

**MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA  
Facultatea de mecanică**

**Colonel inginer Nicolae Ionescu**

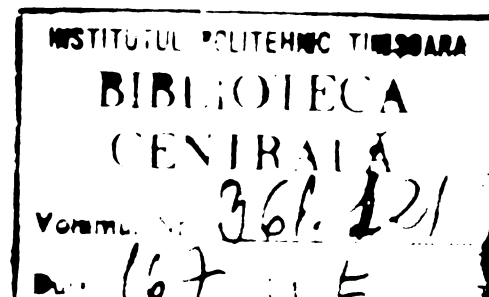
**SUDAREA PRIN EXPLOZIE CU APLICATII IN INDUSTRIA  
CONSTRUCTIILOR DE MASINI SI INDUSTRIA DE  
ALUMINIU**

**- TEZA DE DOCTORAT -**

**CONDUCATOR STIINTIFIC  
Prof.dr.docent ing.Vladimir Popovici**

**BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA  
"POLITEHNICA" TIMIȘOARA**

1978



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

### 1.1. Considerente asupra procedeelor de sudare

La ora actuală - dacă se analizează la scară atomică - se constată că cele aproximativ 60 de procedee de îmbinare a metalelor pot fi împărțite în trei categorii:

- îmbinarea în fază lichidă (prin fuziune);
- îmbinarea în fază solidă (prin difuziune) și
- îmbinarea în fază lichidă-solidă (în soluție).

Dacă ne referim la îmbinările în fază lichidă, constatăm că 90% din procedee folosesc sudarea cu arc electric în condiții destul de bune. Se știe că orice procedeu din această categorie realizează coalescența interfacială prin producerea unei cantități de metal topit între cele două interfețe ce urmează să se îmbine. Metalul de adăos din cusătură trebuie să aibă o rezistență apropiată de cea a metalelor ce se sudează.

Tinând seama că un strat dublu de atomi realizează de fapt îmbinarea în fază lichidă, energia consumată pentru fuziunea în zona interfețelor îmbinării este de ordinul a  $(24...50)10^{-5} \text{ J}$  sau  $(67...139)10^{-12} \text{ kWh}$  pentru fiecare  $\text{cm}^2$ . Nu trebuie uitat însă faptul că pentru fiecare  $\text{cm}^3$  de oțel din cordonul de sudură se consumă  $102560 \text{ J}$  sau  $28,85 \text{ Wh}$ , deci un consum considerabil de energie.

Având în vedere aceste considerații se ajunge la concluzia că îmbinările în fază solidă (prin difuziune) sînt cele mai recomandabile. Însă la suprafața metalelor de îmbinat se găsesc în permanență două bariere: stratul de gaze absorbite, umiditate, impurități, strat care poate avea o grosime de  $0,25 \mu\text{m} = 2500 \text{ \AA} \approx 1000$  diametre atomice și stratul de oxizi cu o grosime de  $2...3 \mu\text{m} = (2...3) \cdot 10^4 \text{ \AA}$  sau  $(8...12)10^3$  diametre atomice.

Sudarea prin difuziune se realizează la temperaturi ( $T_d$ ) inferioare temperaturii de topire ( $T_t$ ) a celor două aliaje sau metale de îmbinat  $[T_d = (0,50...0,65) T_t]$  care au rolul de a contribui la arderea impurităților, evaporarea umidității și sfărîmarea oxizilor de pe suprafețele de îmbinare și la presiuni care să asigure refularea impurităților, gazelor și să fracționeze stratul de oxizi. Pentru îndepărtarea umidității și gazelor

## **1. INTRODUCERE**

**1.1. Considerente asupra procedeeilor de sudare.**

**1.2. Scurt istoric al dezvoltării îmbinării metalelor prin explozie.**

**1.3. Necesitatea aplicării sudării prin explozie la realizarea unor repere.**

**1.4. Stadiul actual al cunoștințelor în domeniul sudării metalelor prin explozie.**

**1.4.1. Principiul sudării prin explozie.**

**1.4.2. Fenomene fizice la sudarea prin explozie.**

**1.4.3. Procese metalurgice la sudarea prin explozie.**

**1.4.4. Metode pentru determinarea parametrilor de lucru la sudarea prin explozie.**

**1.4.5. Aplicații ale sudării prin explozie.**

ei să fracționeze stratul de oxizi. Pentru îndepărtarea umidității și gazelor se folosesc cu succes sursele de vid. O atmosferă de vid înaintat ( $< 10^{-3}$  torri) sau de gaz inert (hidrogen, heliu sau argon), fără oxigen este cea mai potrivită pentru sudarea prin difuziune.

Tabel 1.1

METALE	PARAMETRII DE SUDARE			
	Presiune (bari)	Temperatură [°K]	Timp (min)	Atmosfera
Al - Cu	6,2	743	4	vid
Al - Zr	3,4.....7,75	813	15	vid
Al - Ni	3,4 7,75	723	4	vid
Zr - U	0,34	1118	2160	inertă
UO <sub>2</sub> - Zincaloy	1,55	1125	240	inertă
UO <sub>2</sub> - oțel inox	1,55	1423	180	inertă
Be - Cu - Monel	0,23	618	180	heliu
Cu - Ti	0,11	1123	15	vid

Extras din Mechanical Engineering  
Nr. 5 - mai 1970  
(parametrii dați de firma XEXCEL  
PRODUCTS-SUA.)

În afară de cei patru parametri ai sudării prin difuziune (temperatură, presiune, atmosferă și timp) trebuie să se aibă în vedere netezimea și finisarea suprafețelor de îmbinat ( $4...16 \mu\text{m}$ ) precum și curățirea și activarea lor.

Din analiza datelor cuprinse în tabelul 1.1 rezultă că pentru îmbinarea a două sau trei plăci din metale sau aliaje diferite sînt necesare presiuni de ordinul  $0,11...7,75 \text{ daN}\cdot\text{cm}^{-2}$ , temperaturi de la  $618^{\circ}\text{K}$  la  $1421^{\circ}\text{K}$ , iar timpul variind de la 4 minute la 36 ore în atmosferă de gaz inert sau vid de înalt  $10^{-3}$  torri.

Pentru sudarea prin difuziune se pot folosi utilajele și instalațiile într-o cameră de sudare, în funcție de procedurul de îmbinare ales, de natura materialelor precum și de geometriile și dimensiunile pieselor de îmbinat.

In tabelul 1.2 sînt prezentate principalele procedee de sudare prin difuziune și instalațiile și utilajele folosite pentru îmbinarea celor mai caracteristice metale și aliaje ce se întrebuintează astăzi în construcția de mașini.

In practica curentă nu există suprafețe perfect plane sau care să se poată îmbina perfect, In cazul că se asamblează asemenea suprafețe într-un vid mai înalt ( $10^{-12}$ ... $10^{-13}$  torri), ele aderă complet și ar fi inseparabile [13].

Referindu-se la aceste probleme, H.F.Rondeau [97] propune o experiență surprinzătoare: să presupunem că avem două piese metalice cu suprafețe perfect plane și un spațiu perfect vidat. Dacă cele două suprafețe netede sînt așezate paralel la o distanță de  $25 \cdot 10^{-5}$  mm nu se va întîmpla nimic. Micșorîndu-se distanța la  $1 \cdot 10^{-8}$  mm se va simți o ușoară atracție a unei suprafețe față de cealaltă. Pe măsură ce suprafețele sînt aduse și mai aproape, se va întîmpla un lucru cu totul surprinzător: ele se vor apropia brusc și din acest moment cele două piese metalice vor forma o singură piesă. Suprafețele de îmbinare nu sînt pot fi detectate prin nici o metodă.

In acest caz s-a realizat o îmbinare perfectă fără a se fi utilizat nici un fel de energie. De fapt, în procesul care a avut loc s-a produs o emiterie de energie.

In realitate nu se pot obține suprafețe perfect plane și nici un vid perfect care să înconjoare piesele în procesul de îmbinare.

Întîmplător, la un institut de cercetări s-a efectuat o experiență asemănătoare cu procesul ideal de îmbinare a pieselor metalice. O epruvetă de cupru a fost ruptă într-un vid înalt. Cele două bucăți au fost apropiate în așa fel încît asperitățile feței fracturate s-au îmbinat fără nici un fel de energie.

Dacă nu se poate realiza un vid perfect - fără a pune problema economică - trebuie însă ca alături de o gamă largă de temperaturi să se realizeze presiuni care să conducă la o nivelare a suprafețelor de îmbinare, fapt care urmărește întimitatea atomică - condiție esențială pentru realizarea unei îmbinări metalice prin difuziune.

Presiunea poate varia de la cîtiva daN pînă la zeci de mii daN pe  $mm^2$ . Presiunea poate fi produsă prin apăsare sta-

tică, printr-un impact lent sau comprimare dinamică care poate să includă folosirea explozivilor, electro-hidraulică sau electromagnetice.

Tabel 1.2

Sudare prin difuziune	Instalații și utilaje	Aliaje și metale dimensiuni
cu presare la cald	<ul style="list-style-type: none"> <li>- presă hidraulică de 3000 kN</li> <li>- instalație de vid</li> <li>- plăci încălzite cu rezistențe</li> <li>- sistem de măsurarea temperaturii</li> <li>- sisteme de măsurarea timpului</li> </ul>	Piese de aluminiu 800 x 800 mm
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- presă hidraulică de 1200 kN</li> <li>- instalație de vid cu pompe mecanice pentru <math>10^{-6}</math> torri</li> <li>- plăci încălzite cu rezistențe</li> <li>- retortă sub vid răcită cu apă, teci pentru termocuplă și bobină de inducție.</li> </ul>	Tevi de aluminiu-tevi de oțel inox (sudare cap la cap)
prin presiune izostatică	<ul style="list-style-type: none"> <li>- recipient cu mantă caldă <math>p = 1050 \text{ daN.cm}^{-2}</math>; <math>T = 823^{\circ}\text{K}</math></li> <li>- instalație de Ar; He</li> <li>- instalație de vid</li> <li>- sistem de măsurarea temperaturii</li> </ul>	elemente tubulare din aliaje de uraniu cu arziore de aluminiu. Tevi bimetalice aluminiu-oțel inoxidabil
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- recipient cu mantă rece <math>p = 4250 \text{ daN.cm}^{-2}</math> <math>T = 1373^{\circ}\text{K}</math></li> <li>- instalație de Ar; He</li> <li>- instalație de vid</li> <li>- sistem de măsurarea temperaturii</li> </ul>	Imbinarea pieselor cu forme complexe
în cuptor sub vid	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cuptor sub vid</li> <li>- instalație de încălzire (inducție sau rezistență)</li> <li>- instalație de vid de minim <math>10^{-4}</math> torri</li> <li>- sistem de presare</li> <li>- sisteme de măsurare și control</li> </ul>	Piese cu grosimi mari

Tabel 1.2 (urmare)

Procedeul de sudare	Instalații și utilaje	Aliaje și metale dimensiuni
prin frecare	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mașini de sudare prin frecare avînd:</li> <li>- dispozitive de prindere și rotire a unei piese</li> <li>- dispozitive de prindere și deplasare a celeilalte piese</li> <li>- sistem hidraulic de presare</li> <li>- sistem de cuplare-frînare</li> <li>- sistem de măsurarea timpului</li> <li>- sisteme de alimentare și debavurare</li> <li>- instalație de Ar pentru piese de Ar</li> </ul>	<p>Piese cu același diametru sau diferite în game 0,5...600 mm.                      Secțiuni plane sau țevi de orice lungime.                      Aliaje feroase sau neferoase în orice combinație</p>
prin extrudare	<ul style="list-style-type: none"> <li>- instalații și mașini speciale de extrudare</li> <li>- sisteme de vidare</li> <li>- sisteme de încălzire</li> <li>- sisteme de măsurare și control</li> </ul>	<p>Tevi din aliaje diferite</p>
prin laminare	<ul style="list-style-type: none"> <li>- instalație cu valțuri pentru laminare</li> <li>- instalație de încălzire</li> <li>- instalație de vidare</li> <li>- instalație pentru tratare chimică</li> <li>- sisteme de măsurare și control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plăci bimetalice aluminiu-inox;</li> <li>- aliaje de titan pentru rachete (Titan III)</li> </ul> <p>la firma North American Rockwel S.U.A.</p>
prin explozie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- platforme de lucru beto-nate</li> <li>- explozivi</li> <li>- capse detonatoare</li> <li>- detonatori electrici</li> <li>- dispozitive de fixare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Imbinarea plăcilor din aliaje diferite: 1000x2500 mm 3000x7000 mm.</li> <li>- Tevi la placa tubulară.</li> <li>- Placarea interioară și exterioară a recipientilor</li> </ul>

Se acționează continuu pentru a se găsi procedee cât mai eficiente de îmbinarea metalelor. În ultima perioadă se dezvoltă prelucrarea metalelor prin explozie realizându-se în procesul termodinamic de îmbinare cei trei parametri utilizați astăzi: temperatură, presiune, timp. La acestea se adaugă și factorul economic, îmbinările prin explozie fiind cele mai eficiente.

## 1.2. Scurt istoric al dezvoltării sudării metalelor prin explozie

Utilizarea explozivilor în prelucrarea metalelor a început în urmă cu aproape un secol. Primul brevet datează din 1898 (Anglia) și se referă la lărgirea prin explozie a țevelor pentru cadrul bicicletei [118]. După 11 ani, în Statele Unite se brevetează în 1909 metoda de ambutisare prin explozie a tablelor metalice [119].

În perioada 1936-1939 în Franța se ambutisau prin explozie scuturile tunurilor. În 1950 - Moore Company of Marcelene "Missouri" - a început să aplice la scară industrială ambutisarea prin explozie a bușelor suflantelor confecționate din table de monel, în special pentru loturi mici de producție pentru piesele mari.

După al doilea război mondial (1946-1948), grupuri de cercetători dintr-o serie de țări încep să-și îndrepte eforturile în domeniul studierii și cercetării procedeelelor de prelucrare prin explozie. Dintre aceștia se disting R.G.Abrahamson, R.G.Cowan, H.A.Holtzman, C.I.Duglas și V.Philipchuk.

Prelucrarea metalelor prin explozie ie un avînd deosebit după 1950 cînd cerințele industriei construcțiilor aerspațiale solicită materiale și tehnologii noi. Astfel, în 1960, guvernul Statelor Unite a inițiat 80 programe în domeniul prelucrării prin explozie. Cel mai dens program a fost lansat la North American Aviation pentru construcțiile aerspațiale, în special pentru ambutisările prin explozie.

Sudarea prin explozie a fost descoperită în mod accidental în 1957. În timpul unor experimentări de ambutisare prin explozie, V.Philipchuk [89] a constatat că placa de metal a aderat la matrița pe care era deformată. Fenomene asemănătoare au fost observate și la durificarea superficială prin explozie, atunci cînd folosindu-se plăci metalice de amortizare, acestea s-au sudat de placa supusă durificării.



Descoperirea a determinat organizarea studierii și cercetării fenomenului și primele investigații sînt întreprinse de V.Philipchuk [89], J.Pearson [88], E.D.Davenport și L.G. Duvall [32], S.V.Sedych [102], L.Zernow [116] și B.Crossland[28].

Această acțiune a fost întreprinsă pe scară largă datorită faptului că sudarea prin explozie este procedeul cel mai simplu de îmbinare a două piese din metalele cele mai diferite, fără metal de adaos, cu un consum minim posibil de energie electrică și cost redus al materialelor ajutătoare utilizate. Din schema de lucru cea mai des utilizată pentru sudarea prin explozie a două plăci (fig.1.1) se observă că sub acțiunea undelor de șoc dezvoltate după detonarea explozivului placa de sudat este adusă în contact cu placa de bază. În zona de contact se formează un jet metalic care curăță interfețele de oxizi, gaze și impurități. Detonarea explozivului creează și presiunea și temperatura necesară procesului de sudare. Sudarea prin explozie este procedeul cel mai eficient și rapid de îmbinare a două metale diferite care prin procedeele clasice se realizează foarte greu sau deloc.

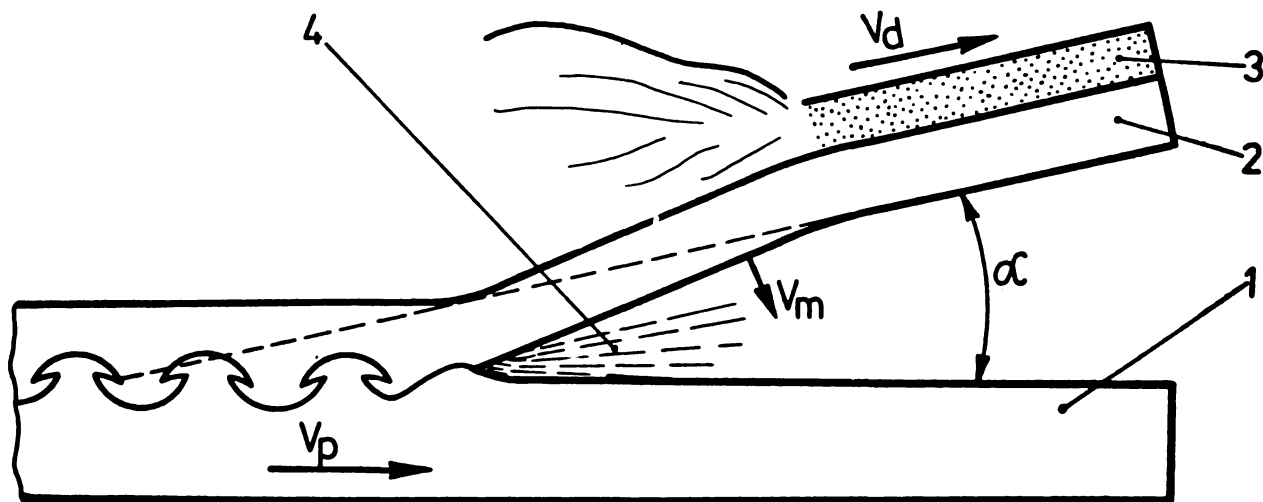


Fig.1.1 Schema sudării prin explozie a două plăci.

- 1-placa de bază ; 2-placa de sudare ;
- 3- exploziv ; 4-jetul ;  $\alpha$ -unghiul de înclinare ;
- $V_d$ -viteza de detonație a explozivului ;
- $V_m$ -viteza de mișcare a plăcii de sudat ;
- $V_p$ -viteza punctelor de contact (viteza de sudare).

După perioada de pionierat, într-o serie de țări (Statele Unite, Anglia, Uniunea Sovietică, Polonia, R.F. Germană, Cehoslovacia, Franța, Belgia, Italia și Canada) se accentuează eforturile de punere la punct a procedurii de sudare prin explozie.

Teoria și mecanismul sudării prin explozie au fost și sînt descrise într-un număr extrem de mare de lucrări [26; 33; 72; 104].

O contribuție covârșitoare la explicarea mecanismului sudării prin explozie a adus colectivul de cercetare de la Universitatea din Belfast (prof.ing.B.Crossland, dr.ing.S.Bahrani și dr.ing.V.Shribman). Din analiza mecanismului sudării prin explozie se constată că fenomenele fizice ce au loc sînt o combinație destul de complicată a presiunilor înalte, curgeri hidraulice, procese termice și metalurgice.

O elegantă demonstrare a apariției și formării velurilor și vârtejurilor la interfața îmbinării pieselor prin explozie au făcut W.Babul și A.Włodarczyk [9].

În domeniul sudării prin explozie a pieselor din superaliese (Zr, Ti, Ta, Nb,) pentru instalațiile nucleare se remarcă lucrările grupului italian G.Verzeletti, M.Montagnani, G.Beghi și P.Golinelli de la Euratom [78; 111].

Dezvoltarea sudării prin explozie s-a făcut după trei direcții principale:

- geometria sudării;
- caracteristicile explozivului;
- proprietățile materialelor de îmbinat.

Referitor la geometria sudării s-a ajuns la concluzia că plăcile trebuie să fie în contact sub un anumit unghi care să poată permite formarea jetului [29]. B.Crossland [28] demonstrează destul de clar că sudura prin explozie nu poate avea loc dacă unghiul de inclinare este zero (plăcile se află în contact direct), iar la unghiuri mai mari de  $31^{\circ}$ , sudurile sînt rebutate.

În paralel cu optimizarea geometriei de sudare s-a acționat pentru obținerea unor explozivi cu parametrii care să conducă la realizarea vitezelor de mișcare a plăcilor de sudat corespunzătoare procesului tehnologic. Astfel, firma E.I.Du Pont a trecut la producția de explozivi speciali, reușind să fabrice explozivi cu viteze de detonație sub 3500 m/s, fapt ce a determinat o geometrie de sudare cu plăcile așezate paralel la o anu-

mită distanță [120; 121].

De la sudarea simultană a mai multor plăci s-a trecut la placarea cu plăci metalice a pieselor din materiale compuse.

La data actuală procedeul de sudare prin explozie s-a dezvoltat mult, reușindu-se să se îmbine în peste 260 de combinații aliaje și superaliaje diferite sau de același fel.

În paralel cu cercetările de laborator, numeroși cercetători și organizații industriale, conștienți de potențialul procedeuului de sudare prin explozie, au inițiat programe de aplicare industrială. În unele țări, sudarea prin explozie a devenit un procedeu industrial curent, multe din produsele respective fiind exportate. Astfel firmele Nobel Bozel S.A. din Franța și Dynamit Nobel A.G. din R.F.G. livrează în mod curent plăci bimetel aluminu oțel și aluminu-cupru pentru industrie de aluminu. Toate laboratoarele de peste hotare țin în secret amănunte ale tehnologiei de lucru ori date specifice determinărilor analitice.

Cea mai spectaculoasă aplicare a sudării prin explozie o constituie îmbinarea plăcilor titan-oțel inoxidabil realizate pentru programul Apollo [121].

Totuși, dezvoltarea procedeuului de sudare prin explozie cunoaște o cale destul de lungă și de dificilă. Nu au fost puse la punct toate aspectele acestui procedeu de îmbinare destul de eficient.

În țara noastră primele experimentări în domeniul prelucrării metalelor prin explozie sînt începute în anul 1963 de un colectiv de cercetare de la Academia militară condus de conf.ing. V.Ghizdavu [41], în special în domeniul ambutisării prin explozie.

Din 1969, colectivul condus de colonel ing.H.Ionescu abordează problema presării pulberilor metalice prin explozie [55] și realizează o instalație de presare bilaterală (brevet RSR nr.67905 din 17.04.71).

Ca urmare a rezultatelor obținute, Ministerul Industriei Construcțiilor de mașini încredințează colectivelor de cercetare din Academia militară și I.C.P.T.C.M. elaborarea unui studiu tehnico-economic și tezei de proiectare pentru construcția unei stații experimentale de prelucrare prin explozie pe platforma industrială - Berceni [44].

În toamna anului 1970, din inițiativa prof.dr.doc.ing.

Vl. Popovici se realizează o colaborare între colectivul de cercetare al catedrei de Utilejul și tehnologia sudării din Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara și colectivul de cercetare din Academia militară.

Primele cercetări ale celor două colective sînt îndreptate în direcția stabilirii tehnologiei de sudare prin explozie pentru lagărele axiale-radiale ale hidrogenatoarelor, lucrare solicitată de Întreprinderea constructoare de mașini - Reșița [92].

