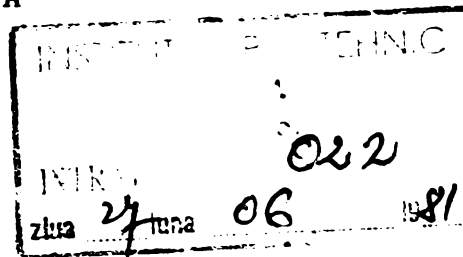
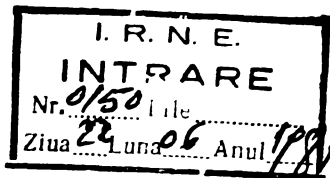


MINISTERUL EDUCATIEI INVATAMINTULUI SI CULTURII

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA

FACULTATEA DE MECANICA



Ing. GALERIU CONSTANTIN ANTONIU

T E Z A D E D O C T O R A T

SUDAREA ALIAJELOR DE TIPUL ZIRCALOY-2 SI 4 IN TECHNOLOGIA  
DE FABRICATIE A ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE PENTRU  
REACTORII ENERGETICI

CONDUCATOR STIINTIFIC

Prof.dr.doc.ing.VLADIMIR POPOVICI

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

" O altă orientare principală a viitorului cincinal este creșterea bazei energetice punându-se accentul pe utilizarea cărbunilor în producția de energie electrică și termică, valorificarea potențialului hidroenergetic, construcția de centrale nucleare-electrice, folosirea noilor resurse de energie. (...) Până la sfârșitul cincinalului va intra în funcțiune prima centrală atomoelectrică cu 660 MW."

NICOLAE CEAUSESCU

Raportul Comitetului Central cu privire la activitatea Partidului Comunist Român în perioada dintre Congresul al XI-lea și Congresul al XII-lea și sarcinile de viitor ale Partidului.

## I N T O D U C E R E

În Documentele Congresului al XII-lea ale Partidului Comunist Român sînt reliefate mutațiile importante prevăzute în structura producției de energie electrică prin axarea cu precădere pe utilizarea combustibililor inferiori, a energiei hidro, precum și a resurselor noi de energie.

În acest amplu program un accent important este pus pe dezvoltarea energiei nucleare. Programul construirii de centrale electrice nucleare, prevede instalarea unei puteri de 660 MW în 1985 și de 3.960 MW în 1990, asigurîndu-se astfel la nivelul acestui an o pondere de 17-18% a centralelor nucleare în producția de energie electrică a țării /135/.

În anul 1971 a luat ființă Institutul de Tehnologii Nucleare care în anul 1977 s-a transformat în Institutul de Reactori Nucleari Energetici, responsabil unic al realizării și punerii în funcțiune a centralelor electrice nucleare în țara noastră. Activitatea de cercetare a fost direcționată spre filiera de reactori cu uraniu natural și apă grea, fapt ce asigură țării noastre independența economică și politică în domeniul nuclear. Una din direcțiile principale de activitate din IRNE o constituie cercetarea, experimentarea la scară pilot și asigurarea fabricației primei încărcături de combustibil nuclear pentru prima centrală electrică nucleară de 660 MWe.

Rezultatele lucrărilor desfășurate în cadrul ITN-IRNE în domeniul combustibilului nuclear au permis ca în cadrul acordului de colaborare cu Canada în domeniul utilizării energiei nucleare în scopuri pașnice, semnat în decembrie 1978, să se cumpere numai licența de fabricație a combustibilului, acesta urmînd a fi executat pe o linie de fabricație de concepție proprie și conform tehnologiei omologate în IRNE. Pentru a putea aprecia importanța economică a acestei realizări, se menționează că prețul pentru cumpărarea unei încărcături de combustibil pentru o centrală nucleară de tipul PHWR-660 MWe se ridică în prezent la cca. 17 milioane \$.

Prezenta teză de doctorat are subiectul integrat în a-

ceastă preocupare majoră, sudarea aliajelor de zirconiu constituind una din problemele de bază în fabricația elementelor combustibile nucleare. Activitatea de cercetare a autorului în domeniul sudării aliajelor de tip zircaloy 2 și zircaloy 4 a parcurs următoarele etape:

- realizarea de echipamente specifice sudării TIG și execuția elementelor combustibile pentru testare la iradiere în reactorul MZFR-R.F.G.(1970-1975)
- cercetări în domeniul sudării electrice prin presiune a aliajelor de zirconiu în colaborare cu specialiștii belgiei în cadrul Centrului de Studii Nucleare-CEN/SCK-Mol(februarie-august 1973)
- continuarea cercetărilor referitoare la sudarea prin presiune și realizarea elementelor combustibile pentru iradiere în reactorul BR-2-Belgia(1973-1976)
- stabilirea tehnologiilor de fabricație la scară pilot și realizarea primelor fascicule combustibile de tipul PHWR cu 28 elemente(1976-1977)
- elaborarea și omologarea tehnologiilor de fabricație la scară pilot a fasciculelor combustibile nucleare de tipul PHWR cu 37 elemente(1978-1979)
- fabricarea de fascicule tip PHWR pentru studiul de detaliu a proceselor tehnologice, a fiabilității instalațiilor, elaborarea instrucțiunilor tehnologice, a manualului de fabricație și a proiectului tehnologic pentru execuția lotului de omologare(1979-1980)
- fabricarea lotului de omologare a fasciculelor tip Candu-660 în anul 1981 în vederea realizării încărcăturii de combustibil pentru centrala nucleară electrică Cernavodă-1.

Legat organic de activitățile menționate mai sus, autorul a participat direct la activitatea de proiectare și execuție de instalații și SDV-uri specifice, la proiectarea și organizarea liniei de fabricație pilot, participând în prezent la elaborarea documentației necesare realizării primei unități de producție la scară industrială a fasciculelor combustibile nucleare.

P A R T E A a I-a

## 1. ENERGETICA NUCLEARA PE PLAN MONDIAL

O caracteristică a epocii actuale este contradicția dintre cerințele mereu crescînde de energie și limitările resurselor clasice, atît ca rezerve, cît mai ales ca repartiție pe suprafața globului. Consumul energetic mondial a crescut de la aproximativ 1,5 miliarde tone cărbune echivalent (t.c.e.) în 1925 la 6,8 miliarde t.c.e. în 1970, adică de 4,6 ori./1/. Rata medie anuală de creștere a consumului de energie în perioada 1950-1968 a fost de 5% și luînd o rată de creștere de 4,5-4,84% pentru intervalul 1971-2000, se atinge un consum de 27-30 miliarde t.c.e. în anul 2000. Rezervele mondiale estimate de combustibil clasic se prezintă astfel :/2/

- lignit 7.653 miliarde t.c.e.
- gaze naturale 645 miliarde t.c.e.
- țitei 135 miliarde t.c.e.

Avînd în vedere faptul că aceste rezerve sînt finite, cît și tendința de valorificare superioară a acestor materii prime, utilizarea energiei nucleare de fisiune pentru producerea energiei electrice s-a impus în țările dezvoltate și chiar și în unele țări în curs de dezvoltare. În anul 1976 pe plan mondial existau în exploatare 193 reactori pentru centralele nucleare electrice însumînd o putere de 85.406 MWe, ceea ce reprezintă 21,2% din producția mondială de energie electrică /3/. La 1.01.1977 pe plan mondial situația puterii electro-nucleare în centrale în funcție, în construcție și proiecte de construcție aprobate, se ridică la 403.520 MWe. Pentru anul 1985 se estimează o contribuție la producția de energie electrică a centralelor nucleare de 28,4% SUA, 11,5% Canada, 21,6% Japonia și 28,7% pentru țările din Piața Comună. Dinamica creșterii puterii instalate în centrale electrice nucleare estimată pentru țările industrializate se prezintă astfel :/4/

- 1985 : 335.000 - 459.000 MWe
- 1990 : 549.000 - 802.000 MWe
- 1995 : 822.000 - 1.321.000 MWe
- 2000 : 1.038.000 - 1.935.000 MWe

Din punct de vedere al producției de uraniu în perioada 1972-1975 cifra se ridică la 19.000 - 20.000 tone anual și circa

30.000 tone în 1977 /5/. Ținând cont de previziunile de dezvoltare a energiei nucleare se estimează o cerere de 71.000 - 88.000 tone uraniu în 1985, 134.000 - 234.000 tone în 1995, iar în anul 2000 circa 178.000 - 338.000 tone uraniu. Conform statisticilor oficiale /5/ rezervele sigure de uraniu se cifrează la 2,2 milioane tone la care se adaugă 1,8 milioane tone potențiale. Din această cantitate globală 3,6 milioane tone revine la un preț mai mic de 80 \$/Kg U iar restul la prețul de 80 - 130 \$/Kg U. Se estimează că se va putea rentabiliza pentru exploatare și rezervele de uraniu cu prețul de cost în domeniul 130 - 260 \$/kg U ceea ce va mări considerabil rezervele potențiale, Ca o problemă de viitor se are în vedere și extragerea uraniului din apele oceanelor, fapt care ar duce în momentul rentabilizării proceselor de extragere la mărirea de câteva ori a rezervelor.

După unele statistici, rezervele de uraniu natural, exceptând țările socialiste se cifrau în 1970 la 770.000 tone. Valorificarea completă a acestei rezerve în reactoare reproducătoare cu neutroni rapizi ar duce la obținerea unei energii primare de 1500 Gt combustibil convențional (c.c.) adică de aproape două ori mai mare decât rezerva probabilă de hidrocarburi /133/. Statisticile prezentate mai sus estimează rezervele sigure în 1978 la 2,2 milioane tone ceea ce ar corespunde aproximativ la 4285 Gt c.c. energie primară disponibilă la valorificarea completă a acestor rezerve adică de 5,56 ori mai mare decât rezerva probabilă de 770 Gt c.c. a tuturor hidrocarburilor /134/.

Dezvoltarea energiei nucleare în direcția controlării reacției de fuziune va crea o rezervă de energie, prin fuziunea deuteriului conținut în apele mărilor, de ordinul a 80.000 milioane Gt c.c., respectiv de circa 10 milioane de ori mai mare decât a combustibililor fosili ai pământului /133/. Față de fisiune, fuziunea nucleară pe lângă avantajul major care constă în faptul că aprovizionarea cu combustibil este nelimitată și ieftină, are și avantajul că elementele poluante și radioactivitatea sînt extrem de scăzute. Pentru trecerea la noua sursă de energie - fuziunea nucleară foarte promițătoare atât din punct de vedere economic cât și din cel al conservării mediului ambiant, sînt necesare încă mari eforturi de cercetare și de dezvoltare. Ajungerea la parametri industriali de utilizare a centralilor nucleare echipate cu reactori de fuziune este estimată în anul 2000 - 2010./7/.

## 2. PRODUCEREA ENERGIEI ELECTRICE ÎN CENTRALE NUCLEARE

### 2.1. Reactori și centrale electrice nucleare.

Prin reactor nuclear se înțelege un ansamblu creat pentru eliberarea energiei nucleare și folosirea ei în practică. /6/. Reactorii nucleari pot produce energie prin fisiunea controlată a nucleelor sau prin fuziune, aceștia din urmă având la bază reacțiile termonucleare. În prezent se utilizează pe scară industrială reactorii de fisiune, reactorii nucleari de fuziune fiind în stadiul de cercetare și experimentare. Gama actuală de reactori nucleari este foarte mare, clasificarea lor făcându-se după o serie de criterii cum sînt: energia neutronilor, scop, zonă activă, tip de moderator, agent de răcire, natura combustibilului, etc.

Gama reactorilor de putere, cu care sînt echipate centralele electrice (CNE) cuprinde și ea un număr mare de tipuri din care amintim /8/9/10/11/ reactorii: AGR, BHWR, BWR, FBR, GCR, HTGR, HWGCR, HWLWR, LWGR, OMR, PHWR, PWR, SZG, SGR și SGHWR. Dintre aceste tipuri, dacă analizăm situația puterii instalate în CNE pînă în 1977 /3/, la stadiul de reactori utilizați la scară industrială avem :

PWR - reactor moderat și răcit cu apă obișnuită sub presiune

BWR - reactor moderat și răcit cu apă obișnuită la temperatura de fierbere.

PHWR - reactor moderat și răcit cu apă grea sub presiune.

SGHWR - reactor moderat cu apă grea și răcit cu apă ușoară în fierbere.

HTGR - reactor răcit cu gaz la temperaturi înalte și moderat cu grafit

GCR - reactor răcit cu gaz și moderat cu grafit.

AGR - reactor avansat răcit cu gaz și moderat cu grafit.

FBR - reactor rapid reproducător.

În tabelul 2.1 este prezentată repartiția puterii instalată pe plan mondial situația fiind dată la 01.01.1977. /3/. Se remarcă faptul că reactorii PHWR, BWR și PHWR-SGHWR reprezintă 80% din puterea actuală instalată în centrale electrice nucleare. Caracteristicile constructive ale acestor tipuri de reactori de bază sînt următoarele :

PHWR - USA - combustibil eterogen 90 tone oxid de uraniu îmbogățit 1-4%  $U_{235}$ , putere 1.100 MWe, vas de presiune  $\varnothing$  4,6 m,



înălțime 13,7 m, grosime 152-279 mm, apă de răcire la 320°C și 168 atm.

BWR - USA - combustibil eterogen, 164 tone oxid de uraniu  
ținut mediu de 1% U<sub>235</sub>, putere 1.065 MWe, vas de presiune Ø 6,4 m, înălțime 23 m, grosime 150 mm, apă de răcire în fierbere la 68 atm.

PHWR-Canada- combustibil eterogen, 90 tone oxid de uraniu natural, putere 650 MWe, tuburi sub presiune, moderator și agent de răcire apă grea.

Tabelul 2,1.

Tip de reactor	Instalați MWe	In construcție și planificată MWe
PWR	39.559	249.934
BWR	25.163	108.739
PHWR-SGHWR	3.819	11.644
HTGR	343	-
FBR	695	2.351
GCR-AGR	8.051	14.380
Alte tipuri	7.776	16.472
TOTAL	85.406	403.520

Centrala nucleară electrică este un ansamblu de instalații și construcții reunite în scopul producerii de energie electrică sau simultan de energie electrică și căldură prin utilizarea energiei nucleare /9/. Clasificarea centralilor poate fi făcută după următoarele criterii:

- a)- modul de transformare a energiei nucleare în energie electrică:
  - în trei faze: energie nucleară - căldură; căldură - energie mecanică ; energie mecanică - energie electrică.
  - în două faze : energie nucleară - căldură; căldură - energie electrică
  - cu transformare directă : energie nucleară - energie electrică
- b)- energia livrată consumatorilor :
  - numai energie electrică
  - energie electrică și căldură pentru termoficare
- c)- schema termică folosită :
  - cu un circuit

- cu două circuite
- cu trei circuite
- d) - caracteristicile reactorului :
  - după energia neutronilor : termice sau rapide
  - structura zonei active : omogene sau eterogene
  - felul combustibilului : uraniu natural, uraniu îmbogățit, plutoniu
  - cantitatea de combustibil nou produs: cu regenerare redusă, convertoare avansate, reproducătoare
  - tipul moderatorului : apă ușoară, apă grea, grafit
  - tipul agentului de răcire: apă ușoară, apă grea, gaze etc.
- e) - putere : mare, medie sau mică
- f) - destinație :
  - producerea energiei electrice
  - propulsie de nave
  - desalinizarea apei de mare.

Reprezentativă pentru programul nuclear Canadian este centrala PICKERING de tipul PHWR, care prin dezvoltare a condus la realizarea unităților de 650 MWe. Centrala Pickering /13/14/15/16/ /17/18/19/ de la Douglas Point are în componență patru reactori de 540 MWe putere unitară. Reactorul de tip calandria cu canale orizontale, are dimensiunile de  $\varnothing$  8,5 m și lungime de 5,94 m. Mantaua este executată din oțel austenitic cu grosime de 25,4 mm iar plăcile de capăt, din același material, au 114 mm grosime. Tuburile de presiune și canalele calandriei în număr de 390 sînt executate din zircaloy-2 și zirconiu-niobiu 2,5%. În figura 2.1. este prezentată proiecția izometrică a reactorului PHWR de tip CANDU. Combustibilul asamblat în fascicule de 28 de elemente combustibile se introduce în număr de 12 fascicule pe canal. Combustibilul este de tipul uraniu natural sub formă de pastile de bioxid de uraniu sinterizate, întecuite în zircaloy-4. Apa grea utilizată ca moderator în cantitate de 240 m<sup>3</sup> în zona activă, este utilizată și ca agent de răcire reprezentînd 102 tone. Sistemul de răcire este presurizat la 88 atm. avînd o temperatură de intrare a agentului de 249°C și de ieșire de 293°C. Turbina cu un etaj de înaltă presiune și trei de joasă presiune are o turație de 1800 rot/min., generatorul de 686.000 KVA furnizînd curent trifazat de 60 Hz și 24 KV. Randamentul general al centralei este de 29,4%. Funcție de factorul

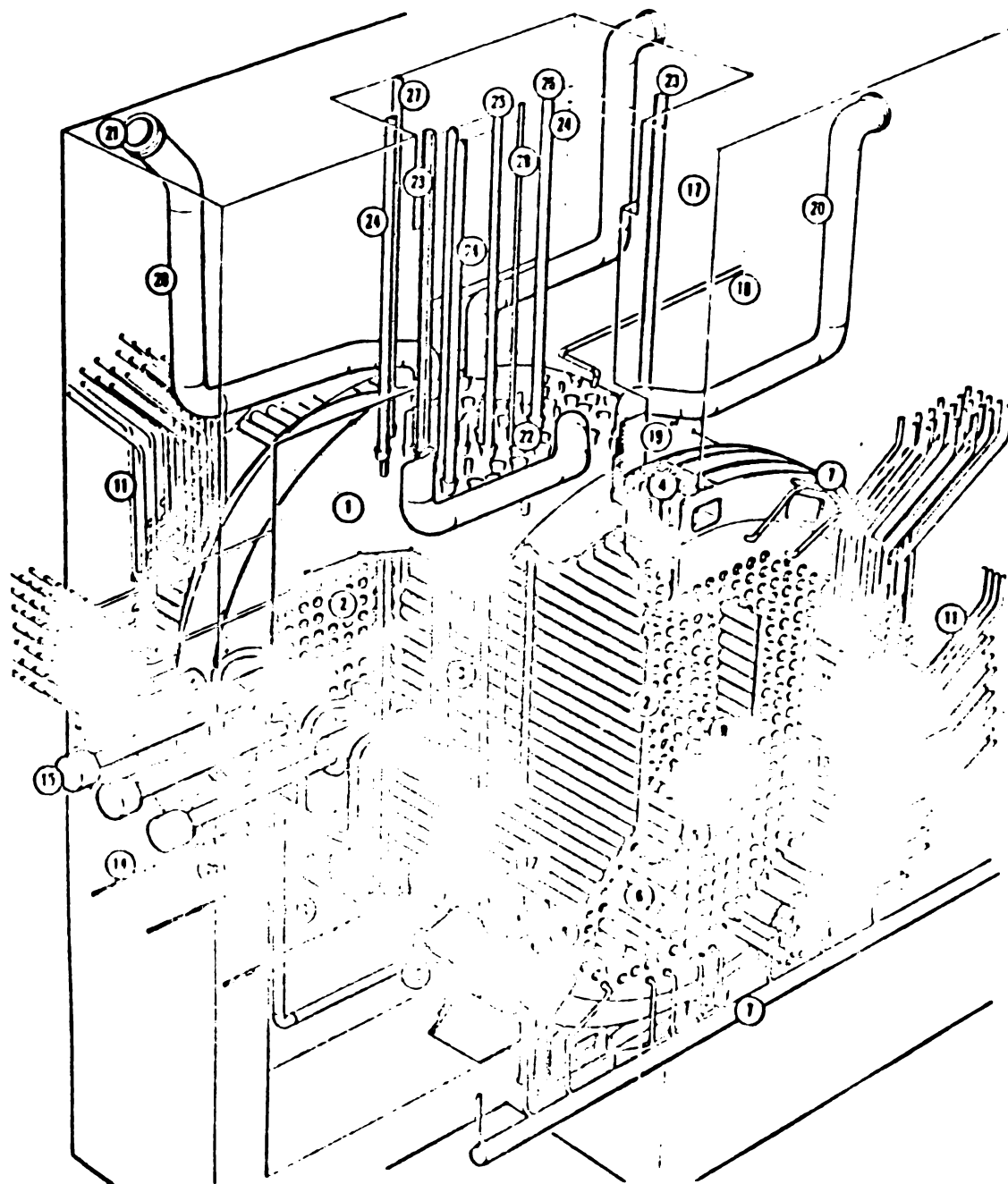


Figura 2.1. Proiecția izometrică a reactorului PWR tip CANDU 418/  
1.calandria,2.placă tubulară,3.tuburile calandrii,4.inel de în-  
tărire,5.placă de fixare,6.zona de capăt a tuburilor,7.conducte ră-  
cire,8.racord,9.protecție fiziologică,cu bile de oțel,10.armătură  
de capăt,11.conducte de alimentare,12.conducte evacuare moderator,  
13.intrare moderator,14.instalație măsurii flux orizontală,15.ca-  
meră de ionizare,16.fixare inferioară,17.perete de boltă al reac-  
torului,18.conductă spre tanc moderator,19.ecrane de protecție,20.  
conducte de relaxare,21.disc de rupere,22.canale de control a reac-  
tivilității,23.obiectiv de vizare,24.barc de oprire reactor,25.barc  
de reglaj,26.bare absorbante,27.instalație de control zonă,28.in-  
stalație măsură flux verticală,29.conductă de injecție.

de utilizare anual al centralei, prețul în m\$ canadieni/KWh este următorul :

factor de utilizare	m\$/KWh
80%	3,28
60%	4,14
40%	5,88

Prețul pe KWh la factorul de utilizare de 80% este de cca. două ori mai mare decât a celui produs într-o centrală convențională. Costul estimat al instalației unei centrale de tipul PHWR este de 594 milioane \$ USA ce revine la 937 \$ USA/KWe net./20/.

Programul canadian de reactori cu uraniu natural și apă grea cunoaște la ora actuală o serie de colaborări internaționale, centrale de acest tip fiind construite în India și Pakistan și în construcție în Coreea de Sud și Argentina. În tabelul 2.2. este prezentată repartiția acestor centrale /21/.

Tabelul 2.2.

Denumirea centralei	Tara-localitatea	MWe net	Data intrării în funcție
NPD	Canada-Ontario	22	1962
Duglas-Point	Canada-Ontario	208	1967
Pickering A	Canada-Ontario	514x4	1971-1973
Gentilly-1	Canada-Quebec	250	1971
Kanupp	Pakistan	125	1971
RAPP-1	India	203	1972
RAPP-2	India	203	-
Bruce A	Canada-Ontario	745x4	1976-1979
Gentilly-2	Canada-Quebec	600	1979
Point Lepreau	Canada-New Brunswick	600	1980
Cordoba	Argentina	600	1980
Pickering B	Canada-Ontario	514x4	1981-1983
Woosung 1	Corea	600	1981
Bruce B	Canada-Ontario	750x4	1983-1986
Darlington	Canada-Ontario	800x4	1986-1988
<b>TOTAL GENERAL</b>		<b>16.703</b>	

## 2.2. Situația cercetărilor pe plan mondial referitoare la centralele PHWR-CANDU.

Pînă în prezent pe plan mondial au fost puse în funcție cca. 20 CNE echipate cu reactori moderați cu apă grea, însumînd aproximativ 4.000 MWe din care 3.000 MWe în CNE cu reactori tip CANDU /22/, pînă în 1988 fiind prevăzuți 16.703 MWe în centrale de acest tip. Se poate deci afirma că principala direcție în dezvoltarea reactorilor PHWR este filiera CANDU, programele elaborate de unele țări în curs de dezvoltare, în direcția energiei nucleare, fiind axate pe această filieră. Reactorii de tip PHWR de concepție diferită de filiera CANDU au fost studiați și realizați ca prototip și în alte state, EL-4 în Franța, Bohunice în R.S. Cehoslovacă, Agesta în Suedia, Çirene în Italia, CVTR în USA /23/, dar sînt șanse minime ca acești reactori să devină cap de filieră. În cele ce urmează se prezintă pe scurt situația centralelor nucleare de tip CANDU în statele care au inclus în programele lor nucleare acest tip de reactori /22/.

### CANADA.

A dezvoltat cercetările în domeniul acestui tip de reactori începînd din 1945, între 1945-1970 fiind concepuți și realizați 10 reactori de puteri cuprinse între 22-208 MWe. În 1967 a fost pusă în funcție centrala Douglas Point de 208 MWe urmată de Pickering și Bruce (vezi tabelul 2.2). Pînă în 1990 Canada își propune a instala o putere totală de 20.000 MWe în centrale CANDU. Dezvoltarea elementelor combustibile a început în 1957 prin proiectarea, realizarea și încercarea elementelor combustibile în prima încărcătură a reactorului de demonstrație NPD. Fasciculul combustibil de tipul autoportant de lungime 500 mm, era realizat cu pastile de  $UO_2$  sinterizate întecuite în zircaloy prin sudură electrică prin presiune. Primul fascicul de 7 bare a fost dezvoltat la 19 bare pentru centrala Douglas Point. Ulterior prin mărirea tubului de forță de  $\varnothing 82,55$  la  $\varnothing 103,4$  mm numărul de elemente combustibile pe fascicul a crescut la 28 pentru Pickering și la 37 pentru Bruce și Gentilly-2. Tehnologia de fabricație a elementelor combustibile s-a păstrat neschimbată ca principii începînd cu cele fabricate pentru Douglas Point, pînă în 1974 fiind fabricate 74.000

fascicule CANDU însumînd cca.3.300 tone uraniu conţinut.

#### ARGENTINA.

După experiența cu centrala ATUCHA (Siemens - RFG) a trecut la reorientarea programului de CNE în 1972 pe filieră CANDU. Comisia Națională pentru Energia Atomică (CNEA) din Argentina este coordonatoarea acțiunilor de cooperare cu AECL-Canada. Prima centrală aflată în prezent în construcție la Rio Tercero este de tipul Gentilly-2 de 600 MWe și a fost cumpărată la cheie. Sînt prevăzute a se construi încă trei CNE ce vor fi realizate sub responsabilitatea CNEA.

Ca țară în curs de dezvoltare, avînd un număr redus de specialiști în acest domeniu, Argentina a adoptat o strategie a instalării și operării CNE diferită de cea a statelor avansate în acest domeniu. Responsabilitatea pentru realizarea, punerea în funcție și operarea unei CNE revine CNEA pînă la punerea în funcție a centralei următoare, cînd prima va fi predată companiei naționale de electricitate.

#### INDIA

Și-a dezvoltat încă din anii 1950 baza de cercetare în domeniul nuclear, făcîndu-și debutul în energia nucleară cu centralele RAPP-1 și 2. Fabricația de elemente combustibile a fost dezvoltată prin asimilare de licență și know-how și cumpărarea unei linii de fabricație. Pînă în 1974 India a fabricat cca.2000 fascicule combustibile nucleare.(f.c.n.) de tip CANDU, omologarea lor făcîndu-se în Canada.

#### PAKISTAN.

Deși a cumpărat, instalat și pus în funcție în anul 1971 centrala Kanupp, nu a reușit pînă în prezent să fabrice în țară combustibil nuclear.

#### 2.3. Combustibilul nuclear.

Prin combustibili nucleari se înțeleg acele substanțe care în urma reacției nucleare, eliberează o parte din energia de legătură a nucleelor lor sub formă de energie termică /6/. Din

punct de vedere energetic sînt interesante numai acele cazuri în care se poate obține o reacție în lanț dirijată. Acestei cerinți îi corespund izotopii  $U_{233}$ ,  $U_{235}$ ,  $Pu_{239}$  și  $Pu_{241}$ . În natură se găsește numai izotopul  $U_{235}$ , ceilalți izotopi se formează în reactorul nuclear prin absorbția neutronilor de către izotopii  $U_{238}$  și  $Th_{232}$ . Acești izotopi sînt cunoscuți sub numele de materiale fertile. Uraniul natural are în principal doi izotopi  $U_{235}$  material fisibil și  $U_{238}$  material fertil, în proporții de 0,71% respectiv 99,29%. Thoriumul este de aproximativ trei ori mai abundent în natură decît uraniul, avînd însă o mare dispersie. Rezervele de thorium nu au fost prospectate și exploatate decît în mică măsură datorită insuficienței dezvoltării reactorilor cu thorium. Combustibilul utilizat în reactorii PHWR, de tipul uraniu natural, produce ca material fertil  $Pu_{239}$  și  $Pu_{241}$  care în parte contribuie la producerea de energie ca material combustibil. Acești izotopi pot fi separați din combustibil și utilizați în reactori cu neutroni rapizi. Gradul de ardere al plutoniului în reactorii termici este dictat de considerente economice, după care plutoniul format este mai rentabil a fi separat și utilizat în alt tip de reactori. Thoriumul  $232$ , material fertil bombardat de neutroni generează materialul combustibil  $U_{233}$ . Acest material datorită proprietăților sale neutronice excelente dă un bilanț neutronic ușor mai mare decît unitatea, adică este supragenerator chiar și în reactorii termici /24/. Canada este preocupată de studiul utilizării thoriumului în centralele tip CANDU fiind posibil un ciclu de conversie al thoriumului de 0,88-1,00. Este estimat anul 1995 ca an de intrare în funcție a reactorului CBR (Canadian Breeder Reactor) cu ciclul de combustibil thorium /25/.

#### 2.4. Elemente combustibile nucleare (e.c.n.), generalități /11/26/.

Materialele fisibile pot fi introduse în reactorul nuclear sub diferite forme chimice (metal, aliaj, compuși), fizice și geometrice pentru a forma zona activă a reactorului. Reactorii nucleari de putere cu combustibil eterogen, utilizează materialele fisibile sub formă solidă, întecuite în diferite aliaje metalice, alcătuiind astfel unitatea de bază numită element combustibil

nuclear. Funcțiile e.c.n. sînt următoarele :

- producerea și transferul de căldură optim de la combustibil la agentul termic.
- obținerea unor coeficienți de scăpări de produse de fisiune minim, pentru a nu contamina radioactiv circuitul primar.
- menținerea configurației geometrice a canalului tehnologic pe toată durata de funcționare a e.c.n.

Elementul combustibil nuclear constituie componenta reactorului care are condițiile cele mai grele de lucru și anume:

- variații mari de presiune, de la presiunea atmosferică la 170 atm.
- variații mari de temperatură, de la temperatura ambiantă la 600-800°C.
- flux intens de radiație neutronică și gama
- variații de sarcină, deci variații de presiune și temperatură care ajung pînă la 1000 de cicluri pe durata de viață a elementului (1-3 ani).

Materialul fisibil este întocmit pentru a fi protejat împotriva coroziunii și eroziunii agentului de răcire primar și pentru a reține produsele de fisiune radioactive. Condițiile deosebite de lucru a e.c.n. impun o tehnologie de fabricație foarte bine studiată și pusă la punct, corelată cu un control riguros pe întreaga linie de fabricație. Degradarea unor elemente în timpul funcționării reactorului poate ridica radioactivitatea circuitului primar peste limita admisă, impunîndu-se oprirea reactorului și înlăturarea defectelor. Se precizează că o zi de oprire a unei CNE de putere mare echivalează cu o pierdere de 150.000 \$.

Elementele combustibile nucleare pot fi clasificate după mai multe criterii avînd în vedere o serie de considerente legate de combustibil, material de întecuire, condiții de funcționare, formă, etc. Clasificarea cea mai des întîlnită este cea care ține cont de caracteristicile geometrice și varianta tehnologică de execuție, care include și modul de asamblare în fascicule. Datorită faptului că există un număr mare de reactori nucleari, incluzînd și pe cei de cercetare, tipodimensiunile e.c.n. după clasificarea dată de Argonne National Laboratory /27/, atinge cifra de 84. Pentru reactorii energetici se utilizează însă doar trei tipuri de e.c.n. și anume: cilindrice, tubulare și plăci, cele mai răspîndite fiind



cele cilindrice sub diferite variante constructive, montajul în fascicul fiind o caracteristică a fiecărui tip de reactor. În figurile 2.2, 2.3 și 2.4 sînt prezentate e.c.n. și modul lor de mon-

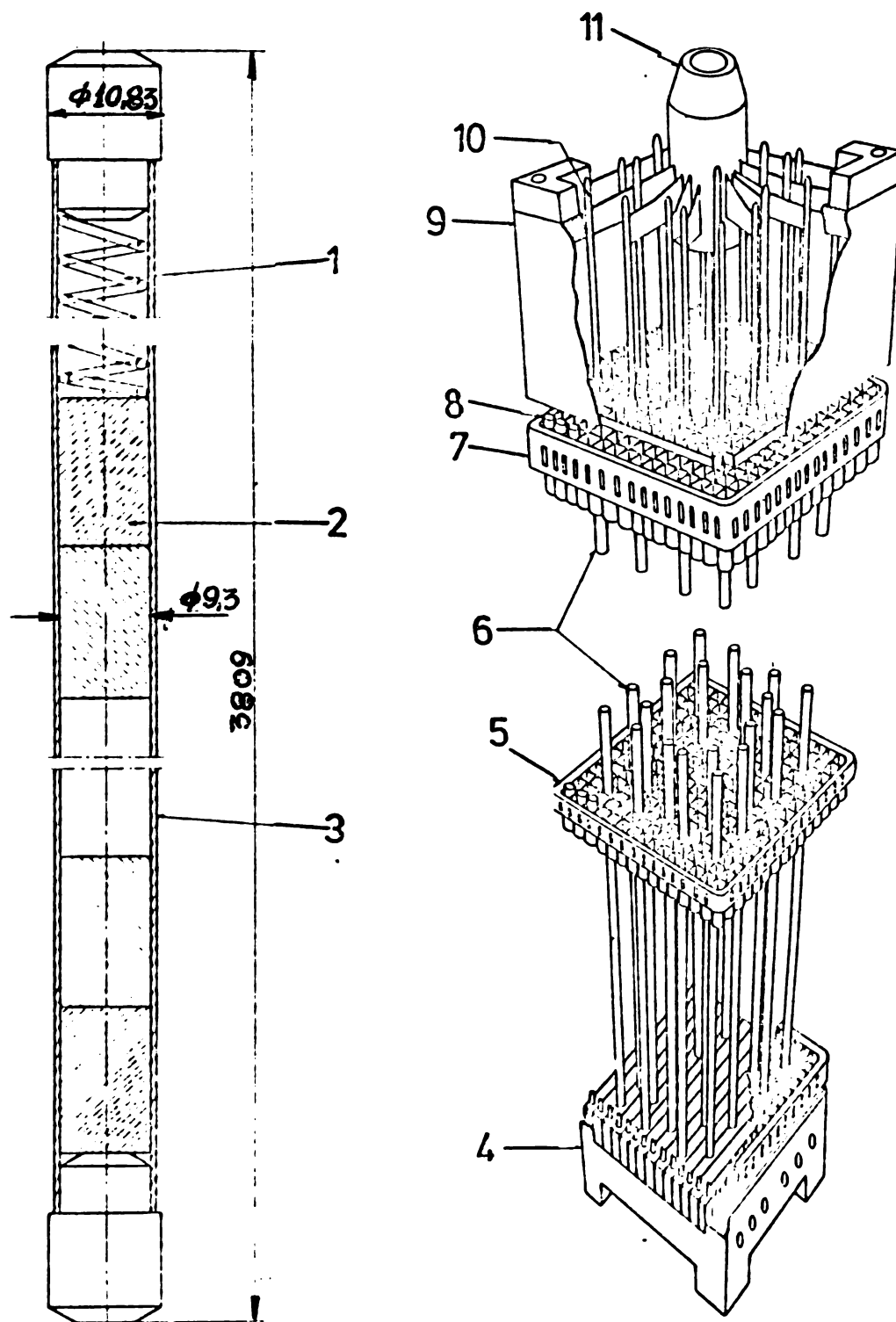


Figura 2.2. Fascicul combustibil PWR (Thiange-Belgia)/8/

1. resort, 2. pastilă uraniu, 3. teaca elementului, 4. suport inferior, 5. grilă intermediară, 6. ghidul barelor de absorbție, 7. grilă de capăt, 8. elemente combustibile, 9. suport superior, 10. bare de absorbție, 11. cap de montaj.

tare în fascicule combustibile pentru reactorii PWR, GCR și BWR. Pentru reactorii CANDU sînt prezentate în figurile 2.5 și 2.6 fasciculele combustibile de tipul Kanupp și Pickering.

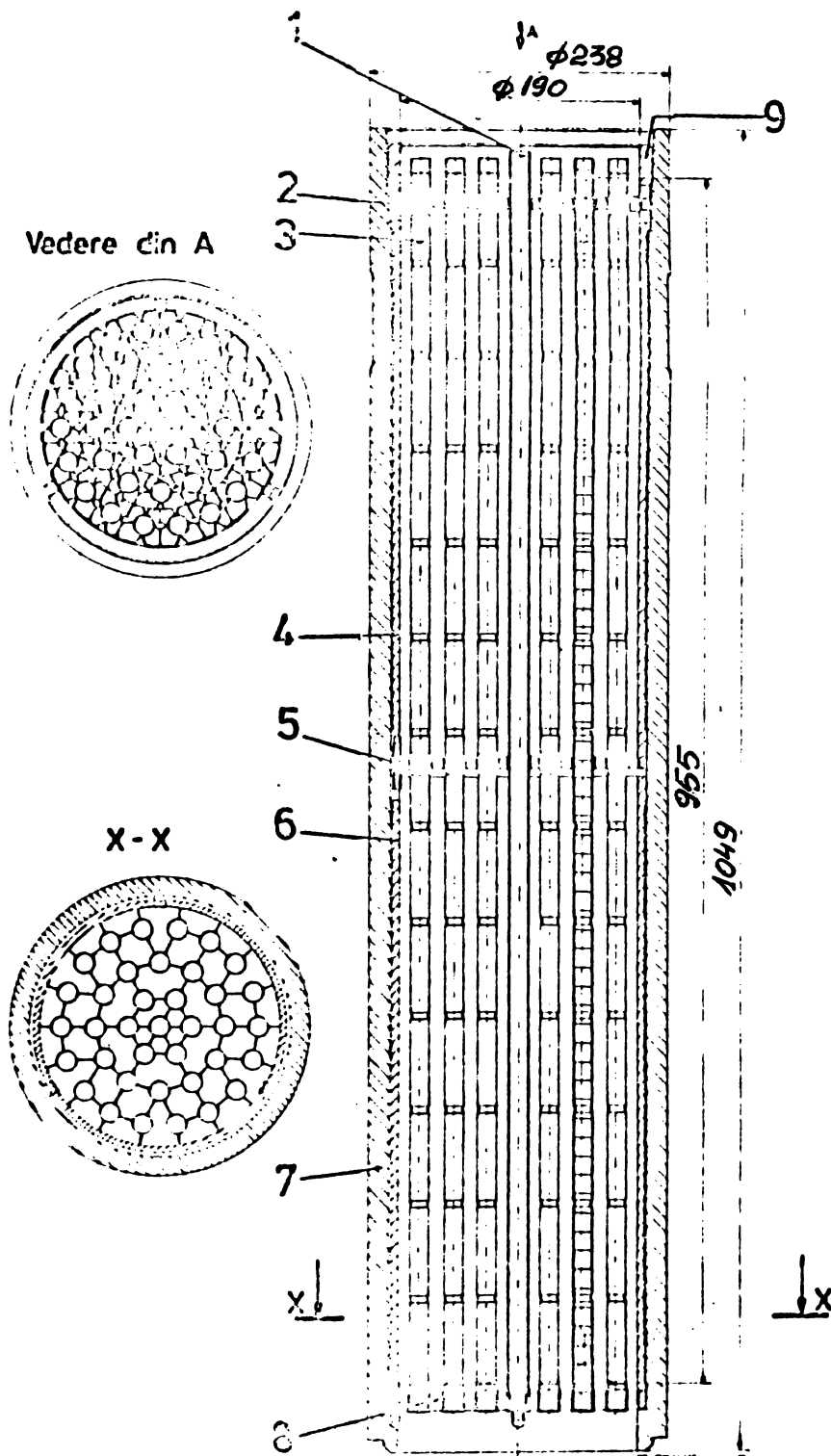


Figura 2.3. Fasciculul combustibil GCR (Hinkley Point-B Anglia) /23/ .

1.tub de ghidare, 2.grilă superioară, 3.element combustibil, 4.piesă intermediară superioară, 5.grilă mediană, 6.piesă intermediară inferioară, 7.cilindru exterior din grafit, 8.grilă suport inferioară, 9.inel de fixare.

542 756  
361 G

Pentru fabricația de fascicule combustibile tip CANDU, schema fluxului de fabricație este prezentată în figura 2.7,

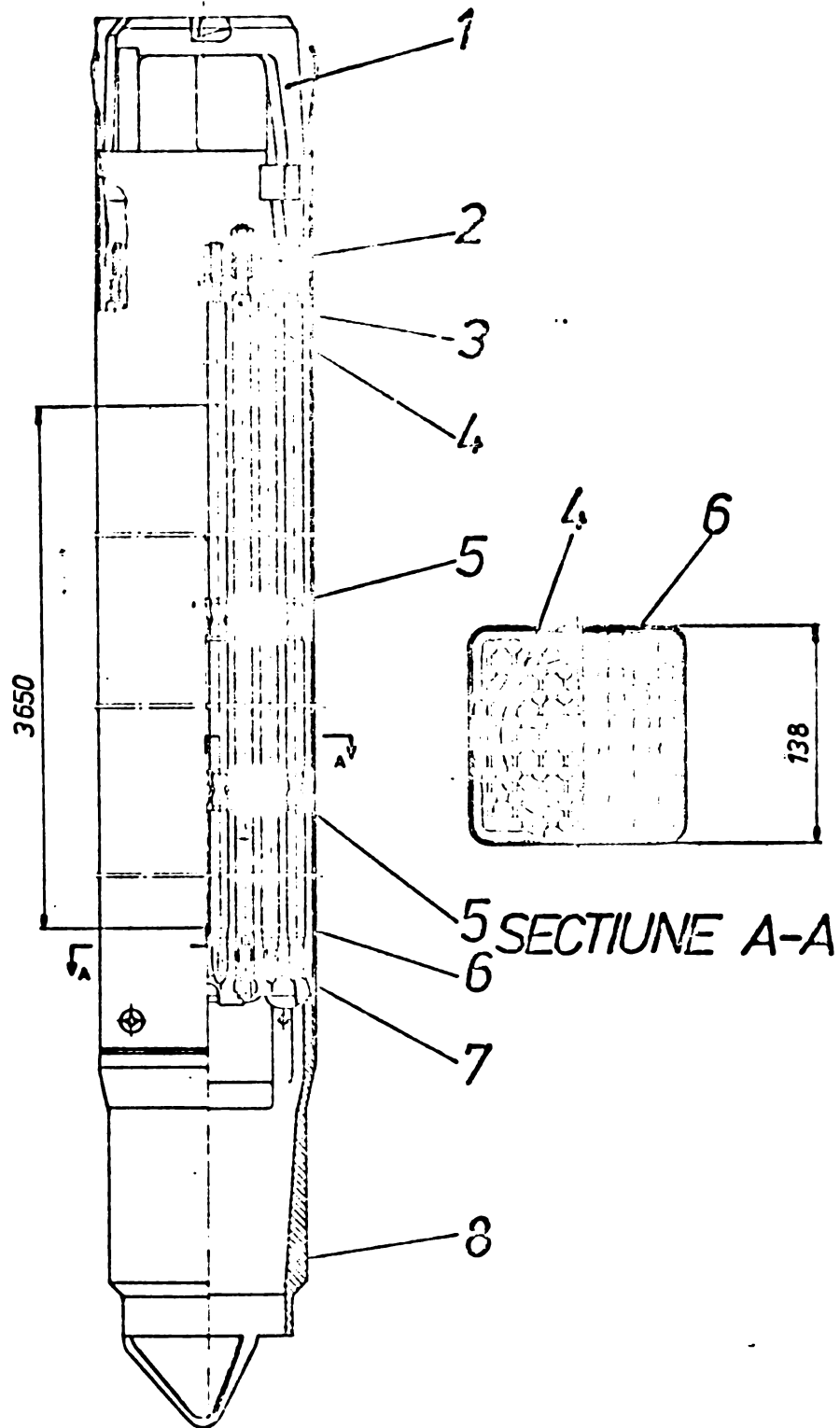


Figura 2.4. Fasciculul combustibil BWR (Ringhals-Suedia) /8/.

1. sistem de fixare superior, 2. grilă de montaj superioară, 3. element combustibil de bază, 4. element combustibil de fixare grile de montaj, 5. grile de distanțare intermediare, 6. casetă exterioară, 7. grilă de montaj inferioară, 8. cap inferior de ghidare.

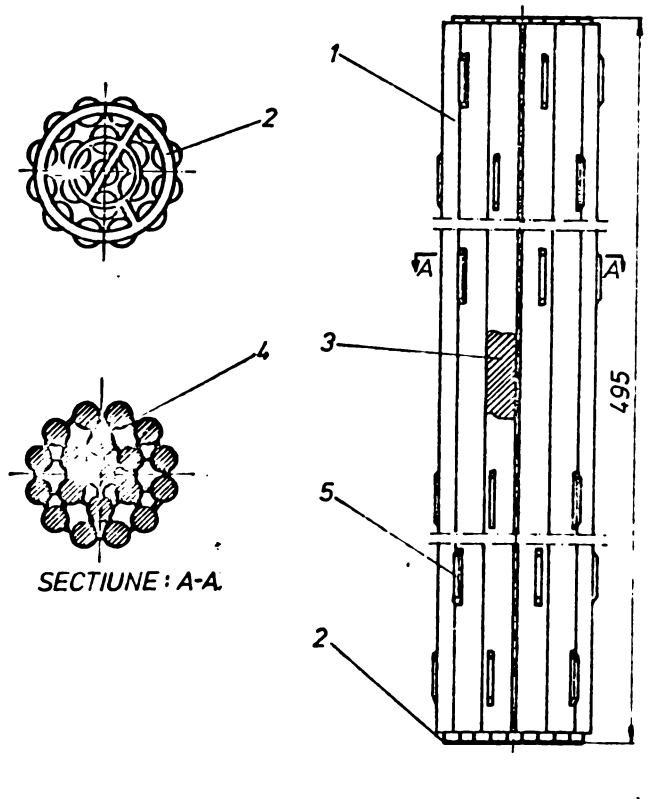


Figura 2.5 Fascicul combustibil PHWR (KANUPP-Pakistan) /8/.

1. element combustibil, 2. grilă de capăt, 3. pastilă de uraniu, 4. elemente de distanțare, 5. patine exterioare de ghidaj

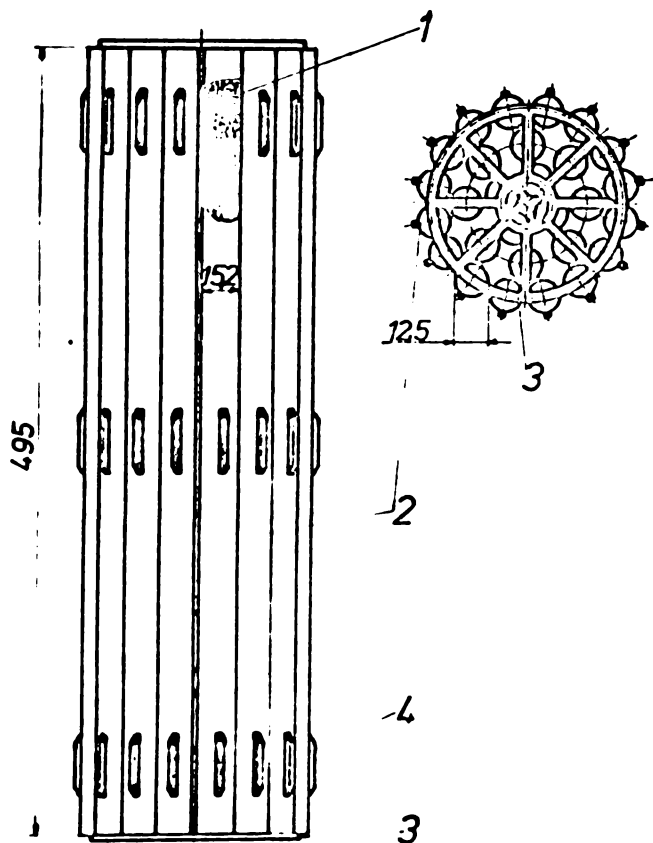


Figura 2.6. Fascicul combustibil PHWR (Pickering-Canada) /28/.

1. pastilă de uraniu, 2. element combustibil, 3. grile de capăt, 4. patine exterioare de ghidaj.

schemă ce indică principalele faze tehnologice.

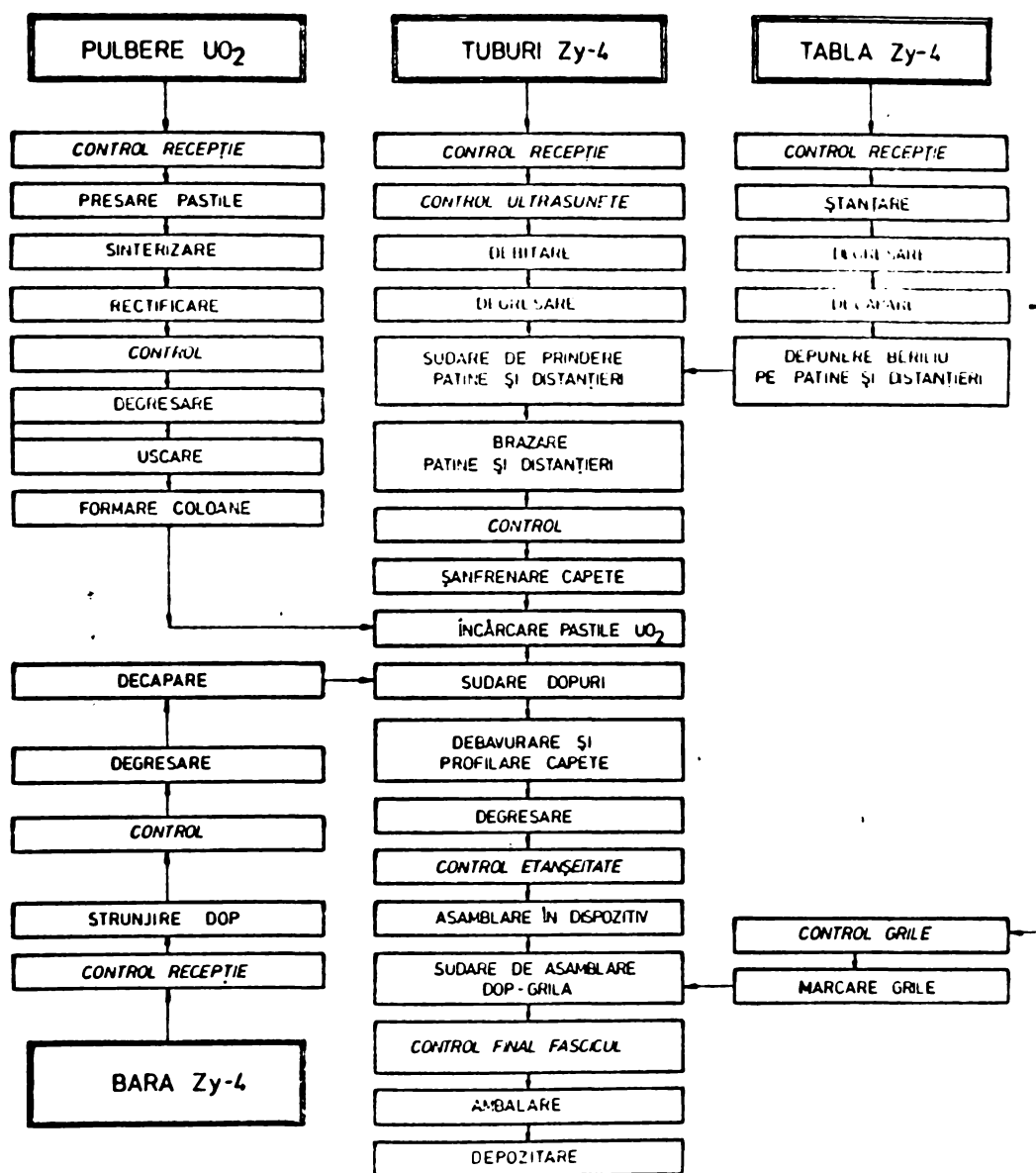


Figura 2.7. Fluxul de fabricație a fasciculelor combustibile tip CANDU.

Analizând operațiile de pe fluxul principal de fabricație a e.c.n. tip CANDU, care apoi sînt asamblate în fascicule, se observă ca o caracteristică tehnologică de fabricație, utilizarea procedurii de sudare prin presiune. Astfel avem :

- sudarea de fixare a patinelor și a distanțierilor prin procedul de sudare în puncte în relief cu energie înmagazinată în câmp electrostatic.
- sudarea de închidere dop-teacă, sudare în capete în stare solidă.
- sudarea de asamblare a e.c.n. în fascicule, prin pro-

cedeul de sudare în puncte în relief, sudare executată între dopurile e.c.n. profilate și cele două grile de capăt.

Ca procedeu conex sudării, menționăm operația de brazare a patinelor și a distanțierilor, brazare în vid cu curenți de înaltă frecvență, după ce inițial s-a depus un strat de beriliu pe suprafață de contact a acestora cu tuburile, prin evaporare în vid.

Caracteristicile fasciculului combustibil nuclear (f.c.n.) de tip Pickering sînt următoarele :/28/

- e.c.n./fascicul	28
- $\varnothing_{ext}$ e.c.n. x lungime	15,20 x 495 mm
- grosime tub Zy-4	0,38 mm
- diametru ext.fascicul /29/	103,5 mm

O încărcătură de combustibil pentru un reactor Pickering reprezintă 4.680 de fascicule, fiind introduse cîte 12 bucăți în fiecare din cele 390 canale orizontale ale reactorului. Intr-un fascicul Pickering, ce are greutatea totală de 24,8 Kg. zircaloy-4 reprezintă 2,1 Kg. diferența de 22,7 Kg fiind reprezentată de pastile  $UO_2$  sinterizat cu echivalentul de uraniu conținut de 19,9 Kg /30/. Durata maximă de funcționare a unui fascicul Pickering este de 2,48 ani, putînd atinge o putere lineară maximă de 13,23 Kw/cm /31/. Intreaga încărcătură de 92,6 t  $U_{natural}$  pentru acest tip de reactor produce 1742 MW termici, producția netă de energie electrică fiind de 508 Mwe /28/. Fasciculele combustibile de tipul Bruce și Gentilly-2 se deosebesc de fasciculele Pickering doar prin numărul de e.c.n. pe fascicul, la același cote de gabarit a acestuia. Astfel, s-a trecut la 37 e.c.n. de 13,08 mm diametru exterior, păstrînd grosimea de perete a tubului de 0,38 mm /32/. Din punct de vedere al tehnologiei de fabricație nu există nici o deosebire fundamentală, respectîndu-se fluxul din figura 2.7, completat cu o operație de grafitare interioară a tuburilor pentru toate elementele, după operația de brazare, operație introdusă din considerente funcționale.

Caracteristicile fasciculelor combustibile pentru reactorii PWR și BWR sînt complet diferite, ca și soluțiile constructive abordate. Astfel dacă ne referim la fasciculul de tipul PWR pentru centrala, Thihange-Belgia /8/ cu puterea de 870 MWe. este alcătuit, (figura 2.2) din 204 e.c.n. cu diametrul exterior de 10,7 mm și perete de 0,6 mm, zircaloy-4. de lungime 3.809 mm. Combust-

tibilul de tipul uraniu îmbogățit 2,06-3,22% este sub formă de pastile de  $UO_2$  sinterizate. Asamblarea în fascicul este făcută cu o serie de grile intermediare și două grile de capăt, o încărcătură a reactorului fiind alcătuită din 157 de fascicule, ceea ce reprezintă 69,8 t U conținut.

Fasciculul de tip BWR (figura 2.3) cu care este echipată centrala Ringhals-1-Suedia, cu o putere de 762 MWe este alcătuită din 64 e.c.n. din zircaloy-2 cu perete de 0,8 mm, montate într-o casetă cu lungimea de cca. 1.000 mm. O încărcătură este alcătuită din 648 fascicule ce conțin uraniu îmbogățit 2,2-2,6%, sub formă de pastile de  $UO_2$  sinterizate, încărcătura reprezentând 114,5 t U conținut.

La aceste tipuri de elemente sudura de închidere dop-teacă se realizează prin procedeul TIG (WIG) automat fără material de adaos. Procedeul de sudare în puncte se întâlnește la prinderea grilelor intermediare și a altor piese de structură ale fasciculului.

## 2.5. Concluzii

Reactorii nucleari de putere utilizați în prezent pentru producerea de energie electrică la scară industrială și care reprezintă cca 80% din puterea instalată, sînt de tipul PWR, BWR și PHWR-SGHR. Referitor la CNE echipate cu reactorii PHWR-CANDU se pot rezuma din cele prezentate mai sus următoarele avantaje pentru o țară în curs de dezvoltare în adoptarea acestei filiere :

- independență economică referitoare la combustibilul nuclear, ceea ce se reflectă și în independența politică

- obținerea de plutoniu în urma retratării combustibilului ars, deci continuarea dezvoltării energeticii apse reactorii rapizi.

- posibilitatea utilizării thoriului în reactorii termici ca reactori reproducători, ceea ce mărește substanțial cantitatea de combustibil existentă pentru reîncărcarea reactorilor.

Pe de altă parte, pentru asigurarea avantajelor prezentate mai sus se impune dezvoltarea și constituirea unor unități industriale de prelucrare a minereurilor de uraniu, producerea de apă grea, obținerii zirconiuului și a aliajelor de zirconiu pentru laminare și pentru retratarea combustibilului ars.

### 3. MATERIALE UTILIZATE LA INTECUIREA COMBUSTIBILULUI NUCLEAR

Materialele utilizate în fabricatia e.c.n. pentru întecuirea combustibilului nuclear, pe lângă proprietățile mecanice termice și rezistentă la coroziune, trebuie să aibă și o secțiune de captură (absorbție) a neutronilor cât mai mică. Aliajele de aluminiu, magneziu, zirconiu și oțelurile inoxidabile sînt utilizate în acest scop, studiindu-se și posibilitatea utilizării altor materiale ca de exemplu aliaje de vanadiu /33/34/35/.

#### 3.1. Aluminiul și aliajele sale.

Utilizat la primii reactori nucleari, deoarece tehnologia de fabricație era bine pusă la punct, aluminiul prezintă avantajul unei secțiuni eficiente de captură\* mici de  $0,24 \text{ b}^{**}$ . În prezent este foarte puțin utilizat datorită proprietăților sale slabe din punct de vedere fizic și chimic.

#### 3.2. Aliaje de magneziu

Avînd o secțiune eficientă de absorbție de  $0,07 \text{ b}$  și o rezistență mecanică și chimică față de uraniu mai bună decît aluminiul, aliajele de magneziu se utilizează ca material de întecuire pentru reactorii cu uraniu metalic răciți cu  $\text{CO}_2$  și moderați cu grafit de tipul GCR și Magnox. În filiera Manox întîlnim aliajele Mg-Zr 0,7% /36/, Mg-Mn 1,2% și Mg-Zr 0,5%-Mn 1% /37/.

#### 3.3. Oțeluri inoxidabile /26/.

Utilizate în general pentru fabricatia de e.c.n. pentru reactorii rapizi, sînt întîlnite și la reactorii cu uraniu îmbogățit și răciți cu apă ușoară. Utilizarea oțelurilor inoxidabile permite ridicarea temperaturii de lucru a e.c.n. datorită proprietăților fizice și chimice bune. Elementele ce intră în compoziția

---

\* secțiunea eficientă de captură - măsură a proprietăților de captare a unui neutron de către un nucleu

\*\*  $\text{b} = \text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$



acestor oțeluri pentru îmbunătățirea proprietăților lor trebuie să aibă însă o influență minimă asupra secțiunii de captură. Gama de oțeluri utilizată este foarte largă, întâlnind atât oțeluri feritice cât și austenitice.

### 3.4 Zirconiul

Zirconiul, cu numărul atomic 40 și masa atomică 91,2 prezintă proprietatea de a avea o secțiune eficace de captură de 0,18 b /38/.

Din punct de vedere metalurgic, la temperatura ambiantă zirconiul prezintă o structură hexagonală compactă alfa care trece în structură cubică cu volum centrat. faza beta, la temperatura de 862°C /39/.

