. Au fost realizate trei instalații, dintre care a doua și a treia sunt prezentate în figurile 2.1 și 2.2. Cu acestea s-au realizat topiri, sudări,

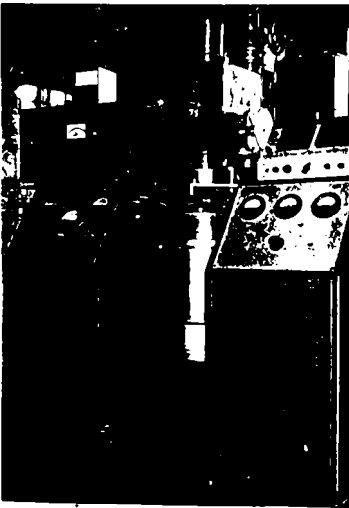


Fig. 2.1.

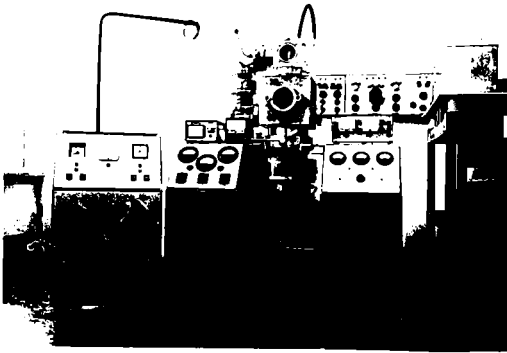


Fig. 2.2.

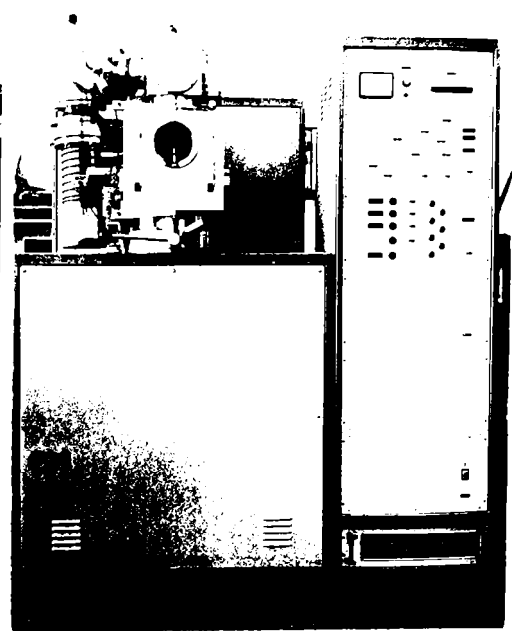


Fig. 2.3.

depuneri de straturi subțiri prin evaporare în vid utilizând tunuri diodă de puteri până la 1,5 kW. În prezent este în curs de finalizare la ITIM Cluj-Napoca un stand de testare tunuri electronice diodă și triodă de putere mică și medie pentru sudare cu fascicul de electroni prezentat în figura 2.3.

În cadrul Universității Tehnice Cluj-Napoca au fost proiectate, în colaborare cu ITIM Cluj-Napoca, un cap de sudare cu fascicul de electroni a țevilor în plăci tubulare pentru schimbătoare de căldură - figura 2.4 - și un agregat de fabricație a țevilor cu pereți subțiri prin sudare cu fascicul de electroni - figura 2.5.

La începutul anilor '70 cercetări în acest domeniu au început la IFA București, realizându-se tunuri de puteri mari, 16-32 kW, pentru topire și sudare. Instalații de sudare cu fascicul de electroni cumpărate din străinătate există la Fabrica de avioane București, ICPE București și ISIM Timișoara.

Utilajele pentru sudare cu fascicul de electroni sunt utilizate în special în toate cazurile în care celelalte procedee nu pot fi aplicate și în cazurile în care este necesară o calitate foarte bună

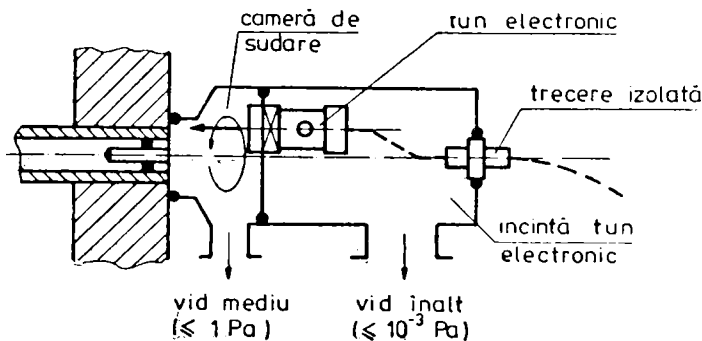


Fig. 2.4.

a cordonului sudat, zonă influențată termic cât mai mică, viteză mare de sudare, contur complex al cordonului sudat, adâncime mare de pătrundere.

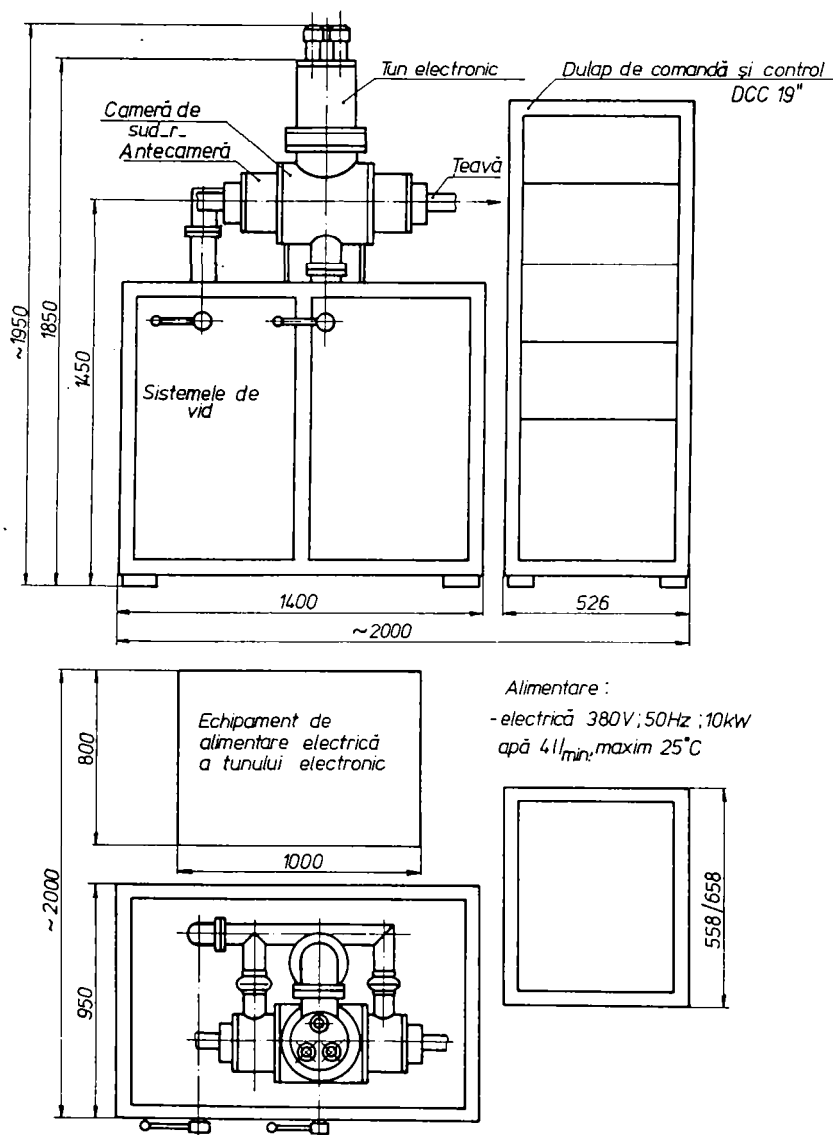


Fig. 2.5.

## 2.2. Echipamentul de sudare cu fascicul de electroni

Așa cum s-a menționat în capitolul 1, părțile componente principale ale unui echipament de sudare cu fascicul de electroni, figura 1.1, sunt :

1. Tunul electronic.
2. Camera de sudare.
3. Sistemul de antrenare a piesei.
4. Sistemul de vid.
5. Sursele de alimentare electrică și comandă a tunului electronic.

### 2.2.1. Tunul electronic

Tunul electronic realizează generarea, accelerarea și focalizarea fascicului de electroni, iar în unele variante și deplasarea relativă a acestuia față de rostul sudurii. În procesele tehnologice de sudare se folosesc tunuri electronice cu emisie termoelectronică de tip diodă și triodă (figura 2.6), tunurile triodă deținând aproape exclusivitatea în prezent. Tunul electronic poate fi montat în camera de sudare, dar cel mai adesea se montează într-o incintă separată, cu propriul sistem de vid. În paragraful 2.3 sunt prezentate în detaliu aspectele constructive ale tunurilor electronice pentru sudare.

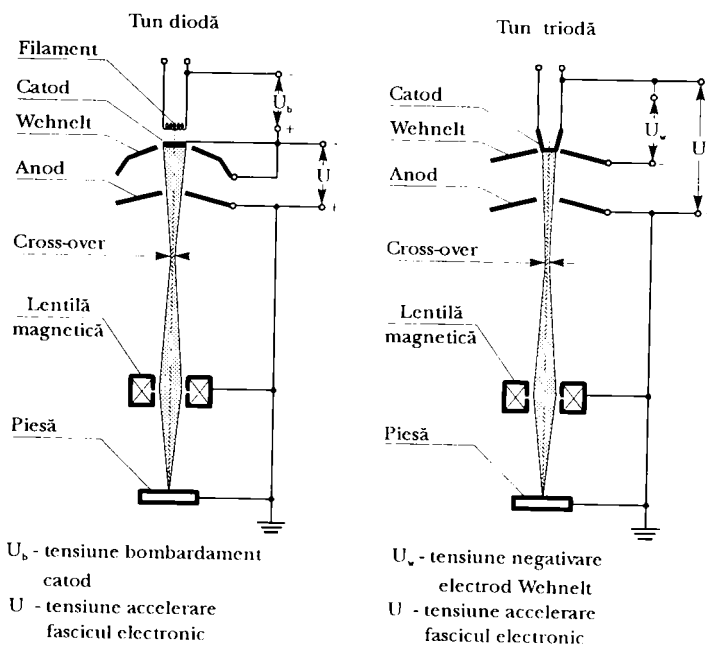


Fig. 2.6.

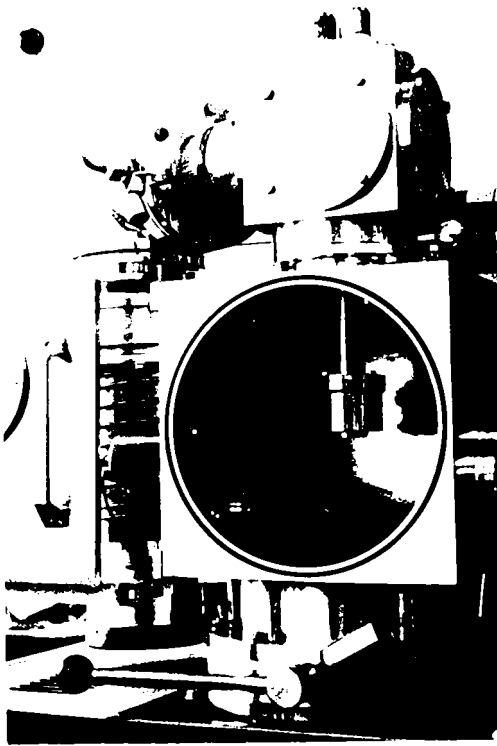


Fig. 2.7.

### 2.2. Camera de sudare

În funcție de dimensiunile camerei de sudare, echipamentele de sudare cu fascicul de electroni pot fi cu camere mici de sudare (până la 300 l), cu avantajul că durata de realizare a vidului necesar sudurii, este relativ mică, de ordinul a câteva minute, ceea ce permite un ritm de sudare convenabil. Aceste echipamente permit sudarea pieselor mici și medii, cu grosimi de sudare până la 50 mm, schimbarea manuală a pieselor și introducerea în camera de sudare a unor sisteme simple de manevrare a pieselor, în timpul sudării. Standul pentru testarea tunurilor electronice realizat la ITIM Cluj-Napoca are o astfel de cameră de sudare prezentată în figura 2.7.

Echipamentele de sudare cu camere mari (700 l - 20 000 l) permit sudarea pieselor mici, medii și mari, cu forme complexe, cu grosimi de sudare pînă la 200 mm, cu sisteme simple sau complexe de manevrare a pieselor în timpul sudării. Principalele lor dezavantaje constau în complexitatea construcției și a etanșărilor, un timp mai lung necesar realizării vidului pentru sudare, în funcție de viteza de pompare a sistemului de vid utilizat.

În unele cazuri echipamentele cu camere mari de sudare, prezintă posibilitatea deplasării tunului electronic în interiorul camerei, ceea ce simplifică sistemul de prindere și manevrare a piesei și permite sudarea unor piese foarte complexe, cum ar fi structurile de rezistență ale avioanelor. În

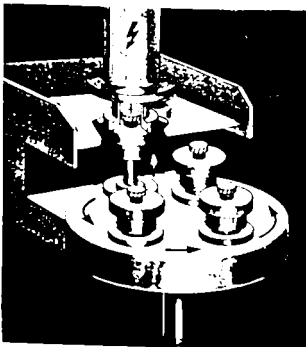


Fig. 2.8.

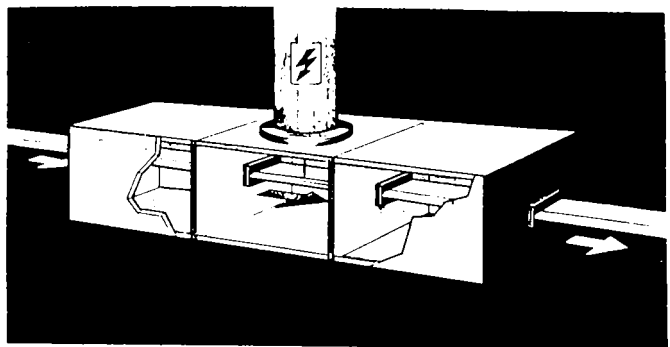


Fig. 2.9.

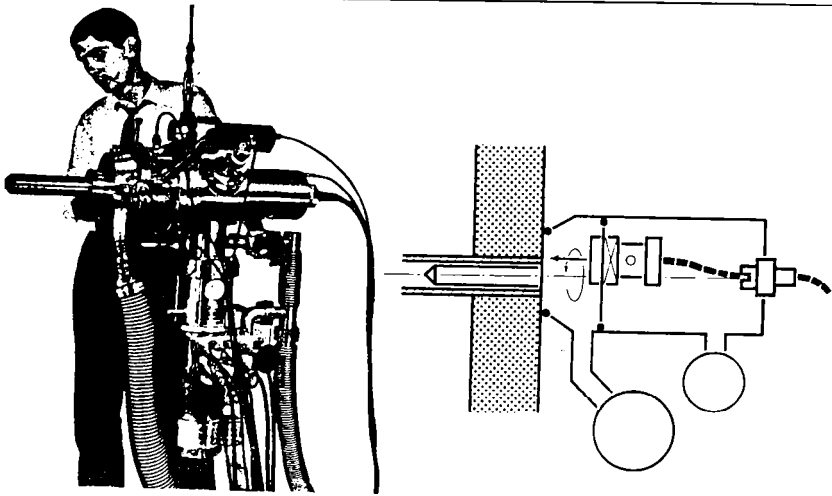


Fig. 2.10.

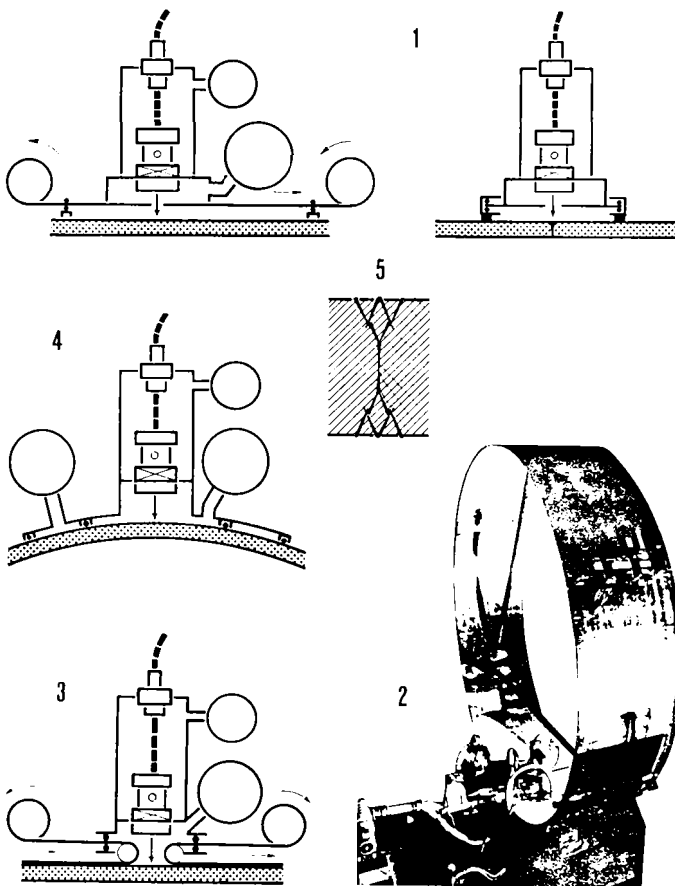


Fig. 2.11.

acest caz, timpul necesar realizării vidului este mare, datorită volumului foarte mare al camerei și este necesar un sistem de vid cu viteze foarte mari de pompare.

Există echipamente de sudare în regim ciclic (figura 2.8) sau cu regim continuu de sudare (figurile 2.5 și 2.9) la care construcția camerei de sudare este determinată de forma și dimensiunile piesei, fapt ce influențează și asupra alegerii sistemului de vid.

Pentru piese foarte mari, se



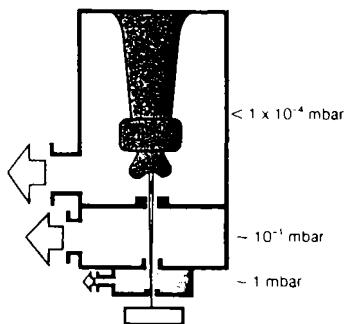


Fig. 2.12

utilizează sistemul tip ventuză (figura 2.10) sau sistemul mobil (figura 2.11).

Există echipamente fără cameră de sudare (figurile 2.12 și

2.13), dar în acest caz calitatea sudurii este apropiată de cea executată în mediu protector.

Alte tipuri de camere de sudare cunoscute, sunt caracteristice echipamentelor de sudare speciale.

O caracteristică importantă a camerelor de sudare este materialul din care acestea se execută. Acesta trebuie să fie nemagnetic pentru a nu influența traiectoria și focalizarea fasciculului, trebuie să asigure protejerea împotriva radiațiilor X care apar la impactul fasciculului electronic cu piesa

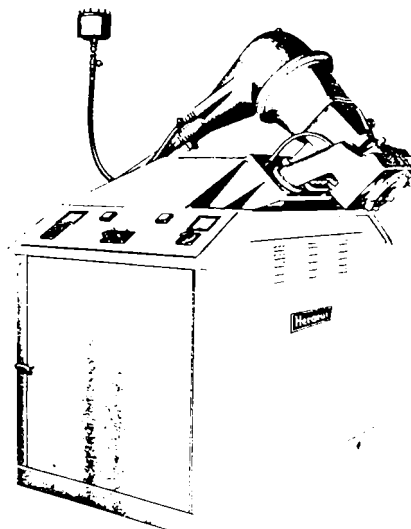


Fig. 2.13.

de sudat, motiv pentru care la tensiuni de accelerare peste 60 kV pereții camerei se căptușesc cu tablă de plumb. Îmbinările sudate ale camerei de sudare trebuie să nu prezinte pori, pentru realizarea și menținerea vidului.

În construcția de camere de sudare, a incintei tunului electronic și altor piese care se introduc în interiorul camerei de sudare, se folosesc oțeluri inoxidabile.

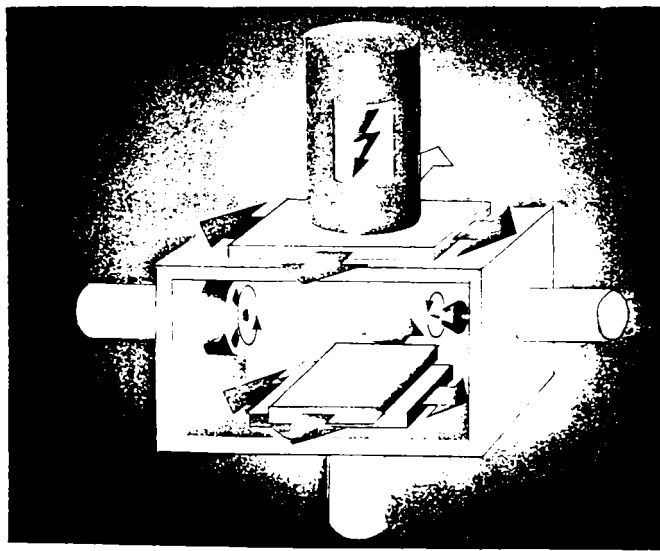


Fig. 2.14.

austenitice.

Camera de sudare este o construcție sudată etanșă la vid, iar suprafața interioară are o rugozitate cât mai mică posibil, pentru realizarea ușoară a igienei vidului.

### 2.2.3. Sistemul de antrenare a piesei

Cele mai utilizate sisteme de antrenare a pieselor pentru sudare cu fascicul de electroni sunt

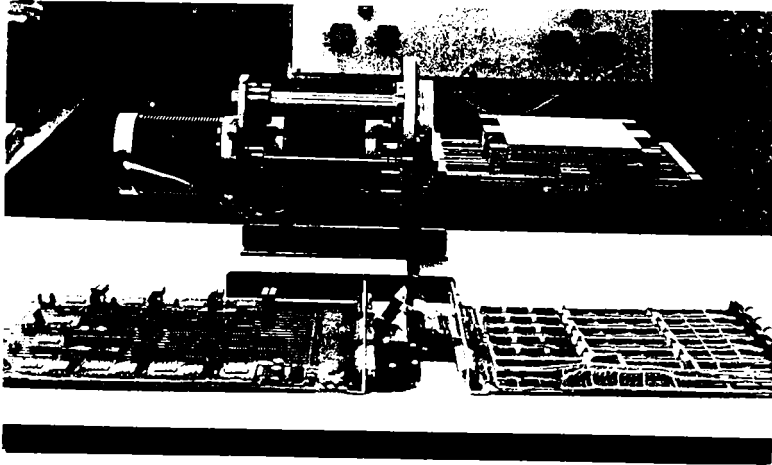


Fig. 2.15.

cele rotative pentru suduri circulare și cele cu deplasare în plan perpendicular pe fascicul, pe o direcție X sau pe două direcții X-Y (figurile 2.14 și 2.15), proiectat la UTC-N Cluj-Napca și realizat la ITIM Cluj-Napca.

De regulă tunul electronic este

fix, pentru a nu complica construcția etanșării dintre incinta tunului electronic și camera de sudare.

Când este necesară sudarea unor piese mari și complexe, se preferă deplasarea tunului electronic

în camere mari de sudare, cel mai des cu roboți aflați în interiorul camerei de sudare.

### 2.2.4. Sistemul de vid

Sistemul de vid trebuie să asigure vidul necesar, atât în incinta tunului electronic, cât și în camera de sudare.

În majoritatea aplicațiilor industriale, este asigurată prin construcție posibilitatea separării incintei tunului electronic de camera de sudare, pentru ca atunci când în camera de sudare nu este vid (se schimbă piesa), în incinta tunului să poată fi menținut vidul. Multe-a nevoie necesar ca în incinta tunului electronic să se realizeze o

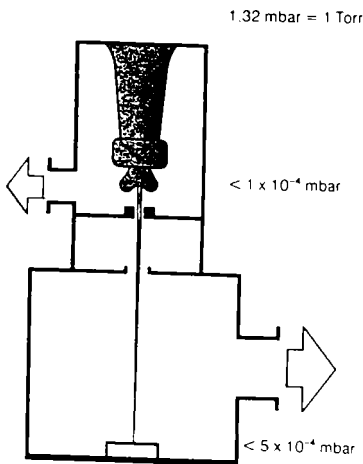


Fig. 2.16.

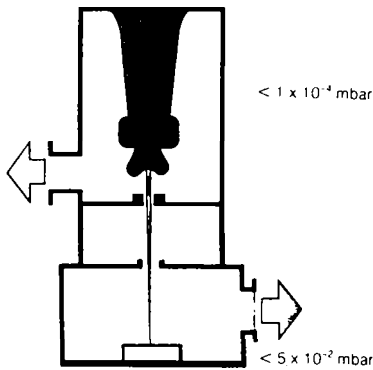


Fig. 2.17.

presiune mai mică de  $10^{-4}$  mbar, corespunzătoare vidului înalt, pentru a prelungi durata de utilizare a catodului și pentru a putea

obține o densitate de putere cât mai mare în cross-over. De asemenea, s-a constatat că numai pentru suduri cu fascicul de electroni foarte fine și precise, este necesar vid înalt și în camera de sudare (figura 2.16). În majoritatea aplicațiilor industriale, în camera de sudare se recomandă menținerea unei presiuni între  $5 \cdot 10^{-2}$  și  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar, corespunzătoare vidului mediu (figura 2.17).

Viteza de pompare necesară pentru asigurarea vidului în camera de sudare, trebuie să fie mai mare decât cea necesară pentru incinta tunului electronic, deoarece volumul celor două este diferit

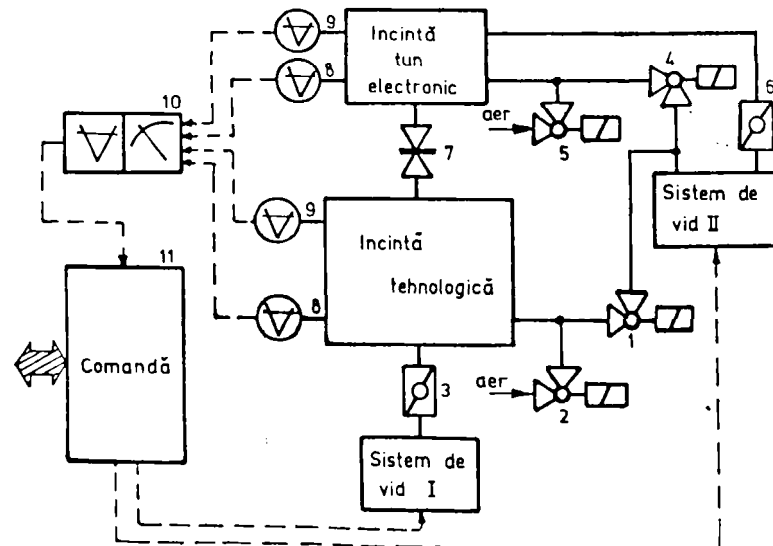


Fig. 2.19.

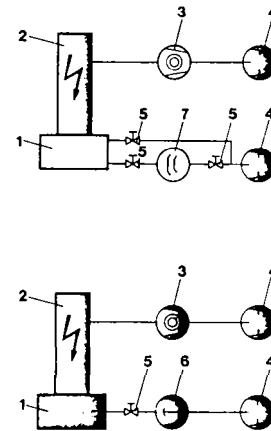


Fig. 2.18. Sisteme pentru vid înalt: 1-camara de sudare; 2-tun electronic; 3-pompă turbomoleculară; 4-pompă rotativă; 5-robinete; 6-pompă Roots; 7-pompă de difuzie cu ulei.

și înrăutățirea vidului este mai mare în camera de sudare, datorită procesului de sudare care are intervenții necesare de schimbare a piesei. Din această cauză, vidul în incinta și camera de sudare este

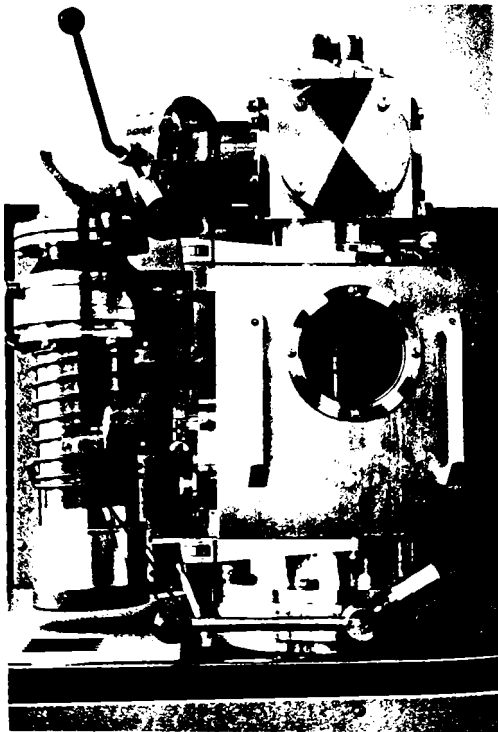


Fig. 2.20.

realizat de sisteme de vid diferite.

Pentru realizarea vidului mediu se folosesc pompe de vid rotative cu palete și pompe de vid Roots, cu lobi. Pompele rotative cu paletă au o viteză de pompare mai mică, comparativ cu pompele Roots.

Pentru realizarea vidului înalt se utilizează pompe turbomoleculare sau pompe de difuzie cu ulei (figura 2.18).

Pentru standul de testare tunuri electronice prezentat în figura 2.3 s-au utilizat două sisteme de vid conform schemei prezentate în figura 2.19, sistemul de vid pentru incinta tunului electronic fiind prezentat în figura 2.20.

În cazul agregatului pentru sudarea țevilor cu pereți subțiri, prezentat în figura 2.5, se utilizează două sisteme de vid, figura 2.21 :

a. Sistemul de vid pentru incinta tunului electronic, care trebuie să asigure vidul înalt (sub  $10^{-4}$  mbar), format dintr-o pompă de difuzie cu ulei, cuplată cu o pompă de vid preliminar, rotativă, cu palete. Pompa de difuzie trebuie să fie

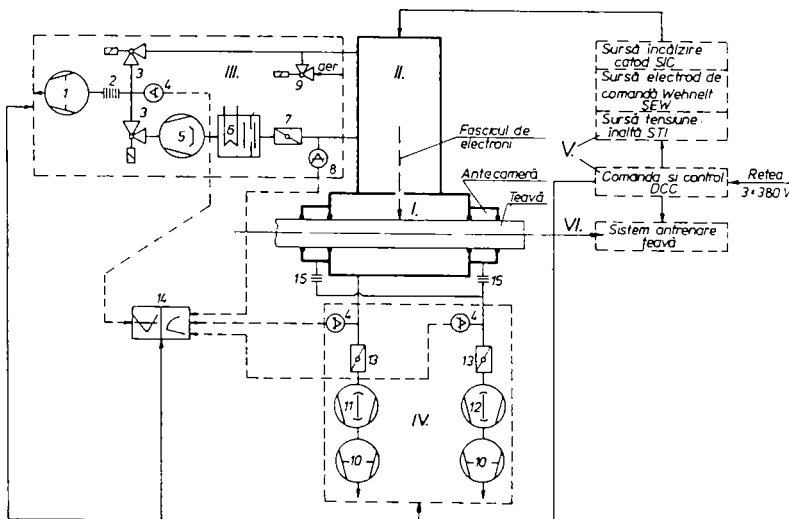


Fig. 2.21.

revăzută cu o capcană răcită cu apă pentru reținerea vaporilor de ulei și cu protecții la întreruperea alimentării cu apă sau cu energie electrică.

b. Sistemul de vid pentru camera de

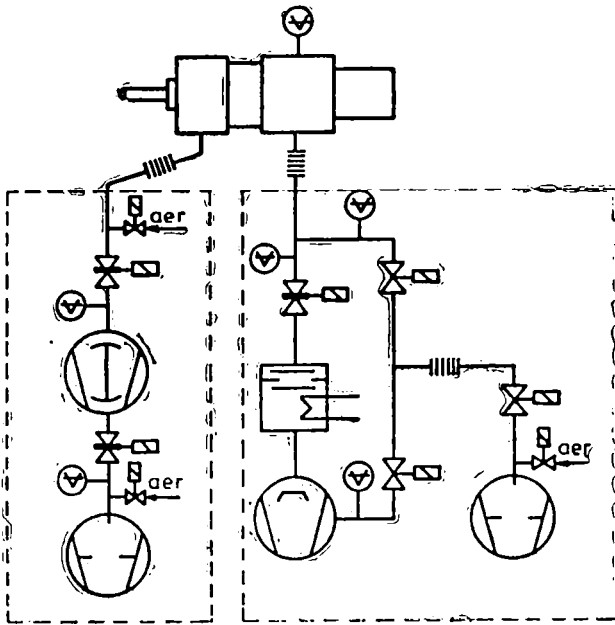


Fig. 2.22.

sudare și antecamere, care trebuie să asigure vidul mediu, este format dintr-o pompă Roots cuplată cu o pompă preliminară rotat vâ, pentru camera de sudare propriu-zisă și o pompă Roots cuplată cu o pompă preliminară rotativă pentru cele două antecamere.

Pentru capul de sudare țevi în plăci tubulare prezentat în figura 2.4 se utilizează similar două sisteme de vid, figura 2.22.

Pompele de vid se conectează prin înșurubări de vid cu incinta tunului electronic, camera de sudare și

antecamerele, prin conducte din oțel inoxidabil, precum și cu racorduri cu tuburi flexibile.

Sistemele de vid sunt prevăzute de regulă cu robinete de comutare a circuitelor de vid și robinete fluture sau sertar și vacuometre pentru măsurarea vidului mediu și înalt.

### 2.2.5. Sursele de alimentare electrică și comandă a tunului electronic

Acestea au o foarte mare diversitate, în funcție de destinația echipamentului pentru sudare cu fascicul de electroni și posibilitățile de realizare a acestuia.

De exemplu pentru standul de testare tunuri electronice acestea sunt, figura 2.23:

1. Sursa pentru încălzire catod.
2. Sursa de tensiune înaltă.
3. Sursa pentru electrodul Wehnelt.
4. Sursa pentru alimentarea lentilelor magnetice.
5. Sursa pentru alimentarea sistemului de deflexie.
6. Sursa pentru sistemul de antrenare a piesei.

În figura 2.24 este prezentată schema bloc pentru alimentarea electrică a unui tun electronic triodă cu încălzire directă compusă din :

1. Tun electronic - TE.
2. Cablu tensiune înaltă - CTI.
3. Grup alimentare tun - GAT.
4. Sursă încălzire catod - SIC.
5. Sursă electrod Wehnelt - SEW.
6. Sursă tensiune înaltă - STI.
7. Dulap de comandă și control - DCC.
8. Reglare încălzire catod - RIC.
9. Reglare electrod Wehnelt - REW.
10. Reglare tensiune înaltă - RTI.

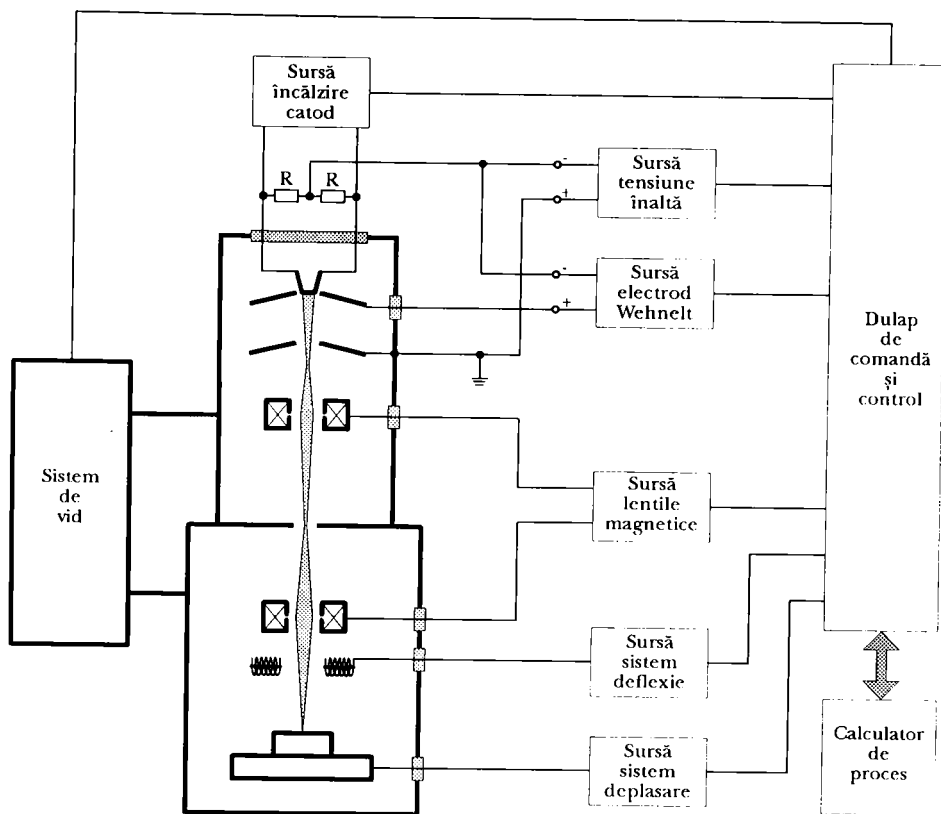


Fig. 2.23.

Echipamentul din figura 2.24 este format din următoarele subsansamble principale:

1. Partea de tensiune înaltă.
2. Partea de tensiune joasă.
3. Partea de comandă și control.

1. Partea de tensiune înaltă este montată într-o cuvă în care sunt imersate în ulei următoarele componente :

- Transformatorul cu conexiunile aferente (hexa sau duodecafazat, serie 600Hz). Acesta trebuie să realizeze împreună cu elementele de filtraj o ondulație foarte scăzută.
- Redresorul cu diodele semiconductoare.
- Două linii de măsură.
- Rezistența de amortizare și ansamblul de filtraj, constituit din condensatori.
- Transformatorul și redresorul circuitului pentru electrodul de comandă Wehnelt.
- Circuitul de comandă a tensiunii pe electrodul Wehnelt.
- Transformatorul și redresorul circuitului de încălzire catod.

SCHEMA BLOC PENTRU ALIMENTAREA ELECTRICĂ A  
TUNULUI ELECTRONIC TRIODA CU CATOD CU ÎNCĂLZIRE  
DIRECTĂ

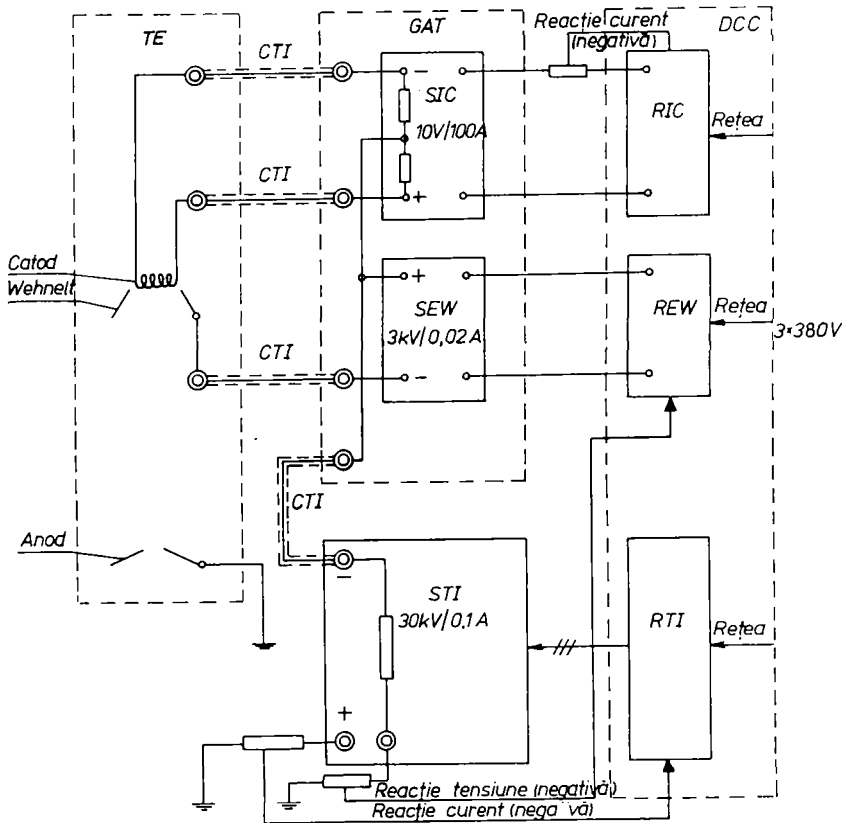


Fig. 2.24.

- Limitatori de supratensiune tranzistorizați.
- Elemente de securitate.

Toate aceste subsansamble sunt fixate pe capacul cuvei pe care sunt montate inele pentru ridicarea întregului subsansamblu din cuvă, în vederea accesului la diferite circuite.

Tot pe capac sunt montate bornele de ieșire și conectorii, iar racordul între grupul de surse și tunul electronic se va face prin trei cordoane cu izolație pentru tensiuni înalte, două din ele dimensionate pentru un curent permanent (încălzire catod) de 100 A.

2. Partea de joasă tensiune este constituită dintr-un dulap care încorporează reglarea cu tiristori a primarului transformatorului de tensiune înaltă, precum și toate înlănțuirile diferitelor circuite de alimentare a tunului electronic.

3. Partea de comandă și control este grupată într-un dulap care este divizat în sertare separate, corespunzând fiecare la o funcție bine precizată :

- 3.1 Sertar de reglare a puterii tunului electronic.

3.2 Sertar de reglare a încălzirii catodului.

3.3 Sertar de reglare a curentului de focalizare și deflexia, respectiv vibrarea fascicului electronic.

3.4 Sertar pentru comanda și controlul sistemelor de vid.

3.1 Sertarul de reglare a puterii tunului electronic realizează reglarea și controlul puterii, pentru care scop, panoul din față este prevăzut cu :

- Un buton care permite preafișarea tensiunii înalte de sudare, tensiune care să poată fi conectată numai după informația "vană tun deschisă".
- Un aparat de măsură a tensiunii înalte.
- Un aparat de măsură a curentului electronic.
- Semnalizare vizuală a prezenței tensiunii înalte.