Cu toate greutățile întâmpinate (neîncrederea întreprinderilor, neacordarea unui sprijin efectiv cît și lipsa unor sorturi de explozivi) cercetătorii ajung la stabilirea tehnologiei de lucru și elaborează tema de proiectare a atelierului de sudare prin explozie. După trei ani, întreprinderea decide încetarea lucrărilor de cercetare.

Academia militară și Institutul politehnic Timișoara, sprijină acțiunea cercetărilor de a continua studiul și experimentările pentru descifrarea diferitelor aspecte ale sudării prin explozie. În acest scop se realizează o instalație experimentală pentru sudarea prin explozie în vid.

Cerințele construcției de mașini impun însă utilizarea sudării prin explozie. În 1975, la programul de construcție a centralelor nucleare electrice ale N.I.C.M., se solicită colaborarea colectivului de cercetare din Academia militară pentru mandrinarea prin explozie a țevilor din incoloy 800 la placa tubulară din oțel 22 NiMoCr 37, pentru generatorul de abur. Pentru acest program pe lângă utilizarea explozivilor se lucrează și la realizarea unei instalații de mandrinare și sudare prin șoc electromagnetic.

În anul 1976, Ministerul industriei metalurgice, în scopul eliminării importului, solicită colectivul de cercetare din Academia militară să elaboreze tehnologia de lucru pentru realizarea în țară a plăcuțelor de aluminiu-oțel pentru electrozii necesari întreprinderii de aluminiu Slatina.

Pentru aceste două programe s-a trecut la proiectarea și realizarea S.L.V.-urilor și A.M.C.-urilor, a unor detonatori și explozori electronici precum și la colaborarea cu Combinatul chimic Părăreș pentru realizarea explozivilor necesari.

În anul 1977 Institutul de cercetări și proiectări pentru echipament hidroenergetic - Reșița, decide reluarea cer-

cetărilor privind sudarea prin explozie a unor piese pentru centralelor hidroelectrice.

Neconstruirea stației experimentale pentru prelucrarea metalelor prin explozie a întârziat mult acțiunea de aplicare a acestui procedeu de îmbinare în industrie.

1.3. Necesitatea aplicării sudării prin explozie la realizarea unor repere din industria construcțiilor de mașini și pentru metalurgia aluminiului

Folosirea din ce în ce mai mult a metalelor și a superaliajelor cu proprietăți deosebite necesare în tehnica aerospațială, tehnica nucleară, în instalațiile centralelor hidro și nucleare-electrice, în construcția utilajelor pentru scufundări la mari adâncimi precum și realizării utilajelor pentru elaborarea acestor metale și superaliaje, pune probleme complicate proiectării și tehnologiei îmbinărilor.

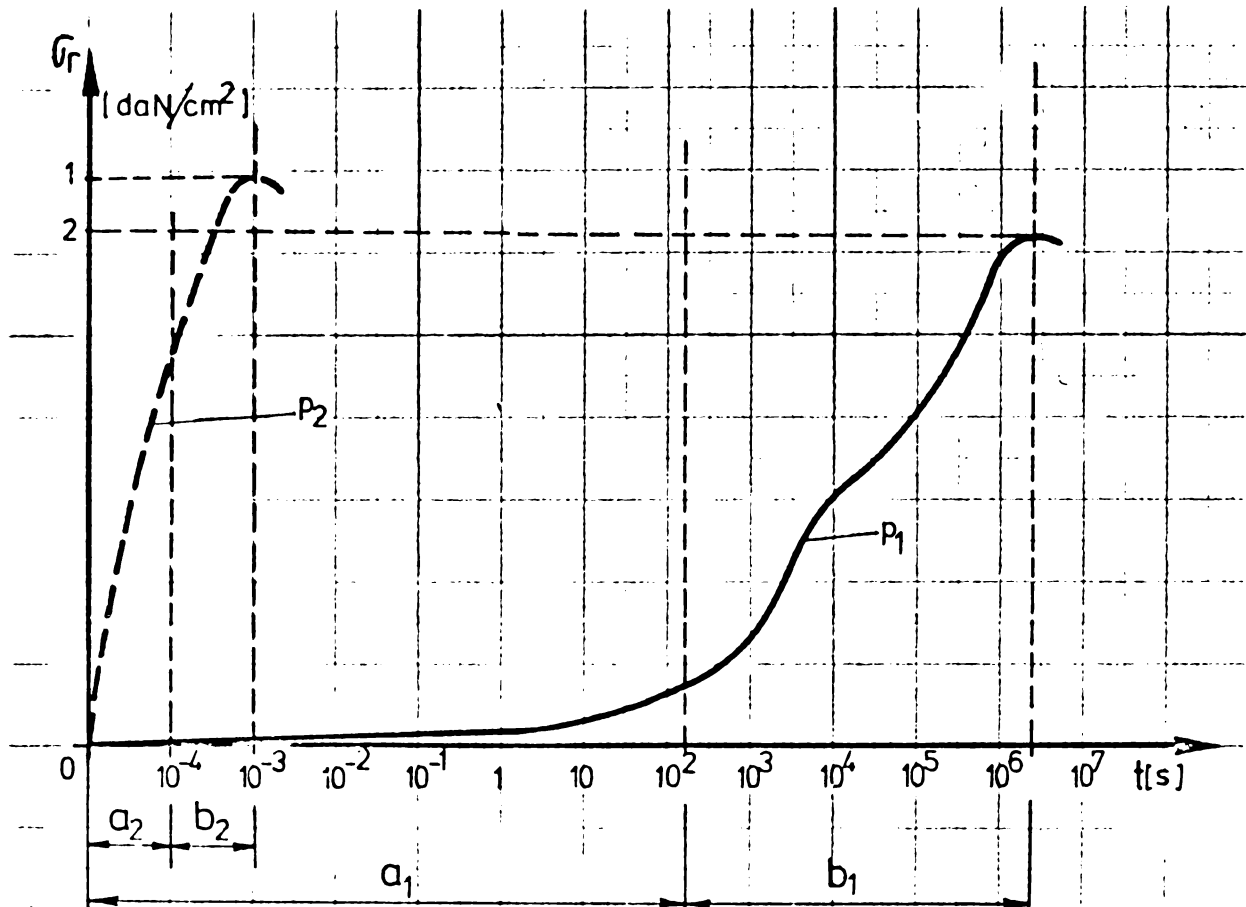


Fig.12 Diagrama  $\sigma_r = f(t, p)$

$a_1; a_2$  - faza de adsorbție;  $b_1; b_2$  - faza de chemosorbție;  
 $p_1$  - presiune aplicată lent;  $p_2$  - presiune aplicată dinamic.

Deoarece menținerea proprietăților aliajelor îmbinate este absolut necesară iar prelucrările ulterioare de cele mai multe ori sînt minime, nu se mai pot folosi procedeele "clasice" de îmbinare ca sudarea prin topire, nituirea, brazurarea cu metale sau adezivi precum și alte metode de îmbinare mecanică.

Referindu-ne la îmbinarea plăcilor de cupru sau de aluminiu cu plăci de oțel în condițiile ca acestea să fie rezistente la tracțiune și forfecare, să păstreze rezistivitatea electrică în limitele admise de norme, să aibă o durabilitate mare în timp la eforturi variabile și temperaturi ridicate se constată că nu se poate realiza prin procedeele clasice de îmbinare ci apelînd la procedee de sudare prin difuziune.

La sudarea prin difuziune, presiunea se poate aplica fie lent, fie dinamic. La sudarea prin difuziune cu aplicarea dinamică a presiunii, ambele faze (adsorbția și chemosorbția) au loc într-un timp extrem de mic ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  s) în comparație cu sudarea prin difuziune cu aplicare lentă a presiunii ( $1,8 \cdot 10^2 \dots 1,32 \cdot 10^5$  s). Din experimentările efectuate într-o serie de laboratoare a rezultat că rezistența la rupere a îmbinărilor sudate prin difuziune cu aplicarea dinamică a presiunii este mai mare decît în cazul aplicării lente a presiunii (fig.1.2).

Tabel 1.3

Metale	Timpul îmbinării	Rezistența $\mu\Omega$
Aluminiu - cupru	Sudarea prin difuziune în vid	0,28
Aluminiu - oțel		0,31
Aluminiu - cupru	Sudare prin explozie	0,30
Aluminiu - oțel		0,34
Aluminiu - cupru	Strîngere mecanică	136,0
Aluminiu - oțel		143,0

Pentru îmbinările aluminiu-otel și aluminiu-cupru necesare în industria aerospațială și în electrotehnică, problema principală constă în a obține în îmbinare o rezistență electrică la interfață cât mai mică.

Din analiza tabelului 1.3 rezultă că procedeele de sudare

dare prin difuziune (în vid sau prin explozie) realizează îmbinări cu rezistența electrică destul de redusă, sporiată de rezistența în metalele respective.

La îmbinarea țevilor de incoloy 800 avînd diametrul  $\phi$  20 mm și  $S = 1,5$  mm la placa tubulară din oțel 22 Ni Mo Cr 37 cu grosime de pînă la 500 mm din compunerea generatoarelor de aburi ale centralelor nucleare-electrice se impun condiții extreme de severe. Cele mai importante sînt:

- îmbinările să asigure etanșarea la circuitele lichidelor, astfel ca ratele de scăpări admise la proba de etanșitate cu heliu să fie de ordinul  $(0,5...1) \cdot 10^{-9}$  torri  $\ell/s$  pentru verificările locale iar la verificarea simultană a tuturor îmbinărilor din placa tubulară scăpările să fie mai mici decît  $1 \cdot 10^{-6}$  torri  $\ell/s$ , ambele verificări la o diferență de presiune de  $1 \text{ daN cm}^{-2}$  [117].

- îmbinările rezultate trebuie să reziste la o forță de smulgere de  $(11...12) \cdot 10^3$  N;

- reducerea grosimii peretilor după mandrinare (sudare) să nu fie mai mare de 5%;

- îmbinarea să aibă o durată de viață de 30 ani.

Analizînd datele din tabelul 1.2 rezultă că la sudarea prin difuziune cu presare la cald, prin presiune izostatică, în cuptor sub vid, prin frecare, prin extrudare sau laminare sînt necesare agregate ce trebuie să aibă în componența lor instalații pentru realizarea presiunilor, sisteme electrice pentru încălzirea materialelor de îmbinat, instalații pentru vid, sisteme de măsurarea timpului, temperaturii și vidului.

Consumul de energie electrică al unui asemenea agregat este destul de mare, Dacă la aceasta se adaugă și costul agregatelor, sudarea prin difuziune în vid este un procedeu costisitor și nu se poate aplica decît numai în condiții de eficiență și la piese de dimensiuni maxime de 800 x 800 mm.

Pentru sudarea tablelor de dimensiuni mari (1000x2000 ... 3000x7000 mm) sau pentru căptușirea recipientelor din oțel carbon cu table din metale, aliaje și superaliaje (Ti, Zr, Ni, Co etc.) cu puncte diferite de topire și dilatare termică singurul procedeu eficient din toate punctele de vedere este sudarea prin explozie. Aceasta datorită faptului că schimbările reduse de temperatură care au loc în metalele sudate precum și du-

Y. I. O. R.  
INSTITUTUL CENTRAL

rata scurtă a efectelor termice în zone turbionară a valurilor, mențin metalele în aceeași stare, pe cînd la sudarea clasică prin topire acest fapt constituie o problemă de nerezolvat.

Dacă se are în vedere că la sudarea prin explozie se realizează presiuni foarte mari  $(20...100) \cdot 10^3 \text{ daN cm}^{-2}$  iar încălzirea se produce simultan cu înaintarea frontului undei de șoc datorită energiei absorbite de suprafața de îmbinare, stratul de oxizi și impurități va fi rupt și evacuat de pe suprafețele de îmbinare sub acțiunea jetului metallic ce se formează după detonarea explozivului și ciocnirea plăcilor de sudat (fig.1.1), iar îmbinarea este foarte intimă, ajungîndu-se la legături interatomice.

Trebuie să avem în vedere și faptul că sudarea prin explozie se poate realiza în cîmp pe platforme sumar amenajate. Pentru producția de serie sau pentru cazuri deosebite se pot amenaja platforme permanente de lucru [60; 63; 64] cu o dotare și încastrare specială.

Condițiile impuse cazurilor prezentate nu pot fi satisfăcute prin procedeele clasice, nici prin sudarea prin difuzie în vid sau prin alte variante (prin extrudare, laminare, frecare), ci numai aplicînd sudarea prin explozie. Aceasta cu atît mai mult cu cît dimensiunile sînt mai mari.

Aluminiul poate fi sudat pe oțel și prin frecare, însă pentru piese cu diametrul de 150 mm sînt necesare mașini de sudat prin frecare înzestrate cu motoare electrice de puteri mari ( $P \approx 165 \text{ kW}$ ) iar forța de apăsare de peste 2 M.N., fapt ce conduce la consumuri și prețuri de cost ridicate.

Din punct de vedere economic sudarea prin explozie, este mult mai avantajoasă decît alte procedee de îmbinare prin sudare. Astfel, realizarea lagărilor butuc și sermenți pentru hidrogenatoarele centralelor electrice prin sudare cu arc electric costă 14.000 lei/buc. și necesită un timp de prelucrare de 268 ore, iar dacă se utilizează sudarea prin explozie, prețul de cost al îmbinării este de 5,6 ori mai mic iar timpul de lucru se reduce de peste 50 ori.

La sudarea prin explozie a țevilor în placă tubulară productivitatea este destul de mare datorită faptului că se pot suda simultan 200, 500, 1000 sau 3000 țevi.

Plăcile de aluminiu-oțel sudate prin explozie pentru



industria de aluminiu se asigură din import, la un preț destul de ridicat (1000...1600 lei o placă de dimensiuni 100x120x50 mm sau 140x150x50mm), fond ce ajunge la suma de 6...10 milioane lei valută în devize libere.

Tinând seama de faptul că toate materialele necesare sudării prin explozie se produc în țară, o placă de aceeași dimensiuni va costa de peste 4 ori mai ieftin. La aceasta trebuie să se adauge reducerea anuală a importului cu aproape 10 milioane lei valută.

Lărgind domeniul aplicațiilor industriale ale sudării prin explozie și la realizarea unor repere și subansamble din industria construcțiilor aerospațiale, din compunerea utilajelor din industria chimică precum și din instalațiile centralelor hidro, termo sau nucleare electrice, se ajunge la concluzia că se pot înlocui fonduri însemnate de valută iar din punct de vedere tehnic se elaborează noi tehnologii care vor contribui la progresul tehnicii românești și la realizarea obiectivelor stabilite de către partid și stat.

Avându-se în vedere faptul că la sudarea prin explozie nu se folosește metal de adaos, că prin presiunea și temperatura ce se produc simultan în câteva microsecunde, metalele de îmbinat nu suferă transformări dar se realizează o legătură intimă, interatomică, se poate afirma că la ora actuală este cel mai indicat procedeu de îmbinare a aliajelor și metalelor cu puncte de topire și dilatare termică.

Dacă se ține seama și de faptul că nu necesită instalații costisitoare, că energia electrică este aproape neglijabilă, că costul explozivilor este acceptabil iar suprafețele de îmbinat nu trebuie prelucrate ci numai curățite de grăsimi și impurități, sudarea prin explozie este procedeu de îmbinare cel mai eficient pentru anumite îmbinări sudate.

#### 1.4. Stadiul actual al cunoștințelor în domeniul sudării prin explozie

##### 1.4.1. Principiul sudării prin explozie

Din analiza rezultatelor experimentărilor se constată că sudarea prin explozie este un procedeu de sudare prin difuziune în care îmbinarea celor două piese se realizează prin ciocnirea oblică dirijată, cu viteză mare și presiune înaltă, obținută prin detonarea unei cantități de exploziv așezată pe una

din piese sub formă de strat.

In general, piesele de sudat pot avea inițial suprafețele ce urmează a fi îmbinate fie înclinate (fig.1.3 a), fie paralele (fig.1.3 b,c,d).

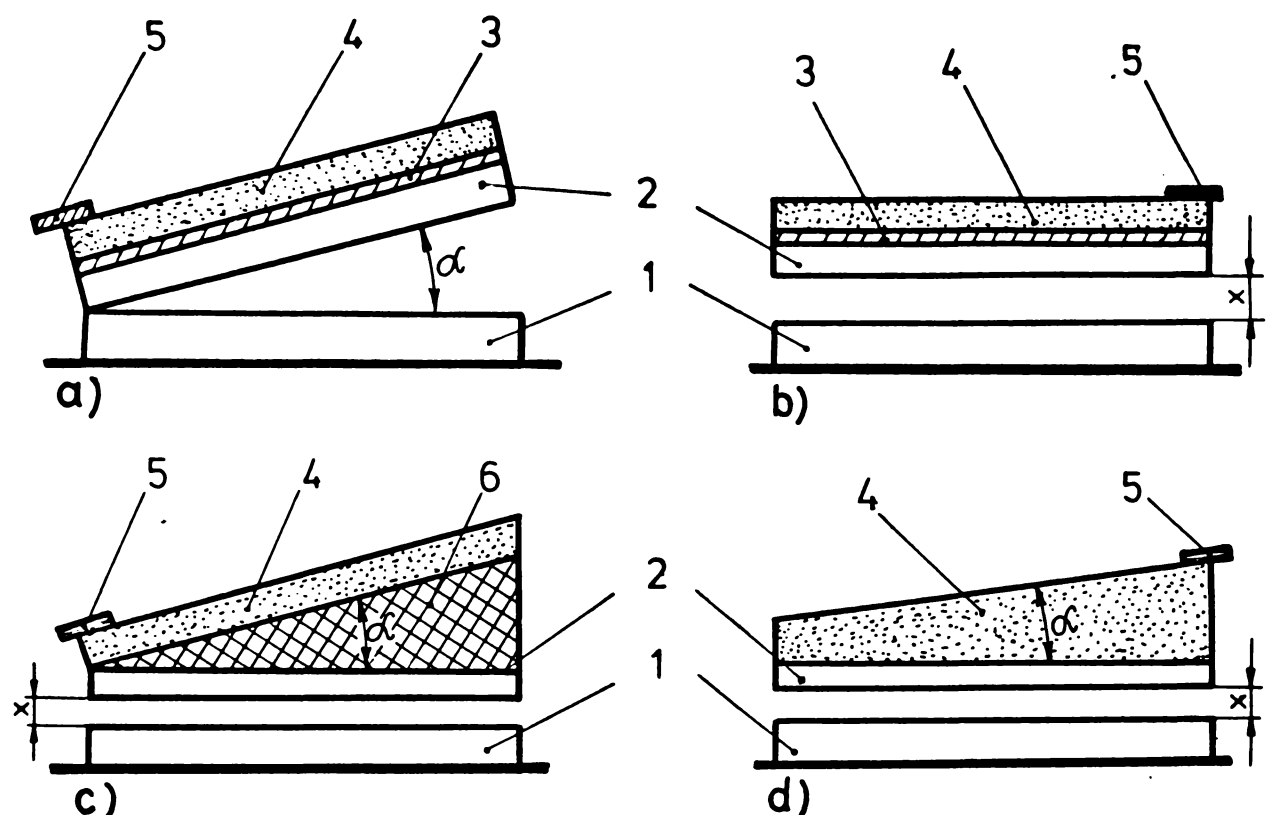


Fig.1.3 Schema de lucru la sudarea prin explozie.

1-Placa de bază; 2-Placa de sudat; 3-Strat tampon;  
4-Strat de exploziv; 5-Detonator; 6-Cală unghiulară.

La așezarea cu plăcile paralele explozivul poate fi în strat uniform peste stratul tampon (fig.1.3 b) ori peste o cală unghiulară (fig.1.3 c) sau într-un strat înclinat, direct peste placa de sudat (fig.1.3 d).

Unanim s-a stabilit că după înfățișarea exploziei, unda de detonație, (fig.1.4) care înaintează cu viteza de detonație ( $V_d$ ) traversează stratul de exploziv și datorită undei de șoc pe care aceasta se produce, placa de sudat este accelerată, se înclină spre placa de bază cu unghiul  $\beta$ , pe care o izbește cu o viteză de mișcare ( $V_m$ ) sub un unghi  $\varphi$ . În unghiul format între cele două plăci se produce un jet care curăță suprafețele de îmbinat. Suprafețele în contact se ondulează luând forma unor valuri.

Faza principale ale procesului de sudare a metalelor prin explozie este prezentat în fig.1.5.

In cazul când plăcile de îmbinat sunt așezate paralel

(fig.1.3 b,c,d), iar impactul are loc perpendicular pe planul lor, se formează unde de șoc plane.

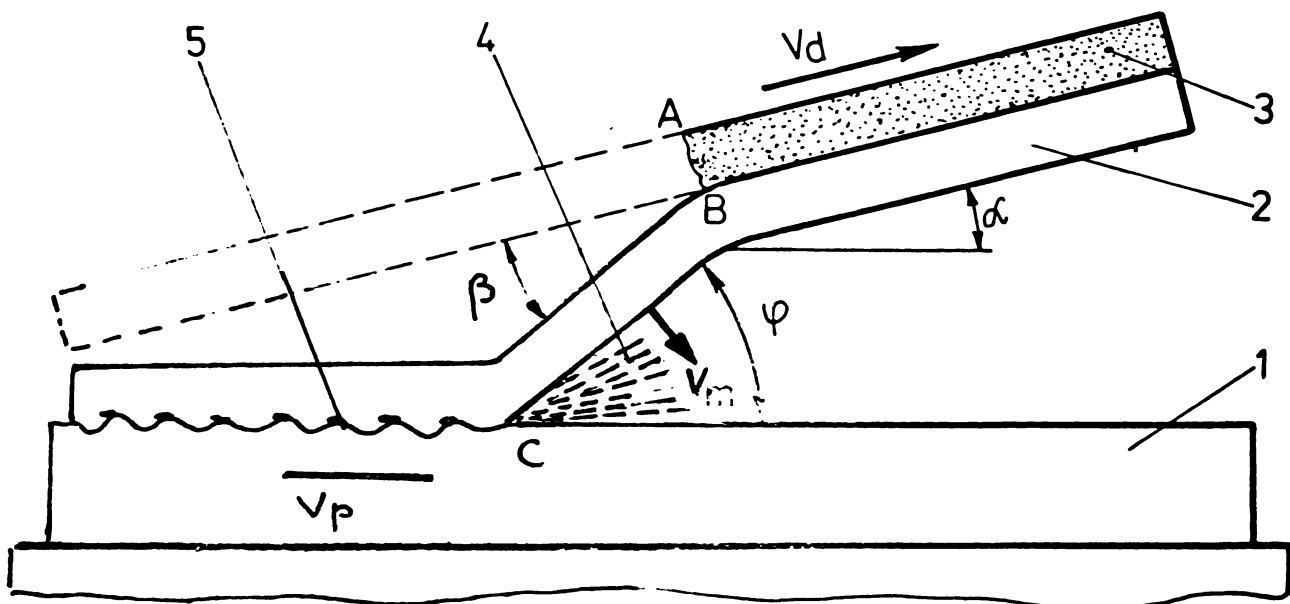


Fig.1.4. Principiul de sudare prin explozie  
1-Placă de bază; 2-Placa de sudat; 3-Strat de exploziv;  
4-Jet metallic; 5-Valuri.