Parametrii rețelei sînt următorii /40/:

Zr.- Alfa (25°C)	distanța dintre atomii planului A:	$a = 3,2312 \text{ \AA}$
	distanța dintre două plane de bază	$d = 3,1788 \text{ \AA}$
		$c = 5,1477 \text{ \AA}$
		$c/a = 1,592$
Zr.- Beta		$a = 3,616 \text{ \AA}$
		(la 980°C)
	distanța dintre un atom al planului A și unul al planului B :	$d = 3,1255 \text{ \AA}$
		(la 862°C)

Dificultatea principală în stabilirea precisă a parametrilor rețelei zirconiului derivă din prezenta impurităților și a distribuției neuniforme a acestora. Trebuie să remarcăm de asemenea că zirconiul alfa nu are o structură hexagonală compactă ideală, deoarece raportul  $c/a$  este mai mic de 1,663  $\text{\AA}$ , raport la care se realizează o împachetare maximă. Astfel la 20°C, șase dintre cei mai apropiați atomi vecini sînt la distanța de 3,178  $\text{\AA}$  iar ceilalți șase la 3,231  $\text{\AA}$ . la 862°C distanțele devenind 3,208 și respectiv 3,250  $\text{\AA}$ . Se observă că distanța interatomică în fază beta este cu cca. 2.6% mai mică decît cea a fazei alfa la 862°C, zirconiul suferind o contractie volumetrică prin trecerea de la faza alfa la faza beta. /41/. Faza alfa are densitatea de 6,489  $\text{gr/cm}^3$  la temperatura mediului ambiant pînă la 6.574  $\text{gr/cm}^3$  în cazul unui continut mai ridicat de hafniu, iar faza beta, la temperatura de 979°C are densitatea de 6,046  $\text{gr/cm}^3$  /42/.

Proprietățile fizico-mecanice ale zirconului sînt următoarele :

a) Proprietăți termice și termodinamice /38/40/41/43/;

- punct de topire :  $1855 \pm 15^{\circ}\text{C}$  /40/

$1852 \pm 10^{\circ}\text{C}$  /38/

- punct de fierbere : cca.  $3700^{\circ}\text{C}$  /40/

cca.  $3580^{\circ}\text{C}$  /38/42/

- căldură latentă de topire : cca.  $5500$  cal/mol

- căldură latentă de transformare :  $920$  cal/mol

- căldură latentă de vaporizare :  $142.146 \pm 350$  cal/mol

- căldură specifică ( $25^{\circ}\text{C}$ ) :  $0,0659$  cal/gr  $^{\circ}\text{C}$

- conductivitate termică la  $20^{\circ}\text{C}$ :  $0,211$  w/cm/ $^{\circ}\text{C}$

la  $300^{\circ}\text{C}$ :  $0,187$  w/cm/ $^{\circ}\text{C}$

- coeficient de dilatare/ $^{\circ}\text{C}$

alfa direcție paralelă cu axa c :  $6,39 \times 10^{-6}$

alfa direcție perpendiculară pe c:  $5,64 \times 10^{-6}$

alfa direcție oarecare :  $5,85 \times 10^{-6}$

- coeficient de dilatare a laminatelor la rece, mediu pentru domeniul de  $20-300^{\circ}\text{C}$

perpendicular pe planul de laminare :

$8,6 \pm 0,4 \times 10^{-6}$

transversal pe direcția de laminare :

$6,3 \pm 0,4 \times 10^{-6}$

în direcția de laminare

:

$5,5 \pm 0,4 \times 10^{-6}$

b) Proprietăți electrice /38/40/

-  $\rho$  la  $0^{\circ}\text{C}$

$41$  micro ohmxcem

coeficient de temperatură  $44 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

-  $\rho_{\text{max}}$ , faza alfa la  $846^{\circ}\text{C}$

$144$  micro ohmxcem

-  $\rho_{\text{min}}$ , faza beta la  $1157^{\circ}\text{C}$

$126$  micro ohmxcem

Variația rezistivității funcție de temperatură /40/43/ este reprezentată în figura 3.1.

- influența presiunii asupra rezistivității

P Kg/mm <sup>2</sup>	$\rho/\rho_0$
0	1
$10^2$	0,9977
$2 \times 10^2$	0,9954
$3 \times 10^2$	0,9933

$4 \times 10^2$   
 $5 \times 10^2$

0,9914  
 0,9894

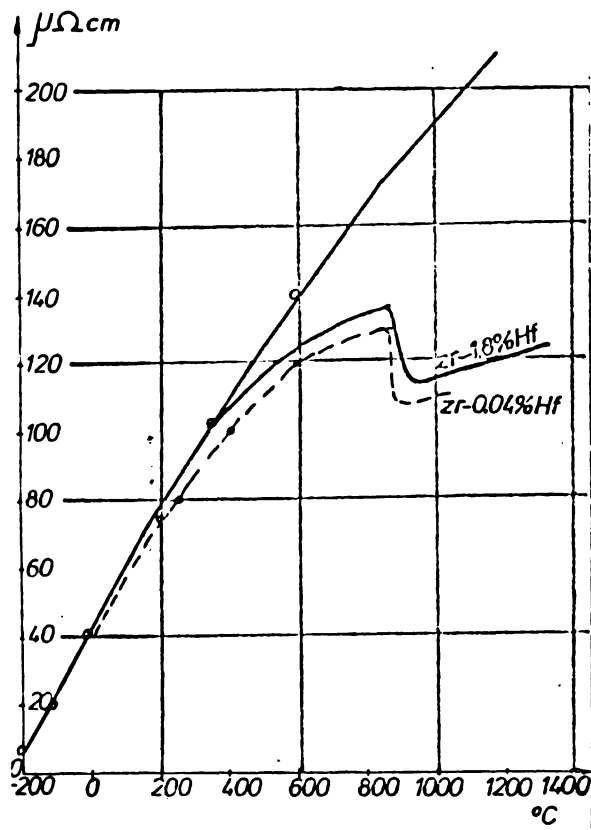


Figura 3.1. Variația rezistivității zirconului funcție de temperatură /40/

- temperatura de superconductibilitate :  $- 272,32^{\circ}\text{C}$
- echivalentul electrochimic :  $0,2363 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$
- forța termoelectrică pentru  $0-600^{\circ}\text{C}$ 
  - Zr-constantan  $0,05725-109,4 \text{ tx}10^{-8} \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
  - Zr-alumel  $0,02881-336 \text{ tx}10^{-8} \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

c) Proprietăți mecanice

- modulul Yung (Zr recopt) :  $9630 \text{ Kg}/\text{mm}^2$
- coeficientul Poisson :  $0,32-0,35$
- limita de rupere :  $40,86 \text{ Kg}/\text{mm}^2$
- limita de curgere  $0,2\%$  :  $25,54 \text{ Kg}/\text{mm}^2$
- alungirea :  $25-35\%$

3.5. Aliaje de zirconiu utilizate la întecuirea elementelor combustibile nucleare

Primul aliaj de zirconiu utilizat în mod curent în fabricația e.c.n. a fost aliajul cunoscut sub denumirea de zircaloy-2. La ora actuală, a fost înlocuit cu aliajul de tipul zircaloy-4 /44/.

fiind studiate pentru dezvoltarea ulterioară aliaje de tipul Zr-Nb. Compoziția acestor aliaje este prezentată în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1.

Element	Zy-2 /44/ %	Zy-4 /44/ %	Zr-Nb 2,5% /45/ %
Staniu	1,20 - 1,70	1,20 - 1,70	-
Fier	0,07 - 0,20	0,18 - 0,24	-
Crom	0,05 - 0,15	0,07 - 0,13	-
Nichel	0,03 - 0,08	-	-
Niobiu	-	-	2,4 - 2,8
Oxigen	max.1400 ppm*	max.1400 ppm	900 - 1300 ppm
Zirconiu + impurități	rest	rest	rest

Aliajele de mai sus sînt utilizate pentru reactorii răciți cu apă ușoară sau grea. Se întîlnesc și alte tipuri de aliaje de zirconiu cum sînt Zr-Cu sau Zr-Cu-Mo pentru reactorii răciți cu gaz /46/.

În figura 3.2 sînt prezentate diagramele binare ale zirconiumului cu elementele ce sînt prezente în cantități importante în aliaje. Se constată că în zona cu conținut ridicat de zirconiu, cea mai mare parte a aliajelor sînt de tipul eutectic, componentele eutecticului fiind pe de o parte o soluție solidă de zirconiu beta și pe de altă parte un compus intermetalic. Excepție face numai oxigenul, diagrama fiind de tipul perectoid, fazele solide prezente fiind beta și alfa. Caracteristicile de echilibru lichid-solid în aliajele binare de zirconiu sînt prezentate în tabelul 3.2.

Se remarcă imediat că conținutul în elemente de aliere utilizate la aliajele de zirconiu sînt mult inferioare limitei de solubilitate în fază beta și în aceste condiții intervalele de solidificare nu depășesc 100°C, efectele de segregare fiind puțin remarcate, la sfîrșitul solidificării găsind practic o soluție solidă beta aproape omogenă. În cursul răcirii transformarea alotropică a zirconiumului beta în zirconiu alfa nu se mai face la 865°C ca în cazul metalului pur. În tabelul 3.3 sînt prezentate caracteris-

\* ppm - părți pe milion

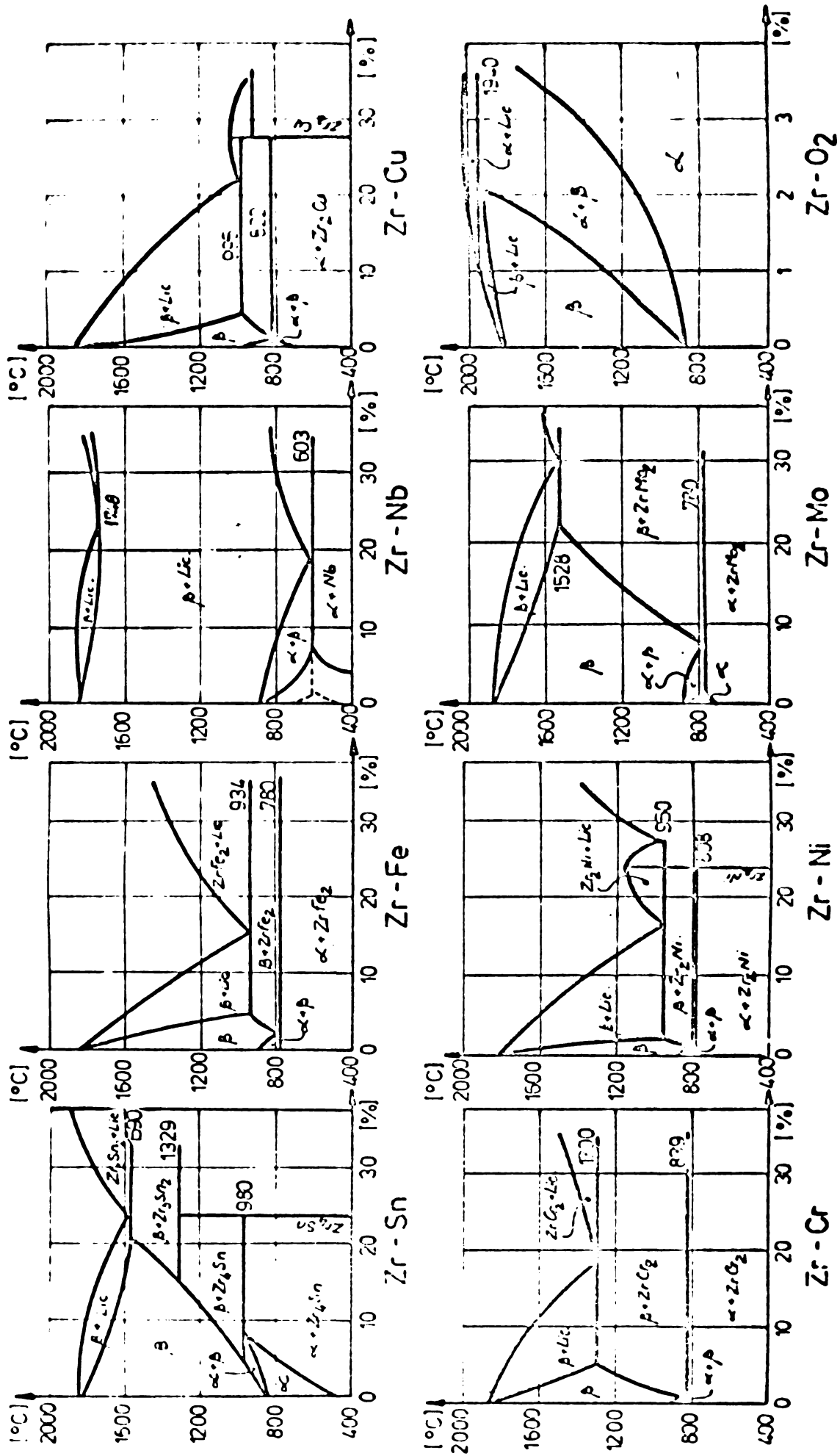


Figura 3.2. Diagrame de echilibru a aliajelor binare de zirconiu

Tabelul 3.2

Element	Solubilitatea maximă a elementului în faza beta %	Compoziția eutectică sau peritectică %	Temperatura °C	Compus metalic sau fază de echilibru
Staniu	21,0	23,5	1.590	Zr <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub>
Fier	5,5	16,0	931	Zr Fe <sub>2</sub>
Crom	4,5	18,0	1.300	Zr Cr <sub>2</sub>
Nichel	1,9	17,0	961	Zr <sub>2</sub> Ni
Niobiu	nelimitat	22,0	1.740	-
Oxigen	2,0	?	1.940	Zr alfa

ticile de echilibru în faza solidă în aliajele binare de zirconiu.

În cazul staniului și a oxigenului starea finală este soluția solidă alfa mai mult sau mai puțin omogenă. Prin adăugarea de alte elemente corespunzătoare diagramelor de tipul eutectoid, funcție de conținut, faza secundară poate fi fază alfa sărăcită în

Tabelul 3.3

Element	Solubilitate maximă a elementului în faza alfa %	Compoziția eutectică sau peritectică %	Temperatura °C	Compus metalic sau fază de echilibru
Staniu	9,0	5,0	980	Zr <sub>4</sub> Sn
Fier	0,02	2,5	780	Zr Fe <sub>2</sub>
Crom	foarte mică	1,0	835	Zr Cr <sub>2</sub>
Nichel	foarte mică	1,3	808	Zr <sub>2</sub> Ni
Niobiu	0,6	17,5	610	Nb
Oxigen	3,75	-	1.940	Zr beta

elemente de aliere, fie un compus metalic. Starea finală poate fi soluție solidă alfa sau soluție solidă alfa și compusul metalic

partial sub formă de eutectic. Referindu-ne la transformările structurale ale aliajelor de zirconiu /41/ s-a constatat că în multe cazuri fazele de la temperaturi înalte se pot găsi în condiții metastabile la temperaturi subcritice, dar după un timp acestea se transformă în faze de echilibru fie direct, fie prin intermediul altor faze. Astfel întâlnim transformările atermale omega pentru aliajele zirconului cu molibden, cupru, niobiu etc. /47/ și martensitică caracteristică aliajelor cu niobiu. Pentru aliajele Zr-Sn transformarea izotermă de descompunere a fazei beta se face foarte repede obținându-se o structură alfa de formă aciculară. Atomii străini din faza beta sînt în general reținuți în faza alfa producându-se o suprasaturare și deformări în rețea, caracteristice fazei martensitice. Compusul  $Zr_4Sn$  s-a evidențiat doar ca o fază secundară fin dispersată.

### 3.5.1. Proprietăți de rezistență la coroziune a aliajelor Zy-2 și Zy-4.

Aliajele de tipul Zy-2 și Zy-4 utilizate în fabricația e.c.n. pentru utilizare în reactorii răciți cu apă prezintă rezistență bună la coroziune în comparație cu zirconiu pur și anume /48/:

- filmul de oxid este aderent o perioadă lungă după apariția fazei a doua, din acest motiv punctul de schimbare a cineticii de coroziune pentru aceste aliaje este determinat de punctul de tranziție și nu de punctul de decojire (breakway), care apare la zirconiu pur la depășirea grosimii critice a filmului de oxid.

- efectul de diminuare a rezistenței la coroziune dat de impurități este considerabil redus.

Cinetica de coroziune a aliajului Zy-2 este prezentată în diagrama din figura 3.3.0 parte a hidrogenului produs în cursul reacției de oxidare ( $Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 4H$ ) este absorbit de aliajul de zirconiu /49/. Când conținutul de hidrogen depășește limita de solubilitate (95 ppm la  $300^\circ C$  pentru Zy-2), proprietățile mecanice sînt diminuate datorită precipitării de hidruri. Această absorbție de hidrogen, care devine importantă odată cu mărirea timpului de funcționare în mediu apos, este favorizată de prezența nichelului. Datorită acestui considerent a fost elaborat aliajul Zy-4 din care este eliminat nichelul și mărit corespunzător procentul de aliere cu fier. În figura 3.4. și 3.5 sînt prezentate diagramele de absorbție a hidrogenului în Zy-2 și Zy-4 funcție de timp

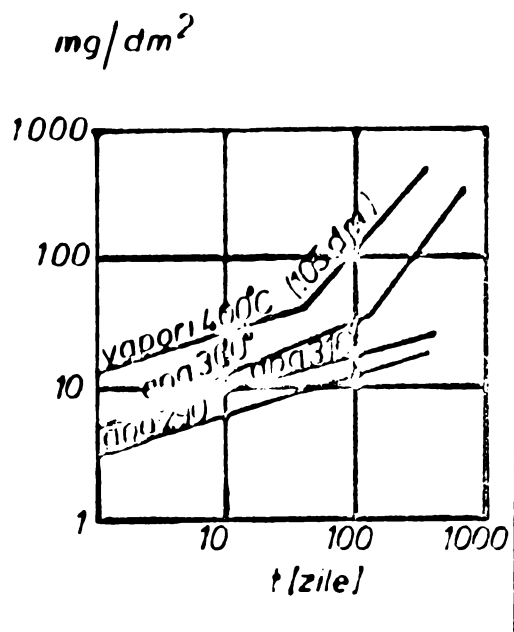


Figura 3.3. Cinetica de coroziune a aliajului ZY-2 /49/

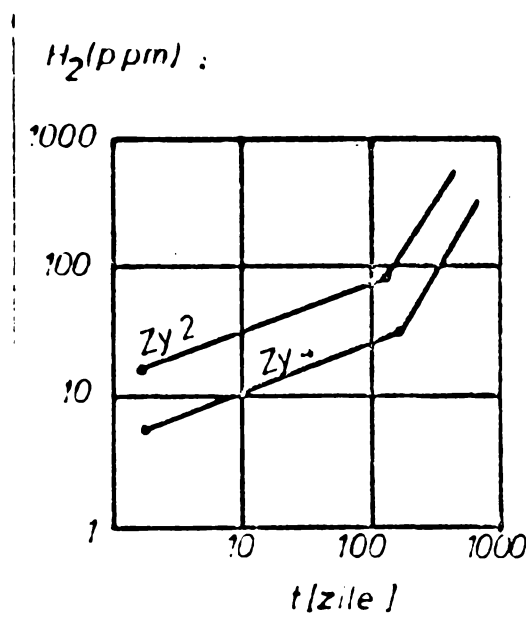


Figura 3.4. Absorbția de hidrogen în Zy-2 și Zy-4 funcție de timp /49/.

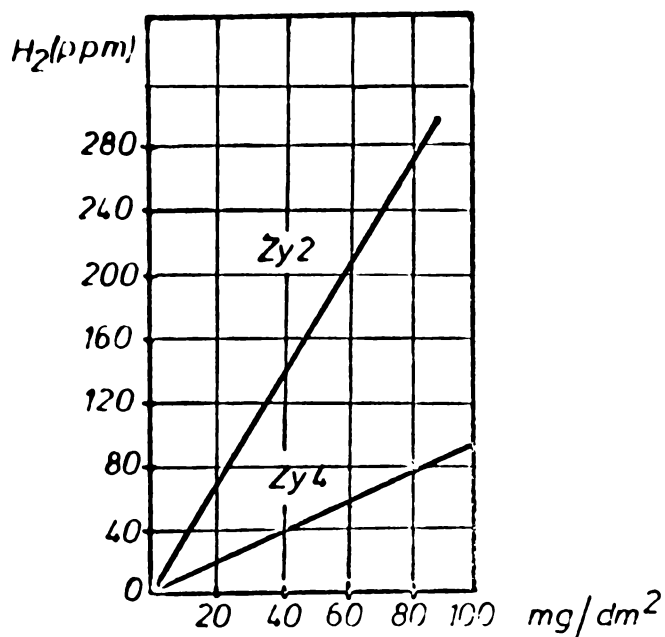


Figura 3.5. Absorbția de hidrogen în Zy-2 și Zy-4 funcție de creșterea în greutate /49/.

și de creșterea în greutate. Rezistența la coroziune a aliajelor de zirconiu este influențată de tratamentul termic al aliajului, aceasta scăzând în cazul în care aliajul prezintă precipitări la limita de grăunți. De asemenea suprafața expusă contactului cu apa de răcire este recomandabil a fi decapată acid pentru înlăturarea



unui strat de metal superficial afectat de prelucrările mecanice, ceea ce duce la îmbunătățirea rezistenței la coroziune.

3.5.2. Caracteristicile aliajelor de Zy-2 și Zy-4.

Pentru exemplificarea caracteristicilor acestor aliaje ne vom referii concret la laminate finite de tipul teavă și bară, laminate ce participă direct la fabricația e.c.n.

Teavă de Zy-2. Furnizor Wah Chang /50/.

- compoziție lingou (%)

Element	Vîrf	Centru	Fund
Staniu	1,48	1,41	1,48
Fier	0,14	0,13	0,14
Crom	0,13	0,13	0,13
Nichel	0,06	0,05	0,06
Impurități ppm			
Aluminiu	38	39	35
Carbon	140	90	120
Cadmium	0,2	0,2	0,2
Cobalt	5	5	5
Cupru	22	28	42
Hidrogen	1,9	1,9	3,2
Hafniu	43	46	41
Azot	50	52	46
Oxigen	1.140	1.330	1.220
Siliciu	95	81	84
Wolfram	25	25	25

- proprietăți mecanice la 20°C la 350°C

limita de rupere Kg/mm <sup>2</sup>	65,5	37,2
limita de curgere Kg/mm <sup>2</sup>	49,8	24,9
alungirea l <sub>0</sub> = 50 mm %	26	30
alungire uniformă %	9,5	13,1

- test de explozie

presiune de explozie Kg/mm <sup>2</sup>	1.210
limita de explozie Kg/mm <sup>2</sup>	84,7
alungirea circumferențială la ruptură %	25
alungirea circumferențială la 20 mm de ruptură %	6,6

- rugozitatea

suprafață exterioară Ra	0,5
suprafață interioară Ra	0,4

- rezistentă la coroziune test de autoclavizare la 400°C,  
105 atm..72 ore:

creșterea în greutate mg/dm <sup>2</sup>	11,8
culoare oxid	negru uniform

- conținut de gaze (ppm)

Hidrogen	7
Azot	42
Oxigen	1.600

- caracteristici dimensionale

diametru exterior	14,40 ± 0,06 mm
diametru interior	12,60 ± 0,04 mm
grosime de perete	0,90 ± 0,06 mm
săgeata	0,40 mm/535 mm

Bară Zy-4 /51/

- compoziție lingou %

Element	Interval admis	Valori determinate		
		Vîrf	Centru	Fund
Staniu	1,20 - 1,70	1,54	1,48	1,61
Fier	0,18 - 0,24	0,21	0,21	0,23
Crom	0,07 - 0,13	0,10	0,10	0,11
Fier + Crom	0,28 - 0,37	0,31	0,31	0,34
Impurități ppm maxim admis				
Aluminiu	75	47	45	43
Bor	0,5	0,2	0,2	0,2
Cadmium	0,5	0,2	0,2	0,2
Carbon	270	160	190	150
Cobalt	20	10	10	10
Cupru	50	19	21	18
Hafniu	200	49	53	37
Hidrogen	25	5	5	5
Mangan	50	25	25	25
Nichel	70	35	35	35

Azot	80	40	39	17
Siliciu	120	69	85	75
Titan	50	25	25	25
Wolfram	100	25	25	25
Uraniu	3,3	1,6	1,6	2,4
Oxigen	-	1.290	1.500	1.180

- proprietăți mecanice

	valori minime	valori determinate
limita la rupere Kg/mm <sup>2</sup>	42,25	54,93
limita la curgere 2% Kg/mm <sup>2</sup>	24,65	34,72
alungirea 50 mm %	14	26

- coroziunea

creșterea în greutate mg/dm <sup>2</sup>	22	16
--	----	----

Teavă de Zy-4 /52/.Sandvik

- compoziție chimică Zy-4. ASTM B353, grad RA-2, %

Staniu	1,20 - 1,70
Fier	0,18 - 0,24
Crom	0,07 - 0,13
Oxigen	0,10 - 0,15
Fier + Crom	0,28 - 0,37

- proprietăți mecanice

	20°C	300°C
limita de rupere Kg/mm <sup>2</sup>	53	27
limita de curgere 2% Kg/mm <sup>2</sup>	38	15
alungire 50 mm %	34	40

- proprietăți fizice - valori nominale

densitatea	6,6 g/cm <sup>3</sup>
căldură specifică 20°C	0,066 cal/g°C
coeficient de dilatare termică x 10 <sup>-6</sup> (20-300°C)	6,15
conductibilitate termică 20°C	0,031 cal/cm°C
300°C	0,037 cal/cm°C
secțiune captură neutroni termici	0,23 b
modul de elasticitate	10.000 Kg/mm <sup>2</sup>

### 3.6. Concluzii

Pentru reactorii cu neutroni termici, aliajele de zirconiu sînt utilizate în general pentru execuția unor piese de structură ale reactorilor și în special pentru întecuirea combustibilului nuclear datorită secțiunii eficiente de captură a neutronilor mici. Aliajul Zy-2 utilizat inițial, a fost înlocuit în prezent cu aliajul Zy-4 din considerente de rezistență la coroziune. Aliajele de zirconiu-niobiu sînt studiate și dezvoltate în prezent, datorită caracteristicilor mecanice mai bune, avînd perspectiva utilizării lor pe scară largă atît pentru execuția unor componente de reactor cît și la întecuirea combustibilului nuclear.

#### 4. SUDAREA ALIAJELOR DE ZIRCONIU ÎN FABRICATIA ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE

##### 4.1. Considerații generale.

Dacă facem o comparație între aliajele de zirconiu și oțelurile inoxidabile austenitice se observă că proprietățile acestora sînt favorabile sudării. Astfel coeficientul de dilatare termică este de trei ori mai mic /53/ și conductibilitatea termică mai scăzută decît a oțelului austenitic ( $Zr-2 = 0,028 \text{ cal/cm}^2\text{sec.}$  și  $CrNi 18/8 = 0,035 \text{ cal/cm}^2\text{sec.}$  /54/), rezistivitatea electrică de cca. șapte ori mai mare. Din punct de vedere metalurgic, zonele de solidificare dau o structură aciculară exbeta de tip martensitic cu precipitări de compuși ai metalelor de aliere. Zonele răcite în domeniul în care există faza alfa și beta prezintă grăunți de fază alfa cu subgrăunți aciculari exbeta cu precipitări de compuși la limita de grăunți. Zonele răcite pornind de la fază alfa prezintă o mărire de grăunți funcție de temperatură. Datorită afinității ridicate față de  $H_2$ ,  $N_2$  și  $O_2$  funcție de temperatură, la sudarea aliajelor de zirconiu este necesară o protecție specială, de tipul atmosferă controlată de înaltă puritate. În general cantitatea de impurități totale admisă în gazul de protecție pentru sudarea TIC este limitată la 50 ppm. necesitînd deci gaze puritatea 99,995% /55/. Verificarea sudurilor din punct de vedere al rezistenței la coroziune se face prin autoclavizare la  $400^\circ\text{C}$  și 100 atm. timp de 72 ore. După autoclavizare suprafața zonei influențate termic a pieselor sudate și a cordonului de sudură trebuie să prezinte un strat uniform de oxid negru cu o creștere în greutate mai mică de  $20\text{mg/dm}^2$ . Prezența unor pete de culoare gri sau albă denotă o contaminare neadmisă cu gaze în timpul sudării.

Aliajele de zirconiu sînt utilizate la execuția pieselor de structură a e.c.n. și a fasciculelor de elemente combustibile precum și la alte componente ale reactorului. Ca procedee de sudare întîlnim :

- TIG cu toate variantele ei /56/
- MIG automată /57/

- electrică prin presiune cu toate variantele ei /58/59/
- laseri /56/
- explozie /60/
- fascicul de electroni /59/61/

Ca procedeu conex sudării amintim brazarea cu curenți de înaltă frecvență în vid și îmbinarea prin difuzie a aliajelor de zirconiu pe alte metale.

În fabricația e.c.n. întâlnim ca procedee de sudare următoarele :

- sudarea TIG automată în atmosferă controlată de înaltă puritate
- sudarea prin presiune cap la cap în stare solidă
- sudarea cu fascicul de electroni

Îmbinarea tipică ce se realizează prin sudare în fabricația e.c.n. este cea de închidere a tecii ce conține combustibilul nuclear, cu două dopuri de capăt. Caracteristica principală a acestui tip de îmbinare o constituie faptul că se sudează țevi cu pereți subțiri de 0,4-0,6 mm pe dopuri masive. Oricare din procedeele de mai sus trebuie să satisfacă o serie de cerințe absolut necesare bunei funcționări în reactor a elementelor și anume :

- să asigure etanșare foarte bună, la controlul de etanșeitate cu heliu să asigure valori în clasa de  $10^{-9}$  torr l/sec./54/.
- să asigure reproductibilitatea foarte bună a ciclului de sudare și deci a caracteristicilor zonelor sudate (adâncime de pătrundere, uniformitate, lățime cordon, mărime zonă influențată termic, structură metalografică a îmbinării, etc).
- să asigure protecția zonei sudate fără diminuare rezistenței la coroziune, ca o condiție de bază în acceptarea sudurilor executate.

Pe lângă aceste considerente de ordin tehnic intervin și cele de ordin economic, procedeu de sudare trebuind să satisfacă :

- rentabilitatea prin pret de cost cât mai scăzut
- productivitatea pentru asigurarea fabricației de serie mare

#### 4.2. Sudarea TIG (WIG)

Pentru îmbinarea de asamblare dop-teacă a e.c.n., suda-

rea TIG automată în atmosferă controlată de înaltă puritate este utilizată în prezent la scară industrială în toate țările care și-au dezvoltat programe nucleare, cu excepția Canadei care utilizează sudarea prin presiune. Procedul TIG se pretează bine la automatizare, asigură reproductibilitatea parametrilor și a sudurilor efectuate, cât și cerințele de calitate impuse de fabricație.

#### 4.2.1. Îmbinarea sudată dop-teacă /62/

Pentru e.c.n. diametrul teii poate varia între 5-40 mm și grosime de perete de 0,2-1,5 mm. Pentru cele care utilizează aliajele de zirconiu ca material de înțecuire, se utilizează teii cu perete de 0,38-0,6 mm și diametru exterior între 11,0-20,0 mm. Tipurile de bază ale îmbinării dop-teacă sunt prezentate în figura 4.1, tipuri caracteristice sudării TIG. În practică se întâlnesc diferite variante ale acestor îmbinări, toate fiind concepute ținând seama că sudarea se execută fără material de adaos.

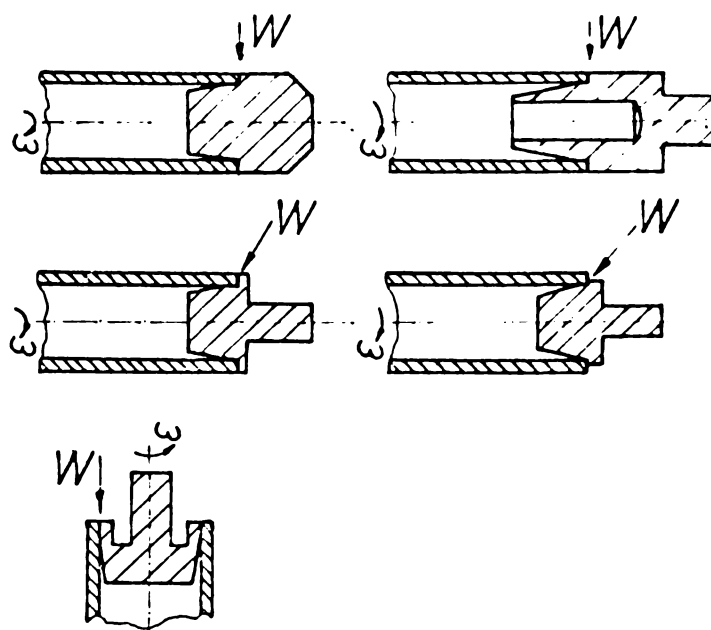


Figura 4.1. Tipuri de îmbinări dop-teacă pentru sudarea TIG a elementelor combustibile nucleare.:

Parametrii care influențează calitatea sudurii pentru realizarea îmbinării dop-teacă sunt multipli, amintim dintre aceștia următorii :

- materialul de sudat (proprietăți fizice, chimice, mecanice, metalurgice)
- îmbinarea (tipul îmbinării, pregătirea suprafețelor, dimensiunile absolute și toleranțele)

- echipamentul de sudare (sursă, amorsare, control și reglaj parametrii)
- electrodul (compoziție, geometrie, lungime liberă)
- gazul și aducția de gaz (puritate, debit, compoziție, tip de curgere)
- fixarea și controlul capului de sudare
- antrenarea piesei în mișcare de rotație
- caracteristicile ciclului de sudare (tip de amorsare, tip de curent, uniformitatea topirii, eliminare crater de sfârșit)

În cazul sudării e.c.n. avînd definit materialul, tipul de îmbinare și cerințele de calitate, ciclul de sudare este factorul determinat în obținerea unei suduri de calitate impusă. Sudarea aliajelor de zirconiu se execută în curent continuu cu polaritate directă. Capul de sudare este fix și piesa execută mișcarea de rotație. Amorsarea arcului se face cu piesa în stare de repaos și după o pretopire piesa intră în mișcare de rotație constantă, curentul de sudare avînd pe durata ciclului de sudare o formă descrescîndă pentru asigurarea unui aport caloric pe unitatea de lungime constant, astfel ca să asigure o pătrundere uniformă. Ajunghîndu-se în punctul de amorsare se execută o acoperire după care urmează stingerea arcului astfel ca să fie înlăturată orice urmă de crater de sfârșit a sudării. Rezultă deci evident necesitatea unui utilaj de sudare de performanțe ridicate care să asigure un control și o corelare a parametrilor de lucru, aceasta constituind un specific al instalațiilor destinate sudării e.c.n. Din punct de vedere al curentului sursa trebuie să acopere domeniul de 1-60 A cc. Aceste cerințe au dus la dezvoltarea unor echipamente care la nivel experimental utilizează unități de calcul de tipul PDP-8/S sau PDP-8/L /63/.

#### 4.2.2. Camere de sudare în atmosferă controlată.

Camerele de sudare în atmosferă controlată au fost dezvoltate în laboratoarele de cercetare, astfel că se întîlnesc o serie mare de variante constructive. La început s-au folosit experimental camere din sticlă termorezistentă /64/ care se vedau inițial cu o pompă de vid preliminar, după care se introducea argon 99,99%. S-au utilizat și protecții locale utilizînd debite foarte mari de gaz și existînd însă riscul de contaminare cu gaze a sudurii. Datorită intrării în producție a unor capacități de fabri-



cație ce impuneau reducerea la minimum a timpilor auxiliari, s-a trecut la realizarea unor camere de dimensiuni mari tip cheson vidabil. Astfel pe lângă pompele de vid preliminar, apar și pompele de difuzie pentru asigurarea unei vidări de calitate /65/. Aceste camere asigurau încărcarea unui număr mare de elemente combustibile pregătite pentru sudare, care ajungeau la 100-150 bucăți /66/. Camerele de dimensiuni foarte mari, care puneau probleme de vidare, volum mare de gaz inert și manipulări din exterior greoaie /67/, au fost apoi înlocuite prin camere mici de sudare prevăzute cu sas de introducere și scoatere a unui număr relativ mare de elemente, /68/, sau utilizând camere mici simple constructiv cu posibilități de vidare până la  $10^{-5}$  torr /69/ în timp foarte scurt. Instalatia de la centrul nuclear Saluggia /70/ este echipată cu două mini camere de sudare cu posibilități de vidare a camerei concomitent cu vidarea de la partea nesudată a elementului, în camera de sudare găsindu-se doar o porțiune scurtă a tubului la care se află montat dopul ce urmează a fi sudat. La ora actuală sînt utilizate în fabricatia elementelor combustibile nucleare următoarele tipuri de camere :

- minicameră pentru sudarea unei îmbinări pentru elemente lungi
- camere pentru mai multe elemente scurte
- camere tip boxă cu mănuși cu sistem de alimentare exterior, utilizate în special pentru uraniu îmbogățit și plutoniu.

Din punct de vedere al vidării initiale, utilizînd un gaz de protecție de puritate mare (99,994%) este suficientă utilizarea unei pompe de vid preliminar care asigură  $10^{-3}$  torr.

#### 4.2.3. Pregătirea suprafețelor.

La sudarea TIG suprafața ce participă la sudare este supusă initial unei degresări și eventual unei decapări acide. O metodă recomandată de pregătire a suprafețelor utilizată la sudarea aliajelor de zircaloy este următoarea: /53/

- degresare în acetonă sau alcool
- decapare în soluție fluoronitrică ( $30\% \text{HNO}_3 + 5\% \text{HF}$ ) în apă demineralizată, soluția fiind termostatăată la  $20^\circ\text{C}$
- spălare în apă demineralizată la  $80^\circ\text{C}$
- spălare în alcool

- uscare în aer cald

Decaparea acidă a pieselor este valabilă însă numai pentru probe de laborator. În fabricație, nu este posibilă decaparea acidă a tuburilor de zircaloy la capete, din cauza reducerii grosimii de perete, iar o decapare completă a tuburilor pune probleme tehnologice deosebite. O degresare a componentelor ce urmează a fi sudate este suficientă ca pregătire a suprafețelor de sudat, atât din punct de vedere calitativ a sudurii obținute cât și din considerații tehnologice. Sudarea TIG a aliajelor de zirconiu nu ridică alte probleme de sudare și sudabilitate decât realizarea unei atmosfere de protecție corespunzătoare /71/. Din punct de vedere a caracteristicilor zonei sudate (structură, pătrundere, lățime de cordon, etc.) care sînt riguros definite și cu toleranțe foarte strînse, echipamentul de sudare trebuie să permită controlul riguros al parametrilor corelarea lor și o reproductibilitate perfectă.

#### 4.3. Sudarea electrică prin presiune.

Sudarea electrică prin presiune este la ora actuală utilizată pe scară industrială numai la fabricarea elementelor combustibile de tip PHWR-CANDU. Datorită avantajelor metodei, din care enumerăm:

- productivitate
- reproductibilitatea sudurilor
- pregătirea simplă a pieselor de sudat
- protecția zonei sudate simplă,

metoda este în atenția majorității centrelor de studii tehnologice în domeniul nuclear, existînd o experiență bună în Anglia, Franța, Italia, USA, Belgia.

Din punct de vedere al domeniului de utilizare această tehnologie este întîlnită la sudarea dop-teacă, la prinderea unor piese de distantare pe tecile de zircaloy și la confecționarea altor structuri sudate de tipul grile, distanțiere intermediare.

Fasciculele combustibile CANDU, de tip autoportant sînt asamblate prin sudare în puncte a elementelor de două grile de capăt.

#### 4.3.1. Îmbinarea sudată dop-teacă.

Pentru această îmbinare se utilizează procedeul de sudare în capete în stare solidă. Din punct de vedere a utilajelor folosite, întâlnim curent mașini de sudare cu forță magnetică /72/ cu capete orizontale. Forța de sudare la aceste mașini se compune dintr-o forță constantă realizată pneumatic și o forță realizată de o armătură magnetică ce acționează în corelare cu curentul de sudare /73/. Aceste instalații permit realizarea unui program de presiune în intervalul de timp al curentului de sudare, care este de ordinul a 1-6 semiperioade /55/. Se utilizează și mașini de sudat cu realizarea pneumatică a forței de sudare /74/, care dau rezultate foarte bune la sudarea dop-teacă a aliajelor de zircaloy. Indiferent de tipul de mașină, ciclul de lucru este următorul:

- introducerea tecii în sistemul de prindere tip mandrină elastică, care are rolul de electrod și strângerea pneumatică a acesteia.
- introducerea dopului în electrodul port-dop fixat pe capul mobil al mașinii.
- deplasarea capului mașinii și realizarea închiderii camerei de sudare, vidarea camerei și umplerea cu gaz inert.
- realizarea sudurii cu ciclul clasic al sudării electrice prin presiune în capete în stare solidă.
- retragerea capului port-dop cu camera de sudare
- deschiderea mandrinei electrod și scoaterea elementului sudat.

Caracteristic pentru acest procedeu este formarea bavurilor interioare și exterioare, bavura exterioară fiind prelucrată mecanic prin așchiere.

În figura 4.2. sînt prezentate mai multe tipuri de pregătire a îmbinării dop-teacă pentru sudarea prin presiune /75/76/77/, iar în figura 4.3. schema unei mașini de sudat cu forță magnetică. /78/. Caracteristicile unei mașini de sudat cu forță magnetică de tipul Precision-USA sînt următoarele /79/:

- 65.000 A. curent de scurtcircuit la 18,3 V
- 540 Kg forță maximă inițială a electrodului port-dop
- oca. 1.700 Kg forța magnetică de sudare la curent max.
- timp de sudare 1/120-1/2 sec. reglabil.

La acest tip de mașină, la sudarea unui dop de zircaloy-2

pe teacă  $\varnothing 14,3$  mm și perete de 0,7 mm, parametri utilizați au fost /75/:

- curent 20.000 - 24.000 A
- timp de sudare 1/50 sec.
- forța inițială de sudare 1000 kg
- distanța între armăturile magnetice 17,5 mm.

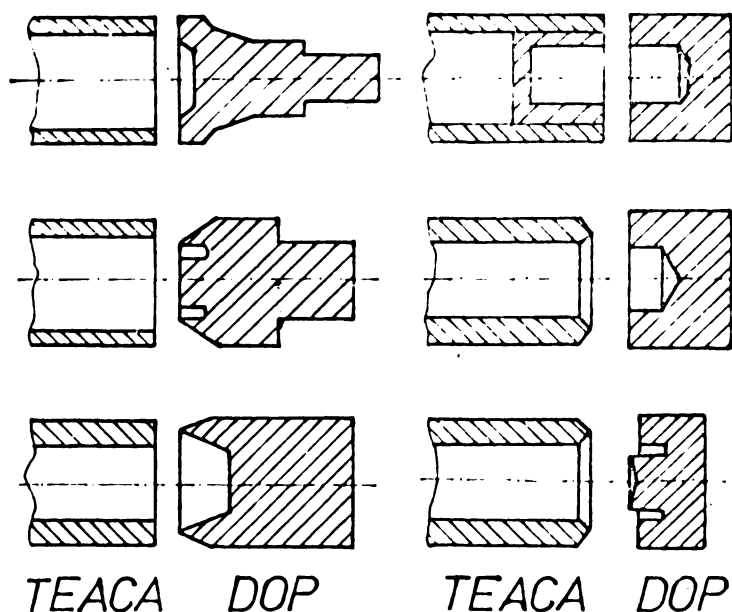


Figura 4.2. Tipuri de îmbinări dop-teacă pentru sudarea prin presiune a elementelor combustibile nucleare.

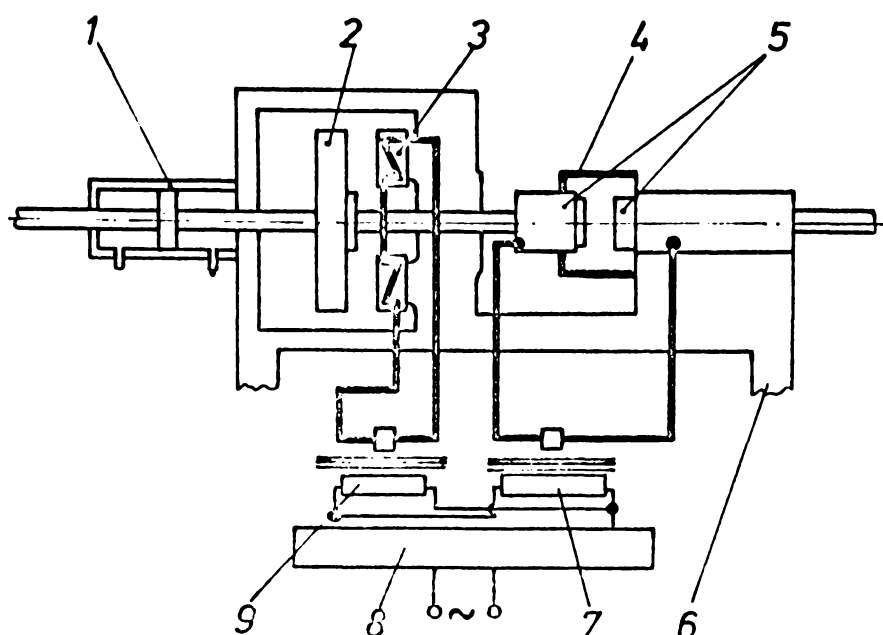


Figura 4.3. Schema mașinii de sudat cu forță magnetică /78/  
1. cilindru pneumatic, 2. armătură magnetică mobilă, 3. armătură magnetică fixă, 4. cameră de sudare, 5. capetele mașinii de sudare, 6. batiu, 7. transformator de sudură, 8. bloc electronic, 9. transformator alimentare armătură fixă.

#### 4.3.2. Controlul sudurilor prin presiune.

Controlul metalografic al sudurilor, care este un control distructiv, se poate aplica pentru calificarea procesului și pentru probe martor.

În fabricație, procedeele de control cu raze X și ultrasunete, care se aplică cu succes la sudurile TIG, nu pot fi aplicate datorită formei neregulate a bavurilor interioare /80/. Astfel în fabricația de e.c.n. sudate prin presiune, se impune un control riguros al parametrilor de sudare /81/ prin care să se asigure reproductibilitatea calității sudurilor pentru un regim de lucru stabilit inițial.

Controlul de etanșeitate cu heliu este un control ce se efectuează 100%, alături de un control periodic de rezistență la coroziune, care se execută prin autoclavizare.

Aliajele de zirconiu se sudază bine și prin procedeul de sudare electrică prin presiune, fiind necesară și pentru acest procedeu funcție de tipul și importanța îmbinării de o protecție de gaz inert, fie prin curgere liberă, fie cu camere de sudare cu atmosferă controlată. Sudarea prin rezistență este o metodă productivă și economică cu perspectivă de generalizare în fabricația de e.c.n., în prezent fiind utilizată la scară industrială doar pentru elementele de tipul PHWR-CANDU.

#### 4.4. Sudarea cu fascicul de electroni /55/.

Avantajele sudării cu fascicul de electroni sînt bine cunoscute, acest procedeu avînd o largă utilizare în tehnica nucleară. În fabricația de serie a e.c.n. acest procedeu se utilizează în prezent doar în Suedia. În general este considerată ca o tehnologie scumpă, fiind preferate sudarea TIG și prin presiune. La scară de laborator se utilizează acest procedeu pentru realizarea e.c.n. experimentale.

#### 4.5. Concluzii.

- aliajele de zirconiu de tipul zircaloy-2 și 4 se sudază bine prin toate procedeele de sudare enumerate mai sus.
- se impune o protecție a zonei sudate în timpul ope-

ratiei de sudare cu o atmosferă inertă controlată de puritate înaltă, protecția zonei sudate fiind o particularitate a sudării acestor aliaje.

- utilajele de sudare trebuie să asigure controlul și reglajul parametrilor de lucru cu o înaltă fidelitate pentru garantarea reproductibilității operației de sudare.

- sudurile executate, datorită condițiilor functionale grele din reactoarele nucleare, sînt supuse unei serii de controale distructive și nedistructive avînd specificații precise asupra caracteristicilor zonei sudate în limite foarte strînse.

- echipamentele de sudare specifice s-au dezvoltat în centrele de dezvoltare în domeniul nuclear, neexistînd o producție industrială specializată în astfel de echipamente

- procedeul de sudare TIG este la ora actuală cel mai larg utilizat în fabricația e.c.n., sudarea electrică prin presiune avînd șanse de a se generaliza în următorii ani datorită avantajelor acestui procedeu.

P A R T E A a II-a

Partea a II-a a prezentei teze de doctorat prezintă rezultatele lucrărilor în domeniul utilajului și tehnologiei sudării aliajelor de zirconiu, efectuate în perioada 1970-1980 în cadrul Institutului de Reactori Nucleari Energetici de către autor.

## 5. UTILAJE PENTRU SUDAREA TIG (WIG) A ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE INTECUIE IN ALIAJE DE ZIRCONIU.

Tinând seama de experiența pe plan mondial în domeniul sudării elementelor combustibile nucleare, prima tehnică de sudare abordată în IRNE a fost sudarea TIG. Programul de lucrări efectuate referitor la utilaje de sudare, a parcurs mai multe etape și anume :

- realizarea instalației de sudare
- soluționarea la scară de laborator a purificării argonului indigen pentru a putea fi utilizat la sudarea aliajelor de zirconiu.
- realizarea de camere de sudare în atmosferă controlată de înaltă puritate.
- realizarea unei linii de sudare TIG a e.c.n. alcătuită din instalație de sudare și camere de sudare cu atmosferă controlată de înaltă puritate.

### 5.1. Instalația de sudare PROMETEU - 100

Realizarea instalației de sudare PROMETEU - 100 demarată în cadrul Laboratorului de Materiale Nucleare, Secția a II-a a Institutului de Fizică Atomică - București 1970, a fost determinată de faptul că firmele constructoare de utilaje de sudare nu realizau instalații automate tip TIG în domeniul 3-100 A cu posibilitate de programare a ciclului de sudare decât la comandă specială /82/.

Caracteristicile instalației de sudare PROMETEU - 100 sînt următoarele /83/ :

- curent de sudare : 1-100 Acc., 5-100 Aca. la DA 20% reglabil în 10 trepte selectate din 24 valori de curent prestabilite
- reglaj de curent : elemente rezistive
- modularea curentului :
  - intensitate maximă : valoare fixă sau variabilă prin programare cu durată reglabilă



între 0,2-5 sec.

- intensitate minimă : valoare prestabilită în toată plaja de reglaj cu durată reglabilă de 0,2-2 sec.

- programarea ciclului de sudare : în ciclu de maximum 30 sec. avînd interval minim de comutare 0,5 sec., cu programator mecanic.

- rotirea piesei : turație reglabilă continuu 0,1-10 rotații/minut.

- positionarea pistolului de sudare : 5 grade libertate

- sudarea manuală : reglarea curentului în timpul sudării prin comandă de la pedală în sens crescător și descrescător după un program de curent prestabilit.

- amorsare arc : oscilator 3000 V ; 0,5-1 MHz

- extincția arcului : continuu, cu panta variabilă de la ultimul curent de sudare

- tensiune de mers în gol a sursei : 100 V

În figura 5.1. este prezentată instalația PROMETEU - 100 care a fost apoi îmbunătățită și asamblată ca instalație unitară (figura 5.2) sub denumirea de PROMETEU - 100 M.

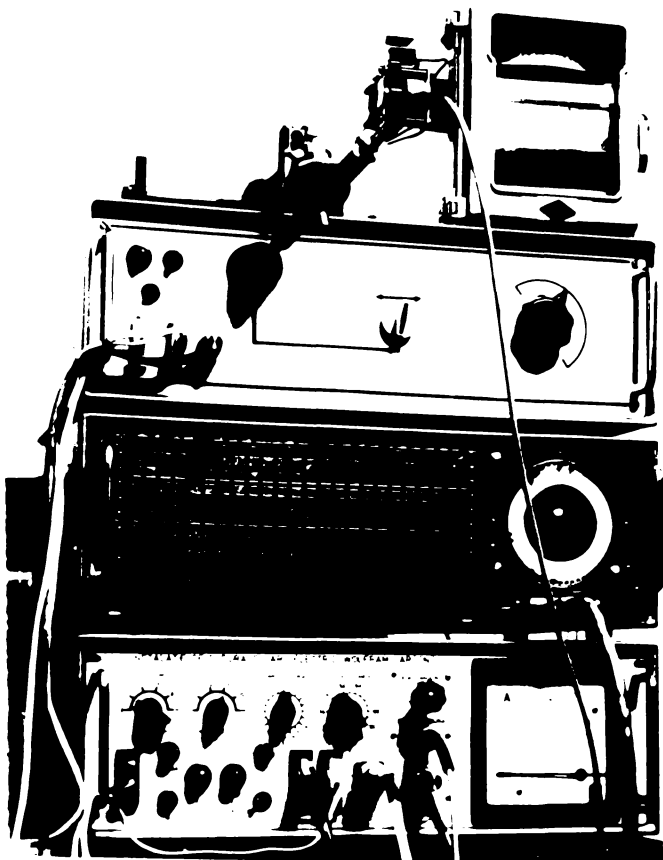


Figura 5.1. Instalație TIC -  
PROMETEU - 100

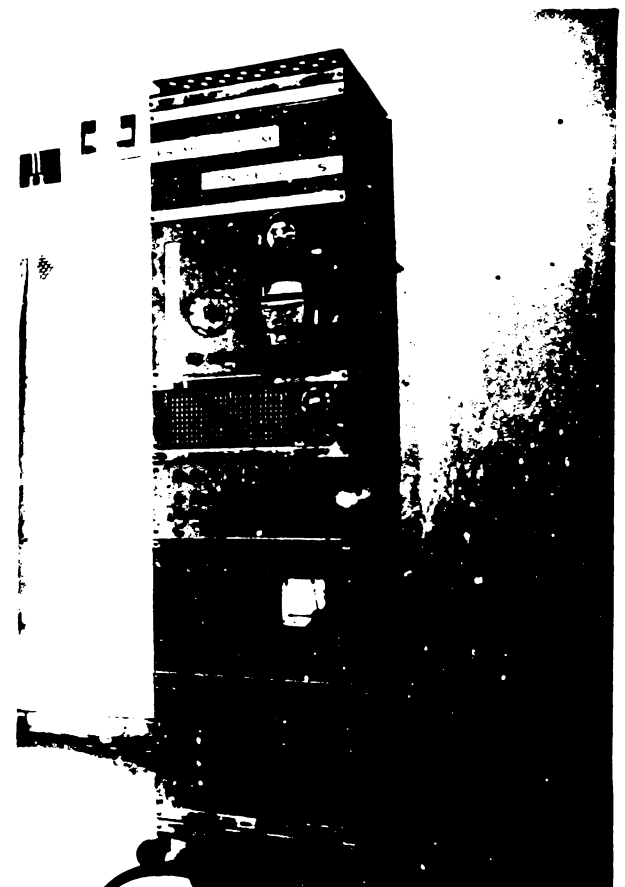


Figura 5.2. Instalație TIC -  
PROMETEU 100-M

Schema bloc (figura 5.3.) a fost concepută în buclă închisă, comenzile dându-se și executându-se succesiv, consecutiv intrării în funcție a fiecărui element în parte. În cadrul instalației se disting patru circuite functionale caracteristice oricărei instalații de sudare TIG și anume :

- circuitul curentului de sudare
- circuitul de comandă și control
- circuitul curentului de înaltă tensiune și înaltă frecvență
- circuitul argonului

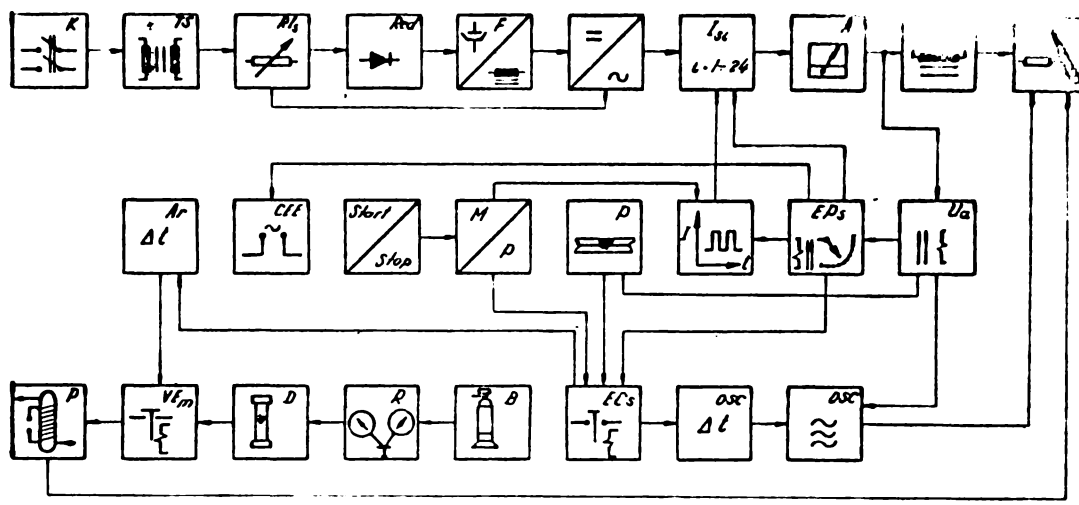
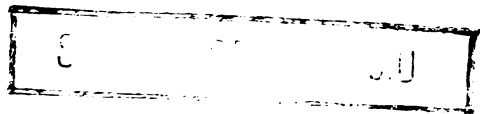


Figura 5.3. Schema bloc a instalației PROMETEU 100 M

Circuitul curentului de sudare are ca prim element întrerupătorul, K, care asigură conectarea acestuia la rețeaua de alimentare. Transformatorul TS ( $I_2 = 100 \text{ A}$ ;  $U_{20} = 100 \text{ V}$ ) este urmat de elementul de reglaj a curentului de sudare  $RI_g$ . Reglarea curentului se face pe rezistențe ohmice în două domenii, 0-50A și 0-100A, domenii în care se stabilesc 24 de valori fixe de curent  $I_g$ . Puntea redresoare Red. utilizând diode IPRS KS 4040 și urmată de filtrul F asigură redresarea curentului. Ampermetrul A cu domenii 7,5; 15; 30; 60; 120 A este instrument electromagnetic înregistrator dispus înaintea bobinei de șoc  $S_{P1}$  pe miez de ferită cu valoarea de  $500 \mu\text{H}$ . Aceasta protejează circuitul de curent împotriva curentului de înaltă tensiune și înaltă frecvență generat de oscilator. Ultimul element al acestui circuit este capul de sudare.



Circuitul de comandă și control are la început comanda Start-Stop pentru alimentare, urmată de elementul de comutare M/P pentru sudarea manuală sau programată. La sudarea manuală comenzile instalației sînt date prin intermediul unei pedale. Contactorul curentului de sudare ECS este un contactor electromagnetic cu două contacte normal deschise, fiind elementul care execută comanda Start-Stop a curentului de sudare. Asupra acestuia acționează elementul P care permite sudarea în puncte temporizate care la rîndul său este comandat de releul minimal de tensiune  $U_a$  care sesizează căderea de tensiune la apariția arcului. Executarea programului de sudare EPS, selector telefonic, lucrînd la sudarea cu program dă comenzile Start-Stop ale programului asupra elementului ECS. De la ECS pornesc două comenzi și anume, cea de devans a oscilatorului  $\Delta t$  OSC care coincide cu temporizarea preargon și  $\Delta t$  Ar, aceasta asigurînd curgerea temporizată a argonului la sfîrșitul operației de sudare prin acționarea asupra ventilului electromagnetic VEm din circuitul argonului. Sînt necesare cîteva precizări asupra elementelor EPS, M-modulator și  $I_{si}$ -selectorul și comutatorul curenților de sudare.  $I_{si}$  este elementul de selectare cu bare încrucișate cu 24 intrări și 11 ieșiri. Cele 24 intrări reprezintă numărul de trepte de curent date de  $RI_s$  iar ieșirile, sînt pentru curenți selectați pentru sudare din cei 24, o ieșire reprezentînd valoarea maximă a curentului de modulare. Comutarea curenților selectați este asigurată de contactorii electromagnetici. Comanda de comutare în timp a curenților selectați este dată de un comutator rotativ acționat de un micromotor sincron cu  $n=2$  rot/min., comanda dată prin acționarea EPS. Modulatorul M permite sudarea cu curent modulată, valoarea maximă a curentului de modulare fiind identică cu valoarea curentului selectat în orice interval de timp. Modularea și selectarea curentului de sudare este posibilă și pentru sudarea manuală comenzile necesare fiind date de pedala de comandă. EPS acționează și comandă execuția exterioară CEF, care la sudarea automată este folosită la comanda Start-Stop a rotirii piesei de sudat

Circuitul oscilatorului comandat de ECS asigură amorsarea arcului de sudare, la sudarea în curent continuu după care este oprit prin comanda dată de  $U_a$ . La sudarea în curent alternativ funcționarea oscilatorului are loc pe toată durata sudării. Frecvența de oscilații este cuprinsă între 0,5 și 1 MHz, valoarea la mers în

gol a tensiunii oscilatorului fiind de 3.000V iar în prezenta arcului de 400 V.

Ultimul circuit, cel al argonului, este alcătuit din butelia B de argon, reductorul de presiune R, debitmetrul D, ventilul electromagnetic VEm și instalația de purificare a argonului, ultimul element constituind capul de sudare.

Se menționează faptul că executarea programului de sudare stabilit la sudarea cu comandă program este complet automată, începând din momentul apariției arcului.

### 5.2. Purificarea argonului /85/.

Având în vedere necesitatea unei calități ridicate a gazului de protecție pentru abordarea sudării aliajelor de zirconiu la nivel de laborator s-a realizat o instalație experimentală de purificare a argonului de fabricație internă.

Analizând gazul dintr-o butelie de argon tip I-A/85/ s-a obținut următorul rezultat :

- apă 1.100 ppm ; hidrogen 600 ppm.; azot 500 ppm.; oxigen 15.000 ppm.