3.2 Sertarul de reglare a încălzirii catodului realizează reglarea și controlul încălzirii catodului pentru care scop, panoul din față este prevăzut cu :

- Un buton care să permită conectarea încălzirii catodului.
- Semnalizare vizuală "pornit-oprit"
- Butonul potențiometrului de reglare a intensității de încălzire a catodului.
- Un aparat de măsură a intensității de încălzire a catodului.

3.3 Sertarul de reglare a curentului de focalizare și deflexie, respectiv vibrarea fascicului, realizează aceste funcțiuni, pentru care scop panoul din față este prevăzut cu următoarele componente:

- Un buton de preafișare a curentului de focalizare.
- Un aparat de măsură a curentului de focalizare.
- Un buton de afișare a curentului de deflexie.
- Butoane de reglare a vibrării fascicului electronic.
- Semnalizare vizuală "pornit-oprit".

3.4 Sertarul pentru comanda și controlul sistemelor de vid, este prevăzut pe panoul din față cu :

- Schemele sinoptice cu circuitele de vid comandate prin butoane "pornit-oprit"
- Semnalizare vizuală a circuitelor de vid.
- Semnalizare vizuală și acustică pentru avarii și comutări greșite a circuitelor de vid.
- Vacuumetrul de măsurare a vidului.
- Buton "pornit-oprit".

Grupul de surse de alimentare a tunului electronic sunt proiectate și realizate pentru următorii parametri caracteristici, tehnici și funcționali :

1. Sursa de tensiune înaltă (STÎ, figura 2.24) :

- Tensiunea de accelerare cu reglare continuă de la 15 la 30 kV, sub 1% stabilitate



- și sub 4% ondulații reziduale.
  - Stabilitate termică  $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ .
  - Curentul maxim admisibil permanent 100 mA; 0,1% stabilitate.
  - Reglarea prin intermediul unui sistem de stăpânire a buclei închise, care compară curentul real cu cel afișat. Odată diferența dată prin comparare, comandă reglarea potențiometrului Wehnelt pentru corectarea curentului electronic.
  - Polul pozitiv la masă.
  - Reglare tensiune accelerare cu  $\pm 1\%$  prin tiristori. Timpi de răspuns 50 milisecunde pentru o corecție completă corespunzând la  $\pm 10\%$  a variației sectoriale.
  - Securitate pentru tensiune înaltă :
    - Dispozitiv de securitate la timpi de răspuns rapizi ( $< 0,1$  secunde), în cazul eliminării accidentale a informației măsurării tensiunii înalte.
    - Rezistențe de amortizare imersate adaptate, la descărcări a tensiunii înalte.
    - Releu magnetotermic pe primar.
    - Releu electrotermic de supracurent.
    - Întreruperea automată a procesului de sudare la supratensiuni superioare sau egale cu 10% față de valoarea afișată.
2. Sursa pentru încălzire catod (SCI, figura 2.24) :
- Tensiune nominală redresată (monofază) 0 la 10 V.
  - Curent nominal redresat 100 A.
  - Tensiune nominală față de masă (secundar și redresor) 60 kV c.c.
  - Factor de ondulație la curent nominal  $2 \cdot 10^{-2}$ .
  - Stabilitate curent redresat  $10^{-2}$ .
  - Stabilitate termică  $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ .
  - Precizie preselecție curent redresat  $2 \cdot 10^{-3}$ .
  - Reglaj continuu curent redresat 0-100 A.
  - Reglaj tensiune redresată 0-10V.
3. Sursa pentru electrodul Wehnelt (SEW, figura 2.24) :
- Tensiune continuă reglabilă 0 la -4000 V.
  - Curent debitat 25 mA.
  - Curent nominal 10 mA.
  - Stabilitate tensiune  $5 \cdot 10^{-3}$ .
  - Stabilitate termică  $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ .
  - Reglaj continuu tensiune redresată 0 la 3 kV.
  - Reglaj timp de creștere și descreștere tensiune (curent redresat) 0,5-10 s (reglabili independent).

- Tensiune nominală față de masă (secundar și redresor) 60 kV c.c.
4. Sursa pentru focalizarea fasciculului electronic :
- Curentul de focalizare se obține prin intermediul unei surse comandată electronic, care furnizează un curent reglabil de la 0 la 2 A, sub  $10^{-3}$  stabilitate, la o tensiune de 10 V.
  - Sursa este cu posibilitate de reglare în curent și tensiune.
5. Sursa pentru deflexia și vibrarea fasciculului electronic :
- Cu redresare monofazată furnizează un curent reglabil de la 0 la 0,5 A, sub o tensiune de 10 V.
  - Sursa este cu posibilitate de reglare numai în curent.
  - Deflexia fasciculului perpendicular pe axa piesei.
  - Vibrarea fasciculului electronic cu 0,1-1000 Hz sinusoidal.

Pentru îmbunătățirea performanțelor în prezent se remarcă folosirea unor surse speciale care folosesc ca izolator, în locul uleiului de transformator, un gaz (fluorura de sulf) sub presiune de 1,5 at, precum și conexiuni cu fibre optice. Aceste îmbunătățiri au permis reducerea dimensiunilor surselor și introducerea lor într-o singură unitate.

Sursele folosite în prezent au prevăzută, prin concepția lor, posibilitatea controlului automat a curentului fasciculului de electroni prin comanda electrozodului Wehnelt și a curentului de alimentare a catodului. Ele sunt prevăzute cu sisteme automate de protecție a descărcărilor electrice accidentale în tun, iar în cazul catozilor cu încălzire indirectă cu sisteme automate de control a curentului de emisie a catodului precum și pentru evitarea descărcărilor în avalanșă între catod și filamentul de încălzire al său. Este posibilă de asemenea reglarea automată a focalizării fasciculului pe piesă prin comanda lentilei magnetice.

### 2.3. Aspecte constructive privind tunurile electronice pentru sudare cu fascicul de electroni

Tunul electronic, figura 2.25, este un dispozitiv care generează, accelerează și focalizează un fascicul de electroni. Catodul generează electronii care sunt accelerați și focalizați în câmpul electric dintre catod, anod și electrodul de polarizare Wehnelt, care se află în zona electrostatică denumită tun electronic propriu-zis. Fasciculul de electroni converge într-un prim punct focal, denumit cross-over, situat în zona aperturii anodice. După cross-over fasciculul de electroni este divergent, astfel că este necesară o nouă focalizare prin intermediul unei lentile magnetice, care proiectează imaginea din cross-over pe piesă, cu un anumit grad de micșorare.

Tunurile electronice utilizate la sudarea metalelor sunt de tip diodă, dacă electrodul Wehnelt este la aceeași tensiune cu catodul, respectiv tip triodă, dacă electrodul Wehnelt este la o tensiune diferită de cea a catodului.

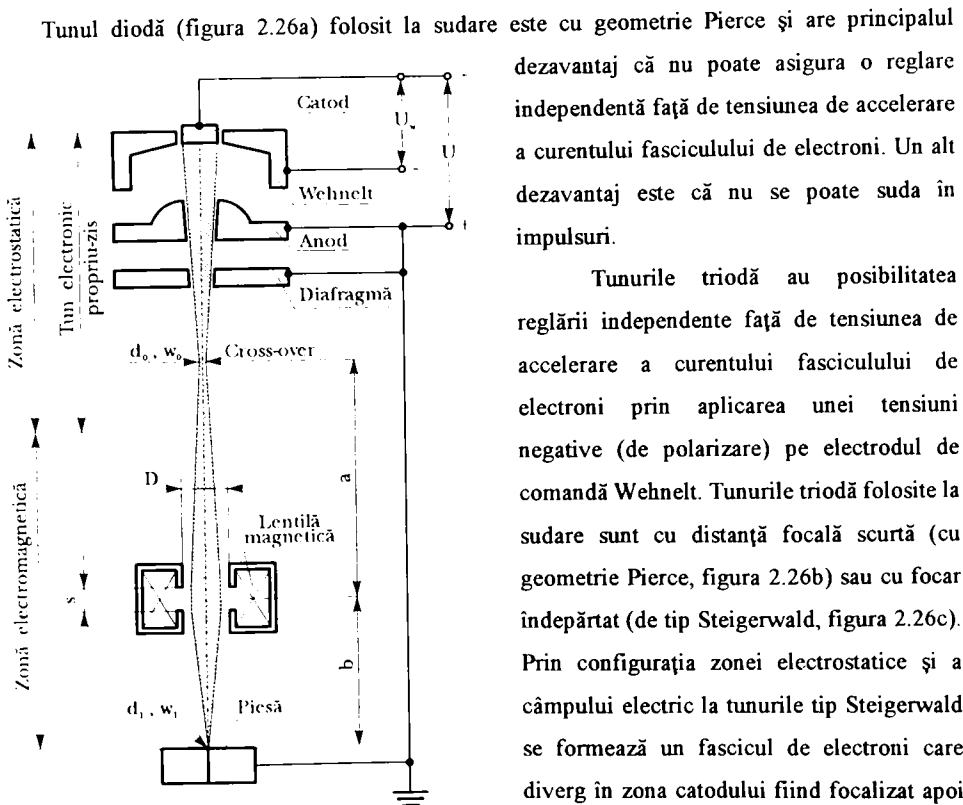


Fig. 2.25.

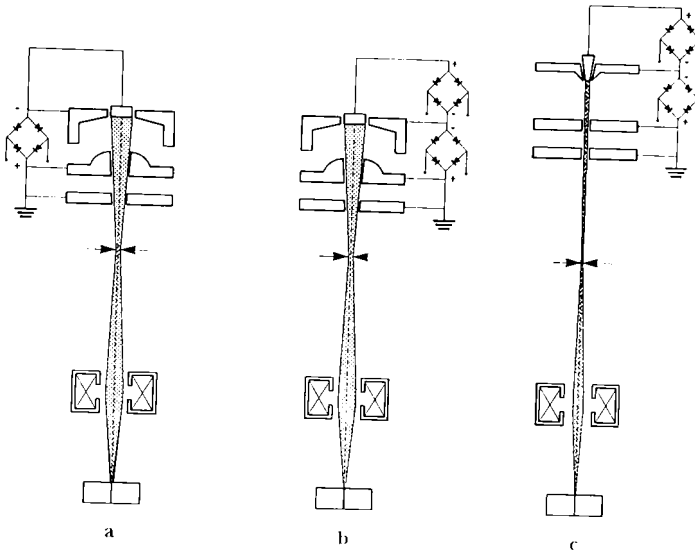


Fig. 2.26.

focalizare mai bună  
 "a", deoarece cato "u"  
 la acest tip de tun  
 este de secțiune  
 mică, tensiunile de  
 accelerare trebuie să  
 fie foarte mari, de  
 obicei 120-150 kV.  
 La tensiuni până la  
 60 kV se utilizează  
 cu precădere tunurile  
 triodă cu distanță  
 focală scurtă (cu  
 geometrie Pierce).

După modul

în care sunt emiși electronii, există tunuri cu emisie termoelectronică, cu emisie fotoelectronică sau cu emisie prin efect de câmp. În cazul tunurilor electronice pentru sudare cea mai utilizată este emisia termoelectronică deoarece asigură densitatea de putere și curentul necesar sudării.

### 2.3.1. Aspecte privind construcția de ansamblu

Concepția constructivă de ansamblu a unui tun electronic pentru sudare este prezentată în figura 2.27 și mai detaliat în figura 2.28 în care elementele componente sunt :

1. Izolator.
2. Catod.
3. Electrode Wehnelt.
4. Anod.
5. Lentilă magnetică de corecție.
6. Vana de izolare cu conexiunea pentru vid a tunului.
7. Lentila magnetică de focalizare.
8. Sistemul de deflexie.

Concepția, proiectarea și construcția tunului electronic constituie o problemă complexă din punct de vedere constructiv și tehnologic, impunându-se o serie de cerințe deosebite dintre care se menționează :

1. Precizie ridicată privind coaxialitatea electrozilor tunului în raport cu axa sistemului electrono optic.
2. Asigurarea fiabilității mecanice și electrice a izolatoarelor tunului electronic la temperaturi înalte de lucru.
3. Necesitatea disipării unei puteri calorice considerabile în electrodul Wehnelt și anod, care se încălzesc la temperaturi importante ca urmare a disipației termice a catodului.

4. Menținerea interstițiilor dintre electrozi la temperaturi înalte de lucru.

5. Realizarea constructivă a ansamblului tunului electronic de așa manieră încât să fie evitate străpungerile între electrozi (10-15 kV/mm în vid și 2-3 kV/mm pe suprafața izolatoarelor).

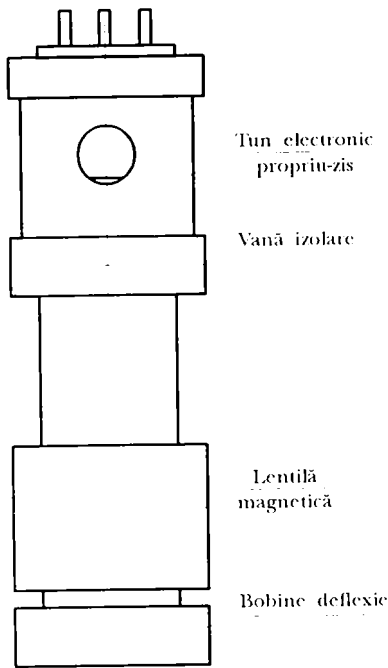


Fig. 2.27.

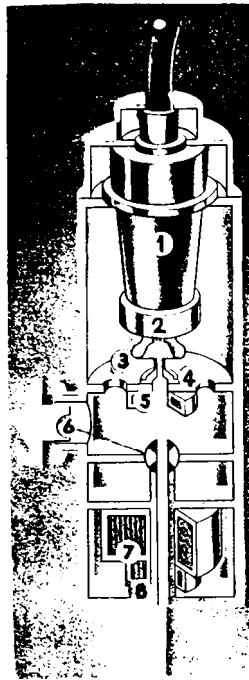


Fig. 2.28.

Pentru îndeplinirea într-o măsură cât mai mare a acestor cerințe, tunul electronic propriu-zis trebuie să constituie un subansamblu independent, montat pe un izolator.

Între tunul electronic propriu-zis și lentila magnetică se intercalează o vană prin care se poate realiza izolarea incintei tunului electronic propriu-zis de camera de sudare când în aceasta nu este vid (la introducerea sau scoaterea pieselor, când utilajul este oprit, etc.). Tunul

electronic propriu-zis și lentila magnetică sunt montate coaxial pe vana de izolare.

### 2.3.2. Construcția catodului

Catodul unui tun electronic pentru sudare trebuie să îndeplinească următoarele condiții :

1. Densitatea curentului de emisie foarte mare, care depinde de temperatura de încălzire a materialului catodului și de lucrul mecanic de extracție a electronilor din material, care trebuie să fie cât mai mic posibil .
2. Durată de lucru cât mai lungă, adică să-și păstreze forma, dimensiunile și poziția coaxială în apertura Wehneltului pentru a nu se modifica geometria electronoptică a tunului electronic.
3. Să fie ușor de realizat și să aibă o construcție cât mai simplă pentru ca înlocuirea lui să fie ușoară.

Din punctul de vedere al modului de încălzire catodii termoemisivi sunt de două tipuri : cu

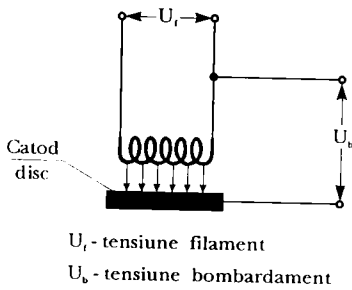


Fig. 2.29.

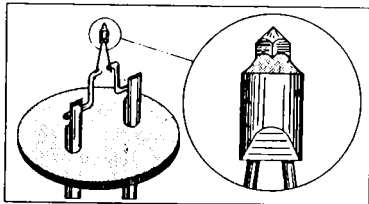
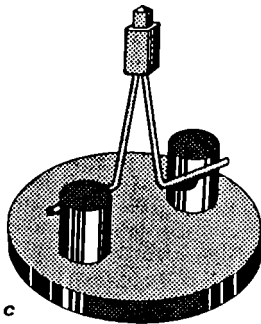
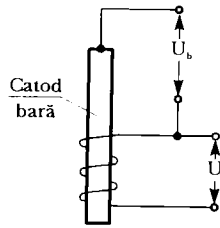


Fig. 2.31.



U<sub>f</sub> - tensiune filament  
U<sub>b</sub> - tensiune bombardament

Fig. 2.30.

încălzire directă și cu încălzire indirectă prin radiație sau bombardament electronic. Catozii cu încălzire directă sunt realizați din sârmă sub formă de ac de păr (tunul tip Steigerwald) sau spirală având un curent de emisie mic, până la 100 mA. Un curent de emisie mai mare, până la 100 mA se poate obține cu catodii tip bandă. Pentru a realiza curenți de emisie mari, peste 100 mA, sau când materialul catodului nu poate fi prelucrat sub formă de sârmă sau bandă se utilizează catozii cu încălzire indirectă de tip disc - figura 2.29 - sau tip bară - figura 2.30.

Catozii cu încălzire indirectă măresc complexitatea construcției tunului electronic propriu-zis, a trecerilor izolate în vid și mai ales a surselor de alimentare și comandă a tunului, motive pentru care aceștia se folosesc atunci când nu este satisfăcătoare utilizarea catozilor cu încălzire directă.

Dintre materialele utilizate la confecționarea catozilor cel mai des sunt utilizate materiale refractare ca wolframul, tantalul și molibdenul. Tantalul are cel mai mare randament de emisie și se prelucrează ușor, dar are rezistență la înmuiere mică, deci nu se poate încălzi la o temperatură prea mare. Wolframul are un randament de emisie mai mic, se prelucrează greu, dar este cel mai rezistent fiind folosit des în construcția de catodii. Dacă presiunea în incinta tunului se menține sub  $10^{-5}$  mbar și debitul de pompare a sistemului de vid pentru incinta tunului este suficient de mare pentru ca efectul bombardamentului ionilor din incinta tunului să fie scăzut, se pot folosi catodii distribuți care sunt acoperiți cu o substanță cu proprietăți emise (bariu) sau catodii cu înveliș oxid la care pe materialul suport se depune un strat din oxid de stronțiu, calciu sau bariu, de grosime 50-200  $\mu\text{m}$ . Cel mai bun randament de emisie se obține cu hexaborura de lantan ( $\text{LaB}_6$ ), dar aceasta este greu de obținut și prelucrat, fiind utilizată mai ales la catozii cu încălzire indirectă, soluția cu încălzire directă fiind mai rar întâlnită, figura 2.31, [21]. Durata de viață la catozii cu încălzire directă, folosiți la tunurile electronice pentru sudare, este până la 100 de ore de funcționare continuă, ceea ce este mulțumitor în procesele de sudare

industriale. Catozii cu încălzire indirectă pot atinge sute de ore de funcționare.

### 2.3.3. Construcția electrodului de comandă Wehnelt

Zona electrostatică a unui tun electronic - denumită și tun electronic propriu-zis - conține catodul, anodul și electrodul de polarizare (negativ), ultimul fiind denumit, [62], și electrod Wehnelt. Obținerea unei densități de putere de valoare ridicată este determinată, [62], și de gradul de focalizare a fascicului de electroni, care depinde de configurația câmpului electrostatic din tunul electronic propriu-zis. Forma electrodului Wehnelt influențează considerabil configurația câmpului electrostatic, iar în cazul tunului electronic triodă determină și tensiunea de tăiere a fascicului de electroni, când tunul funcționează în impulsuri. Electrodul Wehnelt permite comanda curentului fascicului independent de tensiunea de accelerare.

Dintre configurațiile de electrozi wehnelt utilizate la tunurile electronice pentru sudare se prezintă șase, cu următoarele forme ale electrodului Wehnelt :

- 1) Sferică (Pierce) - figura 2.32;
- 2) Conică simplă - figura 2.33;
- 3) Conică compusă - figura 2.34;
- 4) Cilindrică deschisă - figura 2.35;
- 5) Cilindrică închisă - figura 2.36;
- 6) Conic - cilindrică - figura 2.37.

Electrodul Wehnelt se confecționează de regulă din oțeluri inoxidabile nemagnetice și are

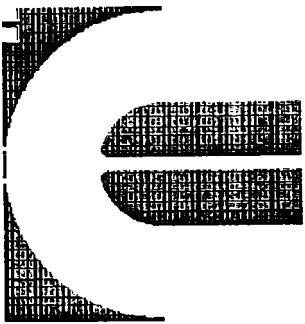


Fig. 2.32.



Fig. 2.33.



Fig. 2.34.

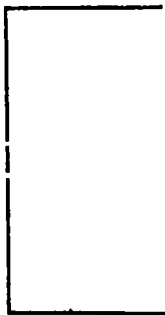


Fig. 2.35.



Fig. 2.36.



Fig. 2.37.

o apertură în care este amplasat catodul, apertură care are un blindaj termic din material refractar. Atunci când, datorită cerințelor de funcționare continuă a tunului electronic, este posibilă supraîncălzirea electrodului Wehnelt, forma și dimensiunile sale trebuie modificate astfel încât să asigure disiparea căldurii și păstrarea coaxialității cu axa tunului.

Electrodul Wehnelt se montează pe un izolator astfel încât în funcționare să rămână coaxial cu axa electronoptică a tunului.

#### 2.3.4. Construcția anodului

Electronii accelerați între catod și anod trec prin apertura anodică și sunt focalizați în cross-over. Forma anodului influențează configurația câmpului electric din tunul electronic propriu-zis, dar într-o măsură mai mică decât electrodul Wehnelt, motiv pentru care la multe tunuri electronice pentru sudare sunt întâlnite forme simple ale acestuia.

Dintre configurațiile anodului utilizate la tunurile electronice pentru sudare se prezintă câteva în figurile 2.38 până la 2.49.

Forma exterioră a anodului și a aperturii lui nu influențează tensiunea de tăiere a fasciculului, aceasta depinzând în principal de poziția (distanța) anodului față de catod și electrodul Wehnelt.

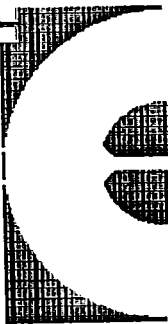


Fig. 2.38.

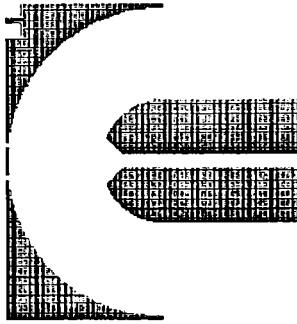


Fig. 2.39.

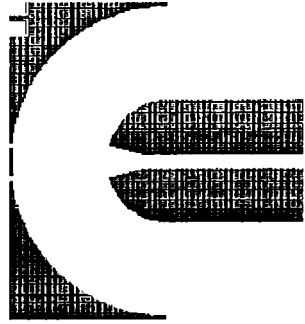


Fig. 2.40.



Fig. 2.41.

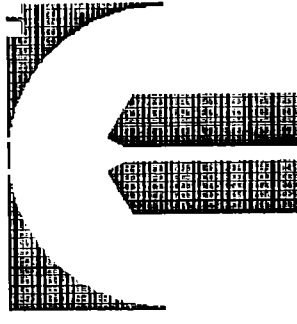


Fig. 2.42.



Fig. 2.43.





Fig. 2.44.

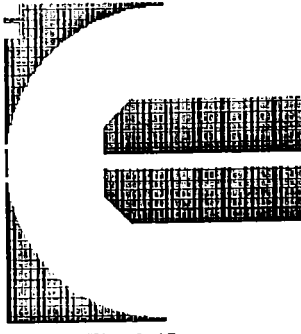


Fig. 2.45.

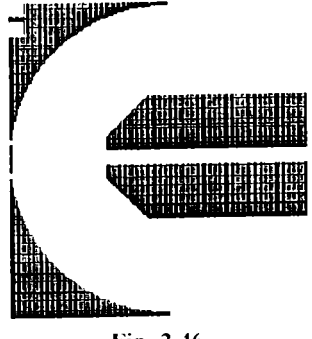


Fig. 2.46.

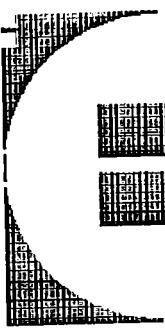


Fig. 2.47.

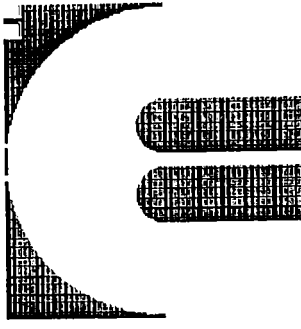


Fig. 2.48.

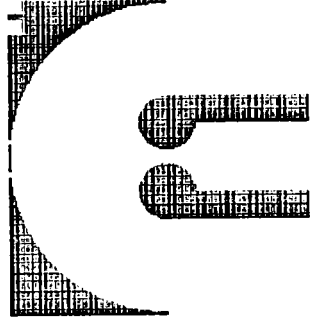


Fig. 2.49.

Solicitarea principală a anodului se datorează faptului că în unele situații electronii de la periferia fasciculului de electroni se ciocnesc de anod și provoacă încălzirea puternică a acestuia, iar accidental chiar topirea lui. Din acest motiv anozii se confecționează din materiale cu conductivitate termică ridicată, apertura anodică se blindează termic cu un material refractar iar în unele cazuri anodul este răcit.

La fel ca și la electrodul Wehnelt, anodul trebuie să fie montat astfel încât în funcționare să rămână coaxial cu axa electronoaptică a tunului.

### 2.3.5. Construcția lentilei magnetice

După ce trece de primul punct focal (cross-over), fasciculul de electroni divergent trebuie să fie focalizat prin intermediul unei lentile, care poate fi electrostatică sau electromagnetice, principiul lor de funcționare fiind prezentat în figurile 2.50 și 2.53, în ambele situații câmpul având o simetrie axială.

Dintre lentilele electrostatice ce pot fi utilizate la tunurile electronice pentru sudare utilizate se menționează lentila cu trei electrozi, care are pe primul și cel de-al treilea cu potențial zero iar electrozului intermediar cu potențial pozitiv sau negativ, denumită lentilă unipotențială. Am studiat un tun electronic cu o lentilă electrostatică unipotențială, cu simetrie axială și configurație

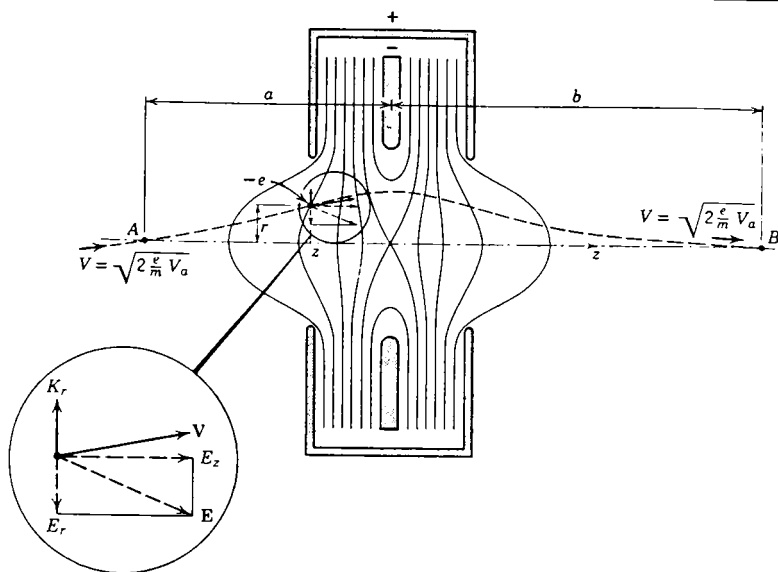


Fig. 2.50.

asimetrică prezentate prima dată de Septier și Ruytoor, [44]. S-a considerat un tun cu configurație geometrică Pierce, care are tensiunea de accelerare -35 000 V iar tensiunea pe electrodul Wehnelt -35 120 V. În figura 2.51 este prezentat cazul în care fasciculul focalizează cu o tensiune pe lentila electrostatică de -19 500 V, iar în figura 2.52 tensiunea pe lentilă este de 41 500 V. Se remarcă în ambele cazuri tensiunea de focalizare ridicată necesară lentilei electrostatice, ceea ce complică construcția surselor de alimentare a tunului electronic și duce la creșterea costurilor în comparație cu utilizarea lentilei electromagnetice.

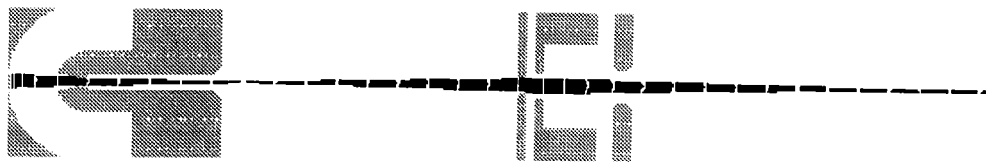


Fig. 2.51.

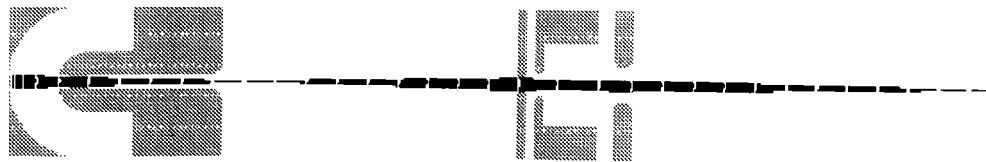


Fig. 2.52.

Ca urmare a motivelor enumerate mai sus, în cazul tunurilor electronice pentru sudare se folosesc în exclusivitate lentile magnetice, deoarece cele electrostatice implică o aparatură de comandă foarte complexă în comparație cu aparatura necesară alimentării și comenzii lentilelor

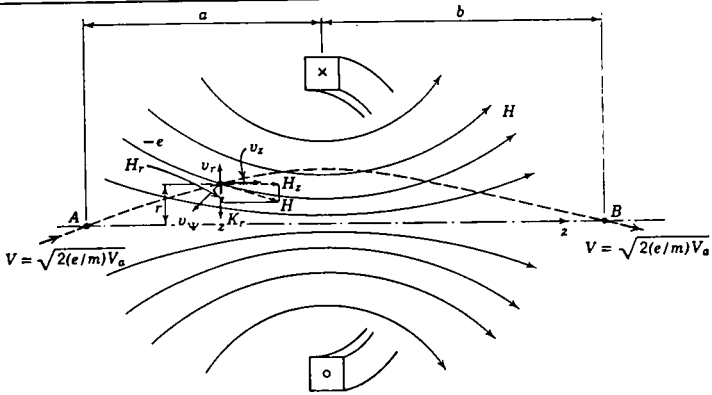


Fig. 2.53.

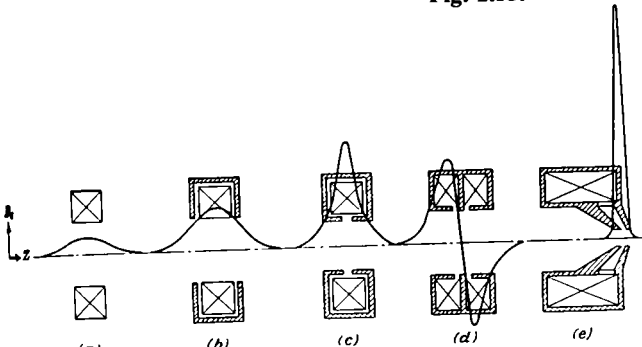


Fig. 2.54.

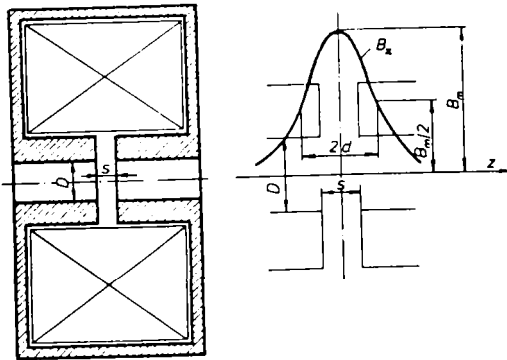


Fig. 2.55.

magnetică. Lentila magnetică este formată dintr-o bobină cu simetrie axială încorporată într-o carcasă dintr-un material cu proprietăți feromagnetice, variația câmpului magnetic în lentilă ... în firmele prezentate în figura 2.54. La tunurile

electronice pentru sudare se utilizează lentile magnetice de forma (c) din figura 2.54 sau (a) din figura 2.56. Construcția cu două bobine prin care curentul circulă în sensuri opuse - forma (d) din figura 2.54 - este folosită pentru evitarea mișcării electronilor după trecerea prin lentilă. Lentile cu piese

polare se folosesc pentru fasciculele foarte fine și sunt mai rar întâlnite la sudare. Variația inducției \$B\_z\$ este determinată de numărul de amperi

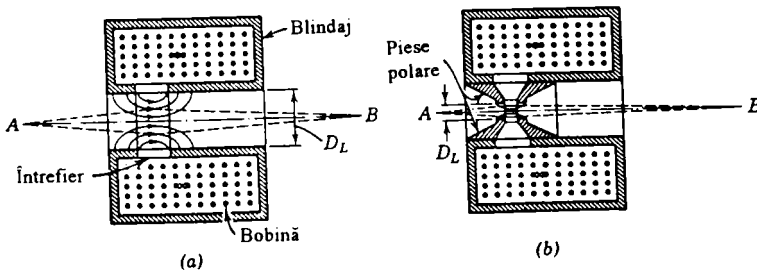


Fig. 2.56.

spire al bobinei ( $N_L$ ), de forma și dimensiunile geometrice ale întrefierului  $s$  și diametrului  $D$  -figura 2.55 - precum și de saturația pieselor polare care alcătuiesc întrefierul.

Lentile magnetice mai sunt folosite pentru corectarea fasciculului în cazul tunurilor cu distanța tun-piesă mare.

### 2.3.6. Sistemul de deflexie

Utilajele moderne de sudare cu fascicul de electroni au montat pe tunul electronic un sistem de deflexie a fasciculului de electroni față de axa electronoptică a tunului. Această deplasare a fasciculului față de axa tunului se face cu următoarele scopuri :

1. Poziționarea exactă a fasciculului electronic pe piesă.
2. Asigurarea posibilității oscilării fasciculului pentru creșterea adâncimii de pătrundere, menținerea stabilității tubului capilar de material topit și reducerea fluctuațiilor pătrunderii sudurii .
3. Urmărirea exactă a traiectoriei îmbinării sudate.
4. Preîncălzirea sau/și tratamentul termic al piesei sudate.

Sistemul de deflexie a fasciculului se compune din două sau mai multe perechi de bobine cu axele conținute într-un plan perpendicular pe axa electronoptică a tunului electronic, iar în cazul sistemelor de urmărire automată a traiectoriei sudurii mai este prevăzut cu un detector al electronilor retrodifuzăți, figura 2.57. Pentru determinarea exactă a traiectoriei sudurii, figura 2.58, un fascicul de putere mică baleiază (scanează) îmbinarea, electronii retrodifuzăți fiind captați de detectorul 6, semnalul fiind prelucrat de unitatea 1 și transmis sistemului CNC 2. Acesta transmite informațiile necesare sistemului de deplasare a piesei 3 și generatorului de funcții 4 care comandă bobinele de

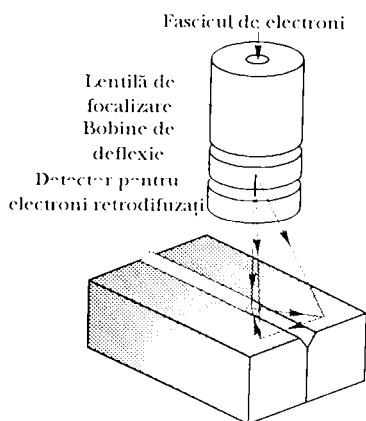


Fig. 2.57.

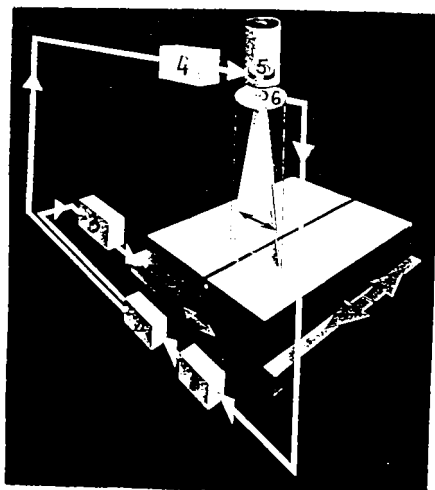


Fig. 2.58.

deflexie. Această operație poate fi executată în două cicluri, adică scanare, figura 2.59, urmată de sudare, figura 2.60, sau într-un singur ciclu, figura 2.61, când în timpul sudării se fac întreruperi foarte scurte pentru scanare imediat în fața tubului capilar de material topit.

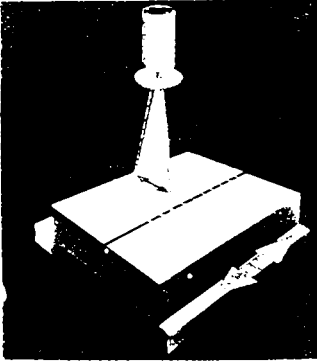


Fig. 2.59.

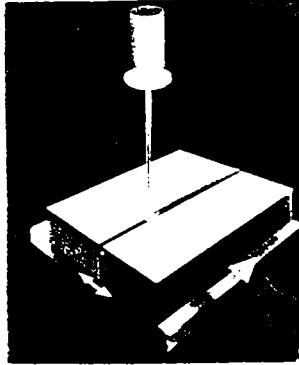


Fig. 2.60.

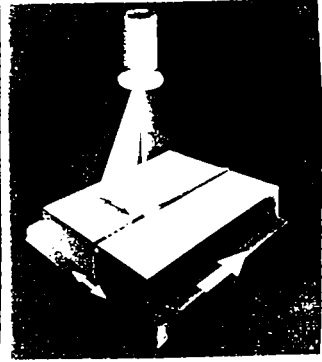


Fig. 2.61.

Echipamentele moderne de sudare au în prezent posibilitatea de a prelucra semnalul captat de detectorul electronilor retrodifuzăți și a-l transforma în imagini video. [42].

În general sistemele actuale de deflexie măresc prețul utilajelor de sudare, ele fiind opționale în oferta firmelor

---

## Capitolul 3

---

# INTERACȚIUNEA FASCICULULUI DE ELECTRONI CU MATERIALUL PIESEI



### 3. INTERACȚIUNEA FASCICULULUI DE ELECTRONI CU MATERIALUL PIESEI

#### 3.1. Aspecte generale privind procesul de sudare cu fascicul de electroni

Sudarea cu fascicul de electroni este un procedeu de sudare prin topire, caracterizat în principal prin densitatea de putere foarte mare a fascicului ( $10^5$ - $10^8$  W/cm<sup>2</sup>) și diametrul redus al acestuia (0,1-1 mm). Datorită acestor caracteristici mecanismul formării cordonului sudat este fundamental diferit de cel corespunzător procedeelor convenționale de sudare.

Din teoria ciocnirii electronilor cu suprafața unui solid, adâncimea de pătrundere a electronilor în piesă se determină pentru metale, așa cum s-a arătat în capitolul 1, cu o relație stabilită de Schonland, figura 3.1:

$$\delta \approx 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{U^2}{\rho} \quad [mm] \quad (3.1)$$

în care tensiunea U este în kV, iar densitatea în kg/m<sup>3</sup>.

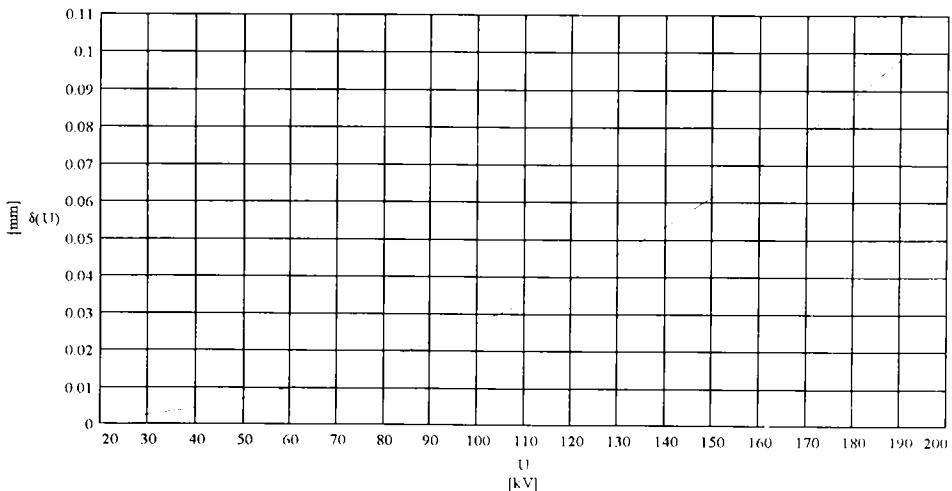


Fig. 3.1.

Din relația (3.1), cu  $U = 160$  kV și  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup> pentru oțel, se obține o adâncime de pătrundere în oțel  $\delta = 0,07$  mm, ceea ce se abate considerabil de la rezultatele experimentale care, pentru tensiunea considerată, indică adâncimi de pătrundere de circa 50 mm. Pătrunderea foarte



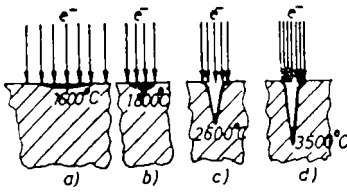


Fig. 3.2.

mare a fascicului de electroni nu se datorează fenomenului de impact a electronilor cu solidul, ci densității de putere foarte mari a fascicului de electroni - de aproximativ 1000 de ori superioară sudării cu arc electric.