Pentru poziția din fig.1.3 b, viteza de detonație a explozivului trebuie să fie mai mică decât viteza sunetului în metelul de sudat  $V_d = (3...5) \cdot 10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Dacă poziția inițială a suprafețelor de îmbinat este înclinată cu unghiul  $\alpha$  (fig.1.3 a) se vor produce unde de șoc oblice. Viteza de detonație a explozivului va fi în acest caz de peste  $5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Este cazul cel mai obișnuit în tehnologia sudării prin explozie.

Forța de izbire este extrem de mare, fapt ce conduce la presiuni ce pot ajunge pînă la  $2 \cdot 10^5 \text{ daN}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Viteza de mișcare ( $V_m$ ) a plăcii de sudat poate atinge valori de  $(1,8...2)10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , fiind în funcție de viteza de detonație a explozivului și caracteristicile metalului de sudat.

Punctele succesive de impact (C din fig.1.4) se deplasează cu viteze  $V_p$ , care de fapt este viteza de sudare a celor două plăci.

Explozivul poate fi așezat ori direct pe placa de sudat, ori pe un strat tampon. Pentru a analiza acțiunea explozivului asupra plăcii de sudat vom considera momentul imediat după detonarea explozivului, placa de sudat fiind așezată orizontal, paralelă cu placa de bază (fig.1.6).

361.12  
100 167 E

Frontul de detonație (AB) se deplasează spre zona ne-explodată (ZNE) cu viteza de detonație  $V_d$ . În spatele frontului

de detonație este zona de expansiune a produselor exploziei (ZEP), încadrată de zonele undelor de compresie (ZUC) care acționează asupra mediului și asupra plăcii de sudat. Deasupra explozivului este zona neperturbată (ZNP).

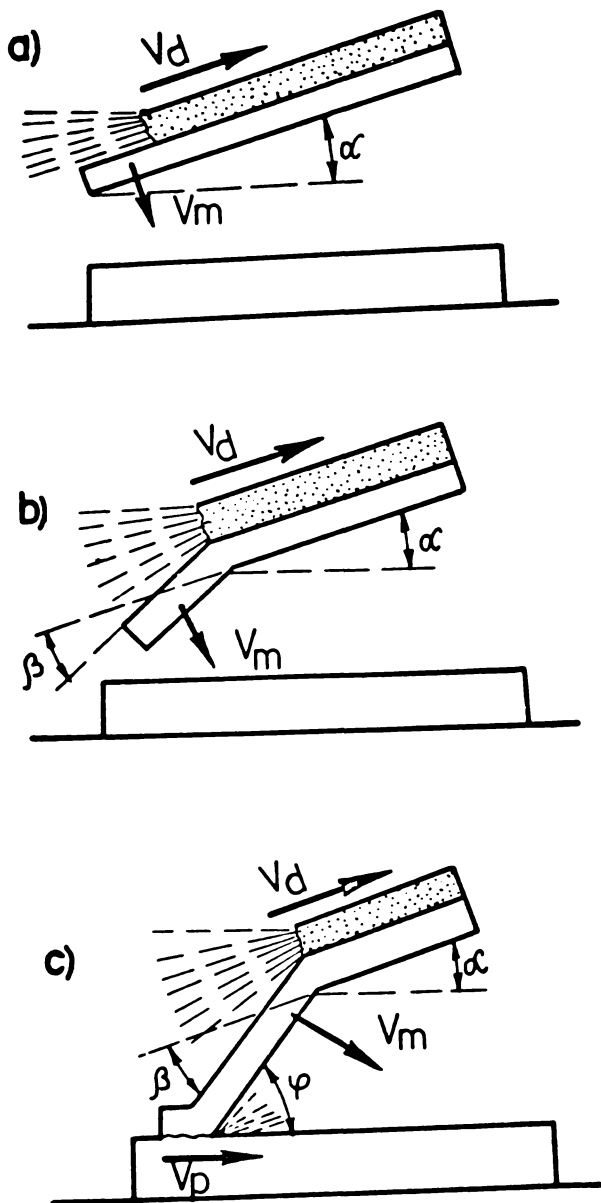


Fig.15 Procesul de sudare prin explozie

$\alpha$ -unghiul de înclinare inițial;  
 $\beta$ -unghiul dinamic de înclinare a plăcii de sudat;  
 $\varphi$ -unghiul dinamic de înclinare dintre placa de bază (unghiul de impact)

Ca urmare a impulsului primit, placa de sudat se înclină cu unghiul dinamic  $\beta$ . În zona de mișcare, între punctele B și C, placa de sudat se deplasează cu viteza de mișcare  $V_m$ .

Pentru realizarea unei îmbinări sudate prin explozie, trebuie să îndeplinească două condiții principale:

- presiunea în punctele de impact a celor două piese de îmbinat trebuie să atingă o anumită valoare, iar

- viteza punctelor de impact (viteza de sudare) trebuie să fie mai mică decât viteza sunetului în metalul sudat.

Din analiza procesului de sudare prin explozie se ajunge la concluzia că presiunea în punctele de impact depinde de viteza de mișcare a plăcii de sudat. La rîndul său, viteza de mișcare a plăcii de sudat - în ultimă instanță - este dependentă de valoarea raportului dintre masa explozivului și masa accelerată ( $m_e/m_p$ ).

Referitor la a doua condiție se poate afirma că viteza de sudare (viteza punctelor de impact) nu trebuie să ajungă la mărimea vitezei sunetului în metalul de sudat, deoarece la viteze mari de detonație a explozivului, plăcile se vor ciocni și îndepărta, nu va mai apare jetul metalic de curățire a suprafețelor de înclinat, iar sudarea nu se mai poate face.

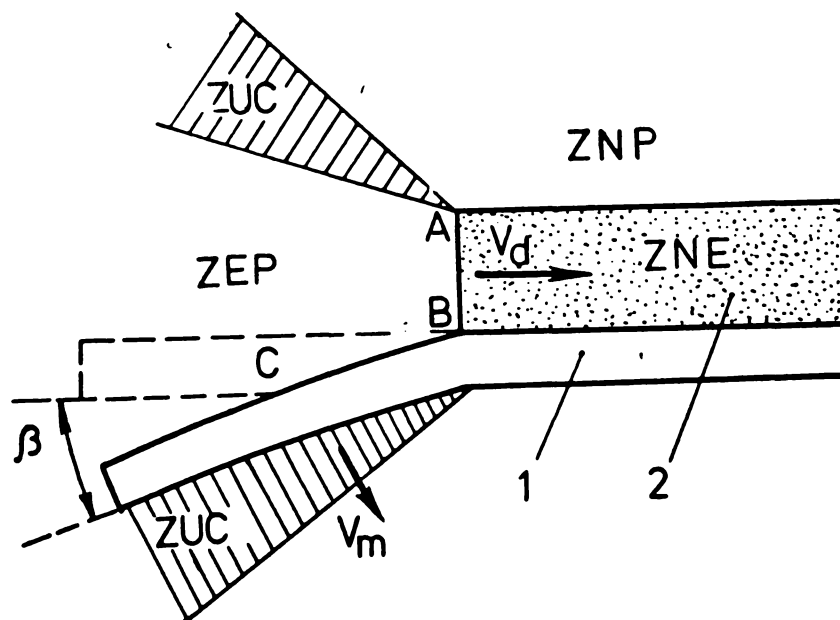


Fig.1.6 Acțiunea explozivului (2) asupra plăcii de sudat (1).

De aici concluzia că sudarea prin explozie poate fi realizată cu două tipuri de explozivi:

- explozivi cu viteza de detonație subsonică, și
- explozivi cu viteza de detonație supersonică.

Deoarece explozivii cu viteze de detonație supersonice, se fabrică în țară în mod curent, cercetările au fost îndreptate în direcția stabilirii tehnologiei de sudare prin explozie cu acești explozivi.

#### 1.4.2. Fenomene fizice la sudarea prin explozie

La ciocnirea celor două plăci care se sudează prin explozie, în metalele respective apar unde de șoc. Pentru analiza mecanismului de formare a undelor de șoc se apelează la metoda impulsurilor succesive, metodă utilizată de Hugoniot și apoi de Cristoffel [67].

S-a stabilit că unda de șoc constă dintr-o discontinuitate. Acest fapt este valabil și pentru solide. Starea ini-

țială avînd parametrii  $p_0$  (presiunea),  $\rho_0$  (densitatea) și  $U_0$  (energia pe unitatea de masă) este transformată într-o stare comprimată în care parametrii devin  $p, \rho, U$ , ( $p > p_0$ ).

Viteza undei de șoc  $V_d$  este viteza cu care se deplasează și frontul de detonație  $S$  (fig.1.7 a). La starea comprimată se asociază și viteza particulei  $V_p$ .

Pentru studiul undelor de șoc trebuie să se țină seama de ecuațiile conservării impulsului, conservării energiei și conservării masei.

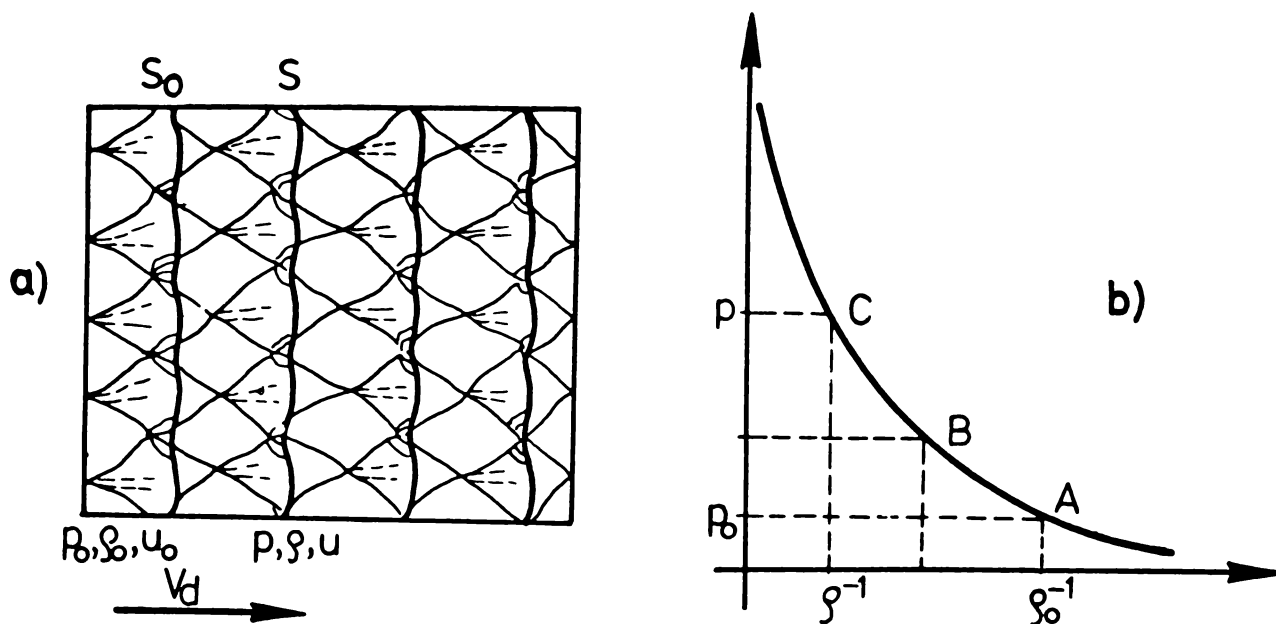


Fig.1.7 Structura frontului de detonație și curba Hugoniot [67]

Pe baza acestor relații se obține ecuația Rankine-Hugoniot pentru undele de șoc în solide:

$$U - U_0 = 0,5 (\rho_0^{-1} - \rho^{-1})(p - p_0) \quad (1.1)$$

În practică, atunci când o placă este impulsionată prin detonația unei cantități de exploziv și izbește o altă placă ia naștere o undă de șoc (fig.1.8).

Pentru plăcile A și B se poate stabili relația Rankine-Hugoniot, ținând seama că:

$$p = f(V_p) \quad (1.2)$$

iar

$$p_A = f(V_U - V_{p_A}) \quad (1.3)$$

și

$$p_B = f(v_{p_B}) \quad (1.4)$$

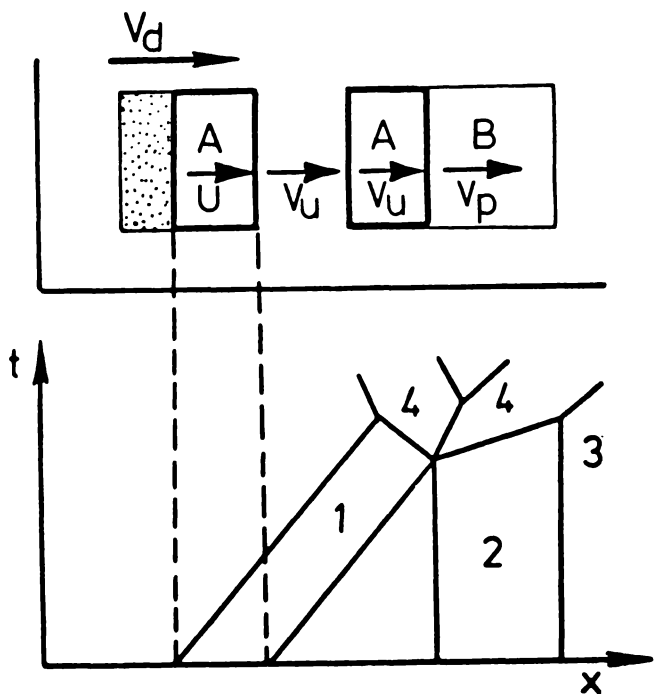


Fig.1.8 Impactul a două plăci A și B [67]

Din fig.1.8 rezultă că la izchirea celor două plăci se formează unde de șoc (1) în placa A, (2) în placa B și (3) în aer. La impactul piștelor (4) ia naștere o presiune destul de mare.

Utilizînd diagrama Hugoniot (fig.1.9), se poate determina atât presiunea  $p$  cît și viteza  $v_p$  din intersecția curbelor  $p_A$  și  $p_B$ . Cunoscînd grosimea plăcii de sudat A și viteza undei de șoc se poate determina și baza de timp.

În cazul cînd plăcile de sudat sînt așezate înclinat cu unghiul  $\alpha$ , unda de șoc nu mai este normală.

Ca urmare a impactului celor două plăci, pe lîngă undele de compresie mai apar și unde reflectate, de tensiune.

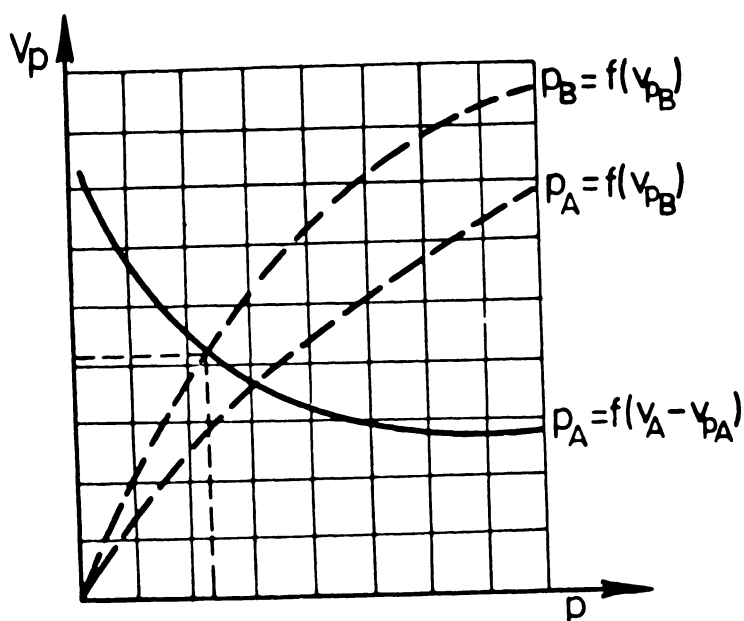


Fig.1.9 Diagrama Hugoniot

Aceste unde pot produce prejudicii procesului de sudare. Se impune ca undele reflectate să aibă o intensitate minimă. Pentru aceasta presiunea de sudare trebuie să fie destul de mare - mai mare decît tensiunea dinamică a metalului de sudat - considerînd metalul ca un fluid.

Comportamentul particulei care se deplasează perpendicular pe direcția de propagare a undei de șoc la undele de șoc nelongitudinale nu se schimbă.

INSTITUTUL NAȚIONAL DE RESEARCH  
TIMIȘOARA  
ROMANIA

In cazul impactului oblic simetric a două plăci, undele de șoc se prezintă ca două jeturi care se întâlnesc sub un unghi  $2\alpha$  (fig.1.10).

Valoarea maximă a unghiului  $\alpha$ , când este încă posibil un șoc oblic, va fi  $\alpha_c$ .

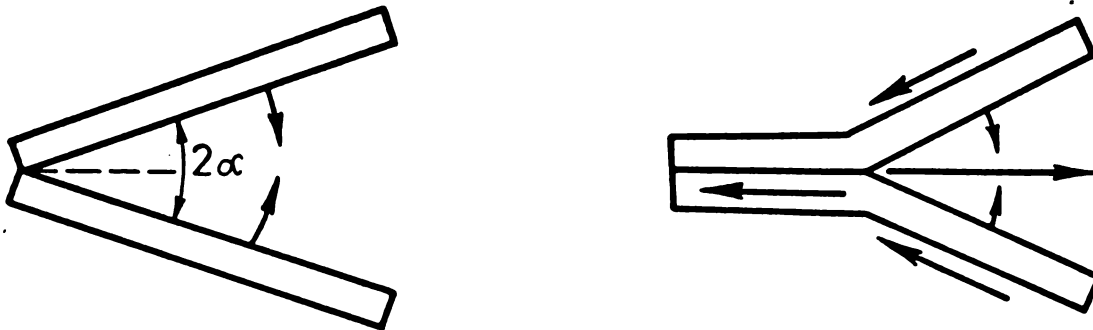


Fig.1.10 Ciocnirea oblică-simetrică a două plăci.

Dacă

$$\frac{d\alpha}{d\mu} = \frac{d(\operatorname{tg}^2\alpha)}{d\mu} = 0 \quad (1.5)$$

în care  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ , se obține

$$\frac{d\rho}{d\mu} = \frac{\rho(\rho - \rho_0 v_{p_0}^2)}{(\mu + 1) [\mu \rho_0 v_{p_0}^2 - \rho(\mu + 1)]} \quad (1.6)$$

Din relațiile (1.5) și (1.6) se determină atât valorile  $\rho$  și  $\mu$ , pentru condițiile inițiale  $\rho_0$  și  $u_0$ , cât și valoarea unghiului  $\alpha_c$ .

Deși s-au ocupat mult de problema îmbinărilor prin explozie, G.Birkhoff, P.Fac Dougall, M.Pugh și R.Taylor [16] nu au reușit să găsească condițiile în care iau naștere - în zonele îmbinării - undele de șoc care influențează extrem de mult rezistența și calitatea sudurii prin explozie.

Ca urmare a cercetărilor efectuate, M.Kelsh, G.Shreffler și L.Tilling [113], reușesc să aducă o contribuție importantă la dezvoltarea teoriei îmbinărilor sudate prin explozie.

Reluând această problemă R.Cowan și H.Holtzman [26] completează și elucidează o serie de aspecte privind comportarea diferită în momentul îmbinării a doi curenți de lichid cu viteze supersonice. Astfel ajung la concluzia că la impactul celor două



plăci de sudat sau naștere unde de șoc încătuse, care pe de o parte împiedică formarea jetului, iar pe de altă parte provoacă formarea unor unde de diluare care pot constitui cauza unei noi separări a curenților.

Continuând cercetările, I.Nemecek și J.Vacek indică o rezolvare analitică [84] a îmbinării cu viteză de detonație supersonică a două plăci metalice.

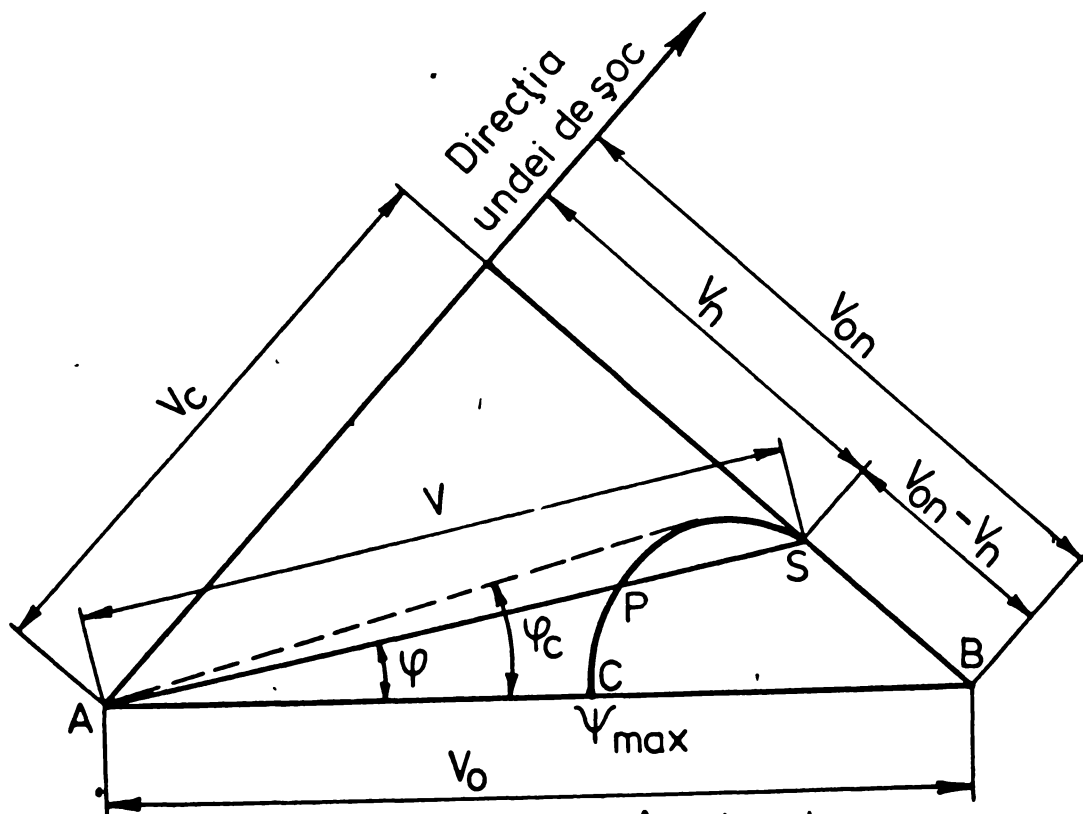


Fig. 1.11 Polara de șoc în planul hodografului [14]

Vitezele curenților de metal care vin ( $V_0$ ) și care pleacă ( $V$ ) sînt descompuse în componentele  $V_{0t}$  și  $V_t$ , respectiv  $V_{on}$  și  $V_n$ , paralele și respectiv perpendiculare pe unda de șoc. Se poate considera că în zona înbinării curenții au densitatea  $\rho_0$  și presiunea din ei este zero, iar după aceasta, densitatea este  $\rho$  și presiunea  $p$ , în condițiile de conservare a masei și a impulsului curențului.