Aceasta corespunde unui total de 17.200 ppm., iar pentru sudarea aliajelor de zirconiu se recomandă un maxim de 50 ppm. impurități totale.

Metodele de purificare a argonului pot fi împărțite în două grupe mari și anume :

- metode chimice
- metode fizice.

În cadrul metodelor chimice menționăm reacțiile chimice între gaz și solid și procesele catalitice. Metodele fizice cuprind absorbția, refrigerarea și distilarea fracționată. Cel mai des utilizate în purificare sînt însă reacțiile chimice gaz-solid și absorbția.

În tabelul 5.1. sînt indicate cele mai frecvente soluții de reținere a impurităților din argon.

Temperatura la care aceste materiale devin apte pentru a reține impuritățile cît și mijlocul de reactivare al lor este indicată în tabelul 5.2.

La alegerea materialelor active trebuie avute în vedere

Tabelul 5.1.

Impuritate	Material activ	Mecanism de purificare	Proveniența	Observații
H <sub>2</sub>	CuO	reducere	RSR	Pericol de sinterizare
	CuO activat	reducere	IRNE	-
H <sub>2</sub> O	silicagel	absorbție	RSR	-
	site moleculare	absorbție	import	-
	agent refrigerator	îngheț	RSR	-
O <sub>2</sub>	MnO	oxidare	RSR	pericol de sinterizare
	Cu activat	oxidare	IRNE	-
	Ca	oxidare	import	-
	Ti	oxidare	import	-
	Cu	oxidare	RSR	-
	Zr	oxidare	import	-
	U	oxidare	import	radiotoxic
N <sub>2</sub>	Ca	nitrurare	import	-
	Zr	nitrurare	import	-
	U	nitrurare	import	radiotoxic

Tabelul 5.2.

Material activ	Temperatura purificare °C	Mecanism reactivare	Agent reactivare	Temperatură de reactivare °C
CuO	350	oxidare	aer	350
CuO activat	200	oxidare	aer	200
silicagel	50	deshidratare	azot	200
site moleculare	50	deshidratare	azot	400
MnO	200	reducere	hidrogen	350
Cu activat	200	reducere	hidrogen	200
Ca	500	-	-	-
Ti	600	-	-	-
Cu	700	-	-	-

Zr	600	-	-	-
U	650	-	-	-
Ca	650	-	-	-
Zr	1.000	-	-	-
U	950	-	-	-

următoarele considerente :

- eficacitatea
- temperatura de lucru și reactivarea cât mai coborâtă
- procurarea ușoară și la preț redus

Avînd în vedere aceste criterii se recomandă utilizarea materialelor din tabelul 5.3.

Tabelul 5.3.

Impuritate reținută	Material activ	Culoarea materialului activ	Culoarea materialului uzat	Greutate g/dm <sup>3</sup>	Observații
H <sub>2</sub>	CuO activat	cafeniu	negru	590	suport diatomit
H <sub>2</sub> O	silicagel	violet	roz	720	colorat cu Co
N <sub>2</sub>	Ca	metalică	gri	510	-
O <sub>2</sub>	MnO	cafeniu	negru	1.750	-
	Cu activat	negru	cafeniu	565	suport diatomit

Reactoarele care conțin aceste materiale active se dimensionează ținînd seama de următorii factori:

- viteza de circulație a gazului să nu depășească 6 cm/sec pentru materialele cu densitatea < 1.

- secțiunea transversală a materialului activ să fie astfel aleasă încît la vitezele de circulație admise gazul să parcurgă un volum de material activ suficient pentru a realiza raportul de purificare impus.

- înălțimea stratului activ să nu provoace căderi de presiune peste valorile admisibile.

- diametrul reactorului trebuie ales ținînd cont de conductibilitatea termică a materialului activ pentru ca temperatura

acestui să fie cât mai uniformă în secțiune transversală.

Ordinea de așezare a reactoarelelor în sensul de parcurgere al gazului (figura 5.4.) este următoarea :

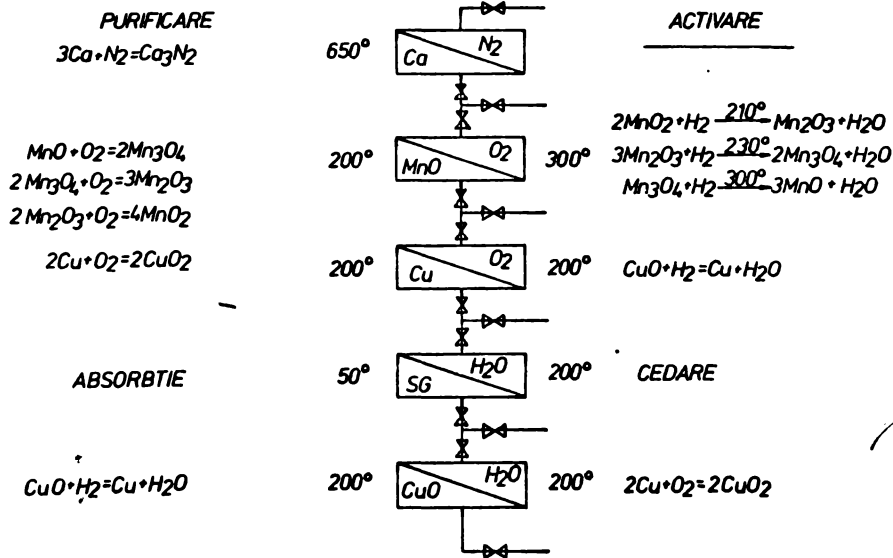


Figura 5.4. Schema de purificare - reacții chimice

- oxid de cupru activat care reține prin reacție de reducere hidrogenul. Oxigenul din argon compensează în parte reducerea produsă de hidrogen, impuritatea devenind astfel agent de reactivare.
- silicagel care reține apa existentă ca impuritate în argon cât și cea rezultată prin fixarea hidrogenului.
- cupru activat și oxid de mangan pentru reținerea oxigenului.
- calciul metalic reține azotul ; fiind așezat după reactoarele de reținere a oxigenului nu este uzat de oxigen.

Cum reactoarele cu oxid de cupru și cupru activat lucrează la temperatura de 200°C ele pot fi executate din sticlă termo-rezistentă la fel ca reactorul cu silicagel (figura 5.5.). Reactorul cu oxid de mangan se recomandă a fi executat din cuarț care rezistă la șocurile termice cauzate de reacția exotermă care are loc la reactivarea încălzirii. Reactorul cu calciu (figura 5.6.) este confecționat dintr-o incintă de oțel inoxidabil din cauza temperaturii ridicate de lucru - 650°C.

Ca element de încălzire se folosește o rezistentă de crom-nichel de Ø 0,6 mm bobinată direct pe reactoarele din sticlă de cuarț după ce în prealabil s-au dispus patru șunururi de azbest

pe patru generatoare ale reactoarelor. Alimentarea acestora se face de la tensiunea de 220 V înseriind înfășurările. Incinta reactoru-

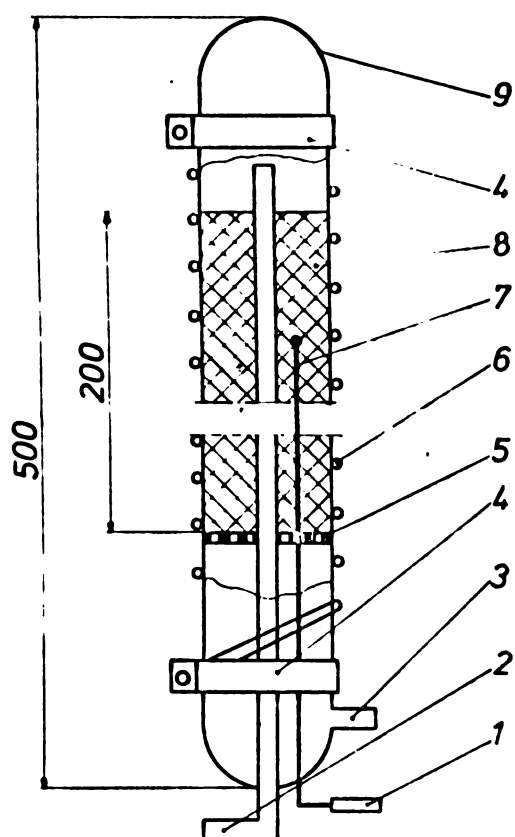


Figura 5.5. Reactor cu  $\text{CuO}_2$ .  
1. conector termocuplu, 2. ieșire argon, 3. intrare argon, 4. cleme fixare element de încălzire, 5. sită inox, 6. element de încălzire, 7. termocuplu, 8. încărcătură de purificare, 9. cilindru sticlă termorezistentă.

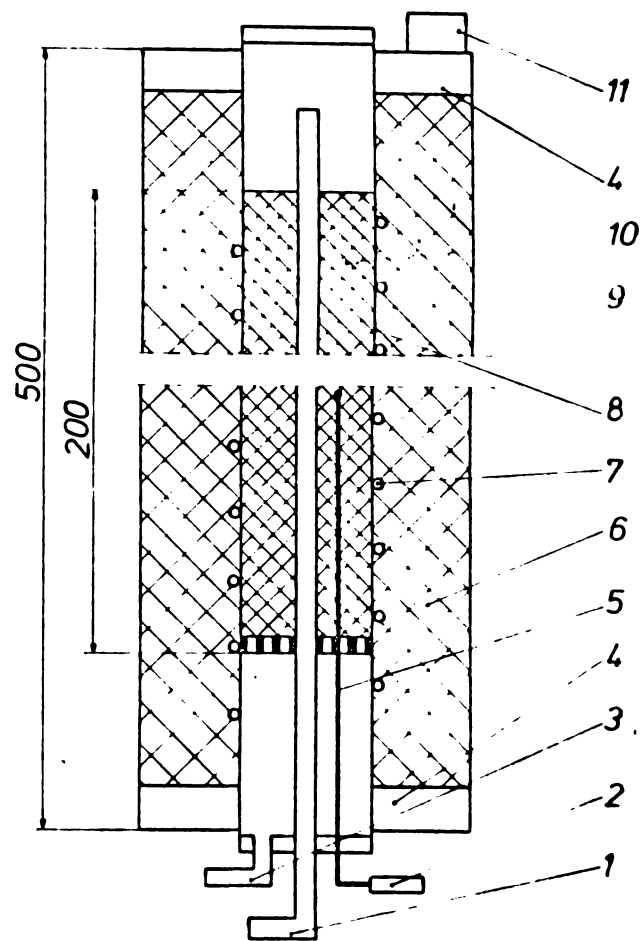


Figura 5.6. Reactor cu Ca  
1. ieșire argon, 2. conector termocuplu, 3. intrare argon, 4. incintă răcită cu apă, 5. termocuplu, 6. izolație termică, 7. element de încălzire, 8. cilindru inox, 9. carcasă, 10. încărcătură de calciu, 11. alimentare electrică.

lui cu calciu se izolează electric cu un strat de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prin depunerea cu plasmă. După realizarea înfășurării cu bandă de crom-nichel  $3 \times 0,4$  mm, se depune un nou strat de oxid de alumina. Izolarea termică se realizează cu vată minerală. Fiecare reactor este dotat cu un termocuplu crom-alumel dispus la jumătatea înălțimii încărcăturii și la semigrosimea stratului inelar al încărcăturii active. Termocuplele sînt conectate printr-un comutator la un milivoltmetru



etalonat în grade Celsius. Reactoarele sînt montate vertical, circulația gazului făcîndu-se astfel :

- admisia cu circulația ascendentă prin coloana de material activ care are o secțiune transversală inelară.

- circulația descendentă cu trecere prin tubul central în partea inferioară făcîndu-se și evacuarea apei rezultate din reactivarea coloanelor.

Recomandările practice rezultate din experimentarea instalației realizate sînt următoarele :

- încălzirea reactoarelor se face după purjarea instalației în prealabil cu argon timp de 10 minute cu debitul de 2 l/min.

- instalația debitează argon purificat la 10 minute după atingerea temperaturii de lucru.

Se impune respectarea strictă a spălării inițiale a instalației cu argon pentru că orice spațiu nespălat cu argon modifică substanțial puritatea gazului.

- înainte de realizarea interconectării reactoarelor se vor purja cu argon toate spațiile adiacente dintre robinete și tuburile de interconectare.

- reactivarea reactorului de cupru activ se face cu un debit de 1 l/min de hidrogen uscat.

- reactivarea reactorului cu oxid de mangan se face cu hidrogen la debitul de 0,1 l/min la temperatura de 215°C. Această temperatură se menține pînă la încetarea evacuării de vapori de apă, după care se ridică la 235°C. La încetarea evacuării vaporilor de apă ridicăm temperatura cu 10°C/min pînă la 305°C, temperatura la care eliminarea apei se încheie. După aceasta se menține încălzirea la 350°C timp de 15 min., cu aceasta reactivarea fiind realizată.

- reactivarea oxidului redus de hidrogen se face la 200°C folosind ca agent de reactivare aerul.

- reactivarea silicagelului se face prin circulație de aer fără ulei sau azot cu debitul de 1 l/min și prin încălzirea reactorului

- respectarea strictă a normelor de protecție muncii la utilizarea hidrogenului pentru reactivare.

Realizarea unei instalații pentru purificarea argonului la debitul de 2,5 l/min a condus la următoarele caracteristici

dimensionale :

- secțiunea transversală a materialului activ :  $5 \text{ cm}^2$
- înălțimea coloanei active : 200 mm
- viteza de circulație a gazului : 5 cm/sec
- diametrul tubului central : 10 mm
- diametrul interior al reactorului : 27 mm
- înălțimea reactoarelor : 500 mm

Instalația experimentală construită la IFA-București pe baza celor prezentate mai sus nu a putut fi utilizată complet datorită lipsei de calciu metalic pentru reactorul de retenție a azotului. Ulterior la intrarea în funcție a Secției de Argon din cadrul Combinatului De Azot Tîrgu Mureș s-a putut procura argonul de puritate necesară sudării aliajelor de zirconiu.

### 5.3. Camere de sudare în atmosferă controlată de înaltă puritate.

Atmosfera controlată de înaltă puritate necesară sudării aliajelor de zirconiu se realizează în camere de sudare care inițial se vedează, după care se introduce argon sau heliu de înaltă puritate.

Primele lucrări experimentale pe aliaje de zirconiu s-au realizat cu o minicameră cu purjare de gaz fără posibilitate de vidare care pe lângă faptul că ducea la un consum prea mare de argon nici nu asigura o protecție corespunzătoare. S-a trecut la realizarea unei camere de sudare a elementelor combustibile CSEC-1 cu care a fost echipată prima linie de sudare TIG a elementelor combustibile nucleare din Zr-2 și 4, cameră care a fost utilizată timp de doi ani de zile. După această perioadă a fost înlocuită cu un ansamblu CSEC-2 executat în colaborare cu firma Polyboudes-Franța, ansamblu care a reușit să înlăture dificultățile functionale din punct de vedere mecanic a CSEC-1.

#### 5.3.1. Ansamblul CSEC-2.

Ansamblul CSEC-2 este destinat sudării TIG a îmbinării dop-teacă a elementelor combustibile nucleare întecuite în aliaje de zircaloy-2 și 4, în atmosferă controlată de înaltă puritate. În figura 5.7. este prezentat ansamblul CSEC-2 alcătuit din camera de sudare propriu zisă, sistem de vidare, subansamble de prindere

și antrenare în mișcare de rotație a piesei și capul de sudare.

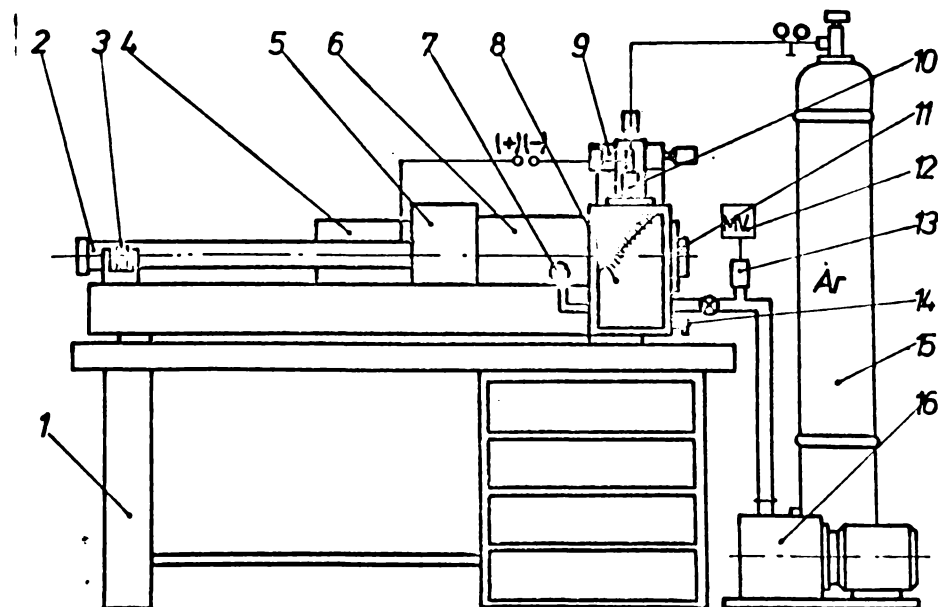


Figura 5.7. Ansamblul CSEC-2.

1. Masă suport, 2. prelungire cameră, 3. suport cu role, 4. motor electric, 5. reductor, 6. sistem pneumatic de fixare a piesei, 7. manovacuetru, 8. cameră de sudare, 9. reglaj micrometric al capului de sudare, 10. cap de sudare, 11. capac, 12. manovacuetru, cu termocuplu, 13. jojă de măsură, 14. robinet, 15. butelie de gaz, 16. pompă de vid.

Caracteristicile funcționale sînt următoarele:

- volumul camerei de sudare :  $2 \text{ dm}^3$
- prindere piesă : sistem pneumatic cu mandrină elastică : 5-20 mm.
- rotație piesă : ansamblul motoreductor cu patru trepte cu posibilitate de reglaj continuu al turatiei,  $V_{\text{max}}$  - 10 rot/min.
- gaz de sudare : argon sau heliu la 1,2 atm.
- sistem de vidare : pompă de vid preliminar  $4 \text{ m}^3/\text{oră}$ , presiune min.  $10^{-3}$  torr, control cu manovacuetru cu termocuplu.
- cap de sudare : reglaj  $X \pm 5 \text{ mm}$ , față de un zero prestabilit și reglaj Z pentru distanța electrod-piesă realizat micrometric.

### 5.3.2. Ansamblul CS-3-EC-5 /37/.

Se utilizează curent în tehnologia de fabricație a elementelor combustibile nucleare o operație tehnologică de umplere cu heliu a volumului liber din interiorul elementului. Acest lucru se realizează printr-un orificiu practicat în unul din dopuri, orificiu care se închide după umplerea cu heliu prin sudare TIG în

puncte.

Instalatia (figura 5.8.) este alcătuită din următoarele părți principale :

a) Camera de sudare (figura 5.9.) alcătuită din :

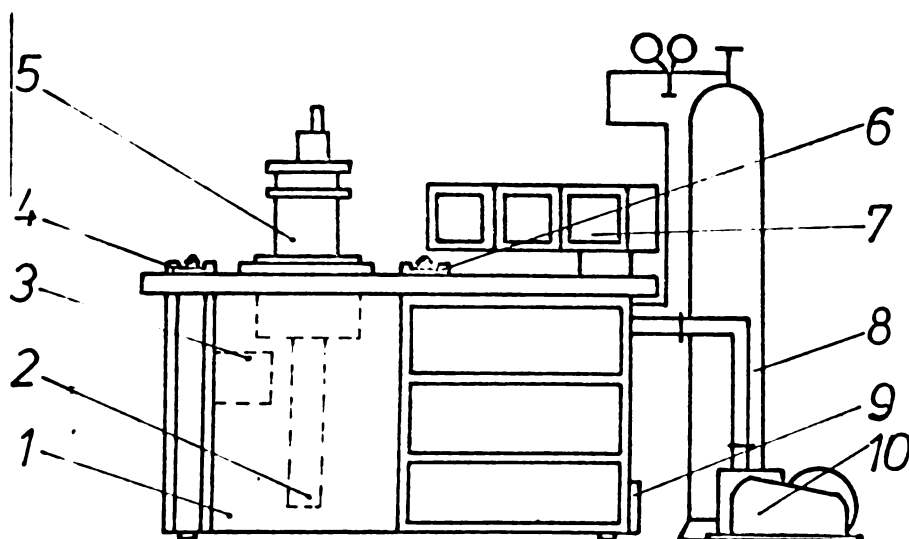


Figura 5.8. Ansamblul CS-3-RC-5.

1.masă suport, 2.prelungire cameră, 3.motor-reductor, 4.reglaaj turație motor, 5.camera de sudare, 6.bloc robineti, 7.panou electric, 8.butelie gaz, 9.placă de borne, 10.pompă de vid.

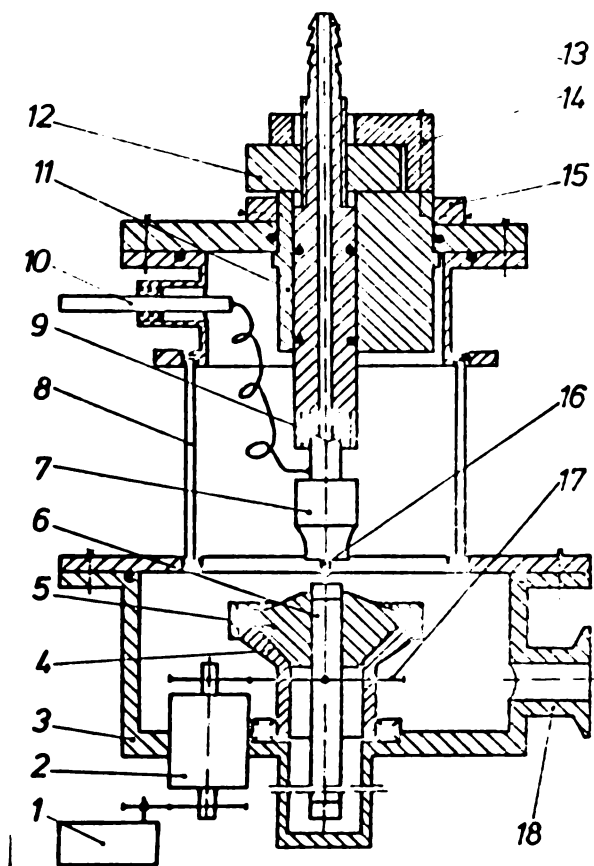


Figura 5.9. Camera de sudare  
 1.motor-reductor, 2.trecere rotativă de vid, 3.partea inferioară a camerei, 4.suport recuperator, 5.recuperator termic, 6.element combustibil, 7.cap de sudare, 8.cilindru de sticlă, 9.bușă izolantă, 10.trecere de curent, 11.bușă excentrică, 12.piulită, 13.ștut gaz, 14.piesă de blocaj, 15.inel de blocaj, 16.electrod de wolfram, 17.angrenaj cilindric, 18.racord de vid.

- partea superioară a camerei în care se găsește montat capul de sudare 7 cu posibilități de deplasare pe axa Z și Această parte este prevăzută cu un vizor cilindric 8 care permite urmărirea procesului de sudare.Întreg ansamblul este rabatabil pentru a permite accesul în interiorul camerei pentru montarea și demontarea elementului combustibil.În partea superioară a subansamblului se găsește aducția de curent 11 și de gaz 13.

- partea inferioară 3 a camerei care conține sistemul de prindere și antrenare în mișcare de rotație a elementului combustibil, combinat cu sistemul de recuperator termic 5. Antrenarea sistemului se face prin intermediul unei treceri de vid rotative 2 cuplate prin intermediul unui angrenaj dintat cu un ansamblu motor-reductor 1 cu control electronic al turatiei. Pe această parte a camerei se găsește și traseul de vidare 18 al camerei. Prinderea părții inferioare de cea superioară se realizează cu ajutorul a trei cleme de strângere, etanșarea fiind asigurată de o garnitură de vid toroidală.

- prelungirea camerei care este destinată să primească elementul combustibil fiind constituită dintr-o teavă cu o lungime de 600 mm cu posibilitate de detașare față de camera propriu zisă.

b) Ansamblul de trasee, control și reglaj, presiune și vid este destinat să asigure:

- vidarea camerei de sudare cu elementul combustibil conținut la  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  torr și măsurarea vidului.

- aerarea pompei de vid

- umplerea cu heliu a camerei de sudare și a elementului combustibil

- reglarea presiunii de heliu între 1-5 atm.

- evacuarea gazului sub presiune după operația de sudare

- măsurarea presiunii de umplere cu heliu

c) Ansamblul circuitelor de comandă electrică care asigură :

- cuplarea și decuplarea sursei de sudare TIG

- cuplarea și decuplarea generală a alimentării electrice a instalației.

- pornirea și oprirea pompei de vid

d) Ansamblul de comandă electronică a motorului de antrenare, care asigură un reglaj continuu al turatiei motorului,

permite realizarea unei viteze constante de antrenare a elementului combustibil între 1-10 ture/min. cu posibilitatea de schimbare dreapta-stînga a sensului de rotație.

Caracteristicile generale ale instalației sînt :

- cote de gabarit : 1.300x700x1.000 mm
- presiune de lucru : maximum 5 atm.
- vid :  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  torr
- putere instalată proprie : 300 W
- curent de sudare : maximum 50 A
- vîiteza de rotație a elementului combustibil : 1-10 ture/min

### 5.3.3. Ansamblul CS-3-EC-50 /88/

Acest ansamblu, funcțional similar cu CS-3-EC-5 a fost conceput pentru realizarea unor suduri de închidere a elementelor combustibile experimentale ce necesită o presiune ridicată de heliu la interior. Deasemenea prin această tehnologie se realizează epruvete pentru testul de fluaj a tuburilor de zircaloy.

Pe plan mondial în laboratoarele de cercetări nucleare pentru elemente combustibile se utilizează această tehnică pînă la presiuni de 40 atm./106/ cu cap de sudare cu electrod și sursă auxiliară de amorsare. Cu blocuri de amorsare speciale, de tip hibrid cu oscilator HF-HP și descărcarea unei baterii de condensatori /107/, instalația TXR-100-Menrick Engineering - USA asigură sudarea elementelor combustibile în heliu la 30 atm./108/.

Cămera de sudare realizată în IRNE cuplată pe instalația de sudare PROGRAMATIG 300, a permis realizarea fără dificultate a amorsării arcului la presiunea de 60 atm. heliu de înaltă puritate, fără utilizarea unor surse speciale de amorsare sau dispozitive auxiliare. Această performanță este determinată de o serie de factori din care menționăm :

- geometria particulară a piesei de sudat, care permite ca amorsarea să se facă la o distanță electrod-piesă minimă, fără pericol de scurtcircuitare.
- unghiul de ascuțire a electrodului de wolfram și poziționarea sa față de piesă.
- sudarea în atmosferă staționară de heliu
- sursă puternică de HF-HP cu care este echipată instalația de sudare.

Ansamblul CS-3-EC-50 prezentat în figura 5.10 are urmă-

toarele părți componente :

- suportul 1 al camerei de sudare
- camera de sudare 2
- blocul de comandă 3 al ciclului de sudare care face parte din dotarea instalației de sudare
- sistem de oglinzi retrovizoare 4 pentru urmărirea procesului de sudare din cameră.
- blocul de racorduri și robinete de presiune pentru depresurizare cameră 5, vidare 6, aerare pompă de vid 7 și admisie heliu 8 pentru presurizarea camerei.

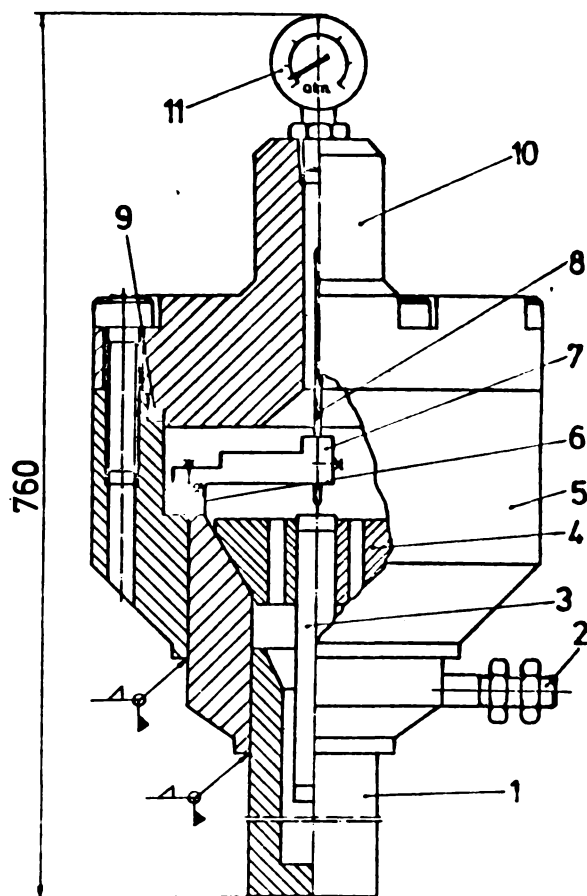
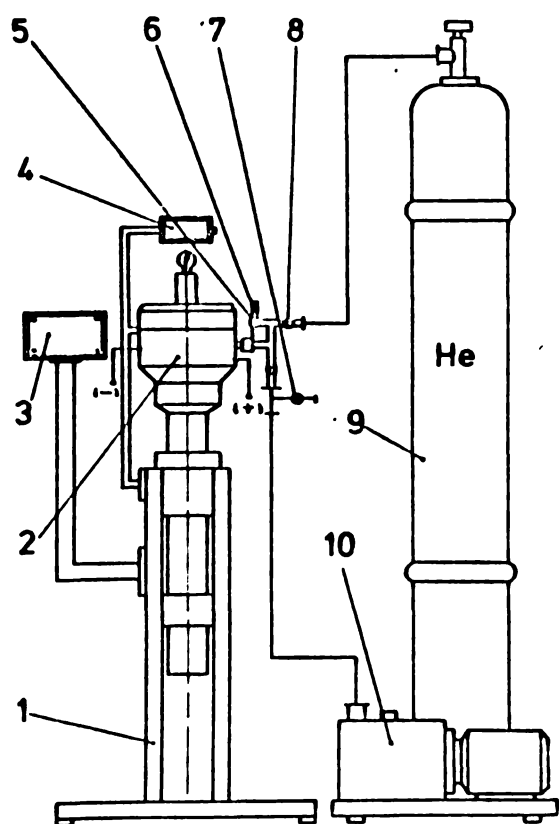


Figura 5.10 Ansamblul CS-3-NC-50

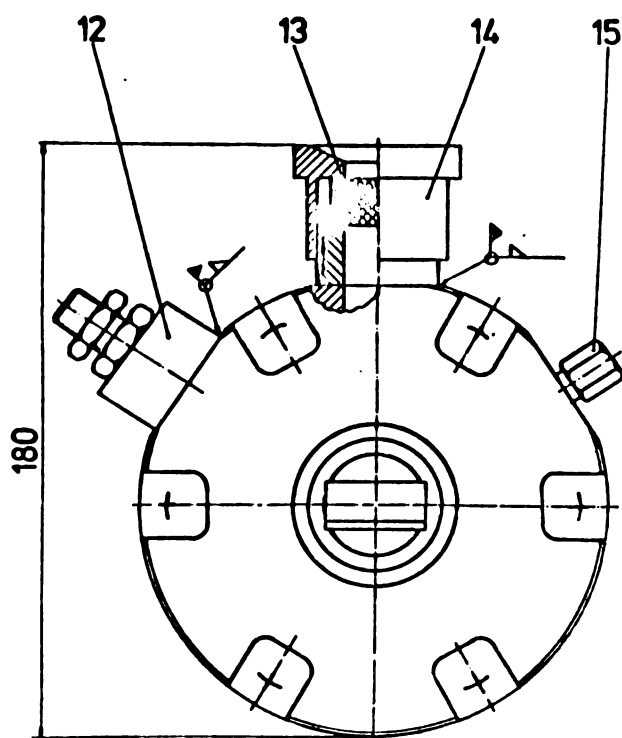
Figura 5.11. Camera de sudare - secțiune

- butelia de heliu 9 care se racordează direct la cameră prin intermediul unei conducte de cupru cu diametrul interior 2 mm și grosime perete de 1 mm.

Camera de sudare propriu zisă este prezentată în secțiune în figura 5.11 și în vedere de sus în figura 5.12, fiind al-

căutuită din următoarele părți :

- prelungirea cilindrică 1 a camerei, care permite sudarea elementelor cu lungime max. de 600 mm.
- racordul de masă 2
- elementul combustibil de sudat 3 fixat în recuperatorul termic 4.
- partea inferioară 5 a camerei care este fixă.
- izolator de sticlătextolit 6.
- suport portelectrod 7 din cupru
- electrodul 8 de wolfram-thoriu
- garnitură de etanșare 9
- partea superioară 10 a camerei de sudare care este detașabilă, fixarea ei făcându-se cu șase șuruburi M12 de partea inferioară 5 a camerei.
- manometrul 11 pentru max. 100 atm.
- trecere de curent 12 pentru cuplarea electrodului la sursa de sudare
- vizorul 13



VEDERE DE SUS

- corpul vizorului 14
- racord de presiune 15 pentru cuplarea blocului de robineti de presiune.

Testele de presiune efectuate pe această cameră au confirmat buna funcționare în domeniu de  $5 \times 10^{-2}$  torr - 80 atm. Prima serie de sudări s-a executat la presiuni de max. 60 atm presiune condiționată de tipul de robineti utilizați. Impunându-se realizarea unor sudări la presiuni mai mari de 60 atm., s-au înlocuit aceștia cu robineti cu ac de presiune ridicată, funcționând perfect camera de sudare la o serie de suduri executate la 95 atm. în heliu.

Figura 5.12. Camera de sudare - vedere de sus



#### 5.4. Linii de sudare TIG a elementelor combustibile.

Linia de sudare TIG este constituită din sursa de sudare, camera de sudare în atmosferă controlată, sistemul de vid și sistemul de comandă și control ale instalațiilor componente.

##### 5.4.1. Linia PROMETEU.

Linia PROMETEU I destinată sudării elementelor combustibile, realizată în 1973 era alcătuită din :

- instalația de sudare PROMETEU 100 M (figura 5.2)
- camera de sudare CSWC-1 (figura 5.13)
- instalație de purificare argon (figura 5.14)
- sistem de vid cu pompă de vid preliminar și pompă de difuzie. Această linie a fost dezvoltată /89/, astfel că în 1974

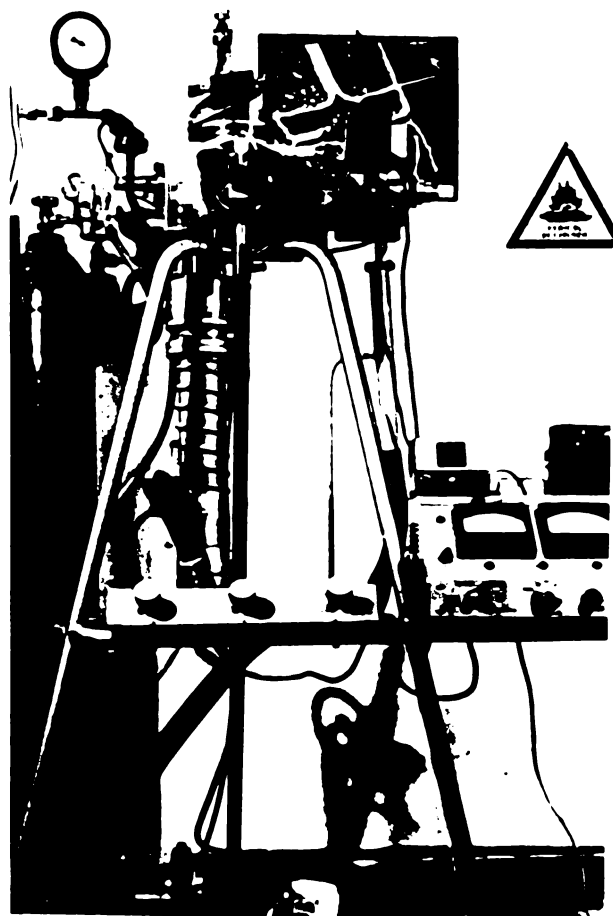


Figura 5.13. Camera de sudare CSWC-1

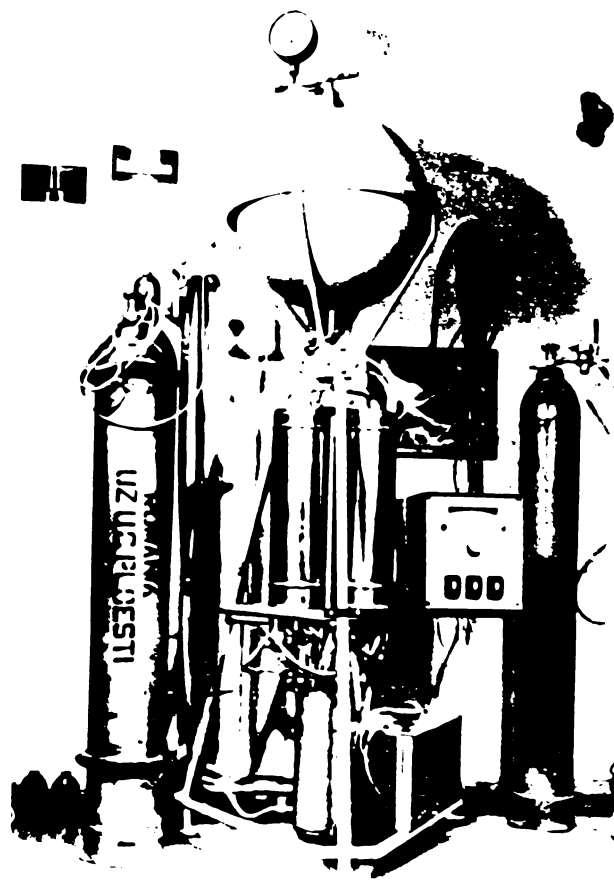


Figura 5.14. Instalația de purificare argon - IFA

Linia PROMETEU II, era alcătuită din :

- instalația PROMETEU 100 M
- camera de sudare CSWC-1

- grup automat de vid tip Alcatel

Gazul de sudare utilizat, de proveniență Messer-Griesheim se încadra în limita de max. 5ppm impurități totale

#### 5.4.2. Linia PROGRAMATIG.

Din motive obiective, dezvoltarea de echipamente de sudare TIC specifice tehnicii nucleare nu a fost posibilă, astfel că s-a impus achiziționarea unei instalații de sudare din import. Instalația tip "PROGRAMATIG 300" realizată de SOCOMET - Franța. achiziționată are următoarele caracteristici /90/:

- generator rotativ : putere 11 Kw, 3x380 V, 50Hz, tensiune de mers în gol 76 V, regim 300 A la DA 60%, domenii de curent 1-45 /10-135/ 40-300 A

- bloc de comandă și control care are următoarele funcții principale :

- sudare manuală și automată

- curent continuu-curent alternativ, cu sau fără modulare de curent

- programare curent de sudare, viteză de rotație a piesei (sau a capului de sudare) și alimentare cu material de adaos.

- înregistrare  $I_s$  sau  $V_s$

- controlul formei de undă a curentului modulat pe osciloscop

- control amorsare arc și extincție arc

- control și reglaj gaze de protecție

- răcire pistol cu apă în circuit închis

- telecomandă și reglaj telecomandat a  $I_s$  sau  $V_s$  la sudarea manuală

- reglaj automat al distanței electrod-piesă

În figura 5.15 este prezentată o vedere a blocului de comandă al instalației PROGRAMATIG 300

Linia PROGRAMATIG este alcătuită în prezent din următoarele părți:

- instalația PROGRAMATIG 300

- camera de sudare CSEC-2

- ansamblul CS-3-EC-5

- ansamblul CS-3-EC-50

Această linie permite execuția unei game largi de suduri a elementelor combustibile întecuite în aliaje de zirconiu

și oțeluri inoxidabile, cu diametre între 6-20 mm și lungime până la 5 m pentru sudarea de închidere dop-teacă. Pentru sudarea de închidere după presurizarea cu heliu, lungimea elementelor ce pot fi sudate este limitată la ora actuală la 600 mm, dar funcție de necesități poate fi mărită prin adăugarea unei prelungiri la camera de sudare.

Pentru a folosi cât mai bine posibilitățile oferite de sursa de sudare, pentru sudări specifice tehnicii nucleare, linia PROGRAMATIG a fost completată cu o serie de dispozitive, având în final un caracter de linie universală de sudare TIG. Aceste dispozitive sînt următoarele:

- poziționator de sudare DB-25, cu posibilitate de rotire  $360^{\circ}$  față de axa X, cu viteză de rotire variabilă
- masă de sudare cu dispozitive de prindere a pieselor și tractor, pentru lungimi de 1.000 mm executată prin autodotare
- dispozitiv pentru sudări circulare și elicoidale, executat prin modificarea unui strung de 150x500 mm
- dispozitiv pentru sudare cap la cap a țevilor cu diametrul maxim de 32 mm cu două capete de prindere cu antrenare sincronă, executat prin modificarea unui strung de sticlărie
- cap de sudare orbital cu  $\varnothing$  max. 90 mm, accesoriu al instalației PROGRAMATIG.
- bloc de balceră a arcului de sudare cu ajutorul câmpului magnetic tip CICLOMATIC 70A-USA

### 5.5. Concluzii.

Experiența acumulată în domeniul utilajelor sudării TIG a condus la realizarea unor linii pe care s-au executat suduri de elemente combustibile nucleare întecuite în aliaje de zirconiu de tipul zircaloy 2 și 4, în condiții foarte strînse de calitate impuse de condițiile de funcționare ale acestora. Utilajele și procedeele de lucru au fost autorizate de TÜV-RFG pentru execuția seriei de elemente combustibile nucleare destinate încercării la iradiere în reactorul MZFR-RFG.

În prezent linia de sudare PROGRAMATIG este echipată la nivelul tehnicii mondiale pentru sudarea elementelor combustibile nucleare și va putea fi utilizată fără modificări esențiale pentru

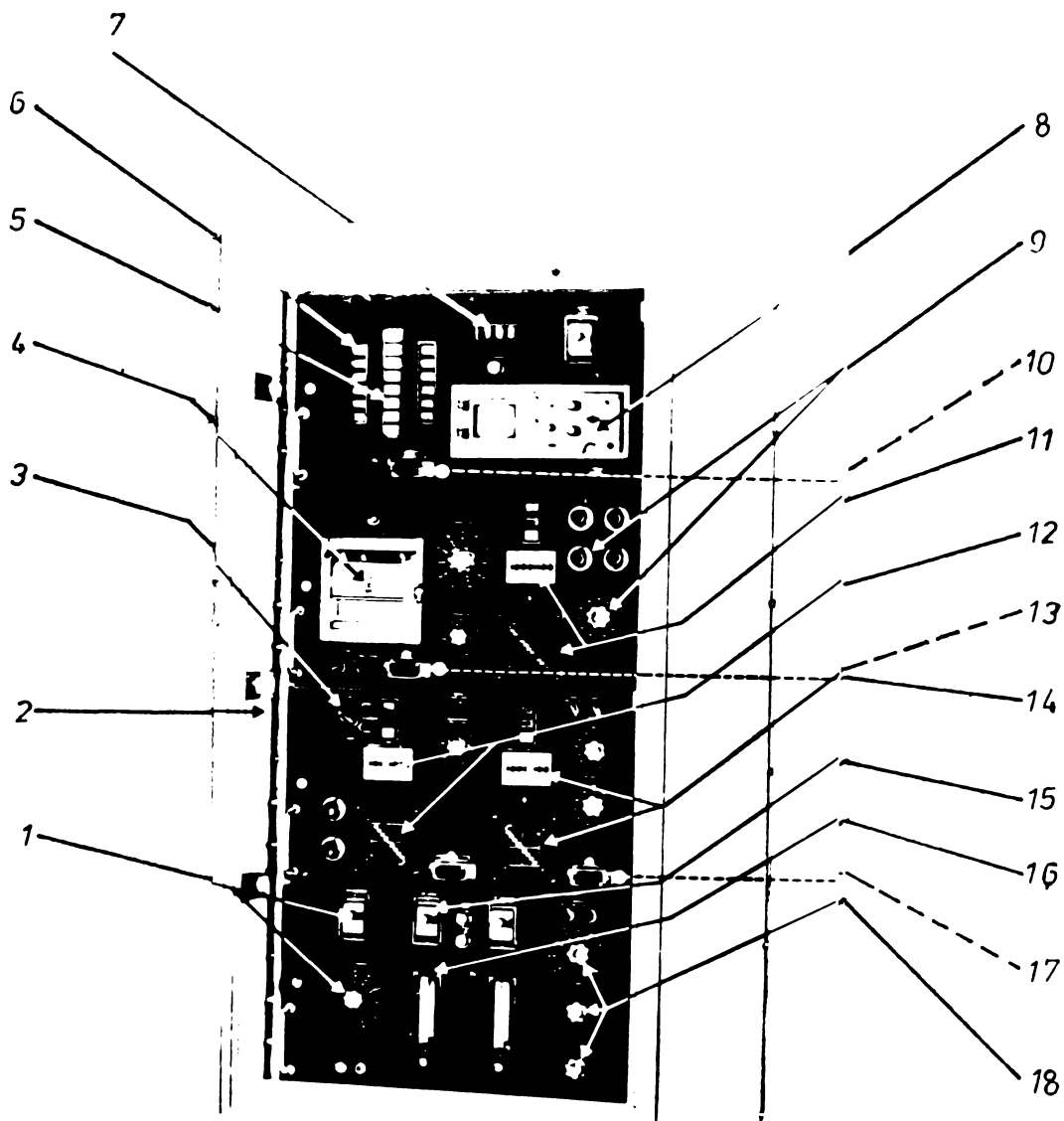


Figura 5.15. Blocul de comandă și control al instalației PROGRAMATIC 300, SOCOMF

1. rețaj curent pretopire, 2. ușe de protecție transparentă, 3. selector alimentare cu metal de adaos, 4. înregistrator, 5. indicatoare luminoase, 6. selectare funcții sudare, 7. numărător de impulsuri, 8. osciloscop, 9. control modulare curent, 10. mufă telecomandă, 11. programator  $I_s$ , 12. programator metal de adaos, 13. mufă telecomandă, 14. programator viteză de antrenare piesă, 15. temporizare argon, 16. debitmetru, 17. mufă alimentare motor, 18. control stingere arc de sudare.

:

stabilirea tehnologiilor de sudare a elementelor combustibile nucleare cu plutoniu, destinate reactorilor rapizi pentru centrale nucleare, în concordanță cu programul general de energetică nucleară din țara noastră.

În realizarea de echipamente se remarcă camera de sudare CS-3-EC-50 care reprezintă un instrument de neînlocuit pentru testarea la un preț de cost scăzut a tuburilor de zircaloy în regim biaxial de solicitare la fluaș, cât și pentru realizarea unor elemente combustibile experimentale cu presiune internă de heliu pînă la 100 atm.

## 6. TEHNOLOGIA SUDARII TIG A ALIAJELOR DE ZIRCONIU PENTRU FABRICATIA ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE.

Cele mai răspândite elemente combustibile pentru reactorii de putere sînt elementele cilindrice de tipul bară /55/, care sînt alcătuite în general din :

- teaca elementului - un tub din aliaj metalic cu pereți subțire
- coloana combustibilă - un tren de pastile sinterizate din materiale fisionabile, ce se introduc în teaca elementului
- două dopuri de capăt care prin sudare de teacă închid coloana combustibilă, formînd astfel elementul combustibil.
- piese de structură - interioare impuse de considerente funcționale și exterioare determinate de asamblarea elementelor în fascicule combustibile

În realizarea elementelor combustibile, sudarea intervine la închiderile dop-teacă, la presurizare cu heliu, la asamblarea fasciculului și a pieselor de structură.

Etapele parcurse în stabilirea tehnologiei de sudare TIG a elementelor combustibile nucleare au fost următoarele :

- lucrări de sudare pe oțeluri inoxidabile pentru probe funcționale ale instalațiilor realizate /91/92/.
- realizarea de elemente experimentale și studiul sudării aliajelor de zirconiu /93/94/95/96/97/98/.
- realizarea elementelor combustibile experimentale pentru încercările de iradiere în reactorul MZFR-RFG.

Avînd în vedere faptul că realizarea elementelor experimentale pentru iradiere în reactorul MZFR-RFG a constituit o finalizare a unei etape importante referitoare la sudarea TIG, sintetizînd experiența acumulată în acest domeniu, se vor prezenta detaliat lucrările efectuate pentru aceste elemente /99/100/101/102/.

### 6.1. Caracteristicile elementelor combustibile pentru iradiere în reactorul MZFR-RFG.

Pentru testele de iradiere s-au executat 25 elemente combustibile (figura 6.1) din care 19 elemente asamblate în fascicul

au fost supuse iradierii la un grad de ardere final de 7.250 MWx xzi/tonă.

Elementele executate au următoarele caracteristici :

- material combustibil : pastile sinterizate din  $UO_2$  natural
- densitatea combustibilului :  $10,55 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$
- diametrul pastilelor :  $14,33 \pm 0,01 \text{ mm}$
- lungimea pastilelor :  $16,5 \pm 1 \text{ mm}$
- material de întecuire : zircaloy-4
- diametrul exterior al tecii de zircaloy :  $15,245 \pm 0,015 \text{ mm}$
- diametrul interior al tecii de zircaloy :  $14,415 \pm 0,015 \text{ mm}$
- lungimea elementului :  $306,4 \pm 0,01 \text{ mm}$
- lungimea coloanei combustibile :  $200 \pm 0,2 \text{ mm}$
- procedeu de sudare : TIG
- gaz de umplere a elementelor : heliu - 1,3 atm

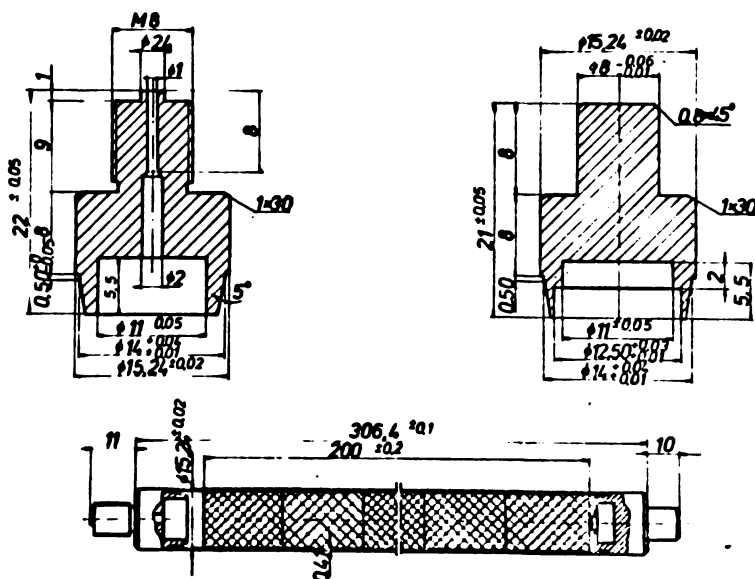


Figura 6.1. Element combustibil experimental pentru iradierii în reactorul MZFR-RFG.

Procesul de fabricație a acestor elemente a cuprins două faze distincte :

- realizarea pastilelor sinterizate de  $UO_2$
- realizarea elementelor combustibile

Pentru elementele combustibile principalele etape de lucru au fost următoarele :

- lucrări pregătitoare :
- controlul de recepție al semifabricatelor din zircaloy-4 (US, metalografic, proprietăți mecanice, caracteristici di-

- mensionale)
- debitarea tuburilor la lungime și strunjirea dopurilor
  - degresarea pieselor
  - montarea discului de wolfram la dopul inferior
  - fabricarea propriu zisă a elementelor :
    - montarea dopului 1 și sudare TIG
    - control radiografic al sudurii și analiza metalografică a probelor martor
    - încărcarea cu pastile de  $UO_2$
    - sudarea dopului 2 și sudare TIG
    - control radiografic al sudurii și analiza metalografică a probelor martor
    - presurizarea cu heliu și închiderea prin sudare TIG în puncte a orificiului de umplere
    - control radiografic al sudurii de închidere și analiza metalografică a probelor martor
    - controlul dimensional al elementelor
    - controlul de etanșeitate cu detector de surgeri de He
    - control contaminare superficială alfa
    - ambalare
    - redactarea documentației însoțitoare /99/
    - expedierea în RFG-Gkf-Karlsruhe
    - asamblarea a 19 elemente în fascicul, asamblare mecanică demontabilă.

#### 6.2. Stabilirea parametrilor de sudare și autorizarea procesului de fabricație.

Specificațiile de fabricație referitoare la sudarea TIG a acestor elemente combustibile au fost următoarele /103/:

- material de întecuire : tub zircaloy-4, Sandvik Suedia conform ASTM-B-350-67 și ASTM-B-553-71
- material pentru dopuri : zircaloy-4, Wah Chang-USA, conform ASTM-B-351

- după stabilirea parametrilor de sudare, analizarea procesului tehnologic se va face pe 5 probe sudate consecutiv cu parametri stabiliți, toate probele trebuind să fie corespunzătoare din punct de vedere calitativ, analiza probelor și autorizația de lucru

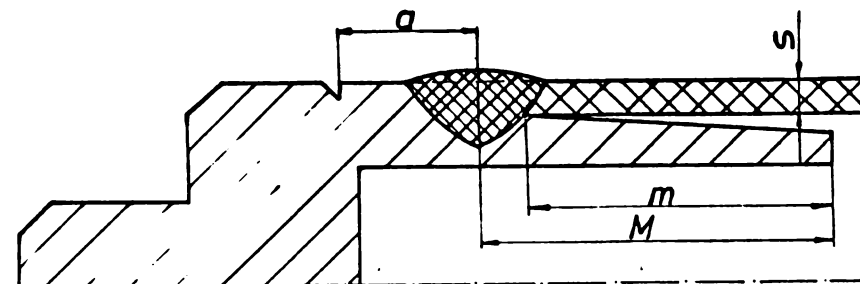


fiind date de către TUV-RFG.

- sudarea elementelor se va executa în aceleași condiții ca a probelor pentru autorizare, cu demonstrația reproductibilității sudării prin înregistrarea parametrilor de sudare și executarea a trei probe martor la începutul și 3 probe la sfârșitul unei serii de sudare.

- caracteristicile sudurii dop-teacă :

- diametrul cordonului sudat : minim 15,25 și maxim 15,55 mm
- lățimea cordonului :  $2 \pm 0,5$  mm
- pătrunderea : 100-150% măsurată conform fig.6.2
- ZIT pe teacă : maxim 1,5 mm
- rezistența la coroziune : la autoclavizare în vapori 400°C, 105 atm, 10 ore-strat negru de oxid lucios continuu



$$\text{PATRUNDEREA \%} = \frac{M-m}{S} \times 100$$

Figura 6.2. Măsurarea pătrunderii la sudarea TIG a e.c.n. tip MZFR.

- caracteristicile sudurii de închidere :

- adâncime de pătrundere : 1-1,5 mm
- rezistența la coroziune : idem ca la dop-teacă

Lucrările de stabilire a parametrilor de sudare s-au împărțit în două mari serii :

- seria preliminară pentru studiul influenței caracteristicilor funcționale ale camerei de sudare CSEC-1 asupra sudurii asamblate

- seria de stabilire a programului de sudare funcție de timp

Seria preliminară a cuprins un număr de 142 suduri analizate metalografic total și controlate dimensional și cu raze X parțial. 86 de suduri au fost apoi necesare pentru stabilirea programului de sudare, în total cu seriile de calificare, probe martor și sudarea efectivă a elementelor executându-se 348 suduri dop-teacă și sudarea de închidere după presurizare.

Lucrările din seria preliminară au condus la următoarele:

- modificarea camerei de sudare CSEC-1 referitor la sistemul de antrenare în mișcare de rotație a piesei
- îmbunătățirea sistemului de poziționare a capului de sudare și controlul micrometric al distanței electrod-piesă
- modificarea sistemului de centrare și fixare a recuperatorului termic pe teaca elementului.
- stabilirea : vitezei de sudare, a poziției relative electrod-piesă, a poziției recuperatorului termic față de axul îmbinării, timpilor de vidare a camerei, puritatea de gaz de sudare necesară și presiunea de lucru, timpul de menținere în atmosferă controlată a piesei după sudare pentru răcire.
- stabilirea unui interval al programului de sudare pentru realizarea pătrunderii, lățimii de cordon și a ZIT specificate
- stabilirea tipului de ajustaj dop-teacă

#### 6.2.1. Ajustajul dop-teacă.

În urma studiului influențelor jocurilor și toleranțelor asupra calității sudurii /104/ concluzia asupra ajustajului optim la sudarea dop-teacă a fost că rezultatele globale ale unui ajustaj presat sînt superioare ajustajelor aderent și liber. Astfel pentru îmbinarea dop-teacă s-a ales un ajustaj cu strîngere de  $0,035^{+} 0,005$  mm. Strîngerea s-a calculat pentru fiecare îmbinare în parte ținînd cont și de ovalitatea tubului de zircaloy.

#### 6.2.2. Stabilirea intervalului de curent de sudare.

Luînd ca parametru de bază adîncimea de pătrundere, s-au efectuat o serie de probe de sudare în plaja de 42,50-30,77 A, care au fost secționare metalografic.