În figura 3.2 sunt prezentate diferitele forme ale materialului topit în funcție de densitatea de putere a fascicului de electroni. Când fasciculul este defocalizat - cazul a) - densitatea de putere fiind mică se produce topirea stratului superficial de material, fără pătrundere. Crescând densitatea de putere - cazul b) - are loc o supraîncălzire a băii de material topit care produce adâncirea acesteia. Când densitatea de putere este în jur de  $10^6 \text{ W/cm}^2$  - cazul c) - se produce o vaporizare a materialului topit, formându-se sub acțiunea vaporilor produși un tub capilar înconjurat de un strat subțire de material topit. La densități de putere în jur de  $10^8 \text{ W/cm}^2$  - cazul d) - are loc o eliminare explozivă a materialului topit, putându-se produce chiar perforarea pe întreaga grosime a materialului. Energia fascicului de electroni este transferată piesei pe întreaga lungime a tubului capilar și nu prin conducție termică de la suprafață ca în cazul procedeele clasice de sudare prin topire.

Experimental s-a observat o limitare a pătrunderii fascicului de electroni la creșterea puterii

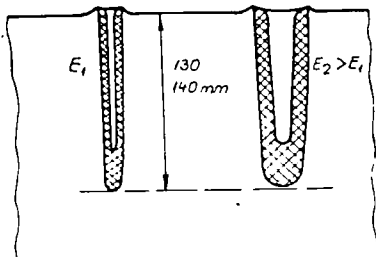


Fig. 3.3.

acestui peste o anumită valoare. Pentru oțel, adâncimea maximă de pătrundere la sudarea în poziție verticală a fascicului de electroni este de circa 130-140 mm, figura 3.3, [13]. Energia în exces a fascicului este transmisă învelișului tubului capilar ducând la creșterea masei de metal topit, iar acesta prin greutatea sa curge în cavitate și o închide, împiedicând pătrunderea în continuare a fascicului în piesă. Pentru a obține adâncimi de pătrundere mai mari decât cele menționate pentru sudarea în poziție verticală a fascicului de

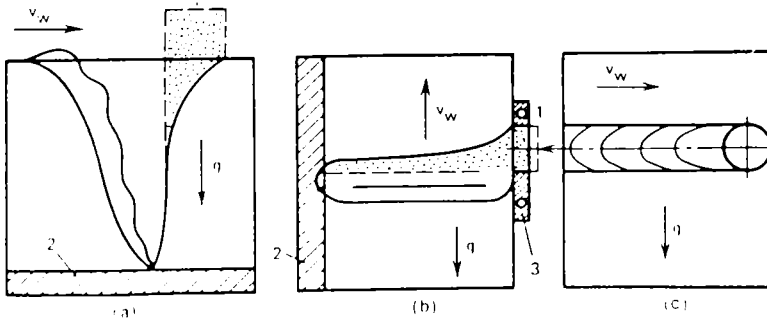


Fig. 3.4

electroni pe perete orizontal - figura 3.4a - se sudează cu fasciculul de electroni în poziție orizontală pe perete vertical, deplasarea fasciculului față de piesă fiind pe verticală - figura 3.4b -sau pe orizontală (în cornișă) - figura 3.4c, în acest ultim caz obținându-se adâncimi de pătrundere în oțel până la 300 mm iar în titan până la 400 mm, [13]. Fiecare dintre aceste poziții de sudare are anumite dezavantaje. Ideal trebuie întrunite următoarele condiții : (1) prevenirea scurgerii metalului topit din baie ; (2) asigurarea temperaturii optime în fiecare punct al băii de metal topit ; (3) micșorarea influențelor negative ale perturbațiilor hidrodinamice din baia de metal topit. În figura 3.4 varianta (a) satisface corespunzător primele două condiții dar slab a treia condiție, varianta (b) satisface corespunzător prima și a treia condiție, iar varianta (c) nu satisface prima condiție. Pentru a satisface toate cele trei condiții se recomandă înclinarea piesei și a axei fasciculului față de orizontală cu un unghi  $\alpha$  , astfel încât la baza tubului capilar presiunea hidrostatică a metalului topit să fie de maximum 4500 MPa,[6]. S-au obținut astfel suduri de o calitate foarte bună în oțel, cu o tensiune de accelerare  $U = 80$  kV, curent fascicul  $I = 0,7$  A,  $\alpha = 24^\circ$  și viteze de sudare  $v = 0,15...0,25$  cm/s, pomindu-se de la condiția :

$$\alpha \leq \arcsin \left( \frac{4500}{\rho \cdot g \cdot h} \right) \tag{3.2}$$

- unde :  $\rho$  este densitatea materialului;
- $g$  - accelerația gravitațională;
- $h$  - adâncimea de pătrundere.

În oricare dintre cele trei poziții de sudare, dar mai ales în cea mai des întâlnită cu fasciculul pe orizontală, tubul capilar nu are o formă constantă ci oscilează atât în lățime cât și în adâncime. Variația în adâncime a tubului capilar la sudarea unui oțel carbon este prezentată în figura 3.5, [13].

Cercetările experimentale privind comportarea dinamică a tubului capilar evidențiază repetarea periodică a următoarelor fenomene, figura 3.6, [13]: formarea unui tub capilar uniform

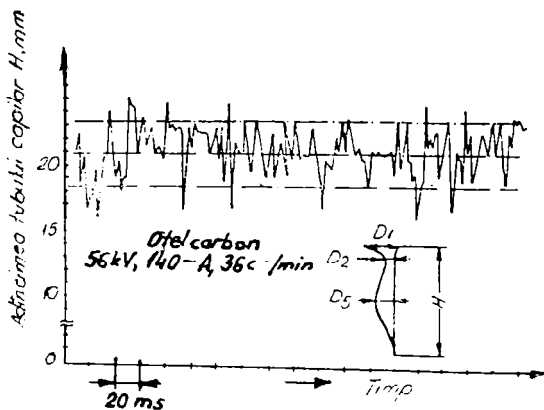


Fig. 3.5.

și de adâncime mare (a), apariția unor proeminente localizate la baza sau în zona mediană a tubului (b), dezvoltarea acestor proeminente (c), fragmentarea lor (d) și crearea unui tub capilar de lățime mai mare (e). Asupra unui element de volum  $v'$  al învelișului topit acționează, figura 3.7, [10]: presiunea hidrostatică  $p_1$ , presiunea de vapori  $p_2$  în tubul capilar, tensiunea superficială  $p_3$ , presiunea  $p_4$  în invelișul de metal topit, forța  $F_1$  datorată



Fig. 3.6.

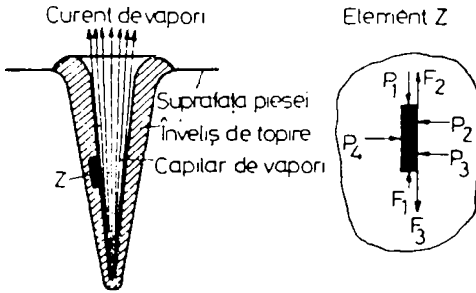


Fig. 3.7.

gradientului de temperatură dintre tubul capilar și materialul învecinat aflat în stare solidă, forța de reacție  $F_2$  produsă de jetul de vapori care pătrunde în tubul capilar și forța de frecare  $F_3$ . Elementul de volum considerat nu este în echilibru staționar deoarece, de regulă, rezultanta acțiunilor menționate nu este constantă în învelișul topit, precum și datorită decaderii a energiei fasciculului de electroni către tubul de vapori și învelișul topit fiind influențat

de : (1) reflexia electronilor la suprafața metalului topit, (2) focalizarea suplimentară a fasciculului de electroni ca urmare a prezenței ionilor pozitivi prin ciocnirile de vapori tubului capilar, (3) reflexia electronilor la baza tubului capilar, (4) absorbția electronilor de către stropii de material topit și (5) transmiterea de căldură din tubul capilar prin radiație și prin condensarea vaporilor. Toate aceste fenomene nu au un caracter staționar ci ele variază în timp și spațiu, prin compunerea lor rezultând un comportament oscilatoriu al tubului capilar și al învelișului topit, cu frecvențe de la 10 Hz, în apropierea frontului de solidificare, până la 20 kHz, la limita dintre învelișul topit și tubul capilar de vapori. Amplitudinea oscilațiilor tubului capilar, mai ales a adâncimii de pătrundere, scade cu micșorarea densității de putere a fasciculului sau prin oscilarea acestuia într-o direcție transversală sau longitudinală față de direcția de sudare. Oscilarea fasciculului cu o frecvență de 25 - 1000 Hz și o amplitudine de circa două ori diametrul fasciculului conduce la o creștere sensibilă a lățimii tubului capilar și o uniformizare a pătrunderii și grosimii acestuia, fără a se remarca modificări majore a adâncimii de pătrundere în comparație cu sudarea fără oscilarea fasciculului. La sudarea cu oscilarea fasciculului se observă o închidere și deschidere periodică a tubului capilar, cu o frecvență aproximativ dublă față de frecvența de oscilare, [13].

Prin studiul experimental, mișcarea metalului topit a fost descompusă în următoarele mișcări simple, figura 3.8, [13] : (a) deplasare circulară la partea superioară a tubului capilar, (b) curgere rapidă vertical-descendentă în vecinătatea zonei de trecere, (c) curgere rapidă vertical-ascendentă în apropierea tubului capilar și (d) curgere violentă la partea inferioară a băii topite.

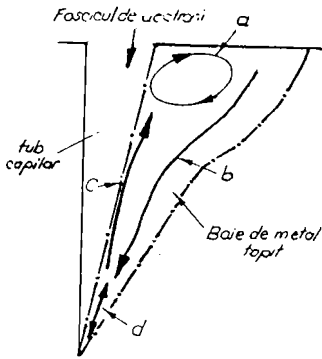


Fig. 3.8.

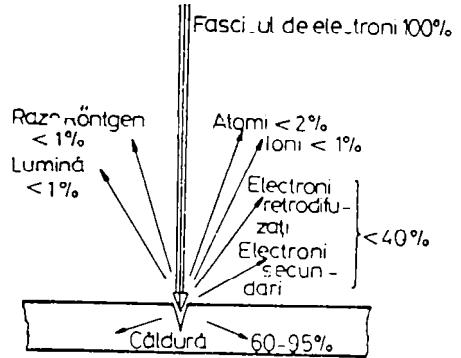


Fig. 3.9.

Energia totală a fascicului de electroni este preluată de piesă în proporție de 60 până la 95 % , figura 3.9, [10], restul reprezentând pierderi datorate electronilor retrodifuzati, electronilor secundari, radiației X, ionilor și atomilor extrași din metal și luminii emise în procesul de sudare. Aceste pierderi depind în principal de parametrii de sudare și de natura materialului sudat. Randamentul efectiv  $\eta_e$  al sudării cu fascicul de electroni se definește ca raport între energia preluată de componente și energia fascicului de electroni, iar randamentul termic  $\eta_T$  al sudării cu fascicul de electroni se definește ca raport între energia necesară încălzirii tubului capilar cu învelișul topit al acestuia și energia preluată de componente. În figura 3.10 este prezentată variația

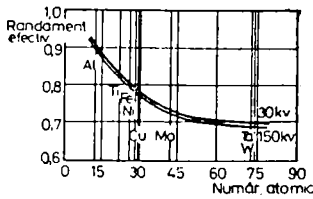


Fig. 3.10.

randamentului efectiv funcție de material  $l$  pe , ..... numărul său atomic. Valori superioare ale randamentului efectiv se obțin la sudurile cu coeficient de suplețe înalt. Randamentul termic are valori între 15 și 60 % , acesta fiind influențat de materialul piesei și parametrii de sudare. Experimental s-a observat că peste o anumită viteză critică de sudare -  $v_c$  - pierderile prin conducție devin independente de parametrii de sudare, [10]. Pentru oțel carbon viteza critică de

sudare este de circa 0,6 m/min. Peste această viteză, randamentul termic este de 34-37 % , ceea ce înseamnă că din energia preluată de componente circa o treime este necesară topirii oțelului, iar restul se transmite prin conducție în material. La sudarea cu viteze sub cea critică, randamentul termic scade datorită pierderilor mari prin conducție.

## 3.2. Surse termice pentru sudare

Sursele termice utilizate la sudare pot fi, din punct de vedere al formei lor, punctiforme, liniare, plane sau volumice. Cea mai importantă caracteristică a surselor termice pentru sudare este repartizarea spațială a energiei, care determină bilanțul energetic al procedurii de sudare, calitatea și forma îmbinării sudate, consumurile specifice și costul îmbinării. Este de asemenea importantă energia liniară  $E_l$  a sursei termice care reprezintă raportul între puterea termică  $P$  utilizată la sudare și viteza de sudare  $v_s$ .

Pentru caracterizarea diferitelor procedee de sudare se definesc fluxul termic :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [W] \quad (3.3)$$

și densitatea fluxului termic (densitatea de putere a sursei) :

$$q = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d}{dA} \left( \frac{dQ}{dt} \right) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3.4)$$

unde :  $Q$  este căldura transmisă;

$A$  - suprafața.

În cazul sudării cu fascicul de electroni densitatea de putere se mai notează cu  $w$ .

Fluxul termic la sudarea cu fascicul de electroni cu o tensiune de accelerare  $U$ , un curent fascicul  $I$  și un randament efectiv  $\eta_e$  este :

$$\Phi = P_e = \eta_e \cdot U \cdot I \quad [W] \quad (3.5)$$

iar cantitatea de energie termică degajată în intervalul  $dt$  este :

$$dQ = P_e \cdot dt \quad [J] \quad (3.6)$$

Considerând densitatea de putere maximă  $q_{max}$  în axa sursei termice și o repartiție exponențială a densității de putere, figura 3.11, se obține valoarea densității de putere în funcție de distanța  $r$  față de axa sursei, precum și funcție de factorul de concentrare a energiei  $k$  :

$$q = q_{max} \cdot \exp(-k \cdot r^2) \quad (3.7)$$

Din figura 3.11 se observă că valorile funcției  $q$  pot fi neglijate pentru  $r > r_0$  (pentru care  $q < 0,05 q_{max}$ ), astfel încât se poate aprecia  $r_0$  ca limită a sursei termice. Din relația:

$$0,05 \cdot q_{max} = q_{max} \cdot \exp(-k \cdot r_0^2) \quad (3.8)$$

se obține :

$$r_0 \approx \sqrt{\frac{3}{k}} \quad (3.9)$$

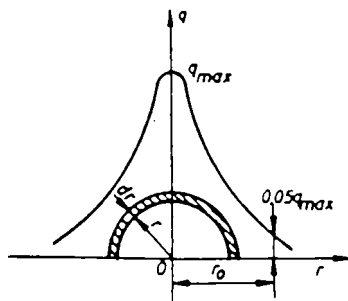


Fig. 3.11

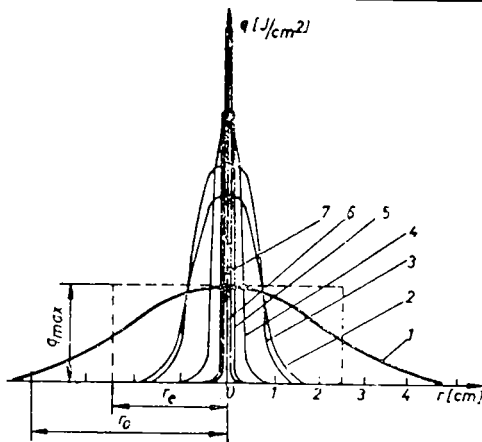


Fig. 3.12.

Din relația (3.9) se observă că limita de extindere a sursei termice  $r_0$  scade cu creșterea factorului de concentrare  $k$ , aspect confirmat de figura 3.12, [29], în care curbele trasate sunt pentru : 1 - flacără  $C_2H_2$  ; 2 - arc electric între electrozi de cărbune ; 3 - arc electric descoperit cu electrod învelit ; 4 - arc electric descoperit sub flux ; 5 - arc de plasmă ; 6 - fascicul de electroni ; 7 - fascicul laser.

### 3.3. Câmpul termic

Este cunoscută dependența câmpului termic la sudare de transferul termic prin conductivitate (legea lui Fourier), prin convecție (legea lui Newton) și prin radiație (legea lui Stefan-Boltzman). Câmpul termic dintr-un material sudat depinde de energia liniară  $E$ , a sursei termice, căldura specifică  $c$  a materialului sudat, conductivitatea termică  $\lambda$  a materialului sudat, densitatea  $\rho$  a materialului sudat, difuzivitatea termică  $a$  pentru materialului sudat, coeficientul termic de convecție  $\alpha$  și coeficientul de pierderi de căldură  $b$ . Difuzivitatea termică se calculează cu relația :

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \tag{3.10}$$

iar coeficientul pierderilor de căldură a plăcilor cu relația :

$$b_p = \frac{2\alpha}{c \cdot \rho \cdot \delta} \tag{3.11}$$

unde  $\delta$  este grosimea plăcii care pierde căldura.

Ecuția câmpului termic rezultată din legea lui Fourier are forma :

$$T = F(r; t) \cdot \exp(-b \cdot t) \tag{3.12}$$

dacă se iau în considerare pierderile de căldură prin convecție, sau forma :

$$T = F(r; t) \tag{3.13}$$

dacă nu se iau în considerare pierderile prin convecție.

Deoarece sudarea cu fascicul de electroni are loc în majoritatea cazurilor în vid, nu se iau în considerare pierderile prin convecție.

La sudarea, cu fascicul de electroni, datorită pătrunderii mari care se realizează aproape

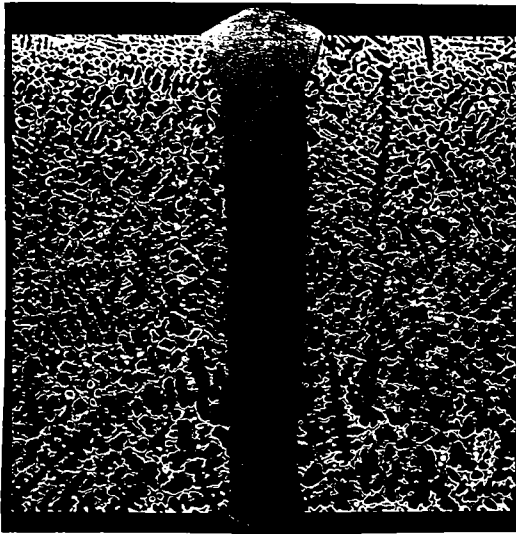


Fig. 3.13.

instantaneu pe toată grosimea materialului și a vitezelor relativ mari de sudare, se consideră o sursă termică liniară permanentă de mare putere și viteză, ipoteză confirmată de forma des întâlnită a unei suduri cu fascicul de electroni, figura 3.13. Există situații în care viteza de sudare este mică fiind comparabilă cu cea de la sudarea prin procedee convenționale prin topire, caz în care se consideră o sursă termică permanentă mobilă de mică putere, pentru care câmpul termic cvasistaționar este,[29]:

- pentru corp masiv (figura 3.14) :

$$T(r;t) = \frac{P_e}{2\pi \cdot \lambda \cdot r} \cdot \exp\left[-\frac{v_s}{2a} \cdot (x+r)\right] \tag{3.14}$$

- pentru placă (figura 3.15) :

$$T(x;y;t) = \frac{P_e}{2\pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(-\frac{v_s \cdot x}{2a}\right) \cdot K_0\left(\sqrt{\frac{v_s^2}{4a^2} + \frac{b_p}{a}}\right) \tag{3.15}$$

unde  $K_0$  este funcția Bessel de ordinul zero și grad doi.

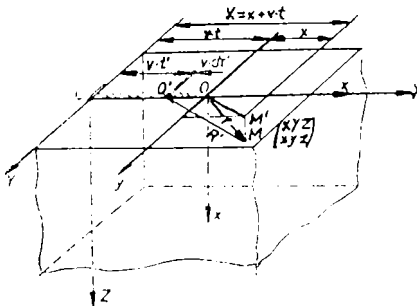


Fig. 3.14.

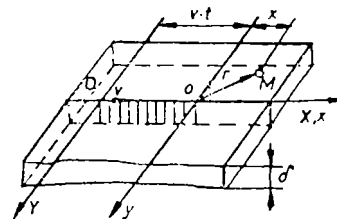


Fig. 3.15.

În cazul primei ipoteze considerate, a sursei permanente mobile de mare putere și viteză, câmpul termic cvasistaționar este [29]

- pentru corp masiv (figura 3.16) :

$$T(x; z; t) = \frac{P_e}{2\pi \cdot \lambda \cdot v_s \cdot t} \cdot \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{4a \cdot t}\right) \tag{3.16}$$

- pentru placă (figura 3.17) :

$$T(y; t) = \frac{P_e}{\delta \cdot c \cdot \rho \cdot v_s \sqrt{4\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{4a \cdot t}\right) \tag{3.17}$$

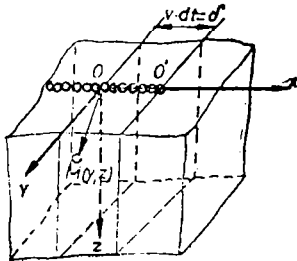


Fig. 3.16.

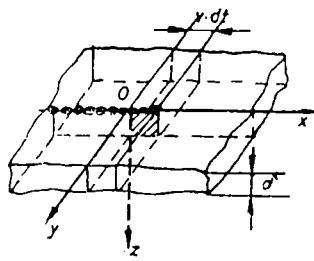


Fig. 3.17.

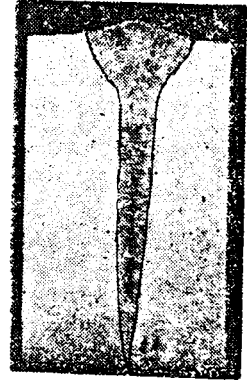


Fig. 3.18.

În cazul vitezelor de sudare mai mici decât viteza critică de sudare (la oțel carbon de circa 0,6 m/min) sudura nu mai are laturi paralele ci are forma din figura 3.18, [10], care prezintă aspectul unei suduri în oțel inoxidabil, cu o viteză de sudare de 0,1 m/min. Ipoteza sursei termice liniare este înlocuită în acest caz cu un model echivalent, [10], care consideră câmpul termic rezultat prin superpoziția acțiunilor a două surse termice distincte, o sursă liniară și o sursă punctiformă cu acțiunea pe suprafața piesei. Câmpul termic este dat de relația :

$$T(x; y; z; t) = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \left[ \frac{q_1}{r_1} \cdot \exp\left(-\frac{v_s \cdot r_1}{2a}\right) + \frac{q_2}{\delta} \cdot K_0\left(r_2 \cdot \frac{v_s}{2a}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{v_s \cdot y}{2a}\right) \tag{3.18}$$

unde primul termen reprezintă contribuția sursei punctiforme, iar al doilea termen contribuția sursei liniare la câmpul termic total. În relația (3.18)  $q_1$  și  $q_2$  reprezintă puterile termice ale sursei punctiforme, respectiv liniare și se determină cu relațiile :

$$q_1 = \frac{A_1}{A} \cdot q \quad ; \quad q_2 = \frac{A_2}{A} \cdot q \tag{3.19}$$

unde  $A_1$  și  $A_2$  sunt ariile secțiunilor cusăturii corespunzătoare acțiunii fiecărei surse cu proprietatea evidentă  $A_1 + A_2 = A$ ,  $A$  fiind aria totală a secțiunii cusăturii.

În practică prezintă interes determinarea densității de putere critice pentru a atinge o anumită temperatură într-o anumită perioadă de timp în material. De obicei se determină densitățile de putere critice necesare atingerii temperaturii de topire  $T_m$  și temperaturii de vaporizare  $T_v$ .



Densitatea critică de putere pentru atingerea temperaturii de topire este, [39] :

- la interacțiunea în impulsuri cu durata de timp  $\tau$  :

$$q_c^{(1)} = \frac{0,885 T_m \cdot \lambda}{\sqrt{a \cdot \tau}} \quad (3.20)$$

- la interacțiunea continuă :

$$q_{cs}^{(1)} = 1,128 \lambda \cdot T_m \sqrt{k} \quad (3.21)$$

Valori ale densităților critice de putere pentru câteva metale sunt date în tabelul 3.1, [39].

Tabelul 3.1, [39]

Metalul	$\lambda$ , [W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$a$ , [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$T_m$ , [K]	$\tau$ , [s]	$q_c^{(1)}$ , [W cm <sup>-2</sup> ]	$k$ , [cm <sup>2</sup> ]	$q_{cs}^{(1)}$ , [W cm <sup>-2</sup> ]
Cu	3.89	1.12	1356	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup>	1.1·10 <sup>4</sup> 3.5·10 <sup>7</sup>	10 <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	4.2·10 <sup>4</sup> 1.3·10 <sup>5</sup> 4.2·10 <sup>5</sup>
Oțel	0.51	0.15	1808	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup>	3.5·10 <sup>3</sup> 1.8·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	7.8·10 <sup>3</sup> 2.5·10 <sup>4</sup> 7.8·10 <sup>4</sup>
Ni	0.67	0.18	1726	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup>	6.5·10 <sup>3</sup> 2.0·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	9.7·10 <sup>3</sup> 3.1·10 <sup>4</sup> 9.7·10 <sup>4</sup>
Ti	0.15	0.06	2073	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup>	3.0·10 <sup>3</sup> 1.0·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	2.7·10 <sup>3</sup> 8.5·10 <sup>3</sup> 2.7·10 <sup>4</sup>
Al	2.09	0.87	933	10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup>	4.2·10 <sup>3</sup> 1.3·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	4.2·10 <sup>4</sup> 1.3·10 <sup>5</sup> 4.2·10 <sup>5</sup>

Considerând modelul unidimensional al unui solid semi-infinit, se poate determina timpul necesar atingerii temperaturii de topire cu relația, [39] :

$$t_m = \frac{0,79 (\lambda \cdot T_m)^2}{q_0^2 \cdot a} \quad (3.22)$$

De exemplu pentru cupru  $t_m = 10^{-5}$  s la  $q_0 = 10^6$  W/cm<sup>2</sup> și  $t_m = 10^{-7}$  s la  $q_0 = 10^7$  W/cm<sup>2</sup>.

În mod similar se determină densitatea critică de putere pentru atingerea temperaturii de vaporizare care este, [39] :

- la interacțiunea în impulsuri cu durata de timp  $\tau$  :

$$q_c^{(2)} = \frac{0,885 T_v \cdot \lambda}{\sqrt{a \cdot \tau}} \quad (3.23)$$

- la interacțiunea continuă :

$$q_{cs}^{(2)} = 1,128 \lambda \cdot T_v \sqrt{k} \quad (3.24)$$

Pentru cupru, care are temperatura de vaporizare  $T_v = 2573$  K, densitatea critică de putere necesară vaporizării este  $q_{cs}^{(2)} = 2,1 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup>.

### 3.4. Mecanismul topirii și vaporizării materialului

Interacțiunea fascicului cu piesa induce în materialul acesteia o serie de procese termice complexe a căror principale efecte sunt :

- 1) transformări de fază în solide, în cazul utilizării fascicului de electroni pentru tratamente termice;
- 2) topirea materialului la sudare, polizare, aliere sau trasare a metalelor și nemetalelor;
- 3) vaporizare la găurire, tăiere, gravare, fisurare și echilibrare a metalelor și nemetalelor;

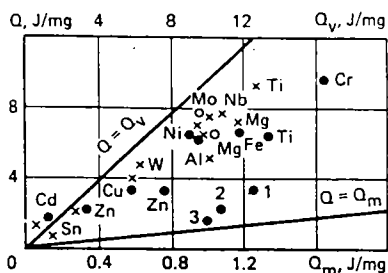


Fig. 3.19.

Prelucrabilitatea unui material cu fascicul de electroni depinde în principal de proprietățile lui termice, de densitatea de putere a fascicului pe piesă și de parametri tehnologici ai procesului de lucru.

Măsurătorile experimentale ale energiei specifice  $Q$  pe unitatea de masă  $m$  a materialului supus interacțiunii fascicului electronic de energie  $E$ ,  $Q=E/m$ , arată că energia specifică  $Q$  necesară prelucrării, pentru majoritatea metalelor, este mai mare decât energia specifică de topire  $Q_m$  și mai mică decât energia

specifică de vaporizare  $Q_v$ , conform celor din figura 3.19.

Pentru a trece la evaporare este necesară o energie absorbită mai mare cu circa 10-20 % față de cea necesară topirii. Factorii care favorizează fierberea băii topite sunt : gazul dizolvat în metal, care formează bule de gaz a căror volum total poate depăși de zeci și sute de ori volumul metalului topit ; contactul nonideal între fazele solidă, lichidă și gazoasă ; fluctuațiile temperaturii locale datorate variației în timp a formei fascicului de electroni care provoacă în zona de interacțiune unde de compresie și rarefiere cu efect asemănător vibrațiilor ultrasonice.

Fierberea datorită supraîncălzirii băii este un proces fizic foarte complex. Se pare că acest fenomen se datorează în principal contrapresiunii de vapori, care provoacă unde ce se propagă cu

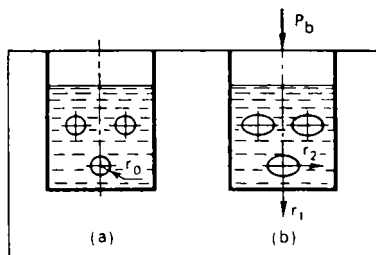


Fig. 3.20.

viteză apropiată de cea a sunetului, producând o încălzire excesiv de rapidă într-un volum local relativ mic. Contrapresiunea de vapori induce în baia topită vibrații mecanice care perturbă echilibrul bulelor de gaz din baie, [40]. Undele de compresie deformează bula de gaz de la o formă sferică la un elipsoid, figura 3.20, iar în momentul scăderii presiunii se produce tendința de expansiune a bulei de gaz, favorizând fierberea băii.

Pentru aluminiu acest proces de vaporizare este evident

de la densități de putere  $q = 10^5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ , [40].

### 3.5. Alegerea poziției planului focal al fasciculului față de suprafața piesei

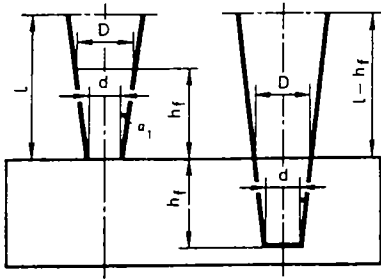


Fig. 3.21.

Experimental s-a demonstrat că, în aceleași condiții, focalizarea unui fascicul de electroni sub suprafața piesei duce la creșterea pătrunderii acestuia cu până la 30%. Dacă planul focal al fasciculului este chiar în planul piesei, electronii vor diverge mai puternic după pătrunderea în piesă, iar densitatea de putere la partea de jos a tubului capilar este insuficientă pentru o pătrundere adâncă.

Considerând un fascicul care are, figura 3.21, un unghi de convergență  $\alpha_1$ , planul focal la distanța  $h_f$  sub suprafața piesei, diametrul  $D$  în planul piesei și diametrul  $d$  în planul focal, există relația :

$$\frac{D-d}{2} = h_f \cdot \text{ctg} \alpha_1 \quad (3.25)$$

Deoarece  $D > d$ , densitatea de putere în planul piesei,  $q_s$ , este mai mică decât densitatea de putere  $q$  în planul focal. Pentru ca pătrunderea adâncă să fie posibilă când planul focal este sub planul piesei, trebuie îndeplinită condiția  $q_s \geq q_c$ , unde  $q_c$  este densitatea de putere critică necesară sudării. La limită există relațiile :

$$D = 2 \sqrt{\frac{P_e}{\pi \cdot q_c}} \quad ; \quad d = 2 \sqrt{\frac{P_e}{\pi \cdot q}} \quad (3.26)$$

unde  $P_e$  este puterea efectivă transmisă piesei și care înlocuite în relația (3.25) duc la condiția :

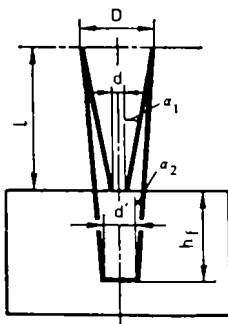


Fig. 3.22.

$$h_f \leq \frac{d}{2} \left( \sqrt{\frac{q}{q_c}} - 1 \right) \text{ctg} \alpha_1 \quad (3.27)$$

Pe baza relației (3.27) s-au calculat valori pentru  $h_f$  în următoarele condiții, [39]: sudarea oțelului inoxidabil cu  $U = 60 \text{ kV}$ ,  $I = 60 \text{ mA}$ ,  $P_e = 3,24 \text{ kW}$ ,  $q = 2,7 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  și  $q_s = 2,7 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ . Valorile obținute prin calcul :  $h_f = 3,9 \text{ cm}$  la  $\alpha_1 = 2^\circ$ ,  $h_f = 2,8 \text{ cm}$  la  $\alpha_1 = 3^\circ$  și  $h_f = 1,5 \text{ cm}$  la  $\alpha_1 = 5^\circ$  sunt foarte apropiate de valorile experimentale.

În practică, prin lentila magnetică a tunului electronic unghiul

$\alpha_1$  poate fi modificat la o valoare convenabilă  $\alpha_2$ , pentru care se obține un  $h_f$  dorit.

Cu notațiile din figura 3.22 și ținând cont de diametrul maxim  $d'$  de defocalizare a fascicului se obțin relațiile :

$$\frac{D-d}{2} = l \cdot \text{tg } \alpha_1 \quad ; \quad \frac{D-d'}{2} = (l+h_f) \cdot \text{tg } \alpha_2 \quad (3.28)$$

care duc la condiția :

$$h_f \leq l \cdot \left( \frac{\text{tg } \alpha_1}{\text{tg } \alpha_2} - 1 \right) + \frac{d}{2} \left( \sqrt{\frac{q}{q_c}} - 1 \right) \text{ctg } \alpha_2 \quad (3.29)$$

### 3.6. Efectul distanței de lucru a tunului electronic asupra configurației sudurii

Procesele ce au loc la interacțiunea fascicului de electroni cu piesa sunt deosebit de complexe, astfel că studiile teoretice privind aceste procese trebuiesc confirmate și adaptate pe baza rezultatelor experimentale. Modelarea pe calculator a fenomenelor turbulente din tubul capilar necesită o putere de calcul foarte mare și timp îndelungat. Pentru determinarea influenței parametrilor de sudare tendința este de a folosi modele teoretice simple combinate cu rezultatele studiilor experimentale, care conduc la obținerea rapidă a condițiilor de sudare pentru un caz dat.

Pentru a determina influența poziției planului focal al fascicului față de piesă asupra configurației sudurii s-au făcut experimentări cu distanțe de lucru  $l$  variabile între tunul electronic și suprafața piesei, [41]. S-au efectuat suduri pe o piesă înclinată față de orizontală și pe piese orizontale situate la diferite distanțe de lucru, cu un tun cu distanța de lucru  $l = 90$  mm, căreia îi corespunde un curent de focalizare  $I_f = 88$  mA pentru lentila magnetică. Pentru a avea o adâncime de pătrundere maximă la diverse valori ale distanței de lucru  $l$ , poziția planului focal al fascicului

trebuie modificat în funcție de până piese, ec și curentul de focalizare trebuie modificat cu  $dI_f = I_f - I_0$ , unde  $I_0$  este curentul de focalizare corespunzător penetrării maxime. Pentru tunul considerat și păstrând restul parametrilor constanți, dependența între curentul  $I_0$  și distanța de lucru  $l$  este liniară, figura 3.23. Pentru alte valori ale lui  $I_f$  graficul lui  $dI_f$  se deplasează pe verticală corespunzător creșterii sau descreșterii lui  $I_f$ . Nomograma din figura 3.23 este, în esență, caracteristica de focalizare pentru un tun electronic dat, permițând estimarea curentului de focalizare necesar pentru o distanță de lucru oarecare.

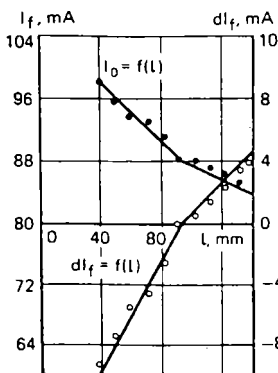


Fig. 3.23,

Au fost realizate suduri cu patru variante de parametrii de

Tabelul 3.2, [41]

Varianta	U, [kV]	I, [mA]	v, [cm/s]	P, [W]	Q, [J/cm]
A	60	60	0.55	3600	6540
B	60	40	0.55	2400	4360
C	60	60	1.10	3600	3275
D	60	40	1.10	2400	2180

lucru prezentați în tabelul 3.2, variante notate A, B, C, D și prezentate în figura 3.24. În această figură la numărător apare curentul de focalizare, iar la numitor distanța în milimetri a planului focal față de suprafața piesei (cu semnul + pentru planul focal deasupra suprafeței piesei, respectiv - pentru planul focal sub

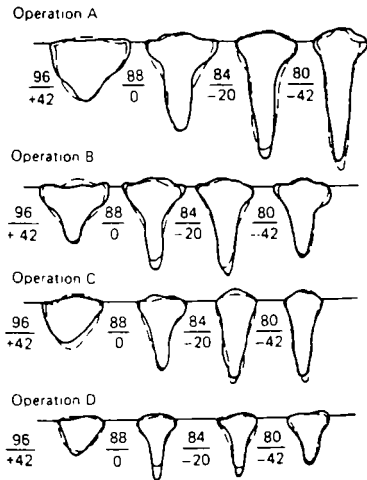


Fig. 3.24.

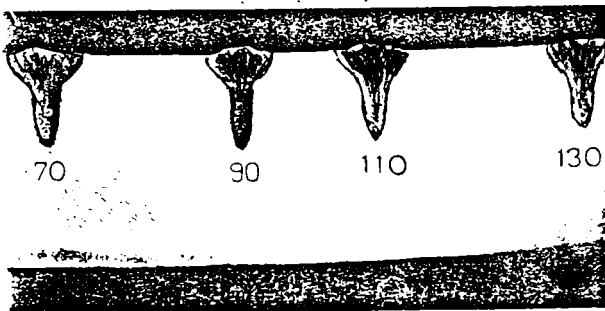


Fig. 3.25.

suprafață). Se observă că la varianta A adâncimea de pătrundere crește cu cât planul focal este mai mult sub suprafața piesei, spre deosebire de varianta D unde adâncimea de pătrundere este aproximativ aceeași pentru  $h_f$  egal cu 0 și -20 mm. Aceasta se explică prin faptul că la varianta A energia liniară este mai mare.

Figura 3.25, [41], prezintă secțiunile unor suduri efectuate cu distanțe de lucru de 70, 90, 110 și 130 mm, cu aceeași valoare a energiei liniare,  $dI_f = 0$ , adică  $I_f = I_0 = 92, 88, 86$  și  $84$  mA, cu  $U = 60$  kV,  $I = 60$  mA și  $v = 0,55$  cm/s. Secțiunile sunt aproximativ identice

ceea ce conduce la concluzia că pentru  $I_f$  constant secțiunea sudurii își păstrează configurația indiferent de variația distanței de lucru între anumite valori, pentru un tun electronic dat.

Valoarea teoretică a distanței maxime  $h_f$  a planului focal, determinată cu relația (3.27), a fost confirmată de rezultatele experimentale, [41], pentru cele

patru variante, cu abateri sub 10%. Astfel pentru  $U = 60$  kV,  $I = 60$  mA,  $q = 2,7 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup> și  $q_s = 2,7 \cdot 10^4$  W/cm<sup>2</sup>, valoarea calculată este 39 mm iar cea experimentală 42 mm.

### 3.7. Randamentul termic al sudării

$$V = \frac{\pi \cdot h}{k} \tag{3.30}$$

unde k este factorul de concentrare pentru distribuția densității de putere iar h este adâncimea maximă de pătrundere a fascicului.

Volumul de metal topit într-o secundă este :

$$v_s A_m = \frac{\eta_e \eta_T IU}{\rho (c T_m + L_m)} \tag{3.31}$$

unde :  $v_s$  este viteza de sudare,  $A_m$  - aria secțiunii de metal topit,  $\eta_e$  - randamentul efectiv,  $\eta_T$  - randamentul termic,  $\rho$  - densitatea metalului, c - căldura specifică a metalului,  $T_m$  - temperatura de topire și  $L_m$  - căldura latentă de topire.

Considerând relațiile :

$$\frac{V}{t} = v_s A_m ; Q = \frac{\eta_e IU}{v_s} ; t \approx \frac{d}{v_s} ; k = \frac{4}{b^2} \tag{3.32}$$

și relația (3.31), se obține :

$$\eta_T Q d = \frac{\pi b^2}{4} h [\rho (c T_m + L_m)] \tag{3.33}$$

unde Q este energia specifică liniară, d - diametrul fascicului în planul focal și b - lățimea cusăturii la o adâncime egală cu 0,368 h. Din relația (3.33) se poate afla ce energie specifică liniară este necesară pentru realizarea unei suduri pentru d, b și h dați. Valorile experimentale ale lui  $A_m$ , b, h și  $\eta_T$  precum și valoarea lui d calculată din relația (3.33) sunt date în tabelul 3.3, considerând variantele A, B, C, D menționate la paragraful 3.6.

Valorile experimentale ale randamentului termic se determină cu relația :

$$\eta_T = \frac{\rho v_s A_m C_m}{P_e} \tag{3.34}$$

unde  $C_m$  este căldura specifică volumică de topire a metalului, iar  $P_e = \eta_e I U$  este puterea efectivă a fascicului de electroni.