Formarea undei de șoc a fost analizată de R.Abrahanson [1] cu ajutorul așa numitei polare de șoc în planul hodografului (fig.1.11).

În acest sens J.Berger și J.Vierd [14] consideră că fiecărui punct al curențului - din planul fizic - îi corespunde un punct în planul hodografului, determinat prin două coordonate (componentele vectorului vitezei în direcția axelor de coordonate ale hodografului).

Pentru reprezentarea grafică se alege ca axa absciselor direcția  $V_0$ , iar axa ordonatelor are direcția perpendiculară pe  $V_0$  (fig.1.11). Pentru o polară de șoc,  $\varphi_0$  și  $V_0$  se consideră invariabile. Parametrul  $\psi$  este o variabilă independentă, iar  $V_{on}$  și  $V_n$  se calculează pentru fiecare valoare a lui  $\psi$  din relațiile:

$$\begin{aligned} V_{on} &= \left[ \frac{p(\psi+1)}{\psi \rho_0} \right]^{\frac{1}{2}} \\ V_n &= \left[ \frac{p}{\psi \rho_0 (\psi+1)} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (1.7)$$

cu ajutorul ecuației de stare a metalului care exprimată analitic de către colectivul Rice [93] are forma:

$$p = K_1 \psi + K_2 \psi^2 + K_3 \psi^3 \quad (1.8)$$

Valoarea maximă a unghiului  $\varphi_0$  se determină din polara de șoc. De aici rezultă că vom avea două situații:

- dreapta cu unghiul  $\varphi > \varphi_0$  numai intersectează polara de șoc și în acest caz nu se mai produce o deviere a curentului, ajungînd la formarea jetului;

- dreapta cu unghiul  $\varphi < \varphi_0$  intersectează polara de șoc în două puncte P și S, corespunzătoare unui șoc puternic, respectiv slab.

În aceste condiții se impune a se găsi soluția reală. Pentru ușurință autorii [14] recomandă ca în locul dependenței  $\varphi_0 = f(V_0)$  să se utilizeze dependența  $2\varphi_0 = f(V_m)$ . În acest scop au trasat o diagramă (fig.1.12).

Asupra procesului de sudare prin explozie s-au emis numeroase teorii. Din analiza acestora a rezultat că cea mai interesantă este teoria elaborată de către A.Bahrami și B.Crossland [10]. Această teorie a fost admisă în ultimul timp de către majoritatea cercetătorilor din acest domeniu.

În punctul de impact dintre placa de sudat (la sudarea prin explozie cu plăcile inițial înclinate) și placa de bază (fig.1.13) vom considera un sistem de coordonate tridimensionale.

Acest sistem se deplasează în lungul plăcii de bază cu viteza punctelor succesive de impact (viteza de sudare)  $V_p$ . Ori-

ginea sistemului de coordonate deplasându-se în direcția valorilor pozitive ale lui Y, rezultă că placa de bază se deplasează în sensul valorilor negative cu viteza de sudare  $V_p$ .

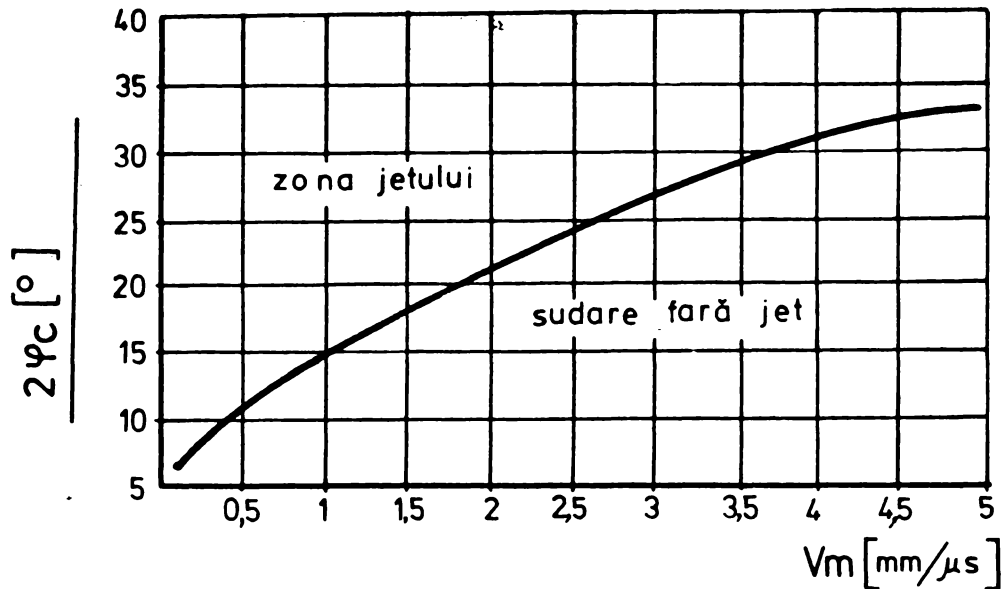


Fig. 1.12 Dependența  $\psi_c = f(V_m)$  la sudarea prin explozie a placilor din oțel [14]

În același timp și placa de sudat se mișcă față de planul OXY tot în sensul ordonatelor negative ale lui Y cu o viteză care - în originea sistemului de coordonate - se confundă cu viteza plăcii de bază.

Se poate considera că placa de sudat izbește placa de bază sub forma unui jet înclinat cu unghiul  $\varphi$  (unghiul dinamic de înclinare a plăcii de sudat față de placa de bază).

Tinând seama de viteza de deflagrație ( $5600 \dots 8000 \text{ ms}^{-1}$ ) precum și de presiunile de sudare ( $50.000 \dots 200.000 \text{ daN.cm}^{-2}$ ) se poate admite ipoteza că cele două plăci se comportă ca două fluide cu vâscozitate nulă.

În funcție de mărimea unghiului  $\varphi$  care se formează în punctul de impact pot să apară diferite situații.

Dacă  $\varphi = 0$  și vitezele celor două lichide sînt identice, nu se produce nici o turbulență.

Dacă  $\varphi > 0$ , lama subțire de fluid (placa de sudat) se va despărți în două: o parte se va deplasa în continuare pe direcția inițială formînd jetul principal iar a doua parte - după impact - va fi proiectată înapoi în interiorul unghiului  $\varphi$ , formînd jetul de întoarcere (fig. 1.13 b și 1.14).

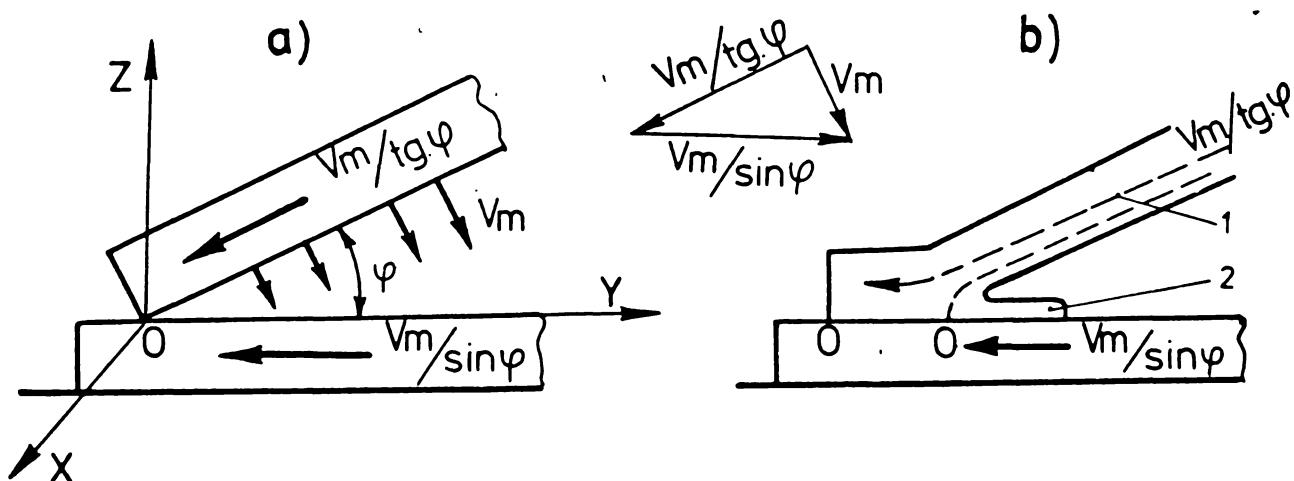


Fig. 1.13 Formarea jetului metalic.

1 - Jet principal ; 2 - Jet de întoarcere.

In realitate, viteza de sudare  $V_p$  este mai mică decât viteza sunetului în placa de bază  $V_s$ , fapt ce face să apară o serie de valuri (fig. 1.16). Din fig. 1.14 rezultă acest mecanism. In punctul O din zona de egală presiune, liniile de curgere ale punctelor B și E se întâlnesc. Stratul pînă la liniile de suprafață ale punctelor A și D, conținând oxizi și impurități este eliminat de jetul de întoarcere.

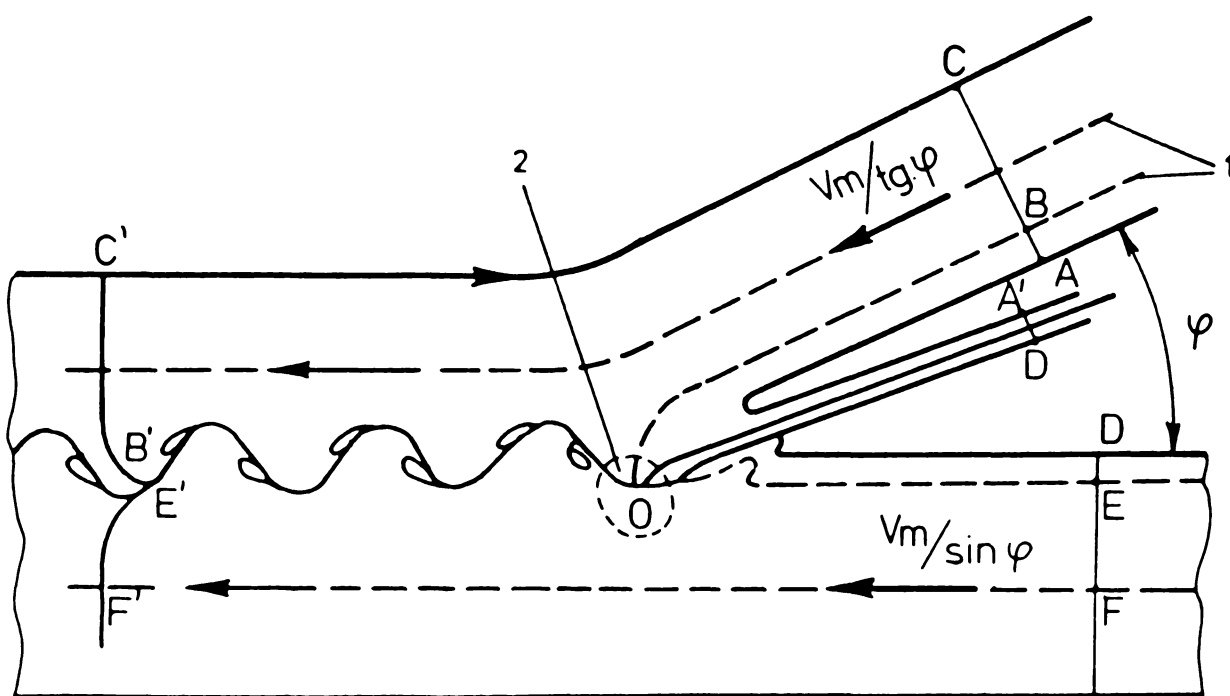


Fig. 1.14 Acțiunea undelor de șoc și zona de impact.

1 - Liniile de curgere ; 2 - Zona de egală presiune.

Porcând de la aceste considerații V. Babul și M. Madar-  
zik [9], reușesc să schițeze procesul formării jetului metalic  
și valurilor la întârzița de sudare (fir.1.15).

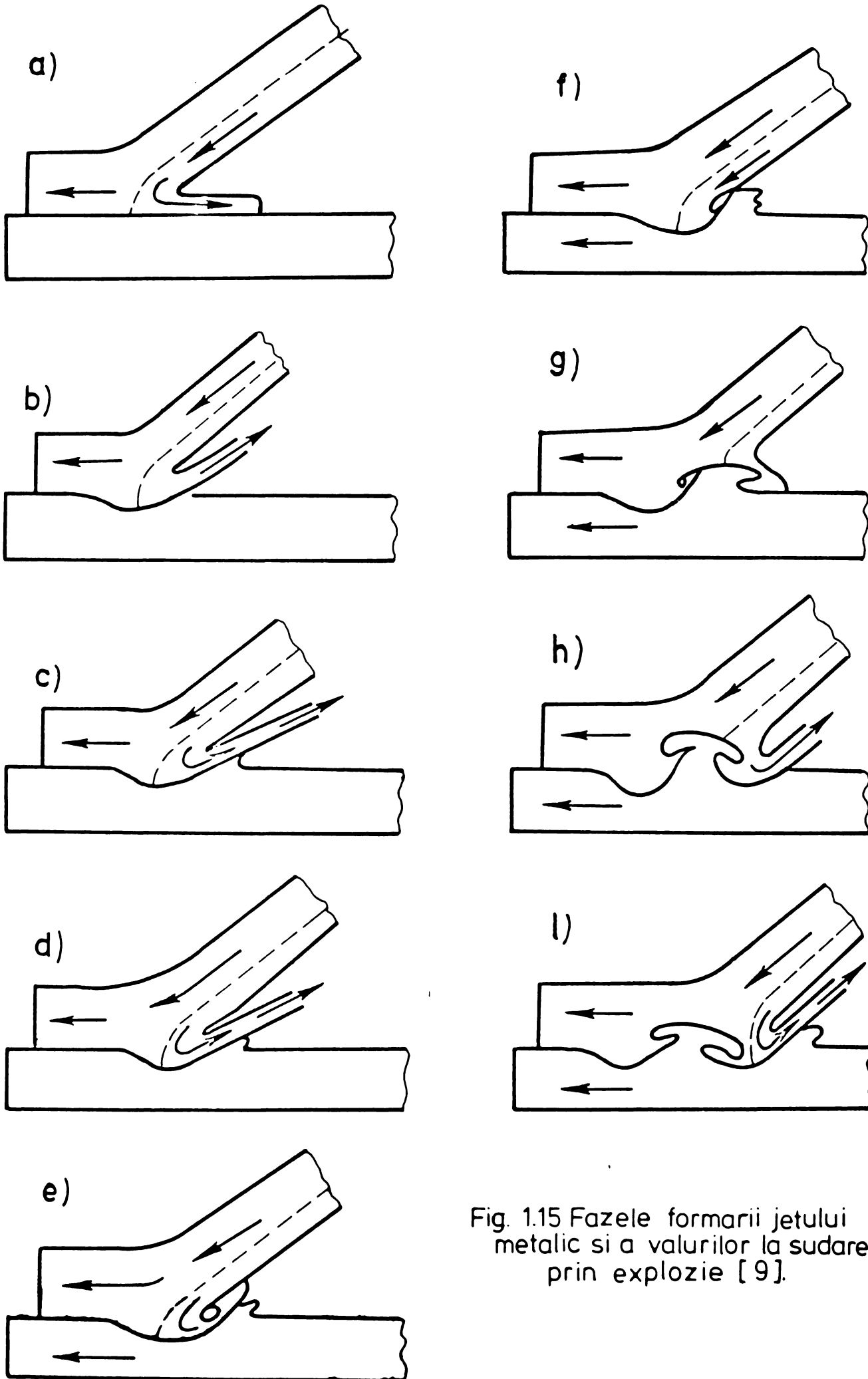


Fig. 1.15 Fazele formării jetului  
metalic și a valurilor la sudarea  
prin explozie [9].

La sudarea prin explozie, presiunea de sudare este realizată de presiunea de detonație a explozivului. Din fizica explozivilor [12; 17; 18; 108]



Fig. 4.16. Sectione într-o sudură prin explozie (Cu-Ol)

rezultă că presiunea de detonație  $p_d$  este determinată numai de densitatea explozivului  $\rho_e$ , viteza de detonație  $V_d$  și de viteza de scurgere a gazelor rezultate din detonația explozivului  $V_g$ . Presiunea de detonație este bine stabilită pe baza teoriei hidrodinamice:

$$p_d = \rho_e \cdot V_d \cdot V_g \quad (1.9)$$

Prin analogie, pentru detonații în aer liber, H. Rice, G. Mc Queen și M. Walsh [93] au stabilit pentru presiunea de sudare cu explozivi relația:

$$p_s = V_p \cdot V_s \cdot \rho \quad (1.10)$$

în care

- $V_p$  - viteza de mișcare a plăcii de sudat;
- $V_s$  - viteza undei de șoc în placa de sudat;
- $\rho$  - densitatea metalului.

Presiunea de sudare trebuie să fie suficient de mare - superioară limitei de curgere  $\sigma_0$  a metalului de sudat - pentru a putea provoca o curgere plastică substanțială a metalului plăcii de sudat.

Rolul presiunii la sudarea prin explozie este hotărîtor. Asupra metalelor de îmbinat, presiunea de sudare are trei efecte:

- peliculele de oxizi sînt rupte prin deformarea și mișcarea relativă a suprafețelor plăcilor de îmbinat, fapt ce duce la curățirea suprafețelor de către jetul metallic;
- suprafețele netede sînt aduse în contact intim iar datorită căldurii de frecare precum și a scurtei difuziuni în lanț face ca forțele interatomice să intre în acțiune;

- deplasându-se odată cu frontul de detonație, presiunea de sudare creează permanent impulsuri ce duc la formarea undelor de șoc.

Energia necesară de a produce perturbații va deriva din energia cinetică a plăcii de sudat, a cărei grosime trebuie să fie comparabilă cu amplitudinea unei unde de șoc primare.

Analizând aceste aspecte, I. Zernow [116] ajunge la concluzia că la depășirea unghiului critic  $\varphi_c$  pentru producerea jetului, amplitudinea și lungimea unei unde de șoc a valurilor (fig. 1.16) crește pînă atinge o valoare relativ mare a unghiului dinamic  $\varphi$ , punct în care amplitudinea se apropie rapid de zero, în timp ce lungimea unei unde de șoc devine nedeterminată (fig. 1.17).

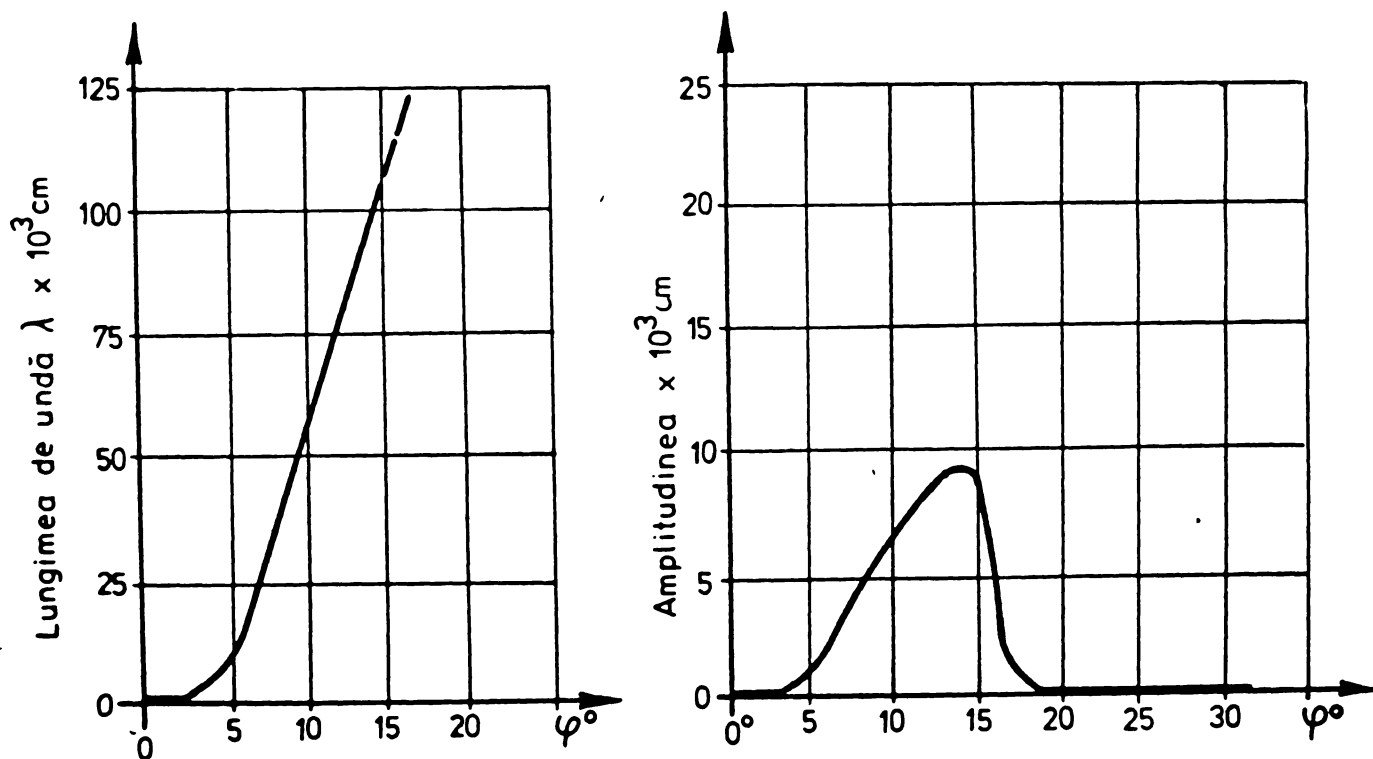


Fig. 1.17 Variația lungimii de șoc și amplitudinii valurilor la sudarea prin explozie a oțelului inoxidabil cu oțel carbon [116].

Anterior vitezei de detonație, presiunea de sudare se manifestă un timp foarte scurt - de ordinul microsecundelor.

La experimentările de sudare prin explozie [10; 29; 30; 57] a unor tipuri de oțel inoxidabil cu CL 32...CL 37 s-a constatat că la unghiuri dinamice mici - sub valoarea critică - și deci și presiuni de sudare mici nu au apărut jeturi, amplitudinea valurilor fiind mai mică de 0,1 cm.

Lupă sudarea prin explozie, metalele îmbinate au o structură nemodificată. Se modifică însă duritatea în straturile superioare.

Propagarea undelor de șoc în metalele ce se sudază prin explozie este un fenomen la care aspectele mecanice și termodinamice sînt extrem de intime. Problema proceselor tehnice la sudarea prin explozie a fost foarte puțin studiată, referirile din literatura de specialitate fiind aproape neglijate. Din cercetările întreprinse de către autor [58] s-a reușit să se obțină o sinteză a încercărilor de elucidare a acestor aspecte.