Analizînd rezultatele obținute s-au constatat următoarele:

- proba 162/252 figura 6.3, pătrunderea excesivă cuprinsă între 188-225% ( $\Delta$  pătrundere 37%)
- proba 163/253, figura 6.4, pătrundere insuficientă cu-

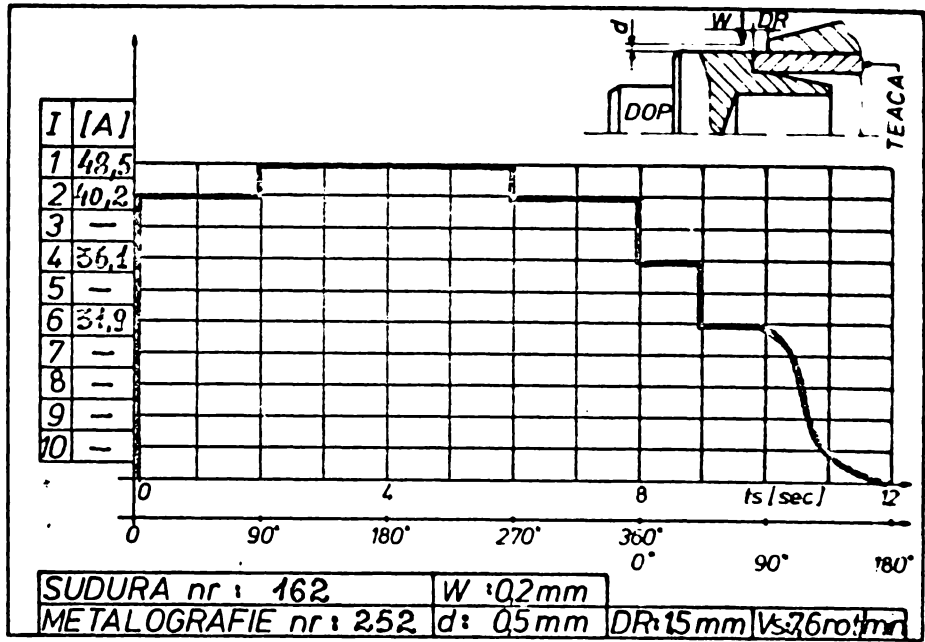


Figura 6.3.  $I_s = f(t)$

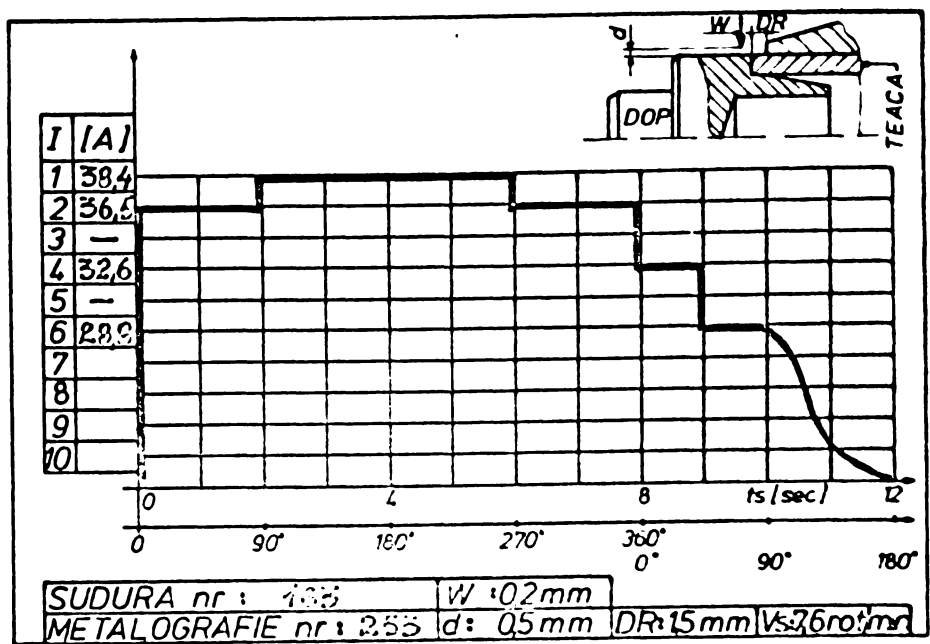


Figura 6.4.  $I_s = f(t)$

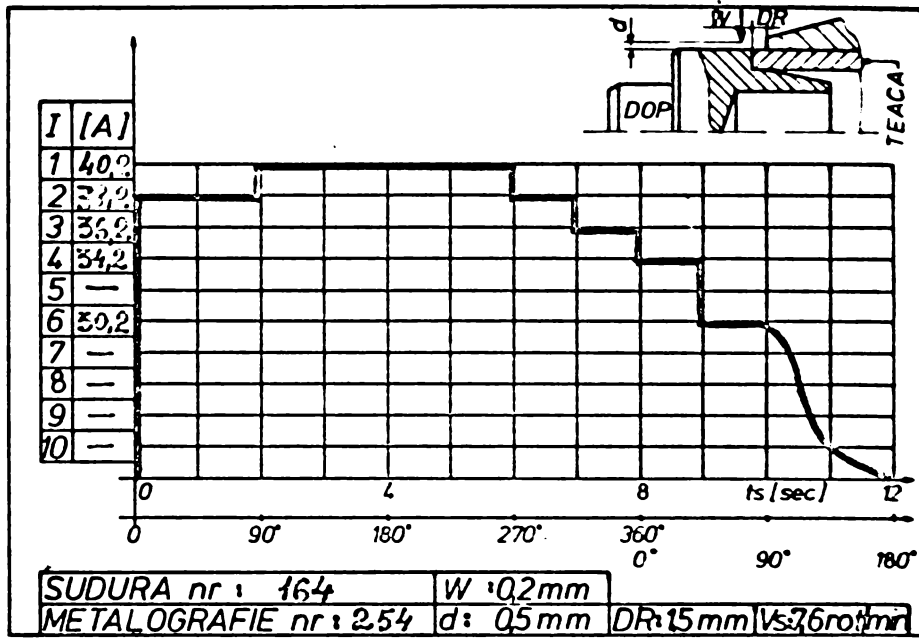


Figura 6.5.  $I_s = f(t)$

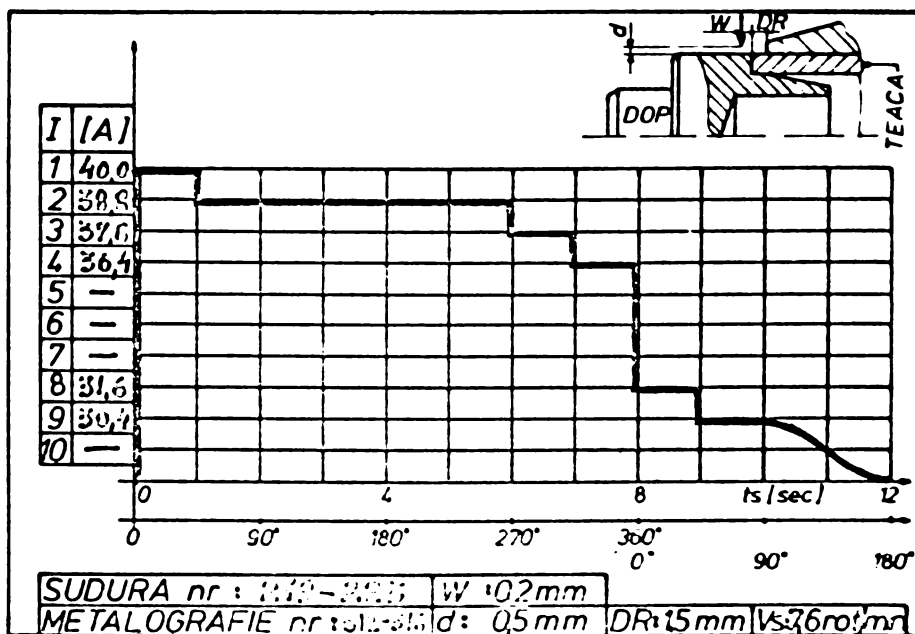


Figura 6.6.  $I_s = f(t)$

prinsă între 95-138% ( $\Delta$  pătrundere 42%)

- proba 164/254, figura 6.5, pătrundere relativ mare 157-180% ( $\Delta$  pătrundere 23%).

### 6.2.3. Definitivarea programului curentului de sudare.

Luând  $I_{max.}$  al probei 164/254 s-a trecut la modificarea programului curentului de sudare executându-se secționări metalografice transversale pe axa tecii a îmbinării sudate dop-teacă. Aceste secționări s-au făcut la cota de pătrundere maximă și apoi la cota de pătrundere minimă, modificând corespunzător programul pentru a obține pătrunderea încadrată în domeniul de 100-150%. Probele martor pentru calificarea procesului de sudare s-au executat conform diagramei de curent din figura 6.6. pentru probele 219-223 (312-316) la care s-au obținut următoarele rezultate :

	minim %	maxim%
219/312	116	132
220/313	157	161
221/314	118	132
222/315	120	132
223/316	123	140

Cu excepția probei 220/313 care a dat o ușoară suprapătrundere, celelalte probe s-au încadrat perfect în specificație, diferența dintre pătrunderea maximă și minimă fiind de maximum 17%, ceea ce reprezintă în valoare absolută 0,068 mm.

Având în vedere că pătrunderea maximă a probei 220/313 depășea în valoare absolută specificația cu numai 0,044 mm, TÜV-RFG a aprobat lotul de probe martor, autorizând executarea sudării elementelor combustibile experimentale pentru teste de iradiere în reactorul MZFR cu programul de curent prezentat în figura 6.6.

### 6.2.4. Control cu raze X a sudurilor dop-teacă.

Pentru controlul cu raze X s-a utilizat instalația Baltographe 200/10-Belgia. S-a utilizat film Agfa Gevaert D4, parametrii de lucru fiind :

$U = 180KV$ ,  $I = 8 mA$ , timp expunere 2 min, distanța 800 mm.

S-au efectuat radiografiile din trei poziții la  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$  și  $240^{\circ}$  având drept calibrul de control o piesă de grosime echivalentă de zirconiu cu pieselor de controlat. Acest calibrul avea practicat cavități sferice de 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; mm diametru.

Prin această metodă defectul minim detectabil a fost de 0,20 mm. Controlul efectuat asupra probelor martor și a sudurilor dop-teacă pentru elementele experimentale nu a pus în evidență defecte în limita de detectare.

#### 6.2.5. Controlul contaminării cu gaze a picșelor sudate.

Controlul contaminării cu gaze s-a făcut prin test de autoclavizare în vapori de apă la  $400^{+30}$ °C și la o presiune de  $105^{+5}$  atm timp de 10 ore. După autoclavizare probele prezentau un film de oxid negru lucios continuu, ceea ce denotă că atmosfera controlată a camerei de sudare asigură puritatea cerută la sudarea aliajelor de zirconiu. Sudarea s-a efectuat în argon de tip Messer Grisheim tip 5.0 (minimum 99,999% Ar).

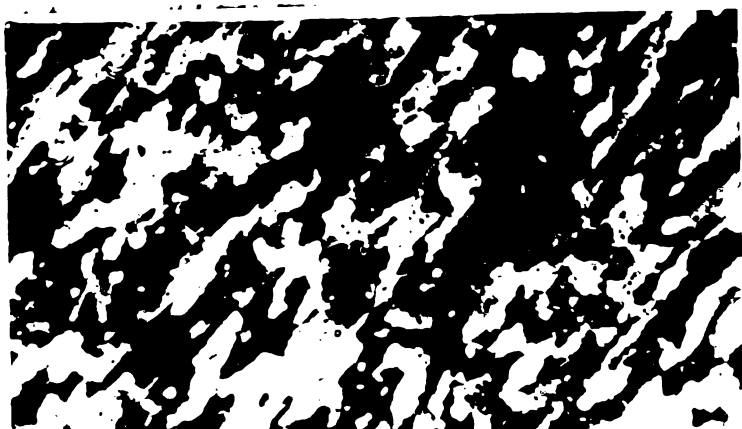
#### 6.2.6. Control metalografic.

Controlul metalografic s-a efectuat prin secționare pe direcția axială a îmbinării dop-teacă. Prepararea probelor s-a făcut pe hîrtie abrazivă pînă la nr. 600, urmată de un atac cu soluție fluoronitrică. Examinarea micrografică s-a făcut la mărirea de 25 și 33.

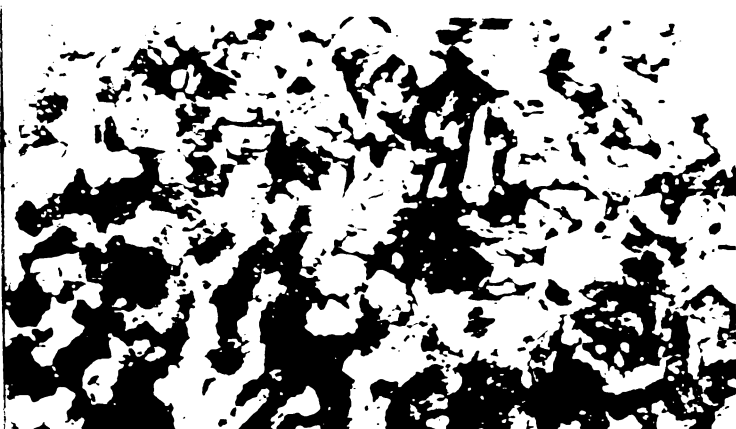
Măsurarea valorilor pătrunderii și a zonei influențate termic s-a făcut pe un microscop de măsură cu masă X-Y acționată prin șuruburi micrometrice cu precizia de  $\pm 0,01$  mm.

Examenul metalografic a permis determinarea cantitativă a pătrunderii și a ZIT. În figura 6.7. sînt prezentate micrografiile zonelor caracteristice ale îmbinării dop-teacă executate pe aliaje de zirconiu Zy-4 prin procedeul TIG. Aliajele de Zy tip 2 și 4 la temperatura normală prezintă numai faza alfa. Micrografiile a și f din figura 6.7. prezintă structura materialelor de bază a tecii și dopului, care au o mărime de grăunte de  $3,3-3,9 \mu\text{m}$  pentru teacă, respectiv  $10,2-11,8 \mu\text{m}$  pentru dop, calculat conform normelor ASTM-E-112-63. În micrografia b care reprezintă trecerea de la metalul de bază al tecii la ZIT teacă se observă o delimitare netă a celor două zone, fapt datorat utilizării recuperatorului termic din cupru masiv aplicat pe teacă. O condiție de bază impusă ZIT teacă este cea de a nu avea mai puțin de 2 grăunți pe grosimea tecii, condiție rezultată din considerente de rezistență mecanică și la coroziune.

Zona cordonului sudat prezintă o structură de tip Widd-



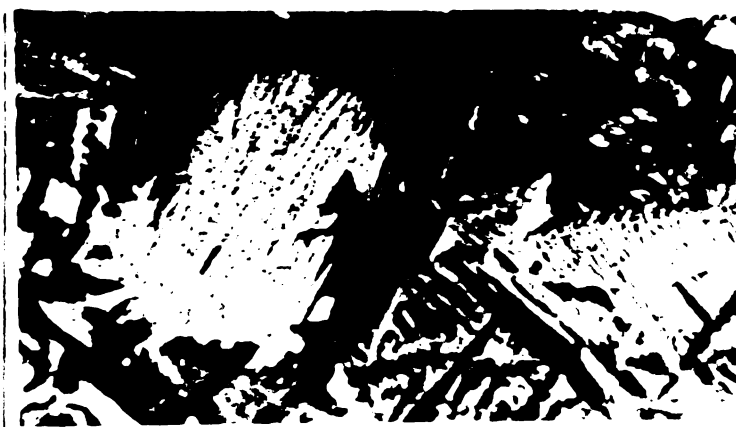
a



b



c



d

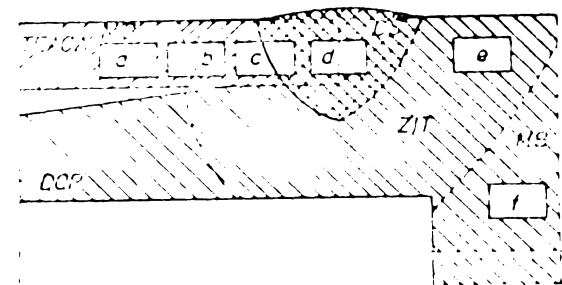


e



f

Figura 6.7. Micrografii electronice care prezinta caracteristicile structurale ale peliculei de oxid de zinc tip ZnO-*nc* realizata pe suprafata de zinc prin procedeul I.C. x500.



Widmansteten în cadrul ex-grăunților beta, în figura 6.7.c. fiind prezentată metalografia de trecere de la ZIT la cordonul sudat iar în figura 6.7.d. zona centrală a cordonului. Figura 6.7.e. reprezintă zona influențată termic pe dop. Toate structurile din ZIT sînt de tip Widmansteten la care diferă doar mărimea de ex-grăunte beta.

#### 6.2.7. Sudarea de închidere.

Pentru umplerea cu heliu a spațiului liber din interiorul e.c.n. s-a practicat un orificiu central în unul din dopurile de capăt cu  $\varnothing = 1$  mm. Sudarea TIG în puncte pentru închidere s-a executat cu un curent de 70 A timp de 3 sec. obținîndu-se o pătrundere în medie de 1,3 mm, valoare ce se încadrează în specificația de fabricație. Puritatea gazului de umplere, heliu, a fost de 99,9996%, testul de rezistență la coroziune prin autoclavizare precum și analiza gazului de umplere efectuată în RFG pe e.c.n. martor, au confirmat păstrarea purității ridicate a gazului de umplere în timpul operației de sudare. În figura 6.8. este prezentată structura metalografică a zonei sudate.

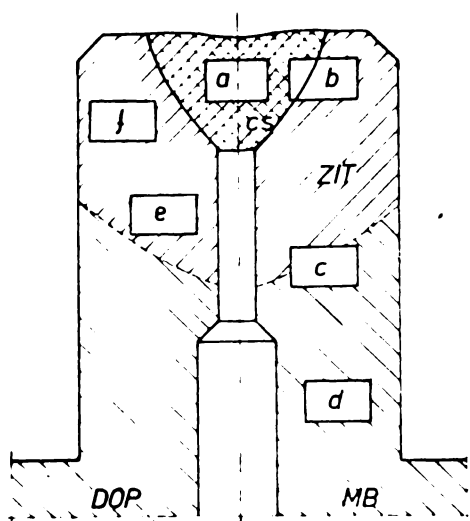
#### 6.3. Tehnologia de sudare a elementelor combustibile experimentale MZFR.

##### 6.3.1. Sudarea dop-teacă.

Lucrările de sudare au fost executate cu instalația de sudare PROGRAMATIG și camera de sudare CSEC-1 montată pe grupul automat de vidare Alcatel. Succesiunea operațiilor tehnologice a fost următoarea :

- introducerea dopului în teaca elementului cu un dispozitiv de presare
- montarea elementului în sistemul de prindere în recuperatorul termic, sistem care face parte din capul de antrenare al piesei.
- închiderea camerei de sudare
- pornirea agregatului de vid și vidarea camerei la  $10^{-4}$  torr.
- oprirea agregatului de vid concomitent cu deschiderea admisiei de gaz - argon tip 5.0
- presurizarea camerei la 1,2 atm și menținerea presiunii prin deschiderea robinetului de evacuare a gazului.

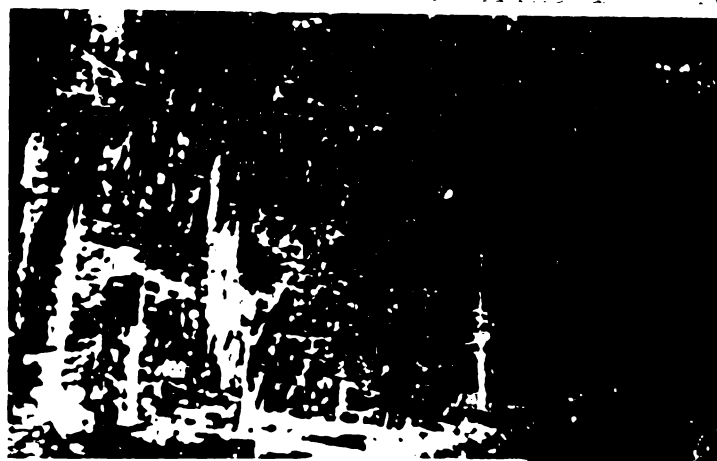




a  
x 30



b



f

c



e

d



Figura 6.6. Structura metalografică a unui ansamblu de închidere a elementelor combustibile nucleare tip MZUR. x 800

- reglarea distanței electrod-piesă la 0,4 mm
- comanda START a programului de sudare
- executarea sudării conform programului stabilit
- menținerea piesei în mișcare de rotație și a curgerii de gaz pînă la răcirea completă a piesei
- închiderea admisiei de gaz
- deschiderea camerei de sudare și scoaterea pieselor sudate

După umplerea cu pastile de  $UO_2$  sinterizate și montarea dopului 2, ciclul de sudare este repetat. O particularitate a procedurii o reprezintă utilizarea unui recuperator termic din cupru masiv aplicat pe teaca elementului la o distanță de 1,5 mm de axul îmbinării. În acest fel ZIT a tecii este foarte redusă, sub 1 mm, iar creșterea de grăunți pe grosimea tecii este limitată.

#### 6.3.2. Sudarea de închidere.

Operația de presurizare cu heliu și sudarea TIG în puncte de închidere a orificiului de umplere s-a executat pe instalația de sudare CS-3-FC-5. Succesiunea operațiilor tehnologice a fost următoarea:

- deschiderea camerei de sudare
- introducerea elementului în sistemul de prindere
- închiderea camerei de sudare
- vidarea la  $5 \times 10^{-3}$  torr cu o pompă de vid preliminar
- presurizarea cu heliu 99,9996% la 1,5 atm.
- revidare la  $5 \times 10^{-3}$  torr
- presurizarea din nou cu heliu la 1,5 atm
- închiderea admisiei de heliu
- reglarea distanței electrod piesă la 0,3 mm
- comanda de START a sudurii și sudarea
- depresurizarea camerei prin robinetul de evacuare He.
- deschiderea camerei și scoaterea elementului sudat.

#### 6.4. Sudarea de închidere în heliu la 50 atm.

##### 6.4.1. Tehnologia sudării de închidere /88/.

Sudarea de închidere se execută pe unul din dopurile e.c.n. prevăzute cu orificiu central, conform figurii 6.9.

SECRET

Parametrii de lucru pentru închiderea orificiului central după presurizare cu heliu, prin sudare TIG în puncte, sînt următorii :

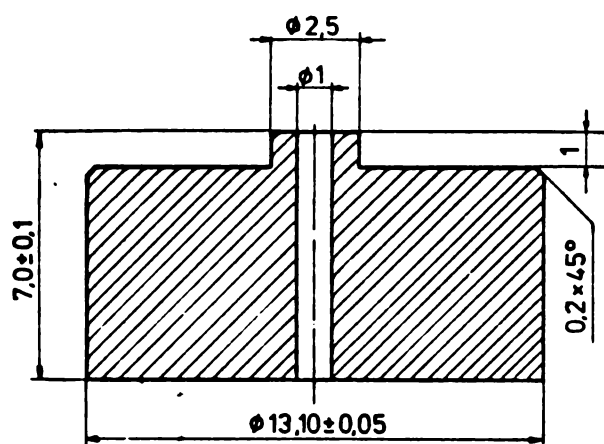


Figura 6.9. Dop de Zy-4 cu orificiu central.

- vidarea inițială a camerei la  $5 \times 10^{-2}$  torr timp de 3 min.
- distanța electrod-piesă 0,2 mm - 0,4 mm
- diametrul electrodului 1,6 mm
- unghiul de ascuțire al electrodului  $35^\circ$
- curent de sudare  $50 \pm 1$  A
- timp de sudare 3,5 sec.
- timp de răcire în heliu 2 min.

Tehnologia de lucru pe ansamblul CS-3-EC-50 este următoarea :

- desfacerea șuruburilor care fixează partea superioară a camerei de sudare și deschiderea camerei
- montarea piesei de sudat în recuperatorul termic și introducerea ei în camera de sudare
- montarea electrodului de wolfram-thoriu în portelec-trod și poziționarea lui față de piesa de sudat
- montarea părții superioare și strângerea șuruburilor de fixare
- robinetele de presiune sînt închise
- pornirea pompei de vid
- deschiderea robinetului de vidare a camerei
- vidare timp de trei minute
- închiderea robinetului de vidare

- deschiderea robinetului buteliei de heliu
- deschiderea robinetului cu ac de admisie heliu și presurizarea camerei la presiunea de lucru
- închiderea robinetului de admisie heliu și a robinetului buteliei
- oprire pompă de vid și aerarea pompei prin deschiderea robinetului de aerare
- dacă presiunea depășește valoarea propusă, prin deschiderea robinetului cu ac de depresurizare a camerei se aduce presiunea la valoarea de lucru
- se dă comanda de sudare și se execută sudare
- se menține piesa în cameră pentru răcire timp de 2 min.
- se deschide robinetul de depresurizare al camerei
- se desfac șuruburile părții superioare a camerei și se deschide camera
- piesa sudată este scoasă din camera de sudare.

După stabilirea preliminară a parametrilor de sudare s-a executat o serie de probe pentru a se determina o relație între diametrul punctului sudat TIG,  $\varnothing_{ps}$  și adâncimea de pătrundere  $h_p$ . Pentru domeniul de sudare cuprins între 135-155 Axs rezultă un diametru de punct sudat de  $6,95 \pm 0,15$  mm fiind satisfăcută relația:

$$h_p = \varnothing_{ps} - 4 \text{ /mm/}$$

iar pentru intervalul 160-220 Axs

$$h_p = \varnothing_{ps} - (4,1 \pm 4,2) \text{ /mm/}$$

Aceste relații permit determinarea adâncimii de pătrundere simplu, cu aceeași precizie ca și prin măsurătoare prin radiografiere cu raze X.

Sudare de închidere la 50 atm. s-a realizat pentru probe de tuburi de zircaloy cu lungime 97 mm la care au fost sudate la capete două dopuri prin procedeul de sudare electrică prin presiune. Unul din dopuri avea practicat orificiul de umplere conform figurii 6.9. La sudarea aceluiași tip de probe însă la presiunea de 95 atm., utilizând același curent ca pentru sudarea la 50 atm., a apărut un fenomen de expulzare completă a băii topite. Aceasta se datorește creșterii presiunii interioare de heliu din probă datorită încălzirii dopului în timpul sudării mult mai puternic decât creșterea presiunii din camera de sudare. Din acest motiv, s-a modi-

ficat curentul de sudare, reducându-se la valoarea de 20,5 A iar timpul de sudare la 1 sec., sudarea de închidere desfășurându-se astfel normal.

Referitor la ascuțirea electrodului, s-a constatat că nu este critic unghiul de ascuțire cât calitatea ascuțirii, vârful electrodului trebuind să fie centrat față de axa electrodului și foarte ascuțit. Un unghi de ascuțire recomandabil este cel de 35-40°, la care mărirea distanței electrod-piesă datorită topirii locale a vârfului nu este semnificativă. Se menționează însă faptul că electrodul trebuie ascuțit după fiecare sudare.

#### 6.4.2. Considerații asupra încercării la fluaș biaxial accelerat a tecilor de Zy-4 /136/.

Prin realizarea instalației și stabilirea tehnologiei de sudare de închidere TIG în puncte la presiuni înalte în heliu s-a creat posibilitatea executării testelor de fluaș biaxial a tuburilor de zircaloy-4 la un preț de cost de cca. 10-20 de ori mai redus decât cel realizat prin presurizarea continuă individuală a probelor.

Cunoașterea dependenței proprietăților mecanice de factorii metalurgici preponderenți cum sînt deformarea la rece și tratamentul termic final al tuburilor de zircaloy, permit proiectantului de elemente combustibile optimizarea combinației de posibilități mecanice și elaborarea unor specificații realiste pentru furnizorii tuburilor de zircaloy. Probele supuse testelor de fluaș biaxial accelerat au fost tratate termic în vid la diferite temperaturi cuprinse în intervalul 450-600°C. Rezultatele obținute arată că o rezistență maximă la fluaș o au tuburile tratate termic în domeniul de recristalizare parțială (4 ore la 525°C), fiind în concordanță cu cele obținute de Kallström /137/ care explică obținerea unui minim de deformare transversală la temperaturi intermediare de tratament termic pe baza teoriei densității de dislocații elaborată de Lagneborg.

#### 6.5. Considerații asupra defectelor posibile la sudarea TIG a elementelor combustibile.

Pentru stabilirea obiectivă a criteriilor de acceptare

a unei suduri din punct de vedere calitativ este necesar să se țină cont de cerințele funcționale ale acestei suduri și de considerente economice. Ca urmare a lucrărilor de sudare TIG efectuate s-au putut determina și sistematiza /105/ defectele ce pot apărea la sudarea TIG a elementelor combustibile nucleare întecuite în aliaje de zirconiu. În tabelul 6.1 sînt prezentate defectele, cauzele și modul de detectare a lor.

Tabelul 6.1

Nr crt.	Tip de defect	Cauza	Mod de detectare
1	Dezaxare dop-teacă	- montare incorectă a dopului - joc între dop și teacă	vizual - control dimensional
2	Crater la începutul cordonului	- program de sudare prea scurt în timp	vizual
3	Crater la sfîrșitul cordonului	- curent final de extincție prea mare	vizual - microscopic
4	Ciupituri de înaltă frecvență	- funcționare incorectă a blocului de înaltă frecvență	vizual - microscopic
5	Cordon de lățime neuniformă	- distanța electrod-piesă variabilă - program de sudare necorespunzător - montaj defectuos a recuperatorului termic	vizual - control dimensional
6	Contaminare superficială cu gaze	- atmosferă de protecție necorespunzătoare - răcire insuficientă a pisei la scoaterea din camera de sudare	determinare calitativă prin autoclavizare - determinare calitativă prin analiză de gaze în metal

7	Crestături laterale	- curent de sudare prea mare - devierea arcului de sudare - joc între dop și teacă	vizual - micro- scopic
8	Cordon discontinuu	- curent de sudare prea mare și rost de sudare între dop și teacă	vizual
9	Cordon supraînălțat	- poziție incorectă a electrodului - îmbinare dop-teacă presată puternic cu deformarea tecii	vizual - micro- scopic
10	Cordon coborât	- poziție incorectă a electrodului - rost între dop- teacă - joc între dop-teacă	vizual - micro- scopic
11	Cordon deplasat față de axa îmbinării	- poziționare inco- rectă a electrodului	metalografic
12	Nepătrundere	- curent de sudare prea mic	metalografic, raze X, ultrasunete
13	Suprapătrundere	- curent de sudare prea mare	metalografic
14	Retasură în zona teacă - cordon sudat	- deformare datorită tensiunilor de soli- dificare - presiune mare in- ternă a gazului	metalografic, raze X

15	Pătrundere neuniformă	- program de curent necorespunzător	metalografic
16	Incluziuni de W în cordon	- scurtcircuitare electrod pisă - electrod necorespunzător	metalografic, reze X
17	Incluziuni superficiale de cupru	- distanța electrod-recuperator termic de cupru prea mică	vizual - microscopic
18	ZIT excesivă	- poziționare incorectă a recuperatorului termic	metalografic
19	Incluziuni de ceramici nucleare	- curățire necorespunzătoare a capetelor tecii după umplerea cu pastile de $UO_2$	metalografic, raze X
20	Incluziuni de gaze sub formă de pori	- suprafețe insuficient curățite	metalografic, sau raze X peste 0,2mm dimensiune de por
21	Neetanșitate	- lanțuri de pori	detector de scurgeri cu He
22	Creștere exagerată de grăunți în cordon și ZIT	- program de sudare necorespunzător	metalografic

### 6.6. Concluzii.

Lucrările efectuate în domeniul utilajului și tehnologiei de sudare TIG a aliajelor de zirconiu au condus în primul rând la realizarea de echipamente specifice tehnicii nucleare, echipare realizată prin autodotare. Pe liniile de sudare TIG a ele-



mentelor combustibile au fost experimentate o serie mare de tipuri de îmbinări dop-teacă, stabilindu-se tehnologii de sudare adecvate fiecărui tip de îmbinare. O confirmare a rezultatelor bune obținute în acest domeniu o constituie realizarea elementelor combustibile nucleare destinate experimentelor de iradiere în reactorul MZFR-RFG. Echipamentul, tehnologia și operatorii au fost autorizați de TŪV-RFG pentru realizarea acestor elemente, care pentru iradiere au fost introduse direct în circuitul primar al reactorului, fără utilizarea de dispozitive de iradiere. Gradul de ardere de 7.250 MW zi/tonă la care au fost iradiate elementele au confirmat buna funcționare, fără apariția nici unui defect.

Echipamentele executate sînt în prezent în curs de modificare pentru abordarea problemelor de sudare a elementelor combustibile nucleare pentru reactori rapizi, elemente ce utilizează ca material de întecuire oțeluri inoxidabile austenitice.

## 7. UTILAJE PENTRU SUDAREA ELECTRICA PRIN PRESIUNE A ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE INTRECUTE IN ALIAJE DE ZIRCONIU.

Sudarea prin presiune a aliajelor de zirconiu pentru elementele combustibile nucleare se impune în momentul de față pe plan mondial datorită avantajelor procedurii, avantaje privind calitatea îmbinării și reproductibilitatea procesului, cuplate cu avantajele unei productivități ridicate. Procedul de sudare electric prin presiune este caracteristic fabricației elementelor combustibile nucleare tip PHWR-CANDU fiind utilizat la scară de fabrică în Canada. La stadiul de pilot întâlnim acest tip de sudare în Italia și laboratoarele de cercetări în majoritatea țărilor cu programe nucleare naționale.

Având în vedere orientarea energetică nucleară în RSR pe filiera CANDU, orientare concretizată prin semnarea la sfârșitul anului 1978 a colaborării româno-canadiene în construirea centralelor nucleare electrice de 650 MWe, în cadrul ITN-IRNE a existat o preocupare susținută în direcția fabricației elementelor combustibile tip CANDU. Pe lângă procurarea de echipamente specifice, s-au construit și s-au adaptat mașini de sudat prin presiune pentru satisfacerea necesităților tehnice și tehnologice impuse de fabricarea acestui tip de element combustibil nuclear. Fasciculele combustibile de tip CANDU, sunt sudate electric prin presiune în întregime și anume :

- sudare dop-teacă, sudare cap la cap în stare solidă
- sudare de fixare a patinelor și distanțierilor pe teaca elementului combustibil în vederea brazării, sudare în puncte în relief cu descărcare capacitivă
- sudarea de asamblare dop-grilă a elementelor în fascicul, sudare în puncte în relief prin presiune.

### 7.1. Utilajul de sudare dop-teacă /109/.

Utilajul de sudare este executat de firma COMEGE-Franța, în colaborare cu SCIARY-Europa. Mașina este destinată sudării cap la cap în stare solidă, cu capetele de lucru orizontale și acțio-

nate pneumatic, fiind o mașină specializată pentru sudarea elementelor combustibile. Caracteristicile mașinii sînt:

- |                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| - outere                           | 50 KVA - DA 50%         |
| - alimentare                       | 2x380 V                 |
| - aer comprimat                    | 5 atm                   |
| - apă de răcire                    | 5 litri/minut           |
| - contactor cu ignitroane          | sincron                 |
| - presiune maximă de sudare        | 200 Kgf                 |
| - bloc de comandă SCIAKY           | DN 1401-M6-S            |
| - ciclu de lucru                   | manual și automat       |
| - productivitate în ciclu automat  | 2 suduri/minut          |
| - cameră de sudare vidabilă        | $5 \times 10^{-2}$ torr |
| - volumul camerei de sudare        | 2 litri                 |
| - sudare în atmosferă de gaz inert | Ar sau He               |
| - presiunea gazului inert          | 1,5 atm max.            |

În figura 7.1 este prezentată instalația de sudare dop-teacă, care este alcătuită din următoarele părți principale :

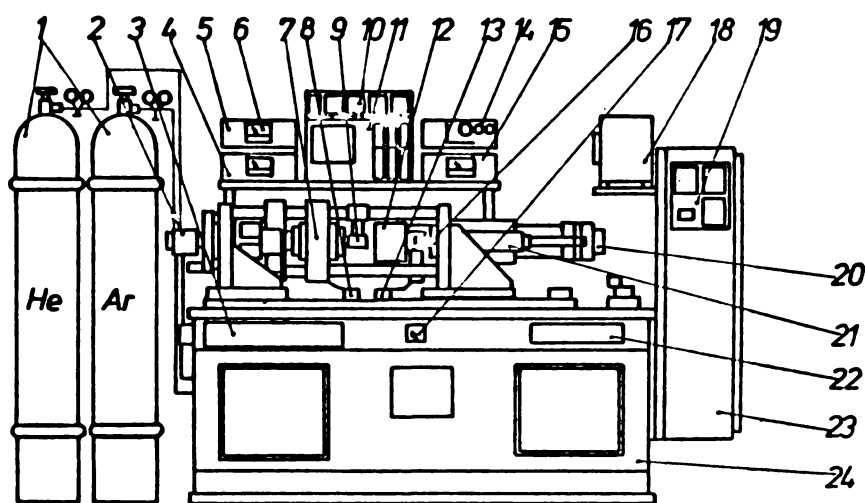


Figura 7.1. Instalația de sudare dop-teacă pentru e.c.n. tip COMEGP

- batiul mașinii 24 care are inclus sistemul de vidare, transformatorul, blocul de ignitroane, sistemul de alimentare și distribuție a aerului comprimat. Pe partea frontală a batiului se găsește panoul de comandă 3, manovacumetru 17, și panoul de control și reglaj 22 pentru aerul comprimat.

- unitatea de comandă și automatizare alcătuită din ta-

bloul de automatizare 23, blocul de comandă și control al ciclului de sudare 18 și unitatea de relee de timp 19 pentru sincronizarea înregistratorului rapid 11 cu ciclul de sudare.

- sistemul mecanic de prindere a tubului de zircaloy situat în partea stîngă pe batiul 24 și care se compune din limitatorul reglabil 2 pentru susținerea axială a tubului, sistemul pneumatic autoechilibrat 6 care acționînd asupra capului de strîngere 7 asigură prinderea tubului în bacuri. Capul de strîngere este legat de bara 8 a transformatorului de sudare. Din acest ansamblu mai face parte și limitatorul pneumatic rabatabil 9 care asigură poziționarea capătului tecii în raport cu bacurile de strîngere.

- capul propriu zis al mașinii situat în partea dreaptă pe batiu, alcătuit din cilindrul pneumatic 21 care asigură cursa de apropiere a capului cilindrul pneumatic 20 care realizează forța de sudare și camera de sudare 12 care conține electrodul port-dop. Acest ansamblu este izolat de batiul mașinii printr-o placă de textolit și legat la bara 13 a transformatorului de sudare.

- alimentarea cu gaz de protecție pentru realizarea unei atmosfere controlate în camera de sudare din buteliile 1.

- subansamblul aparatelor de măsură și control, alcătuit din aparatul 5 pentru măsură  $I_{eff}$ , aparatul 4 pentru măsurarea rezistenței de contact, aparatul 14 pentru numărarea semialternanțelor de sudare, aparatul 15 pentru măsurarea energiei de sudare, traductorul de deplasare 16 cuplat la puntea de măsură 10. Valorile măsurate sînt înregistrate cu ajutorul înregistratorului rapid 11.

În figura 7.2 este prezentat schematic detaliul capetelor de sudare cu piesele de sudat prinse în electrozi, înaintea comenzii de sudare. Teaca elementului este fixată în poziția de sudare de bacurile mandrinei electrod 5, care sînt strînse pe conductivitatea 6 de aducție a curentului de sudare. Strîngerea bacurilor se realizează concomitent cu deplasarea piesei 1, care presînd garnitura 2 de cauciuc pe contrapiesa 3 asigură etanșarea pe teaca elementului. Deschiderea bacurilor mandrinei electrod 5 se realizează printr-un sistem de resorturi și căi de ghidare prevăzute în pisa portelectrod 4. Dopul ce urmează a fi sudat este ținut în electrodul 8 prin vidare. Izolată față de electrodul 8 se găsește camera de sudare care prin etanșare pe piesa 6 asigură po-

sibilitatea de vidare a camerei și umplerea ulterioară cu gaz de protecție. Electrocul portdop 8 se fixează prin intermediul sistemului de centrare 10 pe pistonul 11 al capului de sudare.

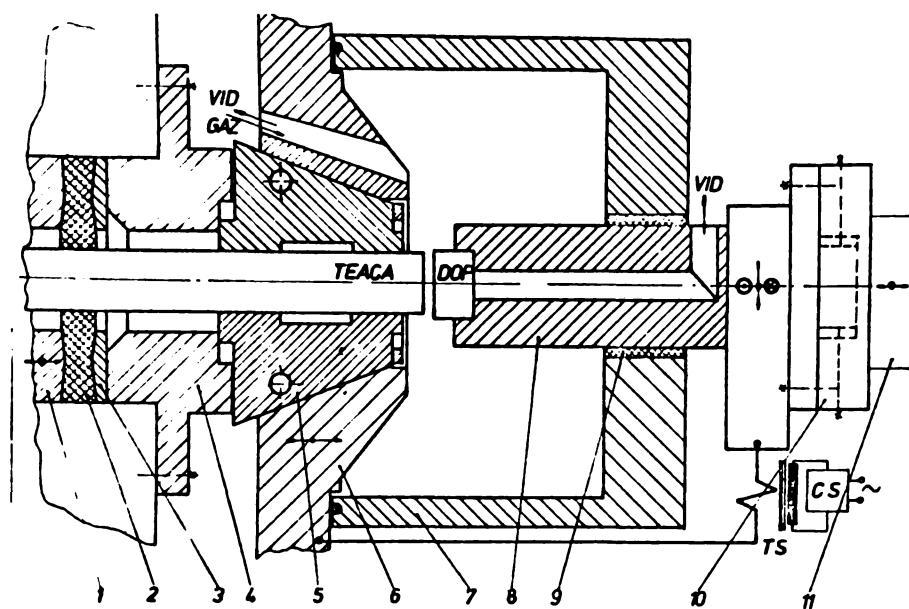


Figura 7.2. Schema capetelor de sudare a mașinii (dop-teacă)

Pentru a îmbunătăți performanțele mașinii și a mări productibilitatea ei s-au efectuat o serie de modificări și anume:

- schimbarea traseului de vidare și cuplarea unei pompe de  $40 \text{ m}^3/\text{h}$
- execuția unui sistem de alimentare din conducte metalice și distribuitor pentru lucru cu argon și heliu succesiv.
- modificarea sistemului de fixare a camerei de sudare
- proiectarea și execuția unei mandrine de prindere a tecii cu trei bacuri electrod
- execuția unui sistem de etanșare a capului liber al tecii în limitatorul reglabil din spate.
- execuția blocului de sincronizare al înregistratorului rapid cu ciclul de sudare
- instrumentarea mașinii cu aparatură de control a parametrilor de sudare

Pe baza experienței acumulate în domeniul utilajului sudării dop-teacă a elementelor combustibile, în 1984 se va întocmi tema de proiectare a unei instalații automate de sudare ce va fi realizată cu forțe proprii.

## 7.2. Utilajul sudării patinelor și distanțierilor pe teaca elementului combustibil.

Patinele ce se găsesc pe exteriorul fasciculului combustibil au rolul de a asigura ghidarea acestuia în tubul de forță al reactorului, iar distanțierii asigură menținerea distanței între elementele combustibile ale fasciculului. Executate prin ștanțare aceste piese sînt depuse pe suprafața de contact cu tubul de zircaloy cu beriliu metalic prin evaporare în vid, după care se fixează prin sudare în puncte în relief cu energie înmagazinată în câmp electrostatic pe tecile de zircaloy. Urmează apoi o încălzire în vid cu curent de înaltă frecvență în urma căreia prin formarea eutecticului de Zy-Be 5% se realizează brazarea acestor piese pe tubul de zircaloy. Sudarea de prindere are deci rolul de fixare a patinelor și distanțierilor pe tubul de zircaloy în vederea brazării.

Instalația de sudare (figura 7.3) se compune din următoarele părți principale :

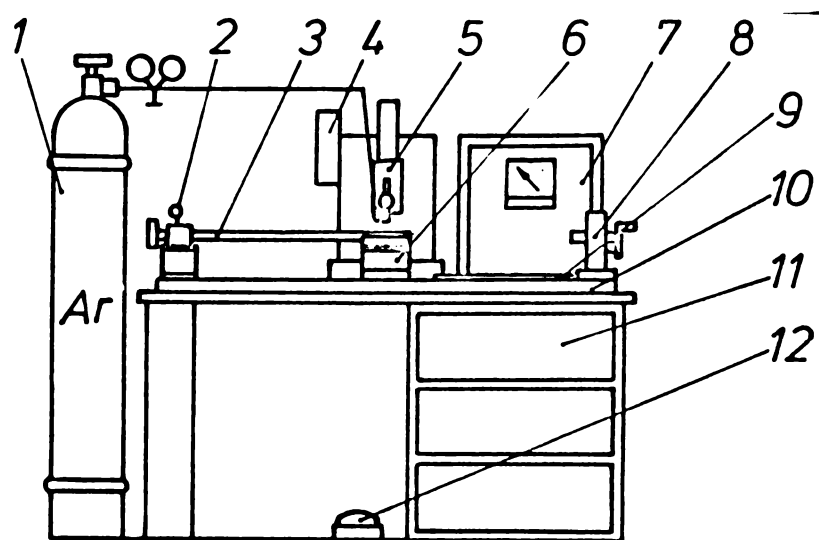


Figura 7.3. Instalația de sudare în puncte cu descărcare capacitivă pentru prinderea patinelor și distanțierilor

- instalația de sudare propriu zisă 7 de tip MINOX-500 cu capul de sudare 5 acționat pneumatic, cu reglajul forței de sudare de la blocul 4

- dispozitivul de sudare realizat în cadrul laboratorului, alcătuit din electrodul interior expandabil 3 care se introduce în tubul de zircaloy prevăzut cu sistemul de blocaj 2, suportul 6 care are rolul de menținere a tubului la sudare și de poziționare a

distanțierilor și patinelor față de axa tubului. Subansamblul 8 ce culisează pe placa de bază 10 a dispozitivului asigură poziționarea unghiulară a pieselor de sudat pe teacă prin capul divizor 9.

- alimentarea cu gaz de protecției a zonei de sudare prin curgere liberă de argon în momentul sudării de la butelia 1.

- masa suport 11 a instalației și pedala de comandă 12 a sudării

.. Instalația de sudare este alimentată la 220 V, furnizează o putere maximă de 500 Ws, reglabilă în mod continuu.

### 7,3. Utilajul sudării dop-grilă.

Prin operația de sudare dop-grilă se asigură asamblarea elementelor combustibile în fascicul, sudarea fiind de tipul în puncte în relief realizată între dopurile elementelor și cele două grile de capăt. Utilajul folosit pentru această operație este o mașină de sudare în puncte modificată. În figura 7.4 este prezentată instalația cu dispozitivele aferente acesteia, avînd ca părți principale următoarele subansamble :

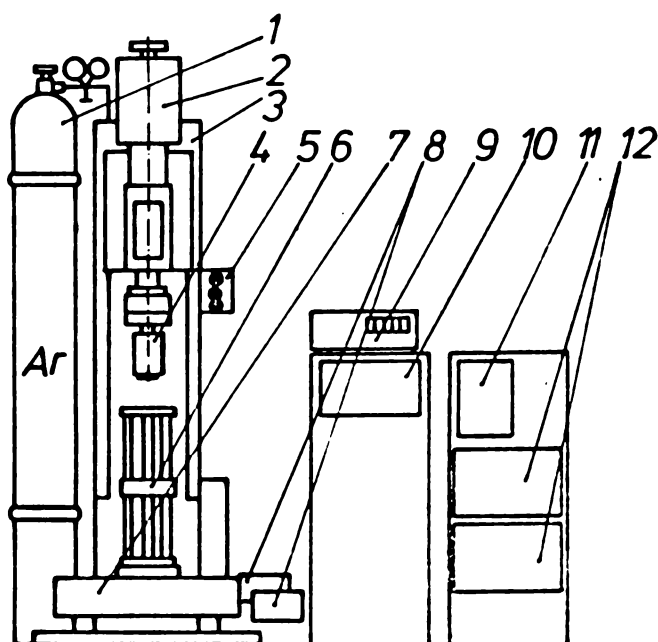


Figura 7.4, Instalația de sudare în puncte pentru asamblarea fasciculelor combustibile nucleare.

- mașina de sudat propriu zisă 3 cu capul pneumatic de sudare 2 și blocul de comandă a operației de sudare 5. Brațul inferior al mașinii a fost desființat, pe capul mașinii fiind montat subansamblul de electrozi concentrici 4 realizat pentru acest tip special de sudare.

- dispozitivul de sudare 6 care asigură poziționarea axială și unghiulară reciprocă a elementelor și în raport cu grilele de capăt, montat pe sistemul automat de poziționare pentru sudare 7, sistem ce lucrează în coordonate polare. Acționarea sistemului de poziționare se face cu două motoare pas cu pas 8 cu blocurilor de alimentare 12 și cu unitatea de programare a ciclului de mișcare 11. Toate aceste subansamble au fost realizate cu colaborarea specialiștilor de profil din cadrul institutului nostru.

- blocul de comandă și control al ciclului de sudare 10 și aparatul de măsurare a energiei de sudare 9.

- sistemul de protecție a zonei sudate cu argon în curgere liberă de la butelia 1

Caracteristicile instalației de sudare propriu zise sînt următoarele :

- putere	40 KVA DA 50%
- alimentare	2x380
- $I_{2sc}$	12 KA.
- forță de sudare	400 Kgf max.

### 7.3.1. Cap de sudare special cu electrozi concentrici.

Principiul sudării dop-grilă este prezentat în figura 7.5.

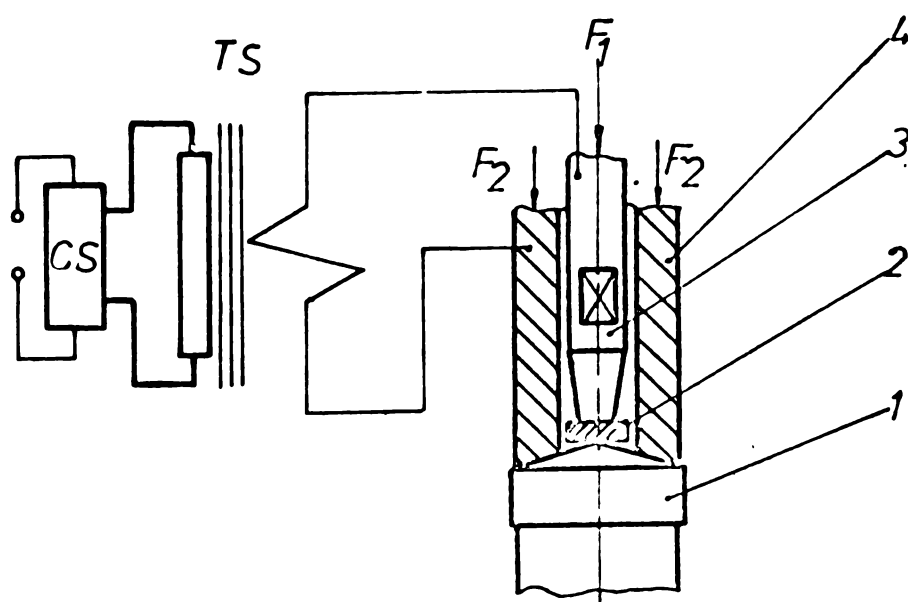


Figura 7.5. Schema de principiu a sudării în puncte dop-grilă cu electrozi concentrici

Pe dopul elementului combustibil 1, profilat, se sudează elementul de grilă 2, electrodul central 3 făcînd contact pe grilă iar electrodul exterior 4 pe dop. În acest fel curentul de sudare se închide numai prin dop și grilă, realizîndu-se punctul de sudură.



Un sistem de electrozi concentrici cu acționare pneumatică /110/ este prezentat în figura 7.6. Se disting trei părți principale ale acestuia și anume :

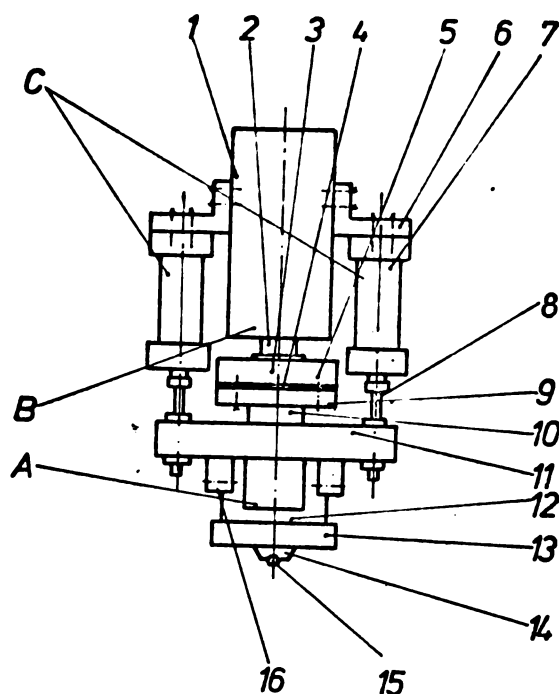
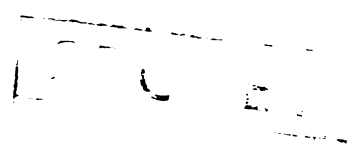


Figura 7.6. Cap de sudare cu electrozi concentrici și acționare pneumatică independentă.

A. - Ansamblul de electrozi concentrici propriu zis format din :

- piesa de ghidaj 10 pe care culisează portelectrodul exterior 12
- umărul 9 al piesei de ghidaj 10 care asigură fixarea ansamblului pe piesa polară 4 a presei de sudare
- portelectrodul exterior 12 care la partea sa superioară are umărul 11 de prindere a pistoanelor 8 ale cilindrilor pneumatice 7 care realizează forța de sudare pe electrodul exterior. Cursa lui de lucru este asigurată prin culisare pe piesa de ghidaj 10.
- piulița de strângere 13 care asigură prinderea și contactul electric între electrodul exterior 14 și portelectrodul exterior 12.
- electrodul interior 15 este montat într-un portelectrod care se găsește în degajarea circulară centrală a piesei de ghidaj 10. Portelectrodul interior se află în contact electric cu placa polară 3 a presei de sudare
- plăcile 16 asigură legătura cu placa polară inferioară,



constituind partea terminală a căii de aducție a curentului pentru electrodul exterior.

B. - Capul presei de sudare, compus din :

- partea superioară a capului presei 1 care conține cilindrul pneumatic care prin intermediul pistonului 2 realizează forța de sudare pe electrodul interior 15.

- placa polară 3 a presei de sudare care este partea terminală a căii superioare de aducție a curentului la electrodul interior

- izolația 4 realizează separarea electrică a plăcii polare 3 de umărul 9 al piesei de ghidaj 10

- sistemul de fixare 5 a ansamblului de electrozi concentrici pe placa polară superioară 3 realizat din două sisteme de strângere cu șurub în canalele T, izolate electric față de umărul 9.

C. - Ansamblul pneumatic al electrodului exterior alcătuit din :

- doi cilindri pneumatici 7 care prin intermediul pistonanelor 8 fixate de umărul 11 realizează forța de sudare pe electrodul exterior 14.

- doi suportți de fixare 6 a cilindrilor 7 pe partea superioară a capului 1 al presei

Păstrînd principiile funcționale ale sistemului prezentat mai sus, a fost realizat ansamblul de electrozi concentrici prezentat în figura 7.7 /111/.

Acesta are avantajul de a fi mai simplu, cuplîndu-se direct pe capul mașinii de sudat. Pe placa polară a capului de sudat se fixează portelectrodul interior 7 cu electrodul central 2. Forța de sudare pentru electrodul exterior 1 fixat de piulița 12 în portelectrodul inferior 4 este realizată tot de cilindrul capului de sudare prin intermediul arcului de compresiune 6. Reglajul forței de sudare pe electrodul exterior se realizează prin comprimarea arcului 7 prin filetarea portelectrodului inferior 4 în cămașa cilindrică 5 care se fixează pe portelectrodul central 7 prin rulmentul radial-axial 8. Izolarea electrică se realizează prin piesele 9 executate din polietilenă de înaltă presiune. Realizarea protecției cu argon a zonei sudate se asigură prin ștuțul 10 și piesa 11 de aducție de argon. Aducția de curent pentru electrodul exterior este fixată de șurubul 3.

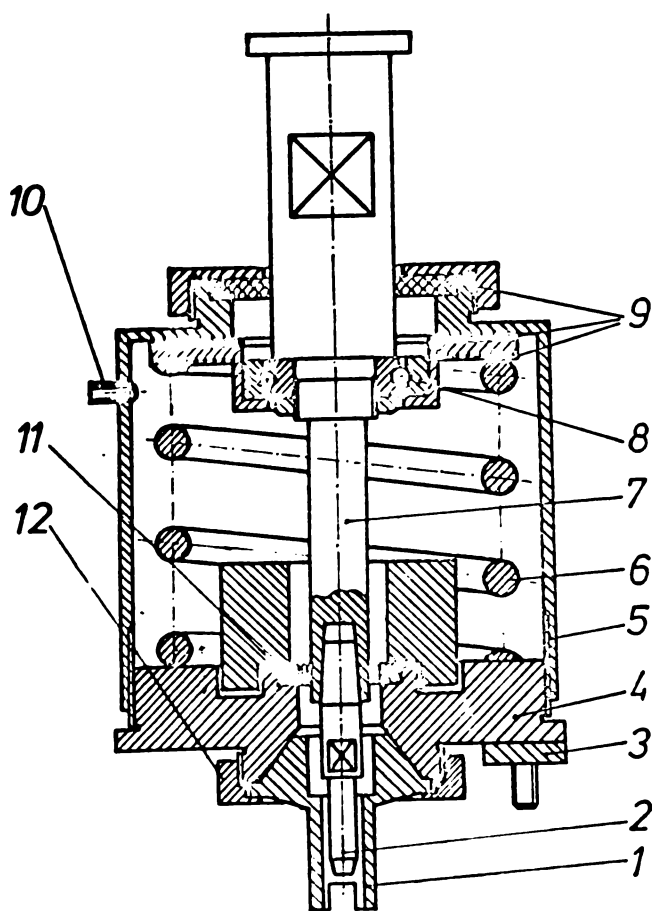


Figura 7.7. Subansamblul de electrozi concentrici cu acționare prin resort.

### 7.3.2. Dispozitivul de asamblare.

Acest dispozitiv are un rol foarte important în sudarea fasciculului combustibil, atât în poziționarea reciprocă a elementelor față de grilă, cât și în asigurarea caracteristicilor geometrice finale ale fasciculului.

Dispozitivul a fost realizat după concepție proprie și îmbunătățit în decursul a doi ani de experimentare, realizat pentru fasciculul PHWR-28 /111/ apoi re-proiectat pentru fasciculul PHWR-37. Acest dispozitiv face obiectul unei cereri de brevet de invenție în curs de redactare.

### 7.3.3. Sistem de poziționare automat în coordonate polare.

Lucrările de asamblare ale fasciculului PHWR-28 au fost executate prin aducerea dispozitivului de sudare în pozițiile succesive de sudare ale elementelor prin acționarea manuală a unui sistem (figura 7.8) alcătuit din masa XY-1 și masa rotativă 2 montate pe placa de bază 3 a mașinii de sudat 4.

Elementele combustibile tip PHWR-28 se asamblau în geometria prezentată în figura 7.8 de cele două grile de capăt.

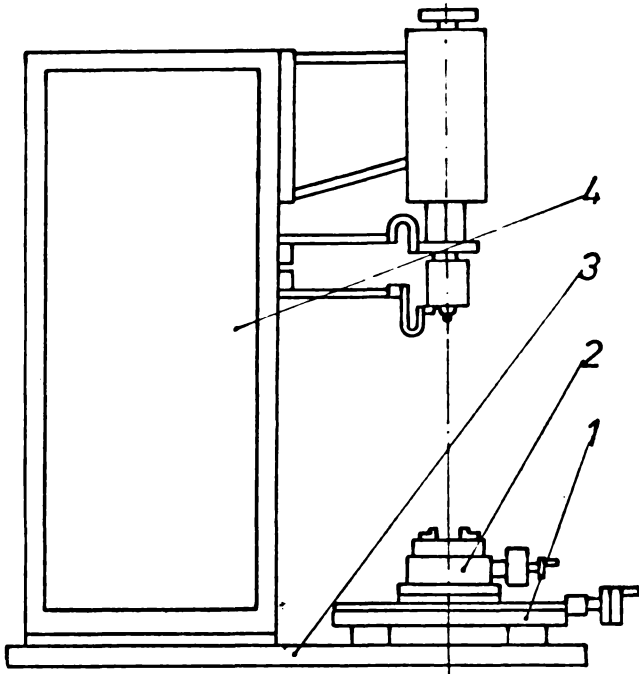


Figura 7.8. Sistemul de poziționare mecanic manual la sudarea de asamblare dop-grilă

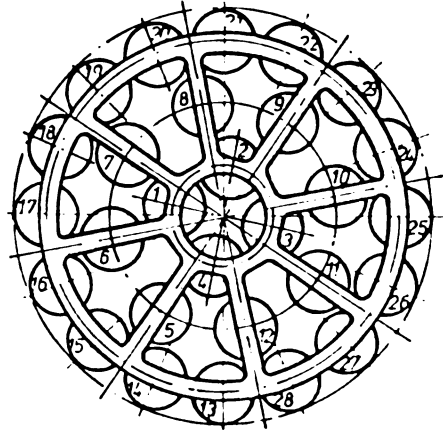
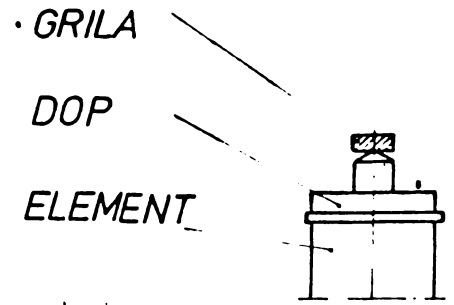


Figura 7.9. Dispoziția e.c.n. în raport cu grila pentru f.c.n. PHWR-28.

Fasciculele combustibile tip PHWR-37 au geometria de asamblare conform figurii 7.10. Pentru sudarea dop-grilă de asam-

PHWR 37

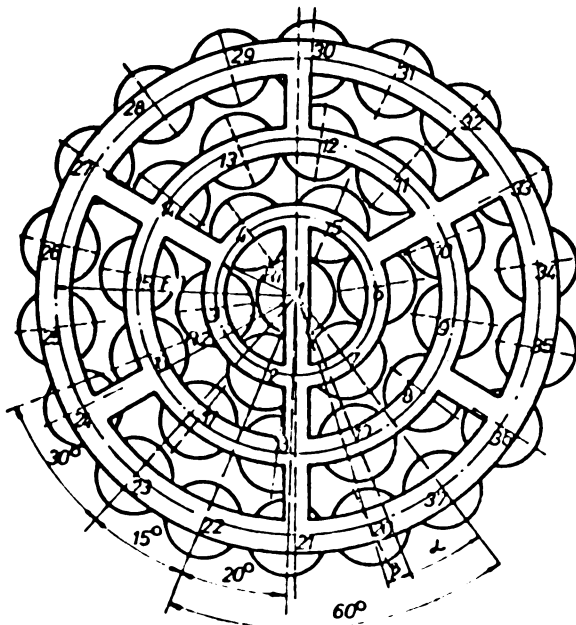
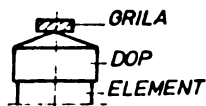


Figura 7.10. Dispoziția e.c.n. în raport cu grila pentru f.c.n. PHWR-37 și ordinea de sudare a elementelor

blare a acestor fascicule a fost realizat în cadrul institutului

un dispozitiv de poziționare automat în coordonate polare. Partea mecanică este alcătuită dintr-o sanie cu deplasare X și o masă rotativă cu angrenaj melc-roată melcată, acționările acestora fiind făcută cu motoare pas cu pas de 100 Kgxcm. Pentru poziționarea automată s-a realizat blocul de programare electronic care asigură executarea următorului ciclu:

- poziția de zero corespunde situației de sudare a elementului central 1 (vezi figura 7.10)

- după sudarea elementului 1, sania X execută deplasarea la cota  $R_1$  care aduce în poziție de sudare elementul 2, apoi cu rotiri succesive de  $60^\circ$  se asigură poziționarea elementelor 3-7

- la încheierea sudării elementelor de pe cercul de rază  $R_1$ , se execută deplasarea pe axa X la raza  $R_2$  și rotirea de corecție de unghi  $\alpha$  odată cu schimbarea de sens a rotirii, aducând în poziție de sudare elementul 8. Prin rotiri succesive de  $30^\circ$  se aduc în poziție de sudare elementele 9-19

- după sudarea elementului 19 se deplasează sania X la raza  $R_3$ , se inversează sensul de rotire se aplică corecția de unghi  $\beta$  și prin rotiri succesive de  $20^\circ$  se aduc în poziție de sudare elementele 20-37

- după sudarea elementului 37, dispozitivul revine automat la poziția zero

- comanda trecerii de la un element la altul este dată la ridicarea capului de sudare în urma efectuării unei suduri

Viteza de acționare este reglabilă, iar în timpul de pauză între două mișcări succesive motoarele sînt decuplate de la blocurile de alimentare aferente.