Așa cum se poate vedea în tabelul 3.3 valorile randamentului termic variază de la 0,382 (varianta A) până la 0,514 (varianta C), valoarea medie pentru cele patru

Tabelul 3.3, [41]

$I_r$ [mA]	Varianta	$A_m$ [cm <sup>2</sup> ]	h [mm]	b [mm]	$\eta_T$	d [mm]
76	A	0.35	11.2	2.8	0.423	1.8
	B	0.24	7.8	3.1	0.436	2.4
	C	0.21	7.0	3.1	0.510	2.9
	D	0.12	4.4	3.8	0.436	4.0
80	A	0.29	14.0	2.3	0.350	1.5
	B	0.22	7.8	2.3	0.400	1.4
	C	0.22	9.2	2.4	0.535	2.2
	D	0.14	5.7	2.7	0.510	3.0
84	A	0.34	11.0	2.7	0.413	1.7
	B	0.22	8.0	2.2	0.400	1.2
	C	0.20	9.3	1.8	0.486	1.3
	D	0.13	5.8	2.1	0.474	1.6
88	A	0.31	9.5	2.5	0.376	1.3
	B	0.24	7.6	2.6	0.436	1.6
	C	0.23	7.2	2.1	0.560	1.4
	D	0.14	5.8	2.3	0.510	2.0
92	A	0.30	7.5	4.1	0.364	2.7
	B	0.25	6.9	3.8	0.464	3.1
	C	0.21	5.9	4.0	0.510	4.0
	D	0.14	4.9	3.2	0.510	3.0
96	A	0.32	5.5	6.7	0.388	5.2
	B	0.24	5.0	5.1	0.436	4.1
	C	0.20	4.0	5.8	0.486	5.7
	D	0.14	3.5	4.5	0.510	5.0
100	A	0.30	4.5	7.5	0.364	5.3
	B	0.23	5.5	5.1	0.417	4.4
	C	0.21	3.3	6.2	0.510	5.3
	D	0.12	2.4	4.9	0.436	4.0

operații fiind 0,452 , care este foarte apropiată de valoare teoretică de 0,484 corespunzătoare unei surse termice liniare ce se mișcă pe o placă infinită. S-a determinat valoarea densității de putere  $q$  pentru toate cele patru variante, acestea fiind  $2,7 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  pentru varianta A ,  $2,1 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  pentru varianta B ,  $2,7 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  pentru varianta C și  $1,2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  pentru varianta D.

### 3.8. Determinarea adâncimii de pătrundere și a lățimii sudurii

Adâncimea de pătrundere  $h$  și lățimea sudurii  $b$ , figura 3.26, nu se pot determina independent una de alta din relația (3.33).

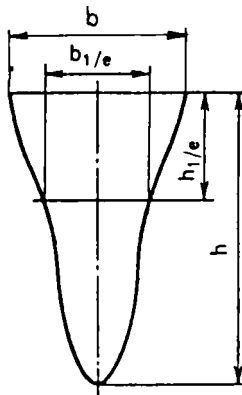
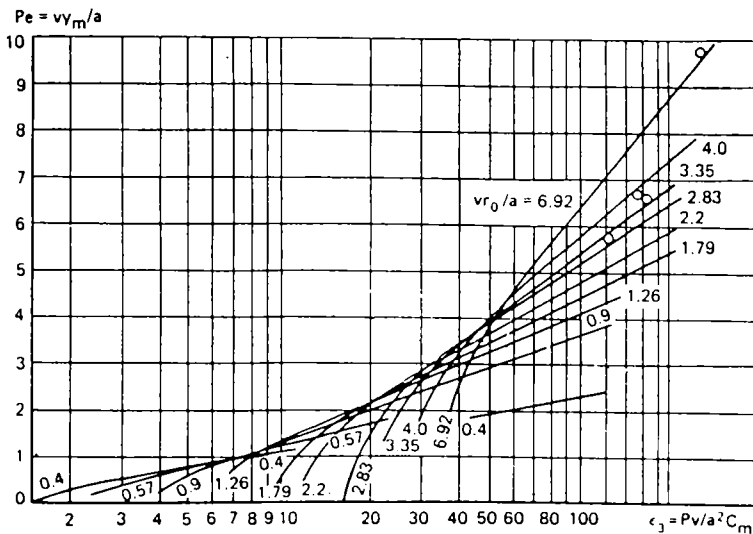


Fig. 3.26.

Lățimea sudurii  $b$  poate fi determinată luând în considerare legătura dintre următorii parametri adimensionali, figura 3.27, [39]: (1) numărul lui Peclet  $Pe = v_s y_m / a$ , (2) criteriul  $v_s r_0 / a$  care definește gradul de concentrare a fluxului de căldură și criteriul  $\epsilon = Pv_s / a^2 C_m$  în care  $v_s$  este viteza de sudare,  $y_m = b/2$ ,  $a$  este difuzivitatea termică,  $r_0 = d/2$  este raza fasciculului în planul focal, iar  $C_m = c \rho T_m$  este căldura specifică volumică. Pentru variantele A,B,C și D menționate anterior în tabelul 3.4 se dau valorile teoretice și experimentale determinate.

Lățimea sudurii se determină din figura 3.27 cu relația:

$$b = \frac{Pe}{\frac{v_s}{a}} \quad (3.35)$$



iar apoi din relația (3.33) se determină adâncimea de pătrundere.

Tabelul 3.4, [39]

Varianta	$e=(Pv_s)/(a^2 C_m)$	$(v_s r_0)/a$	$k=[(v_s/a)/(v_s r_0/a)]$	Pe	b, [mm]	
					$b=(2Pe)/(v_s/a)$	b (experimental)
A	99	4.00	9.8	5.80	9.2	-
		3.35	14.0	5.30	8.5	7.9
		2.83	19.5	5.10	8.2	7.8
		2.20	32.3	4.80	7.7	7.6
		1.79	48.8	4.40	7.0	7.3
		1.26	100.0	4.00	6.4	6.0
		0.90	193.0	3.50	5.6	4.7
		0.40	975.0	2.30	3.7	-
B	66	4.00	9.8	4.60	7.3	-
		3.35	14.0	4.40	7.0	-
		2.83	19.5	4.20	6.8	7.0
		2.20	32.3	4.00	6.4	6.5
		1.79	48.8	3.75	6.0	6.3
		1.26	98.2	3.50	5.6	5.5
C	198	6.92	13.0	8.70	6.9	-
		4.00	39.1	7.25	5.8	5.5
		3.35	55.7	6.75	5.4	4.7
		2.83	78.2	6.40	5.1	4.3
		2.20	129.0	5.80	4.6	4.2
		1.79	195.0	5.40	5.3	4.1
D	135	6.92	13.0	7.40	5.9	-
		4.00	39.1	6.30	5.0	5.5
		3.35	55.7	5.90	4.7	4.9
		2.83	78.2	5.70	4.6	4.5
		2.2	129.0	5.20	4.2	4.3



---

## **CAPITOLUL 4**

---

# **MODELUL FIZICO-MATEMATIC AL TUNULUI ELECTRONIC**

## 4. MODELUL FIZICO-MATEMATIC AL TUNULUI ELECTRONIC

### 4.1. Zona electrostatică

În zona electrostatică potențialul electric  $V$  se determină din ecuația lui Poisson :

$$\nabla^2 V = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

unde  $\nabla$  este operatorul Laplace ;

$\rho$  - densitatea de sarcină spațială ;

$\epsilon_0$  - permitivitatea vidului.

Dacă se consideră simetria axială a tunului și se lucrează în coordonatele cilindrice  $r, z, \theta$ , unde  $z$  este axa tunului, iar  $r$  este perpendiculară pe  $z$ , ecuația (4.1) devine :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

Soluția acestei ecuații va fi o funcție de  $V(r,z)$  care trebuie să satisfacă ecuația (4.2) și condițiile la limită pe frontieră.

Densitatea de sarcină spațială nu este constantă pe domeniul de integrare, ci este o funcție  $\rho(V,r,z)$ , pentru a cărei determinare trebuie făcute aproximații succesive.

Se pornește de la relația :

$$\rho(V,r,z) = \frac{j(V,r,z)}{v(V,r,z)} \quad (4.3)$$

unde  $j(V,r,z)$  este densitatea de curent a unui tub de curent în secțiunea considerată;

$v(V,r,z)$  - viteza electronilor în secțiunea considerată.

Densitatea de curent  $j(V,r,z)$  pentru tubul de curent considerat este influențată de regimul de emisie al catodului, care în cazul tunurilor electronice studiate poate fi :

a) Regim de sarcină spațială, când densitatea curentului de emisie al catodului  $j_{sp}$  este dată de legea CHILD-LANGMUIR :

$$j_{sp} = \frac{4}{9} \cdot \epsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m}} \cdot \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} = 2,334 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} [A/m^2] \quad (4.4)$$

- unde  $\epsilon_0 = 8,85415 \cdot 10^{-12}$  F/m este permitivitatea vidului;  
 $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$  C - sarcina electronului;  
 $m = 9,1091 \cdot 10^{-31}$  kg - masa de repaus a electronului;  
 $U$  - tensiunea de accelerare, în volți;  
 $d$  - distanța între anod și catod, în metri.

b) Regim de saturație termică, când densitatea curentului de emisie al catodului  $j_{\text{sat}}$  este dată de formula RICHARDSON-DUSHMAN :

$$j_{\text{sat}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot e \cdot m \cdot k^2}{h^3} \cdot (1-r) \cdot T^2 \cdot \exp\left(\frac{-\phi}{k \cdot T}\right) \quad (4.5)$$

$$= 1,202 \cdot 10^6 \cdot (1-r) \cdot T^2 \cdot \exp\left(-11604,879 \cdot \frac{\phi}{T}\right) \quad [A/m^2]$$

- unde  $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$  J/K este constanta lui Boltzmann;  
 $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  J·s - constanta lui Planck;  
 $T$  - temperatura absolută a catodului, în grade Kelvin;  
 $\phi$  - lucrul mecanic de extracție, în electronvolți;  
 $r$  - coeficientul mediu de reflexie internă a electronilor din metal, la bariera de potențial metal-vid.

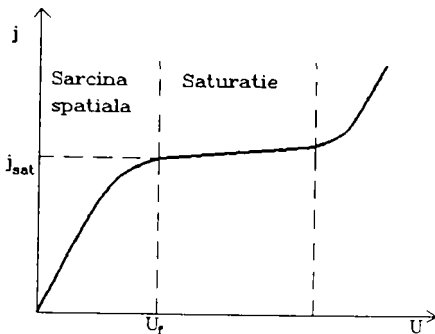


Fig. 4.1.

Variația densității curentului de emisie al catodului în funcție de tensiunea de accelerare  $U$  este prezentată în figura 4.1. Pentru tensiuni de accelerare mai mici decât  $U_f$ , în fața catodului se formează un nor de electroni ce creează o barieră suplimentară de potențial, astfel încât numai o parte din electroni se pot depărta de catod. La tensiuni suficient de mari, peste  $U_f$ , norul de electroni dispăre, toți electronii emiși de catod fiind accelerați în câmpul electric spre anod.

Pentru aprecierea tensiunii de frontieră între cele două regimuri de emisie a catodului, din relațiile (4.4) și (4.5), prin egalare, se obține:

$$U_f = 6,424 \cdot 10^7 \cdot \left[ (1-r) \cdot d^2 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-11604,879 \cdot \frac{\phi}{T}\right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad [V] \quad (4.6)$$

Pentru un catod din tantal pur cu  $\phi = 4,13$  eV,  $r = 0,5$ ,  $T = 2273$  K, montat într-un tun cu  $d = 0,01$  m, se obține  $U_f \approx 2046$  V.

Densitatea de curent  $j(V,r,z)$  pentru tubul de curent considerat este influențată de regimul de emisie al catodului și este variabilă în lungul axei  $z$ .

Viteza  $v(V,r,z)$  în secțiunea considerată este de asemenea variabilă, iar pentru aprecierea ei este necesară determinarea unui număr de traiectorii.

Este de remarcat că densitatea de sarcină spațială  $\rho(V,r,z)$  va avea valori mai mari în apropierea catodului, unde vitezele electronilor sunt mai mici.

Pentru determinarea traiectoriilor electronilor în zona electrostatică se pornește de la relațiile:

$$\begin{aligned} \frac{d^2r}{dt^2} &= - \frac{e}{m} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= - \frac{e}{m} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\frac{m}{2} \cdot \left[ \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right] = - e \cdot V$$

din care, prin eliminarea timpului, se obține ecuația traiectoriilor electronilor :

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{1 + \left( \frac{dr}{dz} \right)^2}{2 \cdot V} \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{dr}{dz} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right) \tag{4.8}$$

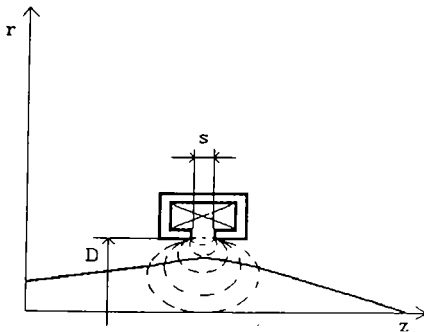


Fig. 4.2.

## 4.2. Zona electromagnetică

Focalizarea fascicului electronic se face cu o bobină cu blindaj metalic cu diametrul  $D$  și întrefierul  $s$ , numită lentilă magnetică, figura 4.2.

Până la pătrunderea electronului în zona câmpului magnetic, între catod și lentila magnetică, electronul se mișcă în planul  $(r,z)$ . În lentilă, asupra electronului acționează o forță electromagnetică a cărei componentă  $F_0$ , normală pe planul  $(r,z)$  și tangentă la un cerc cu centrul pe axa  $z$ , este diferită de zero. Ca urmare a acestui fapt, electronii se vor mișca pe o elice după ce trec prin lentila magnetică.

Ecuația traiectoriei electronilor în planul  $(r,z)$  este :

$$\frac{d^2r}{dz^2} = A \cdot e \cdot \left[ 1 + \left( \frac{dr}{dz} \right)^2 \right] \cdot \frac{\frac{dr}{dz} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\partial A}{\partial r}}{2 \cdot m \cdot V - e \cdot A^2} \tag{4.9}$$

unde  $A$  este vectorul potențial magnetic.

În cazul tunurilor electronice pentru sudare nu se pune problema unei aprofundări deosebite

a determinării câmpului în zona electromagnetică, fiind suficientă determinarea distanței focale a bobinei în funcție de curentul de alimentare a bobinei, pentru  $D$  și  $s$  aleși, astfel ca aberația sferică a lentilei magnetice să fie cât mai mică.

### 4.3. Abateri de la modelul teoretic

Aceste abateri sunt determinate de :

- a) Neuniformitatea emisie electronice pe suprafața emitivă a catodului.
- b) Distribuția maxwelliană a vitezelor termice ale electronilor emiși de catod.
- c) Direcțiile de unghiuri diferite ale vitezei electronilor față de suprafața catodului.
- d) Aberațiile lentilei magnetice.

### 4.4. Etape în modelarea zonei electrostatice a tunurilor electronice pentru sudare

Din experiența acumulată și din bibliografia consultată, o posibilă succesiune a etapelor de lucru este:

- 1) Predimensionarea și aprecierea formei geometrice a catodului, electrodului Wehnelt și anodului, pe baza relațiilor cunoscute din literatura de specialitate pentru tunurile electronice.
- 2) Schema zonei electrostatice a tunului este discretizată printr-o rețea adecvată, precizându-se frontierele și valorile potențialului pe acestea.
- 3) Se neglijează sarcina spațială și se rezolvă ecuația lui Laplace, determinându-se o primă valoare a potențialului în nodurile rețelei.
- 4) Se determină un număr finit de traiectorii ale electronilor de la catod până la o anumită distanță după cross-over-ul estimat.
- 5) Pe baza traiectoriilor determinate se calculează densitatea de sarcină spațială în nodurile rețelei.
- 6) Se rezolvă ecuația lui Poisson, ținând cont de sarcina spațială determinată la etapa precedentă.
- 7) Se determină noile traiectorii.
- 8) Se recalculează densitatea de sarcină spațială.
- 9) Se reia calculul de la etapa 6, dar ținând cont de densitatea de sarcină spațială de la etapa 8.
- 10) Se oprește calculul repetat al etapelor 6, 7, 8 și 9, când precizia este cea dorită.

11) Se determină parametrii geometrici și electrici finali ai fasciculului.

În funcție de destinația tunului electronic sau de anumite pretenții impuse proiectantului, pot apărea modificări în aceasta succesiune propusă. Modificările pot consta în eliminarea sau în introducerea unor etape, în dezvoltarea mai aprofundată a unor aspecte particulare de proiectare.

## 4.5. Metode numerice folosite în modelarea tunurilor electronice

În prezent se folosesc pentru rezolvarea ecuației lui Poisson (4.1) următoarele metode:

- a) Metoda diferențelor finite (FDM).
- b) Metoda elementului finit (FEM).
- c) Metoda ecuației integrale (IEM), care mai este numită și metoda elementului de frontieră (BEM).
- d) Metode hibride.

Dintre aceste metode, cele mai utilizate în cazul modelării tunurilor electronice pentru sudare, sunt FDM și metodele hibride, care combină FDM cu IEM sau FEM cu IEM.

Principalul dezavantaj al FDM este faptul că prin rețeaua de discretizare nu poate fi descrisă corect frontiera, ceea ce introduce anumite erori dacă pasul rețelei este prea mare. Metodele hibride au o acuratețe mai bună decât FDM, dar rețelele folosite în cazul lor fac dificilă trasarea traiectoriilor, iar timpul de calcul este mult mai mare.

Pentru trasarea traiectoriilor electronilor ecuația diferențială (4.8) se rezolvă prin metoda Runge-Kutta de ordinul patru, care oferă o precizie bună și un timp de calcul convenabil.

## 4.6 Programe de calcul utilizate pentru modelarea tunurilor electronice

La ITIM Cluj-Napoca s-au realizat, în perioada anilor 1980-1990, o serie de programe de modelare a tunurilor electronice. Aceste programe au o serie de dezavantaje pentru care nu au putut fi aplicate la proiectarea tunurilor electronice. Dintre aceste dezavantaje se menționează:

- 1) Numărul mic de noduri pentru rețeaua de discretizare, de ordinul sutelor, ceea ce introduce erori majore de calcul, deoarece nu pot fi descrise suficient de precis frontierele.
- 2) Timpul de lucru al calculatorului este foarte lung și prezintă nesiguranță în atingerea convergenței soluțiilor.
- 3) Posibilitățile grafice foarte modeste asigurate de programele realizate.

4) Programele acceptă numai anumite configurații ale zonei electrostatice, ceea ce face ca orice modelare în afara acestora să însemne modificari importante.

5) Conversația proiectantului de tunuri electronice cu programele este extrem de dificilă, necesitând permanent prezența realizatorilor programelor.

După 1990 am trecut la utilizarea și adaptarea unor programe care folosesc FDM, FEM sau IEM și care sunt realizate de firme străine cu experiență. Au fost testate produse ale firmelor americane ALGOR și COSMOS, iar în final s-a optat pentru programul SIMION realizat de Idaho National Engineering Laboratory din S.U.A., care prezintă suficiente avantaje pentru a fi folosit la proiectarea zonei electrostatice a tunurilor electronice pentru sudare.

SIMION este un program pentru analiza și proiectarea sistemelor electrostatice, elaborat la Universitatea Latrobe, Australia, în 1977, a cărui versiune pentru computere compatibile IBM PC sau PS2 a fost realizată la Idaho National Engineering Laboratory, S.U.A., în 1985-1989. SIMION beneficiază de o serie de îmbunătățiri substanțiale pentru mărirea vitezei de lucru și a preciziei de calcul precum și de o grafică interactivă extrem de puternică. În SIMION un sistem electrostatic este definit de o rețea de noduri ce aparțin electrozilor sau nonelectrozilor, pentru care se determină potențialul din ecuația lui Laplace prin metoda diferențelor finite. Programul permite determinarea și trasarea liniilor echipotențiale și a traiectoriilor ionilor.

Avantajele mai importante ale programului SIMION sunt :

- 1) Posibilitatea discretizării până la o rețea cu 16000 de noduri în dublă precizie.
- 2) Viteza de calcul foarte mare în comparație cu alte programe încercate, fiind depășit doar de programele firmelor ALGOR și COSMOS, menționate anterior.
- 3) Posibilitatea trasării liniilor echipotențiale, care ușurează considerabil optimizarea formei electrozilor.
- 4) Trasarea rapidă a traiectoriilor sau a familiilor de traiectorii pentru o variată gamă de parametri inițiali.
- 5) O grafică interactivă deosebit de puternică.

Dezavantajele esențiale sunt :

- 1) Programul nu ține cont de efectul sarcinii spațiale.
- 2) Se aplică FDM în varianta cu 5 puncte, care are o precizie mai scăzută decât varianta în 9 puncte, dar este mult mai rapidă.

Viteza de calcul a calculatoarelor utilizate și posibilitățile financiare limitează în prezent aria de investigare a posibilităților de simulare a câmpurilor potențiale pentru modelarea tunurilor electronice pentru sudare.

### 4.7. Relații de calcul utilizate

Pentru rezolvarea ecuației lui Laplace în două dimensiuni, se utilizează metoda diferențelor finite în 5 puncte, cu rețeaua având pași egali, figura 4.3. Se consideră domeniul dreptunghiular OABC, care este împărțit într-o rețea de pătrate cu latura h (pasul rețelei), vârfurile pătratului fiind nodurile rețelei în care se determină valoarea potențialului.

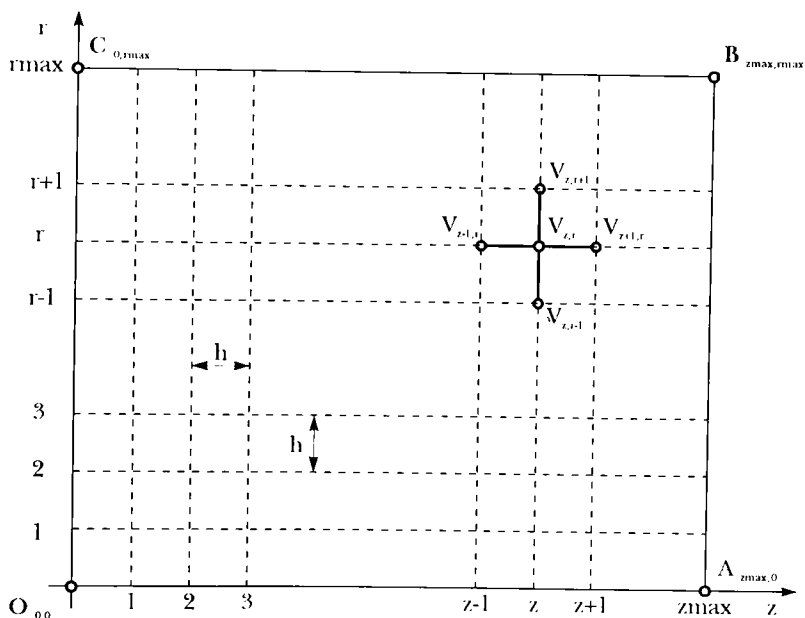


Fig. 4.3.

Potențialul pentru punctele din interiorul domeniului OABC :

$$\begin{aligned}
 V'_{z,r}(n) &= \frac{V_{z-1,r}(n-1) + V_{z+1,r}(n-1) + 2 \cdot V_A(n-1)}{4} \\
 &= \frac{V_{z-1,r}(n-1) + V_{z+1,r}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{z,r-1}(n-1) + \left(1 + \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{z,r+1}(n-1)}{4}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Potențialul unui punct interior frontierei OC :

$$\begin{aligned}
 V'_{0,r}(n) &= \frac{V_{1,r}(n-1) + 2 \cdot V_A(n-1)}{3} \\
 &= \frac{V_{1,r}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{0,r-1}(n-1) + \left(1 + \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{0,r+1}(n-1)}{3}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$



Potențialul unui punct interior frontierei AB :

$$V'_{zmax,r}(n) = \frac{V_{zmax-1,r}(n-1) + 2 \cdot V_A(n-1)}{3} \quad (4.12)$$

$$= \frac{V_{zmax-1,r}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{zmax,r-1}(n-1) + \left(1 + \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot V_{zmax,r+1}(n-1)}{3}$$

Potențialul unui punct interior frontierei OA :

$$V'_{z,0}(n) = \frac{V_{z-1,0}(n-1) + V_{z+1,0}(n-1) + 4 \cdot V_{z,1}(n-1)}{6} \quad (4.13)$$

Potențialul unui punct interior frontierei BC :

$$V'_{z,rmax}(n) = \frac{V_{z-1,rmax}(n-1) + V_{z+1,rmax}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot rmax}\right) \cdot V_{z,rmax-1}(n-1)}{3 - \frac{1}{2 \cdot rmax}} \quad (4.14)$$

Potențialul punctului O :

$$V'_{0,0}(n) = \frac{V_{1,0}(n-1) + 4 \cdot V_{0,1}(n-1)}{5} \quad (4.15)$$

Potențialul punctului A :

$$V'_{zmax,0}(n) = \frac{V_{zmax-1,0}(n-1) + 4 \cdot V_{zmax,1}(n-1)}{5} \quad (4.16)$$

Potențialul punctului B :

$$V'_{zmax,rmax}(n) = \frac{V_{zmax-1,rmax}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot rmax}\right) \cdot V_{zmax,rmax-1}(n-1)}{2 - \frac{1}{2 \cdot rmax}} \quad (4.17)$$

Potențialul punctului C :

$$V'_{0,rmax}(n) = \frac{V_{1,rmax}(n-1) + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot rmax}\right) \cdot V_{0,rmax-1}(n-1)}{2 - \frac{1}{2 \cdot rmax}} \quad (4.18)$$

În relațiile (4.10) până la (4.18) :

$$V_A(n-1) = V_{z,r-1}(n-1) + \left(2 + \frac{1}{2 \cdot r}\right) \cdot [V_{z,r+1}(n-1) - V_{z,r-1}(n-1)] \quad (4.19)$$

unde  $r$  este coordonata punctului considerat în unități de rețea ( număr întreg de pași ai rețelei ).

Pentru micșorarea timpului de calcul a soluțiilor se aplică metoda suprarelaxării succesive,

astfel încât potențialul la iterația  $n$ ,  $V_{z,r}(n)$ , va fi:

$$V_{z,r}(n) = V_{z,r}(n-1) + \alpha(n) \cdot [V'_{z,r}(n) - V_{z,r}(n-1)] \quad (4.20)$$

unde  $\alpha(n)$  este coeficientul dinamic de suprarelaxare la iterația  $n$ .

Coeficientul dinamic de suprarelaxare are valorile :

$$\alpha(n) = \begin{cases} 0,40 & \text{pentru } n = 1 \\ 0,67 & \text{pentru } 2 \leq n \leq 10 \\ \alpha(n-1) \cdot \beta + (1-\beta) \cdot [\alpha_{\max} - \sigma \cdot \delta(n-1)] & \text{pentru } n > 10 \end{cases} \quad (4.21)$$

unde  $\alpha(n-1)$  este coeficientul de suprarelaxare la iterația  $n-1$ ;

$\beta = 0,7$  - coeficientul ce limitează rata de schimbare a lui  $\alpha(n)$ ;

$\alpha_{\max} = 0,9$  - coeficientul maxim de suprarelaxare ;

$\sigma = \alpha_{\max} - 0,4$  ;

$$\delta(n-1) = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon(n-1)}{\varepsilon}}$$

unde  $\varepsilon(n-1) = \max \{ |V_{z,r}(n-1) - V_{z,r}(n-2)| \}$  ;

$\varepsilon$  este eroarea maximă admisă la ultima iterație.

Pentru determinarea liniilor echipotențiale se face o interpolare liniară în fiecare pătrat de rețea pentru valorile dorite de utilizator sau automat de către program pentru valori de  $\pm 10\%$  din potențialul electrozilor. Această metodă prezintă o aproximare suficientă a liniilor echipotențiale reale.

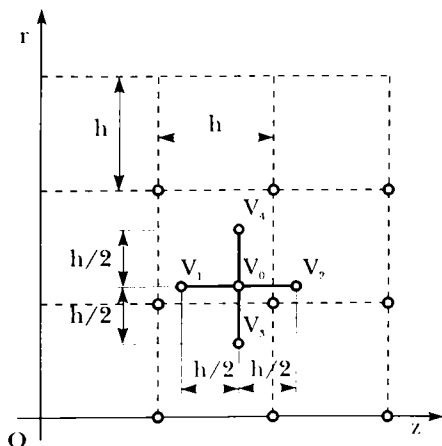


Fig. 4.4.

Pentru determinarea traiectoriilor se parcurg trei etape importante. În primul rând se determină forța electrostatică pe baza poziției curente a electronului. În a doua etapă, pe baza forței electrostatice, se determină accelerația electronului și, prin integrare numerică cu metoda Runge-Kutta de ordinul patru, se determină poziția și viteza electronului la următorul pas de timp. În a treia etapă se ajustează pasul de timp pentru a mări precizia determinării traiectoriei și a micșora numărul de pași de integrare pe traiectorie.

Pentru determinarea forței electrostatice se consideră poziția curentă a electronului.

figura 4.4, într-un pătrat de rețea și cele douăsprezece puncte ce înconjoară acest pătrat de rețea. Se determină potențialele  $V_1, V_2, V_3$  și  $V_4$  corespunzătoare punctelor aflate la distanța  $h/2$  de poziția curentă a electronului, prin interpolare liniară între potențialele nodurilor pătratului în care se află punctele. Apoi se calculează forțele electrostatice cu relațiile :

$$\begin{cases} F_z = (V_1 - V_2) \cdot \frac{e}{h} \\ F_r = (V_3 - V_4) \cdot \frac{e}{h} \end{cases} \quad (4.22)$$

unde  $e$  este masa electronului iar  $h$  pasul rețelei.

Accelerațiile se determină cu relațiile :

$$\begin{cases} a_z = \frac{F_z}{1,036512 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot S^2} \\ a_r = \frac{F_r}{1,036512 \cdot 10^{-2} \cdot M \cdot S^2} \end{cases} \quad (4.23)$$

unde  $M$  este masa electronului în AMU / unitatea de sarcină ;

$S$  - scara în milimetri / unitatea de rețea.

Metoda prezentată permite modelarea cu o bună aproximare și într-un timp rezonabil a zone electrostatice a tunului electronic. Rezultatele obținute prin modelare pe calculator cu această metodă au coincis cu determinările experimentale efectuate pe tunurile construite la ITIM Cluj Napoca. S-au efectuat comparații cu modelările efectuate de alți autori prin alte metode și s-a constatat rezultate foarte apropiate sau identice cu cele obținute prin metoda prezentată în această teză. Astfel, în figura 4.5 se prezintă configurația câmpului electrostatic obținută prin metoda elementului de frontieră de Hawkes și Kasper, [21], care este practic identică cu cea obținută prin metoda prezentată în teză, așa cum se observă în figura 4.6.

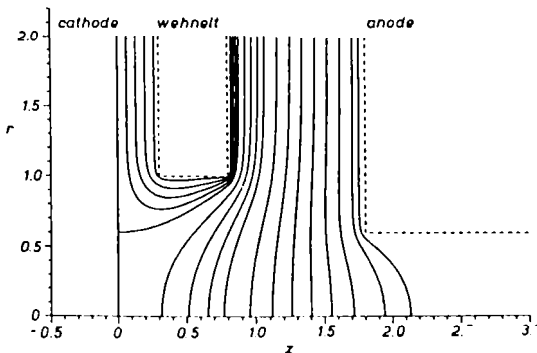


Fig. 4.5.

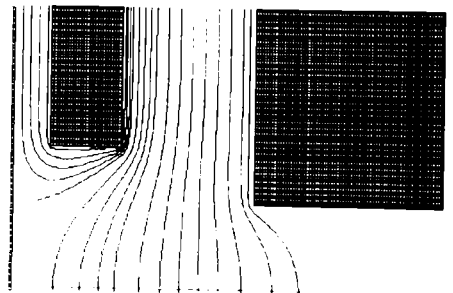


Fig. 4.6.

---

## **CAPITOLUL 5**

---

**CALCULUL ȘI PROIECTAREA  
TUNULUI ELECTRONIC TRIODĂ  
PENTRU SUDARE  
CU FASCICUL DE ELECTRONI**



## 5. CALCULUL ȘI PROIECTAREA TUNULUI ELECTRONIC TRIODĂ PENTRU SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI

### 5.1. Considerații generale

Calculul, proiectarea și construcția tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni sunt prezentate în literatura de specialitate destul de sumar din punctul de vedere al proiectantului. De regulă, se prezintă parametrii de lucru și performanțele măsurate pentru anumite materiale și condiții de sudare, unele detalii constructive mai aparte precum și aparatura necesară alimentării și comenzii tunului electronic. În bibliografia studiată nu se prezintă o metodă unitară de calcul, proiectare și optimizare a construcției elementelor esențiale ale tunului electronic, precum și etapele ce trebuie parcurse pentru atingerea scopului propus. În acest capitol se prezintă contribuția privind

construcția tunurilor electronice pentru sudare, prezentându-se o metodă unitară de calcul și proiectare a tunului electronic triodă pentru sudare cu fascicul de electroni.

Tunul electronic, figura 5.1, este un dispozitiv care generează, accelerează și focalizează un fascicul de electroni. Catodul generează electronii care sunt accelerați și focalizați în câmpul electric dintre catod, anod și electrodul de polarizare Wehnelt, care se află în zona electrostatică denumită tun electronic propriu-zis. Fasciculul de electroni converge într-un prim punct focal, denumit cross-over, situat în zona aperturii anodice. După cross-over fasciculul de electroni este divergent, astfel că este necesară o nouă focalizare prin intermediul unei lentile magnetice, care proiectează imaginea din cross-over pe piesă, cu un anumit grad de micșorare.

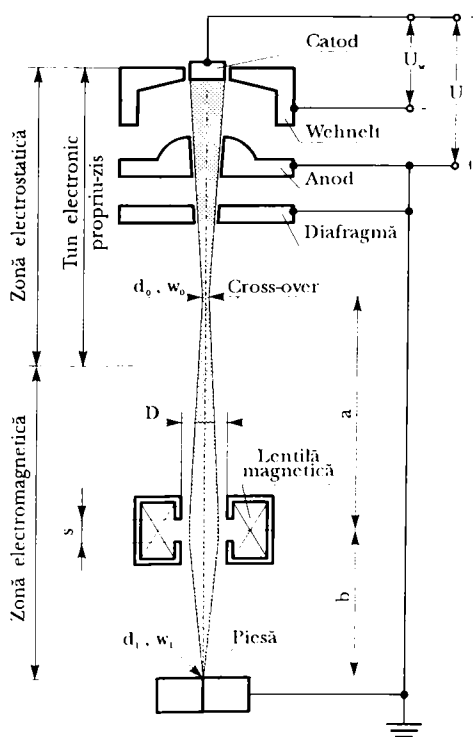


Fig. 5.1.

Tunurile electronice utilizate la suda-

rea metalelor sunt tip diodă, dacă electrodul Wehnelt este la aceeași tensiune cu catodul, respectiv tip triodă, dacă electrodul Wehnelt este la o tensiune diferită de cea a catodului.

Tunurile diodă funcționează în regim de sarcină spațială limitată, ceea ce înseamnă că reglarea intensității de curent  $I$  se face prin modificarea tensiunii de accelerare  $U$ , după relația Child-Langmuir, [11], [25]:

$$I = P \cdot U^{\frac{3}{2}} \quad (5.1)$$

unde  $P$  este perveanța tunului electronic, dependentă de geometria electronoptică a acestuia.

Tipurile de tunuri electronice preferate pentru sudare sunt cele cu geometrie electronoptică Pierce, care elimină într-o măsură mai mare dispersia fasciculului datorată respingerii electrostatice a electronilor și permit, în comparație cu alte tipuri de configurații, atingerea unor densități de putere mai mari la tensiuni mai mici.

În cazul tunurilor electronice triodă reglarea intensității curentului se face independent de tensiunea de accelerare  $U$ , prin reglarea tensiunii de comandă - de negativare -  $U_w$  aplicată pe electrodul Wehnelt. Aceste tunuri au marele avantaj că pot funcționa și în regim de impulsuri, ceea ce constituie o calitate în plus față de tunurile diodă.

Sudarea metalelor cu fascicul de electroni se efectuează în cele mai multe cazuri cu tunuri electronice triodă cu geometrie electronoptică Pierce, cu Wehnelt-ul polarizat.

Pentru procese tehnologice de sudare tunurile electronice trebuie să realizeze o densitate de putere pe piese  $w_1 = 10^5 \dots 10^7 \text{ W/cm}^2$ , care se calculează cu relația:

$$w_1 = \frac{4UI}{\pi d_1^2} \quad (5.2)$$

Obținerea acestei densități de putere este influențată de o serie de factori dintre care se menționează: tensiunea de accelerare  $U$ , densitatea de emisie a catodului  $j_c$ , densitatea de putere în cross-over  $w_0$ , geometria electronoptică a tunului și aberațiile lentilelor.

La proiectarea unui tun electronic pentru sudare se urmărește atingerea unei densități de putere  $w_0$  cât mai mare în cross-over. Această densitate de putere se determină cu relația, [14]:

$$w_0 = K \cdot j_c \cdot U^2 \quad (5.3)$$

unde  $K$  este o constantă influențată de geometria electronoptică a zonei electrostatice și de temperatura catodului.

Obținerea acestei densități de putere (pentru sudare  $10^5 \dots 10^7 \text{ W/cm}^2$ ) este limitată de:

- a) fenomenele de refracție și difracție cauzate de natura ondulatorie a electronului;
- b) efectul cauzat de sarcina spațială;
- c) efectul vitezelor termice ale electronilor emiși de catod, care au o distribuție maxwelliană;

d) limite tehnice cauzate de proprietățile materialului catodului, construcția aparatului electronic de comandă și alimentare, legile opticii electronice dintre care se menționează:

- limitele superioare pentru emisia de electroni de pe suprafața catodului și temperatura optimă a acestuia;
- posibilitățile tehnice de realizare a izolărilor pentru tensiunea înaltă;
- erori ale lentilelor electrostatice și electromagnetice utilizate pentru accelerarea și focalizarea fasciculului electronic, din cauza cărora diametrul fasciculului în planul piesei este, [15]:

$$d_1 = \sqrt{d_T^2 + d_S^2} \quad (5.4)$$

unde:  $d_T$  este diametrul fasciculului datorat aberației vitezelor termice;

$d_S$  - diametrul fasciculului datorat aberației sferice.

În cazul tunurilor electronice pentru sudare, sarcina spațială, fenomenele de refracție și difracție influențează într-o măsură mai mică obținerea unei densități mari de putere  $w_0$  în cross-over, în schimb, datorită vitezelor termice, fasciculul electronic nu poate fi focalizat într-un punct ci numai pe o suprafață mică, fapt care trebuie să fie luat în considerare în calculele de proiectare a tunului electronic, utilizându-se formula lui Langmuir pentru densitatea maximă de curent  $j_0$  care poate fi obținută în cross-over, [14] :

$$j_0 = j_c \cdot \frac{U \cdot e}{k \cdot T} \quad (5.5)$$

unde  $j_c$  este densitatea curentului de emisie a catodului ;

$U$  - tensiunea de accelerare ;

$e$  - sarcina electronului ;

$k$  - constanta lui Boltzmann ;

$T$  - temperatura catodului.

Pe de altă parte, densitatea de putere în cross-over ( $w_0 = K \cdot j_c \cdot U^2$ ) poate fi mărită prin:

- utilizarea unor catozi cu densitate de emisie  $j_c$  mare;
- aplicarea unei tensiuni de accelerare  $U$  cât mai mare posibilă;
- optimizarea geometriei electronoptice a zonei electrostatice a tunului electronic care influențează constanta  $K$ .

Optimizarea geometriei electronoptice a zonei electrostatice este foarte importantă și trebuie să se facă prin modelare pe calculator pentru a obține o valoare cât mai mare pentru constanta  $K$ . Pentru zona electromagnetice nu se impune modelarea pe calculator, fiind suficient calculul distanței focale a lentilei magnetice în funcție de curentul de alimentare al bobinei, pentru diametrul aperturii lentilei  $D$  și întrefierul  $s$  aleși astfel ca aberația sferică a lentilei să fie cât mai mică.



## 5.2. Calculul și proiectarea sistemului electronoptic cu simetrie axială

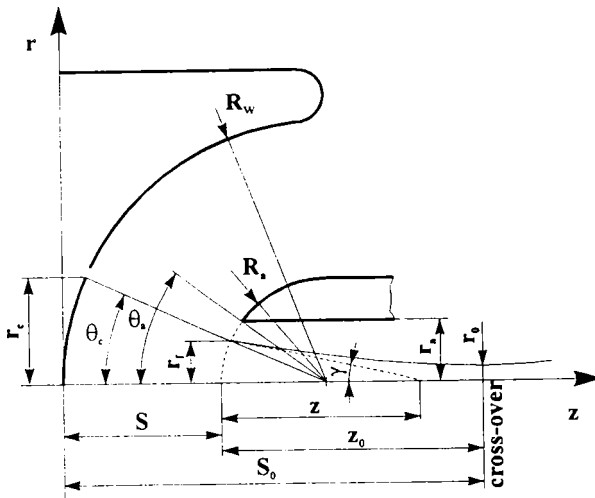


Fig. 5.2.

emis de segmentul de sferă considerat emiter cu suprafața  $4 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \sin(\theta_c/2)$  și semiunghiul de convergență  $\theta_c$ , figura 5.2 :

$$I = \frac{29,34 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right)}{\alpha^2} \cdot U^{\frac{3}{2}} = P \cdot U^{\frac{3}{2}} \quad (5.6)$$

unde:  $U$  este tensiunea de accelerare în volți;

$\alpha$  - factorul de curgere a curentului, dat tabelar în funcție de raportul  $r_c / r_a$ .

$P$  - o constantă numită perveanța tunului electronic, dependentă de geometria electronoptică.