Considerînd că într-o undă de șoc starea de tensiune este hidrostatică, pentru un solid care are densitatea  $\rho$ , volumul specific  $V = \rho^{-1}$ , temperatura  $T^{\circ}K$  și dacă notăm cu  $p$  - presiunea,  $\varepsilon$  - energia internă și  $S$  - entropia specifică, vom avea:

$$T dS = d\varepsilon + p \rho^{-2} d\rho . \quad (1.11)$$

În această expresie se disting două părți constituante, presiunea și energia internă, ambele fie la un volum scăzut (sau densitate mărită) și la temperatură constantă,  $p_T$  și  $\varepsilon_T$ , fie la o creștere a temperaturii la volum (sau densitate) constantă  $p_V$  și  $\varepsilon_V$ .

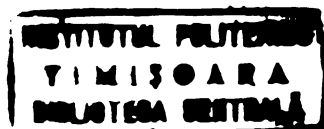
Deoarece presiunile și temperaturile atinse de undele de șoc sînt extrem de ridicate, se poate considera presiunea atmosferică  $p_0 = 0$  iar temperatura inițială  $T_0 \approx 0$ .

Este știut faptul că între cele două tipuri de forțe - forțele de repulsie dintre atomi, care se manifestă mai ales la distanțe mici și forțele de atracție newtoniene, ce scad rapid cu distanța (proporționale cu  $\rho^{-1/3}$ ) - rezultă un echilibru.

Pentru un solid cu densitatea inițială măsurată  $\rho_0$ , energia internă  $\varepsilon_T$  care corespunde la presiunea  $p_T$  (se reduce pentru  $T = 0$  la energia liberă  $\psi$ ) este dată de:

$$\varepsilon_T = - \int_{\rho_0}^{\rho} p d \rho^{-1} \quad (1.12)$$

Bazîndu-se pe teoria deformațiilor finite [67], Burnagham dă pentru  $p_T$  relația:





$$p_T = \frac{3}{2 K_0} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{7/3} - \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{5/3} \right] \left\{ 1 - \xi \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} - 1 \right] \right\} \quad (1.13)$$

unde  $\xi$  este un parametru ajustabil.

Componentele termice ale presiunii și energiei interne  $p_V$  și  $\epsilon_V$  se datoresc agitației termice a atomilor și în parte temperaturii. Dacă se notează cu  $p_{Va}$ ;  $\epsilon_{Va}$  și  $p_{Ve}$ ;  $\epsilon_{Ve}$  componentele atomice, respectiv electronice, ale presiunii și energiei interne, se poate scrie:

$$p = p_T + p_V = p_T + p_{Va} + p_{Ve} ; \quad (1.14)$$

$$\epsilon = \epsilon_T + \epsilon_V = \epsilon_T + \epsilon_{Va} + \epsilon_{Ve} . \quad (1.15)$$

Presiunea și energia internă definite la o densitate și o temperatură  $T$  din relațiile (1.14) și (1.15) se obțin după ce se determină  $p_T$  și  $\epsilon_T$  corespunzător variației densității de la  $\rho_0$  la  $\rho$ , temperatură practic nulă și se evaluează  $p_V$  și  $\epsilon_V$ .

La temperaturi sub  $1 \cdot 10^4$  °K,  $p_{Ve}$  și  $\epsilon_{Ve}$  sînt neglija-bile. Dacă se ia în considerare căldura specifică  $C_V = 3 Nk$  ( $N$  fiind numărul de atomi pe unitatea de masă, iar  $k$  constanta Boltzman) energia termică este:

$$\epsilon_{Va} = C_V \cdot T \quad (1.16)$$

Aceasta este posibil, deoarece bariera potențială care împiedică trecerea atomilor de rețeaua poziției interstițiilor ori vacanțelor este superioară lui  $kT$ . Înălțimea acestei bariere este cu etît mai ridicată cu cît presiunea este mai mare. De asemenea, se poate considera agitația termică a atomilor ca vibratorie la o temperatură de  $20 \cdot 10^3 \dots 30 \cdot 10^3$  °K, temperaturi ce însoțesc undele de șoc experimentate.

Pentru obținerea creșterii corespunzătoare presiunii  $p_{Va}$  se utilizează expresia:

$$\left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho^{-1}} \right]_T = T \left[ \frac{\partial p}{\partial T} \right]_{\rho} - p \quad (1.17)$$

Statistica măsurărilor efectuate de W. Bridgman [20] la  $p = (5 \dots 10) \cdot 10^4$  daN.cm<sup>-2</sup> conduce la concluzie că coeficientul

$[\partial p / \partial T]_{\rho}$ , din expresia (1.17), se poate considera constant, iar căldura specifică  $C_V$  fiind independentă de  $\rho$ , rezultă că  $p_{Va}$  este proporțional cu  $T$ .

În consecință, apelînd la coeficientul din teoria Mie-Grüneisen [47] - păstrînd domeniul temperaturilor - și la (1.16), vom avea:

$$p_{Va} = \Gamma(\rho)^{\rho} C_V T = \Gamma(\rho)^{\rho} v_a \quad (1.18)$$

Justificarea acestei relații, precum și obținerea expresiei coeficientului Grüneisen  $\Gamma(\rho)$ , în funcție de derivata presiunii elastice  $p_T$ , se poate face pornind de la expresia energiei libere a unui solid.

După efectuarea calculelor se ajunge la expresia:

$$\Gamma(\rho) = - \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{\partial^2 p_T / \partial (\rho^{-1})^2}{\partial p_T / \partial \rho^{-1}} - \frac{2}{3} \quad (1.19)$$

Dacă se derivează relația (1.18) în raport cu  $T$ , în final se obține:

$$\Gamma(\rho) = \frac{\rho^{-1} \left[ \frac{\partial p}{\partial T} \right]_{\rho}}{C_V} = - \frac{\rho^{-1} \left[ \frac{\partial \rho^{-1}}{\partial T} \right]_p \cdot \left[ \frac{\partial p}{\partial \rho^{-1}} \right]_T}{C_V} \quad (1.20)$$

De aici rezultă:

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial T} \right]_{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial T}{\partial \rho^{-1}} \right]_p \cdot \left[ \frac{\partial \rho^{-1}}{\partial p} \right]_T = - 1. \quad (1.21)$$

Tinînd seama că coeficientul de dilatare termică la presiune constantă  $\alpha = \rho_p \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_{p_0}$ , de coeficientul de compresibilitate izotermă în condiții normale  $K_0 = - \rho_0 \left[ \frac{\partial \rho^{-1}}{\partial p} \right]_{T_0}$  și de viteza sunetului în aceleași condiții  $\sigma_0 = \left[ dp/d\rho \right]^{1/2}$ , expresie coeficientului Grüneisen, în condiții normale, va fi:

$$\Gamma = \Gamma(\rho_0) = \frac{\alpha}{\rho_0 C_V K_0} = \frac{\alpha^2}{C_V} \quad (1.22)$$

Coeficientul Grüneisen se folosește atît la determinarea presiunii  $p_{Va}$  (1.18) și a entropiei  $S$ , cît și a temperaturii

ce se manifestă la sudarea metalelor prin explozie.

Pentru determinarea entropiei, plecând de la relația (1.11) obținem:

$$dS = \frac{d\varepsilon + p \cdot d\rho^{-1}}{T} = \frac{d\varepsilon_V + p_V d\rho^{-1}}{T}, \quad (1.23)$$

deoarece componentele  $\varepsilon_T$  și  $p_T$  din ecuațiile (1.18) și (1.19) corespund unui proces izentropic.

Substituind expresiile (1.16) și (1.19) pentru temperaturi mai mici de  $10^4$  °K în relația (1.23) se obține:

$$dS = C_V \frac{dT}{T} + \Gamma C_V \frac{d\rho}{\rho}. \quad (1.24)$$

De aici, ținând seama de constantele  $C_V$  și  $\Gamma$  se ajunge la entropia specifică:

$$S = C_V \cdot \lg \left[ \frac{T}{T_0} \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{\Gamma_0} \right] + S_0. \quad (1.25)$$

din care rezultă că relația izentropică între  $T$  și  $\rho$  devine:

$$\frac{T}{T_0} = \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right]^{\Gamma_0} \quad (1.26)$$

Aceasta ne conduce la obținerea temperaturii:

$$T = T_0 \left[ \rho / \rho_0 \right]^{\Gamma}. \quad (1.27)$$

Avîndu-se în vedere particularitățile coeficientului  $\Gamma$ , determinarea valorii sale constituie o problemă dificilă, cu atât mai mult cu cît coeficientul nu este constant. S-au făcut numeroase încercări pentru determinarea coeficientului  $\Gamma$ . Astfel C.Slater [107] obține o expresie pentru coeficientul Grüneisen, iar S.Dugdale și J.Mc.Donald [35] ținînd cont de o modificare uniformă a forțelor interatomice în rețeaua cubică, proporțională cu o compresiune egal distribuită în rețea au propus o formă ameliorată a expresiei coeficientului  $\Gamma$ . Pentru densități și temperaturi realizate la experimentările cu unde de șoc, Zeldovici și Reizer indică valori ale coeficientului  $\Gamma$  în jur de 0,5 în

timp ce J.Alder [2] semnalează dezacordul între creșterea de la 2,09 la aproximativ 4 pentru aluminiu la un raport de compresiune de 0,74 și o descreștere descrisă de V.Altshuler [3] și [4] în condiții asemănătoare.

F.Heyda deduce pentru coeficientul Grüneisen expresia:

$$\Gamma_0 = 2 \left[ b - \frac{1}{3} \right] \quad (1.28)$$

în care  $b$  poate lua diferite valori, iar Gogolev și colectivul său [5] ajung la:

$$\Gamma(\rho) = 2,3 \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right]^{-1,23} \quad (1.29)$$

relație adoptată de majoritatea laboratoarelor de cercetări. Această expresie a fost luată în considerare și de noi și utilizată în calculul temperaturilor ce iau naștere la sudarea prin explozie a metalelor.

#### 1.4.3. Procese metalurgice la sudarea prin explozie

Aspectele metalurgice ale sudării prin explozie au fost tratate de literatură de specialitate destul de sporadic.

Cu toate că sudarea prin explozie este aplicată din ce în ce mai mult pe scară industrială la îmbinarea diferitelor metale, cercetările întreprinse în domeniul proceselor metalurgice sînt reduse la studiul cuplurilor de metale similare și 2-3 metale și aliaje diferite. Aceaste poate și din cauza dificultăților de observare și măsurare a parametrilor, datorate vitezei extrem de mare a desfășurării procesului de sudare.

La experimentările efectuate într-o serie de laboratoare, s-au sudat prin explozie stît metale similare (cupru-cupru, oțel-oțel, titan-titan), precum și metale diferite (cupru-oțel, titan-oțel, stelit-oțel, aluminiu-oțel).

Pentru a se pune în evidență procesele metalurgice, la experimentările efectuate de W.Lucas și J.Williams [75] plăcile de îmbinat au fost așezate la diferite mărimi ale unghiului de înclinare  $\alpha$ , iar grosimea stratului de exploziv a variat între 3 și 10 mm.

În fig.1.18; 1.19; 1.20 și 1.21 se prezintă unele probe metalografice pentru îmbinarea cupru-cupru. Astfel, la unghiuri

mari și încărcătură explozivă mică se realizează o legătură de adeziune destul de strânsă (fig.1.18) linieră, fără ondulații 4 .

Aici jetul metalic a scăpat din sistem fără să producă perturbații în placa de bază [57].

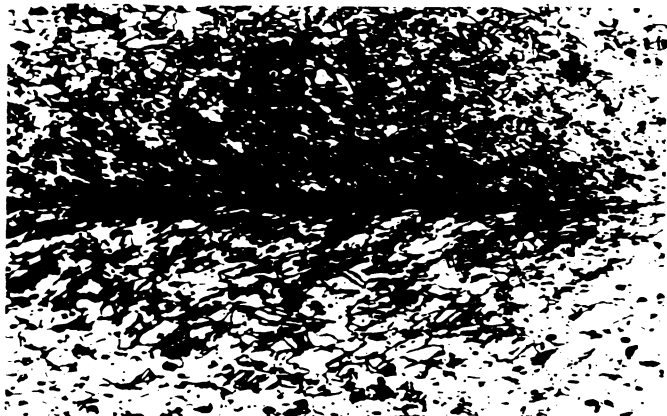


Fig.1.18. Grosimea plăcilor 3 mm; stratul exploziv 3 mm; înclinare  $\alpha = 15^\circ$

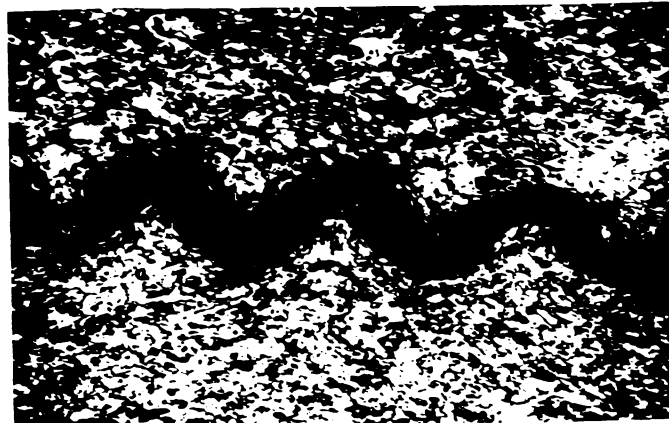


Fig.1.19. Grosimea plăcilor 3 mm; stratul exploziv 10 mm; înclinarea  $\alpha = 5^\circ$

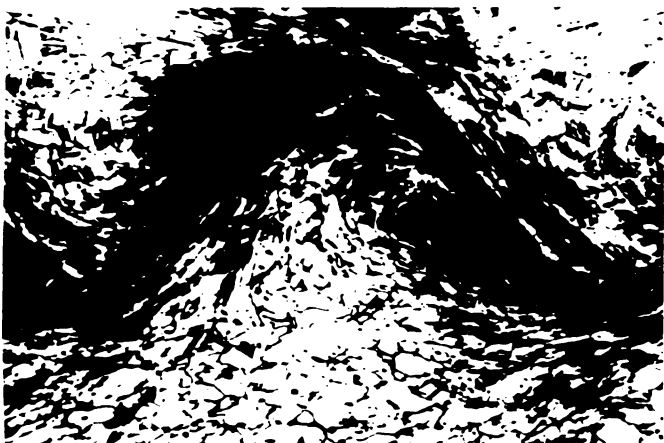


Fig.1.20. Grosimea plăcilor 6 mm; stratul exploziv 6 mm; înclinare  $\alpha = 10^\circ$

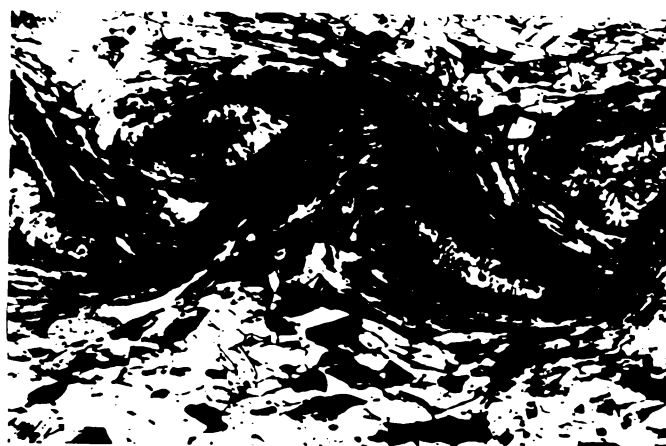


Fig.1.21. Grosimea plăcilor 6 mm; stratul exploziv 6 mm; înclinare  $\alpha = 5^\circ$

Dacă se mărește cantitatea de exploziv și se micșorează unghiul  $\alpha$  se obține o bună legătură, realizându-se un strat subțire, continuu, ușor ondulat, având o înălțime de 0,1 mm (fig. 1.19). În acest caz jetul metalic a rămas în sistem, acționând asupra plăcii de bază.

La valori intermediare ale raportului  $m_e/m_p$  și unghiului  $\alpha$  rezultă [10] o îmbinare cu interfață vălurită specifică sudării prin explozie (fig.1.20 și 1.21). Jetul metalic a acționat asupra plăcii de bază, sudarea făcându-se în regim turbulent ceea ce conduce la apariția vârtejurilor [56].

Apropie în toate cazurile regiunile cu vârtejuri scot în evidență existența unor topiri zonale (fig.1.21). Explicația apariției acestor vârtejuri poate fi găsită în acțiunea jetului de întoarcere [56] care, din cauza vitezei mari, presează alter-

ternativ atît asupra plăcii de bază, cît și asupra plăcii de sudat.

Referindu-se la sudarea prin explozie a două plăci de cupru S.Davenport și E.Duvall [32] ajung la concluzia că la o viteză a jetului metalic de întoarcere de  $3000 \text{ mS}^{-1}$  energia lui ajunge la 62,8 KJ, presiunea fiind de cel puțin  $21 \cdot 10^3 \text{ daN.cm}^{-2}$  iar din măsurarea vitezei de mișcare a plăcii de sudat ( $V_m$ ) deduce o presiune de peste  $32 \cdot 10^3 \text{ daN.cm}^{-2}$ .

După calculele efectuate de autor [57] la sudarea unei plăci de cupru pe oțel pentru unghiuri  $\alpha = 2^\circ \dots 6^\circ$  și  $V_m = 350 \dots 870 \text{ mS}^{-1}$  se ajunge la presiuni mult mai mari,  $p = (55 \dots 142) \cdot 10^3 \text{ daN.cm}^{-2}$ . La sudarea aluminiului pe oțel precum și a alamei pe oțel presiunile pot ajunge de la  $17 \cdot 10^3$  la  $89 \cdot 10^3 \text{ daN.cm}^{-2}$ .

Din analiza mecanismului sudării prin explozie [10; 56; 70; 75] rezultă că partea din jetul de întoarcere care intră în zona vârtejului își va elibera energia cinetică (de mărime considerabilă) astfel încît în zone de mici dimensiuni poate fi atins punctul de topire.

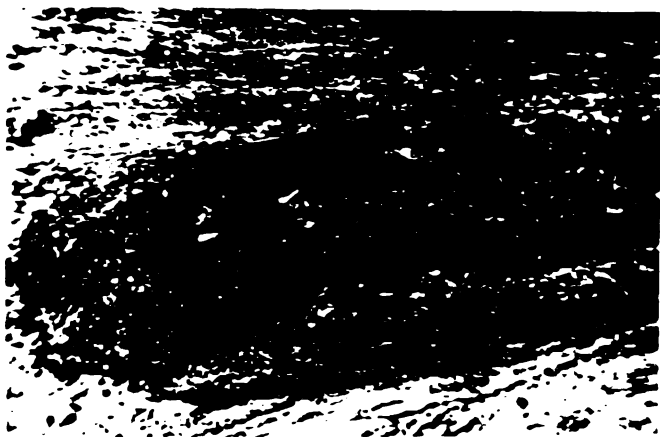


Fig.1.22. Zona vârtejului din fig. .1.20 mărită de 900 de ori

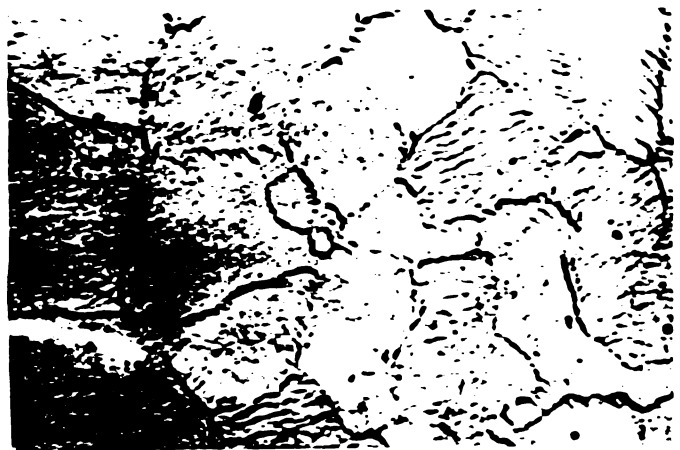


Fig.1.23. Zona vârtejului din fig. .1.20 mărită de 8000 de ori

Cercetînd cu atenție imaginile mărite ale zonei vârtejului se observă că o deformare plastică destul de puternică (fig.1.22), zonă formată din grăunțe mici cu forme neregulate (fig.1.23), fapt ce indică că au avut loc topiri.

Măsurarea microdurităților în zona vârtejului, după sudare [75] arată o mărire (fig.1.26 a), iar după recoacere timp de 2 ore la  $350^\circ\text{C}$  zonele cu duritate mărită se înmoșie (fig.1.26b) însă în vârtej schimbările sînt destul de mici.

Se constată de asemenea că în timpul tratamentului termic a avut loc o recristalizare (fig.1.24).



Fig.1.24. Zona vârtejului după recristalizare



Fig.1.25. Dislocații și maclări în zona vârtejului

La o mărire de 80.000 de ori (fig.1.25) se observă în zona vârtejului acțiuni mari de dislocații, precum și numeroase puncte de maclare. Zone de maclare pot fi observate și în placa de bază, ca urmare a acțiunii destul de puternice a undelor de șoc.

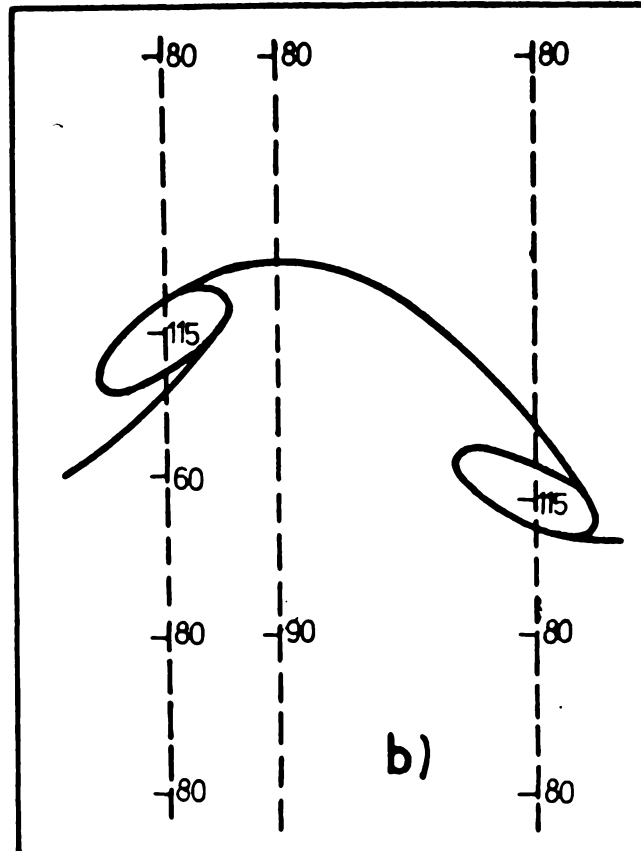
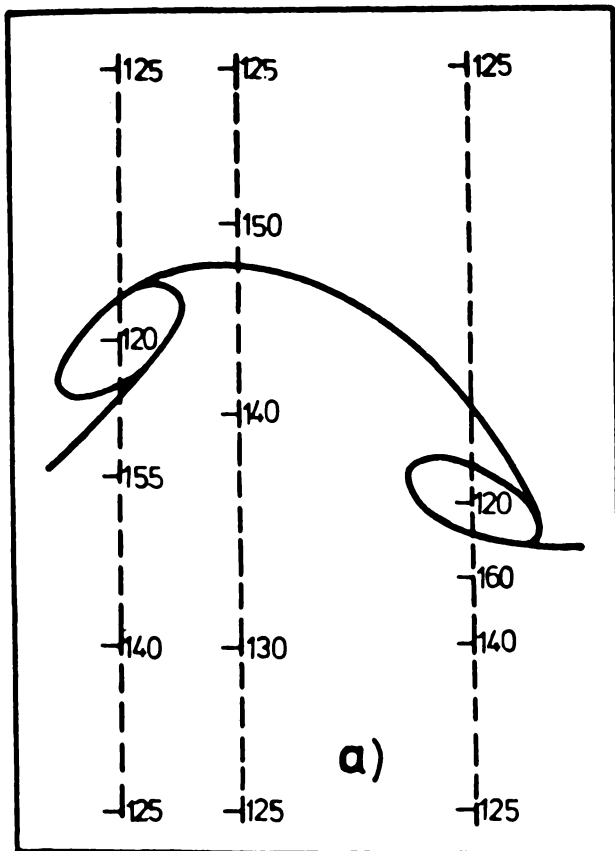


Fig.126 Microdurițiile din zona vârtejului.  
a - după sudare ; b - după recoacere 2 ore la 35°C [75].