În urma experimentării cu succes a acestui sistem automat este în curs de proiectare un sistem de programare cu microprocesor care va putea prelua pe lîngă comanda motoarelor pas cu pas și alte funcții de comandă, control și programare a procesului tehnologic de sudare pentru asamblarea fasciculelor combustibile nucleare. Proiectarea și execuția acestui sistem s-au încheiat în 1980, experimentarea lui începînd în 1981 (vezi cap. 10).

#### 7.4. Aparate de măsură a parametrilor de sudare.

Măsurarea parametrilor procesului de sudare prin presiune la sudarea elementelor combustibile nucleare constituie un

control al calității sudurilor realizate prin urmărirea reproducibilității parametrilor stabiliți prin controalele distructive caracteristice. La ora actuală se consideră ca cea mai completă aparatură de măsurare a parametrilor de sudare, cea produsă de firma PECO-Messer Griesheim RFG care asigură determinarea tuturor mărimilor electrice caracteristice. Mașina de sudare dop-teacă a fost echipată cu o linie de măsură de acest tip, în figura 7.11 fiind prezentată schema de cuplare a acestor aparate pe mașina de sudat.

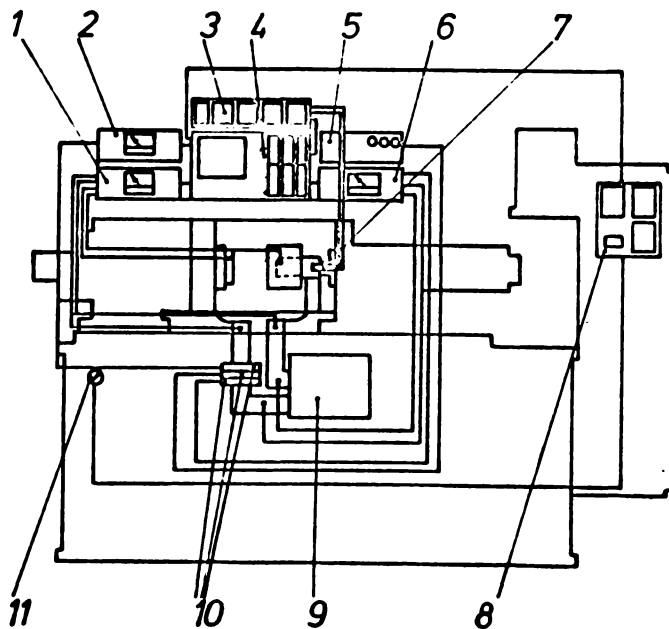


Figura 7.11. Schema de cuplare a aparaturii de măsură a parametrilor de sudare la mașina de sudat dop-teacă.

Aparatul 2 tip SM-13 cu posibilitatea de măsură a valorilor  $I_{ef}$ ,  $I_s$  și  $Q$  (Axs) efectuează măsurarea valorii  $I_{ef}$  (KA) în domeniul de 0-200 KA. Aparatul 1 tip WM-12 este un aparat de tipul miliohmetru fiind utilizat pentru măsurarea rezistenței de contact a pieselor de sudat. Numărul semiperioadelor de sudare este controlat cu aparatul cu afișaj digital 5 de tipul PZ-11. Aparatul 6, de tipul LM-13 care pe lângă mărimile  $I_{ef}$ ,  $I_s$ ,  $Q$  determină și  $P$  (Kw) și  $W$  (Kxs) a fost cuplat pentru măsurarea energiei de sudare  $W$ . Varianta nouă a aparatului LM-13-D cu afișaj digital asigură și posibilitatea măsurării  $U_{ef}$  și  $U_s$  putând avea inclus la cerere și blocul de măsurare a semiperioadelor de sudare. Cuplarea aparatelor pe mașina de sudat s-a făcut în felul următor :

- SM-13 - (2) pe circuitul secundar al transformatorului 9 cu traductor toroidal tip Rogowski 10
- WM-12 - (1) cablurile de măsură pe electrozii de prinde-

re a pieselor de sudat, iar cblurile sursei interne a aparatului pe barele circuitului secundar al transformatorului 9.

- PZ-11 - (5) pe circuitul secundar al transformatorului 9 cu traductor toroidal tip Rogowski 10

- LM-13 - (6) pentru măsurarea curentului - traductorul toroidal tip Rogowski 10 iar tensiunea prin două cabluri de măsură, cuplate pe circuitul secundar al transformatorului 9

Măsurarea scurtării la sudare se face cu ajutorul traductorului inductiv 7 cuplat pe capul mașinii de sudat i legat la puntea de măsură 3. Aparatul 4, oscilograf înregistrator tip Oscilomink E - Siemens RFG - cu viteza maximă a hrtiei de 1000 mm/s este comandat de blocul de sincronizare 8 cu ciclul de sudare, ce intră în funcție la darea comenzii de sudare din comutatorul 11. In figura 7.12 este prezentată o înregistrare a parametrilor unui

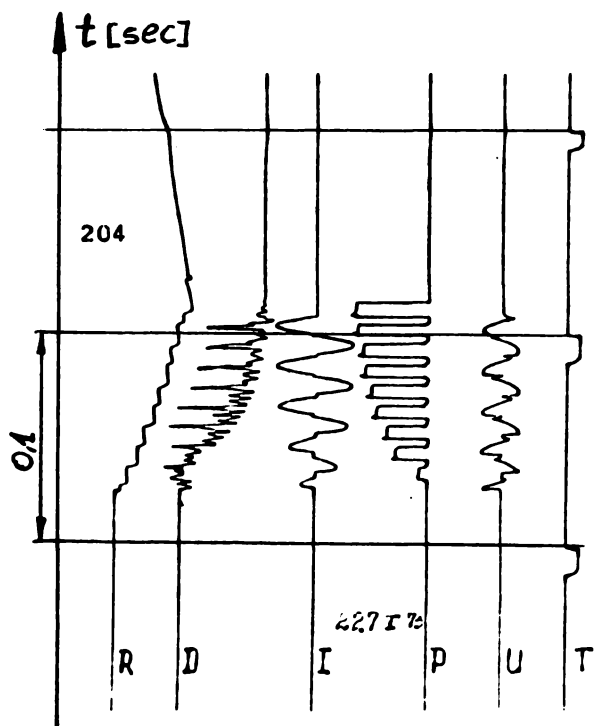


Figura 7.12. Diagrama parametrilor de sudare la îmbinarea dop-teacă.

- R - rezistența de contact
- D - scurtarea la sudare
- I - curentul de sudare
- P - puterea
- U - tensiunea secundară
- T - baza de timp 0,1 secunde

ciclu de sudare.

La sudarea dop-grilă, după lucrări preliminare cu aparatura tip "i<sup>2</sup>t" i "IP" Schlatter, s-a utilizat aparatul PECO tip LM-13-D pentru măsurarea energiei, aparatură utilizată i la controlul sudurii ntinilor i distorsiunilor. Decizia asupra utilizării ca parametri de bază la măsurarea parametrilor de sudare a energiei a fost luată în urma studiului tuturor mărimilor electrice, concluzia fiind că valoarea dată de această măsurătoare, determinată de tensiune, curent i deci i de rezistența de contact, ca valoare a  $\int UI dt \cos \varphi$  caracterizează din punct de vedere electric

cel mai complet calitatea sudurii rezultate. La sudarea dop-teacă se recomandă și controlul scurtării la sudare, deoarece accidental pot apărea necorelări între valoarea energiei măsurate și a scurtării, cauza putând fi o dereglare a sistemului de limitare a lungimii libere a tecii în partea ce urmează a fi sudată, sau o glisare a tubului în baci ca urmare a poziționării incorecte a limitatorului din spate al tecii.

### 7.5. Concluzii.

Mașinile de sudat prin presiune pentru fabricația elementelor combustibile nucleare nu sînt executate ca mașini de serie pe piața mondială decît ca unicat la comandă specială. Cu excepția mașinii de sudat dop-teacă executată sub această formă la firma COMEGE-Franța și îmbunătățită ulterior la IRNE, celelalte mașini utilizează mașini de serie modificate și adaptate acestor tipuri de suduri caracteristice. Se remarcă realizarea și experimentarea cu succes a unor dispozitive specifice cum sînt: capul de sudare cu electrozi concentrici, dispozitivul de asamblare a e.c.n. în fascicule precum și dispozitivul de poziționare automată la sudarea de asamblare.

Experiența acumulată în acest domeniu va permite abordarea în concordanță cu Planul Nuclear Național a realizării în IRNE de echipamente de sudare specializate destinate echipării viitoarelor capacități de fabricație a elementelor combustibile nucleare.



## 8. TEHNOLOGIA SUDARII PRIN PRESIUNE A ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE INTECUIE IN ALIAJE DE ZIRCONIU.

Lucrările de sudare prin presiune a aliajelor de zirconiu au parcurs următoarele etape :

- studii asupra sudurii dop-teacă pe teci cu diametrul de 10,73 mm și grosime de perete 0,65 mm, efectuate la centrul CEN/SCK-Mol Belgia (martie-august 1973).

- stabilirea tehnologiei de sudare dop-teacă pe teci de diametrul exterior 15,25 mm și grosime de perete de 0,4 mm și realizarea elementelor combustibile experimentale pentru iradiere în reactorul PR-2 Belgia (1974-1975)

- studii asupra tehnologiei de sudare a patinelor și distanțierilor pe tecile de zircaloy, a tehnologiei de asamblare a fasciculelor combustibile de tipul PHWR-28 și realizarea primului fascicul (1976)

- definitivarea tehnologiei de sudare și execuția a 5 fascicule PHWR-28 (1977)

- stabilirea tehnologiilor de sudare pentru teci cu diametrul exterior de 13,08 mm și grosime de perete de 0,4 mm și realizarea a 23 fascicule PHWR-37 (1978)

- omologarea tehnologiei de fabricație a fasciculelor combustibile nucleare cu 37 de elemente pentru centrala nucleară electrică de 650 MWe (aprilie 1979) și realizarea a 39 fascicule.

Lucrările vor fi dezvoltate astfel :

- producerea la scară pilot de fascicule PHWR-37 (1980)
- fabricarea lotului de fascicule pentru omologare (1981)
- fabricația încărcăturii de 5.000 fascicule pentru prima centrală nucleară electrică de 650 MWe, echivalentă cu 2.000.000 tone cărbune energetic.

### 8.1. Sudarea dop-teacă a tecilor de zircaloy $\varnothing_{\text{ext}}$ 10,73 mm și grosime de perete 0,65 mm.

Lucrările prezentate mai jos au fost efectuate de autor

în Centrul de Studii Nucleare - Mol Belgia în cadrul unei burse de specializare acordată de Programul Naținilor Unite pentru Dezvoltare. Abordarea sudării aliajelor de zirconiu prin presiune în Belgia, s-a făcut cu ocazia acestei specializări, în CEN/SCK-Mol existând preocupări de sudare prin presiune a oțelurilor de tip feritic. Utilajul folosit a fost o mașină de sudat în puncte de 50KVA tip Electromecanique modificată pentru a permite sudarea dop-teaca și instrumentată pentru măsurarea și înregistrarea parametrilor de sudare.

Variantele geometrice ale dopurilor utilizate la sudare (figura 8.1) au avut la bază experiența sudării prin presiune a îmbinărilor dop -teacă a e.c.n. care utilizau ca material de întecuire oțelul feritic, ținând cont de caracteristicile dimensionale și de particularitățile de sudare ale e.c.n. întecuite în aliaje de zirconiu /112/.

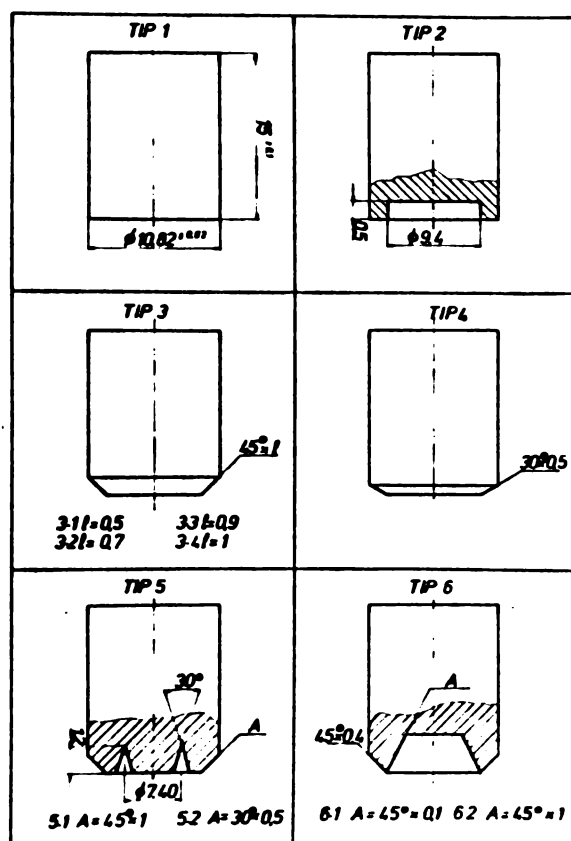


Figura 8.1. Variante geometrice de dopuri pentru sudarea e.c.n. studiate.

### 8.1.1. Lungimea liberă a tecii.

Lungimea liberă a tecii constituie un factor principal care influențează sudarea dop-teacă. Această valoare se măsoară de la capătul tecii ce urmează a fi sudat pînă la bacul de prindere

al tecii. După stabilirea preliminară a celorlați parametri de sudare (forța, curentul, numărul de perioade) s-au executat o serie de suduri pe tipul de dop 3.1 (figura 8.1) cu lungimi libere de teacă de 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 și 2 mm. În figura 8.2 sînt prezentate formele cordonului sudat rezultat, în funcție de valoarea  $L$  (mm) a lungimii libere.

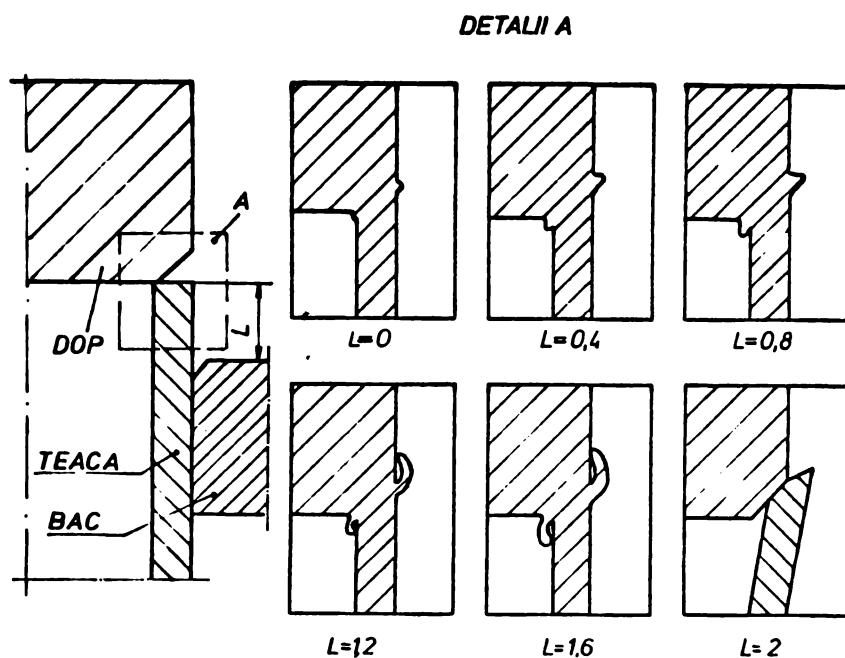


Figura 8.2. Influența lungimii libere a tecii asupra formării îmbinării sudate.

În urma experimentărilor s-a reținut ca valoare  $L=0,4-0,8$  mm. Cazul  $L=0$ , deși generează bavuri minime, conduce la o uzură puternică a bacurilor care se reflectă asupra calității sudurii. Cazul  $L=1,2$  mm și  $L=1,6$  mm generează o bavură mare în planul de separare a materialelor dopului și tecii ceea ce poate genera defecte în sudură. Cazul  $L=2$  mm practic nu asigură sudarea, teaca fiind deformată sub acțiunea forței de sudare la trecerea curentului de sudare. Sudarea diferitelor geometrii de dop s-a făcut cu lungimea liberă a tecii de 0,4 mm din considerentele arătate mai sus corelate și cu examenul metalografic al îmbinării.

#### 8.1.2. Forța de sudare.

Variind forța de sudare în domeniul 40-120 Kgf. s-a constatat că la valorile de 40-60 Kgf. apar expulzii de material topit datorită unor supraîncălziri locale în zona de contact. La 80 Kgf sudurile nu mai prezentau expulzii dar forța nu era suficientă pentru deformarea materialului încălzit la trecerea curentului de sudare neobținînd o sudare completă. La lungimea liberă a tecii de

0,4 mm și sudare cu o alternanță, rezultatele cele mai bune au fost obținute la valoarea de 120 Kgf, valoare menținută ca parametru fix pentru toată seria de lucrări.

### 8.1.3. Curentul și tensiunea de sudare.

Energia de sudare poate fi modificată prin <sup>numărul</sup> de perioade de sudare, prin defazajul unghiului de aprindere a ignitroanelor și prin reglajul de tensiune secundară. În figura 8.3. este prezentată diagrama de variație a puterii eficace a mașinii de sudat tip PR-31/50 Electromecanique funcție de unghiul de defazaj al aprinderii ignitroanelor și funcție de tensiunea secundară.

În urma experienței de la sudarea oțelurilor feritice s-a luat ca bază de plecare sudarea cu o alternanță - 0,02 secunde. La un defazaj de 95% s-au executat pe geometria 3.3. suduri cu tensiunile corespunzătoare plotului 4, 5 și 6 care au fost analizate metalografic. Sudura realizată cu tensiunea secundară de 5,35 V, corespunzătoare plotului 6, o alternanță și defazaj de 95% a dat o sudură de bună calitate la forța de sudare de 120 Kgf. și lungimea liberă a teții de 0,4 mm. Cu aceiași parametri s-au obținut suduri bune și pe celelalte îmbinări cu excepția tipului 1 și 2. Aceste

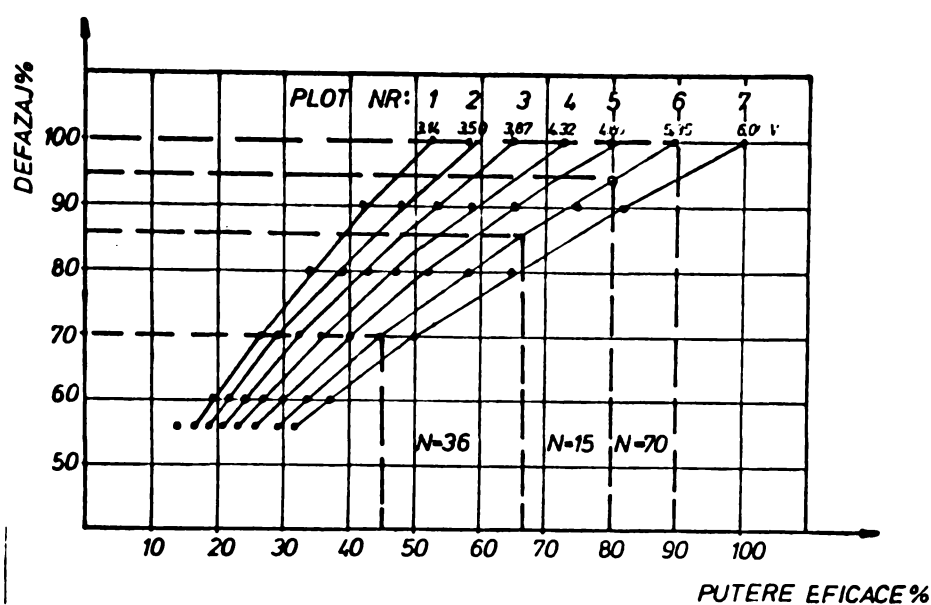


Figura 8.3. Variația puterii eficace funcție de defazaj și tensiune secundară la mașina tip PR-31/50 Electromecanique.

două tipuri de îmbinări au fost abandonate după primele încercări din cauza calității proaste a îmbinării obținute, cauza fiind contactul electric inițial neuniform și pe suprafață mare, care generează expulzii puternice de metal topit.

#### 8.1.4. Scurtarea la sudare.

Din analiza diagramei unui ciclu de sudare (figura 8.4), se observă că scurtarea se desfășoară în două etape distincte, corespunzătoare timpilor de trecere a curentului și a pauzei dintre semialternanțe. Această diferențiere netă a scurtării  $S_1$  și  $S_2$ , corespunzătoare celor două semialternanțe se datorește utilizării unui cap de sudare de mică inerție de construcție specială, care combină o culisare pe căi de rulare cu bile cu un sistem de membrane metalice. Evoluția scurtării și a desfășurării încălzirii în timpul sudării s-a studiat pentru oțelul feritic în filmare ultrarapidă.

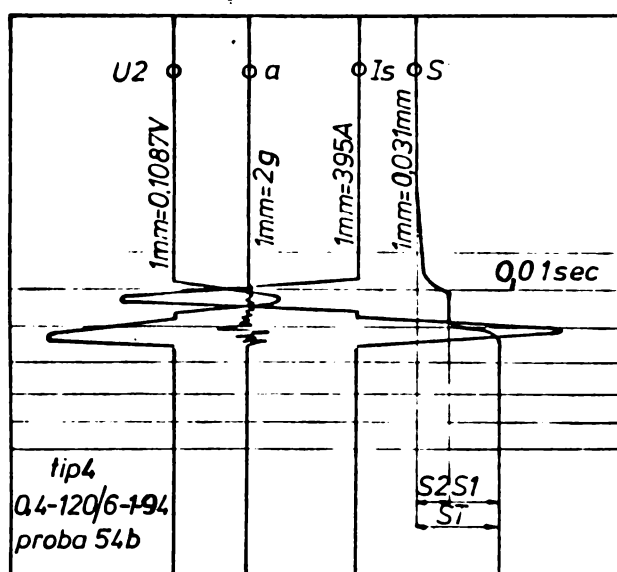


Figura 8.4. Diagrama ciclului de sudare pentru geometria de dop tip 4.

$U_2$  - tensiunea secundară  
a - accelerația  
 $I_s$  - curentul de sudare  
s - scurtarea la sudare

Concluziile - valabile și pentru sudarea aliajelor de zirconiu - sînt următoarele :

- suprafețe inițiale mari de contact dop-teacă (geometria tip 1 și 2 ) provoacă contacte locale în care are loc o supraîncălzire urmată de expulzare de metal topit

- celelalte geometrii care practic asigură un contact circular linear, deși creează inițial puncte de supraîncălzire locală, prin deformare rapidă a materialului în zona de contact se uniformizează încălzirea, fiind excluse expulziile de metal topit.

- zona de sudat are un ciclu termic cu încălziri și răcirii succesive în fază cu curentul de sudare.

- în intervalul de curent zero dintre semialternanțele

de sudare, piesele se răcesc, scurtarea în acest interval fiind zero. Aceste considerente sînt valabile pentru un cap de sudare de inerție mică.

Studiind scurtarea la sudare funcție de geometria dopului, s-a constatat făcînd comparație între dopul tip 4 și tip 5.2 că repartiția scurtării totale  $S_t$  pe cele două semialternanțe de curent ( $S_1$  și  $S_2$ ) este diferită. În cazul dopului tip 4, dop de tip masiv,  $S_1$  are o valoare medie de 62,6% din  $S_t$  și  $S_1 > S_2$  (figura 8.5 a). La dopul de tip 5.2, la care prin canalul circular practicat s-a echilibrat masiv zona de sudare a dopului cu grosimea tablului de zinc 103, se constată că  $S_1$  are o valoare medie de 52% din  $S_t$  iar  $S_1 \approx S_2$  (figura 8.5 b). Deasemenea, dacă se compară cele două scurtări totale, se constată că  $S_{t4} < S_{t5.2}$  diferența fiind cu atît mai mare cu cît valoarea unghiului de aprindere a ighitroanelor tinde spre 100%.

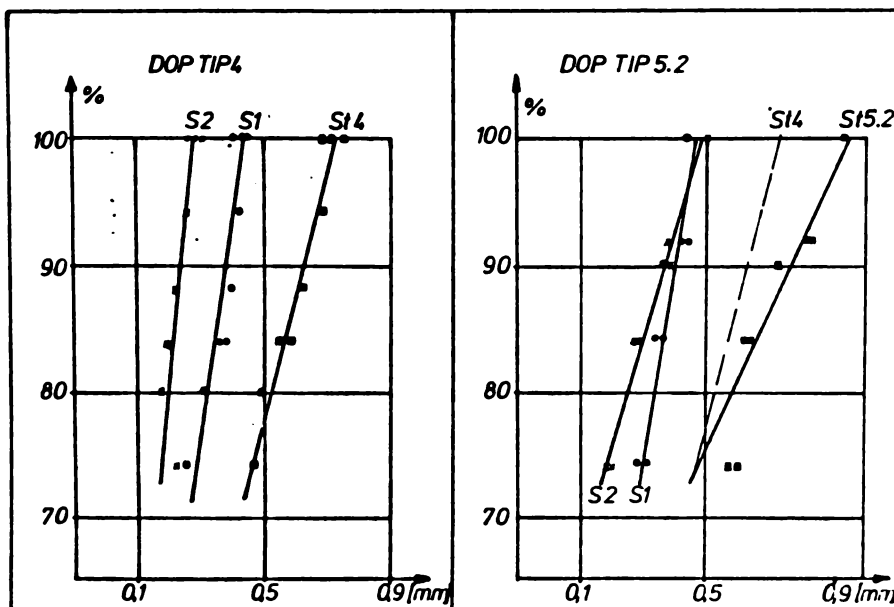


Figura 8.5 a și b. Variația scurtărilor la sudarea dopurilor de tip 4 și tip 5.2 funcție de valoarea unghiului de aprindere a ighitroanelor.

Rezultă deci că scurtarea la sudare este o caracteristică a fiecărui tip de ansamblu dop-teacă care se sudează în strînsă dependență cu parametrii de sudare. Cunoașterea dependenței scurtării de geometria îmbinării este necesară la proiectarea elementelor combustibile, constituind una din datele tehnologice de bază de care trebuie să se țină seama.

### 8.1.5. Pontul de rezistență la oboseală.

Controlul calității îmbinărilor rezultate s-a efectuat având drept criteriu un test de oboseală nestandardizat și control metalografic. Testul de oboseală s-a efectuat pe un dispozitiv a cărui schemă este prezentat în figura 8.6. Acest dispozitiv

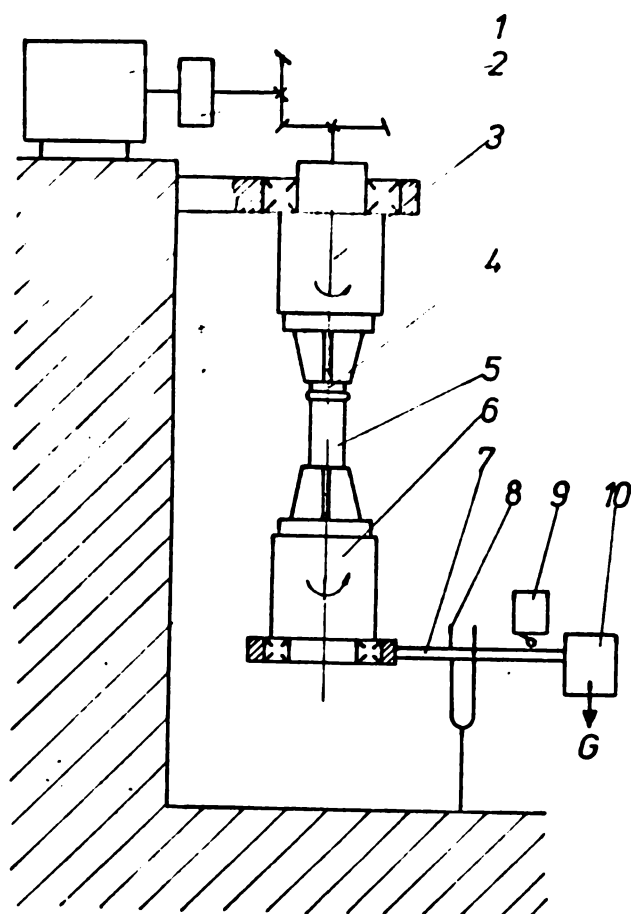


Figura 8.6. Schema dispozitivului de încercare la oboseală a sudurilor dop-teacă.

se compune dintr-un motor 1 cu turație variabilă, un numărător electronic 2, mandrina superioară 3 în care se prinde dopul sudat 4 și mandrina inferioară 6 în care se prinde teaca 5 sudată de dop. Solicitarea zonei sudate se realizează prin greutatea  $10$  care acționează prin pârghia 7 asupra mandrinei inferioare 6. Pârghia 7 este ghidată în furca 8. La ruperea pieselor sudate, mandrina 6 cade liber împreună cu sistemul de greutăți  $10$ , iar microcontactorul 9 decuplează numărătorul electronic 2. Lungimea pârghiei 7 este de 287 mm și greutatea  $10$   $G=3,5$  Kg. Modulul de rezistență al pieselor sudate este  $W=49,5$  mm<sup>3</sup>, astfel că zona sudată are o solicitare de 19,9 Kgf/mm<sup>2</sup> care reprezintă circa 30% din tensiunea de rupere.

Rezultatele acestui test sînt prezentate în tabelul 8.1.

Tabelul 8.1.

Tip de dop	U <sub>2</sub> (V)	Nr. alternațe	Defazaj %	Nr de rotații la rupere	Nr.probă
3.4	5,35	1	90	4552	49 a
	5,35	1	100	5306	50 a
	6,00	1	100	4901	51 a
4	5,35	1	84	3885	68 a
	5,35	1	100	5348	67 a
5.2	5,35	1	74	2350	72 b
	5,35	1	84	2353	71 a
	5,35	1	92	2490	73 a
	5,35	1	100	2143	70 b

Cu excepția sudurii 71 a la care ruperea s-a produs în cordon la toate celelalte probe ruperea este în zona tecii imediat următoare cordonului sudat. Caracteristic la sudarea prin rezistență este formarea bavurii interioare și exterioare, probele testate la oboseală fiind debavurate exterior la cota dopului. Secțiunea zonei sudate este mai mare decât secțiunea tecii datorită bavurii interioare, motiv pentru care ruperea are loc în teacă. Rezultatele obținute prin acest test confirmă alegerea corectă a parametrilor de sudare îmbinarea executată cu dopurile tip 3.4 și 4 dând rezultate superioare celor obținute pe tipul 5.2.

#### 8.1.6. Controlul metalografic.

Controlul metalografic al sudurilor realizate a avut drept scop studiul formei bavurilor și a defectelor ce pot apărea în zona sudată funcție de parametrii de lucru, în vederea determinării parametrilor optimi pentru tipurile de îmbinări studiate. Fiecare probă sudată este însoțită de parametrii de lucru notați a-b/c-d-e unde "a" reprezintă lungimea liberă a tecii în mm, "b" forța de sudare în Kgf, "c" tensiunea secundară prin numărul plotului, "d" numărul de alternanțe de sudare și "e" unghiul de defazaj în %.



Pentru a studia influența tensiunii de sudare asupra formării îmbinării sudate, s-au sudat o serie de probe de tipul 3.3 cu următorii parametrii :

- proba 1 a : 0,4-120/4-1-95
- proba 2 a : 0,4-120/5-1-95
- proba 2 b : 0,4-120/6-1-95

La probele 1 a și 2 b cu tensiunile de sudare corespunzătoare plotului 4 și 5 - 4,32 V respectiv 4,80 V - metalografiile zonelor sudate (figura 8.7 și 8.8) pun în evidență o sudare incompletă a îmbinării. La proba 2 b cu tensiunea de 5,35 V corespunzătoare

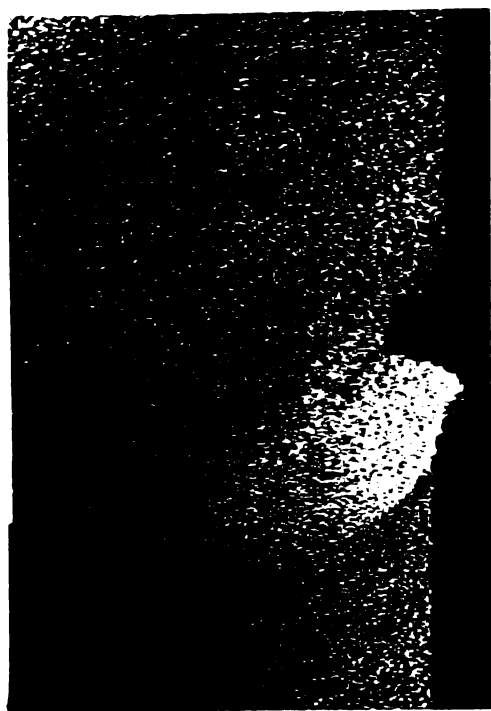


Figura 8.7. Zona îmbinării sudate a probei 1 a, x30.



Figura 8.8. Zona îmbinării sudate a probei 2 a, x30.

toare plotului 6 s-a obținut o zonă sudată completă (figura 8.9), cu parametrii acestei probe obținând o sudură de calitate foarte bună pe geometria de dop tip 4 (figura 8.10).

În figura 8.11 a, b este prezentată zona îmbinării sudate a probei 70a/0,4-120/6-1-90/ de tipul 5.2 după debavurare exterioară și testare la oboseală la 2143 rotații. Se observă apariția fisurilor la baza bavurii interioare în zone tecii de zircaloy. Din modul în care apare morsa de fisură se constată că rezistența la oboseală este determinată de nivelul de rupere a bavurii la

terioare la teaca de zircaloy, o racordare corespunzătoare eliminând riscul apariției de concentratori de tensiuni în această zonă.

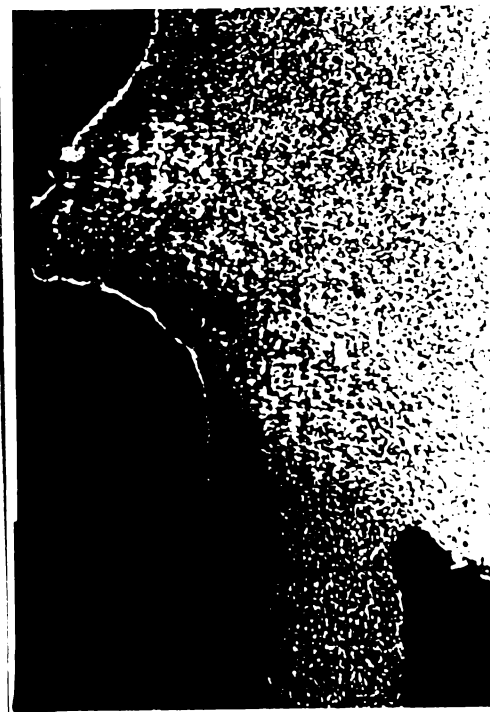
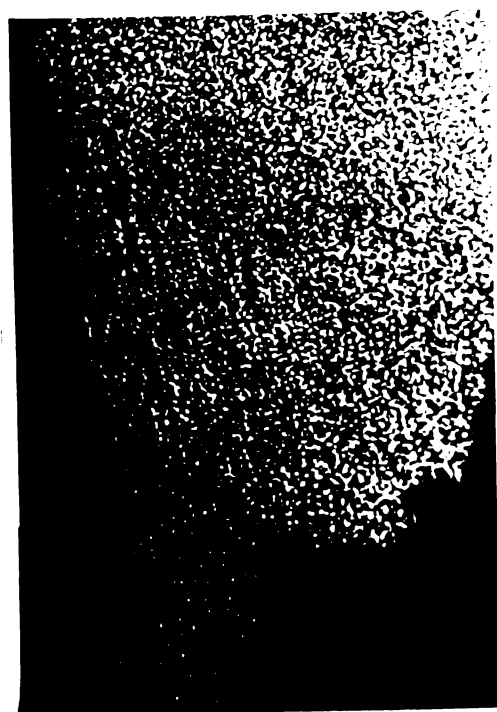
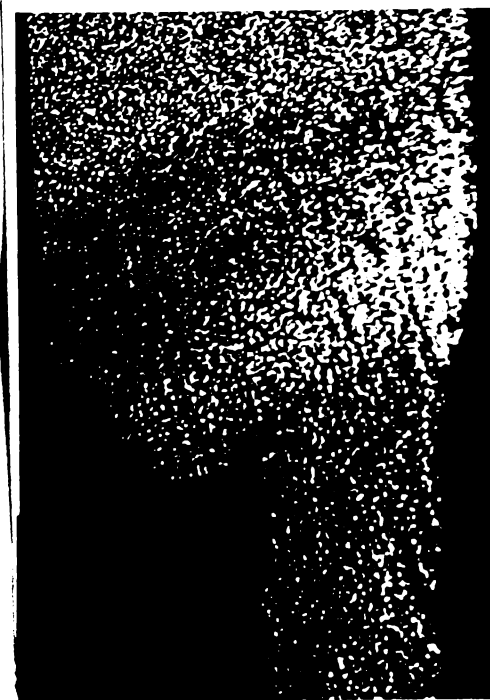


Figura 8.9. Zona îmbinării sudate a probei 2 b, x30.

Figura 8.10. Zona îmbinării sudate a probei 54 a, x30.



a



b

Figura 8.11. Zona îmbinării sudate a probei 70 a cu amorsale de rupere în urma testului de oboseală. x30.

Expulziile de metal topit în cursul procesului de sudare se datoresc după cum s-a arătat anterior atât forțelor de sudare prea mici care conduc la supraîncălziri locale precum și unei suprafețe mari de contact inițial. În figura 8.12 este prezentată zona îmbinării sudate a probei 17 a/o, 4-40/6-1-100/ cu dop de tip 3.2 care la o forță de sudare de 40 Kgf prezintă o zonă de expulzie completă a materialului supraîncălzit. În figura 8.13 se observă o sudură de calitate necorespunzătoare datorită tipului de dop 2, care are suprafața de contact cu tubul plană. Figura prezintă pro- ba 33 a/o, 4-120/6-1-70/.

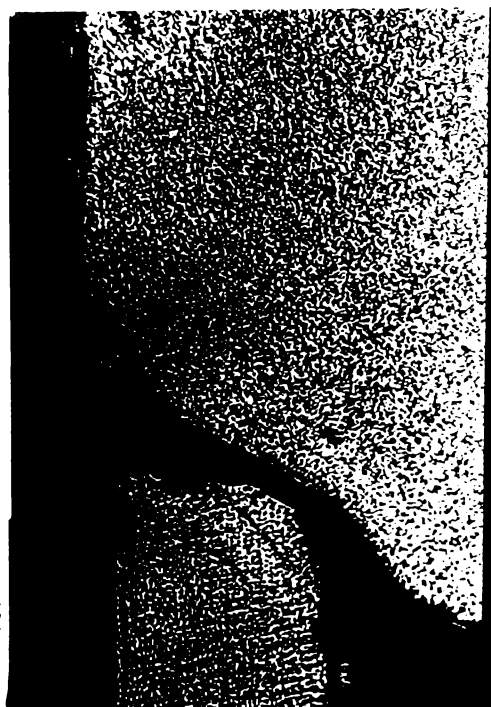


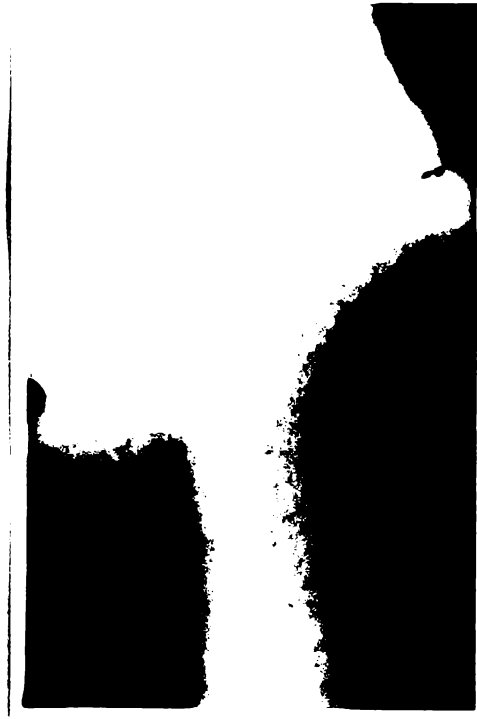
Figura 8.12. Zona de îmbinare a probei 17 a, x30.

Figura 8.13. Zona îmbinată a probei 33 a, x30.

În figura 8.14 a, b și 8.15 a, b sînt prezentate zonele sudate a două probe de sudare, prima de tipul 3.1 proba 30 a/o, 4-120/6-1-100/ și a doua de tipul 5.1, proba 62 b/o, 4-120/6-2-80/, ca suduri standard. În zona de sudare nu apar nici un fel de defec- te, iar bavurile interioare nu prezintă amorse de fisuri.



a



b

Figura 8.14. Zona sudată a probei 30 a, x25



a



b

Figura 8.15. Zona sudată a probei 62 b, x25

8.2. Sudarea elementelor combustibile experimentale  
pentru testele de iradiere în reactorul  
BR-2 Belgia.

Elementele combustibile experimentale iradiate în dispozitive de iradiere BR-2 al CES/SCK-Mol Belgia alături de elementele introduse în reactorul MZFR-RFG au avut ca obiectiv demonstrat capabilității de a produce elemente combustibile în conformitate cu standardele de calitate ale domeniului nuclear /100%.

Față de elementele MZFR, elementele BR-2 (Figura 8.16) se deosebesc în primul rând prin înlocuirea sudurii TIG a dopurilor de capăt cu sudare prin presiune. O altă deosebire o constituie lungimea elementelor de 539 mm la BR-2 față de 306,3 mm la MZFR.

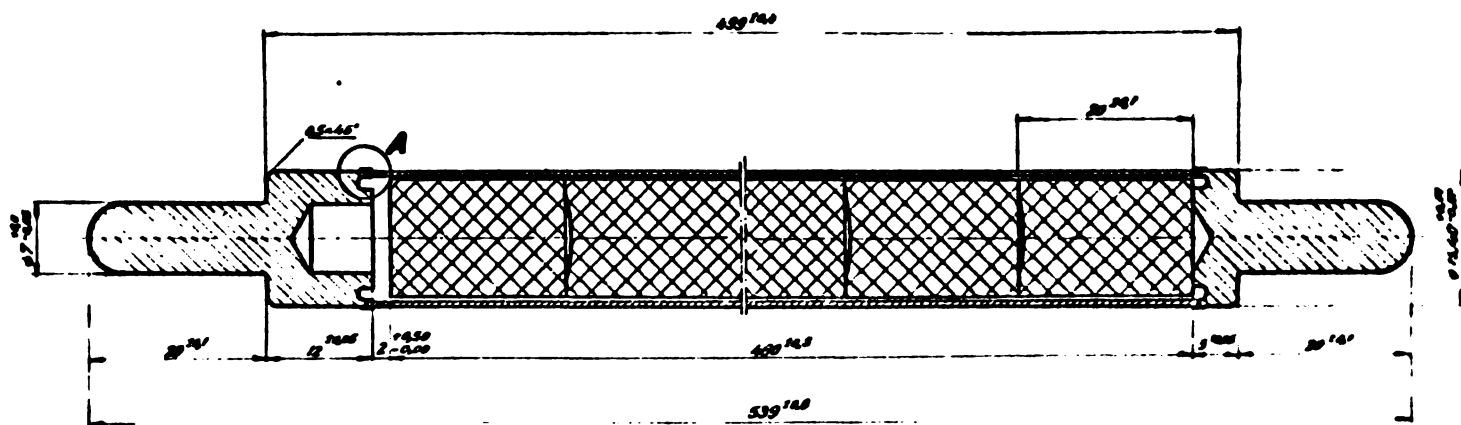
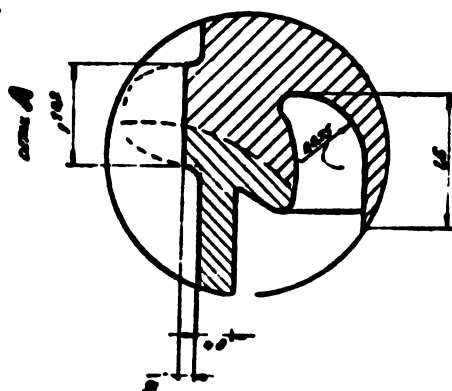


Figura 8.16. Element combustibil pentru testele iradiere în reactorul BR-2.



### 8.2.1. Omologarea procesului de sudare.

Geometria dopurilor ce au fost sudate prin presiune este prezentată în figura 8.17 a,b, geometrie elaborată în urma lucrărilor prezentate în paragraful 8.1. Înainte de sudare, piesele au fost degresate în amestec ternar de alcool-toluen-acetonă în baie de degresare cu ultrasunete. Probele pentru stabilirea parametrilor de sudare au fost analizate metalografic avînd drept criteriu zona nesudată definită conform AFCH-2.814 "Resistance Welding of zircaloy and closure joints". Această metodă evaluează calitatea sudurii în funcție de raportul întregii lungimi complet sudate de-a lungul planului de interferență dop-teacă față de grosimea porțelului tecii, exprimat în procente. Sînt considerate suduri bune toate sudurile a căror raport prezintă o valoare mai mare sau cel puțin egală cu 90%.

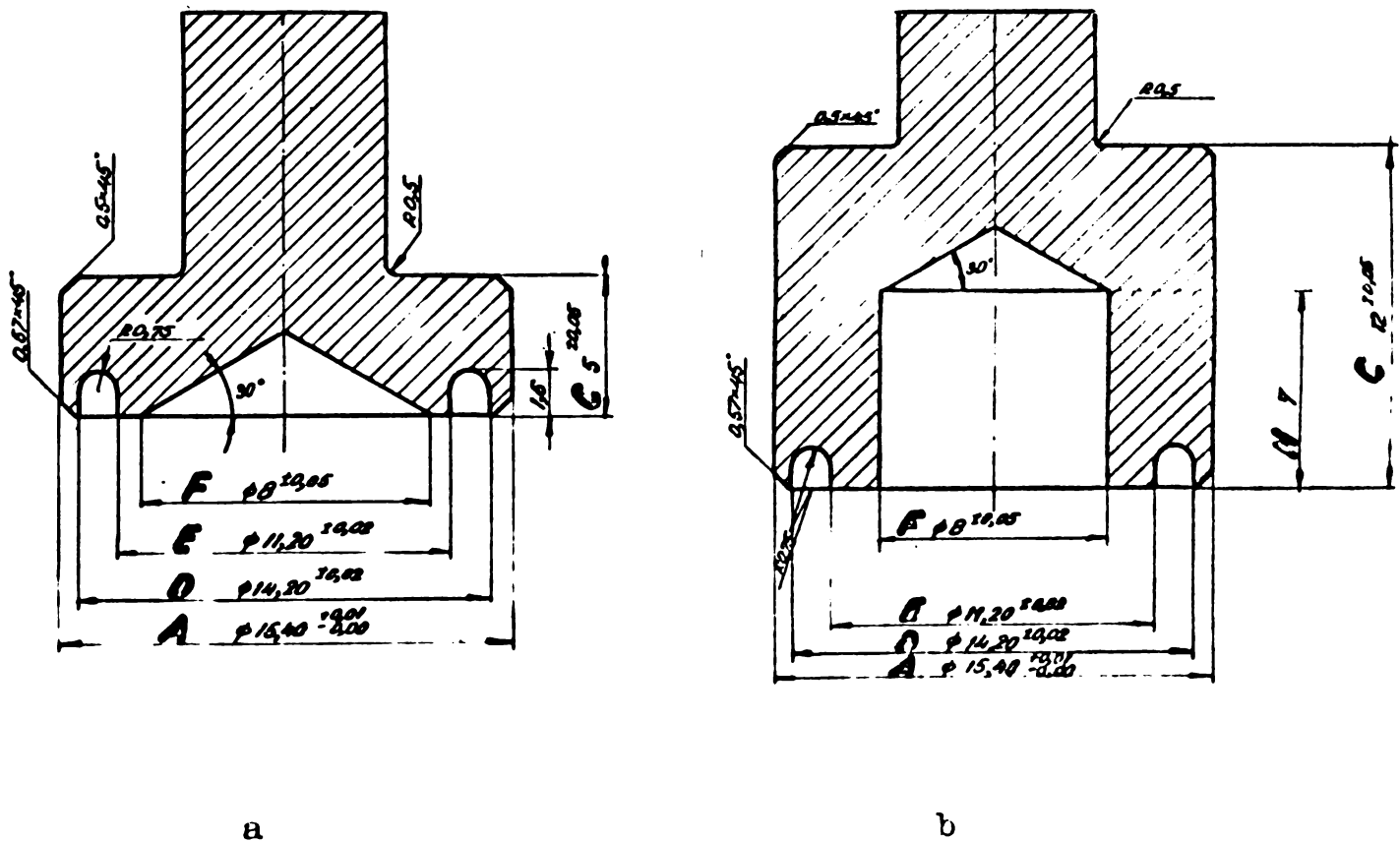


Figura 8.17. Geometria dopurilor pentru e.c.n. BR-2, pentru sudarea prin presiune.

Probele de calificare sudate cu  $I_{c.p.} = 10.000$  A și forță de sudare de 125 Kgf, cu lungimea liberă a tecii de 1,2 mm au con-

după la o zonă sudată cuprinse între 59-112%, prin mărirea forței de sudare la 150 Kgf. și păstrarea constantă a celorlalți parametri, zona sudată s-a încadrat în domeniul de 170-207% ceea ce a permis realizarea lotului de probe martor de sudare ce au fost analizate în Belgia. Procesul de sudare a fost autorizat în urma unor controale dimensionale generale, test de etanșeitate cu heliu, test de presiune la 150 atm. și test de explozie la 500-700 atm /113/ 114/.

8.2.2. Execuția elementelor pentru iradiere /101/115/.

Sudarea dopului I s-a executat după vidarea inițială a camerei de sudare la  $10^{-2}$  torr și umplerea cu argon la presiunea de 1,2 atm. După introducerea pastilelor de  $UO_2$  în teacă, sudarea dopului II s-a făcut în heliu la 1,2 atm. Pentru a asigura o puritate ridicată a gazului de umplere a elementului, operația de vidare și umplere cu heliu s-a repetat de două ori înaintea sudării dopului II. Sudarea s-a executat cu trei alternanțe (0,06 sec) și tensiunea secundară de 3,6 V. Valorile energiei și a curentului efectiv sînt prezentate în tabelul 8.2.

Tabelul 8.2.

Nr. teacă	Sudura I		Sudura II	
	W(ws)	$I_{ef}$ (KA)	W(ws)	$I_{ef}$ (KA)
368	290	9,6	280	8,8
310	290	10,0	310	9,4
363	290	9,6	280	8,8
185	297	9,9	280	8,8
258	292	9,8	295	9,2
134	235	8,2	285	9,2
110	300	10,0	280	8,8
188	245	8,2	310	9,6

8.2.3. Controlul etanșeității.

După debavurarea exterioară a elementelor executată prin strunjire, controlarea lor la etanșeitate s-a făcut cu detectorul

de scurgeri cu heliu.

Valorile măsurătorilor sînt prezentate în tabelul 8.3, toate acestea fiind inferioare valorii maxime acceptate de  $10^{-9}$  torr x litru/sec.

Tabelul 8.3.

Nr. element	Scurgere torrxl/sxlo <sup>-11</sup>	Nr. element	Scurgere torrxl/sxlo <sup>-11</sup>
368	3,24	258	2,31
310	3,61	134	1,93
363	2,24	110	2,50
185	3,08	188	2,60

#### 8.2.4. Iradierea elementelor tip, BR-2.

La iradiere s-au introdus 6 elemente combustibile care s-au iradiat la diferite grade de ardere și anume : 3 elemente la 3.000 Mwxzi/t și 3 elemente la 10.000 Mwxzi/t. Analiza rezultatelor la iradiere se referă în special la comportarea materialului nuclear, al produșilor de fisiune, etc. Din punct de vedere al sudurilor, acestea s-au comportat perfect la iradiere, nu au apărut fisuri sau corodarea zonei sudate, elementele prezentînd stabilitate mecanică și la gradul de ardere de 10.000 Mwxzi/t, grad superior valorii de 7.000 Mwxzi/t la care se schimbă combustibilul în reactorii PHWR-CANDU /138/.

#### 8.3. Sudarea elementelor combustibile nucleare tip PHWR-23.

Experiența acumulată la sudarea prin presiune în cadrul cercetărilor prezentate anterior a constituit baza lucrărilor de execuție a primelor elemente și fascicule combustibile nucleare de tip Pickering. Realizarea primelor fascicule combustibile cu utilaje și tehnologie proprie au demonstrat capabilitatea de a produce combustibil nuclear în IRNE /11/112/117/118/.

Fasciculul combustibil cu 28 de elemente, tip Pickering



este prezentat în figura 2.6. Geometria pieselor de sudat (figura 8.18) s-a conceput avînd suprafața de sudare a dopului plată și capătul tecii de sudat profilat.

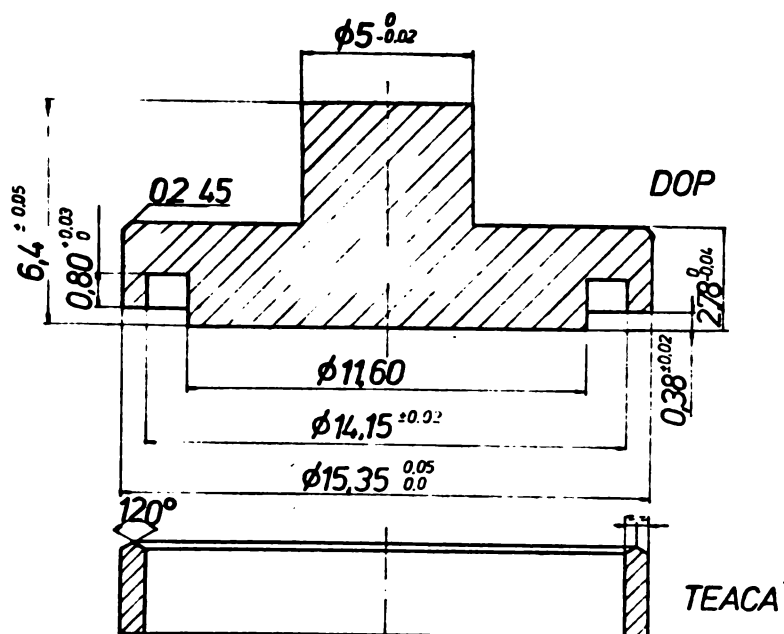


Figura 8.18. Geometria dopului și pregătirea capătului tecii pentru elementele PWR-28 Pickering.

### 8.3.1. Studiul dinamicii de mișcare a capului de sudare

Mișcarea de înaintare a capului de sudare la sudarea îmbinării dop-teacă a elementelor combustibile nucleare s-a considerat a fi utilă de studiat în urma filmării ultrarapide a procesului de sudare. Pentru obținerea unei suduri de calitate este necesar a avea un cap de sudare care să urmărească fidel scurtarea la sudare, pentru a asigura la interfața pieselor o forță constantă pe toată durata procesului de sudare. Lucrările prezentate în capitolul 8.1. au inclus în echiparea cu AMC a mașinii de sudat și determinarea inerției prin măsurarea accelerației capului de sudare. În figura 8.19 este prezentată diagrama sudurii Nr. 39 b tip 6.1. Analizînd diagrama se constată că scurtarea are loc în două etape distincte  $S_1$  și  $S_2$  corespunzătoare semialternatelor de curent de sudare și se încheie odată cu trecerea curentului. Valorile maxime ale accelerației pentru aceste două intervale sînt :

$$\begin{aligned} + a_{1\max} &= 7(g) & + a_{2\max} &= 4(g) \\ - a_{1\max} &= 12(g) & - a_{2\max} &= 5(g) \end{aligned} \quad (g) = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Aceste valori sînt determinate pentru un cap de jousă inerție cu masa de 3,7 Kg.

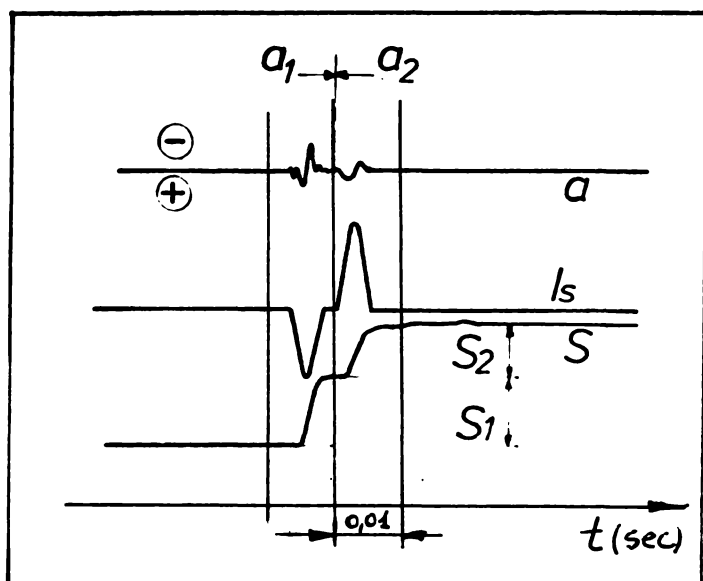


Figura 8.19. Diagrama sudării probei nr. 39 b, tip 6.1

La mașina de sudare COMECE din dotare s-a montat un accelerometru de  $\pm 10\text{ g}$  și s-au efectuat măsurători pe un lot de 56 probe de sudare dop-teacă. Distribuția valorilor măsurate este prezentată în figura 8.20. Analizând diagramele de variație ale accelerației alături de scurtarea S și de curentul de sudare  $I_s$  se constată următoarele :

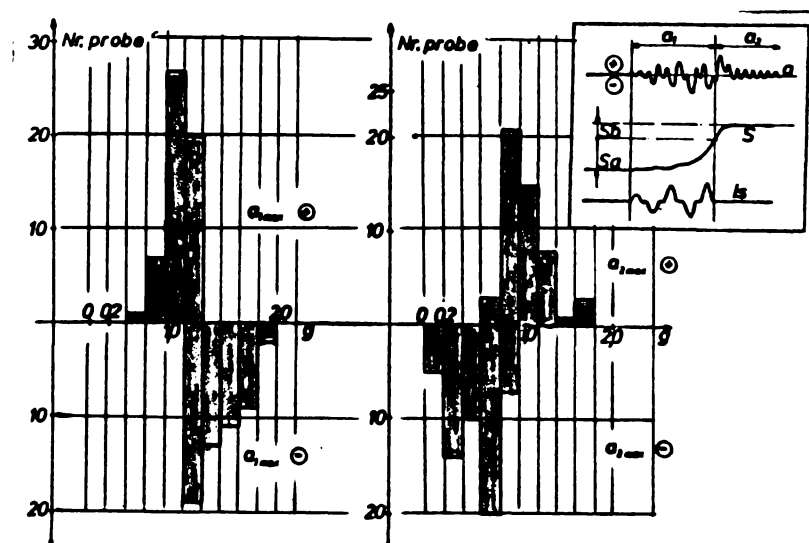


Figura 8.20. Distribuția valorilor accelerației capului de sudare pe lotul de probe executat pe mașina COMECE.

- accelerația prezintă două domenii de maxim, primul  $a_1$  corespunzător scurtării  $S_a$  în intervalul de trecere a curentului de sudare și al doilea domeniu  $a_2$  corespunzător scurtării  $S_b$  care continuă după trecerea curentului

- scurtarea la sudare nu mai poate fi raportată la fiecare semialternanță de curent de sudare, capul de sudare neputînd ur-

mări fidel scurtarea în intervalul de trecere a curentului

- accelerațiile măsurate au valorile în domeniile :

$$\begin{array}{ll} +a_1 : 0,4-1,2 \text{ (g)} & +a_2 : 0,6-1,8 \text{ (g)} \\ -a_1 : 1,0-2,0 \text{ (g)} & -a_2 : 0,0-1,0 \text{ (g)} \end{array} \quad (g) = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Aceste determinări au confirmat că mașina de sudare COMEGE are un cap lent, cu o masă mare în mișcare. Capetele de inerție mare pot să influențeze negativ calitatea îmbinării sudate prin faptul că într-un interval de timp  $\Delta t$  forța de inerție dată de produsul  $m \cdot a$  poate reduce forța de sudare la valori apropiate de zero sau chiar valori negative, în cazul în care dopul este fixat într-o mandrină electrod. Aceasta se traduce în fenomen fizic prin apariția de puncte de contact supraîncălzite care pot provoca expulzii de metal topit. Concluziile studiului inerției capului de sudare în timpul sudării sînt următoarele :

- mișcarea capului de sudare la urmărirea scurtării pieselor nu este o mișcare continuă uniformă ci o mișcare oscilantă ce se reflectă prin oscilații ale forței de sudare

- capetele de sudare de inerție mare pot influența negativ calitatea sudurii

- pentru sudarea elementelor combustibile nucleare, la care secțiunea de sudat este mică și sudarea se desfășoară în interval de maximum 0,02-0,08 sec. se recomandă mașini de sudat cu capete de mică inerție pentru urmărirea fidelă a scurtării pieselor în timpul sudării.