Dacă relația (5.6) se scrie sub forma:

$$P = \frac{I}{U^{\frac{3}{2}}} = \frac{29,34 \cdot 10^{-6}}{\alpha^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \quad (5.7)$$

iar potențialul este cel anodic, relația (5.7) permite estimarea perveanței tunului electronic funcție

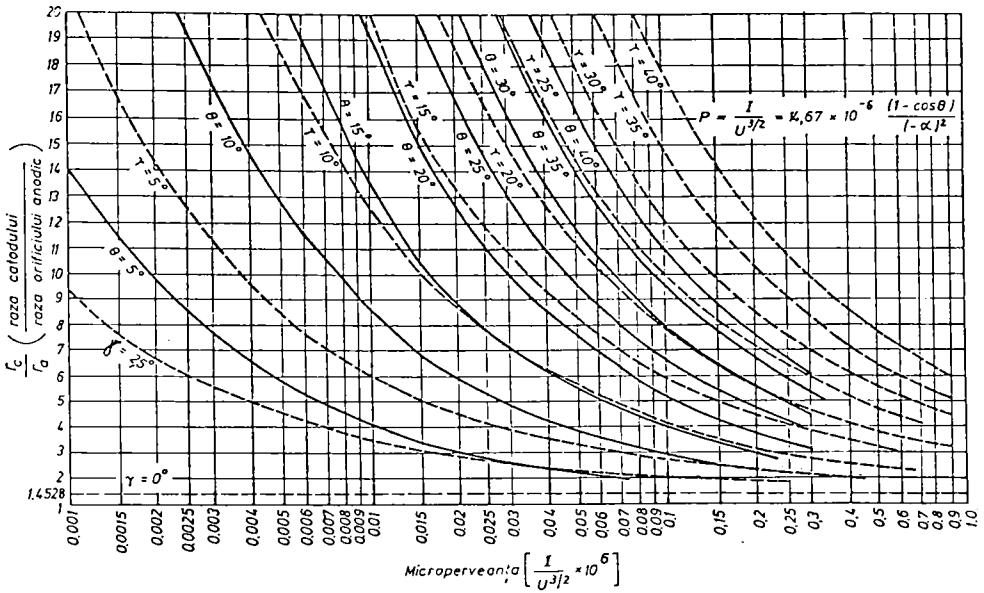


Fig. 5.3.

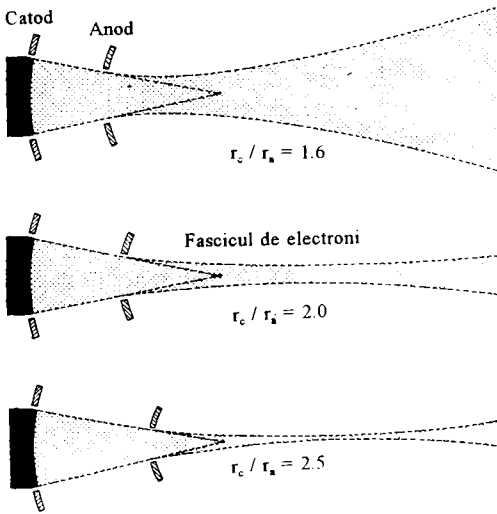


Fig. 5.4.

de semiunghiul de convergență  $\theta_c$  și raportul razelor  $r_c / r_a$ .

Perveanța este un parametru de bază a unui tun cu geometrie electronoptică Pierce, indicând, în cazul tunului diodă, care este tensiunea de accelerare minimă de la care tunul electronic dat poate să furnizeze intensitatea de curent și puterea necesare.

Relația (5.7) reprezentată grafic, figura 5.3, constituie un prim test pentru începerea proiectării tunului electronic, sugerând faptul că o perveanță mare se poate obține prin alegerea corespunzătoare a semiunghiului de convergență  $\theta_c$  și a raportului razelor  $r_c / r_a$ .

Pentru structura și dimensiunile tunului electronic cu geometrie Pierce prezentat în figura 5.2, fasciculul de electroni este convergent pentru valori ale raportului razelor  $r_c / r_a$  mai mari de 1,4528, având convergența optimă pentru valori ale raportului razelor  $r_c / r_a$  cuprinse între 2 și 2,5, după cum se poate observa în figura 5.4.

Calculul tunului electronic cu geometrie Pierce începe cu dimensionarea diametrului  $d_c$  al

suprafeței de emisie a catodului. Pentru aceasta este necesar să fie stabilite puterea  $W = U \cdot I$  dezvoltată de tunul electronic pentru tensiunea de accelerare  $U$  dată și densitatea curentului de emisie a catodului  $j_c$ , care depinde de materialul din care se execută catodul ( $W$ , Ta, LaB<sub>6</sub>, etc.).

Diametrul  $d_c$  al suprafeței de emisie a catodului se dimensionează cu relația, [4]:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{\pi \cdot j_c}} \cdot \cos\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \quad (5.8)$$

care pentru  $\theta_c = 5^\circ$  devine:

$$d_c \approx 1,13 \cdot \sqrt{\frac{I}{j_c}} \quad (5.9)$$

Cu diametrul  $d_c$  astfel calculat și pe baza celor prezentate în figura 5.2, se pot calcula celelalte dimensiuni ale geometriei tunului electronic propriu-zis, considerând, de exemplu, valorile rapoartelor  $r_c / r_a = 2,5$ ,  $\theta_s / \theta_c = 1,25$  și semiunghiul de convergență  $\theta_c = 5^\circ$ .

Cu aceste dimensiuni, rezultate din calculele de predimensionare, se poate trece la optimizarea geometriei electronoptice prin modelarea pe calculator a tunului electronic propriu-zis format din catod, electrod Wehnelt și anod. Forma, dimensiunile finale ale geometriei electronoptice precum și o parte din parametri de comandă ai tunului electronic propriu-zis se pot determina numai prin modelare pe calculator.

### 5.2.2 Calculul și proiectarea lentilei magnetice

Tunului electronic propriu-zis i se atașează o lentilă magnetică, figura 5.1, constituită dintr-o bobină cu blindaj metalic, având diametrul aperturii  $D$  și întrefierul  $s$ . Aceasta proiectează imaginea din cross-over pe suprafața piesei, cu gradul de micșorare :

$$M = \frac{b}{a} \quad (5.10)$$

În cazul tunurilor electronice pentru sudare este suficientă determinarea distanței focale  $f$  a bobinei, pentru  $D$  și  $s$  aleși astfel ca aberația sferică a lentilei magnetice să fie cât mai mică. Pentru lentile convergente, distanța focală este dată de relația :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (5.11)$$

Dimensionarea bobinei se face cu relația, [46] :

$$f = \frac{98 \cdot U \cdot R}{(N \cdot I_f)^2} \cdot k \quad (5.12)$$

- unde  $R$  este raza medie a bobinei ;
- $k$  - coeficientul de umplere al bobinei ;
- $N \cdot I_f$  - numărul de amperi spire al bobinei.

Din relațiile (5.11) și (5.12) se obține numărul de amperi spire al bobinei cu formula:

$$N \cdot I_f = \sqrt{98 \cdot U \cdot R \cdot k \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)} \tag{5.13}$$

Pentru lentila magnetică se aleg diametrul aperturii  $D$  și întrefierul  $s$  astfel ca saturația pieselor polare să respecte condiția :

$$\frac{N \cdot I_f}{s} < 1100 \text{ A sp / mm} \tag{5.14}$$

După aceste calcule, pentru curentul de focalizare  $I_f$  al bobinei ales, se determină numărul de spire al bobinei lentilei magnetice.

Pe de altă parte , alegerea diametrului  $D$  și a întrefierului  $s$  trebuie să conducă la obținerea unui coeficient al aberației sferice  $C_s$ , cât mai mic posibil, dat de relația, [28] :

$$C_s = \frac{5f^3}{(s+D)^2} \tag{5.15}$$

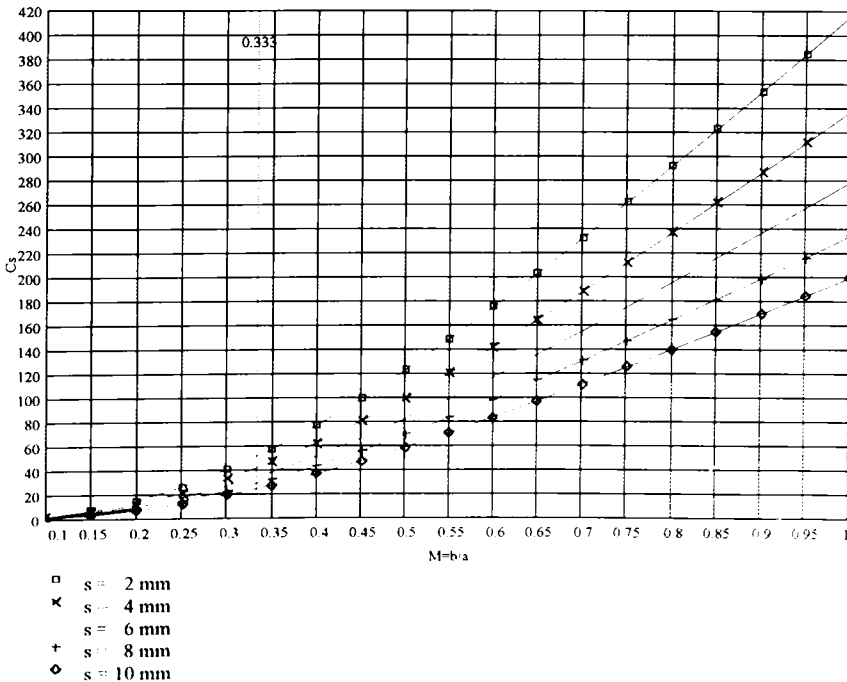


Fig. 5.5.

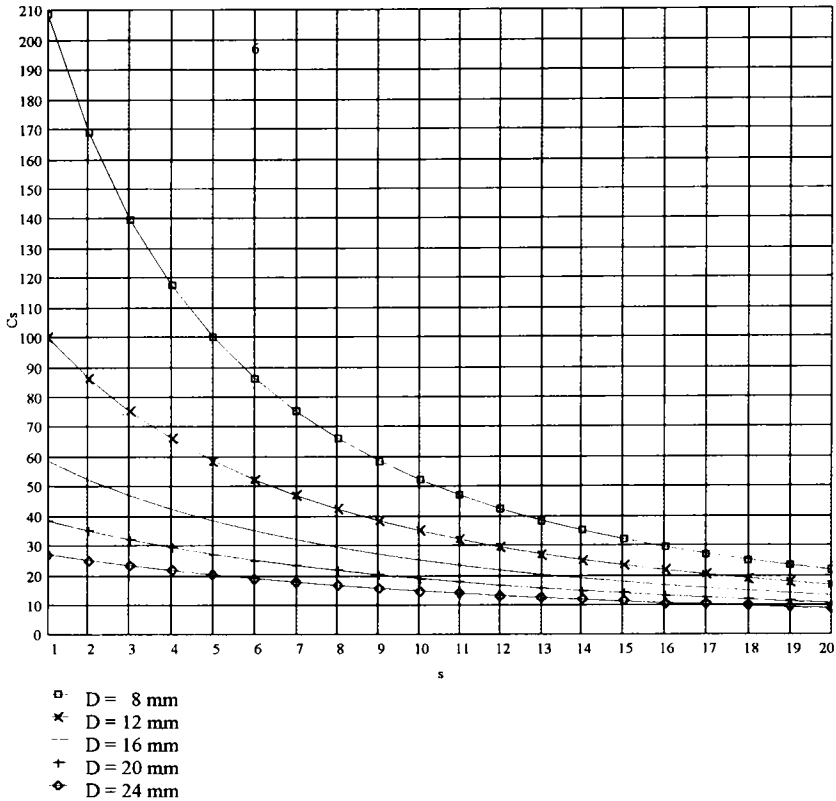


Fig. 5.6.

Pe baza relațiilor (5.10), (5.11) și (5.15) s-au trasat graficele din figurile 5.5 și 5.6 care oferă posibilitatea optimizării alegerii valorilor pentru  $M$ ,  $s$  și  $D$ .

În figura 5.5 se prezintă variația coeficientului aberației sferice în funcție de  $M$  și  $s$ , iar în figura 5.6 se prezintă variația aceleiași mărimi funcție de  $s$  și  $D$ . De pe grafice se observă că sunt de preferat valori cât mai mari pentru  $s$  și  $D$ , iar pentru  $M$  valori cât mai mici. La alegerea acestor mărimi se va ține cont de limitările constructive și tehnologice care apar în cazurile concrete de proiectare a tunului electronic.

### 5.2.3 Exemplu de calcul

Se prezintă calculele efectuate pentru un tun electronic triodă cu geometrie Pierce, care să dezvolte o putere  $W = 1,5$  kW, cu o tensiune de accelerare  $U = 35$  kV și un curent al fasciculului de electroni  $I \approx 45$  mA. Tunul este cu catod cu încălzire directă, executat din bandă de Ta, cu valorile rapoartelor  $r_c / r_a = 2,5$  și  $\theta_a / \theta_c = 1,25$  și semiunghiul de convergență  $\theta_c = 5^\circ$ . Pentru

aceste valori au rezultat din calcule următoarele dimensiuni ale tunului electronic propriu-zis, figura 5.2:  $d_c = 3,2 \text{ mm}$  ,  $R_w = 18 \text{ mm}$  ,  $R_a = 7 \text{ mm}$  ,  $S = 11 \text{ mm}$  ,  $d_a = 1,3 \text{ mm}$  ,  $z = 14 \text{ mm}$  ,  $z_0 = 18 \text{ mm}$  ,  $S_0 = 29 \text{ mm}$  ,  $d_0 = 0,16 \text{ mm}$  și  $w_0 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ .

Prin modelare pe calculator se obțin forma și dimensiunile finale ale tunului electronic propriu-zis. Modelarea permite și aprecierea tensiunii optime de polarizare a electrodului Wehnelt, precum și a tensiunii de tăiere a fasciculului. În figura 5.7 este prezentat tunul electronic propriu-zis proiectat, cu o tensiune  $U_w = -150 \text{ V}$  pe electrodul Wehnelt, cu fasciculul de electroni și cu suprafețele echipotențiale aferente.

Pentru lentila magnetică s-au adoptat  $s = 6 \text{ mm}$  ,  $D = 16 \text{ mm}$  ,  $M = 1/3$  și s-au obținut următoarele valori :  $N \cdot I_f = 1284 \text{ A sp}$  ,  $I_f = 2 \text{ A}$  ,  $N = 642 \text{ spire}$ . Densitatea de putere estimată în

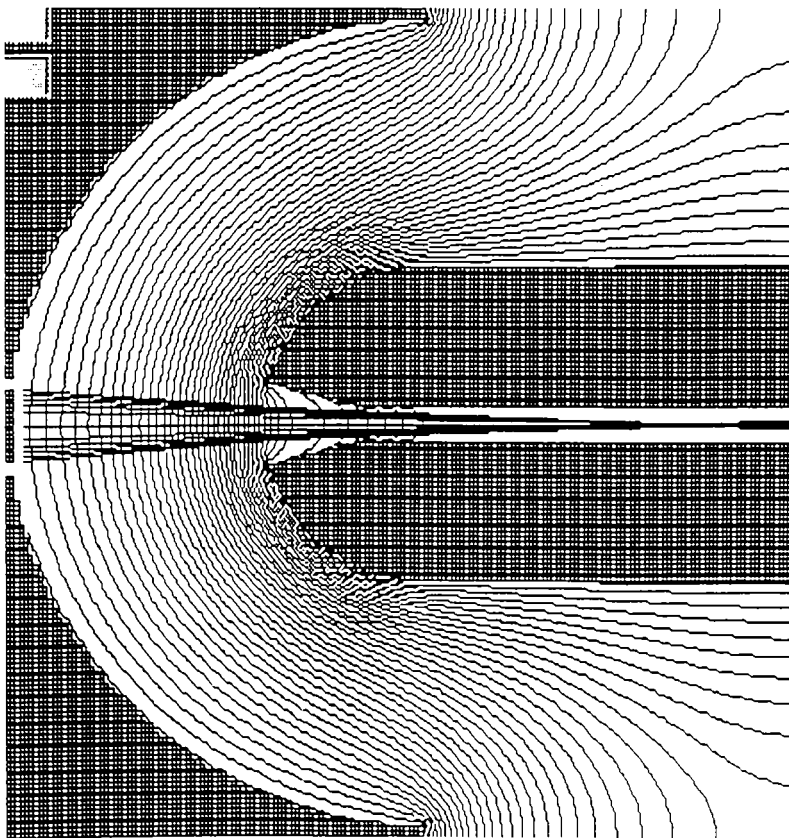


Fig. 5.7.

cordoanel de sudură a rezultat prin calcul  $w_1 = 8,52 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ , în domeniul  $10^5 \dots 10^7 \text{ W/cm}^2$  recomandat pentru procese de sudare cu fascicul de electroni.

## 5.3. Modelarea pe calculator a tunului electronic propriu-zis

### 5.3.1. Considerații generale

Prin adaptarea programului SIMION pentru modelarea pe calculator a tunurilor electronice au fost studiate o serie de configurații de tunuri pentru sudare. În primul rând au fost modelate tunurile electronice construite la ITIM Cluj-Napoca, pentru care existau date experimentale privind parametrii de lucru și performanțele atinse. Acestea au fost confirmate cu o precizie suficientă, astfel încât s-a trecut în continuare la modelare unei game variate de noi configurații de tunuri.

S-au folosit rețele cu 15 900 până la 16 000 de puncte, cu un pas de maximum 0,2 mm, ceea ce a permis o aproximare suficient de bună a frontierelor pentru dimensiunile tunurilor studiate. Eroarea maximă de calcul a potențialului a fost impusă la  $10^{-4}$  V. Pentru diverse valori ale potențialului catodului și a electrodului Wehnelt s-au determinat configurația câmpului electric și forma fasciculului de electroni.

În figurile 5.8 și 5.9 este prezentat un tun cu geometrie Pierce care funcționează ca diodă, respectiv triodă. În figurile 5.10 și 5.11 este prezentat un tun cu o altă geometrie care funcționează ca diodă, respectiv triodă.

Pe baza celor prezentate s-au studiat diverse forme ale electrodului Wehnelt și ale anodului pentru a putea stabili forma optimă a acestora și influențele pe care le au asupra parametrilor electrici, respectiv asupra performanțelor tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni. Modul de definire a configurațiilor geometrice este prezentat în anexă.

Obținerea unei densități de putere de valoare ridicată este determinată, [64], și de gradul de focalizare a fasciculului de electroni, care depinde de configurația câmpului electrostatic din tunul electronic propriu-zis. Forma electrodului Wehnelt și a anodului influențează considerabil

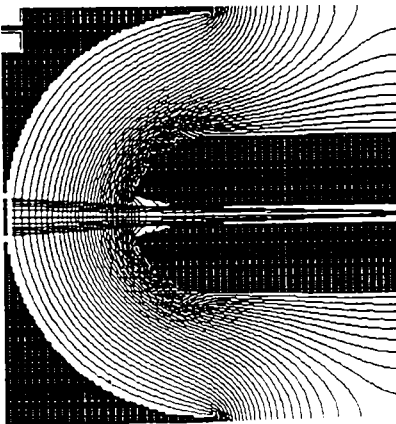


Fig. 5.8.

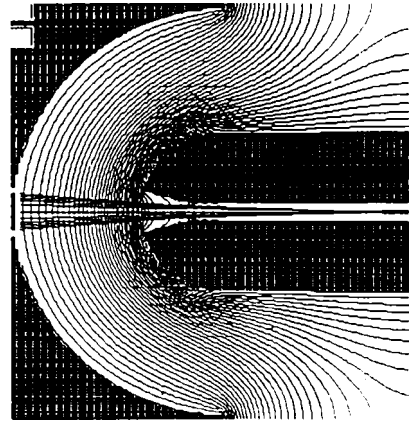


Fig. 5.9.

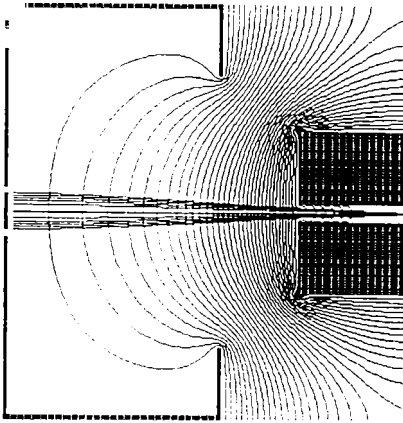


Fig. 5.10.

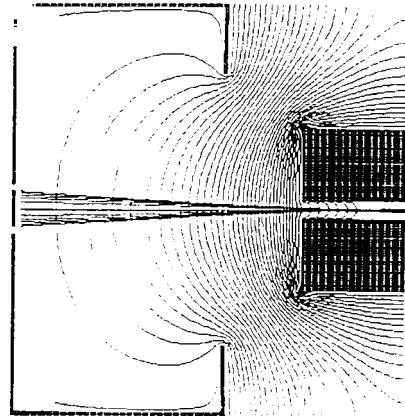


Fig. 5.11.

configurația câmpului electrostatic, iar în cazul tunului electronic triodă electrodul Wehnelt determină și tensiunea de tăiere a fasciculului de electroni, când tunul funcționează în impulsuri.

În literatura de specialitate influența formei electrodului Wehnelt și a anodului asupra performanțelor tunurilor electronice este abordată foarte general, fără exemplificări necesare proiectării.

Studiul influenței formei electrodului Wehnelt și a anodului s-a făcut pe o serie de configurații ale tunului electronic propriu-zis, predimensionat pe baza celor prezentate anterior, iar apoi fiecare configurație de tun a fost optimizată prin modelare pe calculator.

### 5.3.2. Configurații de electrozi Wehnelt studiate

Dintre configurațiile studiate se prezintă următoarele șase forme ale electrodului Wehnelt:

- 1) Sferică (Pierce) - figurile 5.12, 5.18, 5.24, 5.24, și 5.26;
- 2) Conică simplă - figurile 5.13 și 5.19;
- 3) Conică compusă - figurile 5.14 și 5.20;
- 4) Cilindrică deschisă - figurile 5.15 și 5.21;
- 5) Cilindrică închisă - figurile 5.16 și 5.22;
- 6) Conic - cilindrică - figurile 5.17 și 5.23;

Un prim aspect studiat este comportarea acestor forme de electrozi Wehnelt în cazul tunurilor diodă, când tensiunea pe Wehnelt este egală cu cea de pe catod, fiind chiar tensiunea de accelerare  $U$ . Pentru acest caz, în figurile 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 și 5.17, sunt prezentate configurația câmpului electric în zona electrostatică a tunului electronic și forma fasciculului de electroni. Se observă că numai forma conică-compusă, figura 5.14, oferă o focalizare bună pentru tunul diodă, iar în celelalte cazuri fasciculul lovește anodul și punctele focale sunt prea îndepărtate.



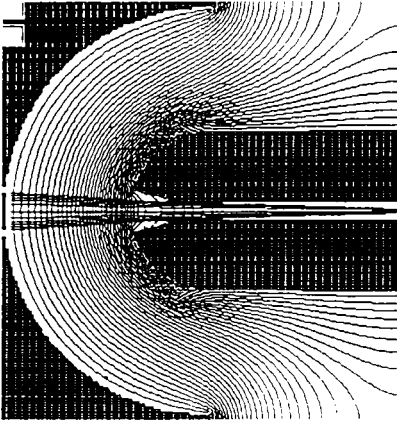


Fig. 5.12.

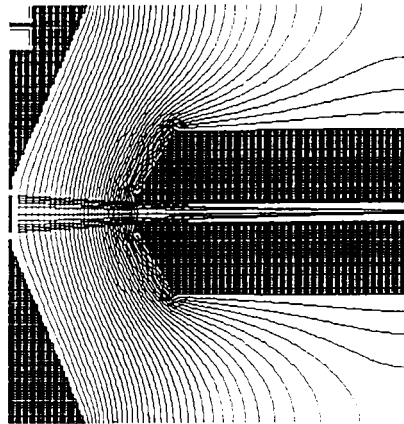


Fig. 5.13.

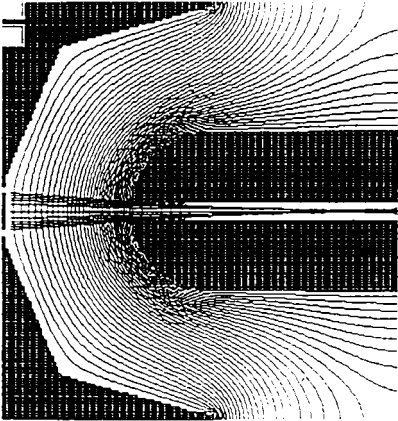


Fig. 5.14.

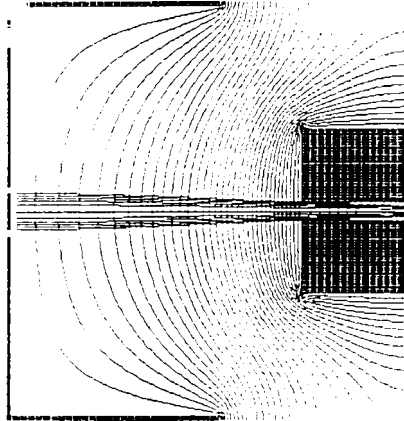


Fig. 5.15.

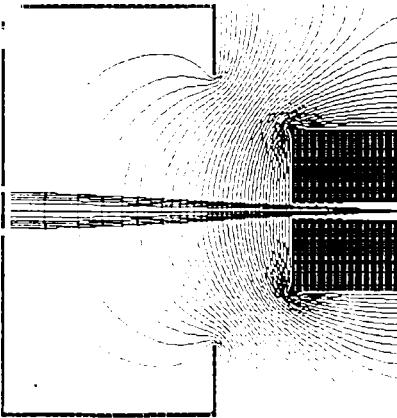


Fig. 5.16.

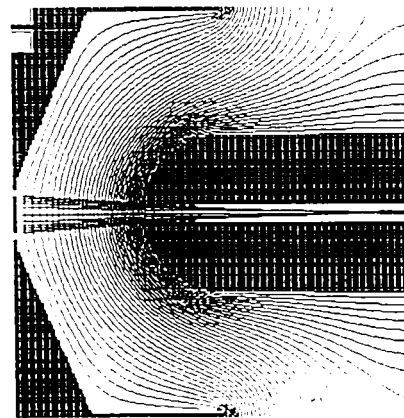


Fig. 5.17.

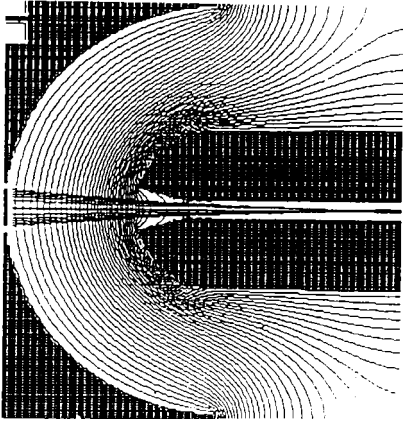


Fig. 5.18.

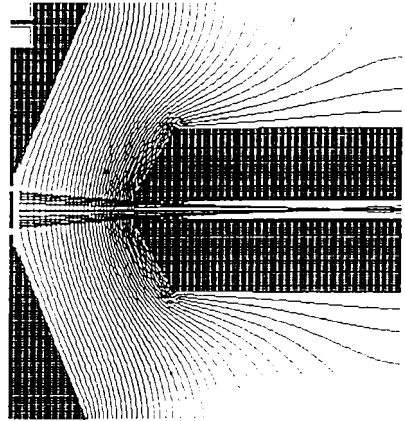


Fig. 5.19.

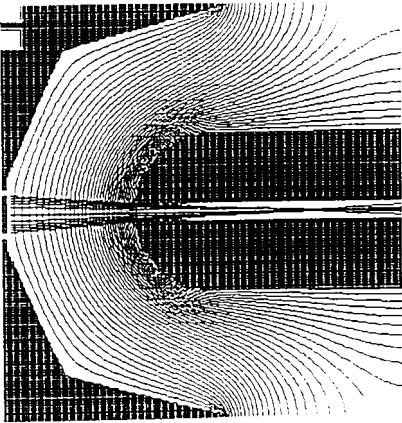


Fig. 5.20.

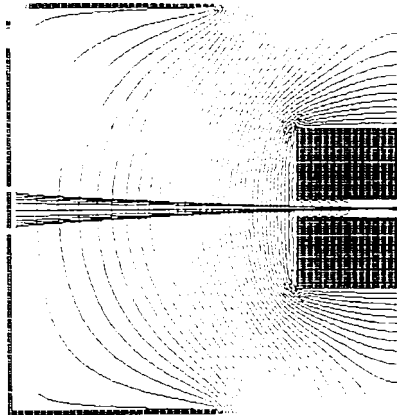


Fig. 5.21.

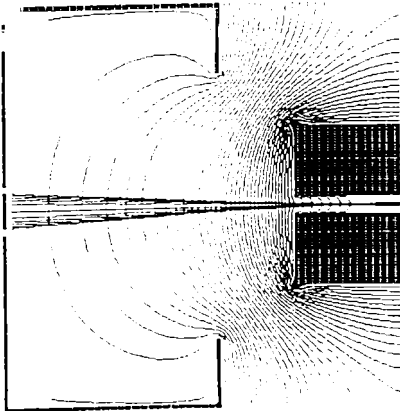


Fig. 5.22.

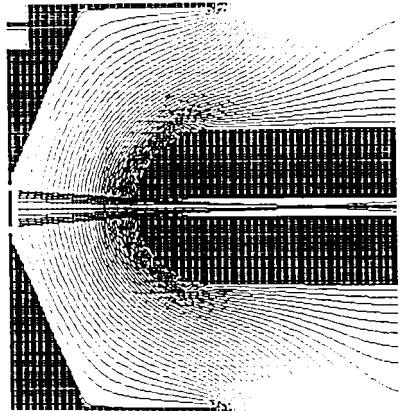


Fig. 5.23.

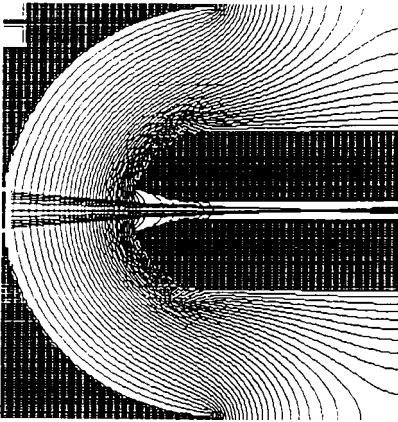


Fig. 5.24.

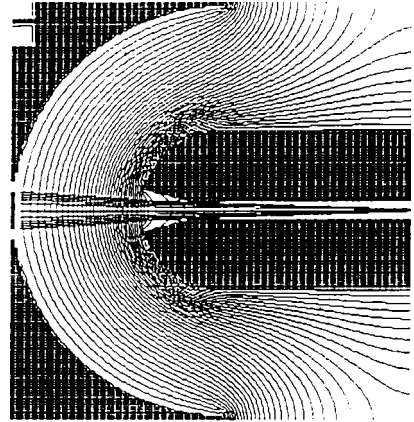


Fig. 5.25.

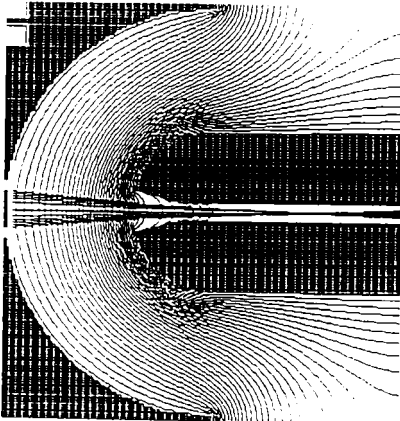


Fig. 5.26.

Apoi a fost studiată comportarea fiecărui tip de electrod Wehnelt în cazul tunurilor triodă, determinându-se tensiunea necesară pe Wehnelt pentru a avea o focalizare optimă a fascicului de electroni. Configurația câmpului electric în zona electrostatică a tunului electronic și forma fascicului de electroni sunt prezentate în figurile 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 și 5.23, tensiunile de focalizare pe Wehnelt fiind de -150 V, -150 V, -50 V, -125 V, -125 V, respectiv -125 V. Se observă că se obține o focalizare bună a fascicului de electroni pentru tensiunile menționate, dar

forma aperturii anodice trebuie modificată pentru ca fascicul să nu lovească anodul. Forma cilindrică, deschisă și închisă, figurile 5.22 și 5.23, are avantajul unor tensiuni de comandă pe Wehnelt relativ mici, focalizarea modificându-se rapid la variații mici ale tensiunii pe Wehnelt.

Un alt aspect important de studiu a fost determinarea valorilor tensiunii necesare pe Wehnelt pentru tăierea fascicului, acestea fiind -3250 V, -3700 V, -3150 V, -1000 V, -575 V, respectiv -3200 V. Se observă că forma cilindrică are cele mai mici tensiuni de tăiere, iar celelalte forme necesită tensiuni de tăiere de peste -3000 V.

Asupra tensiunii pe Wehnelt pentru focalizarea sau tăierea fascicului, o influență importantă are diametrul aperturii electrodului Wehnelt în care este introdus catodul, respectiv interstițiul dintre catod și Wehnelt, calculat ca diferență între raza aperturii electrodului Wehnelt și raza catodului. Pentru o geometrie Pierce, cu cât interstițiul crește cu atât tensiunea de focalizare

pe Wehnelt crește. În figura 5.24 este prezentată o geometrie Pierce cu interstițiul de 0,4 mm, care focalizează la -150 V, iar în figura 5.25 este prezentată aceeași geometrie cu interstițiul de 1 mm, care la -150 V pe Wehnelt are forma fasciculului de electroni ca și tunul diodă prezentat în figura 5.10. Pentru interstițiul de 1 mm, tensiunea de focalizare pe Wehnelt este de -350 V, figura 5.26, iar tensiunea de tăiere a fasciculului ajunge la -3800 V, față de -3250 V pentru un interstițiu de 0,4 mm.

### 5.3.3. Configurații ale anodului studiate

Dintre configurațiile anodului studiate se vor prezenta o serie de aspecte referitoare la cele folosite în tunurile electronice cu geometrie Pierce, pe exemplul calculat în paragraful 5.2.3.

Forma exterioară a anodului și a aperturii lui nu influențează tensiunea de tăiere a fasciculului, aceasta depinzând în principal de poziția (distanța) anodului față de catod și electrodul Wehnelt. Pentru toate configurațiile tunurilor electronice prezentate în acest paragraf, tensiunea de tăiere a fasciculului de electroni este în jur de -3500 V, pentru o tensiune de accelerare de -35000 V, deoarece nu se modifică distanța între anod și catod. Pentru toate configurațiile prezentate în paragrafele 5.3.3 și 5.3.4 se consideră tensiunea de accelerare -35000 V și tensiunea pe electrodul Wehnelt -150 V, pentru care se obține în tunurile cu geometrie Pierce - figura 5.27 - distanța focală  $S_0 = 29$  mm și parametrii de funcționare calculați în paragraful 5.2.3.

În cazul tunurilor electronice cu geometrie Pierce, forma exterioară ideală a anodului este semisferică (figura 5.27), dar practic se pot folosi și alte forme, dacă acestea nu afectează performanțele tunului.

Dacă se alege o formă plană - figura 5.28 - se observă că fasciculul nu mai este focalizat, datorită faptului că suprafețele echipotențiale se aplatisează în apropierea anodului, eroarea fiind peste limita admisă.

Anozii de formă cilindrică pot fi teșii la  $45^\circ$  - figurile 5.29 și 5.30 - sau la  $60^\circ$  - figurile 5.35, 5.36, 5.37 și 5.38, forma lor fiind tronconică. În acest caz, punctul focal rămâne același dacă noua configurație a câmpului electric se apropie cât mai mult de cea teoretic ideală. Se observă că teșirea anodului din figura 5.29 este prea mică, motiv pentru care punctul focal al fasciculului s-a depărtat de cel teoretic pentru tunul Pierce. Pentru celelalte teșiri alese, modificarea poziției focarului este nesemnificativă, deci ele pot fi utilizate pentru a înlocui forma sferică.

Alte forme exterioare ale anodului sunt cele semitoroidale, prezentate în figurile 5.31 și 5.32, caz în care se observă o micșorare sensibilă a distanței focale.

A fost studiată forma aperturii anodice pornindu-se de la un cilindru cu diametrul aperturii

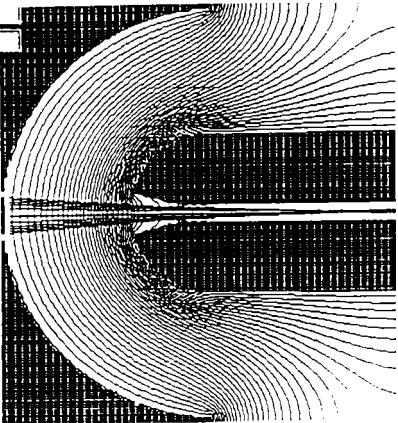


Fig. 5.27.

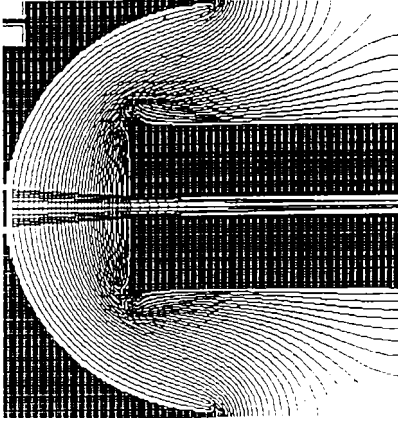


Fig. 5.28.

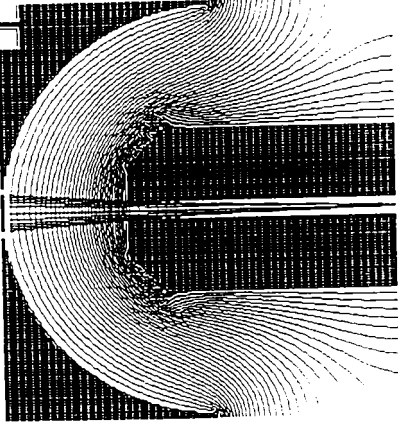


Fig. 5.29.

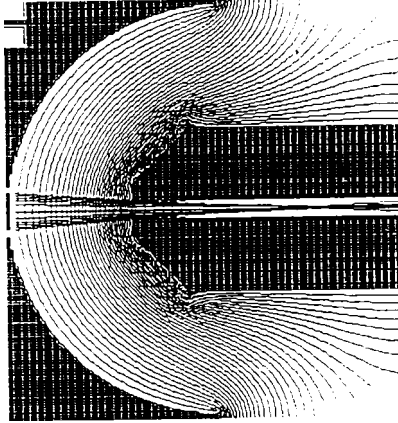


Fig. 5.30.

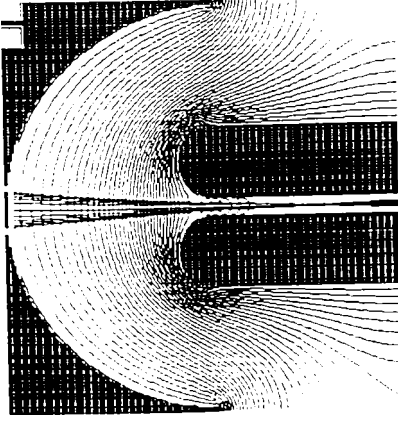


Fig. 5.31.

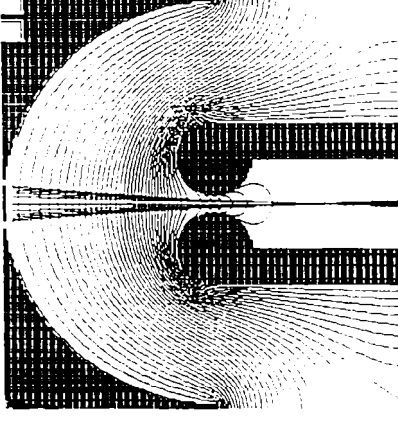


Fig. 5.32.



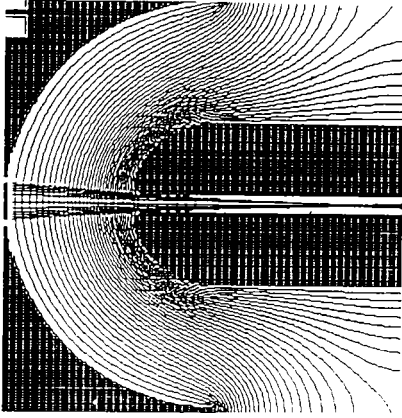


Fig. 5.33.

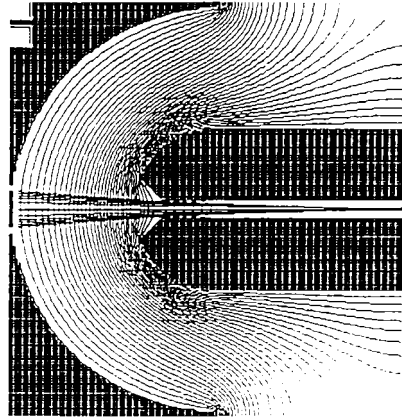


Fig. 5.34.

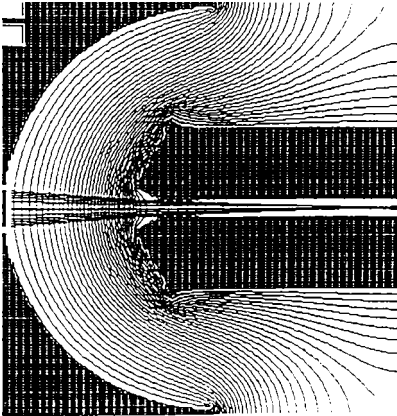


Fig. 5.35.

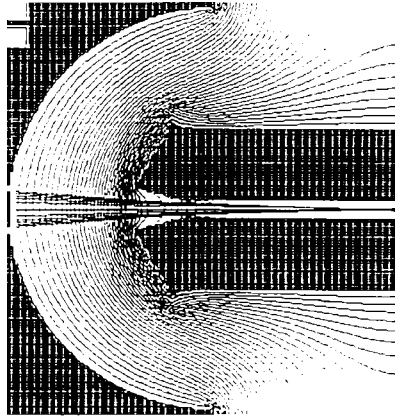


Fig. 5.36.