La sudarea oțel-oțel (fig.1.27 a) se remarcă aceleași observații ca și la îmbinarea cupru-cupru, la care se adaugă efectele rezultate din polimorfism [10].

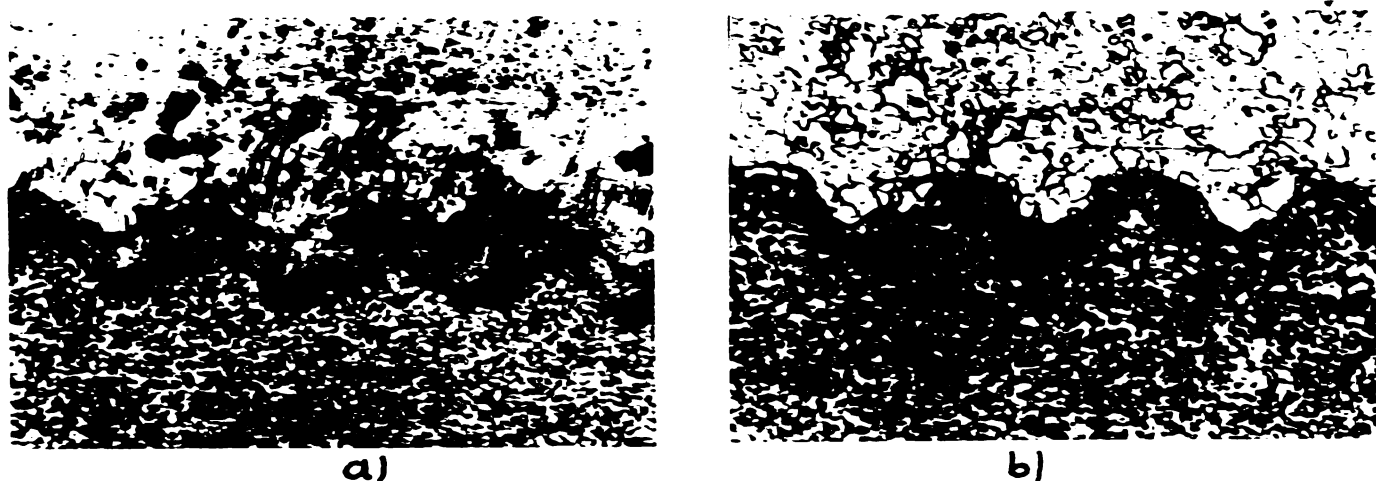


Fig.1.27. Grosimea plăcii de sudat 2 mm; stratul de exploziv 10 mm; înclinare  $\alpha = 5^\circ$   
a) după sudare; b) după recoacere 30 min. la  $600^\circ\text{C}$

Părțile întunecate (fig.1.27 a) reprezintă tranziția reversibilă  $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$  ( $\epsilon$  fiind o fază hexagonală). Această tranziție are loc la o presiune de  $136 \cdot 10^3 \text{ daN} \cdot \text{cm}^{-2}$  rezultată din cantitatea mare de exploziv folosită.

Zonele cu metal topit au un aspect martensitic cu o duritate destul de ridicată. Din analiza metalografică a piesei îmbinate după o recoacere la  $600^\circ\text{C}$  timp de 30 minute (fig.1.27 b) rezultă că efectele apărute după sudare sînt înlăturate.

La sudarea metalelor diferite, zonele vârtejurilor constau de obicei dintr-un amestec intermetalic al ambelor metale [58; 62]. Adeseori aceste zone sînt dure și fragile, fapt ce conduce la scăderea proprietăților mecanice ale îmbinării.

În unele cazuri apar compuși intermetalici anormali față de diagrame de faze a metalelor respective. Acești noi compuși se formează la sudarea prin explozie ca rezultat al presiunilor foarte mari, al temperaturii și al răcirii rapide din zonele vârtejurilor.

Desori s-a observat că în partea din spate a vârtejurilor este o cantitate mai mare din metalul de sudat decît în partea frontală a acestora. Observația confirmă încă odată ipoteza [10] referitoare la mecanismul undelor de șoc în timpul sudării prin explozie.

Topirea este atribuită mai ales transformării energiei cinetice a jetului de întoarcere și forțelor mari de forfecare



care există în zona vârtejurilor. Compresia adiabatică simplă produsă de ciocnirea plăcii netede este incapabilă să producă o încălzire suficientă care să conducă la topirea unor metale ca oțelul.

Topirea extensivă la suprafața de contact are însă trei efecte posibile nedorite [58]:

- realizarea unei microstructuri de turnare care poate fi mai slabă decât structura inițială a metalelor de sudat;
- apariția unor cavități de contracție de-a lungul îmbinării, ceea ce constituie surse de slăbire a rezistenței;
- formarea unor compuși intermetalici fiabili în strat continuu susceptibil la rupturi.

O cauză a producerii defectelor susamintite o constituie și prezența aerului, în special la sudarea plăcilor subțiri. Trebuie să se elimine încălzirea adiabatică a aerului în spațiul dintre plăcile convergente, în special la unghiuri  $\alpha$  mici. Lipsa unei treceri libere a aerului evacuat poate avea ca rezultat crearea unei presiuni nedorite și captarea aerului fierbinte la presiuni mari, care vor interveni în procesul îmbinării.

Folosirea unor camere de vid la sudarea prin explozie conduce la rezultate mult mai bune, fapt evidențiat de o serie de cercetători [45;70;116]. Această soluție a fost adoptată și de autor care în colaborare [60] a proiectat și realizat o instalație experimentală de laborator pentru sudarea prin explozie în vid.

#### 1.4.4. Metode pentru determinarea parametrilor de lucru

Problema determinării parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a constituit o preocupare pentru toți cercetătorii din acest domeniu. Determinarea parametrilor de lucru s-a făcut în paralel cu experimentările, cu elucidarea mecanismului sudării prin explozie. Marea majoritate au luat ca punct de plecare raportul dintre masa explozivului utilizat ( $m_e$ ) și masa plăcii de sudat ( $m_p$ ) - raport notat  $F = m_e/m_p$  - și în funcție de viteza de detonație a explozivului ( $V_d$ ) au căutat să obțină viteza de mișcare a plăcii de sudat  $V_m$ .

Încă din anul 1947, T.Gurney și E.Sterne [48] pe baza legii conservării energiei ajung la relația:

$$V_m = V_d \left[ \frac{3 F}{40 + 8 F + 32 F^{-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.30)$$

și luînd în considerație conservarea momentului, obțin:

$$V_m = V_d \frac{0,612 F}{2 + F} \quad (1.31)$$

Apelînd la teoria hidrodinamică, E.Duvall și O.Erkeman [36] ajung la expresia:

$$V_m = V_d \left\{ 1 + \frac{27}{16} F^{-1} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{32}{27} F \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (1.32)$$

Valorile vitezei de mișcare a plăcii de sudat  $V_m$  calculate cu aceste expresii corespund cu valorile obținute prin măsurări experimentale în laboratoare. Verificînd aceste relații, M.Chadwich [24] arată că ele sînt însă exacte pentru anumite valori ale raportului  $m_e/m_p$ . Astfel, pentru

$$F \rightarrow \begin{cases} \leq 5 & \text{în relația (1.30)} \\ > 2,5 & \text{în relația (1.31)} \\ > 0,2 & \text{în relația (1.32)} \end{cases}$$

Unele colective de cercetare folosesc în calculul vitezei de mișcare a plăcii de sudat o expresie - dedusă inițial pentru viteza de deformare a unei căptușeli metalice într-o încărcătură cumulativă de către A.Baum, K.Staniukovici și J.Sechter [12] - avînd forma:

$$V_m = V_d \frac{0,41 \cdot \eta}{\left[ F^{-1} + \frac{1}{3} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.33)$$

în care  $\eta = 0,50 \dots 0,68$  (eficiența utilizării energiei stratului de exploziv).

O contribuție la soluționarea acestei probleme o aduce K.Azis, H.Hurwitz și M.Sternberg [7], care ajung la soluția:

$$V_m = V_d \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \quad (1.34)$$

în care

$$\xi = \left[ 1 + \frac{34}{27} F \right]^{\frac{1}{2}}$$

O altă formulă de calcul a vitezei de mișcare a plăcii de sudat este dată de S.Sedych și P.Bonder [102], fără explicații mai amănunțite, avînd forma:

$$V_m = \left[ \frac{2}{n+1} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{V_d}{\alpha-1} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_p} \cdot \frac{y}{a} \cdot \frac{b}{2y+b} \quad (1.35)$$

unde:

- n - coeficientul politropic;
- $\rho_e$  - densitatea explozivului;
- $\rho_p$  - densitatea plăcii de sudat;
- $y$  - grosimea stratului de exploziv;
- a - grosimea plăcii de sudat;
- b - lățimea plăcii de sudat.

Această relație a fost utilizată și de către E.Schmidt-mann, W.Koch și H.Schneck [101]. Mai târziu, pornind de la expresia (1.34), A.Deribas și colectivul său [33], în urma experimentărilor o corectează cu un factor obținînd relația:

$$V_m = 1,2 V_d \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (1.36)$$

în care  $\xi$  are aceeași semnificație ca la (1.34).

Verificînd pe cale experimentelă relațiile de mai sus, E.Wright și A.Beyce [115] obține o relație pentru calculul vitezei de mișcare a plăcii de sudat prin explozie, adoptată de majoritatea cercetătorilor:

$$V_m = V_d \left[ \frac{0,578 F}{2 + F} \right] \quad (1.37)$$

sau sub forma:

$$V_m = V_d \frac{0,289 F}{1 + 0,5 F} \quad (1.38)$$

unde  $F \approx 0,1$ .

G.Verzeletti și colectivul său [111] reprezentînd geometria deformării plăcii de sudat (fig.1.28), reușesc să determine viteza de sudare  $V_p$ , dependentă de viteza de detonație a explozivului:

$$v_p = v_d \frac{\sin \beta}{\sin \varphi} \quad (1.39)$$

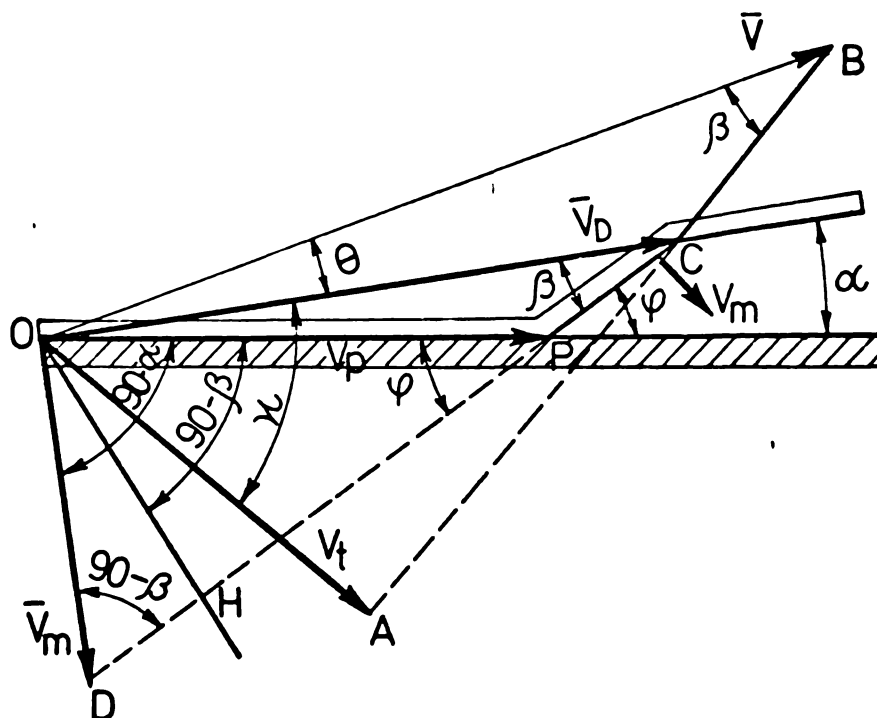


Fig. 1.28 Geometria deformării plăcii de sudat.

Dacă placa de sudat este paralelă cu placa de bază, atunci viteza de sudare este egală cu vitezele de detonație ( $v_p = v_d$ ), fapt ce conduce la condiția de a se utiliza în acest caz explozivi cu viteză de detonație mai mică decât viteza sunetului în metalul de sudat.

Din relațiile prezentate se poate calcula atât viteza de mișcare a plăcii de sudat ( $v_m$ ) cât și viteza de sudare ( $v_p$ ).

Pentru a determina viteza de sudare trebuie ca unghiul  $\alpha$  să fie ales, iar viteza de mișcare ( $v_m$ ) trebuie determinată în funcție de viteza de detonație simplificată cu un factor în care intră raportul  $m_e/m_p$ . Însă nu se cunoaște precis nici mărimea acestui raport și nici caracteristicile explozivilor care au stat la baza determinării aproximative a raportului  $m_e/m_p$ .

### 1.4.5. Aplicații ale sudării prin explozie

In urma cercetărilor și experimentărilor din laboratoare și poligoane a rezultat că se pot îmbina utilizând sudarea prin explozie unele metale și aliaje cu puncte diferite de topire, care în mod practic nu se pot suda prin procedeele convenționale.

Tabel 1.4

	Zinc	Wolfram	Aliaj Ni-Cr	Magneziu	Molibden	Niobiu și aliaje Nb	Argint	Tantal	Zirconiu	Titan și aliaje Ti	Nichel	Bronz	Aliaj Cu-Ni	Alamă	Cupru	Aluminiu și aliaje Al	Oțel Maraging	Oțel Hadfield	Oțel inox Sr 300	Oțel al. AISi 4340	Oțel al. AISi 4130	Oțel al. ASTM A302	Oțel al. ASTM A212	Oțel al. ASTM A201	Oțel AISi 1004...20	Incoloy 800...850	Inconel	Plumb	
Oțel C-AISI 1004...20	●			○	●		○				○		○	○	○														
Oțel ASTM A 201				○	●		○				○		○	○	○									○					
Oțel ASTM A 212				○	●		○				○		○	○	○								○						
Oțel al. ASTM A 302									○				○	○	○							○							
Oțel al. AISi 4130																													
Oțel al. AISi 4340																													
Oțel inox Sr 300		○			●	●				○				○	○	○										○	○		
Oțel Hadfield																		○											
Oțel Maraging																	○												
Incoloy 800...850																													
Aluminiu și aliaje Al										○	○			○	○														
Cupru					●		○	○		○				○	○														
Alamă														○	○														
Aliaj Cu - Ni													○																
Bronz												○																	
Nichel și aliaje Ni										○	○			○	○														
Titan și aliaje Ti		●				●				○	○				○	○													
Zirconiu și aliaje Zr									○																				
Tantal					●		○							○	○														
Argint							○																						
Niobiu și aliaje Nb					○	○																							
Molibden				○	●										○														
Magneziu				○																									
Aliaje Ni-Cr			○		●																								
Wolfram		○							○																				
Zinc	●																												
Inconel																											○		
Plumb																													○

In tabelul 1.4 întocmit după [38] au fost înscrise toate combinațiile de îmbinări realizate pînă în prezent. Toate aceste îmbinări sînt folosite în construcția de mașini, în special în industria utilitatilor chimice, industria construcțiilor aerospațiale, în construcția centralelor nucleare-electrice și

hidroelectrice, în construcția instalațiilor siderurgice.

Geometriile de sudare se aleg în funcție de geometria pieselor de îmbinat, de sorturile de explozivi, de caracteristicile fizico-mecanice ale metalelor de sudat precum și de dimensiunile pieselor de îmbinat.

Sudarea prin explozie a fost și este utilizată în construcțiile navelor cosmice din programele sovietice și americane, în căptușirea recipientilor din oțel cu table din aliaje anticrozive, în mandrinarea și sudarea țevilor la plăcile tubulare ale generatoarelor de aburi, în industria siderurgică, în special în industria de aluminiu pentru realizarea plăcuțelor aluminiu-oțel din compunerea instalațiilor de electroliză precum și în industria electrotehnică.

În ultimii ani s-a trecut la aplicarea procedurii de sudare prin explozie la scară industrială.

Toate laboratoarele și firmele producătoare de piese sudate prin explozie păstrează cu strictețe tehnologiile de lucru dând publicității doar probleme de principiu și unele date care de multe ori s-au dovedit materiale de desinformare.

## 2. CERCETARI PRIVIND ELABORAREA TEHNOLOGIEI DE SUDARE PRIN EXPLOZIE

2.1. Cupluri de metale utilizate pentru experimentări

2.2. Explozivi folosiți

2.3. Materiale moderatoare și de protecție

2.4. Geometrii de sudare prin explozie și parametri  
de lucru

2.5. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin  
explozie

2.5.1. Analiza metodelor de calcul a parametrilor  
folosite de unele laboratoare

2.5.2. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin  
explozie a plăcilor

2.5.3. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin  
explozie a țevilor la plăcile tubulare

2.5.4. Calculul parametrilor de lucru la mandrinarea  
prin explozie a țevilor la plăcile tubulare

2.5.5. Calculul regimului termic la sudarea prin ex-  
plozie

2.5.6. Tabele de calcul și întocmirea diagramelor de  
lucru

2.6. Echipamente folosite la sudarea prin explozie

2.6.1. Platforme și dispozitive

2.6.2. Instalații experimentale pentru sudarea prin  
explozie în aer

2.6.3. Instalații experimentale pentru sudarea prin  
explozie în vid

## 2. CERCETARI PRIVIND ELABORAREA TEHNOLOGIIEI DE SUDARE PRIN EXPLOZIE

### 2.1. Cupluri de metale utilizate pentru experimentări și caracteristicile lor

Programul de cercetări a inclus cuplurile de metale ce trebuiau sudate prin explozie impuse prin contractele de cercetare (cupru-oțel, YSn 83 - oțel și țevi de alamă în placa de oțel pentru întreprinderea constructoare de mașini - Reșița; aluminiu-oțel pentru întreprinderea de aluminiu - Slatina; oțel inox-oțel pentru întreprinderea de mașini grele București), precum și o serie de cupluri în scopul extinderii procedurii. Metalele și aliajele care au fost sudate prin explozie sînt înscrise în tabelul 2.1 iar în tabelele 2.2 și 2.3 sînt prezentate cuplurile de materiale.

Tabel 2.1

Metalul de sudat \ bază	OL 37	OLC 45	Arc 2A	Aluminiu	Dural	Zicral	Cupru	Alamă	10NC 180
Cupru	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Alamă	•	•		•			•		
Aluminiu	•	•			•	•	•	•	
Dural	•	•		•		•	•	•	
Zicral	•	•							
YSn 83	•	•					•		
10 NC 180	•	•					•	•	
OL 37		•							
OLC 45	•								



Tabel 2.2

PLĂCI BIMETAL					
1	Cu 5D / OL 37	5	Am 63 / OL 37	9	Al 99,5 / OL 37
2	Cu 5D / OLC 45	6	Am 63 / Al 99,5	10	Al 99,5 / Dural simb. 2024
3	Cu 5D / Al 99,5	7	YSn / OL 37	11	Dural simb. 2024 / OL 37
4	Cu 5D / 7C 120	8	10 NC 180 / OL 37	12	Zicral simb. 7075 / OLC 45

Tabel 2.3

ȚEVI LA PLĂCI TUBULARE			
1	Am Sb (ø 19) - OL 37	3	Al Si Mg (ø 20) - OL 37
2	Cu 5D (ø 16) - OL 37	4	Am 63 (ø 20) - Alj. 7075

Materialele și aliajele utilizate pentru experimentări sînt produse în țară. În tabelul 2.4 au fost înscrise caracteristicile principale ce au legătură directă cu procesul de sudare prin explozie.

Tabel 2.4

METALE	Norme de fabricat	$\gamma$	E	$\sigma_r$	$\sigma_c$	$V_s$	DURITATE
		$\frac{kg}{dm}$	$\frac{daN}{mm^2}$	$\frac{daN}{mm^2}$	$\frac{daN}{mm^2}$	$\frac{m}{s}$	HB
Cupru Cu 5D	STAS 270-74	8,91	11770	44,1	28,4	3553	70
Alamă Am 63	STAS 95-75	8,34	10790	36,0	18,8	3360	66
Aluminiu Al 99,5	STAS 7607-72	2,70	6800	13,0	9,1	5104	28
Dural simb. 2024	ASTM B 209-65	2,68	7060	45,0	32,0	5150	45
Zicral simb. 7075	ASTM B 209-65	2,80	7200	54,0	48,0	5050	60
YSn 83	STAS 202-73	7,55	4800	8,3	7,8	2530	26
10 NC 180	STAS 3583-74	8,02	19700	50,0	20,0	4900	167
Arc 2A (Cr-Mn-V)	STAS 795-71	7,75	20300	132,0	117,0	5640	360
OL 37	STAS 5002-68	7,86	20800	42,0	21,0	4880	106
OLC 45	STAS 880-68	7,85	21000	74,0	40,0	5030	229

Dimensiunile plăcilor sudate prin explozie sînt cuprinse într-o gamă destul de mare (de la 2 x 50 x 100 mm la 20 x 300 x 800 mm). Pentru fiecare caz în parte, dimensiunile sînt înscrise în tabelele de calcul a parametrilor de lucru.

În tabelul 2.5 au fost înscrise compozițiile chimice ale aliajelor metalice ce au fost sudate prin explozie, date ce vor fi utilizate la analiza proceselor metalurgice.