### 8.3.2. Omologarea procesului de sudare pentru c.c.n.- PHWR-28.

Pentru autorizarea execuției primelor fascicule combustibile cu 28 de elemente, s-au executat un număr de 50 probe sudate cu parametrii stabiliți pe baza criteriului "zonă nesudată". Parametrii cu care s-au executat probele sînt următorii:

- forța de sudare 175 Kgf
- tensiunea secundară 3,2 V
- număr de cicli de sudare 4 (0,08 sec)

Parametrii de sudare măsurați au fost energia de sudare  $W$ , curentul de sudare  $I$  și scurtarea la sudare  $S$ . În figura 8.21 sînt prezentate diagramele de distribuție funcții de numărul de

probe a celor trei parametri. Se observă că parametrii ce influențează direct procesul de sudare I și W, au o împrăștiere minimă, deci instalația de sudare asigură o reproductibilitate bună a parametrilor stabiliți inițial. Parametrul rezultat S, scurtarea la sudare este distribuit în intervalul de 1,10-1,25 mm cu valoarea nominală de  $1,18 \pm 0,08$  mm.

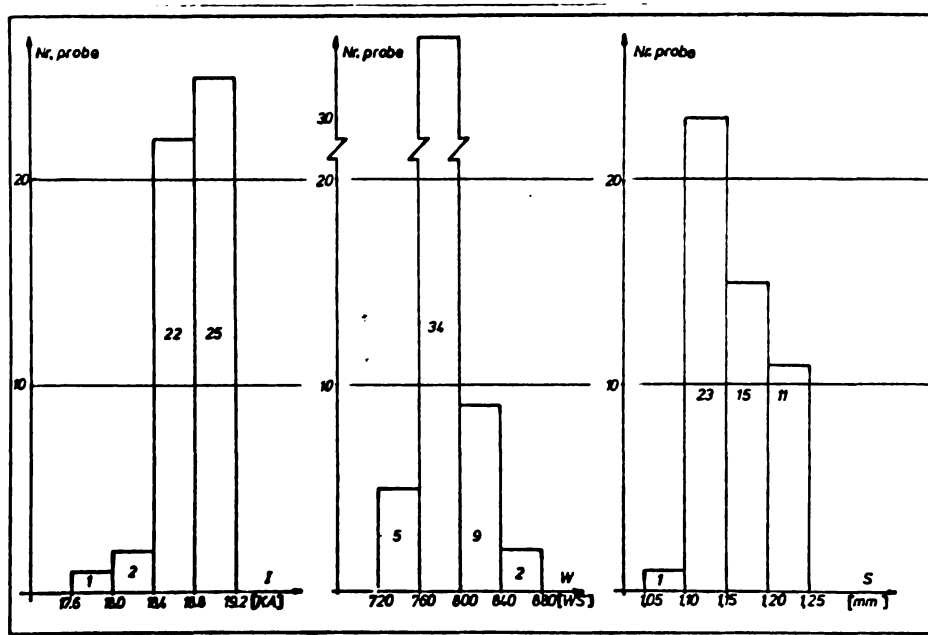


Figura 8.21. Distribuția I, W și S la sudarea lotului de probe pentru omologarea procesului de sudare.

Sudurile executate au fost analizate metalografic având drept criteriu de acceptanță zona nesudată "a" și valoarea "m", definite conform figurii 8.22.

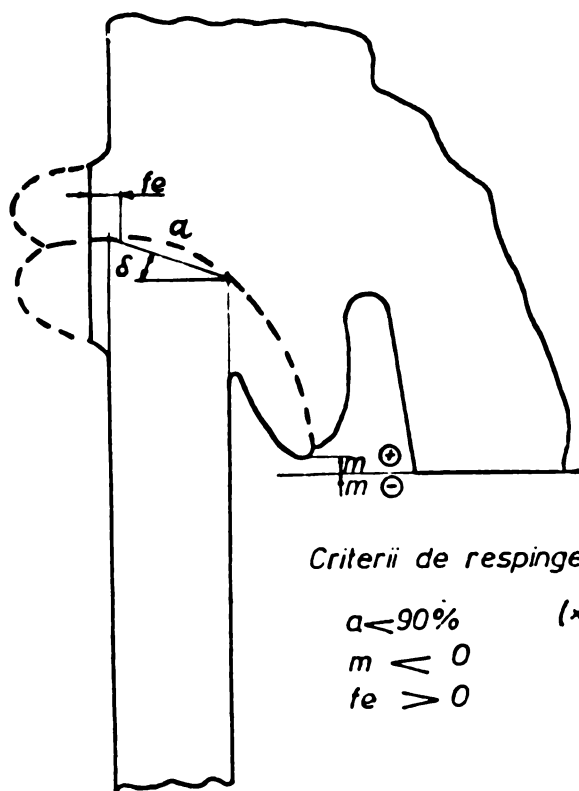


Figura 8.22. Definirea mărimilor "a", "m" și "fe" la controlul metalografic al sudurilor dop-teacă a e.e.n.

Criterii de respingere

$$\begin{aligned}
 a &< 90\% && (\times 128) \\
 m &< 0 \\
 fe &> 0
 \end{aligned}$$

Față de criteriul "zonă nesudată" utilizat la elementele tip RR-2 noul criteriu este mai restrictiv, referindu-se doar la zona sudată corespunzătoare secțiunii tecii. Condiția suplimentară de  $m > 0$  a fost determinată de faptul că bavura interioară nu trebuie să depășească fundul dopului pentru ca pastilele de  $UO_2$  să fie susținute de dop, deci de o suprafață mare și nu pe bavură care ar putea cauza ciobirea pastilelor. Probele au fost debavurate exterior și studiate metalografic. Mărimea "a" este definită ca raportul dintre lungimea arcului determinat de prelungirea peretelui tecii cu interfața dintre materialul dopului și a tecii, din care se scade valoarea zonei nesudate și grosimea de perete a tecii, raportul fiind exprimat în procente. Concluziile examenului metalografic sînt următoarele :

- cu excepția probei 0545 toată seria a îndeplinit condițiile de calitate

- proba 0545 prezintă pe una din cele două imagini o valoare a parametrului "a" de 76%. Analiza contraprobei 0545-1 prezintă însă o sudură bună cu raportul  $a=109\%$ . În conformitate cu normele de acceptare elaborate în cadrul Programului de Asigurare a Calității (PAC) și cu normele MIL-STD-105-D privind sistemul de control prin eșantionare, lotul de omologare a fost acceptat ca bun.

În urma examenului metalografic corelat cu analiza parametrilor de sudare, se consideră că domeniul parametrilor de sudare pentru obținerea sudurilor de calitate este :

- curent de sudare : 18.400-19.200 A

- energia : 720-840 Ws

Derivat din acești parametri, rezultă o scurtare la sudare de 1,10-1,25 mm.

Pentru execuția primelor trei fascicule combustibile tip PHWR-28 s-au efectuat un număr de 168 suduri dop-teacă și 18 suduri martor analizate metalografic, câte trei la începutul și sfîrșitul sudării celor 28 de elemente componente ale unui fascicul. Toate probele martor au îndeplinit criteriile de acceptanță impuse avînd valoarea "a"  $> 100\%$ , patru probe avînd  $90\% < a < 100\%$ .

După operația de sudare a dopurilor, elementele combustibile nucleare au fost debavurate și profilate la capăt conform desenului din figura 8.23 în vederea asamblării lor în fascicul.

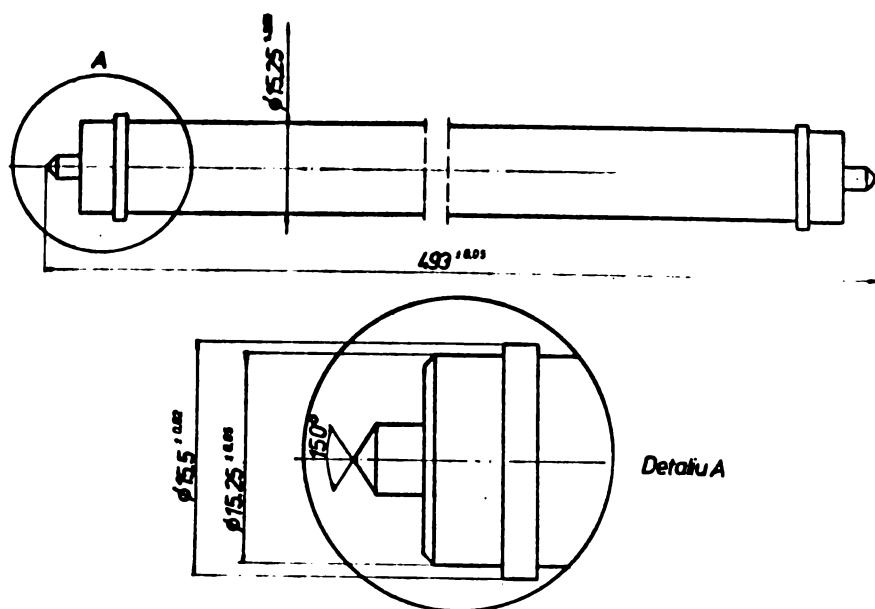


Figura 8.23. Geometria de prelucrare a capetelor e.c.n. în vederea asamblării în f.c.n.

#### 8.4. Controlul îmbinării sudate dop-teacă pentru e.c.n. PHWR-28.

##### 8.4.1. Controlul de etanșeitate cu heliu.

Controlul de etanșeitate s-a executat cu detectorul de scurgeri cu heliu cu domeniul de  $10^{-11}$  -  $5 \times 10^{-4}$  torr x l/sec și sensibilitatea de  $5 \times 10^{-10}$  torr x l/sec. După calibrarea aparatului cu etalonul de scurgere de  $3,25 \times 10^{-8}$  torr x l/sec, au fost controlate individual elementele sudate. Valorile măsurate sînt cuprinse în domeniul  $10^{-9}$  -  $5,7 \times 10^{-9}$  torr x l/sec, valori inferioare scăpării etalon, elementele fiind acceptate pentru asamblarea în fascicule.

##### 8.4.2. Controlul cu raze X.

Controlul cu raze X s-a executat pentru a examina poziția pastilelor de  $UO_2$  în teacă, valoarea axială a volumului liber și integritatea pastilelor de  $UO_2$  în urma operațiilor efectuate pe elementele combustibile. Din punct de vedere al controlului sudurii, singura determinare posibilă este cea a valorii "m" (vezi figura 8.22), cu o precizie de  $\pm 0,2$  mm.

##### 8.4.3. Contaminarea superficială $\alpha$ .

La încărcarea pastilelor de  $UO_2$  în teacă și în timpul vidării camerei de sudare poate apare o contaminare a suprafeței

e.c.n. cu particule microscopice de  $UO_2$ , emițători de radiație  $\alpha$ . Din considerente de ordin nuclear, impuse circuitului primar al reactorului, se limitează contaminarea superficială  $\alpha$  pe fiecare e.c.n. la valoarea de 2,2 dezintegrări/minut  $\times$   $cm^2$ . Controlul elementelor executate au dat valori cuprinse între 1,4-2,08 dezintegrări/minut  $\times$   $cm^2$ , inferioare valorii maxime admise.

#### 8.4.4. Rezistența la coroziune a sudurii dop-teacă.

Determinarea rezistenței la coroziune a sudurii dop-teacă s-a executat pe probe martor degresate, decapate acid și cântărite, prin test de autoclavizare. Autoclavizarea s-a făcut în vapori de apă la 100 atm. și 400°C timp de 72 ore. Prin autoclavizare s-a determinat variația în greutate a probelor și s-a analizat macro și micrografic stratul de oxid format. Rezultatele acestui control au fost următoarele :

- media variației în greutate a probelor autoclavizate: 19,24 mg/dm<sup>2</sup>
- strat de oxid negru, uniform, continuu și aderent
- stratul de oxid își păstrează aspectul și grosimea și în zonele afectate termic.

Legat de procesul de sudare dop-teacă în urma controlului prin autoclavizare se consideră că în tehnologia de sudare prin presiune, creerea unei atmosfere controlate în camera de sudare prin vidare la  $10^{-3}$  torr și umplere cu argon la 1,2 atm. asigură o protecție suficientă, conservând proprietățile la coroziune a aliajului de zirconiu în zona sudată.

#### 8.5. Sudarea în puncte de asamblare a e.c.n. în fascicul combustibil nuclear PHWR-28.

Fasciculele de tip CANDU sînt de tip autoportant, asamblarea e.c.n. făcîndu-se prin sudare în puncte în relief pe două grile de capăt. Distribuția e.c.n. în raport cu grile este prezentată în figura 7.9., sudarea executîndu-se cu un cap special cu electrozi concentrici (figura 7.7). Criteriul de acceptare al sudurilor de asamblare dop-grilă pentru acest tip de fascicul l-a constituit examenul metalografic al zonei sudate, care trebuia să aibă un

punct de minimum 2,2 mm diametru, iar zonele nesudate, inclusiv porii să nu reprezinte mai mult de 10%, adică 0,22 mm lungime totală. Pe baza acestui criteriu, s-a examinat un lot de probe sudate, fiind determinate pentru parametrii de lucru următoarele domenii în care se realizează o sudură de calitate :

- forța de sudare pe electrodul central : 40 Kgf
- forța de sudare pe electrodul exterior: 120 Kgf
- curentul efectiv de sudare : 3.200-3.700 A
- număr de perioade de sudare : 7

Pentru protecția locală a zonei de sudat s-a folosit argon în curgere liberă cu debitul de 9 l/min, evitând astfel oxidarea locală a zonelor încălzite în timpul sudării. Zona de contact a electrodului exterior cu dopul a fost placată cu aliaj de cupru-argint 70% pentru a înlătura urmele de cupru ce pot apărea pe dop în zona de contact cu electrodul.

### 8.6. Caracteristicile geometrice ale electrozilor la sudarea dop-teacă /119/.

Pentru confecționarea electrozilor s-a utilizat <sup>aliajul</sup> Mallory 328 tip Cu-Cr-Zr cu o duritate Rockwell B de 70-75 unități și o conductibilitate electrică de 80% în raport cu cuprul.

Mandrina electrod care asigură poziționarea și aducția de curent în teaca 1 (figura 8.24) este compusă din patru bucăți 2

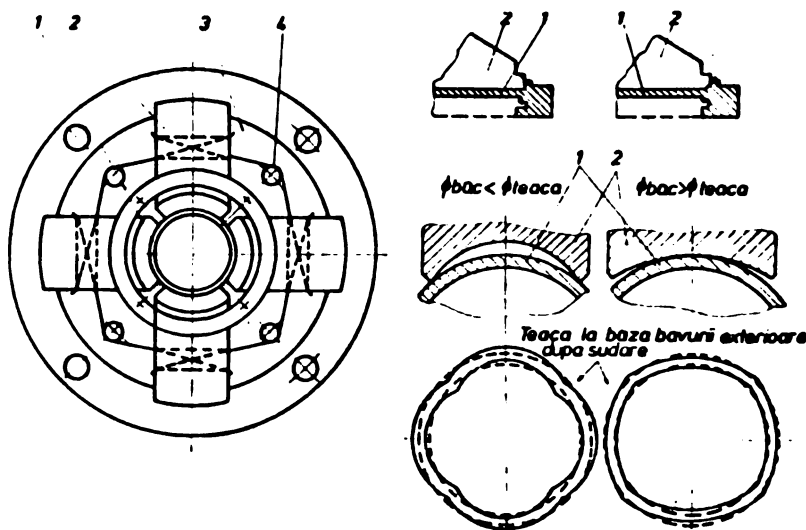


Figura 8.24. Mandrina electrod de prindere a tecii la sudarea dop-teacă.



SECRET

montate în piesa suport 3. Bacurile au o poziție normal deschisă datorită unor resorturi 4, strângerea mandrinii pe teacă făcându-se pe con cu acționare pneumatică. În urma studiului geometriei bacurilor corelat cu deformațiile maxime admise ale tecii în zona adiacentă sudurii, s-a determinat ca o condiție de prelucrare a bacurilor relația :  $\varnothing_{bac} = \varnothing_{max.teacă}$ . În cazul în care  $\varnothing_{bac}$  este mai mic decât  $\varnothing_{teacă}$ , teaca este sollicitată în zona de vîrf a bacurilor, ceea ce duce la deformări locale ale tecii în cursul sudării precum și la expulzii de metal topit în cordonul sudat. Referitor la distanța între bacuri în poziție strînse pe teacă, aceasta trebuie să fie de max. 0,3 mm pentru a evita formarea unor amprente pe cordonul sudat în care probabilitatea de apariție a defectelor este mare. O altă caracteristică de prelucrare a bacurilor este șanfrenarea frontală în zona de formare a bavurii la un unghi de  $45^\circ$  ceea ce asigură formarea unei bavuri exterioare racordate la teacă. Bacurile neșanfrenate pe lîngă faptul că provoacă o trecere în unghi drept de la teacă la bavură, pot genera și defecte de scînteiere locală în această zonă. Funcție de grosimea peretelui tecii de zircaloy șanfrenul se execută pe o adîncime de 0,2-0,5 mm.

Electrodul port-dop, figura 8.25 are o construcție mult mai simplă, fiind compus din electrodul propriu zis 3 în care dopul 1

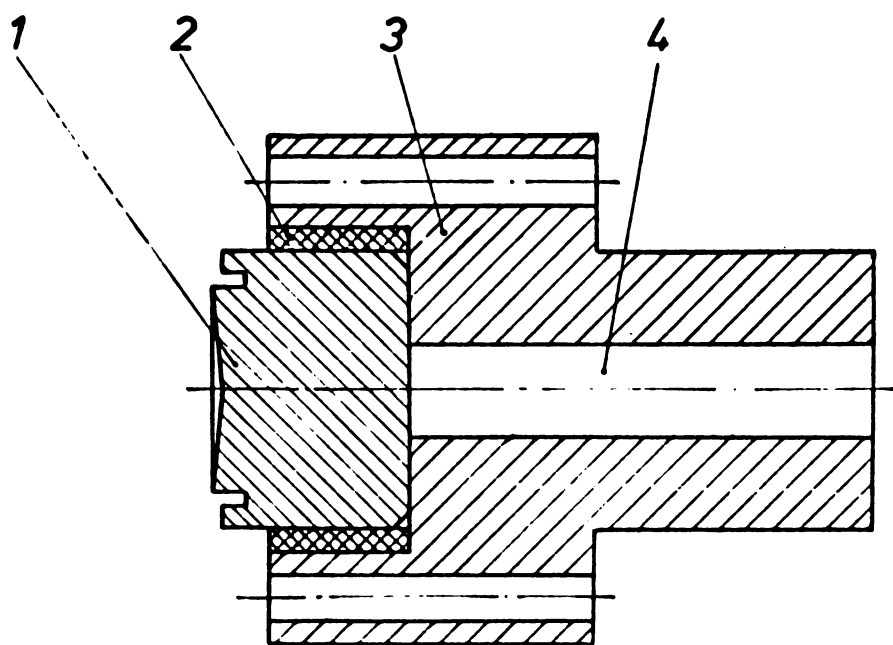


Figura 8.25. Electro-  
dul port-dop la su-  
darea dop-teacă.

este menținut în poziție axială prin vidare realizată prin ori-

ficiul 4. Pentru a evita căile parazite de curent pe suprafața laterală a dopului 1, electrodul este prevăzut cu o bușe de material izolant 2. Electrocul port-dop trebuie să satisfacă următoarele condiții dimensionale :

- dopul să intre alunecător în bușea de material izolant pentru a asigura o poziționare corectă axială în raport cu teaca.

- dopul să rămână în exteriorul electrocului cu circa 20-25% din lungimea sa pentru a permite formarea liberă a bavurii exterioare.

#### 8.7. Considerații asupra zonei nesudate la îmbinarea dop-teacă./120/.

Procesul de formare al îmbinării sudate prin presiune în stare solidă se desfășoară în felul următor :

- sub acțiunea forței de sudare, punctele de vîrf ale rugozității pieselor vin în contact fizic, distrugînd pelicula de oxid. Numărul acestor puncte de contact crește la solicitări în domeniul plastic

- numărul punctelor în contact rămîne relativ constant atunci cînd sarcina aplicată intră în domeniul plastic, însă suprafața lor crește, în acest fel rezistența de contact în zona respectivă scade.

- la valoare constantă a densității de curent efectul Joule datorită scăderii rezistenței de contact scade și temperatura suprafețelor în contact nu atinge valorile necesare realizării unei îmbinări sudate corespunzătoare. Apariția unor zone nesudate este deci favorizată de creerea locală a unei suprafețe "rece" la nivelul zonei de interfață dop-teacă datorită aplicării unor presiuni mari și curent de intensitate mică în raport cu valoarea forței de sudare. Imperfecțiunile geometrice ale suprafețelor în contact și cele de poziționare reciprocă a pieselor pot crea o distribuție diferențială a presiunii pe interfață. La aceasta se adaugă și variația de forță datorită inerției capului de sudare.

Pe de altă parte intensitatea curentului poate fi reglată numai la nivel global pentru întreaga sudură. Distribuția densității de curent în diferite zone ale interfeței depinde de fac-

tori aleatorii menționați mai sus la care se adaugă și starea de curățenie a suprafețelor în contact. Prin optimizarea condițiilor de sudare se poate reduce la minim riscul apariției de zone nesudate, optimizare care trebuie să țină cont însă de faptul că printr-o încălzire excesivă pot apărea zone supraîncălzite care conduc la expulzii de metal topit.

Zona nesudată apare la controlul metalografic al îmbinării la mărimi de 20-200 ori, funcție de dimensiunile acestuia. În figura 8.26 este prezentată o metalografie a unei îmbinări dop-teacă cu zonă nesudată în bavuri și în zona adiacentă tecii. Analizând în detaliu această zonă la microscopul electronic (figura 8.27) se constată următoarele:



Figura 8.26. Imbinare sudată dop-teacă cu "zonă nesudată" în bavuri și zona adiacentă tecii. x50

- zona nesudată vizibilă la mărimi de 20-50 ori, ca o linie neagră mai mult sau mai puțin continuă, este o zonă cu micropori

- forma microporilor este sferică sau eliptică (figura 8.27 b-c) cu dimensiuni de ordinul zecimilor de micron, distanța dintre aceștia fiind de ordinul micronilor (figura 8.27 d)

- zona nesudată este alcătuită în general din 5-10% pori și 90-95% zonă sudată

Având în vedere cele prezentate mai sus se consideră că zona nesudată ce apare în regiunea adiacentă tecii nu trebuie con-

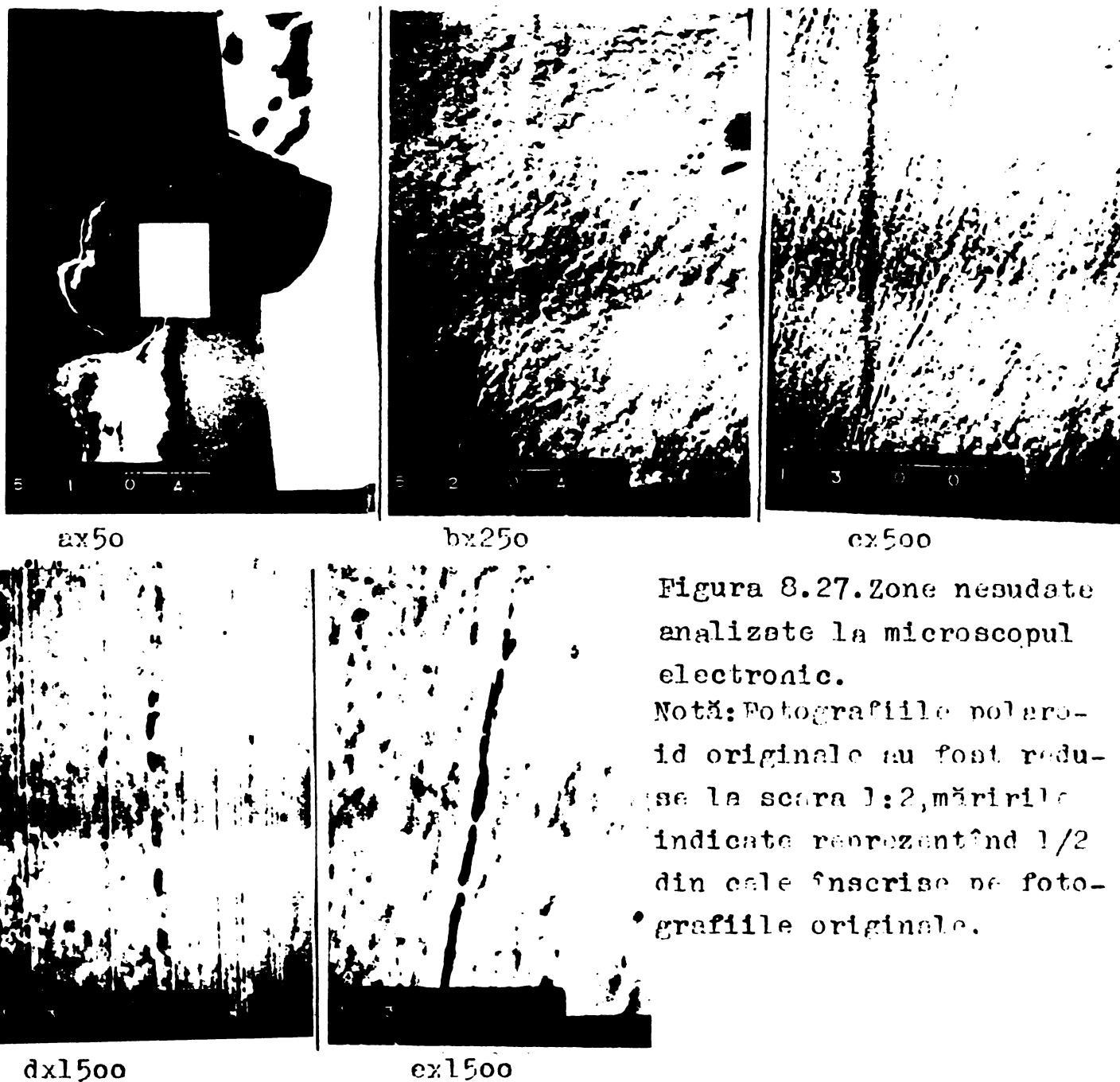


Figura 8.27. Zone nesudate analizate la microscopul electronic.

Notă: Fotografiiile polero-  
id originale au fost redu-  
se la scara 1:2, măririle  
indicate reprezentând 1/2  
din cele înscrise pe foto-  
grafiile originale.

siderată ca un defect periculos chiar la valoarea de 25%, ceea ce corespunde la  $a=75\%$ , cu excepția cazului în care este formată din pori eliptici de dimensiuni foarte mari (figura 8.27 e). În cazul în care după înlăturarea bavurii exterioare zona nesudată comunică cu exteriorul, indiferent de mărimea și tipul porilor din care este formată, se consideră ca defect periculos, în special din cauza fenomenului de coroziune locală care este favorizată în această zonă.

### 8.8. Concluzii

Lucrările de cercetare pentru stabilirea tehnologiei de sudare prin presiune a aliajelor de zirconiu au cuprins un mare număr de probe, circa 8.000, studiindu-se influența parametrilor de lucru, a geometriei îmbinărilor, a pregătirii suprafețelor. De-

finitivarea tehnologiilor de lucru pentru cele trei tipuri de tuburi de zircaloy prezentate s-a făcut ținând cont de rezultatele controalelor distructive și nedistructive specifice.

Se remarcă studiul influenței caracteristicilor geometrice a electrozilor asupra calității îmbinărilor sudate precum studiul dinamicii de mișcare a capului de sudare și considerațiile asupra zonei nesudate la îmbinarea dop-teacă.

Elementele combustibile nucleare experimentale testate în reactorul BR-2 Belgia s-au comportat perfect din punct de vedere îmbinări sudate dop-teacă. Ansamblul lucrărilor prezentate în sinteză în acest capitol au permis elaborarea tehnologiei de sudare dop-teacă a elementelor combustibile nucleare tip PHWR pentru centrale nucleare-electrice de 660 MWe.

SECRET

## 9. APLICAREA SUDARII PRIN PRESIUNE IN FABRICATIA ELEMENTELOR COMBUSTIBILE NUCLEARE PENTRU CENTRALELE ELECTRICE NUCLEARE DIN RSR.

Prin acordul încheiat cu AECL-Canada privind colaborarea în domeniul utilizării energiei nucleare în scopuri pașnice, în țara noastră se vor realiza centrale nucleare electrice tip CANDU-660 (figura 9.1), centrale din filiera uraniu natural-apă grea. Reactorul centralei CANDU-660, de tip calandria (figura 9.2) este alcătuit din 380 tuburi de forță orizontale în care se introduc 4.560 fascicule combustibile nucleare cu 37 de elemente combustibile.

Fasciculul combustibil (figura 9.3) este de tip autoportant. Elementele combustibile 2 de pe cercul exterior au brațate la trei nivele patinele 1 care asigură ghidarea și distanțarea fasciculului în tubul de forță 6. Elementele sînt prevăzute la nivelul median cu distanțieri 5 brazați care asigură păstrarea distanței între elemente în timpul funcționării în reactor. Fasciculul este asamblat pe două grile de capăt 3 prin sudare în puncte de dopurile elementelor combustibile. Energia dezvoltată de un fascicul combustibil este echivalentă cu cea realizată de 450 t cărbune sau  $325 \text{ m}^3$  de petrol /32/. Caracteristicile tehnice ale fasciculului combustibil sînt următoarele /32/ :

- lungime : 495,3 mm
  - diametru : 102,49 mm
  - număr de elemente : 37
  - material de întecuire : Zy-4
  - diametrul exterior al tecii : 13.08 mm
  - grosimea peretelui tecii : 0,38 mm
  - material combustibil : pastile de  $\text{UO}_2$  sinterizate
  - cantitatea de U echivalentă : 18,5 Kg
  - greutate totală a fasciculului : 23 Kg
  - puterea nominală : 800 Kw
  - grad de ardere : 180 Mwh/Kg uraniu
- Sarcina realizării fasciculelor combustibile nucleare

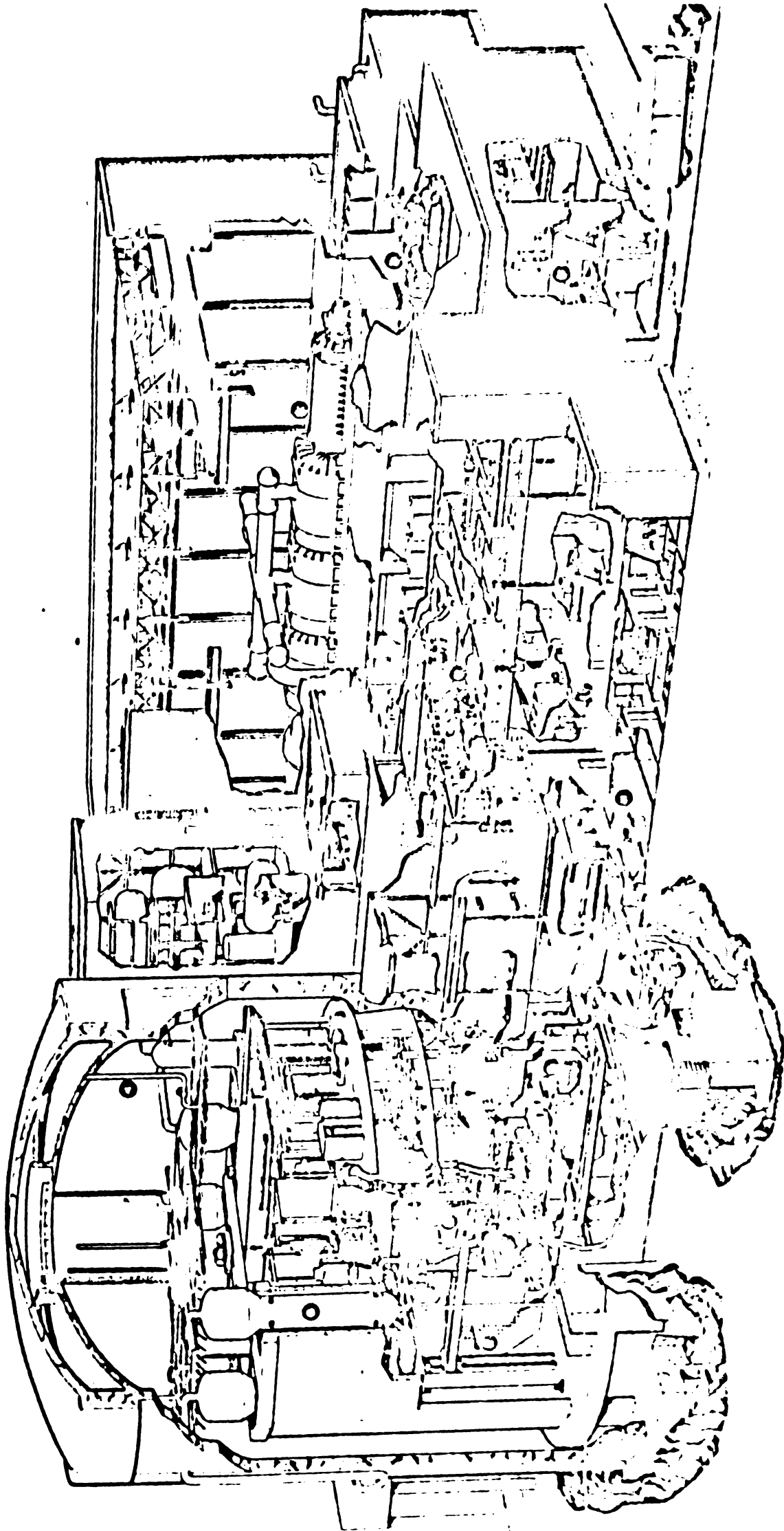


Figura 9.1. Centrala nucleară electrică de 660 Mwe /138/

1. Reactorul nuclear.
2. Mașina de încărcat;
3. Generator de abur;
4. Sistem de inundare;
5. Stocare combustibil nou;
6. Spațiu de manipulare a combustibilului ars;
7. Controlul și stocare combust.ars.
8. Introducere și control;
9. Camera centrală de comarță;
10. Atelier mecanic;
11. Instalații de tratare apă;
12. Turbina și generatorul.

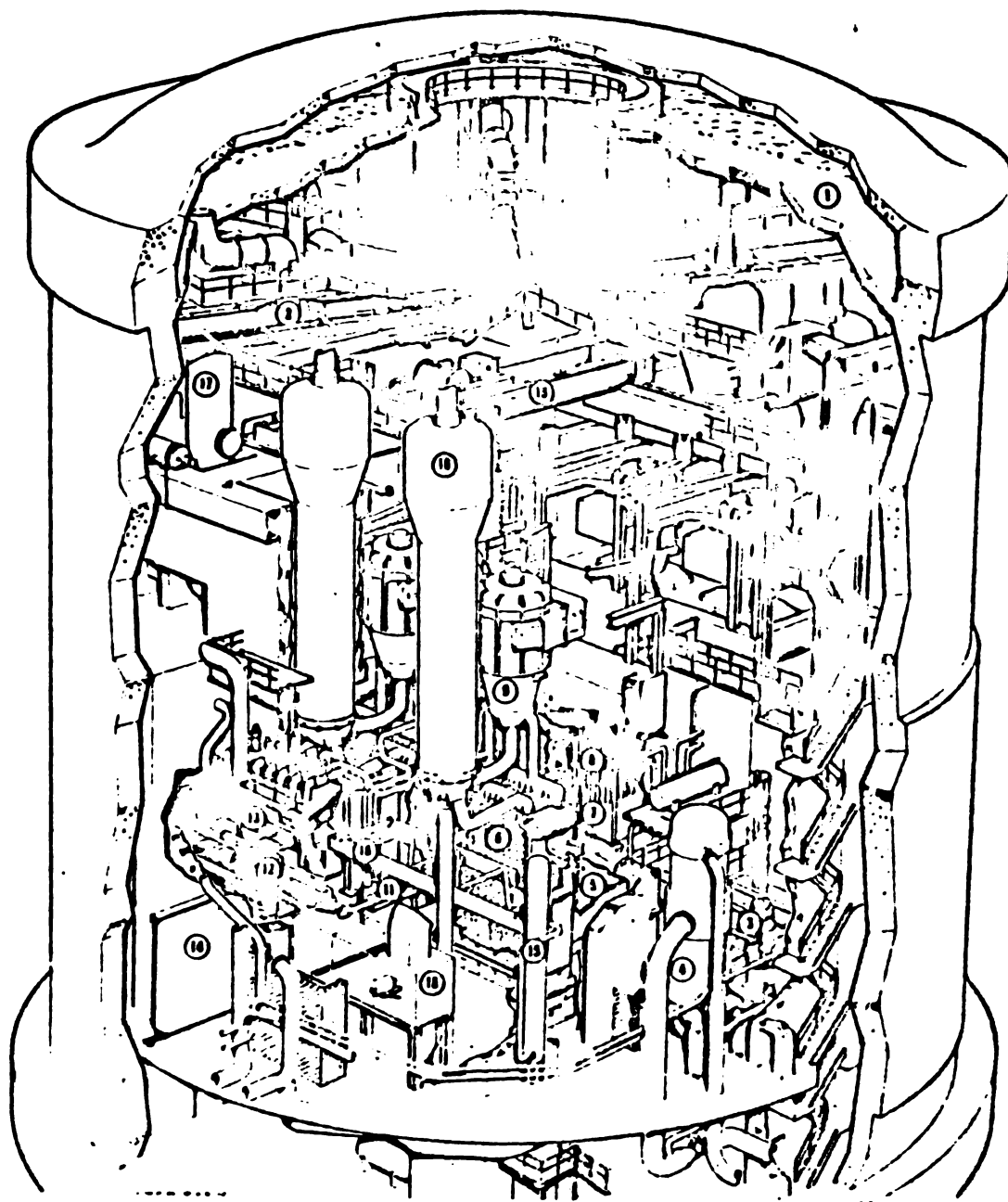


Figura 9.2. Ansamblul reactorului CANDU-660,  
secțiune./138/.

1.tanc de inundare, 2.valvă de inundare, 3.pompele de moderator,  
4.schimbător de căldură, 5.cameră de intrare combustibil, 6.fază  
reactorului, 7.reactore, 8.mecanismul de control al reactivității,



9.pompele circuitului primar,10.podul mașinii de încărcat,11. capul mașinii de încărcat,12.calca de rulare a mașinii de încărcat,13.camera de întreținere a mașinii de încărcat,14.ușa camerei de întreținere,15.ieșire apă de răcire,16.tanc de răcire,17.presurizor,18.generator de abur,19.pod rulant.

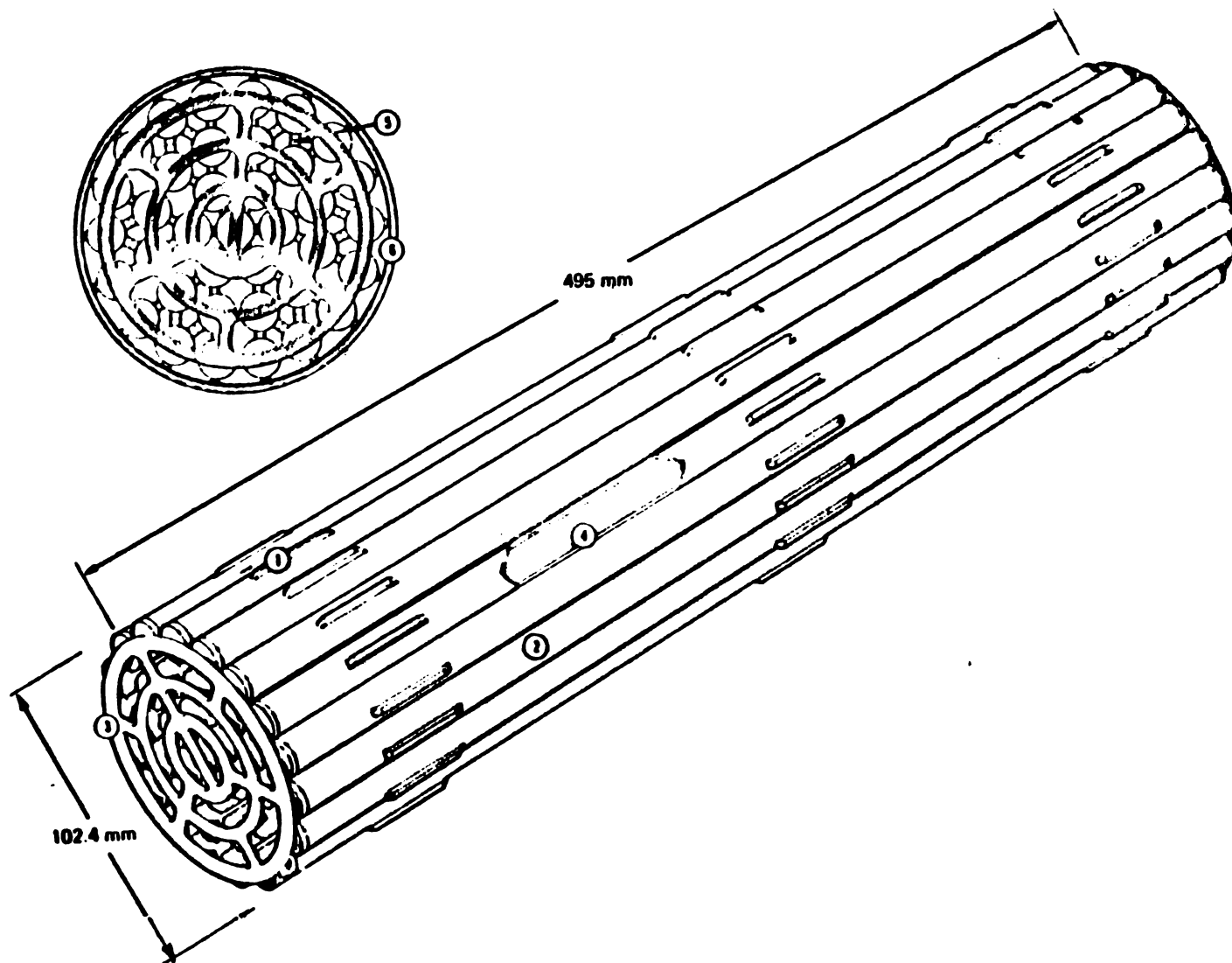


Figura 9.3. Fasciculul combustibil nuclear pentru centrala CANDU-660 /121/.

1.patine,2.element combustibil,3.grilă de capăt,4.coloană de pastile de  $UO_2$  sinterizat,5.distanțieri,6.tub de forță.

a revenit Institutului de Reactori Nucleari Energetici-Pitești, care a trecut de la faza de cercetare tehnologică de laborator la cea de nivel pilot și se va trece în scurt timp la fabricația de serie a f.c.n.pentru prima centrală electrică nucleară.In cadrul

Programului de Combustibil Nuclear s-a elaborat documentația de fabricație la nivel pilot a fasciculelor care cuprinde și PAC, ceea ce constituie o premieră națională. Experiența tehnologică acumulată a permis elaborarea tehnologiei de fabricație și a documentației de omologare a elementelor combustibile pentru reactorii de putere în aprilie 1979 /122/ și a omologării acestora în mai 1979. Pe baza acestei documentații se va realiza în IRNE Secția de Producție Elemente Combustibile.

Prezentul capitol prezintă o sinteză a tehnologiei de fabricație a fasciculelor combustibile pentru centrala de 660 Mwc, avînd la bază lucrările experimentale pe linia pilot de fabricație /123/124/125/126/.

### 9.1. Pregătirea pieselor de structură.

Laminatale din aliaj de zirconiu tip zircaloy-4 pentru piesele de structură ale fasciculului se împart în trei categorii și anume :

- țevi  $\varnothing$  13,08, grosime de perete 0,38 mm
- bară  $\varnothing$  14 mm
- table  $\neq$  0,8 - 2 mm

În conformitate cu PAC se execută controlul de recepție a acestora care cuprinde următoarele categorii de operații de control :

- mecanice : tracțiune la cald și la rece, explozie la cald și la rece și fluaaj pentru țevi
- chimice : control compoziție chimică, control contaminare cu  $O_2$ ,  $H_2$  și N
- metalografice : mărime grăunte, orientare hidruri, textură, coroziune
- dimensionale : rugozitate, grosime, ovalitate și grosime perete pentru tuburi
- control cu ultrasunete : defectoscopie și dimensional pentru țevi și defectoscopie pentru bare

Semifabricatele care întrunesc condițiile de acceptanță în urma acestor teste sînt introduse în fabricație astfel :

- bară : prin strunjire automată se realizează dopurile

de închidere a tecilor încărcate cu pastile de  $UO_2$

- tablă : prin ștanțare fină se realizează patinele, distanțierii și grilele de capăt

- țevile : prin debitare pe mașină specială de retezat /127/ se aduc la cota tehnologică pentru realizarea elementelor combustibile

Piese de structură astfel obținute se controlează dimensional, după care se degresează în baie cu ultrasunete în amestec tenar alcool-toluen-acetonă. Dopurile, patinele, distanțierii și grilele sînt supuse unei decapări acide în soluție floro-nitrică cu 45%  $HNO_3$ , 5%  $HF$  și 50  $H_2O$  demineralizată. Decaparea se execută în scopul îndepărtării unui strat superficial de material afectat de prelucrările mecanice pentru asigurarea calității operațiilor tehnologice ulterioare. În urma acestor operații tecile, dopurile și grilele sînt pregătite pentru intrarea în fluxul tehnologic de fabricație a fasciculelor combustibile. Patinele și distanțierii pe suprafața de contact cu teaca sînt depuși cu un strat de beriliu metalic în vederea operației de brazare a acestora pe teci. Depunerea beriliului se face prin evaporare în vid la  $5 \times 10^{-5}$  torr. Prin această tehnologie se depune o peliculă de beriliu cu grosimea de 10 microni.

## 9.2. Pastile de $UO_2$

Materialul combustibil nuclear utilizat este uraniul natural care conține circa 0,7%  $U_{235}$ , material fisionabil. În fluxul de fabricație al fasciculelor combustibile nucleare intră sub formă de coloane de pastile de  $UO_2$  sinterizate. Ciclul de fabricație a pastilelor cuprinde o parte de chimie care conduce la extracția pulberii de  $UO_2$  pornind de la concentrat de uranil. Din pulbere, prin tehnica metalurgiei pulberilor se obțin pastile sinterizate din care după operația de rectificare-spălare-uscare și controale dimensionale sînt formate coloane de pastile de 480 mm lungime cu care se încarcă tecile de zircaloy. Pastilele de  $UO_2$  au următoarele caracteristici :

- diametrul :  $12,116^{+0,01}$  mm.
- lungime :  $16,40^{+0,08}$  mm
- densitate : 10,45-10,75  $g/cm^3$

- raport uraniu/oxigen : 2,00-2,015

### 9.3. Execuția elementelor combustibile

#### 9.3.1. Sudarea de prindere a patinelor și distanțierilor pe teci.

Pe elementele cercului exterior, în număr de 18 bucăți, se fixează pe o generație trei patine în zonele de capăt și în zona mediană a tecii. Aceste patine au rolul de ghidare a fasciculului în canalul de forță al reactorului. Toate elementele ce intră în alcătuirea unui fascicul, în zona mediană a tecilor au fixate distanțeri la unghiuri determinate în așa fel încât să asigure distanțarea unui element față de elementele înconjurătoare, eliminând astfel riscul de ajungere în contact fizic a două elemente învecinate în timpul funcționării în reactor. Fixarea patinelor și distanțierilor pe teci se face prin sudare în puncte în relief prin descărcare capacitivă. Distribuția patinelor și distanțierilor pe teci este prezentată în figura 9.4. funcție de tipul e.c.n.

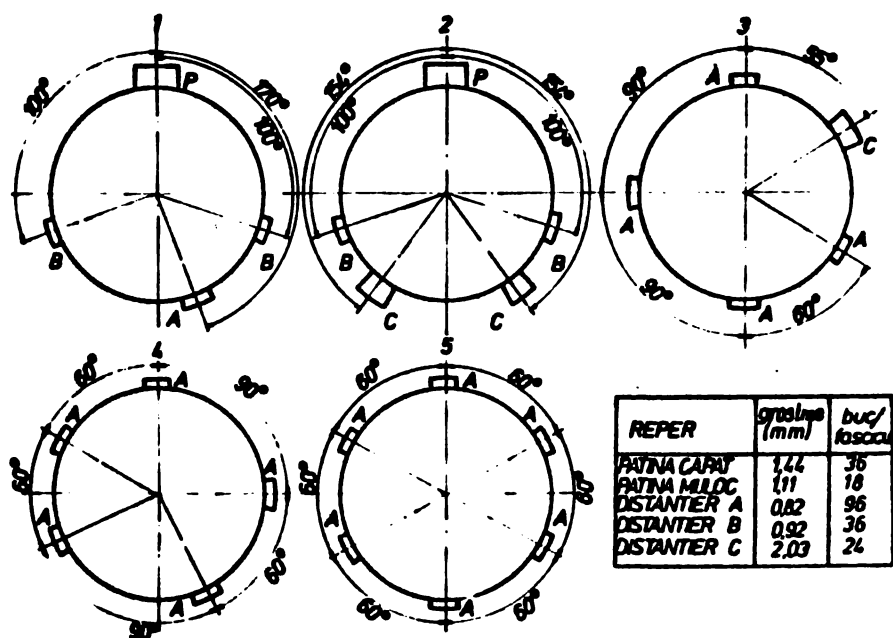


Figura 9.4. Distribuția patinelor și distanțierilor funcție de tipul e.c.n.  
1-2 e.c.n. pentru cercul exterior "a"  
3 e.c.n. pentru cercul interior "b"  
4 e.c.n. pentru cercul interior "c"  
5 e.c.n. central

Parametrii de sudare funcție de tipul piesei de sudat sînt prezentați în tabelul 9.1.

Scopul acestei operații tehnologice este de a asigura

Tabelul 9.1.

Tipul piesei	Forțe de sudare Kgf	Energia Wxs
distanțier A	5	60
distanțier B	5	70
distanțier C	6	100
patină capăt	6	120
patină mijloc	6	100

o fixare mecanică a pieselor pe teacă prin care acestea să rămână în poziție la operația de brazare. Avînd în vedere acest considerent, sudarea de prindere nu pune probleme legate de sudarea în sine. Se utilizează o protecție locală cu argon în curgere liberă care înlătură oxidarea locală a zonelor de formare a punctelor de sudură oxidare care influențează negativ calitatea brazurilor obținute.

### 9.3.2. Brazarea patinelor și distanțierilor pe teci.

Operația de brazare se desfășoară într-o incintă vidată la  $10^{-5}$  torr unde tecile cu patine și distanțieri fixați sînt poziționate într-un dispozitiv în interiorul inductorului. Încălzirea se execută cu curenți de înaltă frecvență (1MHz). Ciclul de încălzire durează 40-60 sec, avînd temperatura de palier în domeniul 1000-1.100°C, valoare la care se formează eutecticul Zr-Ber 5%. În perioada de încălzire, cea de menținere și începutul perioadei de răcire, beriliul se aliază cu zirconiumul cu care se află în contact formînd faza lichidă care se distribuie prin efect de capilaritate în spațiul existent între piesele de brazat. La răcire, aliajul de brazare se solidifică avînd o structură legată la nivel de rețea de materialul de bază al pieselor în contact cu aliajul.

### 9.3.3. Grafitarea tecilor.

Din considerente nucleare și mecanice legate de funcționarea e.c.n., tecile sînt acoperite la interior cu o peliculă de grafit coloidal ce poate varia între 5-20 microni. Grafitul coloidal de puritate nucleară în suspensie se depune pe suprafața in-

ternă cu o instalație specială /128/ după care urmează o pruscare a peliculei depuse cu aer cald /129/. Tecile astfel pregătite sînt uscate într-un cuptor la  $450^{\circ}\text{C}$ , în vid la  $10^{-4}$  torr /130/. După uscare tecile sînt șanfrenate la capete. O operație deosebit de importantă pentru asigurarea calității sudurii dop-teacă este curățirea internă a stratului de grafit pe o lungime de 2 mm, aceasta executîndu-se cu un dispozitiv de curățire mecanică.

#### 9.3.4. Încărcarea cu pastile de $\text{UO}_2$

Înainte de încărcare în teci se verifică lungimea coloanelor și greutatea lor și se face determinarea conținutului de umiditate în pastile. Coloanele se introduc în teci după sudarea dopului I cu un dispozitiv care asigură încărcarea simultană a 10 teci.

#### 9.3.5. Sudarea dop-teacă.

Sudarea se execută pe mașina specializată tip COMECE descrisă la capitolul 7. Geometria dopului de sudat este prezentată în figura 9.5, capetele tecilor fiind șanfrenată dublu la  $120^{\circ}$ . Parametrii de lucru pentru sudarea dop-teacă a elementelor combustibile componente ale fasciculului PHWR-37 sînt următorii:

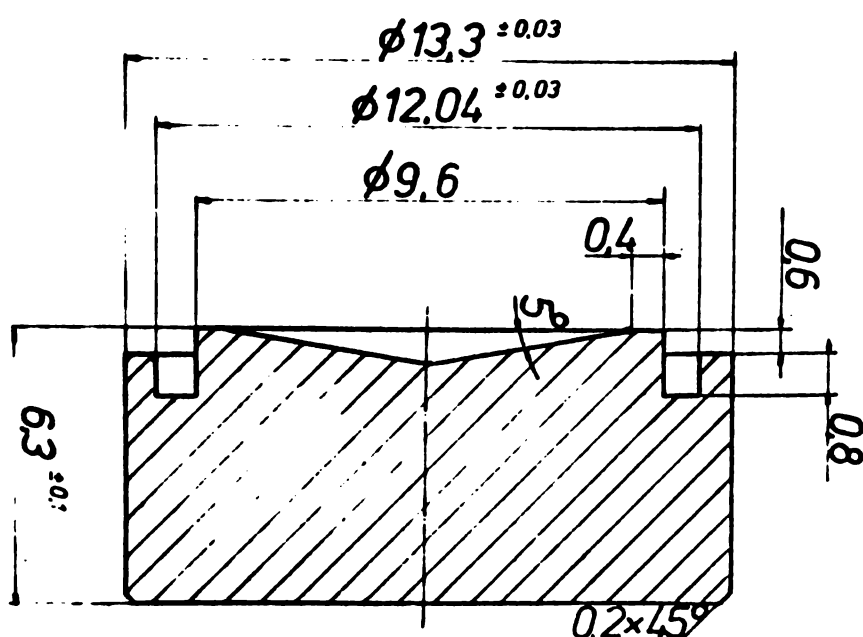
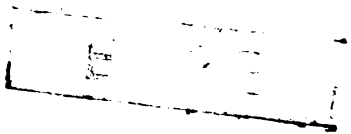


Figura 9.5. Geometria dopului pentru sudarea dop-teacă a e.c.n.

- forța de sudare : 175 Kgf
- tensiunea secundară : 3,2 V
- timp de sudare : 0,08 sec. (4 alternanțe)



- vidarea camerei de sudare :  $5 \times 10^{-2}$  torr
- gaz de protecție pentru sudura I : argon tip A
- gaz de protecție și de umplere a elementelor la sudura II : heliu 99,998%
- presiunea gazului de umplere : 1,5 ata.

Controlul parametrilor de sudare în timpul procesului, după stabilirea regimului optim de sudare, reprezintă un control de calitate în timpul operației de sudare. Parametrii care caracterizează sudarea dop-teacă se consideră a fi : rezistența de contact, energia și scurtarea. O rezistență de contact de 2-6 m $\Omega$  conferă siguranța realizării unui contact bun al pieselor în sistemul de electrozi ai mașinii de sudat și un centraj corect al pieselor, deci contact uniform a acestora la interfața dop-teacă. Energia de sudare dată de  $\int UI \cos \varphi dt$  este o mărime care caracterizează cel mai complet fenomenul de sudare. Domeniul de variație al acestei mărimi este cuprins între 600-750 Ws. Scurtarea pieselor determinată pentru 18 fascicule realizate are o valoare medie de 1,8769 cu o abatere standard de 0,6472. Distribuția acestei mărimi pentru cele 18 fascicule este prezentată în figura 9.6.

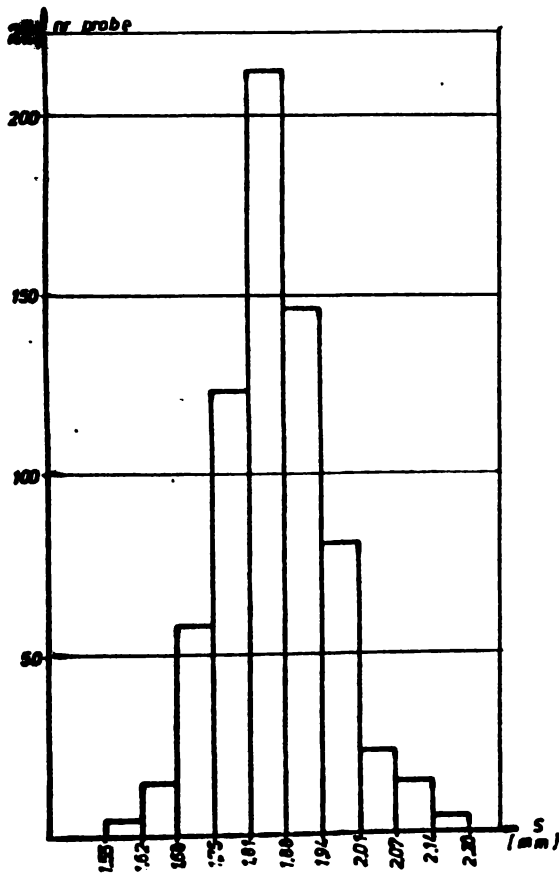


Figura 9.6. Distribuția scurtării la sudarea dop-teacă pe lotul de 18 fascicule PIVR-37.

Tecile grafitate au creat probleme de sudare, o serie de îmbinări dop-teacă executate pe aceste teci prezentând scăpări la controlul de etanșeitate cu heliu. Din analiza statistică a rezultatelor controlului distructiv efectuat pe două fascicule /130/, defecte în zona sudată au fost puse în evidență doar 2% din teciile negrafitate și 19% din teciile grafitate, ceea ce reprezintă 3 respectiv 17 e.c.n. Defectele apărute la sudarea dop-teacă a teciilor grafitate se datorează faptului că în timpul procesului de sudare particule de grafit aflate imediat în zona de sudare sau care pot intra în zona de sudare în timpul procesului de sudare provoacă o alunecare a tecii în raport cu dopul având în final o zonă nesudată dop-teacă. În figura 9.7 este prezentată o metalografie caracteristică cu zonă nesudată care traversează complet îmbinarea, teaca alunecând complet spre exterior, bavura interioară fiind formată numai din materialul dopului. Pentru a elimina aceste defecte,



Figura 9.7. Zonă nesudată 100% la îmbinarea dop-teacă grafitată. x40.

s-a impus executarea unei operații tehnologice de curățire a teciilor la capete după tratamentul termic de uscare a stratului de grafit. Operația se execută pe un dispozitiv ce realizează îndepărtarea mecanică a grafitului pe o porțiune de 2 mm de la capetele tecii. Lucrări executate în această variantă pentru fabricația e.c.n. în 1979 au dat rezultate bune nici unul din elementele sudate neavând scurgeri la testul de etanșeitate cu heliu.



### 9.3.6. Debavurarea și profilarea capetelor elementelor combustibile.

După operația de sudare dop-toacă se execută înlăturarea bavurii exterioare și profilarea capetelor elementelor combustibile prin prelucrare mecanică. Profilarea capetelor se face conform figurii 9.8. și are drept scop aducerea la lungimea de asamblare a e.c.n. și pregătirea capetelor pentru sudarea de asamblare prin sudare în puncte pe grilele de capăt. Prelucrarea se execută pe o mașină specială cu două capete de prelucrare cu sculă rotitoare și elementul de prelucrare fix. După executarea acestei operații elementele sînt degresate în amestec ternar și se efectuează un control dimensional, controlul contaminării superficiale alfa, controlul de etanșeitate cu heliu și controlul cu raze X a volumului liber axial al elementelor, a integrității și a dispunerii pastilelor de  $UO_2$ .

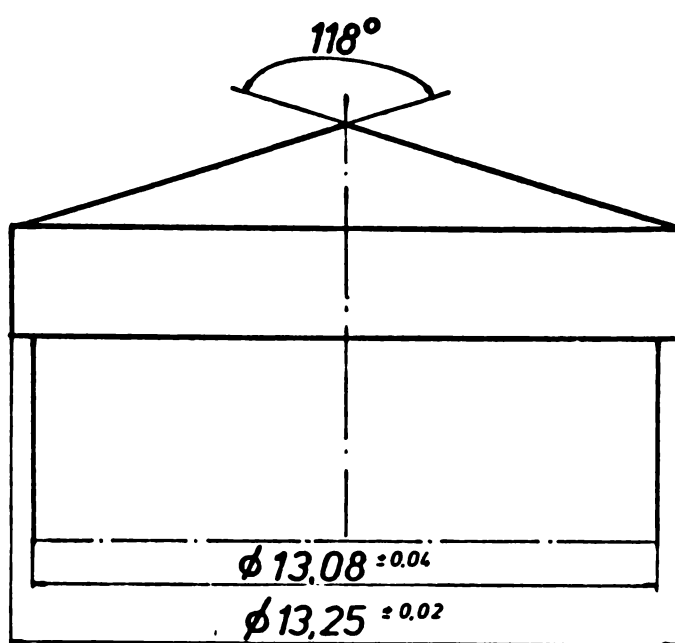


Figura 9.8. Capătul e.c.n. după debavurare exterioară și profilare.