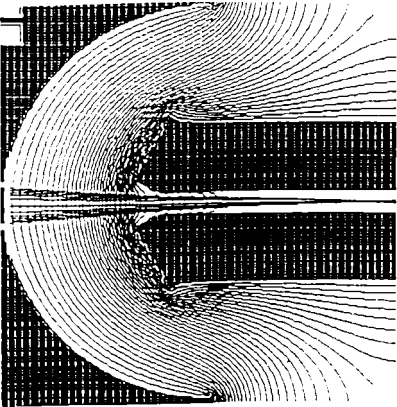


Fig. 5.37.

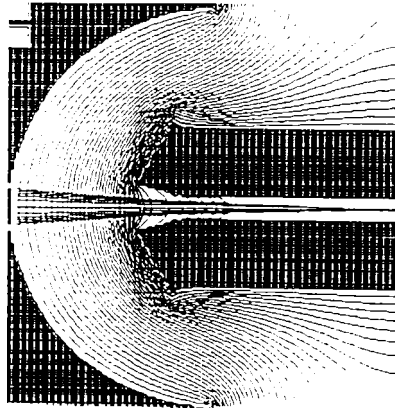


Fig. 5.38.

$d_a = 1,3$  mm, formă ce este prezentată în figurile 5.28, 5.29 și 5.30.

Se observă că, la intrare în apertura anodică, fasciculul de electroni lovește anodul. Acest fenomen ar putea fi evitat mărind tensiunea pe electrodul Wehnelt, caz în care focalizarea fasciculului este defavorabilă, sau prin mărirea diametrului  $d_a$ , caz în care se modifică valoarea raportului  $r_c / r_a = 2,5$  calculată în paragraful 5.3.2. În variantele din figurile 5.37 și 5.38 diametrul aperturii anodice este mărit la valoarea  $d_a = 2$  mm, observându-se că nu apar modificări ale formei fasciculului față de variantele inițiale cu  $d_a = 1,3$  mm, prezentate în figurile 5.35 și 5.38. De regulă, diametrul aperturii anodice trebuie păstrat la valoarea calculată pe o anumită lungime la intrarea în anod a fasciculului, practicându-se o teșirea aperturii anodice.

Au fost testate aperturi anodice cu teșiri la unghiuri de  $90^\circ$  (figurile 5.33 și 5.34),  $60^\circ$  (figurile 5.35 și 5.37) și  $30^\circ$  (figurile 5.27, 5.36 și 5.38), cu diverse adâncimi de teșire. Influența acestor teșiri asupra formei fasciculului este relativ mică, dar din punctul de vedere al evitării supraîncălzirii anodului sunt preferate teșirile din figurile 5.27, 5.37 și 5.38.

#### 5.3.4. Aspecte privind traiectoriile electronilor

În cadrul modelării pe calculator s-a urmărit studierea unor aspecte legate de influența energiei inițiale a electronului asupra traiectoriei acestuia în zona electrostatică a tunului electronic.

În cazul tunurilor electronice care funcționează în regim de sarcină spațială, se formează în fața catodului un nor de electroni, care constituie o barieră de potențial pentru electronii ce urmează să fie emiși de catod. Practic, din acest nor electronic, alimentat permanent de catod, sunt accelerați electronii în câmpul electrostatic dintre catod, electrodul Wehnelt și anod. Ei părăsesc norul electronic sub diverse unghiuri și cu diverse energii inițiale, care au o anumită influență asupra traiectoriei lor. În cele prezentate în continuare nu s-a considerat influența unghiului inițial de pornire a electronului ci s-a luat pentru toți electronii o direcție de plecare perpendiculară pe suprafața catodului.

Studiul s-a efectuat pe tunuri electronice triodă care au ca parametri de bază:

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1. Puterea tunului electronic                      | $W = 1,5$ kW        |
| 2. Tensiunea de accelerare                         | $U = 35$ kV         |
| 3. Curent fascicul                                 | $I \approx 45$ mA   |
| 4. Catod cu încălzire directă executat din tantal. |                     |
| 5. Diametrul catodului                             | $d_c = 3,2$ mm      |
| 6. Diametrul aperturii anodice                     | $d_a = 1,3$ mm      |
| 7. Distanța focală                                 | $S_0 \approx 29$ mm |

8. Densitatea de putere estimată în cross-over  $w_0 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$

S-a considerat un nor electronic sub forma unui disc de același diametru cu catodul, paralel cu acesta și aflat în fața lui la 0,4 mm. Acest disc a fost împărțit în 10 zone de arie egală și, cu ipoteza că norul electronic are o densitate de emisie uniform distribuită pe toată suprafața, fiecărei zone îi corespunde o traiectorie, [24]. Electronii pornesc din norul electronic de la o rază corespunzătoare razei medii a fiecărei zone și perpendicular pe suprafața norului.

Din punctul de vedere al energiei inițiale a electronului, au fost considerate trei tipuri de fascicule de electroni : primul cu energie inițială  $E = 0 \text{ eV}$ , al doilea cu  $E = 0,5 \text{ eV}$  și al treilea cu  $E = 1 \text{ eV}$ .

Au fost trasate și liniile echipotențiale pentru valorile - 1 V, - 10 V, - 100 V, - 1 000 V, - 2 000 V, ... , - 80 000 V, pentru a se observa configurația câmpului electrostatic în fiecare caz.

Pentru fiecare din cele nouă configurații, materialul grafic este prezentat pe două pagini alăturate sub forma unor "matrici" cu trei linii și patru coloane.

Pe prima linie sunt fascicule cu energie inițială 0 eV, pe a doua linie cu 0,5 eV, iar pe a treia cu 1 eV.

Pe prima coloană se prezintă configurația câmpului când fasciculul este "tăiat" ca urmare a tensiunii de negativare pe electrodul Wehnelt.

Pe coloana a doua, în toate cele trei figuri, potențialul electrodului Wehnelt este același și corespunde configurației câmpului electrostatic necesar focalizării unui fascicul cu energie inițială 0 eV, focalizare ce se observă în figura de sus. În figura din mijloc și cea de jos sunt prezentate fasciculele cu energie inițială 0,5 eV, respectiv 1 eV.

Pe coloana a treia, în toate cele trei figuri, potențialul electrodului Wehnelt este același și corespunde configurației câmpului electrostatic necesar focalizării unui fascicul cu energie inițială 0,5 eV, focalizare ce se observă în figura din mijloc. În figura de sus și cea de jos sunt prezentate fasciculele cu energie inițială 0 eV, respectiv 1 eV.

Pe coloana a patra, în toate cele trei figuri, potențialul electrodului Wehnelt este același și corespunde configurației câmpului electrostatic necesar focalizării unui fascicul cu energie inițială 1 eV, focalizare ce se observă în figura de jos. În figura de sus și cea din mijloc sunt prezentate fasciculele cu energie inițială 0 eV, respectiv 0,5 eV.

Toate figurile sunt, din punct de vedere al dimensiunilor liniare, la scara 2 : 1.

La fiecare figură se indică tensiunea  $U$  de negativare a electrodului Wehnelt și energia inițială  $E$  a electronilor. Tensiunea de negativare a electrodului Wehnelt este diferența de potențial dintre acesta și catod. Astfel, o tensiune de negativare de - 2 000 V corespunde unui potențial al electrodului Wehnelt de - 37 000 V, respectiv unui potențial al catodului de - 35 000 V.



În tabelul 5.1 sunt prezentate numerele figurilor corespunzătoare configurațiilor și parametrilor anterior prezentați.

Tabelul 5.1

Nr. crt.	Configurația geometrică	Configurația câmpului electrostatic corespunzătoare tăierii fasciculului			Configurația câmpului electrostatic corespunzătoare focalizării fasciculului		
		0 eV	0,5 eV	1 eV	0 eV	0,5 eV	1 eV
1.	Conică simplă ( pag. 102 - 103)	5.40	5.41	5.42	5.43, 5.44, 5.45	5.46, 5.47, 5.48	5.49, 5.50, 5.51
2.	Cilindrică deschisă ( pag. 104 - 105)	5.52	5.53	5.54	5.55, 5.56, 5.57	5.58, 5.59, 5.60	5.61, 5.62, 5.63
3.	Cilindrică închisă ( pag. 106 - 107)	5.64	5.65	5.66	5.67, 5.68, 5.69	5.70, 5.71, 5.72	5.73, 5.74, 5.75
4.	Pierce ( pag. 108 - 109)	5.76	5.77	5.78	5.79, 5.80, 5.81	5.82, 5.83, 5.84	5.82, 5.83, 5.84
5.	Pierce cu anod toroidal ( pag. 110 - 111)	5.88	5.89	5.90	5.91, 5.92, 5.93	5.94, 5.95, 5.96	5.97, 5.98, 5.99
6.	Conică compusă ( pag. 112 - 113)	5.100	5.101	5.102	5.103, 5.104, 5.105	5.106, 5.107, 5.108	5.109, 5.110, 5.111
7.	Conică cilindrică (pag. 114 - 115)	5.112	5.113	5.114	5.115, 5.116, 5.117	5.118, 5.119, 5.120	5.121, 5.122, 5.123
8.	Pierce cu anod tronconic și apertură neteșită (pag. 116 - 117)	5.124	5.125	5.126	5.127, 5.128, 5.129	5.130, 5.131, 5.132	5.133, 5.134, 5.135
9.	Pierce cu anod tronconic și apertură teșită la 30° ( pag. 118 - 119)	5.136	5.137	5.138	5.139, 5.140, 5.141	5.142, 5.143, 5.144	5.145, 5.146, 5.147

Din figurile prezentate rezultă că energia inițială a electronului are o influență foarte mare asupra traiectoriei sale.

Se observă diferențe mari între tensiunile de tăiere a fasciculului pentru cele trei valori ale energiei considerate, pentru o energie inițială de 0,5 eV tensiunea de tăiere fiind de circa 6 ori mai mare decât la 0 eV, iar pentru 1 eV de circa 20 de ori mai mare.

În aprecierea tensiunii de focalizare trebuie ținut cont de distribuția statistică a vitezelor termice ale electronilor, deci de energia lor inițială, deoarece se observă că dacă un fascicul cu o anumită energie inițială, focalizează cele cu alte energii lovesc anodul, ceea ce provoacă încălzirea acestuia și o pierdere de densitate de putere a fasciculului.

În cazul emisie termoelectronice, Hawkes și Kasper, [21], propun următoarele relații pentru densitatea de repartiție normalizată, funcția de repartiție și valoarea medie a energiei E a electronilor din norul electronic aflat în fața catodului:

$$f(E) = \frac{E}{(k \cdot T)^2} \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right) \tag{5.16}$$

$$F(E) = \int_0^E \frac{x}{(k \cdot T)^2} \exp\left(-\frac{x}{k \cdot T}\right) dx \tag{5.17}$$

$$E_m = \int_0^\infty \frac{E^2}{(k \cdot T)^2} \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right) dE \tag{5.18}$$

unde k este constanta lui Boltzmann iar T temperatura absolută a catodului.

Din reprezentarea grafică a ultimelor trei relații, figura 5.39, se observă că circa 75% din electroni au energia cuprinsă între 0 și 0,5 eV, iar energia medie a electronilor este de 0,39 eV, astfel încât acești electroni, cu energie sub 0,5 eV, au o influență preponderentă în focalizarea fasciculului de electroni.

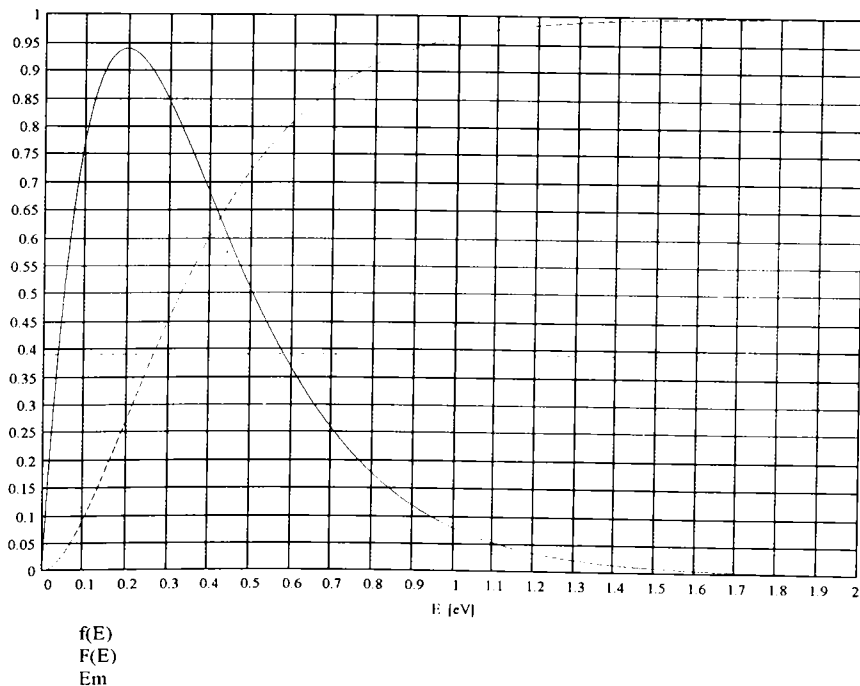


Fig. 5.39.

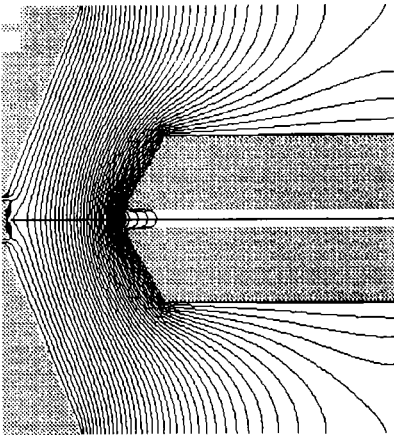


Fig. 5.40.  $U = -3650 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

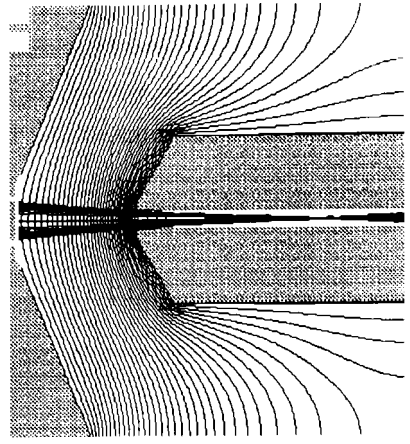


Fig.5.43.  $U = -200 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

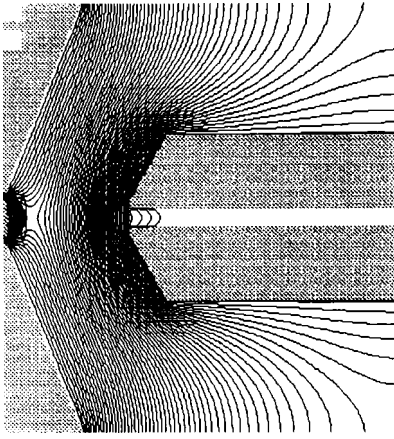


Fig. 5.41.  $U = -20\ 000 \text{ V}$  ;  $E = 0,5 \text{ eV}$

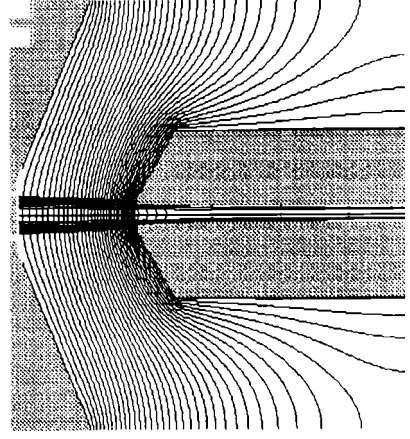


Fig. 5.44.  $U = -200 \text{ V}$  ;  $E = 0,5 \text{ eV}$

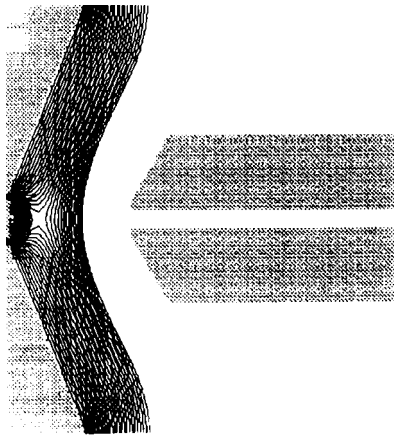


Fig. 5.42.  $U = -34\ 000 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

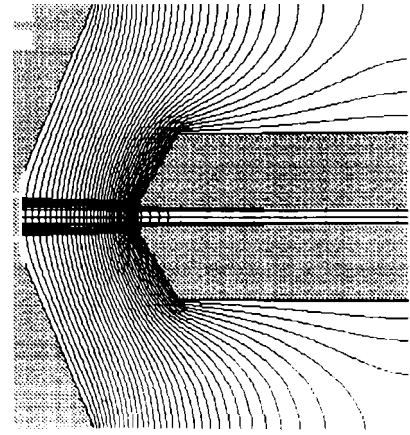


Fig. 5.45.  $U = -200 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

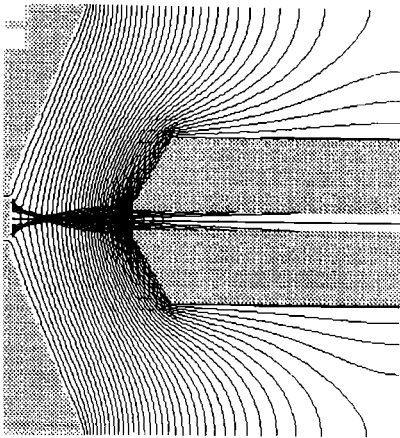


Fig. 5.46.  $U = -1\ 800\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

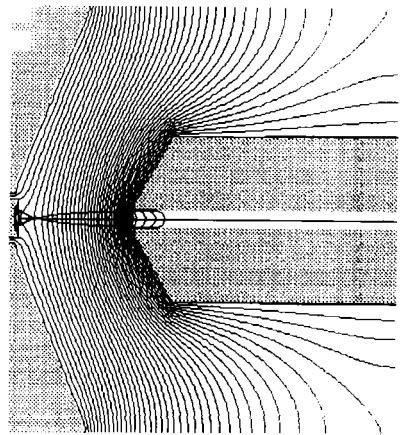


Fig. 5.49.  $U = -3\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

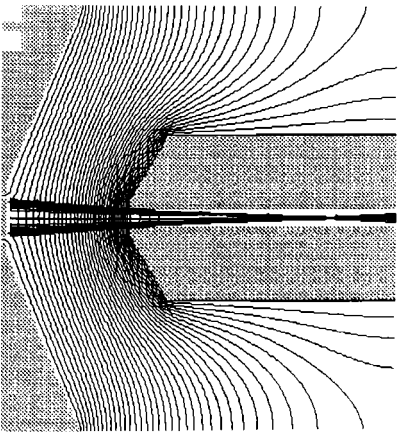


Fig. 5.47.  $U = -1\ 800\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

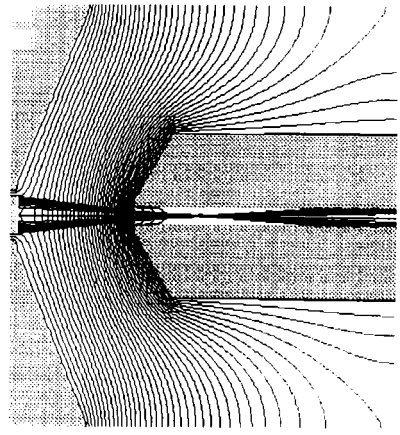


Fig. 5.50.  $U = -3\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

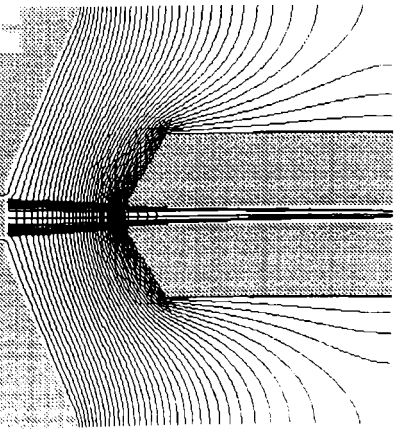


Fig. 5.48.  $U = -1\ 800\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

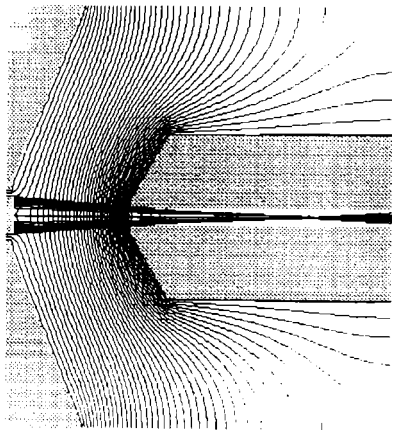


Fig. 5.51.  $U = -3\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$



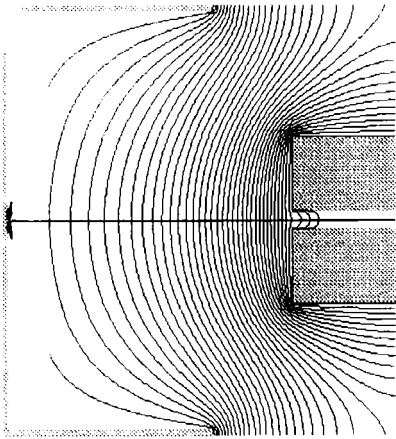


Fig. 5.52.  $U = -950 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

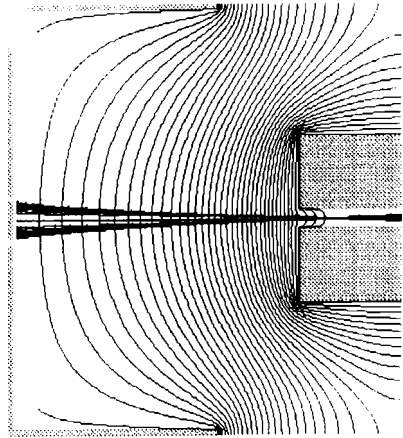


Fig. 5.55.  $U = -150 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

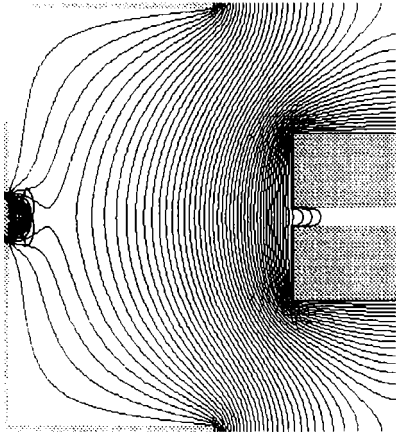


Fig. 5.53.  $U = -12\,750 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

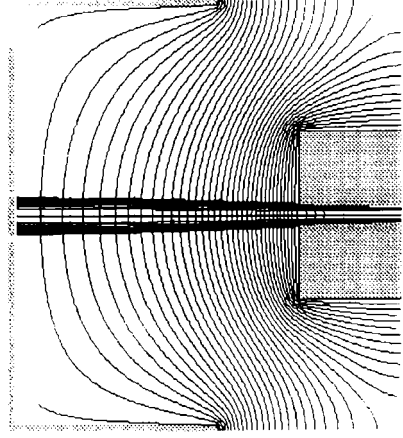


Fig. 5.56.  $U = -150 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

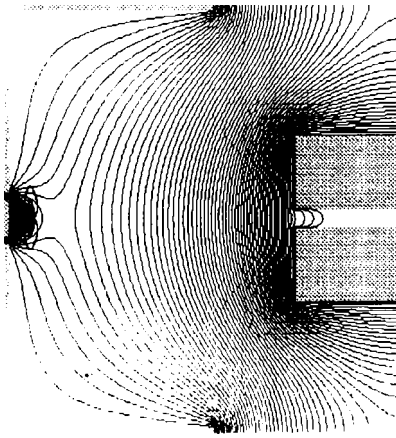


Fig. 5.54.  $U = -23\,000 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

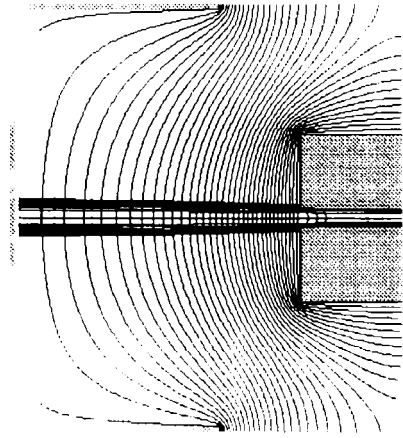


Fig. 5.57.  $U = -150 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

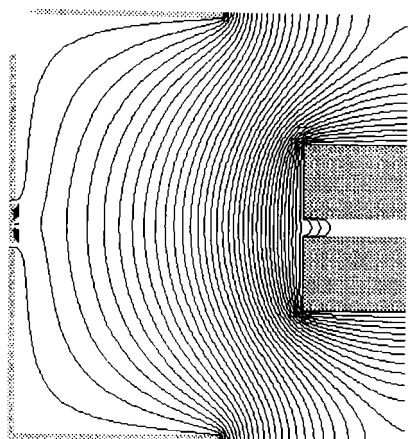


Fig. 5.58.  $U = -1\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

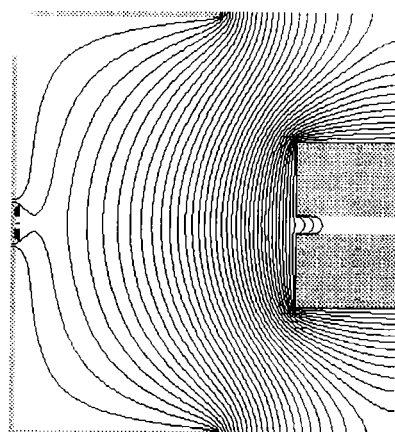


Fig. 5.61.  $U = -2\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

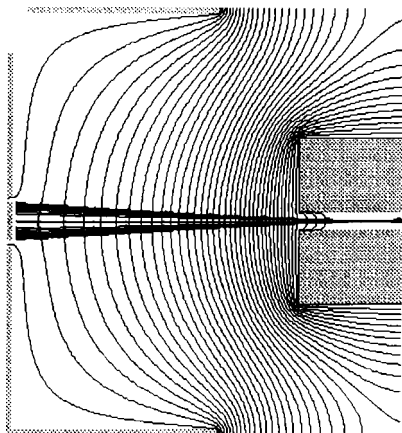


Fig. 5.59.  $U = -1\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

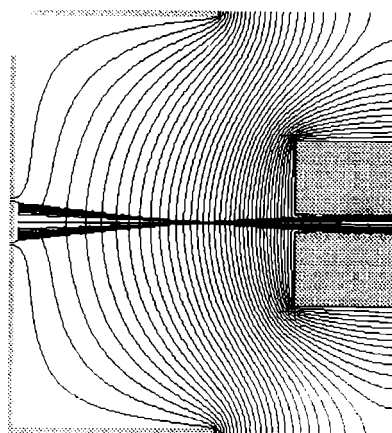


Fig. 5.62.  $U = -2\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

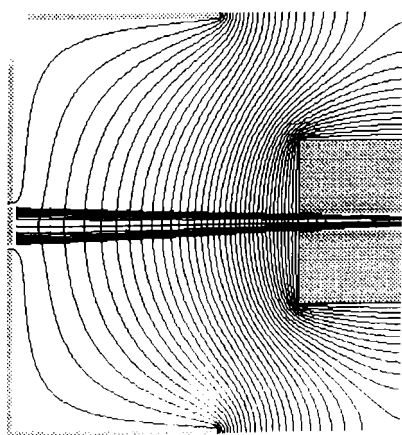


Fig. 5.60.  $U = -1\ 500\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

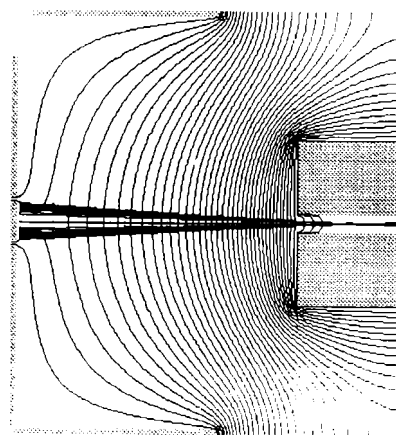


Fig. 5.63.  $U = -2\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

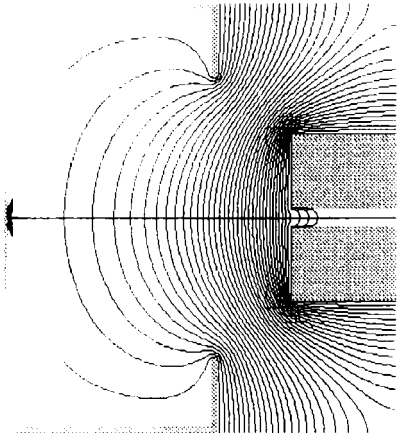


Fig. 5.64.  $U = -550 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

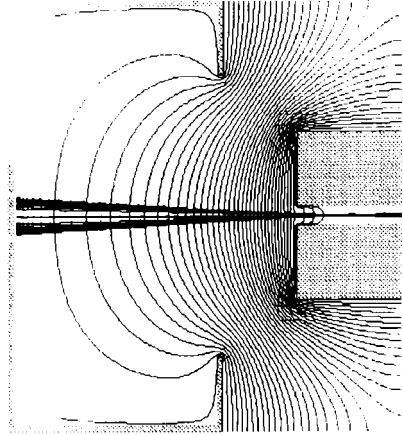


Fig. 5.67.  $U = -50 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

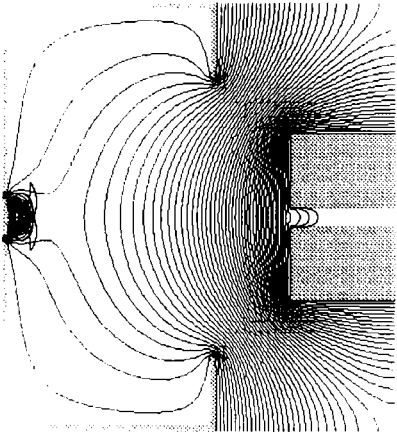


Fig. 5.65.  $U = -11\,300 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

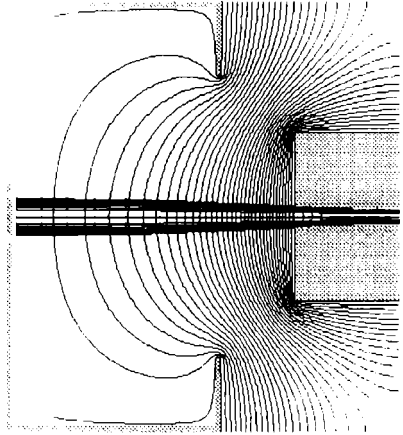


Fig. 5.68.  $U = -50 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

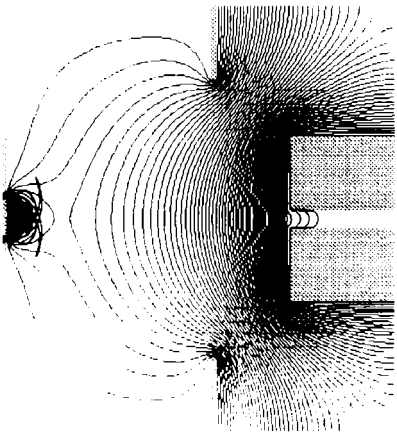


Fig. 5.66.  $U = -20\,800 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

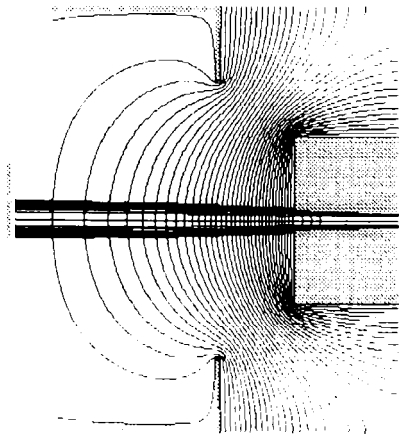


Fig. 5.69.  $U = -50 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

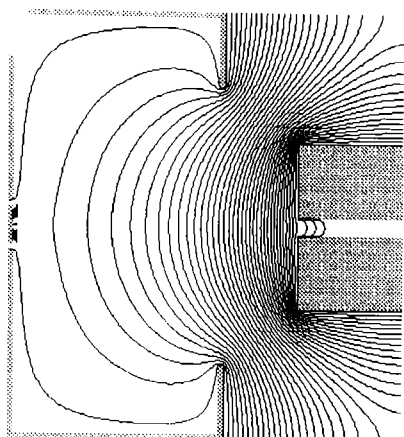


Fig. 5.70.  $U = -1200 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

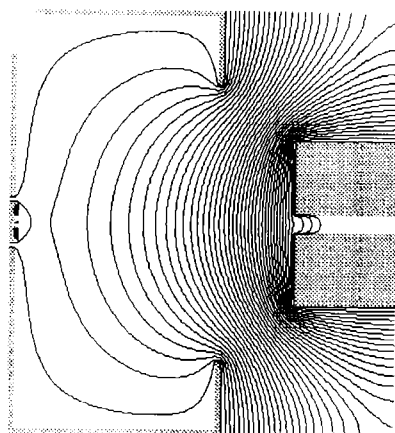


Fig. 5.73.  $U = -2300 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

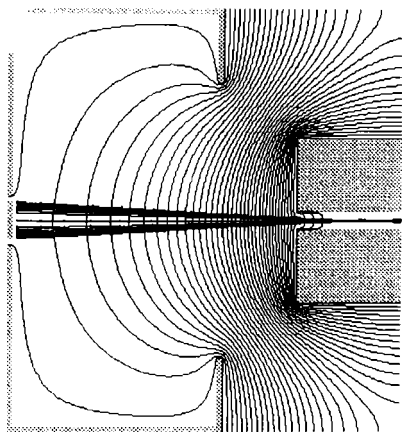


Fig. 5.71.  $U = -1200 \text{ V}$  ;  $E = 0,5 \text{ eV}$

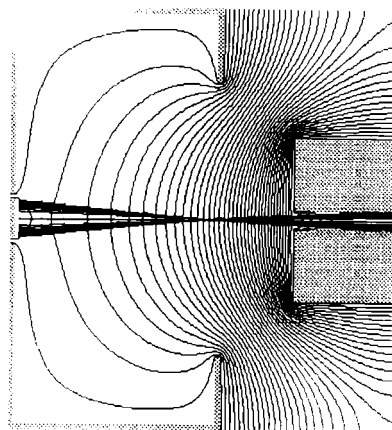


Fig. 5.74.  $U = -2300 \text{ V}$  ;  $E = 0,5 \text{ eV}$

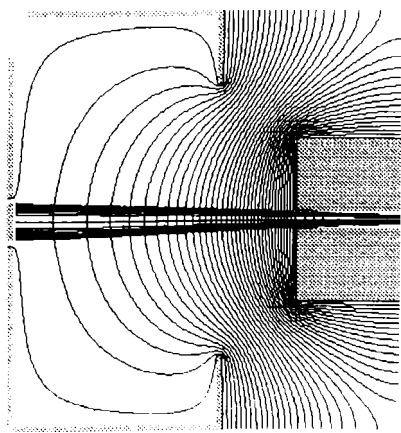


Fig. 5.72.  $U = -1200 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

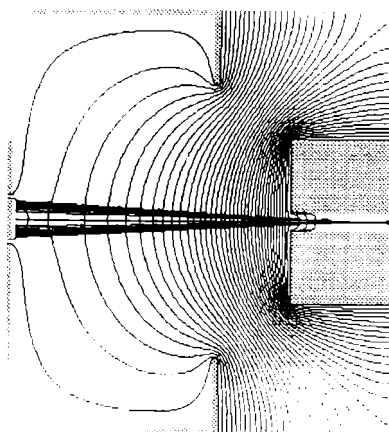


Fig. 5.75.  $U = -2300 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$



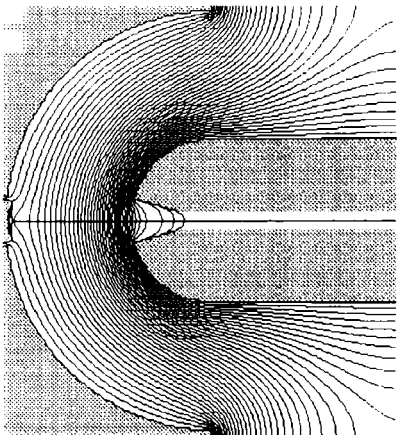


Fig. 5.76.  $U = -3\ 100\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

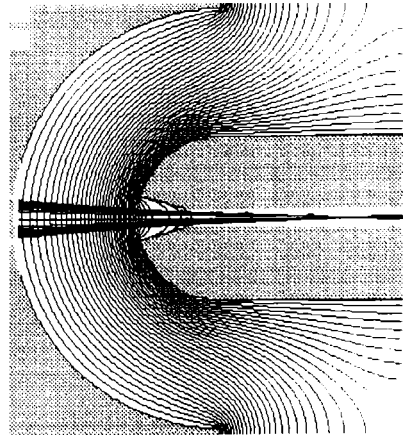


Fig. 5.79.  $U = -150\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

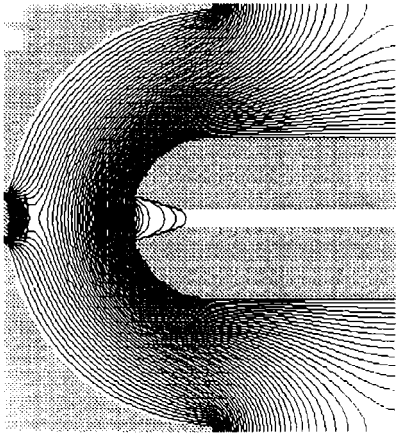


Fig. 5.77.  $U = -18\ 900\ \text{V}$  ;  $E = 0.5\ \text{eV}$

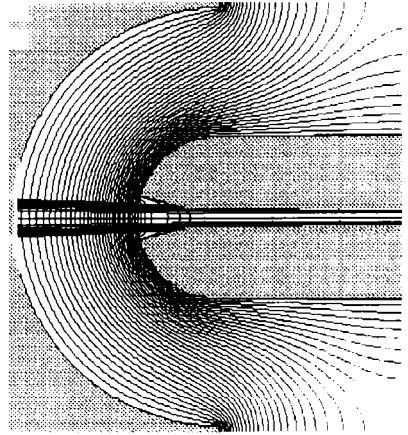


Fig. 5.80.  $U = -150\ \text{V}$  ;  $E = 0.5\ \text{eV}$

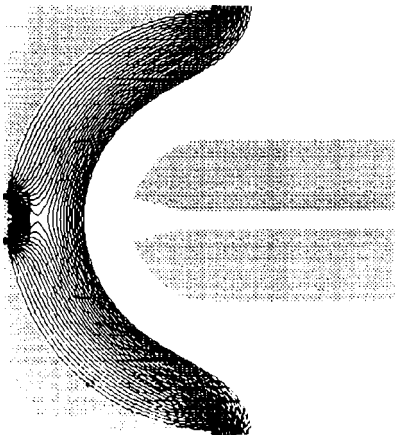


Fig. 5.78.  $U = -31\ 600\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

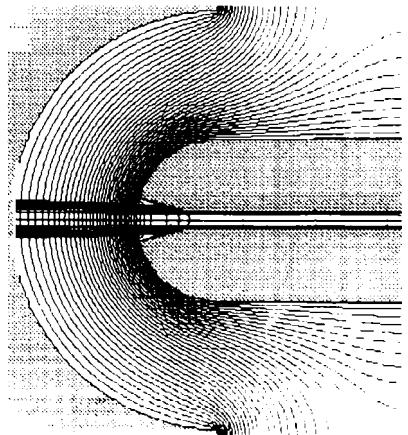


Fig. 5.81.  $U = -150\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

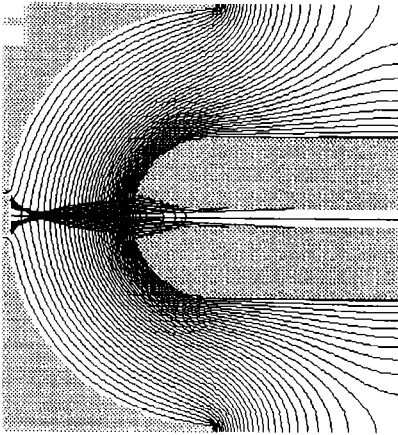


Fig. 5.82.  $U = -1\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

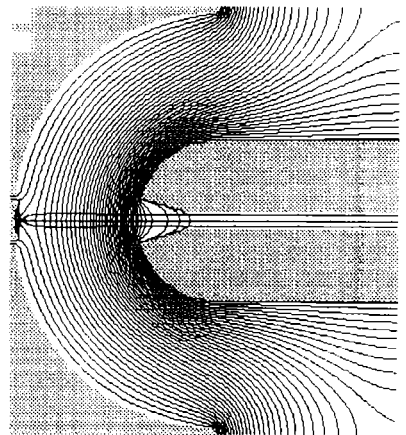


Fig. 5.85.  $U = -3\ 000\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$

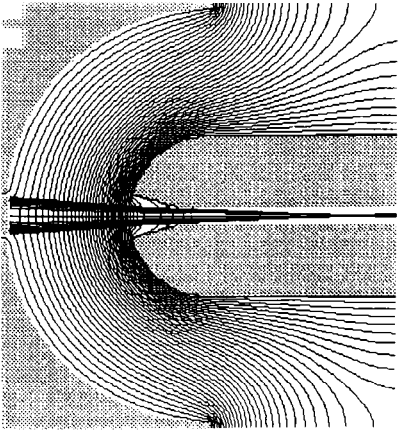


Fig. 5.83.  $U = -1\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

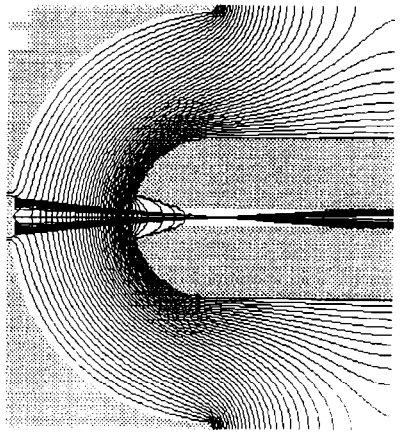


Fig. 5.86.  $U = -3\ 000\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$

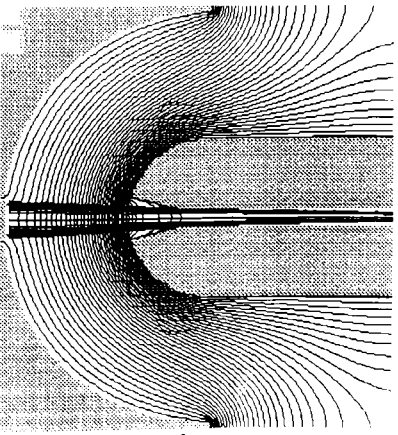


Fig. 5.84.  $U = -1\ 700\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

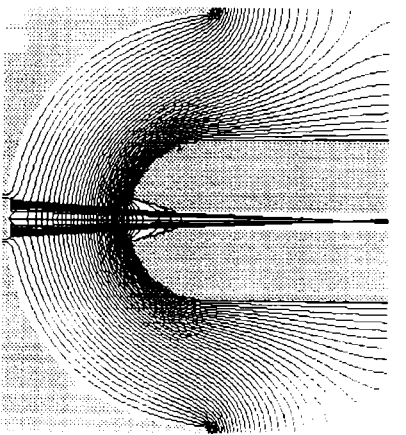
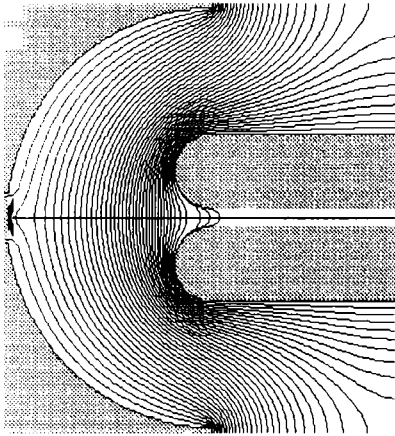
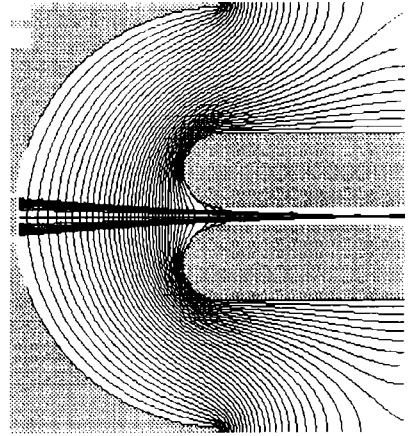
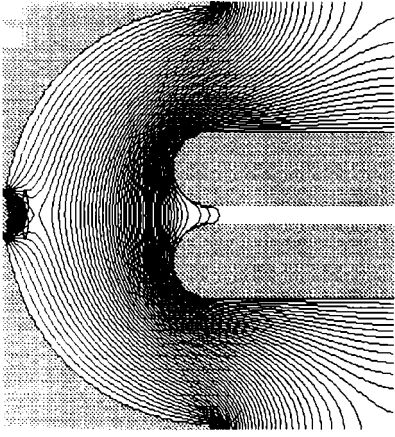
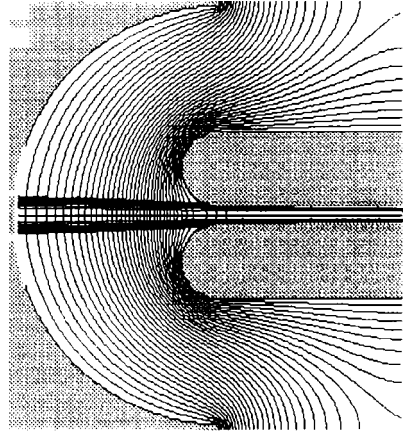
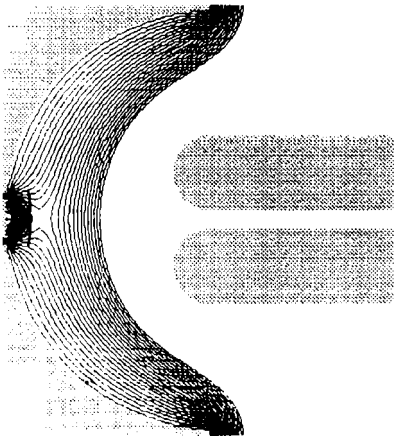
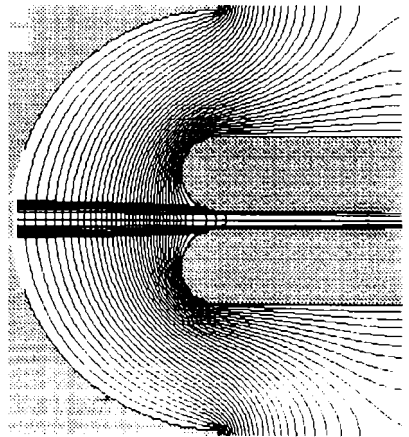