Tabel 2.5

Alj. %	Am63	Dural 2024	Zicral 7075	YSn 83	10NC180	Arc2A (Cr Mn V)	OL37	OLC 45
C					max. 6,12	0,47...0,55	0,19...0,25	0,42...0,50
Mn	0,1	0,9	0,4		max. 2,00	0,80...1,10	0,26...0,85	0,50...0,80
Si		0,5	0,4		max. 0,80	0,15...0,35	0,07...0,40	0,17...0,37
Cr		0,1	0,18...0,35		17...19	0,90...1,20		max. 0,30
V						0,07...0,12		
Ni					8...10			max. 0,30
Fe	0,2	0,5	0,5	0,1	rest	rest	rest	rest
Cu	62...65	3,8...4,9	1,2...2,0	6 <sup>±0,5</sup>				max. 0,30
Zn	rest	0,25	5,1...6,2	0,05				
Mg		1,2...1,8	2,1...2,9					
Al	0,03	rest	rest	0,05			0,025	
Sn	0,1			83 <sup>±1</sup>				
Sb				11 <sup>±1</sup>				
P+S						max. 0,07	max. 0,12	max. 0,08
Ti			0,2					
Pb	0,3			0,5				
As				0,15				max. 0,05
Bi				0,05				

2.2. Explozivi folosiți la experimentări și caracteristicile lor

La alegerea explozivilor a trebuit să ținem seama de factorii:

- sensibilitatea la transport și detonare;
- viteza de detonație;
- ușurința manipulării în timpul folosirii;
- prețul de cost.

În acest sens s-au evitat explozivii sensibili sau cu caracteristici speciale de distrucere. Având de sudet, cei cu seamă plăci, atenția a fost îndreptată spre explozivii ce pot fi modelați în folii. Pentru aceasta s-a ținut o legătură strânsă cu Combinatul chimic Făgăraș, realizându-se o colaborare permanentă.

Pentru experimentări s-a folosit o gamă largă de explozivi (tabelul 2.6) în scopul de a se stabili sorturile care să poată fi utilizate la scară industrială.

Tabel 2.6

EXPLOZIV		$V_d$	$\rho_e$	$P_d$	Sensibilitate
		m/s	g/cm <sup>3</sup>	Kbari	daNm
1.	E.T.R. - 15	3 350	0,9...1,10	-	-
2.	E.P. - S	4 900	1,20	-	-
3.	Hexolită 1	5 700	1,20	-	-
4.	Hexolită 2	6 300	1,40	-	-
5.	Trotiil - T	6 500	1,25	-	-
6.	Trotiil - P	6 800	1,50	-	-
7.	Compus A	7 000	1,30	1,48	-
8.	E.P. - P.1	7 000	1,52	-	2,0
9.	E.P. - 02	7 065	1,50	-	-
10.	E.P. - P.2	7 100	1,33	-	1,9
11.	E.P. - 01	7 200	1,42	-	-
12.	E.P. - P.4	7 200	1,40	-	1,5
13.	E.P. - P.3	7 500	1,50	-	1,7
14.	Tetriil	7 600	1,65	410	-
15.	Compus B	7 800	1,45	230	-

INSTITUTUL POLITEHNIC  
TIMIȘOARA  
INDUSTRIA CENTRALĂ

**2.3. Materialele moderatoare și de protecție folosite la sudarea prin explozie**

Pentru a proteja suprafața plăcii de sudat ce este în contact cu explozivul precum și pentru atenuarea undelor de șoc rezultate din detonarea explozivilor cu viteză mare de detonare, s-au folosit materiale plastice - tabelul 2.7 - ce se produc în mod curent în țară.

Tabel 2.7

MATERIAL	$\rho_t$	$\sigma_r$	$\sigma_c$	E	$V_t$
	g/cm <sup>3</sup>	daN/mm <sup>2</sup>	daN/mm <sup>2</sup>	daN/mm <sup>2</sup>	m/s
Polietilenă	0,95	2,5.....3,9	1,7	56.....205	759.....2732
Policlorură de vinil	1,40	4,5.....5,5	7.....8	280.....300	1400.....1448
Polistiren	1,05	4.....6	10.....11,5	310.....330	1700.....1762
Rășini epoxidice	1,11.....1,23	2,8.....9,1	10,5.....12,6	305.....400	1645.....1784
Chit plastic termostabil (opanal)	1,12	1,8.....2,4	3,2.....4,7	40.....189	6.....13
Cauciuc	1,2	4	—	—	31.....70

**2.4. Geometrii de sudare prin explozie și parametrii de lucru**

Pentru sudarea prin explozie, geometriile se aleg în funcție de forme și dimensiunile pieselor de îmbinat, de mărimea suprafeței de sudare, precum și de caracteristicile explozivului [59;92] de către tehnologi și proiectanți.

În cadrul experimentărilor - legat de programele de lucru prevăzute în contractele de cercetare - am inclus sudarea plăcilor așezate paralel și înclinat precum și sudarea și mandrinarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare.

Geometriile de sudare a reperelor din programele de lucru sînt prezentate în fig.2.1...2.5.

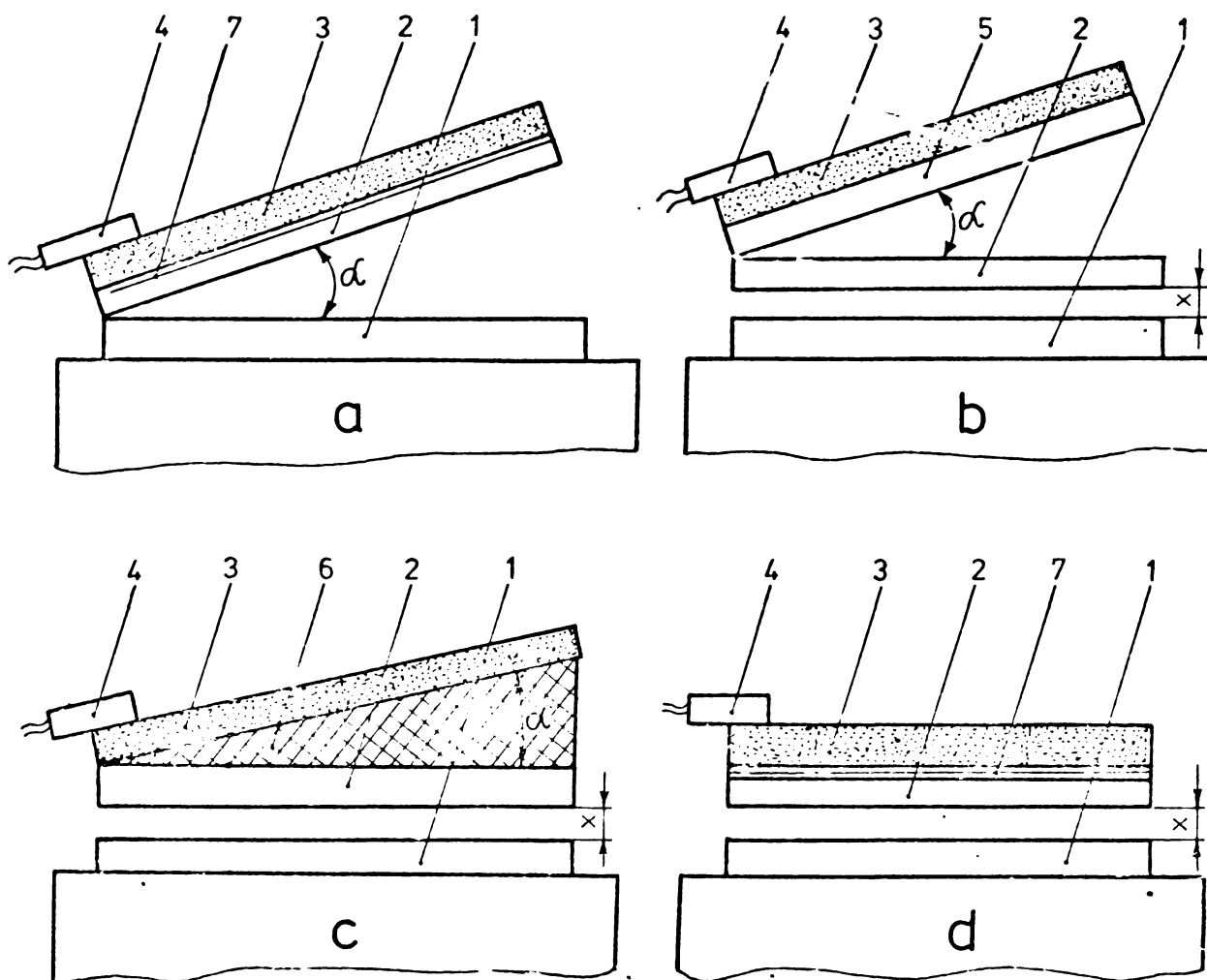


Fig.21 Geometria la sudarea prin explozie a plăcilor:

- 1-Placa de bază ; 2-Placa de sudat ; 3-Exploziv ; 4-Detonator ;  
 5-Placă secundară ; 6-Cala unghiulară din material plastic ;  
 7-Strat tampon.

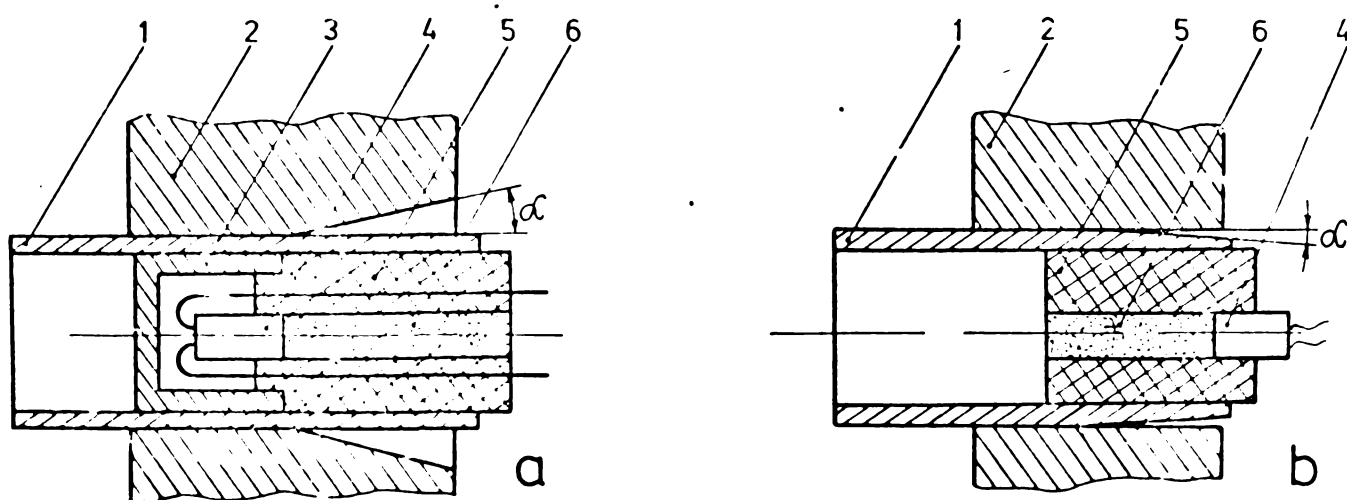


Fig.22 Geometria la sudarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare:

- 1-Țeava ; 2-Placa tubulară ; 3-Capac de protecție ; 4-Detonator ;  
 5-Dop de material plastic ; 6-Exploziv.

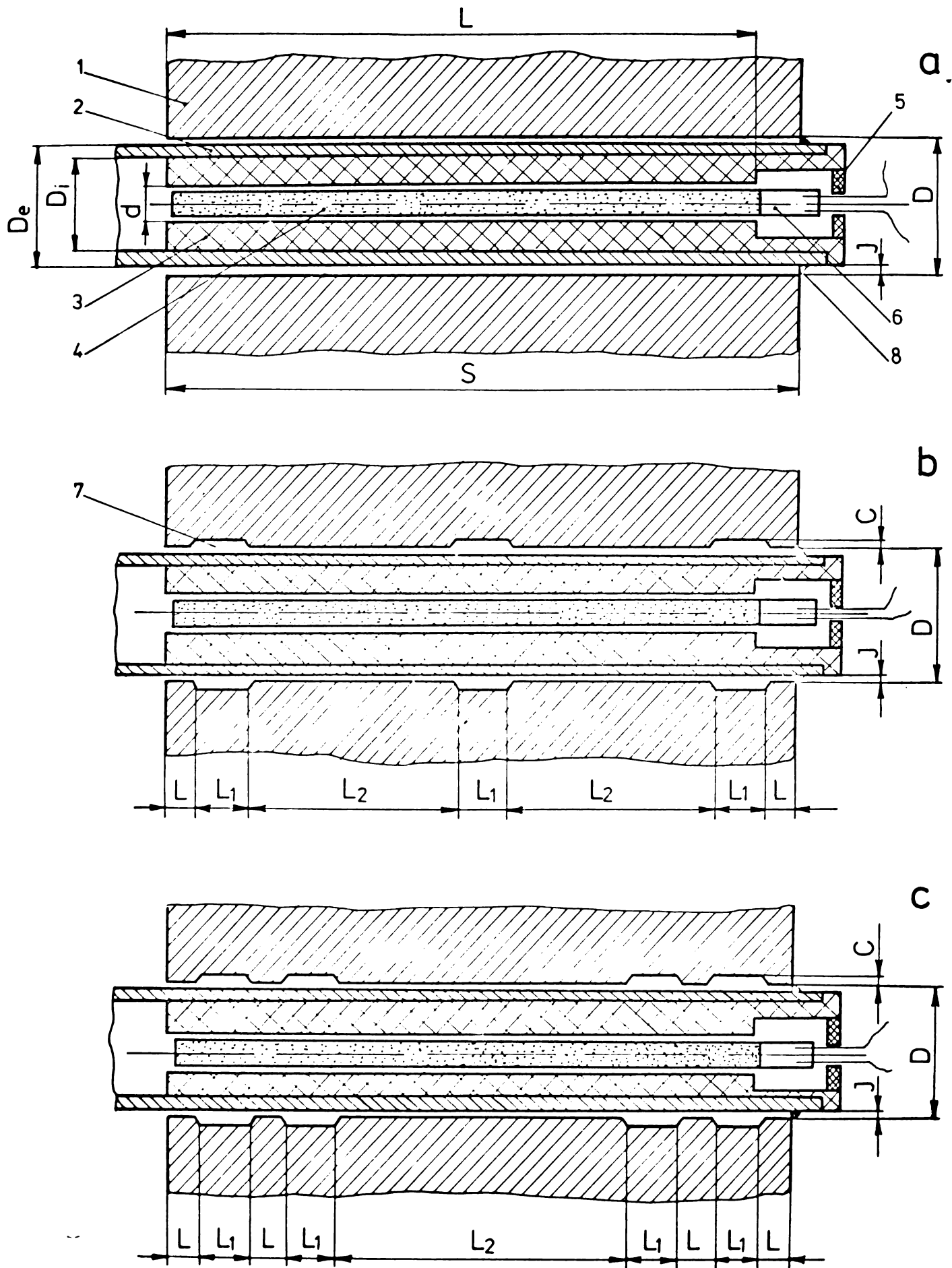


Fig. 23 Geometria de mandrinare -  
-sudare prin explozie a țevilor la plăcile tubulare.  
1 - Placa tubulară ; 2 - Țeava ; 3 - Teaca din material plastic ;  
4 - Exploziv ; 5 - Capac ; 6 - Detonator ; 7 - Canale ; 8 - Cordon de sudură.

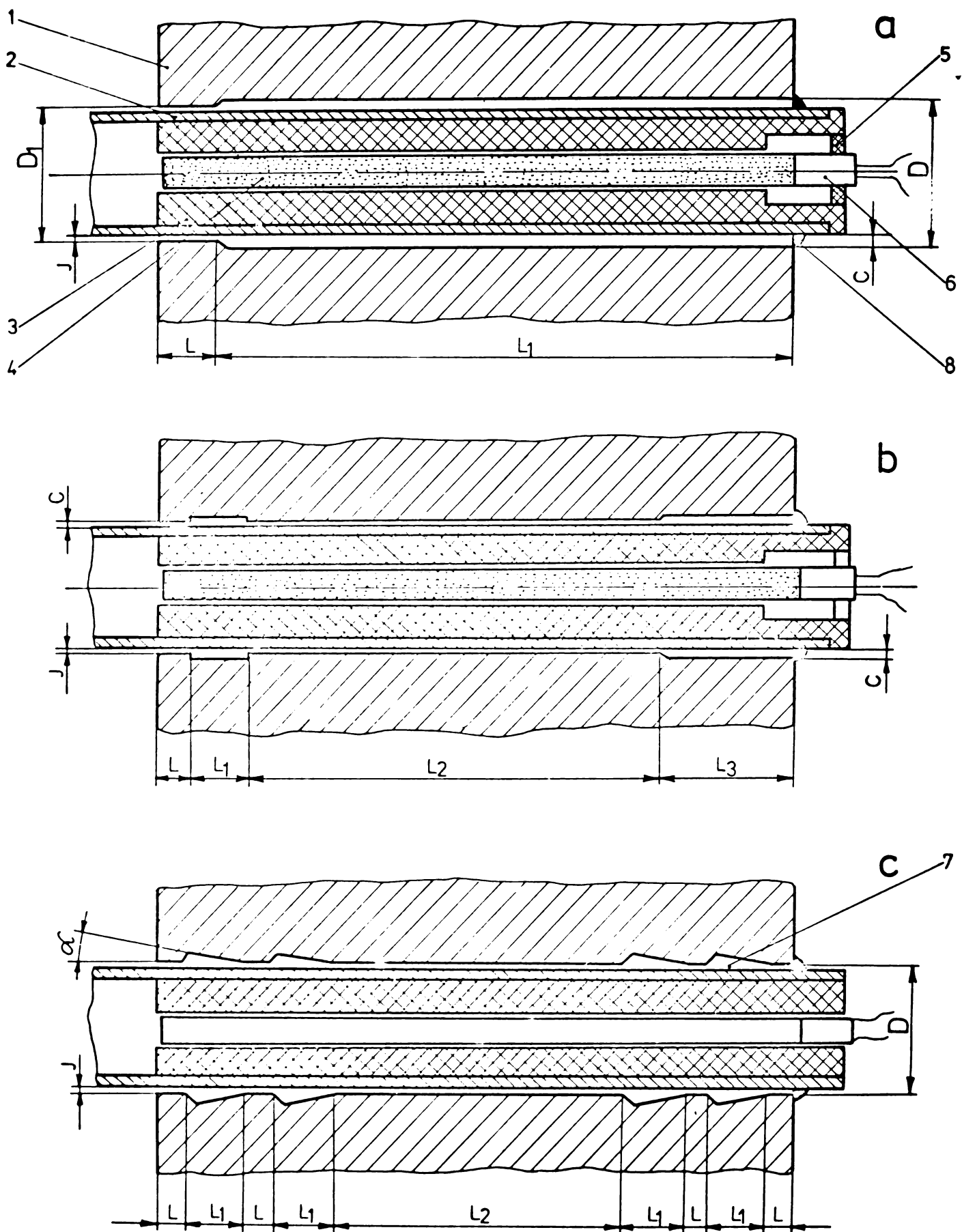


Fig. 24 Geometria de mandrinare-sudare prin explozie a țevilor la plăcile tubulare.

1-Placa tubulară; 2-Țeavă; 3-Teacă de protecție; 4-Exploziv; 5-Capac; 6-Detonator; 7-Canale; 8-Cordon de sudură.

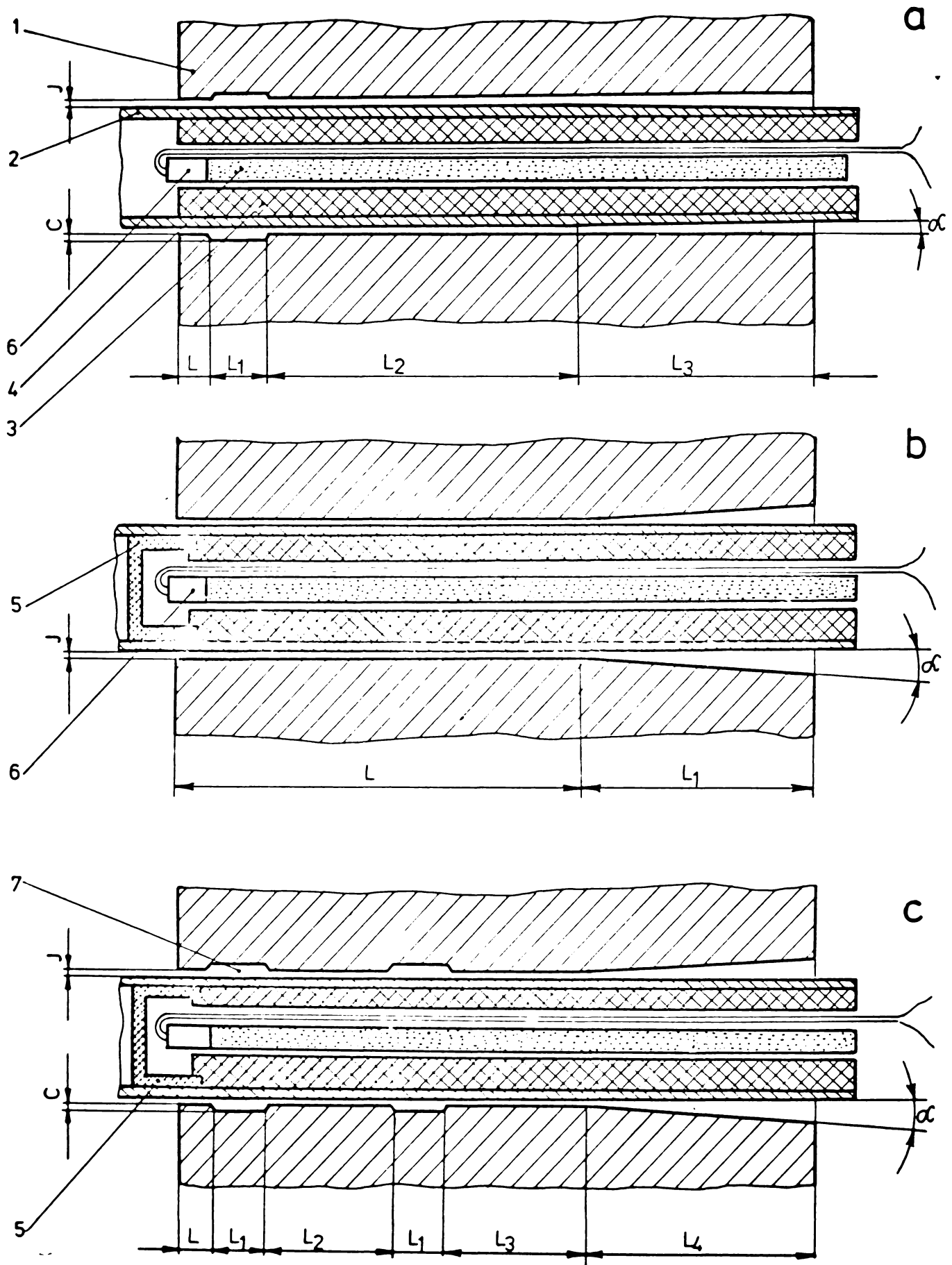


Fig. 2.5 Geometria de mandrinare și sudare prin explozie a țevilor la placa tubulară  
1-Placa tubulară; 2-Țeavă; 3-Teaca de protecție; 4-Exploziv; 5-Capac; 6-Detonator; 7-Canale.