### 9.4. Asamblarea fasciculelor combustibile.

Elementele se introduc în dispozitivul de asamblare care asigură poziționarea unghiulară între elemente și poziționarea față de grilele de capăt. Sudarea se execută cu următorii parametri:

- forța totală de sudare : 100 Kgf
- timp de sudare : 0,14 sec. (7 alternanțe)

- gaz de protecție : argon tip A
- debit de gaz : 7 l/min

Scurtarea la sudare obținută pe geometria dopului prezentată în figura 9.8. este de 0,4 - 0,5 mm. Ordinea de sudare a elementelor este prezentată în figura 7.10 capitolul 7.3.3. ordine determinată din considerente de deformare mecanică a grilei de capăt la sudare pentru urmărirea scurtării.

Din analiza distructivă efectuată pe trei fascicule s-a constatat că 4,05% din suduri prezentau defecte de sudură iar 2,7% diametrul punctului sudat mai mic de 2,5 mm. Punctul sudat are o valoare medie de 3,4661 mm cu o deviație standard de 0,4268. La această analiză s-a observat apariția unui defect care nu este prins în specificația de control de calitate și anume microfisuri în zona exterioară a punctului sudat, care au apărut în proporție de 23,87% la fasciculele analizate. În figura 9.9 este prezentată

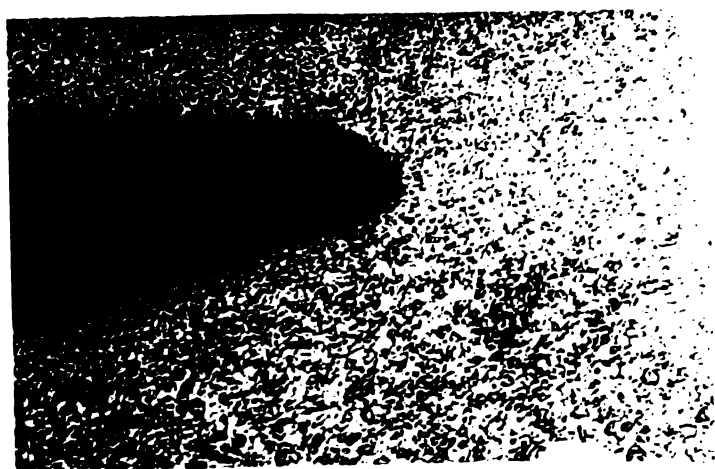


Figura 9.9. Metalografie standard la nivelul diametrului maxim al punctului sudat.



Figura 9.10. Fisură la nivelul diametrului maxim al punctului sudat.

o metalografie standard iar în figura 9.10 o zonă cu microfisură la nivelul diametrului maxim al punctului sudat. Se consideră că aceste microfisuri se datoresc unui program de presiune necorespunzător în perioada de răcire atât cu valoarea a forței cât și cu durata de menținere.

Având la bază aceste rezultate, la asamblarea fascicule-

lor din seria F-2 din 1979 s-au modificat parametrii de sudare, astfel forța totală a fost mărită cu 13% și intervalul de curent la 8 alternanțe. Un lot de sudură de asamblare dop grilă a fost testat la torsiune, test rezultat din specificația tehnică X-81-37.000-TS-004. Conform acestei specificații, rezistența la torsiune a sudurilor trebuie să fie mai mare de 6,8 Nm pentru elementele de pe cercul exterior și mai mare de 4,5 Nm pentru celelalte poziții din fascicul, ceea ce corespunde unui diametru de punct sudat de 4,07 mm, respectiv 3,54 mm. Rezultatele încercării au dat pentru îmbinările cercului exterior valori de rupere la torsiune cuprinse între 7-8 Nm, superioare valorii minime admise, respectiv 5-6 Nm pentru celelalte poziții din fascicul /139/. Se consideră deci că sudarea de asamblare dop-grilă întrunește condițiile de acceptare conform PAC pentru fabricația combustibilului nuclear. Un diametru de punct sudat de 4,2 mm pentru cercul exterior și de 3,6 mm pentru celelalte poziții asigură rezistența mecanică în funcționare a f.c.n., testul de torsiune pe probe martor în cursul fabricației fiind un control de calitate, controlul metalografic al îmbinării rămânând o metodă complementară de studiu. Deoarece tensiunea maximă la torsiune într-un punct situat la distanța  $\rho$  față de centrul punctului sudat scade direct proporțional cu această distanță /140/ un defect circular central de diametrul de 1 mm, pentru un punct sudat de 4,2 mm, asigură acestuia o rezistență la torsiune de 7,5 Nm /139/, valoare superioară minimei admise.

Având în vedere cele prezentate mai sus este în curs de elaborare norma de control de calitate a îmbinării sudate dop-grilă pentru producția de serie mare.

#### 9.5. Controlul metalografic interfazic la sudarea dop-teacă.

În conformitate cu PAC pentru sudarea e.c.n, tehnologia, utilajul și operatorul sînt autorizați pentru fabricație în urma execuției unui lot de suduri controlate integral prin metode distructive și nedistructive.

În procesul de fabricație se lucrează cu probe martor pe loturi de fabricație pentru operația de brazare, sudare dop-teacă

și sudarea dop-grilă. La sudarea dop-teacă se execută serii de 5 probe martor la începutul și sfârșitul fiecărui lot de suduri, aceste probe fiind analizate metalografic. Același număr de probe martor se execută și la sudarea dop-grilă pentru fiecare fascicul combustibil sudat, probele fiind testate la torsiune. În cazul unei modificări a parametrilor s-au SDV ce influențează direct procesul de sudare, se execută un nou lot de suduri de autorizare. Mărimea lotului de autorizare și criteriile de respingere precum și numărul și condițiile de respingere a probelor martor se stabilesc funcție de mărimea lotului de fabricație în conformitate cu normele MIL-STD-105.D. Astfel pentru 5 probe martor, caracteristic pentru un lot de 50-500 suduri la nivelul de control  $S_2$  sever se admite o sudură defectă, adică valoarea zonei nesudate evidențiată prin control metalografic pe o probă poate să fie mai mare de 10% în zona adiacentă tecii. Elaborarea normei de control de calitate pentru fabricația de serie prin studiul metalografic pentru sudura dop-teacă va fi definitivată după încheierea programului de încercări mecanice și de coroziune care va permite definirea calitativă și cantitativă a defectelor critice.

Metalografia standard a îmbinării sudate dop-teacă este prezentată în figura 9.11, îmbinarea neavând zone nesudate nici la extremitățile bavurilor. La analiza metalografică probele sînt debavurate la cota de fabricație, sudura fiind necorespunzătoare dacă apare zonă nesudată la exteriorul îmbinării (figura 9.12). Acest defect favorizează coroziunea locală care poate conduce la pierderea de gaze de fisiune în funcționarea de durată a e.c.n.

În figura 9.13 sînt prezentate structurile metalografice pentru zonele caracteristice ale unei îmbinări sudate dop-teacă prin presiune. Spre deosebire de sudarea TIG unde ZIT se deosebeste net de cordonul sudat, în care materialul topit prezintă după solidificare o structură columnară, la sudarea prin presiune ca zonă netă de separare apare numai trecerea de la metalul de bază la ZIT (figura 9.13 b și d). Zona centrală (figura 9.13 c) are o structură de tip Widmansteten fină, caracteristică sudării prin presiune a aliajelor de zirconiu. Datorită acestei structuri îmbinarea sudată prin presiune are caracteristici mecanice și de rezistență la coroziune superioare îmbinării prin procedeul TIG.

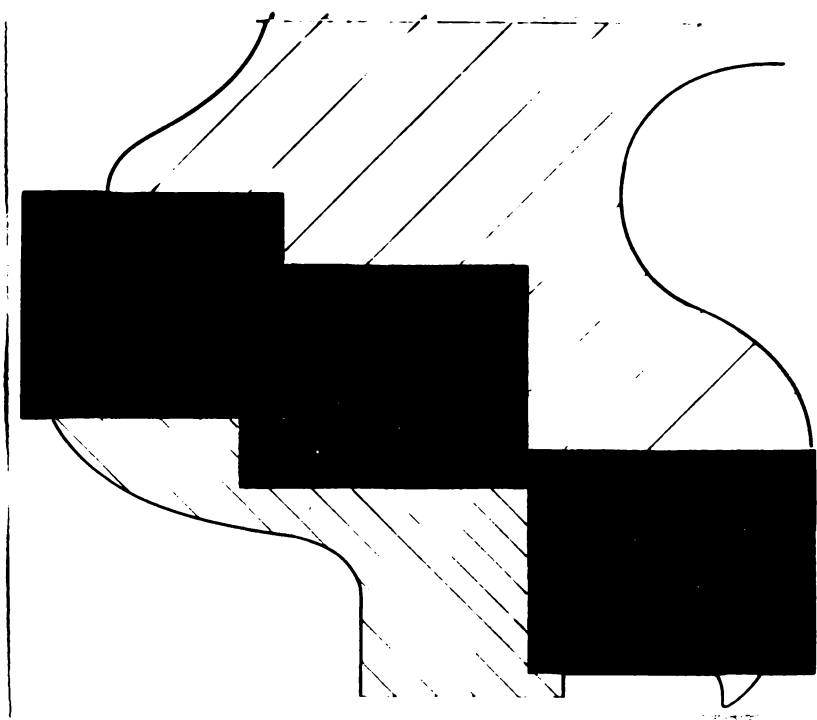
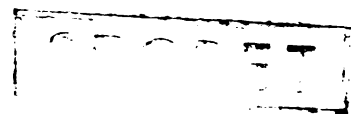
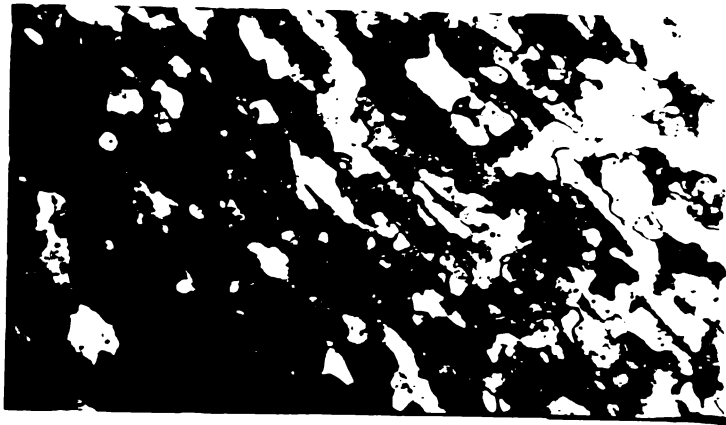


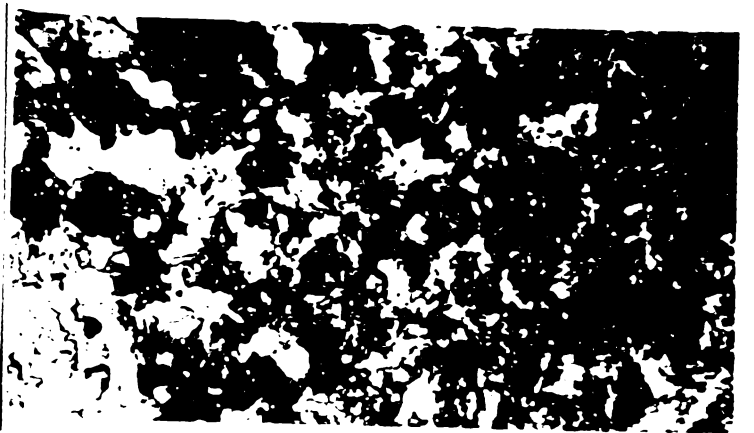
Figura 9.11. Imbinare sudată dop-teacă standard. x60

Figura 9.12. Zonă nesudată la exteriorul imbinării. x100.

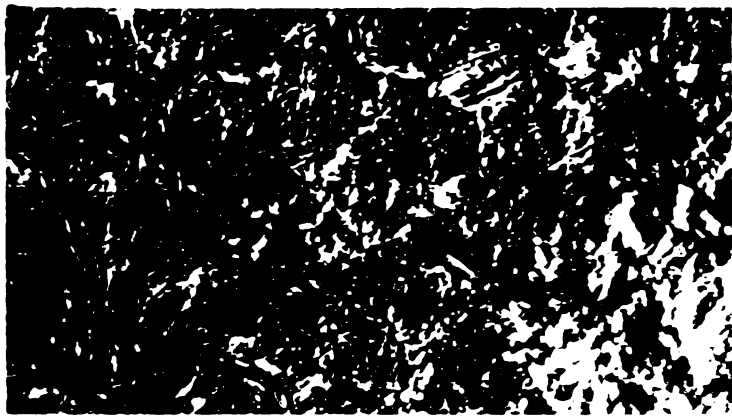
Defectele caracteristice imbinării sudate dop-teacă care pot să apară în cursul fabricației se referă în general la forma bavurii interioare. O descentrare a capetelor mașinii de sudat face ca participarea tecii și a dopului la formarea bavurii să fie neuniformă. Astfel în figura 9.14 este prezentată situație în care teaca este deplasată spre exterior, fiind pe lângă o participare minimă a tecii la bavura interioară (nr. 395) sau nulă (nr. 397) apare și defectul de tip zonă nesudată pe toată lungimea imbinării. În cazul în care teaca este deplasată spre interiorul dopului (figura 9.15 nr. 465) participarea tecii la formarea bavurii interioare este minimă, materialul dopului din bavura interioară fiind aplicat pe fundul canalului circular, apărând ca o a doua zonă nesudată a imbinării. În figura 9.15 nr. 466 este prezentat cazul limită în



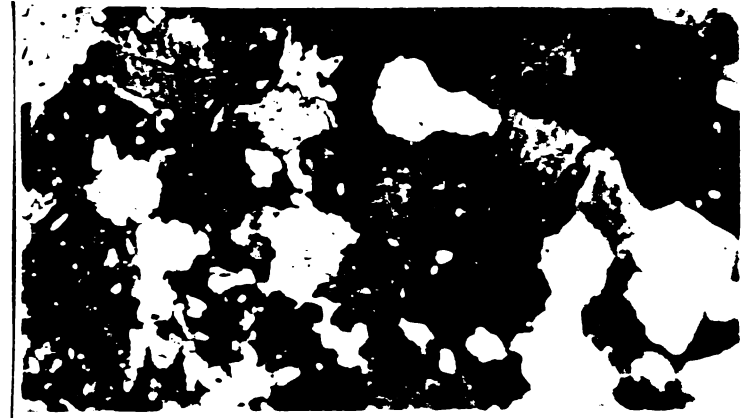
a



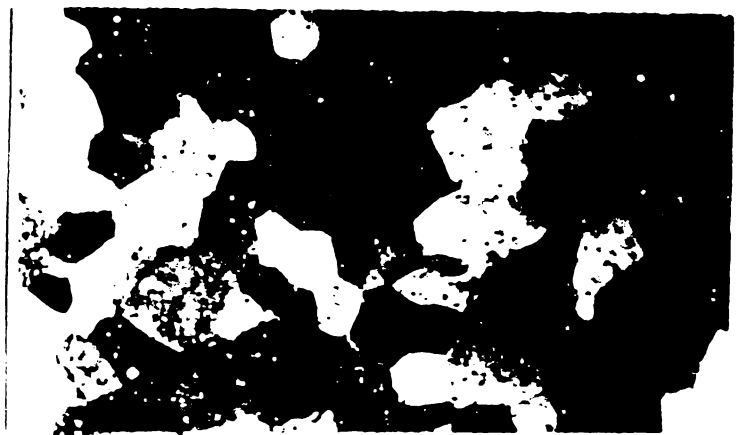
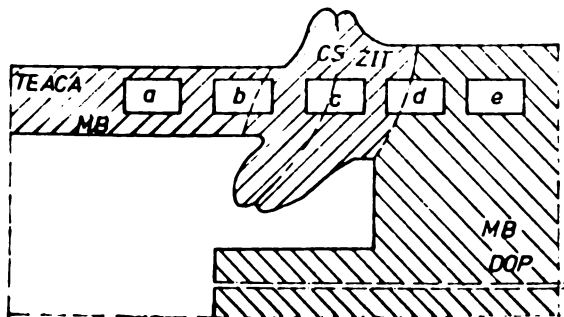
b



c



d



e

Figura 9.13. Structurile metalografice ale unei îmbinări sudate dop-teacă prin presiune pentru aliajul zircaloy-4. x800

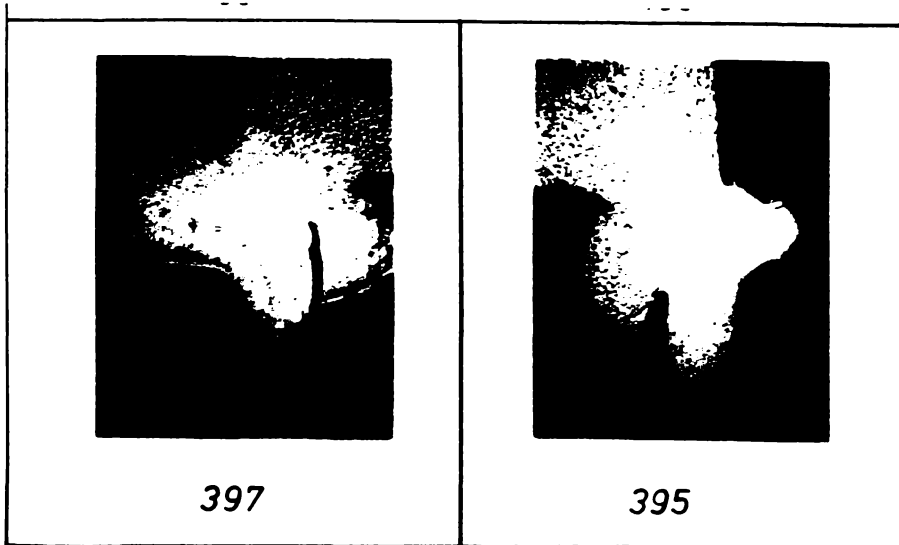
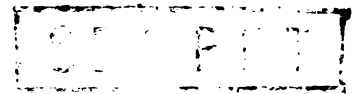


Figura 9.14. Sudură defectă cu teaca deblansată spre exterior. x20

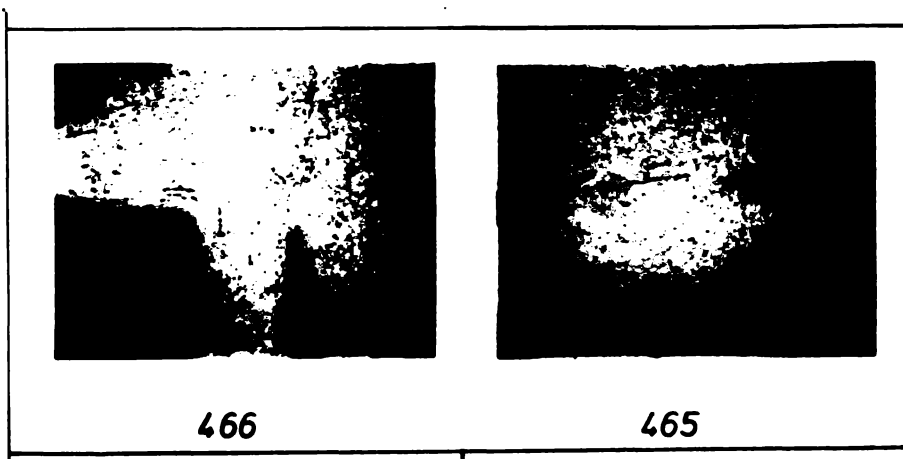


Figura 9.15. Sudură defectă cu teaca deplasată spre interior (465) și situația limită în țeava deplasată spre exterior (466). x30.

care deplasarea spre exterior a teii deși dezechilibrează participarea masică a pieselor la formarea bavurii, nu generează defectul critic de zonă nesudată în zona adiacentă teii.

Un alt tip de defect, expulzie de metal topit, poate fi generat de contacte electrice dintre piese sau dintre piese și electrod necorespunzătoare, precum și de unele scăderi accidentale de presiune pe rețeaua de aer comprimat. În figura 9.16 este prezentat un tip de expulzie locală care a fost apoi secționat și analizat metalografic în două plane succesive. Acest tip de defect devine critic în situația când metalul topit depășește fundul dopului sau când expulzia creează goluri de material în zona sudată (figura 9.17).

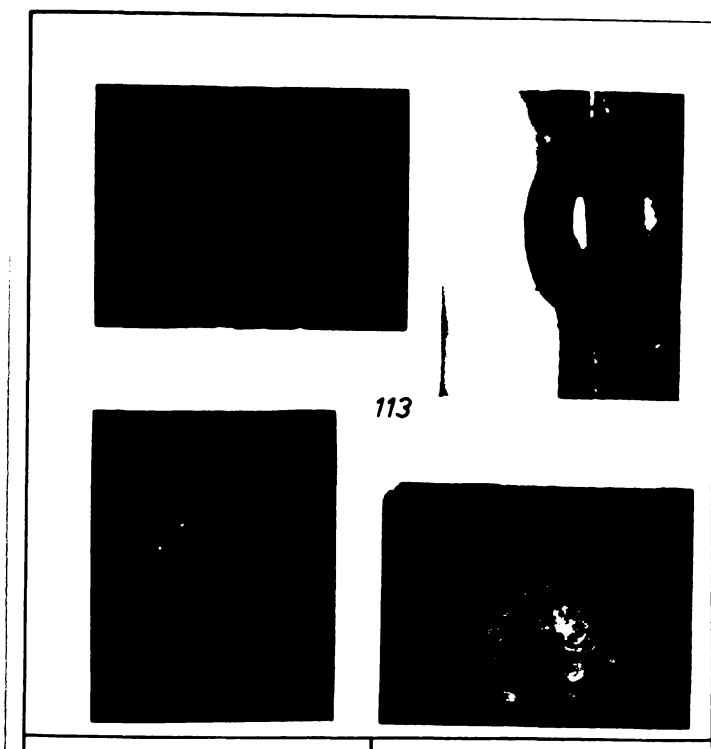


Figura 9.16. Expulzie locală de metal topit.  
Stînga sus: macrografie x5  
Dreapta sus: macrografie x20  
Stînga jos: secțiune în marginea expulzicii x20  
Dreapta jos: secțiune centrală x20

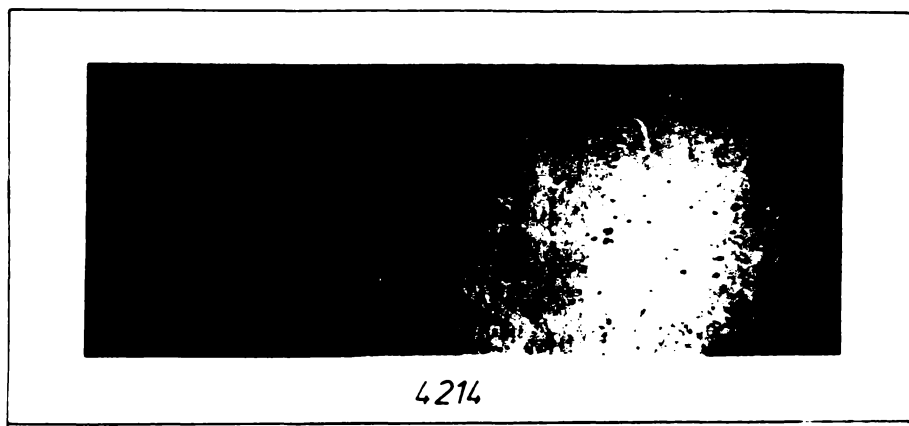


Figura 9.17. Defect intern creat de expulzie la sudarea dop-teacă. x100.

Verificarea reproductibilității parametrilor stabiliți pentru sudarea dop-teacă, pe lângă urmărirea mărimilor electrice și a scurtării, s-a făcut și prin examen metalografic. În figura 9.18 sînt prezentate macrografiile unor probe martor de fabricație nr. 2.593, 3.108 și 4.105, la care se observă că mărimea, forma și calitatea îmbinării sînt păstrate perfect la un lot de fabricație de 1.500 de suduri. Pe baza experienței acumulate prin executarea unui număr de 7.500 de suduri dop-teacă din care 40% au fost studiate metalografic se poate trage concluzia că instalațiile de sudare pon-



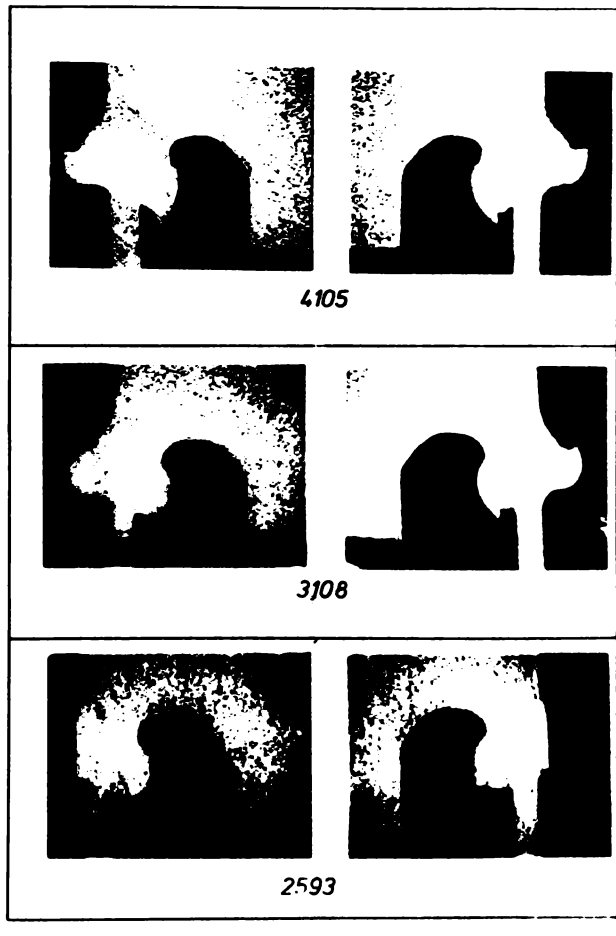


Figura 9.18. Macrografii ale îmbinării dop-teacă pentru verificarea reproductibilității instalației de sudare pe un lot de fabricație de 1.500 suduri. x10.

te fi autorizată pentru fabricația de e.c.n. asigurând o reproductibilitate înaltă a unui regim de lucru omologat pentru un tip dat de îmbinare dop-teacă.

9.6. Controlul prin emisie acustică a sudurilor dop-grilă /142/143/.

Prin definiție, emisia acustică (EA) este o undă elastică tranzitorie generată de eliberarea rapidă de energie de la o sursă localizată sau difuză din interiorul materialului, punctul sudat fiind o sursă de acest fel. /44/

9.6.1. Principiul metodei.

La sudarea unui punct, EA este alcătuită dintr-o serie de evenimente acustice succesive și discrete, cu amplitudini variabile. Mecanismul surselor acustice nu este încă complet elucidat, necesa-

tînd modele teoretice complete pentru descrierea schimbărilor dinamice în timpul formării punctului de sudură. Surse de EA identificate la sudare sînt schimbarea de fază solid-lichid-vapori, trecerea din structură austenitică în martensitică, fisurarea la răcire, fierberea apei în electrozi, expulzii de metal topit etc. Pentru ca un sistem de control să permită identificarea în timp real a fenomenelor acustice sau selectat trei surse de pondere mare și anume: volumul punctului topit, mărimea expulziilor de metal topit și fisurarea după sudare. Controlînd aceste mărimi se pot obține informații precise asupra calității punctului de sudură realizat. În figura 9.19 este prezentată diagrama desfășurării în timp a EA la sudarea în puncte.

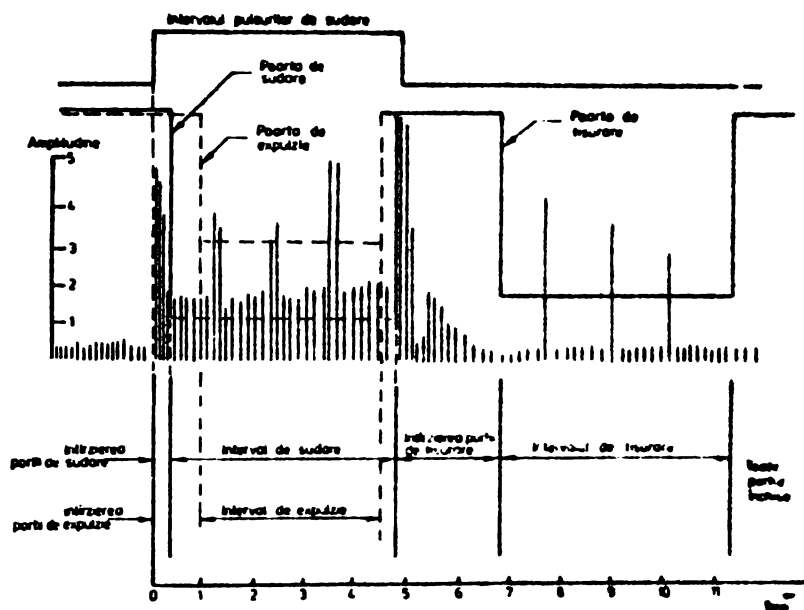


Figura 9.19. Desfășurarea în timp a EA la sudarea în puncte.

La prinderea pieselor între electrozi se observă un zgomot de fond scăzut. La începutul trecerii curentului de sudare, amplitudinile EA cresc datorită distrugerii filmului de oxid dintre piese. În continuare se observă o bandă de semnale discrete de ma-

plitudine relativ constantă care corespunde creșterii punctului de sudură. Nivelul EA poate fi detectat în comparație cu un nivel inferior amplitudinii medii și numărată pe un contor. S-a demonstrat că valoarea înregistrată depinde linear de volumul punctului sudat fiind corelată cu diametrul punctului și rezistența mecanică a îmbinării. În intervalul de curent pot apărea și EA de o amplitudine mare cauzate de expulzii în timpul sudării. Aceste semnale sînt detectate la un nivel mai înalt decît EA de sudare, valoarea rezultată și înregistrată constituind o măsură a mărimii expulziilor. La trecerea de la o alternanță de curent la alta se observă o bandă de EA ușor crescătoare cu amortizare exponențială generată de transformările de fază în punctul sudat, în general aceste valori nefiind măsurate. La sfîrșitul sudării EA scade la nivelul de zgomot de fond, acesta fiind întrerupt de emisii bruște generate de apariția fisurilor. Aceste semnale sînt detectate deasupra nivelului de zgomot, constituind o determinare numerică a fisurării după sudare.

#### 9.6.2. Echipamentul de măsură și cuplarea sa pe instalația de sudare.

Echipamentul de măsură utilizat, de tipul MODEL 8.100-A-USA, are schema bloc prezentată în figura 9.20.

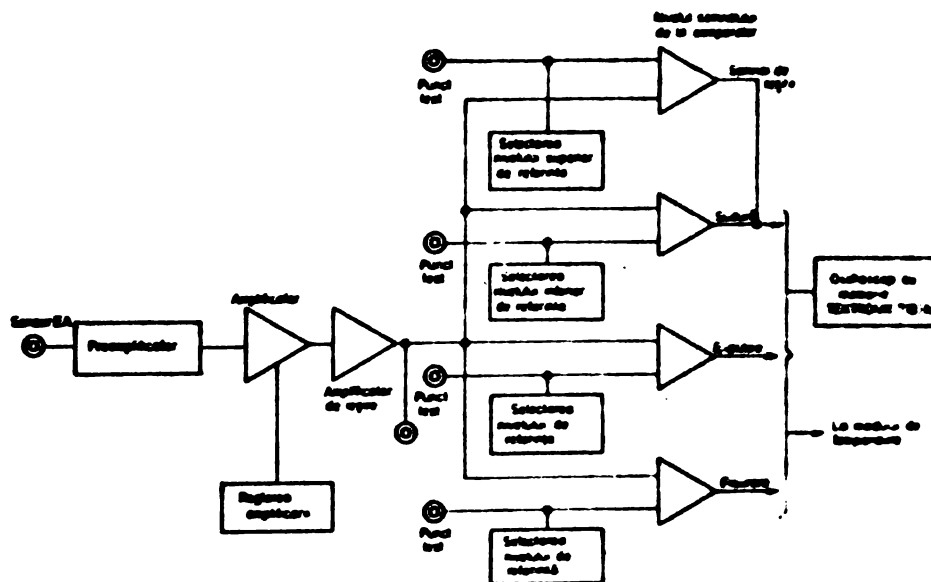


Figura 9.20. Schema bloc a aparatului de control prin EA tip MODEL 8.100-A-SUA.

Semnalele sînt detectate de senzorul EA de tip traductor diferențial piezoelectric și trecute printr-un preamplificator cu domeniul fix de 40 dB. Semnalele preamplificate și filtrate printr-un filtru trece-bandă de 100-400 KHz. Astfel semnalele de EA sînt aduse la o amplitudine suficientă pentru prelucrările ulterioare. Prelucrarea semnalelor începe cu separarea lor după nivelul de tensiune în semnale de sudură, expulzie și fisurare în conformitate cu separarea în timp prestabilită de pe panoul frontal al echipamentului. Semnalele EA de sudură și de expulzii sînt numărate în intervalul curentului de sudare, iar cele de fisurare după întîrzierea prestabilită pentru poarta de fisurare, întîrziere care elimină emisiile transformărilor de fază. Pentru fiecare din aceste trei intervale, domeniile de măsură sînt determinate în conformitate cu întîrzierile și nivelele de referință prestabilite, precizate în instrucțiunile de exploatare a echipamentului.

Senzorul de EA se cuplează pe electrodul exterior al capului de sudare conform figurii 9.21.

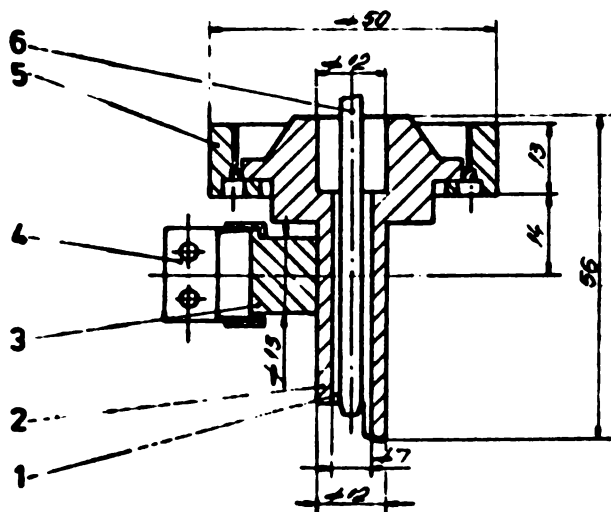


Figura 9.21. Poziționarea senzorului EA pe electrodul exterior.

1. Curgere gaz de protecție
2. Electrode exterior
3. Ghid de undă
4. Senzor EA
5. Piuliță de fixare
6. Electrode central

Cuplarea se face prin intermediul unui ghid de undă 3 din zirconiu fixat de electrodul 2 cu rășină epoxidică. Cuplarea acustică între

ghidul de undă și electrod se asigură cu vaselină siliconică aplicată în strat subțire între cele două piese înaintea lipirii lor.

În figura 9.22 este dată schema bloc a echipamentului de control cuplat pe instalația de sudare în puncte pentru asamblarea dop-grilă a f.c.n. Senzorul de curent, montat pe placă polară a capului de sudare asigură declanșarea echipamentului de control la începutul trecerii curentului, prin intermediul adaptorului 8175. Vizualizarea configurației generale de EA generate în timpul ciclului de sudare, precum și a lungimii intervalelor de întârșire, sînt asigurate de un osciloscop cu memorie, cu posibilitate de fotografare a înregistrării obținute. Numărul de semnale de EA pe

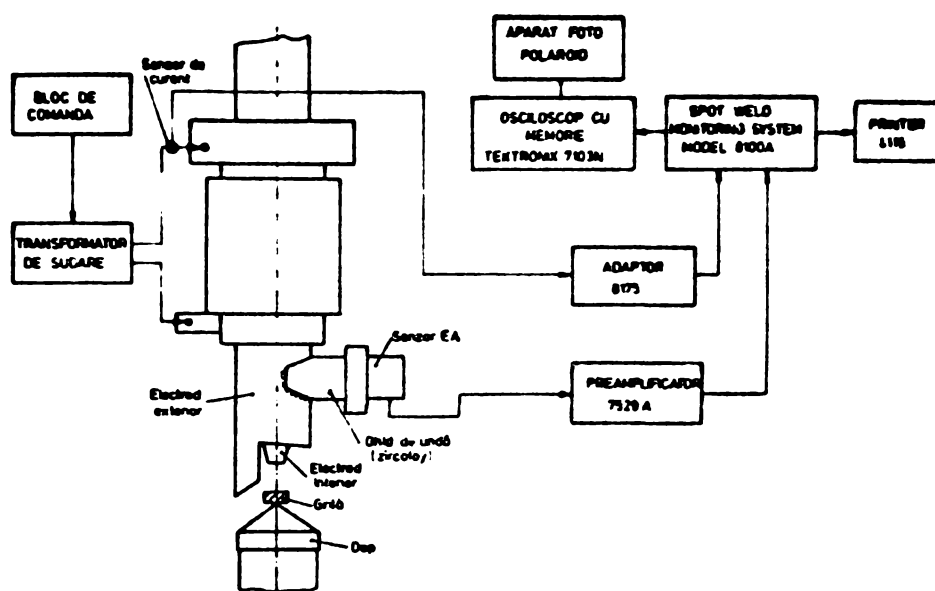


Figura 9.22. Schema bloc a echipamentului de control EA cuplat pe instalația de sudare în puncte a f.c.n.

cele trei domenii distincte :sudare,expulzii și fisuri sînt tipărite de pînterul 8118.

### 9.6.3. Rezultatele experimentale preliminare.

Lucrările de control EA a sudurilor de asamblare a f.c.n.

au început în decembrie 1979, efectuându-se o înregistrare a semnalelor pentru trei fascicule deci pentru 222 suduri, plus 15 probe martor.

Analiza metalografică a probelor martor și corelarea cu oscilogrammele EA au demonstrat o dependență a amplitudinilor semnalelor de mărimea zonei nesudate. În figurile 9.23, 9.24 și 9.25 sunt reprezentate grafic numărul de EA pentru cele trei intervale caracteristice, determinate la sudarea fascicului F2-016. Se con-

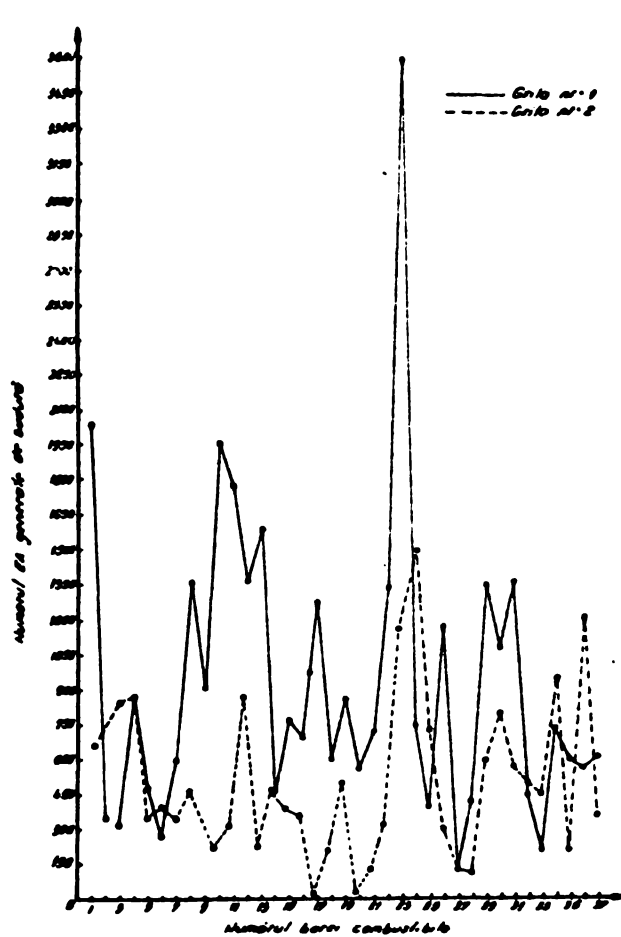


Figura 9.23. Numărul de EA în intervalul sudare la asamblarea fascicului F2-016.

stată o împrăștiere mare a valorilor, mult mai accentuată la sudarea grilei 1. Diferența de semnale dintre sudarea grilei 1 și 2 poate fi cauzată de rigiditatea mai mare a ansamblului la sudarea grilei 2. De asemenea, la sudarea unei grile, diferența de EA între puncte poate fi generată și de poziția punctului sudat în raport cu geometria grilei, comportarea la deformare a elementului de grilă la sudarea unui punct nefiind o mărime constantă.

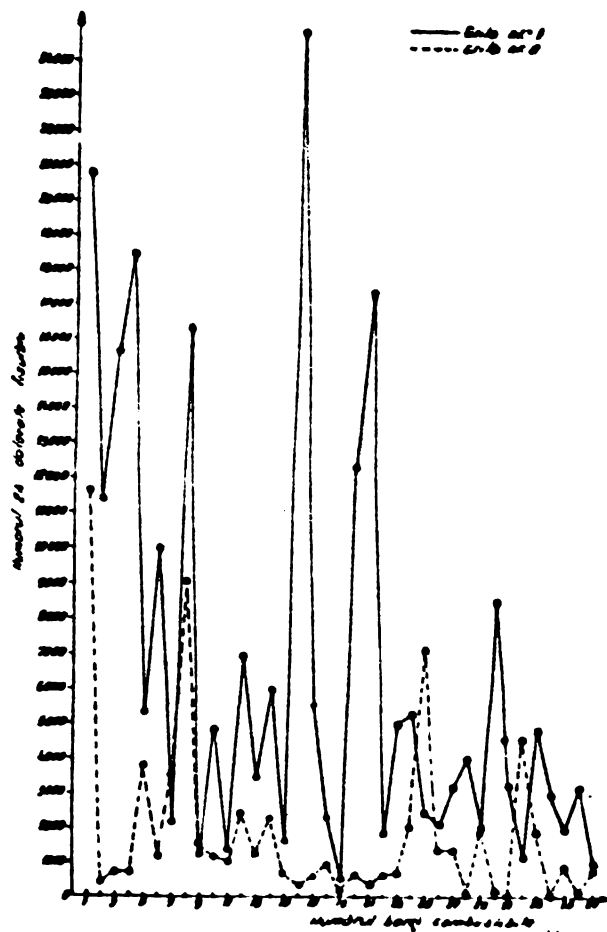
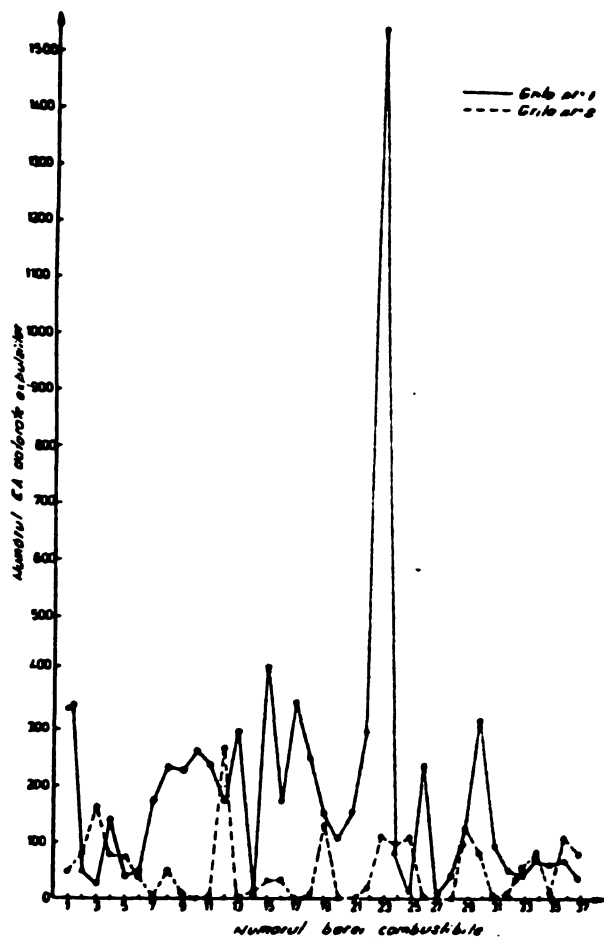


Figura 9.24. Numărul de EA în intervalul expulzii la asamblarea fasciculului F2-016.

Figura 9.25. Numărul de EA în intervalul fisuri la asamblarea fasciculului F2-016.

Din datele experimentale preliminare se consideră că metoda de control prin EA a sudurilor de asamblare dop-grilă poate fi dezvoltată pentru aplicarea ei în procesul de fabricație a f.c.n. Metoda necesită corelarea parametrilor EA cu studii comparative metalografice și de rezistență mecanică prin torsiune a sudurilor, pentru determinarea nivelului de acceptare, precum și a intervalului de măsură a EA. Aceste studii se vor face pe baza unui program detaliat în cadrul lucrărilor de fabricație a f.c.n. din anul 1970. Dezvoltarea aplicării acestei tehnici moderne de control se va face și în direcția aplicării ei la sudarea dop-teucii.

### 9.7. Concluzii.

Execuția la scară pilot a fasciculelor combustibile nucleare tip CANDU-660 (PHWR-37) a permis verificarea instalațiilor, tehnologiilor și a SDV-urilor speciale în contextul respectării cerințelor Programului de Asigurare a Calității.

A fost elaborată documentația de fabricație formată, din proiect tehnologic de execuție, manual de fabricație, instrucțiuni tehnologice, instrucțiuni de control precum și documentația însoțitoare de fabricație în vederea realizării lotului de omologare fasciculelor combustibile realizate în tehnologie proprie, omologare în afara și în reactorul nuclear.

S-au executat studii de detaliu asupra proceselor de sudare dop-teacă și dop-grilă fiind în curs de elaborare normele de control de calitate. Se remarcă introducerea controlului prin rezistență la torsiune a îmbinării sudate dop-grilă și rezultatele preliminară pozitive obținute la aplicarea controlului prin emisie acustică a acestor suduri. Dezvoltarea controlului prin emisie acustică se va face corelat cu rezultatele testului de torsiune, scopul final al lucrărilor fiind asimilarea acestei metode ca un control de proces.

Pe baza experienței tehnologice prezentată pe scurt în prezentul capitol a fost organizată și pusă în funcție prima linie industrială de fabricație a fasciculelor combustibile care va asigura prima încărcătură de combustibil pentru centrala electrică nucleară Cernavodă - 1.



10. AUTOMATIZAREA PROCESELOR DE SUDARE PRIN  
PRESIUNE SI CONTROLUL PARAMETRILOR DE  
SUDARE CU UNITATE CENTRALA CU MICROCALCULATOR

Conform sarcinilor din Planul Nuclear Național, în cadrul IRNE Pitești se va asigura fabricația combustibilului nuclear pentru centrala electrică nucleară Cernavodă-1. În acest context, realizarea de echipamente specifice, instalații și SDV-uri pentru prima linie industrială de producție a fasciculelor combustibile nucleare constituie una din direcțiile principale de lucru din cadrul institutului.

Una din ultimile realizări, care se situează la nivelul tehnicii mondiale o constituie introducerea microcalculatoarelor în automatizarea proceselor de sudare prin presiune și controlul parametrilor de sudare. Pe baza rezultatelor experimentale obținute în 1979 la sudarea de asamblare în puncte a fasciculelor combustibile utilizând sistemul automat de poziționare în coordonate polare, a fost realizată o unitate centrală de calcul având la bază un microcalculator tip SUPERBUS-IRNE. Întreg ansamblul, definit ca INSTALAȚIE DE AUTOMATIZARE PROCESE DE SUDARE, are două funcții distincte definite prin temele de proiectare respective /145/146/ și anume :

- automatizarea procesului de sudare la asamblarea fasciculelor combustibile nucleare
- sistem de achiziție și prelucrare date pentru controlul parametrilor de lucru pentru mașinile de sudare prin presiune dop-teacă și dop-grilă.

În capitolele 7.3 și 9.4 sînt prezentate detaliat utilajele, respectiv considerațiile tehnologice referitor la sudarea în puncte în relief dop-grilă pentru asamblarea fasciculelor combustibile. În prezentul capitol se vor prezenta principiile funcționale și caracteristicile blocurilor din componența instalației de automatizare procese de sudare, modul de lucru pentru automatizarea cu sudării dop-grilă și specificațiile temei de proiectare pentru sistemul de achiziție și prelucrare date.

10.1. Principiul funcțional și caracteristicile instalației.

In figura 10.1. este prezentată vederea din față și din spate a instalației, care cuprinde ca subansamble principale cutia cu sursă modulară 1, microcalculatorul 3, tip Superbus-IRNE, consola 4 a microcalculatorului, concentratorul de comenzi 2, sursele de alimentare a motoarelor pas cu pas 9.

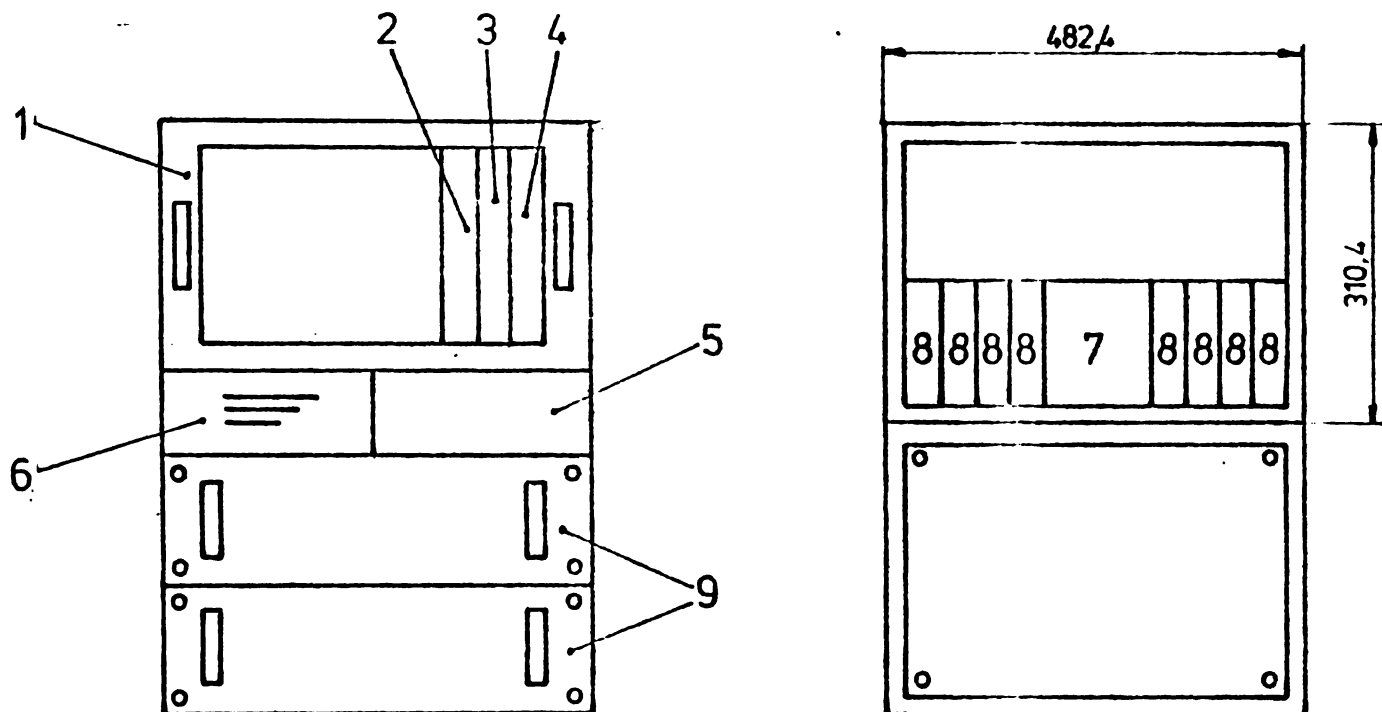


Figura 10.1. Instalație de automatizare procese de sudare

10.1.1. Cutie cu sursă modulară.

Cutia cu sursă modulară /147/ este o cutie tip standard Camac prevăzută cu sistem de ventilație detașabil și echipată cu o sursă de alimentare realizată modular. In cadrul acestei cutii pot fi realizate diverse configurații de sisteme de control Camac sau Superbus, calea de date Superbus fiind dezvoltată în Atelierul de Electronică IRNE. Cutia propriuzisă este alcătuită dintr-o unitate mecanică Camac cu 25 de conectori, cutia pentru sursă modulară în

care se găsesc așezate modulul transformator-regulator 7 și modulele regulator 8 și partea inferioară a ansamblului în care se găsește blocul de alarmă 5, sistemul de ventilație detașabil 6 și condensatorii de filtraj. Alimentarea cutii cu sursă se face la 220 V cu variație de + 10 și - 15%, puterea maximă consumată la echipare completă fiind de 600 w. Sursa asigură tensiuni stabilizate de + 6V la 25A, - 6V la 8A  $\pm$  12V la 4A și  $\pm$  24V la 2A, cu variații de maximum 1,5% pentru tensiunile de 6V și 1% pentru 12 și 24V. Ajustarea internă a tensiunilor stabilizate se poate face în  $\pm$  10%, tensiunea medie de zgomot la ieșire fiind de 500 $\mu$ V iar tensiunea reziduală nefiltrată la ieșire de 1mV.

#### 10.1.2. Microcalculator Superbus.

Microcalculatorul Superbus, bazat pe microprocesorul INTEL-8080, este conceput să lucreze în sisteme multiprocesoare care utilizează calea de date tip Suprbus dezvoltată în IRNE /148/. Microcalculatorul este un modul controlor de sistem conceput să lucreze în trei stări funcționale și anume :

- BUS-MASTER<sup>x</sup>, stare în care microcalculatorul controlează BUS-ul extern Superbus al sistemului, primește cereri de întreruperi și le deservește prin subrutin adecvate, realizează transferul DMA între două zone de memorie.

- BUS-SLAVE, stare în care memoria și registrele interne adresabile ale microcalculatorului sînt accesibile dinspre BUS, putînd fi citite respectiv scrise de către alt controlor de sistem care îndeplinește momentan funcția BUS-MASTER.

- independent, stare în care BUFERII de ieșire sînt blocați și microcalculatorul lucrează izolat pe sistem procesînd date intern, avînd posibilitatea de a comunica cu prifericele aferente.

Trecerea dintr-o stare în alta se face conform cu cerințele protocoului de cedare-cîștigare a BUS-ului specific căii de date Superbus, protol executat între microcalculator și ceilalți controlori de sistem prevăzuți în configurație (microcalculatoare, consolă Superbus, modul transfer DMA), cu respectarea priorității stabi-

---

<sup>x</sup> Denumirile și prescurtările specifice tehnicii de calcul sînt scrise cu litere mari și explicitate în anexa II.

lite în configurație prin poziția microcalculatorului în cutie.

În structură completă, microcalculatorul cuprinde :

- structura de bază 8080 (microprocesor, generator de tact, controlor de sistem)
- memorie RAM de 2k biți
- memorie PROM de 6k biți
- sistem de comunicare serială
- sertar de întrerupere
- posibilități de transfer DMA
- controlor display CRT
- controlor cu claviatură

Memoria RAM cât și memoria PROM aferentă microcalculatorului poate fi extinsă pînă la 64k biți memorie totală prin introducerea unui modul de memorie externă. Microcalculatorul lucrează pe baza programelor de lucru introduse în memoria PROM sau dinamic prin programare de la perifericile tip operator conectate direct la acesta. Pornirea unui program intern se face printr-un buton RESET al calculatorului sau de la o adresă selectată de consola Superbus în mod de lucru "START" prin întrerupere. Pentru depanare sau dezvoltare SOFT, microcalculatorul poate lucra împreună cu consola Superbus care permite rularea pas cu pas sau continuu cu viteză variabilă a programelor cu posibilitatea opririi programului la o adresă selectată pe consolă.

#### 10.1.3. Consola Superbus.

Consola Superbus /149/ asigură controlul manual al sistemului permițînd intervenția dinamică în sistem prin scrierea sau citirea oricăror zone de memorie sau registre adresabile ale sistemului ca și rularea pas cu pas sau continuu cu viteză variabilă a unor programe ale microcalculatorului controlor de sistem.

#### 10.1.4. Modul concentrator comenzi și acționări motoare pas cu pas.

Concentratorul de comenzi și acționări motoare pas cu pas realizează legătura concomitentă a maximum 6 posturi de lucru la controlorul de sistem Superbus /150/. Acest bloc lucrează în conformitate cu programarea inițială, caracterul de programabilitate fiind asigurat prin folosirea unor circuite LSI programabile, respectiv două de intrare-ieșire tip 8255 și șase numărătoare programabile tip 8253. Registrele interne ale acestor circuite sînt con-

SECRET

siderate ca registre programabile ale sistemului, adresele lor fiind formate din combinația :

- ADR 0 / și ADR 1/- selectează registrele interne ale fiecărui circuit (A0 și A1)
- ADR 2/, ADR 3/ și ADR 4/ - selectează circuitul de modul
- ADR 5/, ADR 6/ și ADR 7/ - selectează modulul în sistem la o adresă între 0 și 7 care poate fi prestabilită prin STRAB în funcție de configurația sistemului.

Circuitul 8255 - 1 este programat să lucreze în combinația mod 1 avînd PORTUL B1 ca intrări cu PC0 la PC 3 ca semnale de control al transferului de date și mod 0 avînd PORTURILE A1 și C1 ca ieșiri. PORTURILE A1 și C1 deservesc primele două posturi de lucru cu comenzi referitoare la acționarea celor două motoare pas cu pas ale fiecărui post. Circuitul 8255 - 2 este programat să lucreze în mod 0, deservind cu comenzi pentru acționarea motoarelor celorlalte patru posturi rămase.

Fiecare circuit 8253 conține trei numărătoare programabile de 16 biți care realizează :

- numărătorul 0 - divizarea frecvenței BCLK a sistemului pînă la o valoare fixată de operator pentru impulsurile de acționare ale celor două motoare pas cu pas aferente postului.

- numărătorul 1 și 2 - livrarea unui număr programat de impulsuri către motorul 1, respectiv 2 al postului de lucru.

Pentru formarea cuvîntului A 0 - A 7 care indică comanda dată de operator pentru fiecare post de lucru sînt prevăzute un circuit de codare și un circuit de preluare al comenzii. Circuitul de codare creează cîte un cod distinct pentru fiecare buton al claviaturii de la 0 0 0 0 la 0111 și generează un semnal logic la apăsarea unui buton. Circuitul de preluare al comenzii conține un BUFFER care memorează codul butonului și o schemă logică care generează un semnal de indicare a primirii unei comenzi. Pentru identificarea numărului postului de lucru sînt baleate secvențial cu un numărător decodor circuitele de preluare ale comenzii. La detectarea prezenței unei comenzi numărătorul se oprește la adresa postului de lucru respectiv și este generat impulsul STB către circuitul 8255 - 1. Semnalul IBF primit după citirea cuvîntului A 0 - A 7 repune în starea inițială circuitul de preluare al comenzii adresat și restaurează numărătorul. În același timp este indicată operatorului permișunea de a da o nouă comandă prin stingerea LED-ului de pe panoul cutiei

operatorului.

Modulul Camac concentrator are pe panoul frontal șase conentori la care se cuplează cutiile de comandă ale operatorilor de la cele șase posturi de lucru. Cutia operatorului conține o claviatură cu 16 butoane prin care se pot da pînă la 50 de comenzi distincte, care pot fi comenzi de acționare sau comenzi cifrice. Sînt asigurate posibilități de programare pentru :

- numărul impulsurilor de acționare pentru fiecare motor pas cu pas în parte între 1 și 64.000
- sensul de rotire al fiecărui motor
- frecvența impulsurilor de acționare a celor două motoare aferente unui post între 10 și 1000 Hz.
- pornirea și oprirea motoarelor în orice moment
- deplasarea unui motor cu un număr de pași dat cifric de la claviatura cutiei de comandă.

10.2. Modul de operare al instalației la automatizarea sudării dop-grilă.

Instalația de sudare în puncte pentru sudarea dop-grilă este prezentată în figura 7.4- pag.94, unitatea de programare 11 fiind înlocuită cu instalația de automatizare procese de sudare descrisă mai sus. Operatorul așează dispozitivul de asamblare încărcat în universalul sistemului de poziționare și îl blochează în poziție. Se pune sub tensiune unitatea centrală de calcul, blocurile de alimentareale motoarelor pas cu pas și se trece comutatorul cutiei de comandă cu claviatură (figura 10.2) în poziția I.