Fig. 5.87.  $U = -3\ 000\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$

Fig. 5.88.  $U = -2\ 100\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$ Fig. 5.91.  $U = -100\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$ Fig. 5.89.  $U = -16\ 100\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$ Fig. 5.92.  $U = -100\ \text{V}$  ;  $E = 0,5\ \text{eV}$ Fig. 5.90.  $U = -27\ 600\ \text{V}$  ;  $E = 1\ \text{eV}$ Fig. 5.93.  $U = -100\ \text{V}$  ;  $E = 0\ \text{eV}$



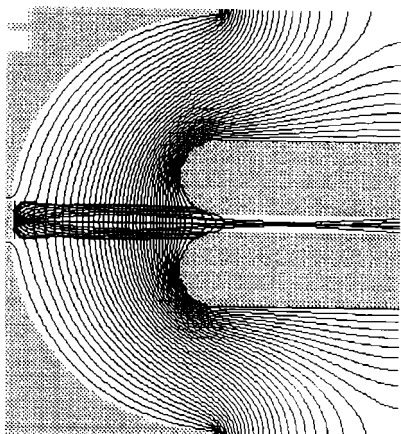


Fig. 5.94.  $U = -1700 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

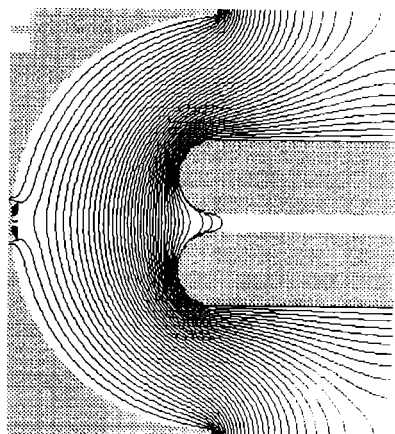


Fig. 5.97.  $U = -3000 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

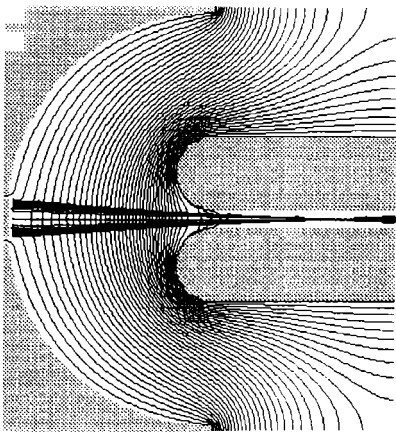


Fig. 5.95.  $U = -1700 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

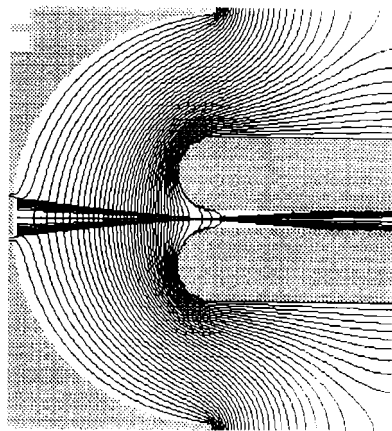


Fig. 5.98.  $U = -3000 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

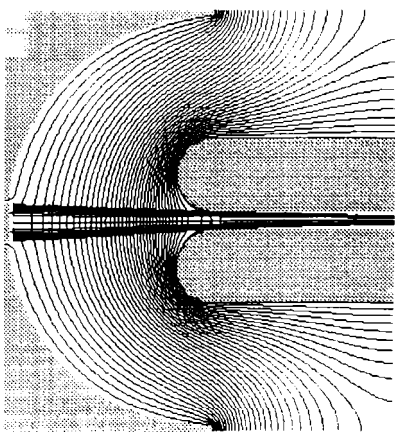


Fig. 5.96.  $U = -1700 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

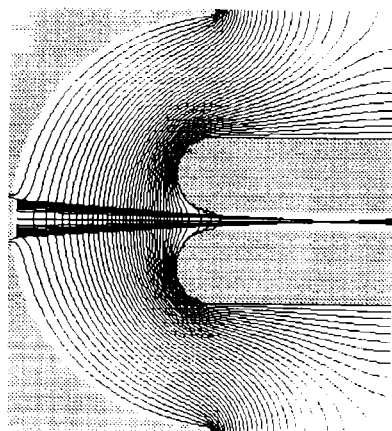


Fig. 5.99.  $U = -3000 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

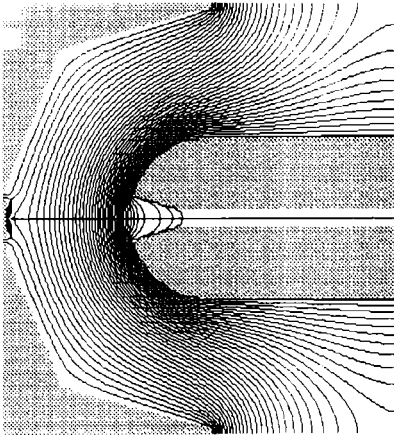


Fig. 5.100.  $U = -3\ 000\text{ V}$  ;  $F = 0\text{ eV}$

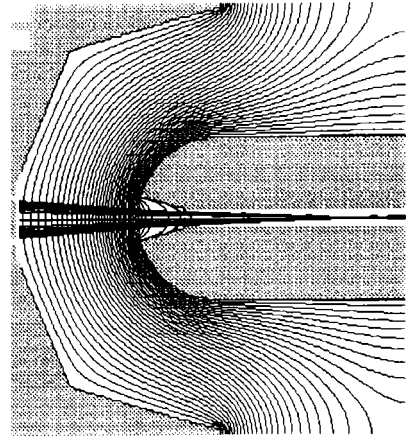


Fig. 5.103.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

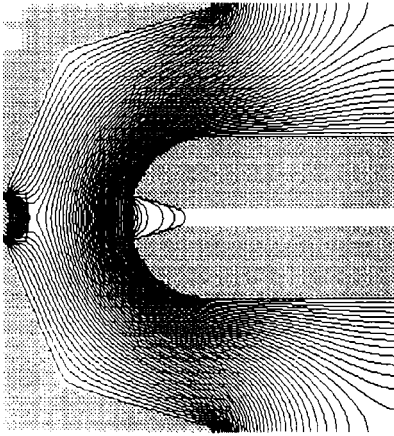


Fig. 5.101.  $U = -18\ 400\text{ V}$  ;  $E = 0,5\text{ eV}$

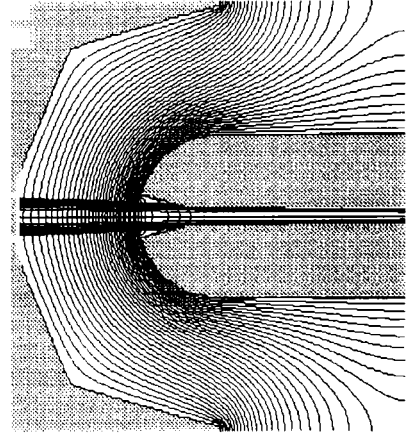


Fig. 5.104.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 0,5\text{ eV}$

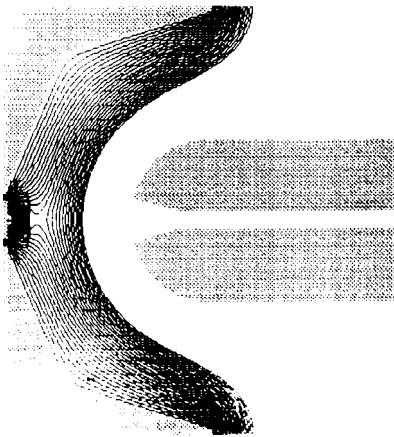


Fig. 5.102.  $U = -31\ 000\text{ V}$  ;  $F = 1\text{ eV}$

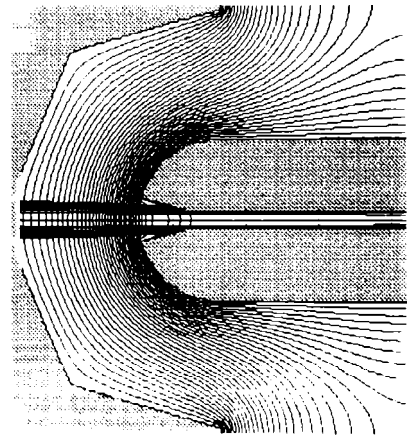


Fig. 5.105.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

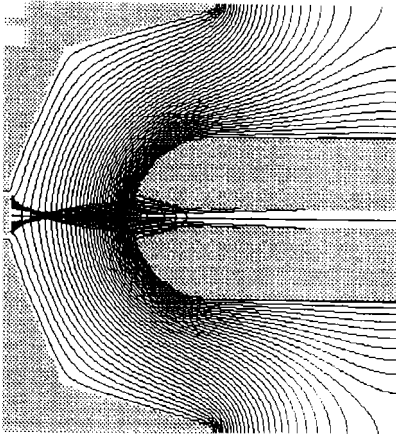


Fig. 5.106.  $U = -1500 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

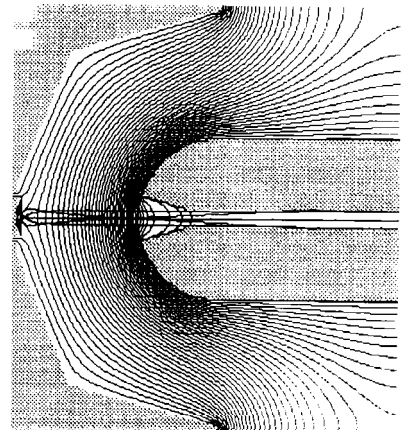


Fig. 5.109.  $U = -2800 \text{ V}$  ;  $E = 0 \text{ eV}$

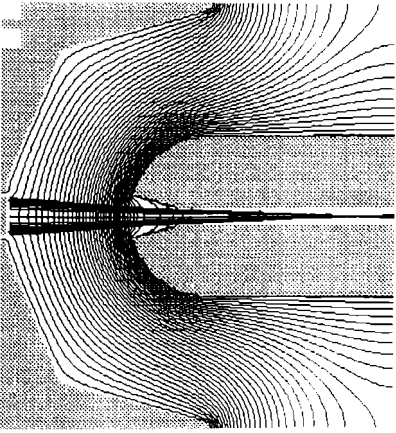


Fig. 5.107.  $U = -1500 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

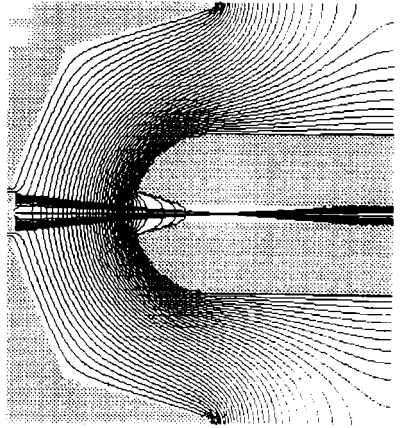


Fig. 5.110.  $U = -2800 \text{ V}$  ;  $E = 0.5 \text{ eV}$

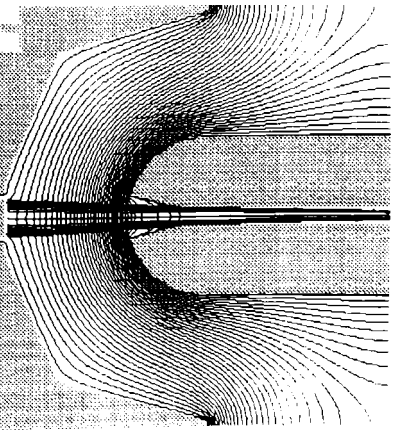


Fig. 5.108.  $U = -1500 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$

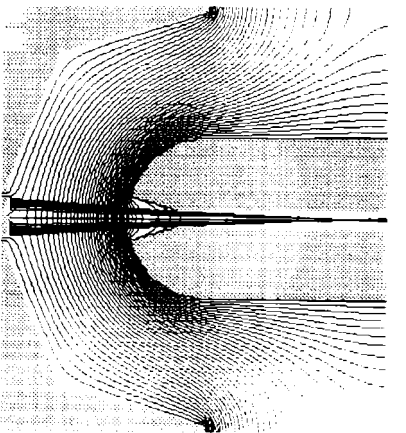
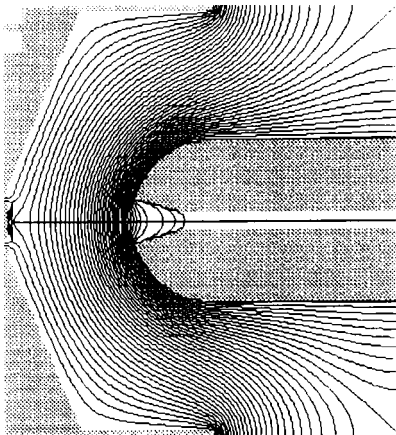
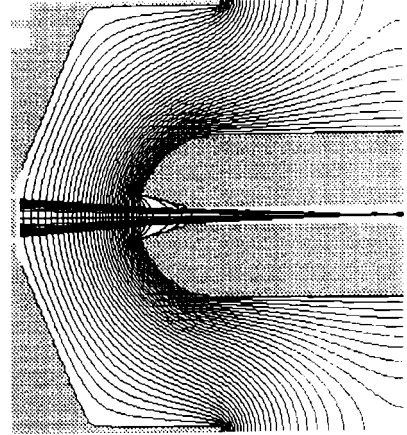
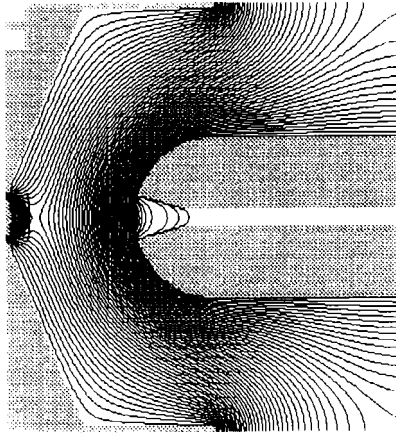
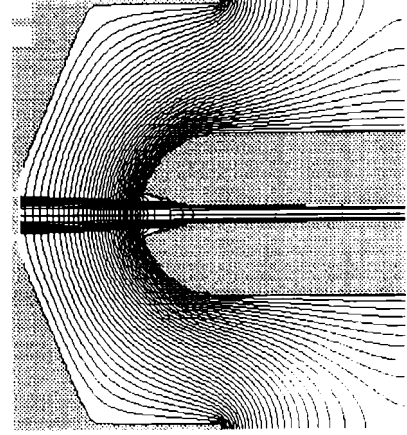
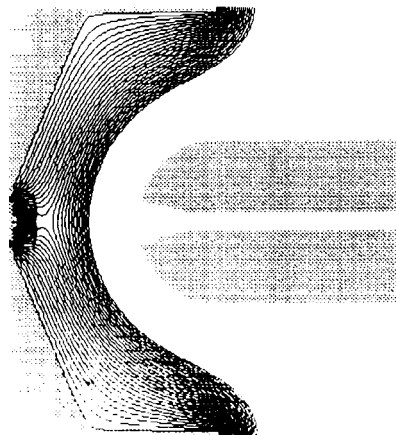
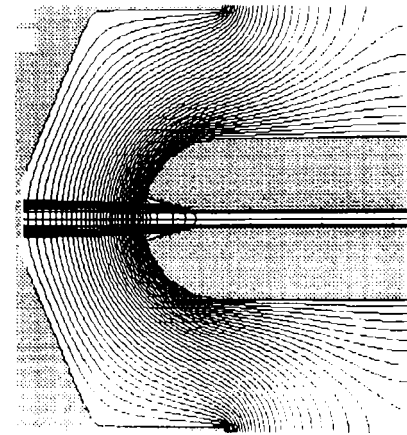


Fig. 5.111.  $U = -2800 \text{ V}$  ;  $E = 1 \text{ eV}$



Fig. 5.112.  $U = -3\,000\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$ Fig. 5.115.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$ Fig. 5.113.  $U = -18\,600\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$ Fig. 5.116.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$ Fig. 5.114.  $U = -31\,200\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$ Fig. 5.117.  $U = -50\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

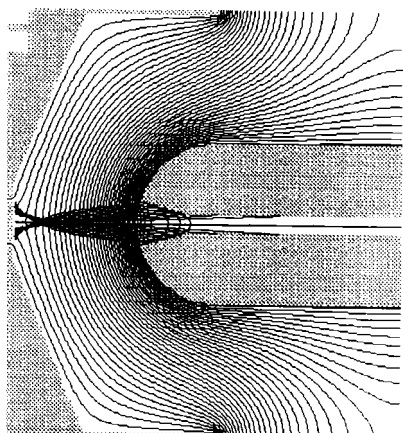


Fig. 5.118.  $U = -1\,700\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

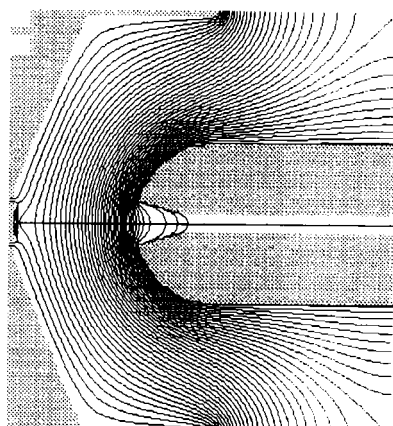


Fig. 5.121.  $U = -3\,000\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

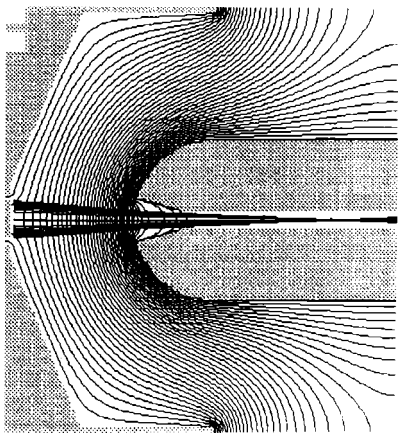


Fig. 5.119.  $U = -1\,700\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$

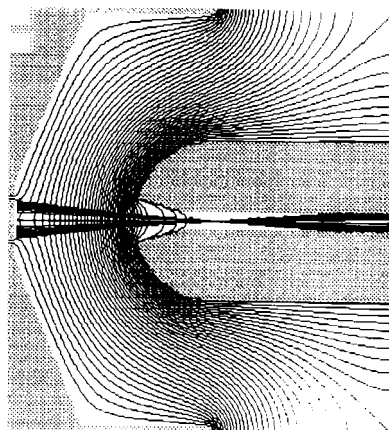


Fig. 5.122.  $U = -3\,000\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$

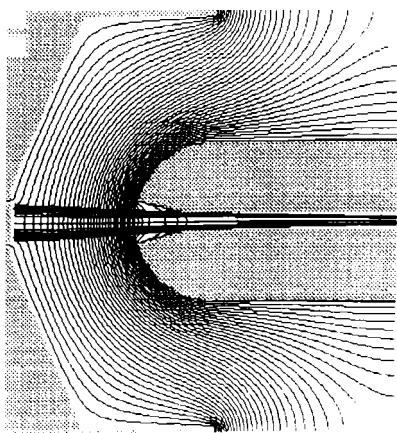


Fig. 5.120.  $U = -1\,700\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

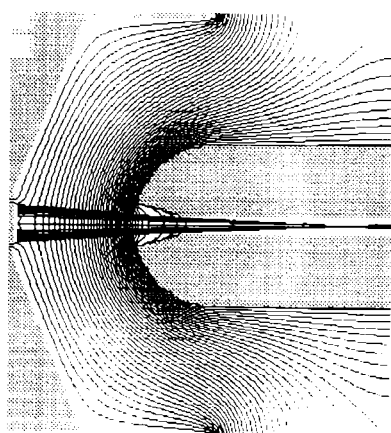


Fig. 5.123.  $U = -3\,000\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$



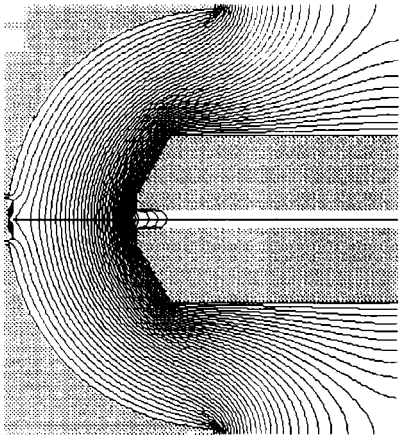


Fig. 5.124.  $U = -3\ 300\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

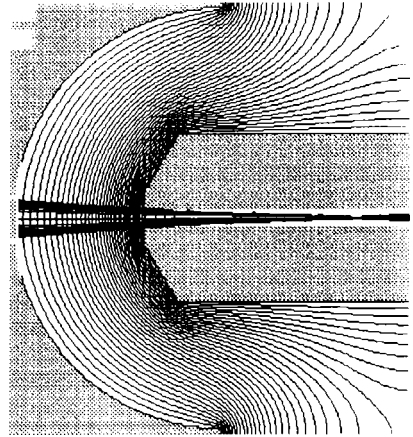


Fig. 5.127.  $U = -120\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

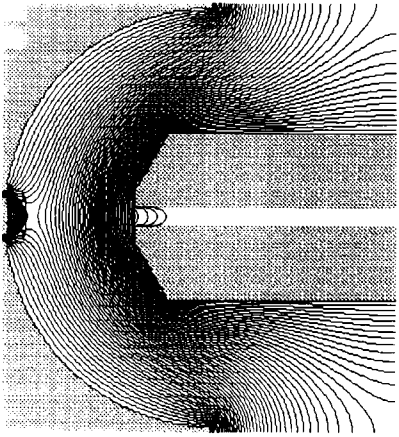


Fig. 5.125.  $U = -19\ 100\text{ V}$  ;  $E = 0,5\text{ eV}$

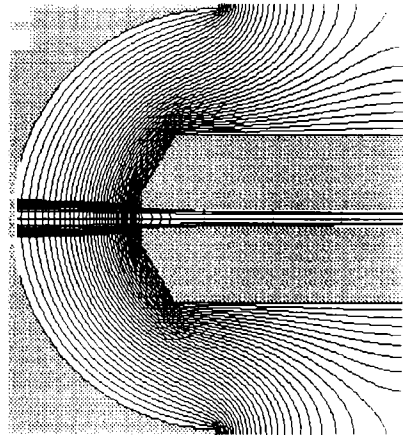


Fig. 5.128.  $U = -120\text{ V}$  ;  $E = 0,5\text{ eV}$

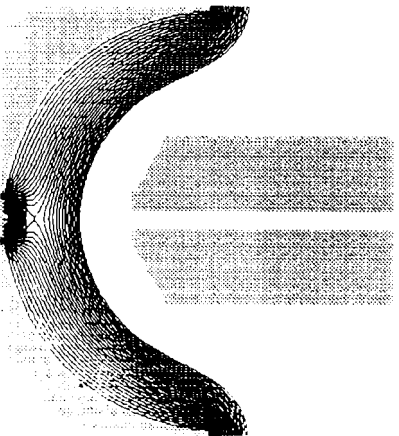


Fig. 5.126.  $U = -31\ 900\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

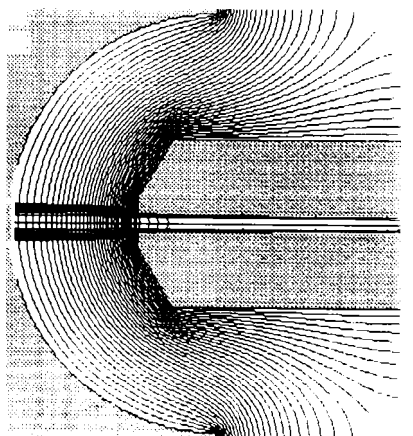


Fig. 5.129.  $U = -120\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

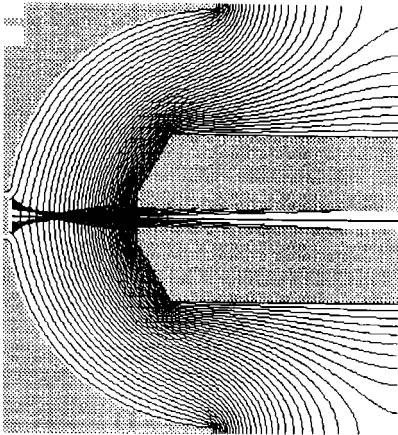


Fig. 5.130.  $U = -1\ 500\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

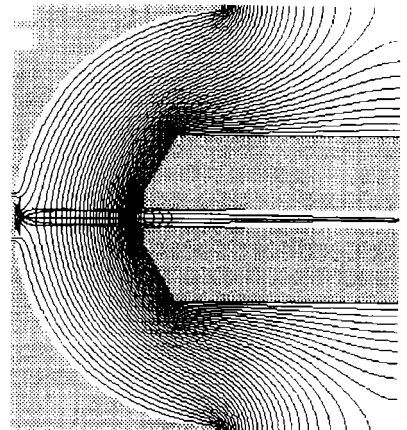


Fig. 5.133.  $U = -3\ 000\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$

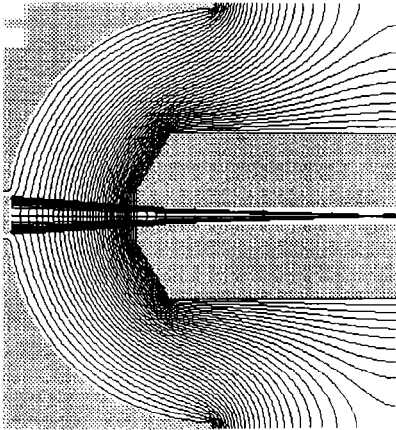


Fig. 5.131.  $U = -1\ 500\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$

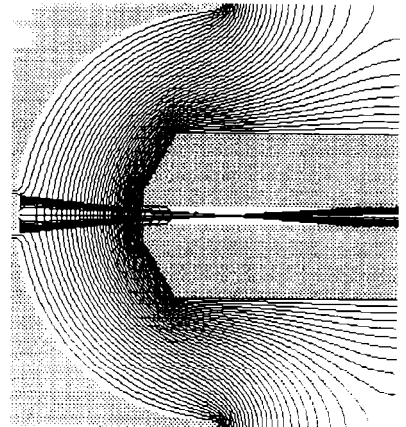


Fig. 5.134.  $U = -3\ 000\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$

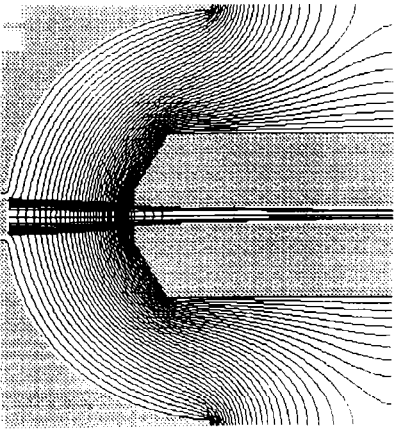


Fig. 5.132.  $U = -1\ 500\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

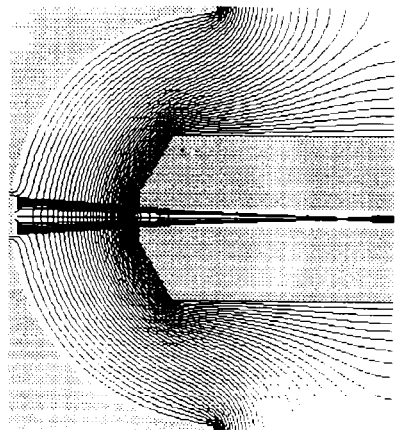
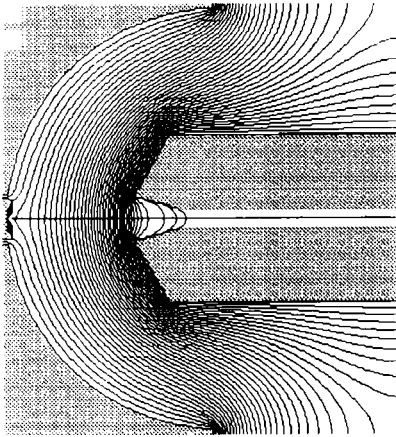
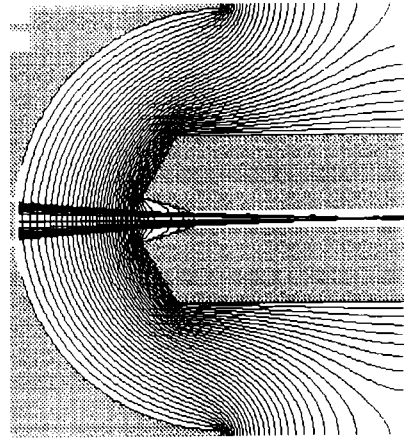
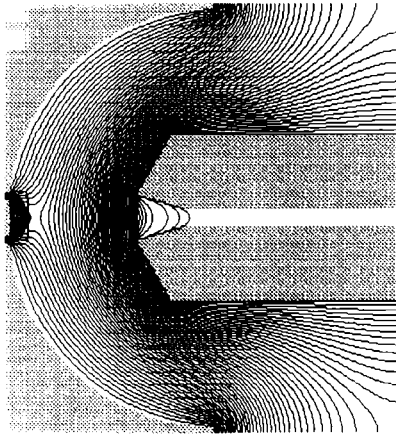
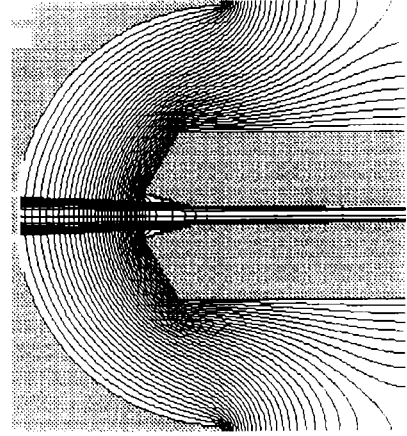
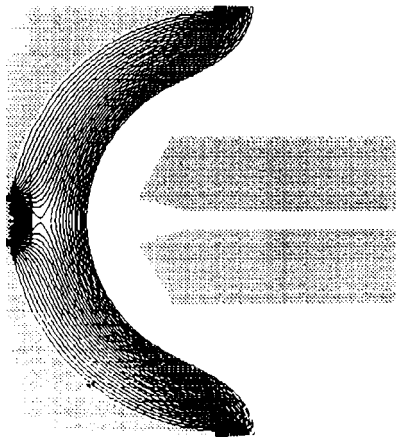
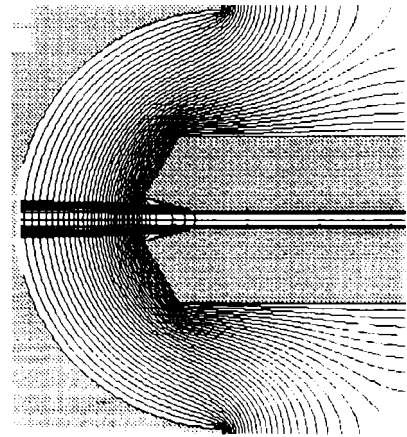


Fig. 5.135.  $U = -3\ 000\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$



Fig. 5.136.  $U = -3\,300\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$ Fig. 5.139.  $U = -170\text{ V}$  ;  $E = 0\text{ eV}$ Fig. 5.137.  $U = -19\,000\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$ Fig. 5.140.  $U = -170\text{ V}$  ;  $E = 0.5\text{ eV}$ Fig. 5.138.  $U = -31\,800\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$ Fig. 5.141.  $U = -170\text{ V}$  ;  $E = 1\text{ eV}$

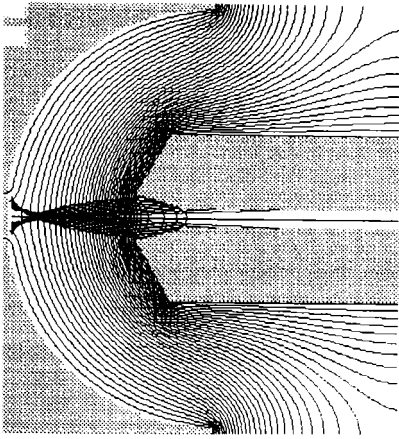


Fig. 5.142.  $U = -1\ 800\ V$  ;  $E = 0\ eV$

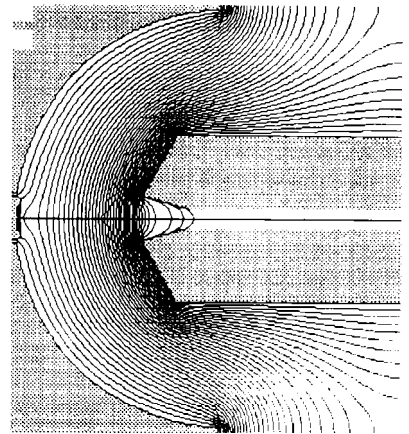


Fig. 5.145.  $U = -3\ 200\ V$  ;  $E = 0\ eV$

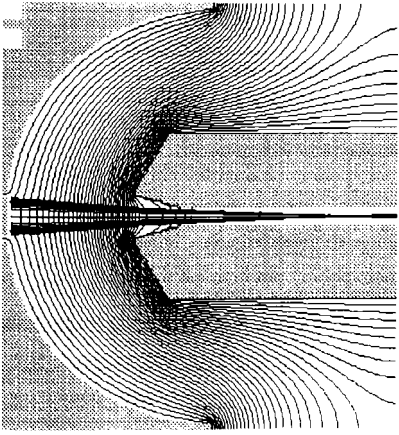


Fig. 5.143.  $U = -1\ 800\ V$  ;  $E = 0.5\ eV$

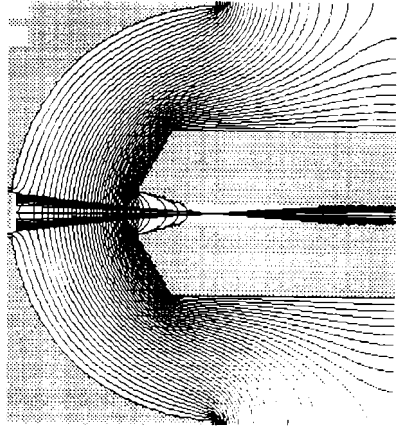


Fig. 5.146.  $U = -3\ 200\ V$  ;  $E = 0.5\ eV$

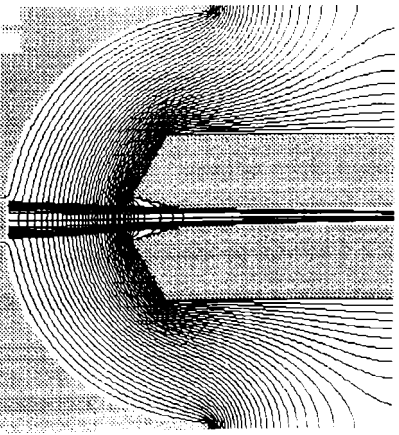


Fig. 5.144.  $U = -1\ 800\ V$  ;  $E = 1\ eV$

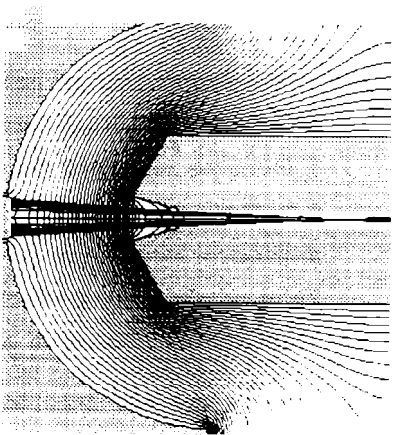


Fig. 5.147.  $U = -3\ 200\ V$  ;  $E = 1\ eV$

## 5.4. Proiectarea constructivă a tunului electronic triodă pentru sudare cu fascicul de electroni

### 5.4.1. Considerații generale

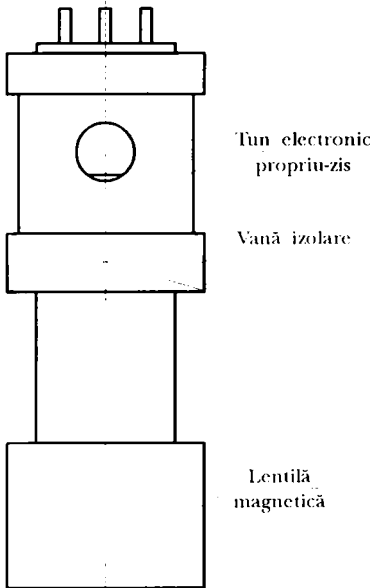


Fig. 5.148.

În cele mai multe cazuri tunul electronic se află într-o incintă separată de camera de sudare, sudarea având loc la o presiune diferită de cea din incinta tunului electronic, astfel încât concepția constructivă de ansamblu a tunului electronic are - în aceste cazuri - structura prezentată în figura 5.148 :

- tunul electronic propriu-zis;
- vana de izolare;
- lentila magnetică.

### 5.4.2. Tunul electronic propriu-zis

Concepția, proiectarea și construcția tunului electronic propriu-zis - format din catod, electrod Wehnelt și anod - consi' uie o problemă complexă din punct de vedere constructiv și tehnologic, impunându-se

o serie de cerințe deosebite dintre care se menționează :

1. Precizie ridicată privind coaxialitatea electrozilor tunului în raport cu axa sistemului electronoptic.
2. Asigurarea fiabilității mecanice și electrice a izolatoarelor tunului electronic la temperaturi înalte de lucru.
3. Necesitatea disipării unei puteri calorice considerabile în electrodul Wehnelt și anod, care se încălzesc la temperaturi importante ca urmare a disipației termice a catodului.
4. Menținerea interstițiilor dintre electrozi la temperaturi înalte de lucru.
5. Realizarea constructivă a ansamblului tunului electronic de așa manieră încât să fie evitate străpungerile între electrozi (10-15 kV/mm în vid și 2-3 kV/mm pe suprafața izolatoarelor).

Pentru îndeplinirea într-o măsură cât mai mare a acestor cerințe, tunul electronic propriu-zis trebuie să constituie un subansamblu independent, montat pe un izolator.

5.4.3. Vana de izolare

Între tunul electronic propriu-zis și lentila magnetică se intercalează o vană prin care se poate realiza izolarea incintei tunului electronic propriu-zis de camera de sudare când în aceasta nu este vid (la introducerea sau scoaterea pieselor, când utilajul este oprit, etc.). Tunul electronic propriu-zis și lentila magnetică sunt montate coaxial pe vana de izolare.

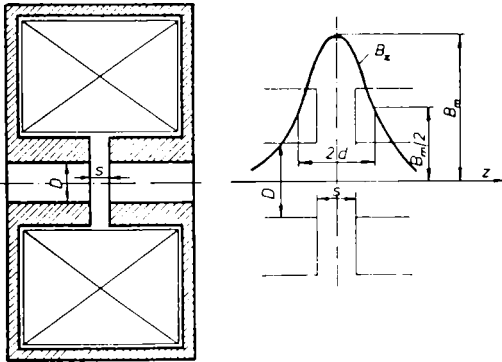


Fig. 5.149.

5.4.4. Lentila magnetică

Lentila magnetică este o bobină cu simetrie axială a inducției magnetice  $B_z$ , figura 5.149, încorporată într-un blindaj din fier "Armco". Marimea inducției  $B_z$  este determinată de numărul de amperi spire al bobinei ( $NI_1$ ), de dimensiunile geometrice ale întrefierului  $s$  și diametrul  $D$  precum și de saturația pieselor polare care alcătuiesc întrefierul. Montarea lentilei magnetice pe vana de izolare se face prin intermediul unei

piese de distanțare, prin care se realizează un anumit grad  $M=a/b < 1$  de micșorare a imaginii din cross-over (figura 5.1) în planul piesei.



Fig. 5.150.



Fig. 5.151.



Fig. 5.152.

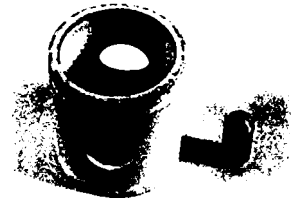


Fig. 5.153.

Cu metoda prezentată în textă s-a verificat construcțiile electronice realizate și experimentate anterior la ITIM Cluj-Napoca și au fost proiectate și realizate tunuri electronice triodă noi, dintre care se prezintă o variantă în figurile 5.150 - construcția de ansamblu, 5.151 - subsamblul catod, 5.152 - subsamblul electrod Wehnelt și 5.153 - subsamblul anod împreună cu izolatorul principal.

---

## **CAPITOLUL 6**

---

### **CONCLUZII**

## 6. CONCLUZII

Pentru realizarea scopului propus în teză, autorul a fost obligat să acționeze, în paralel, pe două direcții: cercetarea, proiectarea și realizarea în ansamblu a echipamentelor de sudare cu fascicul de electroni precum și cercetarea, proiectarea și realizarea tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

Echipamentul de sudare cu fascicul de electroni, așa cum rezultă din capitolul doi, este deosebit de complex în comparație cu cele necesare altor procedee de sudare, convenționale sau neconvenționale, ceea ce face ca realizarea unui astfel de echipament să implice efectuarea unor cercetări multidisciplinare în următoarele domenii: tehnica tensiunilor înalte și a izolațiilor la tensiuni înalte, electronică, automatizări și calculatoare, optică electronică, mecanică fină, materiale speciale, tehnica vidului și altele. Realizarea părților componente ale unui astfel de echipament necesită echipe de specialiști pe fiecare domeniu menționat, materiale și subansamble de calitate deosebită, aparatură de măsură și control precisă, ceea ce înseamnă, practic, eforturi financiare foarte mari. Un utilaj industrial obișnuit de sudare cu fascicul de electroni, cu dotări minime, depășește ca preț 500 000 USD, iar orice facilitate în plus înseamnă costuri relativ mari.

Din punctul de vedere al aplicațiilor industriale, un astfel de utilaj se justifică numai dacă productivitatea obținută este suficient de mare pentru a putea amortiza utilajul și a acoperi costurile de exploatare, sau dacă prin alte procedee de sudare nu se poate realiza sudarea.

Condițiile concrete în care au fost declanșate iar apoi dezvoltate cercetările în domeniul tehnologiei neconvenționale cu fascicul de electroni la ITIM Cluj-Napoca nu au permis cumpărarea unui astfel de utilaj sau măcar a unora dintre părțile principale care-l compun. În cei peste 25 de ani de cercetări în acest domeniu s-au putut cumpăra doar unele elemente ale părților principale, cum ar fi: pompe de vid rotative cu palete, pompe de vid cu difuzie, două vacuometre și componente electrice și electronice. Toate celelalte elemente componente au fost realizate cu forțe proprii la ITIM Cluj-Napoca sau în colaborare.

Deoarece instalațiile realizate la ITIM Cluj-Napoca urmăreau în primul rând scopuri de cercetare, ele sunt mai complexe decât un utilaj de sudare cu fascicul de electroni pentru aplicații industriale, care are dotările minime necesare scopului propus.

Având în vedere cele afirmate, munca de cercetare a construcției tunului electronic a implicat, în prealabil, cercetarea, proiectarea și realizarea tuturor componentelor echipamentului de sudare cu fascicul de electroni în ansamblu, ceea ce a făcut ca efortul depus să fie în proporție mai mare pentru realizarea ansamblului decât pentru realizarea tunului electronic. Aceasta a mărit și perioada de timp necesară atingerii scopului propus în teză.

Pentru experimentarea tunurilor electronice este necesar un stand de testare a tunurilor electronice, stand a cărui proiectare și construcție a început în 1986 la ITIM Cluj-Napoca și



constituie ultima instalație realizată. În ordinea descrescătoare a complexității și costurilor, părțile componente principale ale unui astfel de stand pentru testarea tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni sunt, [57]:

1. Sursele de alimentare electrică și comandă a tunului electronic.
2. Tunul electronic.
3. Sistemul de vid.
4. Sistemul de antrenare a piesei.
5. Camera de sudare.

Autorul tezei a fost direct implicat în stabilirea concepției de ansamblu a standului și în cecetarea, proiectarea și realizarea tunului electronic, sistemului de vid, sistemului de antrenare a piesei și a camerei de sudare. Pentru sursele de alimentare electrică și comandă a tunului electronic, autorul tezei a fost implicat în stabilirea temei de cercetare și proiectare, realizarea efectivă revenind unui alt colectiv. Toate părțile componente principale ale standului au fost realizate integral, mai puțin sursa de tensiune înaltă pentru tunul electronic, care a fost realizată cu unele deficiențe de concepție și construcție privind mai ales izolările la tensiune înaltă, care nu au permis efectuarea testărilor tunurilor la parametri proiectați (35kV și 50mA). În aceste condiții au fost utilizate rezultatele experimentale obținute pe instalațiile precedente realizate la ITIM Cluj-Napoca.

Cercetările efectuate de autorul tezei privind calculul, proiectarea și construcția tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni au urmărit, în principal, realizarea unei metode moderne de proiectare și optimizare a tunurilor, în condițiile concrete existente la ITIM Cluj-Napoca și Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Realizarea acestei metode era necesară deoarece, din bibliografia consultată, atât pe plan național cât și pe plan internațional nu se prezintă o metodă unitară de calcul și proiectare a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

Pentru realizarea acestei metode s-a pornit de la aspectele fundamentale stabilite de pionierii în acest domeniu, așa cum s-a menționat în paragraful 2.1, și s-a insistat apoi pe optimizarea configurației tunului electronic, pentru a putea îmbunătăți performanțele acestuia.

În cazul sudării cu fascicul de electroni, principalul parametru urmărit este densitatea de putere a fascicului pe piesă  $w_1$ , care, așa cum s-a prezentat în capitolul 5 și cum rezultă din relația (5.3), este direct proporțională cu tensiunea de accelerare la pătrat -  $U^2$ , densitatea curentului de emisie a catodului -  $j_c$  și cu constanta  $K$  ce depinde de configurația geometrică a zonei electrostatice a tunului și de temperatura catodului. În condițiile concrete de realizare a instalațiilor cu fascicul de electroni la ITIM Cluj-Napoca, s-a optat pentru tensiuni până la 35kV, iar ca material pentru catod s-a ales tantalul. Astfel, pentru a putea mări densitatea de putere, parametrul care mai putea fi influențat este constanta  $K$ , prin optimizarea configurației geometrice a zonei electrostatice a tunului. Până în 1982, această optimizare se făcea la ITIM prin studierea diverselor configurații în baie electrolitică, urmată de testarea tunurilor pe instalațiile existente. Această metodă necesită

o durată de timp de mai multe luni pentru optimizarea unei singure configurații, iar rezultatele au un grad de siguranță relativ scăzut. A apărut astfel necesitatea modelării pe calculator a configurației geometrice a zonei electrostatice a tunului electronic. La ITIM Cluj-Napoca s-au realizat, în perioada anilor 1980-1990, o serie de programe de modelare a tunurilor electronice pe minicalculatoare. Aceste programe au o serie de dezavantaje pentru care nu au putut fi aplicate la proiectarea tunurilor electronice. Dintre aceste dezavantaje se menționează:

1. Numărul mic de noduri pentru rețeaua de discretizare, de ordinul sutelor, ceea ce introduce erori majore de calcul, deoarece nu pot fi descrise suficient de precis frontierele zonei electrostatice a tunului electronic.
2. Timpul de lucru al calculatorului este foarte lung și prezintă nesiguranță în atingerea convergenței soluțiilor.
3. Introducerea datelor și interpretarea rezultatelor este dificilă datorită posibilităților grafice foarte modeste asigurate de programele realizate.
4. Programele acceptă numai anumite configurații ale zonei electrostatice, ceea ce face ca orice modelare în afara acestora să însemne modificări importante.
5. Conversația unui proiectant de tunuri electronice cu programele este extrem de dificilă, necesitând permanent prezența realizatorilor programelor.

După 1990 s-a trecut la utilizarea și adaptarea unor programe care folosesc metodele enumerate la paragraful 4.5, care rulează pe calculatoare compatibile IBM PC/AT și care sunt realizate de firme străine cu experiență, având colective de peste 100 de realizatori ai programelor. Au fost testate produse ale firmelor americane ALGOR și COSMOS, iar în final s-a optat pentru programul SIMION, realizat la Idaho National Engineering Laboratory din S.U.A., care prezintă suficiente avantaje pentru a fi folosit la proiectarea zonei electrostatice a tunurilor electronice pentru sudare. Acest program a fost adaptat cerințelor de modelare a tunurilor electronice și a permis optimizarea configurației geometrice a zonei electrostatice pentru câteva sute de variante, din care în teză sunt prezentate cele considerate de autor ca reprezentative. În prezent, studiul și optimizarea unei configurații geometrice durează între 10 și 40 de ore. Comparând rezultatele obținute de autorul tezei cu cele obținute de alți autori, [21], [43], s-a observat, așa cum se arată la paragraful 4.7, că acestea sunt identice sau foarte apropiate, în condițiile în care ceilalți autori au avut acces la programe mai performante, la calculatoare mult mai puternice și au lucrat în colective mari de cercetători.

Din studiul configurațiilor prezentate în paragrafele 5.3.2, 5.3.3 și 5.3.4 se desprind o serie de concluzii privind modelarea zonei electrostatice a tunului electronic:

1. Pentru orice configurație geometrică și pentru orice parametri electrici este necesară modelarea pe calculator a zonei electrostatice a tunului electronic, deoarece sunt imposibil de stabilit reguli generale privind tendințele de modificare a câmpului electrostatic, care

determină forma fasciculului de electroni.

2. Influența cea mai mare asupra formei fasciculului de electroni în zona electrostatică, deci a poziției cross-over-ului, o au forma și dimensiunile electrodului Wehnelt, forma și dimensiunile aperturii anodice, precum și energia inițială cu care electronii părăsesc norul electronic din fața catodului.

3. Pentru a trasa forma fasciculului de electroni trebuie considerate energiile inițiale ale electronilor într 0 și 0,5eV, care reprezintă, în total, circa 75% din electronii ce părăsesc norul electronic aflat în fața catodului, care, conform celor prezentate la paragraful 5.3.4, au următoarele ponderi: între 0 și 0,1eV - 10%, între 0,1 și 0,2eV - 18%, între 0,2 și 0,3eV - 19%, între 0,3 și 0,4eV - 16%, iar între 0,4 și 0,5eV - 12%.

4. Deoarece electronii cu energie inițială peste 0,5eV focalizează la distanțe relativ mari de catod, este posibil ca ei să lovească anodul, ducând la încălzirea acestuia. În acest caz anodul va trebui răcit din exterior, în funcție de rezultatele testărilor tunului electronic pe stand.

5. Interstițiul dintre catod și apertura electrodului Wehnelt influențează tensiunea de tăiere a fasciculului, această tensiune scăzând cu scăderea mărimii acestui interstițiu.

6. Catodul trebuie să fie în același plan cu apertura electrodului Wehnelt. Când catodul este deplasat în interiorul aperturii electrodului Wehnelt, traiectoriile electronilor aflați înspre periferia fasciculului de electroni sunt puternic focalizați, iar când catodul este deplasat în fața aperturii electrodului Wehnelt acești electroni sunt defocalizați. La montajul tunului electronic trebuie asigurată alinierea între catod și apertura electrodului Wehnelt.

7. În modelul fizico-matematic al zonei electrostatice a tunului electronic propus de autorul tezei este neglijată influența sarcinii spațiale asupra configurației câmpului electrostatic. Sarcina spațială are ca efect respingerea electrostatică între electroni, deci creșterea distanței între catod și cross-over. Influența acesteia este cu atât mai mare cu cât viteza electronilor este mai mică, așa cum se poate observa din relațiile (4.2) și (4.3). Electronii cu energie inițială mai mică au viteze inițiale mai mici ceea ce face ca practic focalizarea lor să aibă loc mai departe de catod decât apare în figurile din teză, acest lucru fiind favorabil deoarece punctele focale ale electronilor de diverse energii inițiale se apropie.

8. Modelarea zonei electrostatice a tunului electronic cu metoda propusă în teză este deosebit de avantajoasă față de modelarea în baie electrochimică și permite analiza rapidă a unei configurații geometrice a zonei electrostatice a tunului electronic, furnizând datele inițiale necesare testării acestuia.

Ca urmare a interacțiunii fasciculului de electroni cu materialul piesei apar ioni pozitivi care se deplasează în fascicul în sens invers electronilor, bombardând catodul. Cantitatea de ioni pozitivi este în funcție de materialul piesei sudate, densitatea de putere a fasciculului și de parametri de

sudare. Ionii pozitivi micșorează influența sarcinii spațiale și îmbunătățesc focalizarea fascicului de electroni pe piesă. Datorită acestora, după modelarea tunului electronic pe calculator, este deosebit de importantă testarea acestuia și a parametrilor de sudare pe un stand de testare a tunurilor electronice, pornind de la datele inițiale obținute prin modelare.

## 6.1. Contribuții originale

Activitatea de cercetare a autorului tezei în domeniul tehnologiei neconvenționale cu fascicul de electroni și a construcției tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni a condus la următoarele contribuții originale:

- În domeniul echipamentelor de sudare cu fascicul de electroni
  1. Proiectarea unui cap de sudare cu fascicul de electroni a țevilor în plăci tubulare și a tunului electronic folosit pentru acesta, [59].
  2. Proiectarea agregatului de sudare cu fascicul de electroni a țevilor în plăci tubulare, [59].
  3. Proiectarea ansamblului standului de testare a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni, figura 2.3.
  4. Proiectarea și realizarea sistemelor de antrenare a piesei, figura 2.15, pentru standul de testare a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.
  5. Participare la proiectarea și realizarea comenzii prin calculator de proces a comenzilor pentru standul de testare a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.
  6. Proiectarea și realizarea camerei de sudare și a incintei tunului electronic cu sistemele de vid aferente, figurile 2.19 și 2.20, pentru standul de testare a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.
  7. Proiectarea agregatului pentru fabricație a țevilor cu pereți subțiri prin sudare cu fascicul de electroni și a tunului electronic folosit pentru acesta, [61], [63].
- În domeniul construcției tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni:
  1. Propunerea unui model fizico-matematic a zonei electrostatice a tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.
  2. Propunerea unor etape de modelare a a zonei electrostatice a tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.
  3. Adaptarea unui program de analiză și proiectare a sistemelor electrostatice la modelarea zonei electrostatice a tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.
  4. Propunerea unor relații de calcul prin metoda diferențelor finite pentru rezolvarea

ecuației lui Laplace, care descrie configurația câmpului electrostatic în zona electrostatică a tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.

5. Propunerea unei metode unitare de calcul a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

6. Definierea unor configurații geometrice noi pentru electrodul Wehnelt.

7. Definierea unor configurații geometrice noi pentru anod și apertura sa.

8. Studiul unor configurații geometrice ale zonei electrostatice a tunului electronic, din punctul de vedere al tensiunilor de focalizare și al tensiunilor de tăiere a fasciculului, pentru diverse valori ale energiilor inițiale ale electronilor.

9. Propunerea unor diagrame de optimizare a dimensiunilor caracteristice ale lentilei magnetice, pentru micșorarea aberației sferice a acesteia.

10. Proiectarea modulară a ansamblului tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

11. Cercetarea și realizarea catozilor cu încălzire directă și indirectă, precum și a tehnologiilor de execuție a catozilor, care sunt confecționați din materiale refractare, mai greu de prelucrat și fasonat.

12. Proiectarea subsansamblului catod împreună cu izolatorul pe care acesta este montat.

13. Participarea la cercetarea și realizarea izolatorilor tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.

14. Calculul și proiectarea lentilei magnetice a tunului electronic pentru sudare cu fascicul de electroni.

## **6.2. Valoarea aplicativă și direcții de dezvoltare în continuare**

Valoarea aplicativă a rezultatelor cercetărilor prezentate în această teză de doctorat este dată de metoda unitară de calcul prezentată, de considerațiile privind modelarea tunurilor electronice pe calculator, de studiile efectuate pentru configurațiile prezentate în teză și de soluția constructivă modulară dată pentru tunul electronic, care, cel puțin în literatura românească de specialitate, sunt prezentate pentru prima dată.

Pe de altă parte, cercetările autorului tezei în domeniul tehnologiei de sudare cu fascicul de electroni s-au materializat în proiectarea unor echipamente de sudare cu fascicul de electroni, prezentate anterior, care au constituit obiectul a trei contracte de cercetare-proiectare și a trei lucrări științifice.

Rezultatele cercetărilor autorului tezei în domeniul construcției tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni au constituit obiectul a două contracte de cercetare și patru lucrări

științifice publicate.

Dirrecțiile de dezvoltare ulterioară ar putea fi următoarele:

- În domeniul cercetărilor teoretice:

1. Utilizarea metodei diferențelor finite în 9 puncte, cu considerarea influenței sarcinii spațiale, ceea ce va necesita, în primul rând, utilizarea unor calculatoare mai puternice.
2. Utilizarea unor programe de calcul ce folosesc și alte metode, enumerate în paragraful 4.5, pentru a putea compara rezultatele acestora cu metoda diferențelor finite.
3. Modelarea zonei electromagnetice a tunului electronic, cu considerarea aberațiilor semnificative în cazul tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.
4. Modelarea interacțiunii fasciculului de electroni cu materialul piesei.
5. Modelarea unor configurații noi, atât pentru zona electrostatică cât și pentru zona electromagnetice a tunului electronic.

- În domeniul cercetărilor experimentale:

1. Utilizarea unor materiale mai performante pentru confecționarea catodului (hexaborura de lantan) și cunoașterea tehnologiei necesare realizării acestora.
2. Studiul efectelor termice în elementele componente ale tunului electronic.
3. Determinarea experimentală a unor parametri ai tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.
4. Determinarea experimentală a parametrilor tehnologici de sudare pentru diversele variante de tunuri electronice pentru sudare cu fascicul de electroni.

## **BIBLIOGRAFIE**

## BIBLIOGRAFIE

1. Ardenne, M., *Z. Physik*, 109, 553, 1938.
2. Ardenne, M., Heisig, U., Panzer, S. *Feingerätetechnik*, 13, 293, 1964.
3. Bakish, R. *Introduction to Electron Beam Technology*, John-Wiley Sons, New York, 1962.
4. Bakish, R., White, S.S. *Handbook of Electron Beam Welding*, John-Wiley Sons, New York, 1964.
5. Bas, E.B., Cremosnik, G., Lerch, H. *Transactions of The Eight Vacuum Symp. and Second Intern. Congress*, vol. 2, 817, 1961.
6. Bashenko, V.V., Lopota, V.A., Mitkevich, E.A. *Welding with a tilted electron beam*, Svarochnoe Proizvodstvo, No. 7, p.19, 1981.
7. Beckert, M., Neuman, A. *Grundlagen der Schweisstechnik Sonderschweisverfahren*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1970.
8. Becket, F.J. *Welding and Metal Fabrication*, 41, 210, 1973.
9. Biegelsen, D.K., Rozgony, G.A., Shank, C.V. *Energy beam-solid interactions and transient thermal processes*. Vol. 35, MRS, Pennsylvania, 1984.
10. Boarnă, C., Dehelean, D., Arjoca, I. *Procedee neconvenționale de sudare*, Editura Facla, Timișoara, 1980.
11. Child, C.D. *Physical Revue*, 32, 422, 1911.
12. Dahl, D.A., Delmore, J.E. *The SIMION PC/PS User's Manual*, 1989.
13. Dehelean, D. *Sudarea cu fascicul de electroni. Stadiul actual și perspective de dezvoltare*, OIDICM, București, 1988.
14. Dorn, L. *Schweissen und Schneiden*, 17, p. 41, 1965.
15. Dorn, L. *Untersuchungen zum Elektronenstrahl-Schweißvorgang und zum Festigkeitsverhalten elektronenstrahlgeschweißter Metallverbindungen*, Dissertation - Technischen Universität Hannover, 1969.
16. Dumitrescu, I. I. *Simularea câmpurilor potențiale*, Editura Academiei, București, 1983.
17. Dushman, S. *Scientific Foundations of Vacuum Technique*, John-Wiley Sons, New York, 1970.
18. Estman, A.V. *Fundamentals of Vacuum Tubes*, McGraw-Hill Co., New York, 1949.
19. Föti, E. *Elektronteknologiak*, Muzsaki könyvkiadó, Budapest, 1965.
20. Glaser, W. *Grundlagen der Elektronenoptik*, Springer Verlag, Wien, 1952.
21. Hawkes, P.W., Kasper, E. *Principles of Electron Optics*, vol. I-II, Academic Press, London, 1989.
22. Kasper, E. *Optik*, 64, p. 157, 1983.
23. Kasper, E. *Optik*, 68, p. 341, 1984.
24. Kasper, E. *Optik*, 71, p. 121, 1985.
25. Kumar, L., Kasper, E. *Optik*, 72, p. 23, 1985.
26. Langmuir, I. *Physical Revue*, 2. Ser.2, 450, 1913.
27. Langmuir, I., Blodgett, K. *Physical Revue*, 24, p.49, 1924.
28. Meleka, A.H. *Electron Beam Welding: Principles and Practice*, McGraw-Hill Co., London, 1971.
29. Micloși, V., ș.a. *Bazele proceselor de sudare*, EDP, București, 1982.
30. Molokovskiy, S.I., Sușkov, A.D. *Intensivnâie electronâie i ionâie puciki*, Leningradskoe otdelenie, 1972.
31. Nanu, A. *Tehnologia materialelor*, EDP, București, 1982.
32. Nanu, A., Isarie, I., Gyursik, P. *Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor*. Timișoara, 1971.
33. Nazarenko, O.K. *Elektronovo Pucevala Svarka*, Mașinostroienia, Moskva, 1966.
34. Pierce, J.R. *Applied Physics*, 10, 715, 1939.
35. Pierce, J.R. *Theory and Design of Electrons Beams*, D. van Nostrand Co., New York, 1949.
36. Pirani, M. *U.S. Patent no. 848600*, March 26, 1907.
37. Popescu, I.I., Ciobotaru, D.Ș. *Bazele fizicii plasmei*, ET, București, 1987.
38. Rykaly, N., Uglov, A., Zuev, I., Kokora, A. *Laser and electron beam material processing*



- handbook*, MIR Publishers, Moscow, 1988.
39. Rykaly, N., Zuev, I., Uglov, A. *Fundamentals of electron beam material processing*, Moscow, Mashinostroenie, 1978.
  40. Rykaly, N., Zuev, I., Uglov, A. *Electron beam material processing of materials*, Moscow, Mashinostroenie, 1978.
  41. Roth, A. *Vacuum Technology*, Israel Atomic Commission, Part I (1971), Part II (1972), Tel-Aviv.
  42. Sanderson, A. *Recent advances in electron beam welding*, Professional Engineering, May 1993, 20-33.
  43. Sciaky, H. *Le Soudage par Fascieu d'Electrons*, Paris, 1973.
  44. Septier, A. *Applied Charged Particle Optics, Part A and B*, Academic Press, London, 1980.
  45. Septier, A. *Focusing of Charged Particles, vol. II*, Academic Press, New York, 1967.
  46. Spangenberg, K.R. *Vacuum Tubes*, McGraw-Hill Co., New York, 1948.
  47. Steigerwald, K.H. *Optik*, 5, 469, 1949.
  48. Steigerwald, K.H. *U.S. Patent no. 2793281*, 1957.
  49. Stohr, J.A. *Fuel Element Conference*, Paris, nov. 1957.
  50. Stohr, J.A. *Thèse de doctorat*, CEA-R2507, 1964.
  51. Taranenko, U.P. *Electroniie Puciki*, Kiev, Tehnika, 1964.
  52. Tătar, E. *Topire și sudare prin bombardament electronic*, Teză de doctorat, IPC-N, 1982.
  53. Tătar, E. *Cap de sudare cu fascicul de electroni a țevilor în plăci tubulare*, Contract de cercetare nr. 1228, ITIM Cluj-Napoca, 1983.
  54. Tătar, E. *Instalație de sudare cu fascicul de electroni a tablelor groase*, Contract de cercetare nr. 1239, ITIM Cluj-Napoca, 1984.
  55. Tătar, E. *Studiu tehnico-economic privind prototipul Agregat de fabricație a țevilor cu pereți subțiri prin sudare cu fascicul de electroni*, Contract de cercetare nr. 1223, ITIM Cluj-Napoca, 1992.
  56. Tătar, E., Bot, A. *Definitivarea execuției subansamblelor standului de testare tunuri electronice*, Raport de fază, ITIM Cluj-Napoca, 1991.
  57. Tătar, E., Bot, A., Tătaru, O. *Mașină de sudat și prelucrat cu fascicul de electroni EBWM 35.4*, comunicare la Conferința a-V-a de Procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 20-21 noiembrie, 1986.
  58. Tătar, E., Tătaru, O., Bot, A. *Agregat de sudat țevi în plăci tubulare cu fascicul de electroni*, Simpozionul "Tehnologiile neconvenționale - mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini", Timișoara, 30-31 mai, 1986.
  59. Tătaru, O. *Cap de sudare cu fascicul de electroni a țevilor în plăci tubulare*, Contract de cercetare nr. 19a, IPC-N, 1983.
  60. Tătaru, O. *Studiul posibilităților de utilizare a unor programe de simulare a câmpurilor potențiale la modelarea pe calculator a geometriei electronoptice în proiectarea tunurilor electronice*, Contract de cercetare nr. 93, UTC-N, 1991.
  61. Tătaru, O. *Contribuții la elaborarea și redactarea studiului tehnico-economic privind realizarea prototipului agregatului de fabricație a țevilor cu pereți subțiri prin sudare cu fascicul de electroni*, Contract de cercetare nr. 88, UTC-N, 1992.
  62. Tătaru, O. *Cercetări privind proiectarea tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni*, faza 1993, Contract de cercetare nr. 5003C, tema B26, UTC-N, 1993.
  63. Tătaru, O., Tătar, E. *Agregat de fabricație a țevilor cu pereți subțiri prin sudare cu fascicul de electroni*, Buletinul științific al UTC-N, Cluj-Napoca, 1992.
  64. Tătaru, O., Nanu, A., Tătar, E. *Aspecte privind modelarea geometriei electronoptice a tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni*, comunicare la VI-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, România, Timișoara, octombrie 1993.
  65. Tătaru, O., Nanu, A., Tătar, E. *Influența formei electrodului Wehnelt asupra performanțelor tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni*, comunicare la VI-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, România, Timișoara, octombrie 1993.
  66. Tătaru, O., Nanu, A., Tătar, E. *Influența formei anodului asupra performanțelor tunurilor electronice pentru sudare cu fascicul de electroni*, comunicare la VI-a Conferință națională de

- tehnologii neconvenționale, România, Timișoara, octombrie 1993.
67. **Tătaru, O., Nanu, A., Tătar, E.** *Proiectarea tunurilor electronice triodă pentru sudare cu fascicul de electroni*, comunicare la VI-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, România, Timișoara, octombrie 1993.
68. **Wolfram, R.** *AEÜ*, 31, p. 239, 1977.
69. \* \* \* COSMOS/M 1.65, *User's Manual*, 1990.
70. \* \* \* ALGOR, *Processor Reference Manual*, 1989.
71. \* \* \* Cataloagele firmei Alcatel.
72. \* \* \* Cataloagele firmei Edwards.
73. \* \* \* Cataloagele firmei Leybold-Heraeus.
74. \* \* \* Cataloagele firmei Languepin.
75. \* \* \* Cataloagele firmei Messer-Griesheim.
76. \* \* \* Cataloagele firmei S A F.
77. \* \* \* Cataloagele firmei Sciaky.
78. \* \* \* Cataloagele firmei British Oxigen Company.
79. \* \* \* Cataloagele firmei Balzers.

# ANEXĂ

# ASPECTE PRIVIND ALEGEREA CONFIGURAȚIEI GEOMETRICE A ZONEI ELECTEROSTATICE ÎN CAZUL TUNURILOR ELECTRONICE PENTRU SUDARE CU FASCICUL DE ELECTRONI

Au fost studiate următoarele configurații geometrice ale zonei electrostatice a tunului electronic :

1. Configurație conică simplă (figura A.1)
2. Configurație cilindrică deschisă (figura A.2)
3. Configurație cilindrică închisă (figura A.3)
4. Configurație Pierce (figura A.4)
5. Configurație Pierce cu anod toroidal (figura A.5)
6. Configurație conică compusă (figura A.6)
7. Configurație conică cilindrică (figura A.7)
8. Configurație Pierce cu anod tronconic și apertură neteșită (figura A.8)
9. Configurație Pierce cu anod tronconic și apertură teșită la  $30^\circ$  (figura A.9)

Alăturat figurilor sunt prezentate instrucțiunile de definire a fiecărei configurații. Configurațiile sunt definite prin intermediul a trei funcții :

1. Funcția dreptunghi :  $R, x_1, y_1, x_2, y_2$   
unde  $x_1, y_1$  sunt coordonatele colțului dreptunghiului din stânga jos ;  
 $x_2, y_2$  - coordonatele colțului dreptunghiului din dreapta sus.
2. Funcția triunghi :  $T, x, y, a, \alpha$   
unde  $x, y$  sunt coordonatele vârfului triunghiului din stânga jos ;  
 $a$  - lungimea catetei spre dreapta ;  
 $\alpha$  - unghiul dintre cateta cu lungime dată și ipotenuză.
3. Funcția cerc :  $C, x, y, r$   
unde  $x, y$  sunt coordonatele centrului cercului ;  
 $r$  - raza cercului.

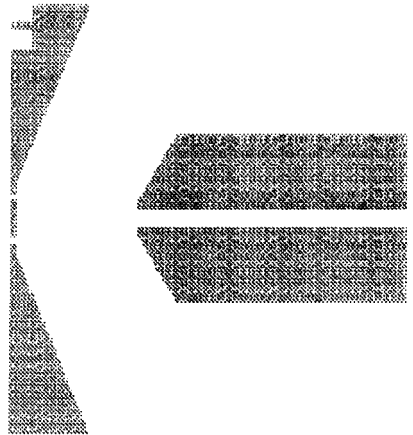
După o linie ce conține una dintre funcții urmează o linie în care se precizează dacă zona respectivă este electrod - simbol E - sau non-electrod - simbol N, precum și o cifră care indică potențialul zonei respective în volți.

Litera X încheie un fișier de configurație geometrică.

Toate configurațiile au simetrie cilindrică în raport cu axa Ox și sunt discretizate în  $x * y = 172 * 93 = 15996$  puncte, distanța dintre două puncte vecine fiind de 0,2 mm.

**W1M**

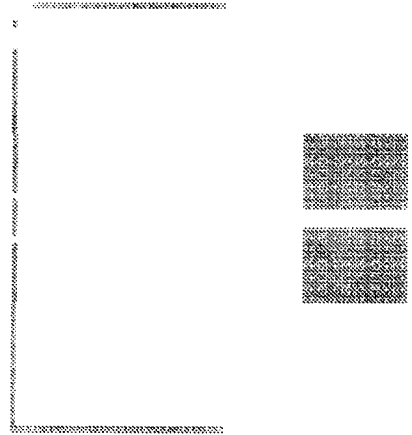
R,0,16,34,93  
 E,2.  
 T,3,16,31,67.27026792  
 N,0.  
 R,0,11,2,16  
 E,2.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 R,55,4,71,8  
 E,0.  
 R,71,4,172,36  
 E,0.  
 T,55,8,16,60.2551187  
 E,0.  
 X



**Fig. A.1.** Configurație conică simplă.

**W2AM**

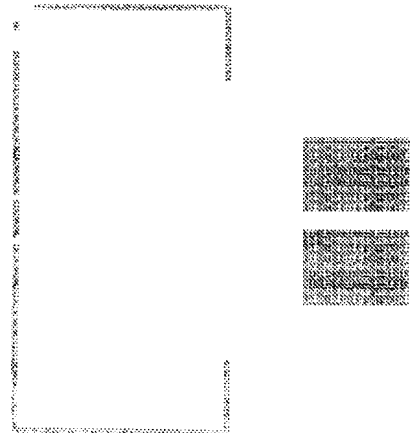
R,0,11,2,93  
 E,2.  
 R,1,90,91,93  
 E,2.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 R,126,4,172,36  
 E,0.  
 X



**Fig. A.2.** Configurație cilindrică deschisă.

**W2BM**

R,0,11,2,93  
 E,2.  
 R,2,90,91,93  
 E,2.  
 R,91,60,93,93  
 E,2.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 R,125,4,172,36  
 E,0.  
 X



**Fig. A.3.** Configurație cilindrică închisă.

**W M**

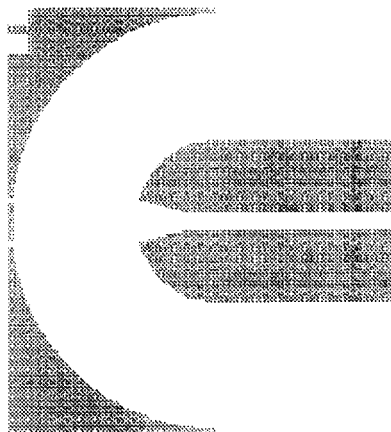
R,0,11,91,93  
 E,2.  
 C,91,0,89  
 N,0.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 C,91,0,35  
 E,0.  
 R,91,0,172,35  
 E,0.  
 R,56,0,172,3  
 N,0.  
 R,56,4,76,9  
 N,0.  
 T,57,9,19,-14.74356283  
 E,0.  
 X

**W3C1**

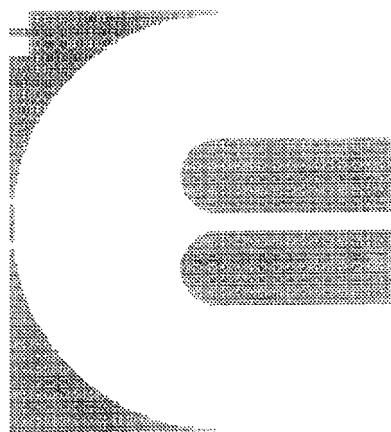
R,0,11,91,93  
 E,2.  
 C,91,0,89  
 N,0.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 R,91,4,172,36  
 E,0.  
 C,91,20,16  
 E,0.  
 X

**W4M**

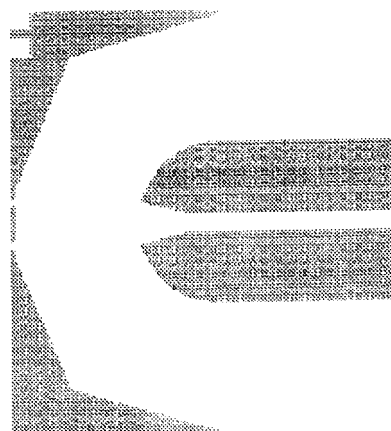
R,0,91,91,93  
 E,2.  
 R,0,16,34,91  
 E,2.  
 T,3,16,31,67.27026792  
 N,0.  
 R,27,72,91,90  
 E,2.  
 T,27,72,65,15.47863816  
 N,0.  
 R,0,11,2,16  
 E,2.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 C,91,0,35  
 E,0.  
 R,91,0,172,35  
 E,0.  
 R,56,0,172,3  
 E,0.  
 R,56,4,76,9  
 N,0.  
 T,57,9,19,-14.74356283  
 E,0.  
 X



**Fig. A.4.** Configurație Pierce (cu apertura anodică teșită la 30°).



**Fig. A.5.** Configurație Pierce cu anod toroidal.



**Fig. A.6.** Configurație conică compusă.

**W5M**

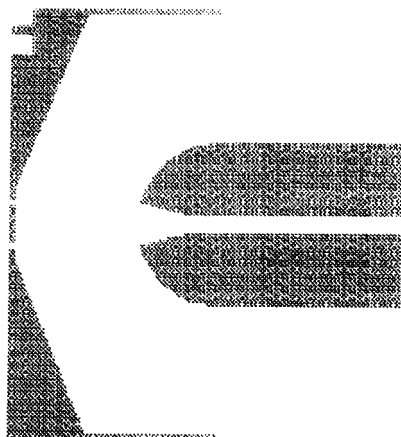
R,0,16,34,91  
 E,2.  
 T,3,16,31,67.27026792  
 N,0.  
 R,0,90,91,93  
 E,2.  
 R,0,11,2,16  
 E,2.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 C,91,0,35  
 E,0.  
 R,91,0,172,35  
 E,0.  
 R,56,0,172,3  
 N,0.  
 R,56,4,76,9  
 N,0.  
 T,57,9,19,-14.74356283  
 E,0.  
 X

**W6M**

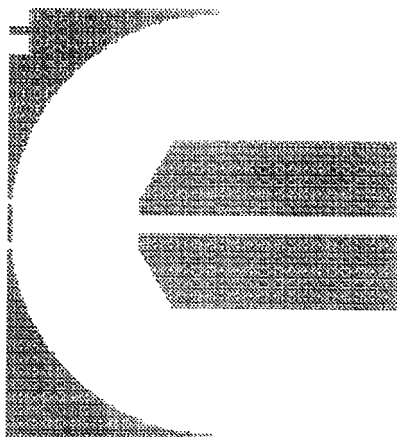
R,0,11,91,93  
 E,2.  
 C,91,0,89  
 N,0.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 T,58,12,14,59.74356283  
 E,0.  
 R,58,4,172,12  
 E,0.  
 R,72,12,172,36  
 E,0.  
 X

**W6T**

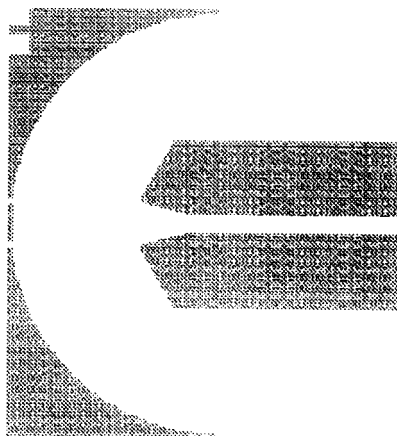
R,0,11,91,93  
 E,2.  
 C,91,0,89  
 N,0.  
 R,0,0,2,8  
 E,1.  
 T,58,12,14,59.74356283  
 E,0.  
 R,58,4,172,12  
 E,0.  
 R,72,12,172,36  
 E,0.  
 R,58,4,77,9  
 N,0.  
 T,58,9,19,-14.74356283  
 E,0.  
 X



**Fig. A.7.** Configurație conică cilindrică.



**Fig. A.8.** Configurație Pierce cu anod tronconic și apertură neteșită.



**Fig. A.9.** Configurație Pierce cu anod tronconic și apertură teșită la 30°.