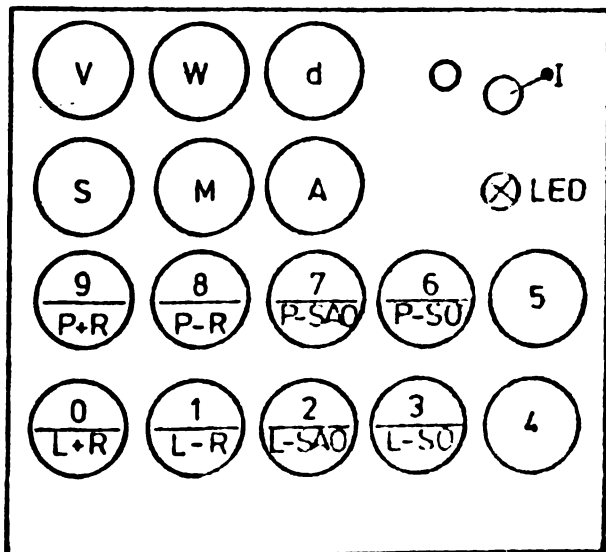


Figura 10.2. Cutia de comandă cu claviatură a postului de lucru.

De la cutia de comandă operatorul poate da următoarele comenzi :

a - deplasare liberă :

(d)(L+R) : deplasare liberă pe rază în sensul de la centrul spre Rmax.

(d)(L-R) : deplasare liberă pe rază în sensul de la Rmax spre centru

(d)(L-SA) : rotire liberă în sensul acelor de ceasornic

(d)(L-SAO) : rotire liberă în sensul invers acelor de ceasornic

b - ajustare controlată :

(z1)(z2)(d)(P+R) : ajustare controlată cu precizie de zecime de milimetru ( $z1 = \text{mm}$  și  $z2 = \text{mm} \cdot 10^{-1}$ ) pe rază în sensul de la centru spre Rmax. Pentru deplasări de 0,01 mm se acționează (d)(P+R).

(z1)(z2)(d)(P-R) : ajustare controlată cu precizie de zecime de mm pe rază în sensul de la Rmax spre centru. Pentru deplasări de 0,01 mm se acționează (d)(P-R).

(z1)(z2)(d)(P-SA) : ajustare controlată a rotirii în sensul acelor de ceasornic cu unghiuri din 6' în 6'. De exemplu  $z1 = 0$  și  $z2 = 5$ , deci (0)(5)(d)(P-SA) = rotire de 30'. Pentru deplasări de 3' se acționează (d)(P-SA)

(z1)(z2)(d)(P-SAO) : ajustare controlată a rotirii în sensul invers acelor de ceasornic cu aceleași posibilități ca cea anterioară.

c - controlul vitezei de rotație a motoarelor pas cu pas :

(z1)(z2)(V) : controlul simultan al vitezei de rotație tradus în viteză de deplasare pe rază și viteză unghiulară. De exemplu (0)(1)(V) asigură o viteză de deplasare pe rază de 1,75 mm/sec și 4,38°/sec viteză unghiulară, la (1)(5)(V) vom avea 2,5 mm/sec respectiv 6,25°/sec.

d - comanda START-STOP:

(S): la prima apăsare oprește orice mișcare în execuție

(S) : la a doua apăsare se reia mișcarea oprită sau se execută altă mișcare care este cerută de operator

e - stabilirea originii :

(d)(W) : prin această comandă după poziționarea elementului central al fasciculului în raport cu electrozii concentrici ai mașinii de sudat, se memorează poziția de zero în raport cu care se derulează programul de sudare.

f - funcționare automată :

(z1)(z2)(A) : desemnează aducerea în poziție de sudare a elementului cu numărul de identificare din fascicul (z1)(z2), după care prin comanda (A) se trece la următoarea poziție definită prin programul de sudare în mod automat. Această comandă permite automatizarea completă a sudării prin legarea în paralel pe comanda (A) a unui întrerupător acționat de ridicarea capului de sudare după executarea sudării. La terminarea execuției aducerii în poziție de sudare a elementului următor un semnal de ieșire dat printr-un releu intermediar comandă coborârea capului de sudare și execuția sudării, acest ciclu repetându-se pînă la sudarea elementului 37, după care se revine automat în poziția de zero.

g - funcționare manuală :

(z1)(z2)(M) : desemnează aducerea în poziție de sudare a elementului cu numărul de identificare dat prin (z1)(z2). Trecerea de la un element la altul, de exemplu de la elementul 34 la 17 (vezi figura 7.10 - pag.99) se execută pe drumul cel mai scurt.

Gama largă a posibilităților de comandă asigurată prin cutia de comandă cu claviatură de la postul de lucru oferă posibilitatea execuției în variantă manuală de sudări de asamblare și în altă ordine de sudare a elementelor decât cea stabilită prin program, situație necesară optimizării ordinii de sudare. În cazul în



care se impune tehnologic o altă ordine de sudare decât cea dată de programul existent în memorie, acesta este șters și înlocuit cu noul program.

10.3. Sistem de achiziție și prelucrare date pentru controlul parametrilor de lucru.

Pe baza temei de proiectare /146/, unitatea centrală de calcul va fi dezvoltată și completată cu noi blocuri funcționale pentru preluarea de informații referitoare la parametrii de sudare, stocarea, prelucrarea și tipărirea, înregistrarea sau vizualizarea datelor prelucrate. Schema bloc de automatizare în configurație maximă este prezentată în figura 10.3.

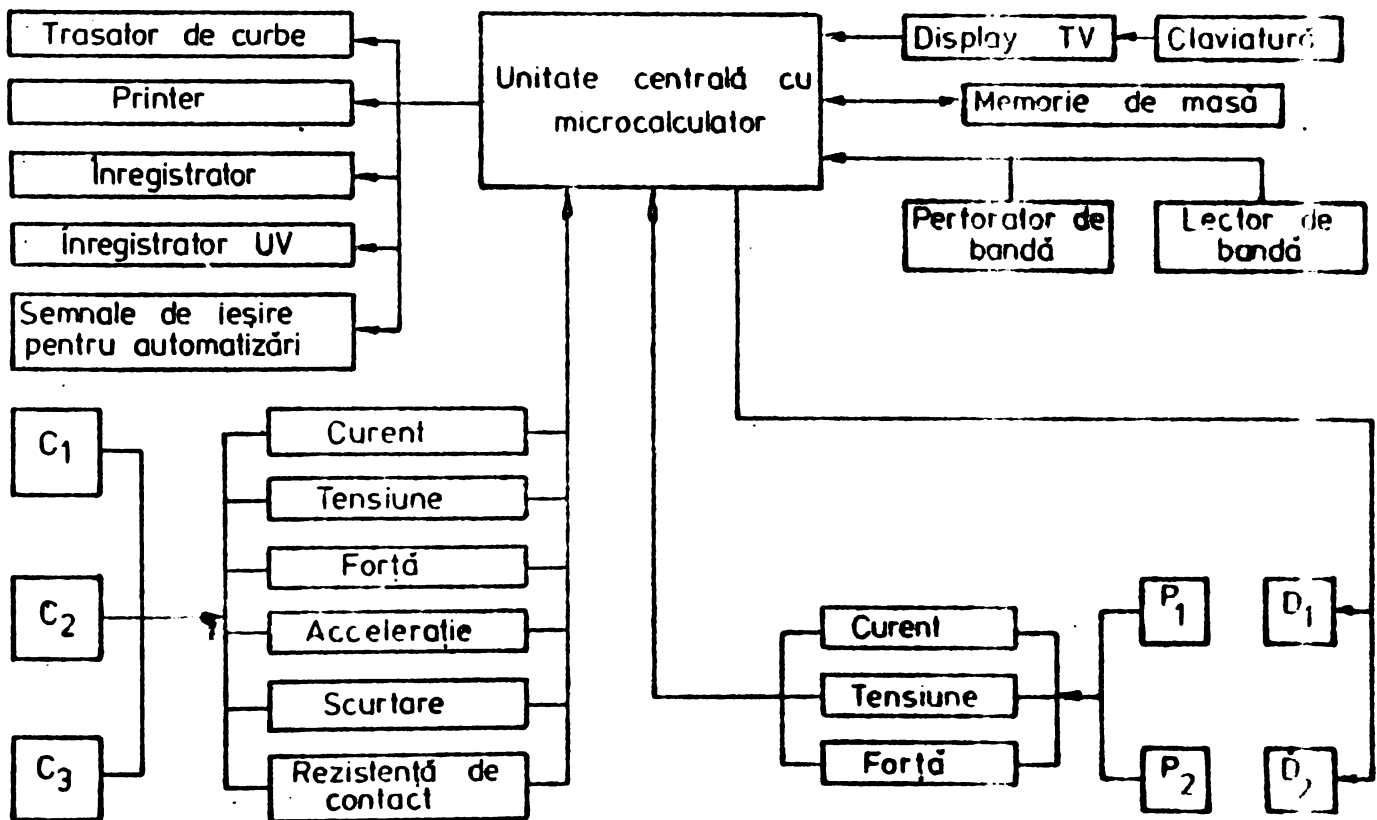


Figura 10.3. Schema bloc de automatizare și control a mașinilor de sudat prin presiune dop-tencă și dop-grilă în configurație maximă.

Avînd în vedere dotarea actuală și perspectiva imediat următoare, sistemul de achiziție și prelucrare date trebuie să deservescă simultan cinci mașini, trei tip C de sudare dop-teacă și două de tip P de sudare dop-grilă cu două dispozitive automate de poziționare D cu motoare pas cu pas. Transmiterea de informații de la mașinile de sudare la unitatea centrală se face prin traductoare și unități electronice intermediare astfel :

- curent : măsurat în circuitul secundar cu patru traductori Rogowski și un șunt
- tensiunea : cuplare directă pe circuitul secundar
- forța de sudare : traductori de presiune pentru mașinile C montați pe cilindrul pneumatic al capului de sudare cuplați pe punte de măsură și traductori de presiune piezoelectrice pentru mașinile P cuplați pe amplificatoare de încărcare.
- accelerația : traductori montați pe mașinile C și cuplați pe punte de măsură
- scurtarea : traductori inductivi montați pe mașinile C cuplați pe punți de măsură pentru determinarea scurtării pieselor la sudare.

Achiziția de date se face continuu și simultan de la cele cinci mașini. Prelucrarea datelor pe partea electrică impune ca pornind de la semnalele de intrare tensiune și curent de sudare să se calculeze  $U_s, I_s, U_{ef}, I_{ef}, P,$  și  $W$  ca valori maxime și medii pe durata unui ciclu de sudare, valorile respective fiind la cerere înregistrate pe printer. Mărimile de mai sus trebuie să poată fi calculate la cerere pentru oricare din semialternanțele ciclului de sudare, operația putînd a fi executată și succesiv pentru toate semialternanțele ciclului, valorile determinate pe fiecare semialternanță fiind tipărite la cerere. Pentru mărimile electrice, scurtarea și forța de sudare instalația de automatizare va asigura stocarea datelor prelucrate fiind capabilă să execute pe un interval de lucru ales analiza statistică a valorilor calculate pe tip de parametru și mașină, precum și compararea mărimilor similare între mașini de același tip, distribuțiile grafice rezultate din aceste analize putînd a fi vizualizate pe display - TV sau înregistrate la cerere pe trasatorul de curbe.

Măsurătorile de curent și tensiune pe durata unui ciclu de sudare trebuie făcute astfel încît să poată furniza la cerere diagrama  $I = f(t)$  și  $U = f(t)$  precum și scurtarea -  $f(t)$  pe display,

pe un înregistrator oscilografic de viteză mare sau de tip rapid cu hîrtie sensibilă la ultraviolete. Din considerente economice se solicită și posibilitatea de "dilatare" în timp a înregistrării unei diagrame, amplitudinea semnalului alegîndu-se din amplificatorul înregistratorului oscilografic de viteză mare, care utilizează hîrtie de înregistrare normală. Această funcție trebuie să fie asigurată concomitent pentru cele trei mașini C care constructiv sînt identice și separat pentru mașinile P, cu posibilitatea de comparare de exemplu a ciclului de sudare cu numărul 215 al mașinii C1, cu ciclul de sudare numărul 5 al mașinii C2 și ciclul de sudare cu numărul 1006 al mașinii C3, numărul de identificare al ciclurilor de comparat fiind determinat la cerere. Ca ieșire de înregistrare pentru un ciclu de sudare al oricărei mașini trebuie să fie asigurată posibilitatea de înregistrare simultană pe același înregistrator, a variației în timp a curentului de sudare, a tensiunii, a scurtării la sudare și a accelerației pentru mașinile C, precum și a forței de sudare.

Instalația de automatizare procese de sudare fiind concepută ca o instalație mixtă destinată cercetării precum și asigurării controlului în flux de fabricație va trebui să asigure prelucrarea imediată a mărimilor măsurate și anume : energia de sudare  $W$ , scurtarea la sudare, timpul de sudare în număr de semiperioade și al forței de sudare, compararea acestor mărimi pentru verificarea încadrării lor în limite prestabilite, la depășirea acestor limite trebuind să furnizeze semnale de ieșire pe relee intermediare pentru oprirea procesului de sudare la mașina la care a apărut abaterea sesizată. Pentru completarea posibilităților de utilizare a instalației de automatizare ca instrument de cercetare, se va prevedea posibilitatea de cuplare a unui aparat de tip miliohmetru pentru măsurarea rezistenței de contact, care funcție de necesități va fi cuplat pe oricare din cele cinci mașini.

Pentru asigurarea funcțiilor de mai sus, unitatea centrală va avea o memorie de masă pe unitate de casetă sau disc și display cu claviatură. De asemenea va fi prevăzută posibilitatea de cuplare a unui perforator și a unui lector de bandă, care oferă posibilitatea de programare dinamică a sistemului.

#### 10.4. Concluzii.

Abordarea realizării unui sistem de automatizare cu microcalculator care asigură și funcții de achiziții și prelucrare date pentru mașini de sudat prin presiune se înscrie ca realizare de prim ordin în acest domeniu la nivel mondial. Subansamblele realizate pînă în prezent și testate cu rezultate foarte bune, au permis abordarea proiectării unui sistem de configurație maximă prezentat anterior, cu posibilități de utilizare foarte largi, atît pentru cercetarea fundamentală a proceselor de sudare prin presiune cît și pentru producția de serie. Sistemul complet va fi funcțional la sfîrșitul anului 1981, în prima jumătate a anului 1982 urmînd a fi procurate unele subansamble standard de fabricație internă (printer și unitate de memorie de masă).

Preocupările în direcția utilizării microcalculatoarelor la controlul și automatizarea proceselor de sudare prin presiune vor continua pentru realizarea de asemenea unități pentru echiparea liniilor de fabricație a fasciculelor combustibile nucleare în curs de proiectare. În acest mod, se asigură controlul conform cu cerințele din Programul de Asigurare a Calității în tehnica nucleară, realizarea tehnică încadrîndu-se organic în efortul general de ridicare a calității, a automatizării și robotizării proceselor de fabricație în industria națională.

## 11. CONSIDERAȚII FINALE, CONTRIBUTII ORIGINALE SI PROBLEME DE VIITOR.

În prezenta teză sînt sintetizate lucrările din domeniul utilajului și tehnologiei de sudare a aliajelor de zirconiu, lucrări efectuate de către autor pe durata a 10 ani de activitate. Volumul de lucrări de cercetare tehnologică se ridică la 2600 suduri TIG, peste 12.000 suduri dop teacă și circa 10.000 de suduri dop-grilă. Sudarea aliajelor de zirconiu a fost abordată și studiată pentru prima oară în țară în cadrul IRNE. Lucrările în acest domeniu, referitoare la sudarea elementelor combustibile nucleare, prin rezultatele bune obținute au avut partea lor de contribuție la luarea deciziei de fabricație a combustibilului nuclear în licență, pe baza tehnologiilor și pe o linie de fabricație elaborată testată și omologată în IRNE. Valoric această reprezintă reducerea efortului valutar cu 15-17 milioane dolari USA pe o încărcătură pentru fiecare reactor nuclear al centralei electrice, valoare care anual la nivel mondial are o tendință de creștere cu 10%.

Pe baza lucrărilor efectuate se pot concluziona considerațiile finale, contribuțiile originale și problemele de viitor prezentate mai jos.

### 11.1. Considerații finale.

Referitor la sudarea aliajelor de zirconiu în fabricația elementelor combustibile nucleare, deși pe plan mondial preponderentă este sudarea TIG, se recomandă sudarea prin presiune deoarece :

- asigură o productivitate mare
- operarea instalațiilor se poate face cu personal de calificare inferioară
- asigură stabilitatea statică și dinamică a procesului de sudare în condițiile impuse prin Programul de Asigurare a Calității în domeniul nuclear
- sudarea prin presiune se pretează la o automatizare complexă și completă, putînd utiliza sisteme centrale de calcul cu microcalculatoare atît pentru funcțiile de automatizare cît și

pentru achiziție și prelucrare de date referitoare la parametrii procesului tehnologic, asigurînd astfel optimizarea de ansamblu a procesului.

- experiența cîștigată prin execuția de utilaje specializate de concepție proprie, care poate fi dezvoltată ținînd seama de mașinile standard intrate în fabricație curentă în țara noastră, permite să se considere ca posibilă echiparea viitoarelor linii de fabricație a elementelor combustibile nucleare cu echipamente de sudare prin presiune specifice, realizate în țară. O linie de fabricație de capacitate 400 tone U/an necesită un număr de patru mașini automate de sudare dop-teacă, cu valoare unitară de trei-336.000 \$ și șase mașini pentru sudarea dop-grilă de automatizare medie, cu valoare unitară de 84.000 \$, ceea ce înseamnă un total de 1.848.000 \$ preț la nivelul anului 1980, reprezentînd 22.176.000 lei. Se apreciază că echiparea cu utilaje realizate intern a acestei linii se poate executa în varianta : 8 mașini de sudat dop-teacă și 8 mașini de sudat dop-grilă. Toate aceste mașini au la bază utilajul de sudat în puncte tip PPOU-63 cu prețul unitar de 213.000 lei. Adăugînd costurile echipării suplimentare cu subansamble specializate realizate în IRNE, cu o valoare medie de 120.000 lei pe mașină, prețul total devine 5.328.000 lei.

## 11.2. Contribuții originale.

În partea I-a a tezei s-a arătat stadiul tehnologiei și al echipamentelor specifice referitoare la sudarea aliajelor de zirconiu, precum și unele probleme referitoare la fabricația combustibilului nuclear în contextul producerii energiei electrice în centrale echipate cu reactoare nucleare.

În partea a II-a a tezei sînt prezentate o serie de realizări originale în domeniul utilajului de sudare TIG și prin presiune, a tehnologiilor de sudare, a controlului calității și a mecanizării și automatizării proceselor tehnologice de fabricație la o producție de masă, realizări care constituie revendicări tehnico-științifice, dintre care se evidențiază :

### 11.2.1. În domeniul cercetării fundamentale.

- cercetări asupra dinamicii de mișcare a capului mașinii de sudat prin presiune a îmbinării dop-teacă prin măsurători de

acelerație, lucrări care au condus la concluzia că pentru asigurarea calității îmbinării sudate a elementului combustibil nuclear se recomandă ca o condiție de bază pentru mașinile de sudat prin presiune, echiparea lor cu capete de joasă inerție.

- studiul aplicării la sudarea în puncte pentru asamblarea fasciculelor combustibile nucleare a controlului prin emisie acustică, control în timpul procesului de sudare, lucrări care au demonstrat posibilitatea utilizării acestui tip nou de control în fabricația de serie.

- introducerea unităților centrale cu microcalculatoare în controlul și automatizarea proceselor de sudare prin presiune a elementelor și fasciculelor combustibile nucleare.

#### 11.2.2. In domeniul cercetării aplicative.

- studiul tehnicilor de sudare a aliajelor de zirconiu de tipul zircaloy-2 și zircaloy-4 și dezvoltarea procedurilor de sudare TIG și prin presiune în fabricația elementelor combustibile nucleare. Experiența dobândită poate fi utilă industriei pentru realizarea unor subansamble pentru reactorii nucleari în alcătuirea cărora intră aceste aliaje.

- conceperea, execuția și experimentarea cu succes a unei serii de camere de sudare TIG în atmosferă controlată de înaltă puritate și stabilirea tehnologiilor de lucru, menționând în special camera de sudare în heliu la 100 atm.

- studiul geometriei de asamblare dop-teacă pentru sudarea TIG și prin presiune, optimizarea proceselor și execuția a două loturi de elemente combustibile nucleare experimentale teste cu succes la iradiere în reactorii BR-2 Belgia și MZFR RFG.

- studiul sudării prin presiune a îmbinării dop-teacă și dop-grilă pentru fascicule combustibile cu 28 și 37 elemente, realizarea primelor fascicule la nivel de laborator și a două serii de fabricație la nivel de pilot industrial.

- elaborarea și omologarea tehnologiilor de sudare prin presiune pentru fasciculele combustibile destinate primei încărcături a centralei electrice nucleare Cernavodă - 1.

- elaborarea instrucțiunilor tehnologice, a manualului de fabricație și a normelor de control specifice pentru îmbinările sudate în vederea execuției lotului de fascicule destinate omologării prin teste în afara reactorului și în reactor.

- studiul metalografic al zonei sudate dop-teacă și an-

liza prin microscopie electronică a zonei nesudate.

- conceperea și executarea unei game largi de SDV-uri speciale, menționând capul de sudare cu electrozi concentrici și dispozitivul de asamblare destinate sudării de asamblare în puncte a fasciculelor combustibile.

- studiul și optimizarea metodelor de control în timpul procesului la sudarea prin presiune, introducerea controlului prin emisia acustică și a sistemelor cu microcalculatoare.

- elaborarea pe baza experienței acumulate și a studiului posibilităților actuale a temelor tehnice referitoare la execuția de echipamente de sudare prin presiune specifice de concepție și construcție internă.

- realizarea a două instalații specifice fabricației de elemente combustibile, pentru retezarea tuburilor de zirconiu și pentru grafitarea interioară a tuburilor, brevetate cu nr. 75.417 respectiv 73.908, fiind în curs de elaborare cererile de brevet de invenție pentru un număr de 6 instalații și dispozitive.

- întocmirea temei de proiectare pentru atelierul de fabricație fascicule din cadrul Secției de Producție a Elementelor Combustibile, elaborarea temelor de proiectare pentru utilajele și SDV-urile specifice în vederea executării acestora în IRNE.

### 11.3. Probleme de viitor.

- coordonarea execuției și experimentarea sistemului de achiziție și prelucrare date pentru controlul parametrilor procesului de sudare prin presiune.

- finalizarea în 1981 a unei instalații experimentale de sudare dop-teacă de concepție proprie, în vederea asimilării în fabricație a acestora.

- continuarea studiului aplicării controlului nedistructiv prin emisie acustică ca un control de proces.

- studiul sudării TIG a oțelurilor inoxidabile pentru realizarea elementelor combustibile experimentale pentru reactorii nucleari cu plutoniu.

- finalizarea studiului distribuției câmpului termic la sudarea de asamblare dop-teacă, cercetare fundamentală cu aplicații practice directe, considerată ca o premieră pe plan mondial.



## ANEXA I.

### TEHNICA DE LUCRU LA PREGATIREA PROBELOR PENTRU CONTROLUL METALOGRAFIC AL ALIAJELOR DE ZIRCONIU.

#### 1. Tăierea probelor

Tăierea cu disc abraziv, răcit intens, a tuburilor de zirconoy, a barelor și a îmbinărilor sudate se utilizează pentru prelevarea de probe pentru lucrările curente. Pentru lucrări pretențioase de studiu este indicată secționarea probelor prin electroeroziune.

#### 2. Inglobarea probelor

Se recomandă înglobarea în rășini termoplastice deoarece înglobarea la rece în rășini de tip formaldehidice prezintă o contracție accentuată la solidificare, spațiile libere rămase permit acumularea de reziduuri de gelifuire, solvenți și soluții de atac, influențând negativ examenul metalografic.

#### 3. Slefuirea mecanică

Se execută fără dificultate pe hârtie abrazivă de la 340 la 600 sau și 800. Se va evita o apăsare exagerată pe hârtia abrazivă care durifică inutil suprafața probelor, îngreunând gelifuirea.

#### 4. Atacul chimic

Atac tampon (swabbing) - atacarea se execută cu un tampon de vată îmbibat în soluție de atac. Tamponul se trece la prima mișcare pe întreaga suprafață a probei, în continuare frecându-se ușor suprafața probei pe toată durata de atac. /144/

Soluțiile de atac recomandate prin ASTM E 407-70, E 2-62 și E 304-68 pentru aliajele de zirconiu sînt:

- a. - 30 ml HF, 15 ml HNO<sub>3</sub>, 30 ml HCl - atac tampon 3-10 sec. sau imersie 1,5-2 min.
- b. - 5ml HF, 95 ml apă distilată - atac mecano-chimic pentru examinare în lumină polarizată

- c.-10 ml HF, 45 ml  $\text{HNO}_3$ , 45 ml apă distilată-atac tampon, 5-20 sec.
- d.-5 ml HF, 2 ml  $\text{AgNO}_3$  5%, 100 ml apă distilată-atac tampon, 10-60 sec.
- e.-3,5 ml soluție preparată din 5g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 50$  ml  $\text{HCl}$  densitate 1,19 la  $15^\circ\text{C}$ , 5 ml apă distilată, 1 picătură HF-atac tampon 2-3 min. Se utilizează și ca atac pentru figuri de coroziune la timp de atac de 10 min.
- f.-10 ml apă oxigenată, 4 picături HF, 3 picături Nitaf 10%-atac tampon 2-3 min.
- g.-100 ml apă distilată, 50 ml  $\text{HCl}$  37%, 5 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 2 picături HF-atac tampon 3-6 min.
- h.-5 ml acid acetic, 1 ml HF, 12 ml apă distilată, 8 ml apă oxigenată-atac tampon 1-2 min.
- i.-45 ml  $\text{HNO}_3$  concentrat, 8-10 ml HF 48%, 45 ml glicerină-atac imersie 5-10 sec. după apariția vaporilor
- j.-45 ml apă oxigenată, 45 ml  $\text{HNO}_3$  concentrat, 8-10 ml HF 48% atac tampon pentru aliajele de zirconiu bogat aliat; atac macrostructural pentru zircaloy.
- k.-40-45 ml  $\text{HNO}_3$ , 40-45 ml apă distilată, 10 ml HF-atac tampon 10-20 sec; atac macrostructural pentru zircaloy
- l.-45 ml glicerină dublu distilată 87%, 45 ml  $\text{HNO}_3$ , 7 ml HF-atac tampon 30-60 sec.
- m.-25 ml acid lactic  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ , 25 ml  $\text{HNO}_3$ , 3-4 picături HF-atac imersie după atacul "l" timp de 10-15 sec.; atac pentru punerea în evidență a hidruților.

ANEXA II

LISTA PRESCURTĂRIILOR UTILIZATE ÎN TEXTUL TEZEI

1. AECL - Atomic Energy of Canada Limited
2. AIEA - Agenția Internațională de Energie Atomică - Viena
3. ASTM - American Society for Testing and Materials
4. ANL - Argonne National Laboratory - USA
5. ASM - American Society for Metals
6. AWS - American Welding Society
7. b-barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>, unitate ISO de măsură a secțiunii eficace de captură
8. BNES - British Nuclear Energy Society
9. BNWL - Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Washington
10. BR-2 - Belgian Reactor-2
11. BWJ - British Welding Journal
12. BWR - Boiling-Light-Water-Cooled Power Reactor
13. CANDU - CANadian Deuterium Uranium
14. CEA - Comisariatul de Energie Atomică (Franța)
15. CNE - Centrală Nucleară Electrică
16. CNEN - Comisia Nucleară de Energie Nucleară (Italia)
17. EA - Editura Academiei (la bibliografie)
18. EA - Enciclopedie Acustică (în capitolul 9)
19. e.c.n. - element combustibil nuclear
20. EP - Editura Politică
21. ES - Editura Științifică
22. ET - Editura Tehnică
23. f.c.n. - fascicul combustibil nuclear
24. GCR - Gas-Cooled Power Reactors
25. G.t.c.c. - Giga-tonn combustibil convențional
26. WY - Sandford Atomic Production Operation - Washington, DC
27. IAEA - International Atomic Energy Agency - Viena
28. ICENIZ - Institutul Național de Cercetări Atomice - București
29. IAEA - IAEA - Agenția Internațională de Energie Atomică - Viena (în Colectivul de referințe)
30. IRIS - Institutul Național de Cercetări Atomice - București
31. IEN - Institutul Național de Energie Nucleară
32. MFR - Material Research Reactor - MVR

- 33. Mw x zi/t-Mega-wați x zi pe tonă de combustibil nuclear, unitate de măsură a gradului de ardere în reactor, cu submultiplu Mw x h/Kg
- 34. MIL-STD-Military Standard-USA
- 35. Mwe -Mega-wați electrici
- 36. PAC -Program de Asigurare a Calității
- 37. PHWR-Pressurized Heavy Water Moderated Power Reactor
- 38. p.p.m.-părți pe milion
- 39. PWR -Pressurized Light
- 40. SCK/CEN-Centre d'Etude de l'Energie Nucleaire-Mol, Belgia
- 41. WJ -Welding Journal-USA

LISTA PRESCURTARILOR UTILIZATE IN CAPITOLUL 10.

- 42. ADR-Aдресă
- 43. BCLK-Bus Clock; ceasul busului-generator de frecvență bază de timp
- 44. BUS-abrev. eng.-bus bar; bară colectoare; în tehnica de calcul; magistrală de date, totalitatea conexiunilor și a firelor de legătură
- 45. Buffer-circuit intermediar de amplificare a semnelor care ies sau intră pe BUS
- 46. BUS-MASTER-funcționare a microcalculatorului drept controlor de sistem, situație în care trimite date pe BUS și primește date la cerere
- 47. BUS-SLAVE-funcționare a microcalculatorului subordonat unui alt calculator în funcționare BUS-MASTER, primind date dinspre BUS
- 48. CRT-Cathode Ray Tube, monitor de televiziune
- 49. DMA-Direct Memory Access, acces direct la memorie
- 50. HARD-partea fizică a unui calculator
- 51. IBF-Input Buffer Full, semnal complet de intrare pentru buffer
- 52. LED-Light Emission Diode, diodă luminescentă
- 53. LSI-Large Scale Integration, integrare pe scară largă
- 54. PORT-poartă de intrare conținută pe un singur integrat LSI; PORTUL X, definește poarta X de intrare pe BUS

- 55. PROM-Programable Read Only Memory, memorie fixă programabilă
- 56. RAM-Random Acces Memory, memorie cu acces aleatoriu
- 57. RESET-punere la zero a ansamblului general, după care se dă o nouă comandă.
- 58. SOFT-partea de program a calculatorului
- 59. STB-Strobe, impuls de validare al unei comenzi de intrare, etc.

B I B L I O G R A F I E

1. IANCU A. - Creșterea economică și resursele naturale, EP, București, 1970
2. FLORESCU M. - Resursele mondiale și limitele lor, EP, București, 1975.
3. x x x - Potenze electronucleare. Situazione all'inizio del 1977 e previsioni di sviluppo, Notiziario, anno 23, n. 6, 1977, pag. 38.
4. RURIK K. - Future trends in nuclear power, IAEA bulletin, vol. 19, no. 4, 1977.
5. x x x - Uranium supply and demand, IAEA bulletin, vol. 20, no. 1, 1978.
6. URSU I. - Energia atomică, ES, București, 1973.
7. GRIEGER G., PALUMBO D. - Le role de la fusion dans l'avenir de l'energie nucleaire, un point de vue European, IAEA-CM-36/473, 1977.
8. x x x - Directory of nuclear reactors, vol. IX, Vienna, 1971.
9. DANILA N., - Centrale nucleare-electrice, EA, București, 1973.
10. PUNDUCEA C. și a. - Centrale nucleare-electrice de putere mare, ET, București, 1974.
11. GALEFIIU A.C. - Îmbinări și structuri sudate pentru centralele nucleare, referat doctorat, Timișoara 1976.
12. HUGH C. Mc. - Intyre-Reactori a uranio naturale et aque presante, Notiziario, no. 4, 1976.
13. MOON C.L. - Pickering generating station, Nucl. Eng. Int., vol. 15, no. 169, 1970.
14. ROBERTSON J.A.L. - Improved performance for  $UO_2$  fuel, AECL-4366, 1973.
15. BEYNAN E.C. - The Pickering nuclear generating station, AECL-2214, 1965.
16. CASA A.F., și c., - L'energie nucleare nel Canada, Notiziario, no. 12, 1973.
17. MORISON W.C. - Progress report on the Pickering generating station, AECL-2553, 1963.
18. KEYS D.A. - Atoms at your service, AECL-4127, 1972.

19. HOYWOOD L.R. - Nuclear power in the next decade and AECL's program to meet it, AECL-3911, 1971.
20. WAITE G. - Capital investment of nuclear power plants, IAEA, vol. 20, no. 4, 1978.
21. FOSTER J.S., RUSSELL S.H. - CANDU-Canadian experience and expectations with the heavy water reactors, IAEA-CN-36/179, 1977.
22. ALECU M., GHEATA V., PASCU A., GEORGEONI P., GALERIU A.C. și a. - Elemente combustibile pentru centrala nucleare-electrică de 600 Mwe cu uraniu natural și apă grea. Program de cercetare dezvoltare, 1977-1982, IRNE-RI, 1977.
23. x y x - Directory of nuclear reactors, vol. X, IAEA, 1976.
24. SAUTERON J. - Les combustibles nucléaires, Hermann-Paris, 1975.
25. WENT J.J. - Status and prospects of thermal breeders, IAEA-NL-302, 1977.
26. ALECU M., GALERIU A.C., GORCINSKI C. - Tehnologii de sudare pentru elemente combustibile nucleare întecuite în oțeluri inoxidabile, IFA-ECS-ool-București, 1971.
27. x x x - Reactor handbook, vol. IV, ANL, USA, 1954.
28. x x x - Directory of nuclear reactors, vol. VII, IAEA, 1968.
29. EWAN Mac J.R. - Irradiation experience with fuel for power reactors, IAEA conf. 49/P/153, 1971.
30. PANJOV G.R., BOIN A.S. - Pickering, fuel and fuel cycle, Fuel. Eng. Int., vol. 15, no. 169, pag. 514, June 1970.
31. PAGE R.D. - Engineering and performance of Canada's  $UO_2$  fuel assemblies for heavy-water reactors, IAEA conf. SW 99/48, 1967.
32. PAGE R.D. - Canadian power reactor fuel, AECL-5609, 1976.
33. KRANER W.C., și a. - Vanadium alloy screening studies and fabrication of V-Ti-Cr tubing for Nuclear fuel cladding, ANL-7206, 1966.
34. NADLER G.A., SVEDBERG R.A. - Vanadium alloy cladding development, WARD-7701-47, 1970.
35. HOPFS M., FORNIE S., SARI C., SCHUMACHER G. - Oxidation of vanadium alloy cladding material in contact with mixed oxide fuel, kerntechnik, no. 8, pag. 347, 1972.
36. x x x - Génie atomique, tome IV, 1965.
37. ENGLANDER M. - The development of metallic fuel elements for the French power industry, BNES vol. 6, no. 1-4, 1967.

38. CHEADLE F.A. - Introduction to the physical metallurgy of zirconium alloys, CRNL-128, pag.1, 1974.
39. INTASH Mc A.B., și a. - Material for nuclear engineers, Temple Press Ltd., London, 1968.
40. SEREPRINSKY J.H. - Propriedades físicas del circonio, TE/1-27 Buenos-Aires, 1970.
41. DOUGLASS D.L. - The metallurgy of zirconium, IAEA, 1971.
42. x x x - Metals handbook, vol.1, ASM-USA, 1968.
43. TOVLOUKIAN Y.S. - Thermophysical properties of high temperature solid materials, vol.1, New York, 1957.
44. COLEMAN C.F., și a. - Zirconium alloy fuel cladding, CRNL-1208, pag.116, 1974.
45. CHEADLE B.A. - The microstructure and mechanical properties of zirconium alloy, CRNL-1208, pag.21, 1974.
46. ARMOND M. - Les alliages de zirconium et leurs transformations, IX-c Colloque de Metallurgie, 1965.
47. HATT F.A., ROBERTS J.A. - The omega phase in zirconium base alloys Acta Metall., no.8, pag.575, 1960.
48. Coriu H. - La corrosion aqueuse dans les installations nucleaires, Ind. Atom. & Spatiales, no.2, pag.11, 1972.
49. ELLS C.F. - Behaviour of hydrogen in zirconium and its alloys, CRNL-1208, pag.67, 1974.
50. LUNDE K., NORDENG S. - Control and test certificate-lot no.3/11, AEG-Telefunken, 1971.
51. SUTHERLIN R.J. - The test report, rod & sheet Zy-4, Telodine-Wah Chang Albany, 1973.
52. x x x - Reactor core components, Sandvik 4,00E, pag.4, 1972.
53. x x x - Recherche sur le soudage des alliages de zirconium, Revue de la soudure, no.2, pag.86, 1967.
54. SCHNEIDER G. - Schweissverfahren bei der brennstabherstellung, Kerntechnik, no.1, pag.18, 1969.
55. GALERIU A.C. - Procedee de sudare a îmbinărilor pentru reactori, referat doctorat, Timisoara 1977.
56. x x x - Welding handbook, 6-th edition, section 5, AWS-1973.
57. WILKINSON W. - Arc and metal transfer characteristics with MIG welding zirconium, Metal constr. and RWJ, no.7, pag.220, 1974.
58. x x x - Metallurgy and fuels, vol.2, pag.148, 1959.



59. SLAUGHTER C.M., - Welding and brazing techniques for nuclear reactor components, 1964.
60. ALBERTINI C., și a. - Soudure par explosion des bouchons des elements combustibles pour reactors rapides, EURATOM-ISPRA, 1970.
61. ZURN H. - Schweisstechnische Beispiele aus dem Atom-Reaktorbau, Schweisstechnik, no. 10, pag. 333, 1966.
62. GALERIU A.C. - Mecanizarea și automatizarea proceselor de sudare TIG(WIG) a elementelor combustibile nucleare, referat doctorat, Timișoara, 1977
63. WHITE D., WOODACRE A., TAYLOR A. - Advances in automatic welding control, Atom, no. 195, pag. 20, 1973.
64. MELVIN J.G. - A welding technique for experimental zircaloy endcap closures, NEI-67, 1956.
65. PESSE R., PAGES M. - Soudure du zirconium et ses alliages sous atmosphere conditionnee, CFA-1828, 1961.
66. SPALARIS C.N., WEYERS J.W. - Welding of fuel and controls, WJ, no. 3, pag. 760, 1959.
67. LEMON L.C. - End closure for plutonium bearing zircaloy-2 clad fuel elements, HW-60910, 1959.
68. LEMON L.C., ROSS T.W., POILEY W.J. - Welding plutonium containing fuel elements, WJ, no. 10, pag. 347, 1964.
69. SOVIK H.R. - Programmed welding of end plugs to fuel canning tubes, VIII-Congresso Nucleare, pag. 211, 1963.
70. ROCCALARI M., și a. - Le attività del CERN a Saluggia per la fabbricazione dei combustibili nucleari, Notiziario, no. 8-9, pag. 46, 1971.
71. AMATEI I., CARENA G. - Some developments in the end closure welding technology for zircaloy clad fuel rods, Energia Nucleare, vol. 17, no. 4, pag. 234, 1970.
72. BOOLEN B.F. - Magnetic force welding applications at Battelle Northwest, BNWL-492, 1967.
73. SCHUELER A.W. - Magnetic force butt welding for nuclear cladding, WJ, no. 3, pag. 633, 1969.
74. GALERIU A.C., GALERIU D. - Punerea în funcție și probele tehnologice ale mașinii de sudare prin rezistență electrică a dopurilor, ITW-RI-121/IV, București, 1974.

75. MILLS L.E. - Zircaloy welding techniques developed for plutonium recycle program  $UO_2$  fuel element fabrication, WJ, no. 2, pag. 141, 1961.
76. x x x - Method for seal welding of nuclear reactor fuel elements, Kerntechnik, no. 6, pag. 88, 1964.
77. GALERDU A.C. - Considerații asupra formării bavurilor funcție de geometria îmbinării la sudarea prin rezistență a îmbinării dop-teacă a elementelor combustibile nucleare, Sesiune ICF-București, sept. 1974.
78. MILLS L.E. - Magnetic-force resistance butt welding of zircaloy-2 fuel element closures, HW-62482, 1959.
79. MILLS L.E. - Magnetic-force welding sintered aluminium powder materials, HW-72379, 1962.
80. WATTEAU M. - Contrôles non destructifs mis en oeuvre lors de la fabrication des éléments combustibles, IAEA-145, 1972.
1. BARTES K.T. - Resistance welding of zircaloy end closure joints, AECL-2214, 1966.
  2. GORCINSKI C., GALERDU A.C. - Proiect de loo. Publicația IFA anul VII, nr. 1, 1971.
  3. GORCINSKI C., GALERDU A.C. - Instalație de sudare în arșon cu electrod de wolfram, cu comandă program și curent modulată. Cursul de perfecționare în domeniul sudurii, vol. 5, 1971.
  4. GORCINSKI C., GALERDU A.C. - Instalație de sudare MIG Proiect de loo, proiectare și execuție prin autodotare, Sesiune de Comunicări Științifice a Academiei Militare, 1972, 16-17 mai, București.
  5. GALERDU A.C., GORCINSKI C. - Purificarea argonului indigen pentru sudarea metalelor reactive. Sesiune de Comunicări Științifice a Academiei Militare 1972, 16-17 mai, București.
  6. PALLY I., CRISTU I., POPESCU C. - Determinarea impurităților în argonul tehnic, IFA-III, 1971.
  7. GALERDU A.C., GALERDU P. - Proiect tehnic pentru instalație de introducere gaze în elemente combustibile, 1974, Pitești.

88. GALERIU A.C., GALERIU D. - Dispositiv și procedeu de sudare TIG sub presiune de gaz inert la 50 atm. pentru închiderea elementelor combustibile, IRNE-RI 555/1-1979.
89. GALERIU A.C., GALERIU D. - Stabilirea parametrilor și elaborarea specificațiilor tehnice destinate sudurii TIG în pilot a barelor combustibile, ITN-RI 233/3 /IV.1974.
90. HENION P. - Programatie standard, mode d'emploi, Lyon.1975.
91. GHEATA V., SABAU C., GALERIU A.C. și a. - Realizarea și evaluarea calității sudurilor pe oțel inoxidabil și zircaloy, ITN-RI 7/IV 1971.
92. ALECU M., GALERIU A.C., GORCINSKI C., SABAU C. - Cercetări de reproductibilitate a parametrilor tehnologici și instalației de sudare cu arc electric în atmosferă de argon, ITN-RI 20/IV 1972.
93. GALERIU A.C., GORCINSKI C. - Realizarea unui model de element combustibil cu pastile de  $UO_2$  în teacă de zircaloy, ITN-RI 6/IV 1971.
94. GALERIU A.C., GALERIU D. - Închiderea prin sudare TIG a barelor destinate încercării la iradiere Seria I-a. ITN-RI 178/IV 1973.
95. GALERIU A.C., GALERIU D. - Realizarea a 6 bare combustibile experimentale pentru încercări la iradiere, ITN-RI 224/IV, vol.1, 1974.
96. GALERIU A.C., GALERIU D. - Proiect tehnologic pentru un model de fascicul combustibil cu 7 bare, ICFIZ Sesiunea de Comunicări Stiintifice 1974.
97. GALERIU A.C., GALERIU D. - Stabilirea parametrilor și elaborarea specificațiilor tehnice destinate sudurilor TIG în pilot a barelor combustibile, ITN-RI 224/IV, vol II, 1974.
98. GALERIU A.C., GALERIU D. - Bară combustibilă experimentală cu  $UO_2$  întecuită în zircaloy destinată încercărilor la iradiere, ITN-RI 127/IV 1975.
99. x x x - The Romanian experimental fuel rods for MZFR irradiation - Acceptance test qualificated - Test reports ITN 1976.

100. GHEATA V., GALERIU A.C., DOBOS I., GLODEANU F. - Experience gained in the fabrication of experimental fuel rods with natural uranium and zircaloy-4 cladding for irradiation experiments, ATEA-SM-233/41 nov.1978, Praga.
101. ALECU M., GALERIU A.C., GHEATA V., SABAU C., DOBOS I. - Realizarea barelor experimentale pentru iradiere în BR-2 și MZFR, Sesiunea de Comunicări Stiințifice IRNE dec.1977.
102. ALECU M., GHEATA V., SABAU C., GALERIU A.C. și a. - Realizarea a 6 bare martor pentru avizarea raportului de securitate în reactori BR 2 și MZFR, ITN-RI 270/IV 1975.
103. x x x - Specification of the Romanian experimental fuel rods for MZFR irradiation ITN, 1975.
104. GORCINSKI C., GALERIU A.C., GALERIU D. - Influenta diferitelor parametri de sudare asupra pătrunderii și modificării structurii. Influenta jocurilor și toleranțelor asupra calității sudurilor, ITN-RI 51/IV vol.I, 1972.
105. GALERIU A.C., GALERIU D. - Defecte posibile ale sudurilor la asamblarea TTG a elementelor combustibile, Sesiunea de Comunicări Stiințifice a Institutului Central de Fizică, 1974.
106. PAPELEUX P. - Etude de soudage sous pression, Resultats des experiences entreprises par le Groupe Mixte Plutonium SCK/CEN - Bergonucleaire 500.000/354 'n/200 Sch, 1972.
107. x x x - Welding Systems for tomorrow's technology. Condensed catalog Merrich Engineering Inc. Nashville Tennessee, USA, 1978.
108. x x x - Welds in pressurized helium, Welding Journal, vol.57, no.3, march 1978.
109. GALERIU A.C., GALERIU D. - Punerea în funcție și probe tehnologice ale mașinii de sudat prin rezistență electrică a dopurilor, ITN-RI 191/IV, 1974.
110. GALERIU A.C. - Proiect tehnic pentru subansamblul de electrozi coaxiali destinat operației de sudare prin puncte pentru asamblarea fasciculelor combustibile, Sesiunea de Comunicări Stiințifică ICFIZ, 1974.

111. GALERIU A.C., FULEA N., ILIE N., GALERTU D. - Elaborarea tehnologiei de asamblare. Verificarea ei prin execuția unui model de fascicul tip, PHWR, ITN-RI 365/IV/2, 22.11.1976.
112. GALERIU A.C. - Considerații asupra formării bavurilor funcție de geometria îmbinării la sudarea prin rezistență a îmbinării cōp-teacă a elementelor combustibile nucleare. Academia Militară, Sesiunea Jubiliară de Comunicări Stiintifice 12-13 sept. 1974.
113. x x x - Report on testing of dummy rods - Technical Note 81/7080/07/PD-CEN/SCK-Mol Belgia 7.1.1976.
114. x x x - Report on testing of the fuel rods - Technical Note 81/7080/12/PD-CEN/SCK-Mol Belgia 28.6.1976.
115. x x x - The Romanian experimental fuel rods for irradiation in the BR-2 reactor, Belgium ITN december 1975, Bucharest.
116. GALERIU A.C., GALERIU D. - Verificarea reproductibilității și definitivarea procesului tehnologic de fabricație la nivel pilot a barelor combustibile tip PHWR, cap. II, ITN-RI 365 /IV/1 nov. 1976.
117. GALERIU A.C., GHEATA V., GALERIU D., CABAU C. și a. - Fabricarea a trei fascicule și 10 elemente combustibile tip PHWR pentru verificarea tehnologiilor, IRNE-RI 443/1 nov. 1977.
118. GALERIU A.C., GEORGEONI P. - Proiect de tehnologie pentru fasciculul de 28 de elemente combustibile IRNE 1978.
119. GALERIU A.C., GALERTU D. - Considerații asupra caracteristicilor geometrice ale electrozilor mașinii de sudare prin rezistență a elementelor combustibile nucleare, Sesiunea de Comunicări Stiintifice IRNE 1978.
120. GEATA V., ALECU M., GALERIU A.C., și a. - Analiza statistică a datelor sudurilor și brazurilor prin examinarea distructivă a trei fascicule tip PHWR-650 IRNE-RI 546/1 15.6.1979.
121. ALLEN V.H., SHAREY.Ș.R.I., STIRLING A.J. - The development of irradiated fuel bundle counters for 600 MWe CANDU reactor safeguards systems AECL 6209 july 1978.

122. MIRION I., GEORGEONI P., GALERIU A.C. și a. - Documentație pentru omologarea tehnologiei de fabricație a elementelor combustibile pentru reactorii de putere cu uraniu natural și apă grea - Sinteză - IRNE-RI 24.4.1979.
123. ALECU M., GALERIU A.C., HAVRIS C., NICOLESCU I., GALERIU D., GHEATA V., și a. - Fabricarea a 20 fascicule și 100 bare combustibile pe baza proiectului și a tehnologiei elaborate. IRNE-RI 514 dec.1978.
124. GALERIU A.C., GALERIU D., HAVRIS C., NICOLESCU I. - Execuția a 29 elemente combustibile nucleare pentru testele neutronice în RIM-IRNE-RT 15.09.1978.
125. x x x - Elaborarea proiectului de tehnologie pentru Secția de Producție de Elemente Combustibile IRNE-RI vol.I-IV, iunie 1978.
126. GHEATA V., FULEA N., DUGAN M., GALERIU A.C., și a. - Elaborarea programului de asigurarea calității pentru fabricația în pilot a fasciculelor combustibile de 37 bare. Manual de Fabricație IRNE-RT 469/I/3/2.1978.
127. GALERIU A.C., VLADOI I., MANOIU I. - Mașină de retezat tuburi. Cerere de brevet OSIM 94351, 14.06.1978.
128. ALECU M., POPA I., GALERIU A.C. - Instalație de depunere grafit Cerere de brevet OSIM 94484, 28.06.1978.
129. ALECU M., GALERIU A.C., DUGAN M., POPA I. - Realizarea instalației experimentale și punerea la punct a tehnologiei de grafitare a tecilor IRNE-RT 458/1978.
130. ALECU M., DUGAN M., GALERIU A.C., NICOLESCU I., GALERIU D. - Stabilirea tehnologiei de uscare a tecilor grafitate, IRNE-RI 511/3 1978.
131. x x x - CANDU 600 - AECL - September 1975.
132. PRICE E.G., RICHINSON P.J. - Thin - Walled large diameter zirconium alloy tubes in CANDU reactors AECL 6345.
133. POPESCU I., TURCU E. - Energia încotro ? Scrisul Românesc 1978.
134. RADULET R., GEORGESCU A., și a. - Perspective de dezvoltare a energiei. ET, 1974.
135. TULPAN I. - Elemente calitative în dezvoltarea economico-socială a României, Revista Economică nr.48, nov.1979.

136. GHEATA V., GALERIU A.C., NANESCU F. - Studiul efectului tratamentului termic final al tuburilor de zircaloy-4 asupra proprietăților mecanice determinate prin încercare la explozie (Burst test) și fluaj (240 ore). IRNE-RI 625, 1979.
137. KOLLSTROM K., ANDERSON T., HOFVENSTAM A. - Creep strength of zircaloy tubing at 400°C as dependent on Metallurgical structure and texture, ASTM SP 551, 1974.
138. x x x - Data base for a CANDU - PHWR operating on a once-through natural uranium cycle - /INCE/EG2/CAN/DOC 2/- AECL-6593, 1979.
139. GALERIU A.C., GALERIU D., GROZA I., și a. - Fabricația a 35 fascicule tip PHWR-650, IRNE-RI 631 dec. 1979.
140. x x x - Manualul inginerului HÜTTE, vol. I, ET, 1949.
141. x x x - Model 800 acoustic emission adaptive spot weld control system, Trodync Corp., New Jersey 1972.
142. GALERIU A.C. - Procedee de control a calității îmbinărilor sudate prin presiune în cursul procesului de sudare. Referat doctoral, Timișoara 1977.
143. DASCALU E., COTOC., I., GALERIU A.C. și a. - Controlul sudurilor dop-grilă la fasciculele combustibile prin emisii acustice IRNE-RI 631 dec. 1979.
1144. GHEATA V., DOBOS I., SABAU C., ș.a. - Stabilirea tehnologiilor de lucru pentru controlul metalografic, controlul porozității și analiza conținutului de gaze ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ) în semifabricatele de zircaloy. IRNE-RI-118/IV, 1973
145. GALERIU A.C. - Temă de proiectare pentru sistem de poziționare automată cu microcalculator. IRNE-1979
146. GALERIU A.C. - Temă de proiectare pentru sistem de achiziții și prelucrare date la sudarea prin presiune. IRNE-1980
147. PATRICIU C., RADU Ghe., VULPOIU P. - Cutie cu sursă modulară. IRNE-RI-764/6, 1980, Pitești
148. NEAGU V. - Calculator Superbus. IRNE-RI-764/1, 1980, Pitești
149. NEAGU V., DANES E. - Consola Superbus. IRNE-RI-764/5, 1980, Pitești
150. NEAGU V., RADU Ghe. - Modul concentrator comenzi și acționări motoare pas cu pas. IRNE-RI-764/3, 1980, Pitești

C U P R I N S

Introducere ..... 0

PARTEA-I-a

Cap.1 Energetica nucleară pe plan mondial ..... 5

Cap.2 Producerea energiei electrice în centralele nucleare: 7

2.1. Reactori și centrale electrice nucleare ..... 7

2.2. Situația cercetărilor pe plan mondial referitoare la centralele PHWR-CANDU .....12

2.3. Combustibilul nuclear .....17

2.4. Elemente combustibile nucleare (e.c.n.) generalități .....17

2.5. Concluzii .....22

Cap.3 Materiale utilizate la întocuirea combustibilului nuclear.....23

3.1. Aluminiul și aliajele sale .....23

3.2. Aliaje de magneziu .....27

3.3. Oțeluri inoxidabile .....23

3.4. Zirconiu .....24

3.5. Aliaje de zirconiu utilizate la întocuirea elementelor combustibile nucleare .....26

3.5.1. Proprietăți de rezistență la coroziune a aliajelor Zy-2 și Zy-4 .....30

3.5.2. Caracteristicile aliajelor Zy-2 și Zy-4 .....32

3.6. Concluzii .....35

Cap.4 Sudarea aliajelor de zirconiu în fabricația elementelor combustibile nucleare .....36

4.1. Considerații generale .....36

4.2. Sudarea TIG (WIG) , .....37

4.2.1. Imbinarea sudată dop-teacă .....38

4.2.2. Camere de sudare în atmosferă controlată .....39

4.2.3. Pregătirea suprafețelor .....40

4.3. Sudarea electrică prin presiune .....41

4.3.1. Imbinarea sudată dop-teacă .....42

4.3.2. Controlul sudurilor prin presiune .....44

4.4. Sudarea cu fascicul de electroni .....44

4.5. Concluzii .....44



PARTEA a II-a

Cap.5 Utilaje pentru sudarea TIG (WIG) a elementelor combustibile nucleare întecuite în aliaje de zirconiu ...	47
5.1.Instalația de sudare Prometeu-100 .....	47
5.2.Purificarea argonului .....	51
5.3.Camere de sudare în atmosferă controlată de înaltă puritate .....	57
5.3.1.Ansamblul CSEC-2 .....	57
5.3.2.Ansamblul CS-3EC-5 .....	58
5.3.3.Ansamblul CS-3EC-50 .....	61
5.4.Linii de sudare TIG a elementelor combustibile ...	64
5.4.1.Linia Prometeu .....	64
5.4.2.Linia Programatig .....	65
5.5.Concluzii .....	66
Cap.6 Tehnologia sudării TIG a aliajelor de zirconiu pentru fabricația elementelor combustibile nucleare.....	69
6.1.Caracteristicile elementelor combustibile pentru iradiere în reactorul MZFR-RFG .....	69
6.2.Stabilirea parametrilor de sudare și autorizarea procesului de fabricație .....	71
6.2.1.Ajustajul dop-teacă .....	73
6.2.2.Stabilirea intervalului de curent de sudare .....	73
6.2.3.Definitivarea programului de sudare .....	76
6.2.4.Controlul cu raze X a sudurilor dop-teacă	76
6.2.5.Controlul contaminării cu gaze a pieselor sudate .....	77
6.2.6.Controlul metalografic .....	77
6.2.7.Sudarea de închidere .....	79
6.3.Tehnologia de sudare a elementelor combustibile experimentale MZFR .....	79
6.3.1.Sudarea dop-teacă .....	79
6.3.2.Sudarea de închidere .....	81
6.4.Sudarea de închidere în heliu la 50 atm.	
6.4.1.Tehnologia sudării de închidere .....	81
6.4.2.Considerații asupra încercării la fluaj biaxial accelerat a tecilor de Zy-4.....	84
6,5.Considerații asupra defectelor posibile la sudarea TIG a elementelor combustibile .....	87
6.6.Concluzii .....	87

Cap.7 Utilajele pentru sudarea electrică prin presiune a elementelor combustibile nucleare întecuite în aliaje de zirconiu .....	89
7.1.Utilajul de sudare dop-teacă .....	89
7.2.Utilajul sudării patinelor și distanțierilor pe teaca elementului combustibil .....	93
7.3.Utilajul sudării dop-grilă .....	94
7.3.1.Cap de sudare special cu electrozi concentrici .....	95
7.3.2.Dispozitiv de asamblare .....	98
7.3.3.Sistem de poziționare automat în coordonate polare .....	98
7.4.Aparate de măsură a parametrilor de sudare .....	100
7.5.Concluzii .....	103
Cap.8 Tehnologia sudării prin presiune a elementelor combustibile nucleare întecuite în aliaje de zirconiu. .	105
8.1.Sudarea dop-teacă a tecilor de zircaloy $\varnothing_{ext} 10,71$ mm și grosime de perete de 0,65 mm. ....	105
8.1.1.Lungimea liberă a tecii .....	105
8.1.2.Forța de sudare .....	106
8.1.3.Curentul și tensiunea de sudare .....	107
8.1.4.Scurtarea la sudare .....	108
8.1.5.Testul de rezistență la oboseală .....	110
8.1.6.Controlul metalografic .....	111
8.2.Sudarea elementelor combustibile experimentale pentru testele de iradiere în reactorul BR-2 Belgia .....	116
8.2.1.Omologarea procesului de sudare .....	117
8.2.2.Execuția elementelor pentru iradiere....	118
8.2.3.Controlul etanșeității .....	118
8.2.4.Iradierea elementelor tip BR-2 .....	119
8.3.Sudarea elementelor combustibile nucleare tip PHWR-28 .....	119
8.3.1.Studiul inerției capului de sudare .....	120
8.3.2.Omologarea procesului de sudare pentru e.c.n. PHWR-28 .....	122
8.4.Controlul îmbinării sudate dop-teacă pentru e.c.n. PHWR-28 .....	125
8.4.1.Controlul etanșeității cu heliu .....	125
8.4.2.Control cu raze X .....	125

8.4.3. Contaminare superficială alfa .....115

8.4.4. Rezistența la coroziune a sudurii dop-teacă .....126

8.5. Sudarea în puncte de asamblare a e.c.n. în fabricul combustibil nuclear PHWR-28 .....126

8.6. Caracteristicile geometrice ale electrozilor la sudarea dop-teacă .....127

8.7. Considerații asupra zonei nesudate la îmbinarea dop-teacă .....129

8.8. Concluzii .....131

Cap.9 Aplicarea sudării prin presiune în fabricația elementelor combustibile nucleare pentru centralele electrice nucleare din R.S.R. ....133

9.1. Pregătirea pieselor de structură .....137

9.2. Pastilele de  $UO_2$  .....138

9.3. Execuția elementelor combustibile .....139

9.3.1. Sudarea de prindere a patinelor și distanțierilor .....139

9.3.2. Brazarea patinelor și distanțierilor pe teți .....140

9.3.3. Grafitarea tecilor .....140

9.3.4. Încărcarea cu pastile de  $UO_2$  .....141

9.3.5. Sudarea dop-teacă .....141

9.3.6. Debavurarea și profilarea capetelor elementelor combustibile .....144

9.4. Asamblarea fasciculelor combustibile .....144

9.5. Controlul interfazic metalografic la sudarea dop-teacă .....146

9.6. Controlul prin emisie acustică a sudurilor dop-grilă .....152

9.6.1. Principiul metodei .....152

9.6.2. Echipamentul de măsură și cuplarea sa pe instalația de sudare .....154

9.6.3. Rezultatele experimentale preliminare...156

9.7. Concluzii .....159

Cap.10 Automatizarea proceselor de sudare prin presiune și controlul parametrilor de sudare cu unitate centrală cu microcalculator .....160

10.1. Principiul funcțional și caracteristicile instalației .....161

10.1.1. Cutie cu cursă modulară .....161

10.1.2. Microcalculator Superbus .....162

10.1.3. Consola Superbus .....163

10.1.4. Modul concentrator comenzi și acțiuni  
motoare pas cu pas .....165

10.2. Modul de operare al instalației la automatizarea  
sudării dop-grilă .....165

10.3. Sistem de achiziție și prelucrare date pentru  
controlul parametrilor de lucru .....168

10.4. Concluzii .....171

Cap.11. Considerații finale, contribuții originale și probleme  
de viitor .....172

11.1. Considerații finale .....172

11.2. Contribuții originale .....173

11.2.1. În domeniul cercetării fundamentale....173

11.2.2. În domeniul cercetării aplicative .....174

11.3. Probleme de viitor .....175

ANEXA 1. Tehnica de lucru la pregătirea probelor pentru  
controlul metalografic al aliajelor de zirconiu....176

ANEXA 2. Lista prescurtărilor utilizate în textul tezei ....178

BIBLIOGRAFIE .....181

CUPRINS .....191