Parametrii de lucru la sudarea prin explozie a plăcilor (fig.2.6) așezate inițial înclinat, sînt:

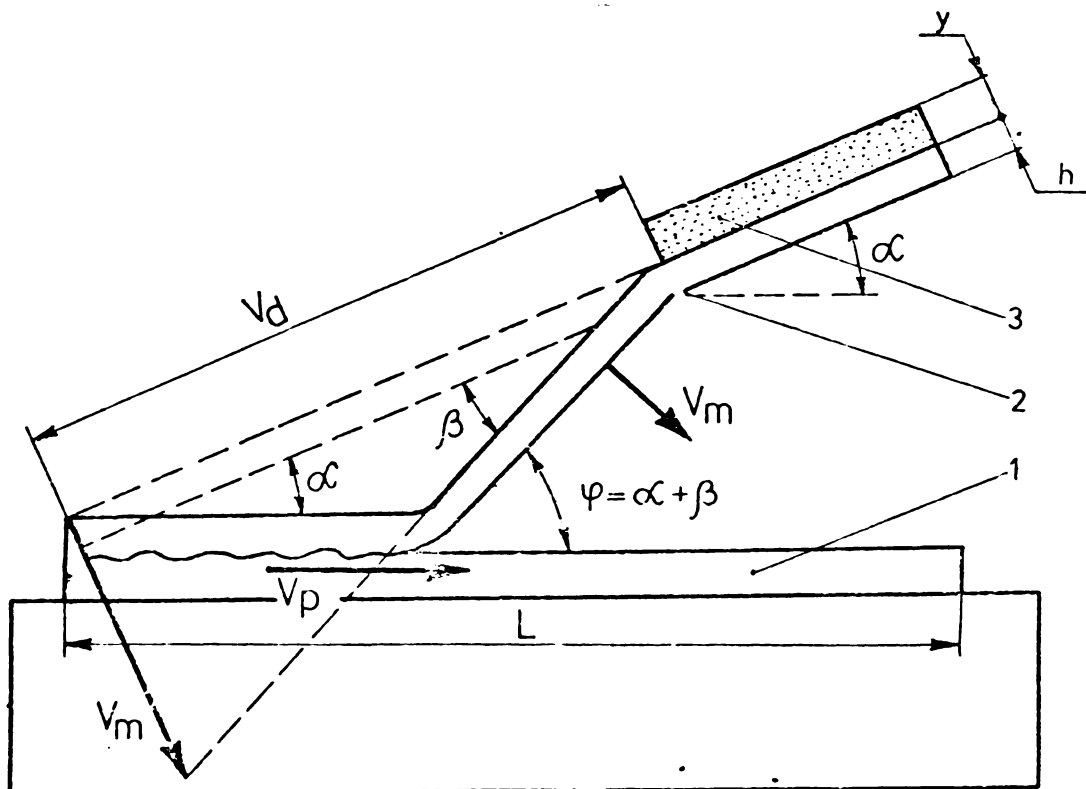


Fig.2.6 Parametri de lucru la sudarea prin explozie a plăcilor metalice așezate înclinat

- $\rho_p$  - densitatea plăcii de sudat;
- $\rho_e$  - densitatea explozivului;
- $\sigma_c$  - limita de curgere a metalului plăcii de sudat;
- $V_s$  - viteza sunetului în placa de sudat;
- $V_t$  - viteza sunetului în materialul moderator;
- $V_d$  - viteza de detonație a explozivului;
- $V_m$  - viteza de mișcare a plăcii de sudat;
- $V_p$  - viteza de sudare (de deplasare a punctelor de impact);
- $\alpha$  - unghiul static de înclinare a plăcii de sudat;
- $\beta$  - unghiul dinamic de înclinare-(curbură) a plăcii de sudat;
- $\varphi$  - unghiul dinamic de înclinare -(curbură) sub care placa de sudat izbește placa de bază;
- $p_s$  - presiunea de sudare;
- $h$  - grosimea plăcii de sudat;
- $L$  - lungimea plăcii de sudat;
- $b$  - lățimea plăcii de sudat;
- $y$  - grosimea stratului de exploziv.

În cazul când sudarea prin explozie se face cu explozivi care au  $V_d < V_g$ , geometria de sudare va fi cu plăcile de sudat așezate paralel (fig.2.1 d) iar parametrii de lucru (fig.2.7) sînt:

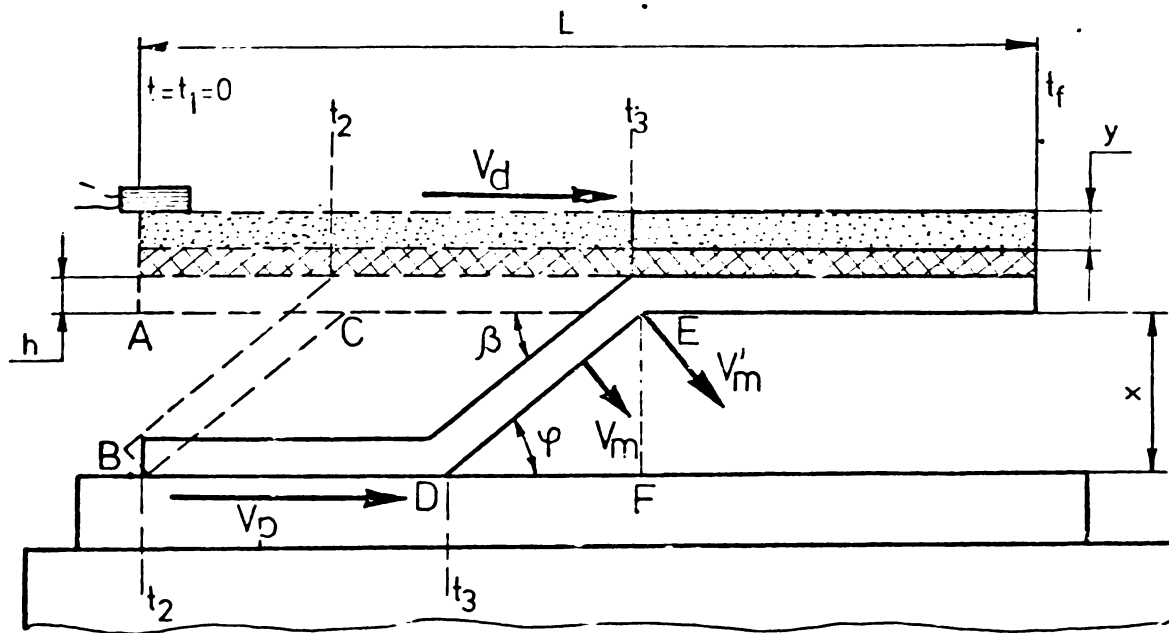


Fig 2.7 Parametrii de lucru la sudarea prin explozie a plăcilor așezate paralel

- $\rho_p$  - densitatea plăcii de sudat;
- $\rho_e$  - densitatea explozivului;
- $\sigma_0$  - limita de curgere a metalului plăcii de sudat;
- $V_g$  - viteza sunetului în placă de sudat;
- $V_t$  - viteza sunetului în materialul moderator;
- $V_d$  - viteza de detonație a explozivului;
- $V_m$  - viteza de mișcare a plăcii de sudat;
- $V_p$  - viteza de sudare (de deplasare a punctelor de impact);
- $\beta$  - unghiul dinamic de înclinare (curbură) a plăcii de sudat;
- $\varphi$  - unghiul dinamic de înclinare (curbură) sub care placa de sudat izbește placa de bază;
- $p_s$  - presiunea de sudare;
- $h$  - grosimea plăcii de sudat;
- $L$  - lungimea plăcii de sudat;
- $b$  - lățimea plăcii de sudat;
- $x$  - distanța dintre plăcile de sudat;
- $y$  - grosimea stratului de exploziv.

Parametrii de lucru la sudarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare (fig.2.8) sînt:

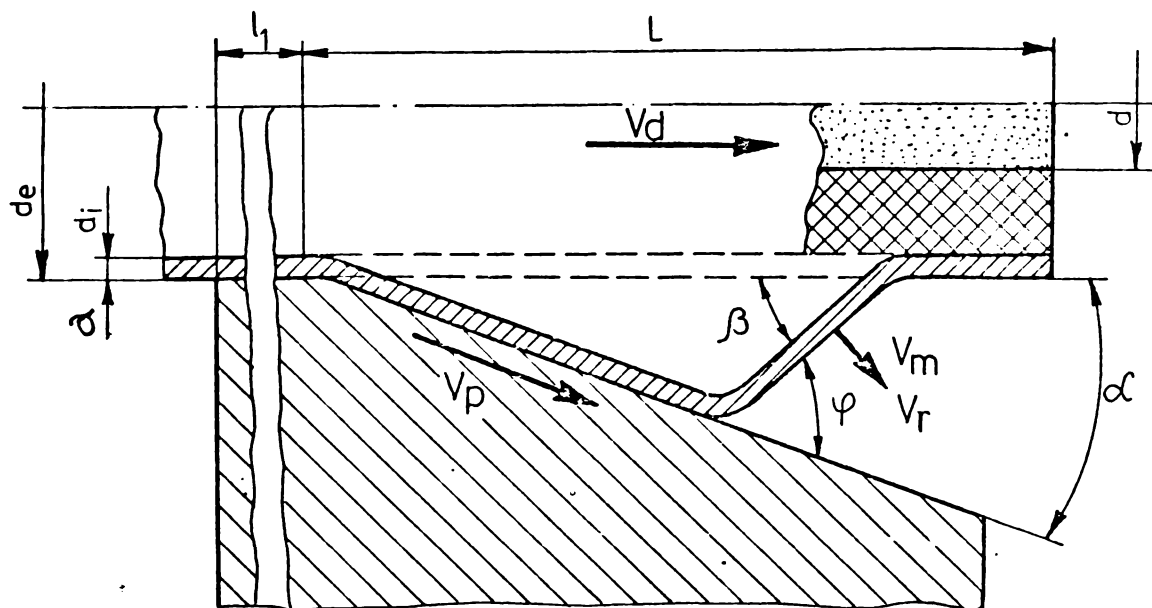


Fig. 2.8 Parametrii de lucru la sudarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare

- $\rho_t$  - densitatea metalului țevii;
- $\rho_e$  - densitatea explozivului;
- $\sigma_c$  - limita de curgere a metalului țevii;
- $V_s$  - viteza sunetului în peretele țevii;
- $V_t$  - viteza sunetului în materialul tecii de protecție;
- $V_d$  - viteza de detonație a explozivului;
- $V_m$  - viteza de deformare a țevii;
- $V_r$  - viteza de deformare a țevii recalculată;
- $V_p$  - viteza de sudare;
- $\alpha$  - unghiul de înclinare a peretelui conului;
- $\beta$  - unghiul dinamic de înclinare - curbură;
- $\varphi$  - unghiul dinamic sub care țevă izbește peretele găurii conice din placă tubulară;
- $p_s$  - presiunea de sudare;
- $a$  - grosimea peretelui țevii;
- $d_i$  - diametrul interior al țevii;
- $d_e$  - diametrul exterior al țevii;
- $L$  - lungimea de sudare;
- $l$  - lungimea părții cilindrice din placă tubulară.

La mandrinarea prin explozie a țevilor la placa tubulară care de fapt este o sudare, peretele țevii fiind așezat paralel cu peretele găurii din placa tubulară, parametrii de lucru (fig.2.9) sînt aceiași ca și la sudarea țevilor la care se adaugă jocul dintre suprafața exterioară a țevii și peretele țevii din placa tubulară (J).

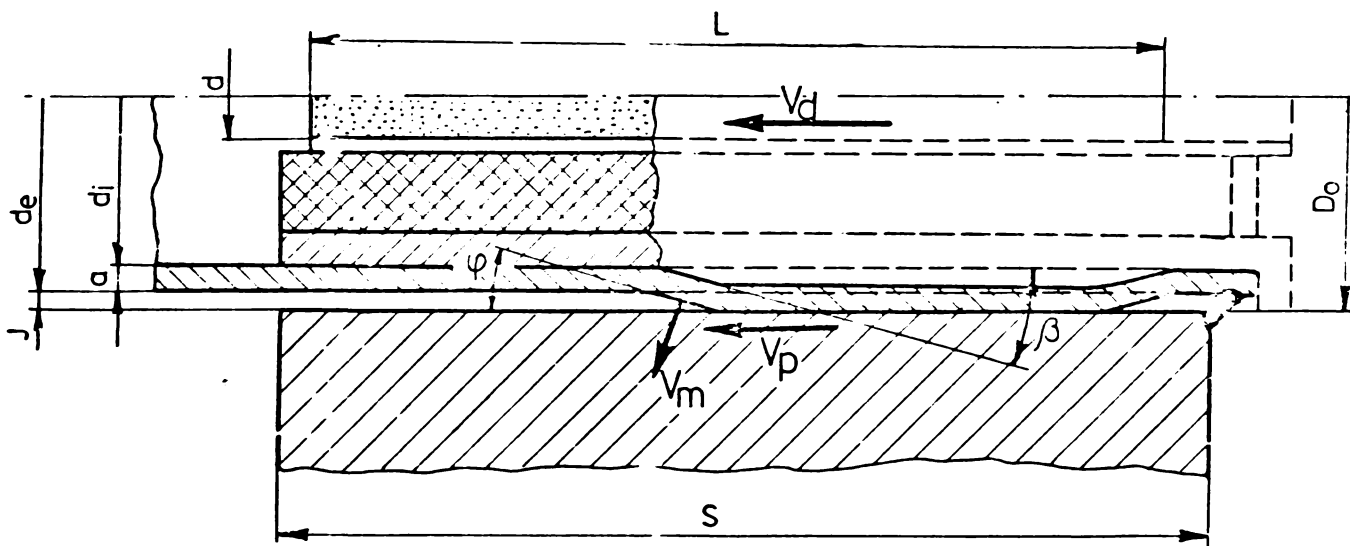


Fig. 2.9 Parametrii la mandrinare-sudare prin explozie a țevilor la placa tubulară

În cazul cînd se combină mandrinarea cu sudarea (fig. 2.5) parametrii de lucru vor fi cei de la ambele procedee de îmbinare.

În practica curentă, majoritatea firmelor utilizează pentru îmbinarea țevilor la plăcile tubulare sudarea prin explozie. Deoarece prin proiectele elaborate în cadrul programului de construcție a centralelor nucleare-electrice se preconizează și alte metode de îmbinare, s-a adoptat soluția de mandrinare prin explozie.

Geometriile de sudare vor fi extrem de variate, însă parametrii de lucru vor fi aceiași și se determină prin calcul pe baza datelor inițiale.

## 2.5. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a metalelor

### 2.5.1. Analiza metodelor de calcul a parametrilor folosite de unele laboratoare

Deoarece relațiile de calcul obținute de o serie de cercetători sînt destul de diferite - dacă ne referim numai la viteza de mișcare a plăcii de sudat - am considerat necesar să

analizez aceste soluții pentru a alege o cale cât mai bună de determinare a parametrilor de calcul.

În acest sens am apelat la o schemă a procesului de sudare (fig.2.10) realizată de Nemecek și Vacek [84] completată cu elementele geometrice [57].

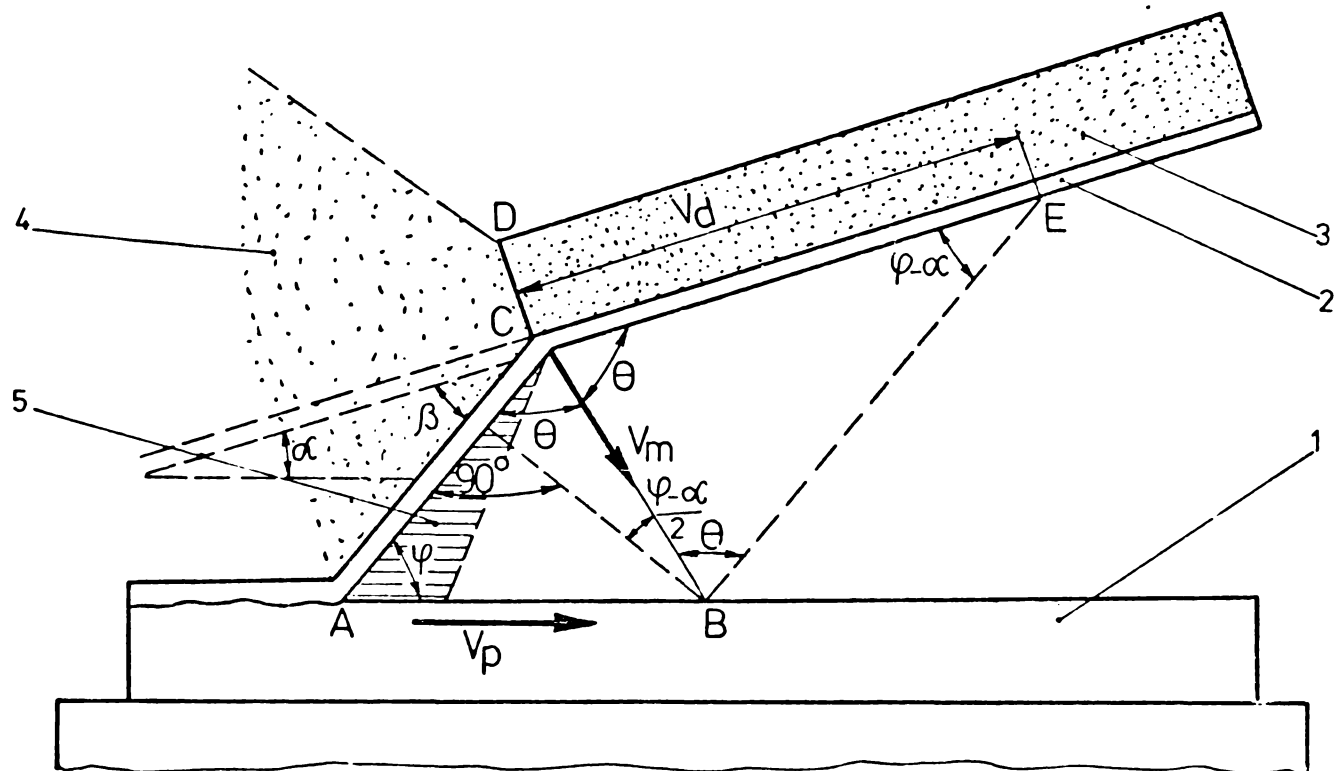


Fig.2.10 Schema procesului de sudare prin explozie a plăcilor metalice [84]

1-Placa de bază; 2-Placa de sudat; 3-Exploziv; 4-Zona de expansiune a produsilor exploziei (ZEP); 5- Zona undelor de compresiune (ZUC).

Din schemă se observă că din punctul A pînă în punctul B, punctele de impact succesive se deplasează cu viteza de sudare  $V_p$ :

$$V_p = V_m \frac{\sin \theta}{\sin \varphi}, \quad (2.1)$$

$$\text{Deoarece } \theta = 90^\circ - \frac{\varphi - \alpha}{2},$$

$$V_p = V_m \frac{\cos \frac{\varphi - \alpha}{2}}{\sin \varphi} \quad (2.2)$$

Din analiza schemei rezultă corelația dintre viteza de detonație a explozivului și viteze de mișcare a plăcii de sudat:

Tabel 2.8

Expresia parantezei din relația		$V_m = [ \dots ] V_d \quad (1.31) \dots (1.38)$						
		$F = m_e / m_p$						
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	3,0	4,0
1,30	$\left[ \frac{3F}{40+8F+32F^{-1}} \right]^{\frac{1}{2}}$	0,028	0,077	0,117	0,152	0,194	0,346	0,387
1,31	$\frac{0,612 F}{2+F}$	-	-	-	-	-	0,367	0,408
1,32	$1 + \frac{1,68}{F} \left[ 1 - (1 + 1,18F)^{\frac{1}{2}} \right]$	-	0,093	0,139	0,158	0,200	0,368	0,416
1,33	$\frac{0,279}{[F^{-1} + 3^{-1}]^{\frac{1}{2}}}$	0,087	0,145	0,182	0,210	0,242	0,343	0,366
1,34	$\frac{[1+1,18F]^{\frac{1}{2}} - 1}{[1+118F]^{\frac{1}{2}} + 1}$	0,028	0,075	0,115	0,149	0,192	0,361	0,410
1,35	$F [3,62 \dots 8,94]$	0,362 ..... 0,894		-	-	-	-	-
1,36	$1,2 \frac{[1+1,18F]^{\frac{1}{2}} - 1}{[1+118F]^{\frac{1}{2}} + 1}$	0,034	0,090	0,138	0,179	0,230	0,433	0,492
1,37	$\frac{0,578 F}{2+F}$	0,028	-	-	-	-	-	-

$$V_m = 2 V_d \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{2} \quad (2.3)$$

Inlocuind valoarea vitezei  $V_m$  din (2.3) în relația (2.2) și ținând seama că  $\varphi - \alpha = \beta$  se obține expresie care descrie dependența vitezei de sudare de viteza de detonație, asemănătoare cu relația (1.39).

Dacă se cunosc unghiurile  $\alpha$ ,  $\beta$  și  $\varphi$  se poate determina viteza de mișcare. Sau invers, cunoscând viteza de mișcare  $V_m$  se poate determina unghiul  $\beta$ .

În cap.1.4.1 s-au prezentat relațiile de calcul a vitezei  $V_m$  în care termenul principal este raportul dintre masa explozivului și masa plăcii de sudat (masă accelerată).

Pentru a pune în evidență mărimea vitezei de mișcare a plăcii de sudat s-a înlocuit în relațiile (1.30...1.37) raportul  $F = m_e/m_p$  cu valorile recomandate de autorii lor. Forma finală a acestor relații precum și valorile din paranteză au fost înscrise în tabelul 2.8.

Din analiza noilor relații se constată că în general ele sînt apropiate. În același timp se observă că sînt însă și diferențe destul de mari între valorile cu care trebuie - pentru calculul vitezei de mișcare - să se amplifice viteza de detonație. Aceste diferențe apar mai evident din diagrame 2.11 trasată pentru explozivii folosiți la experimentări.

Separat pentru relația (1.37) am dat raportului  $F = m_e/m_p$  pe lângă valoarea recomandată încă cinci valori apropiate, astfel: 0,01; 0,05; 0,09; 0,10; 0,145 și 0,19.

În aceste condiții s-au obținut șase variante ale vitezei de mișcare  $V_m$ . Pentru  $F = 0,19$  și  $V_d = 8500 \text{ ms}^{-1}$ , se obține  $V_m = 420 \text{ ms}^{-1}$ .

Din relația (2.3) prin înlocuirea diferenței  $\varphi - \alpha$  cu  $\beta$  se obține:

$$\sin \beta = \frac{V_m}{V_d} \quad (2.4)$$

Considerînd că unghiul inițial  $\alpha$  se alege iar unghiul dinamic  $\beta$  se calculează, cu valorile rezultate pentru relația (1.38) am trasat diagrame 2.12 pentru determinarea unghiului  $\varphi$  în funcție de  $\beta$  și  $\alpha$ .

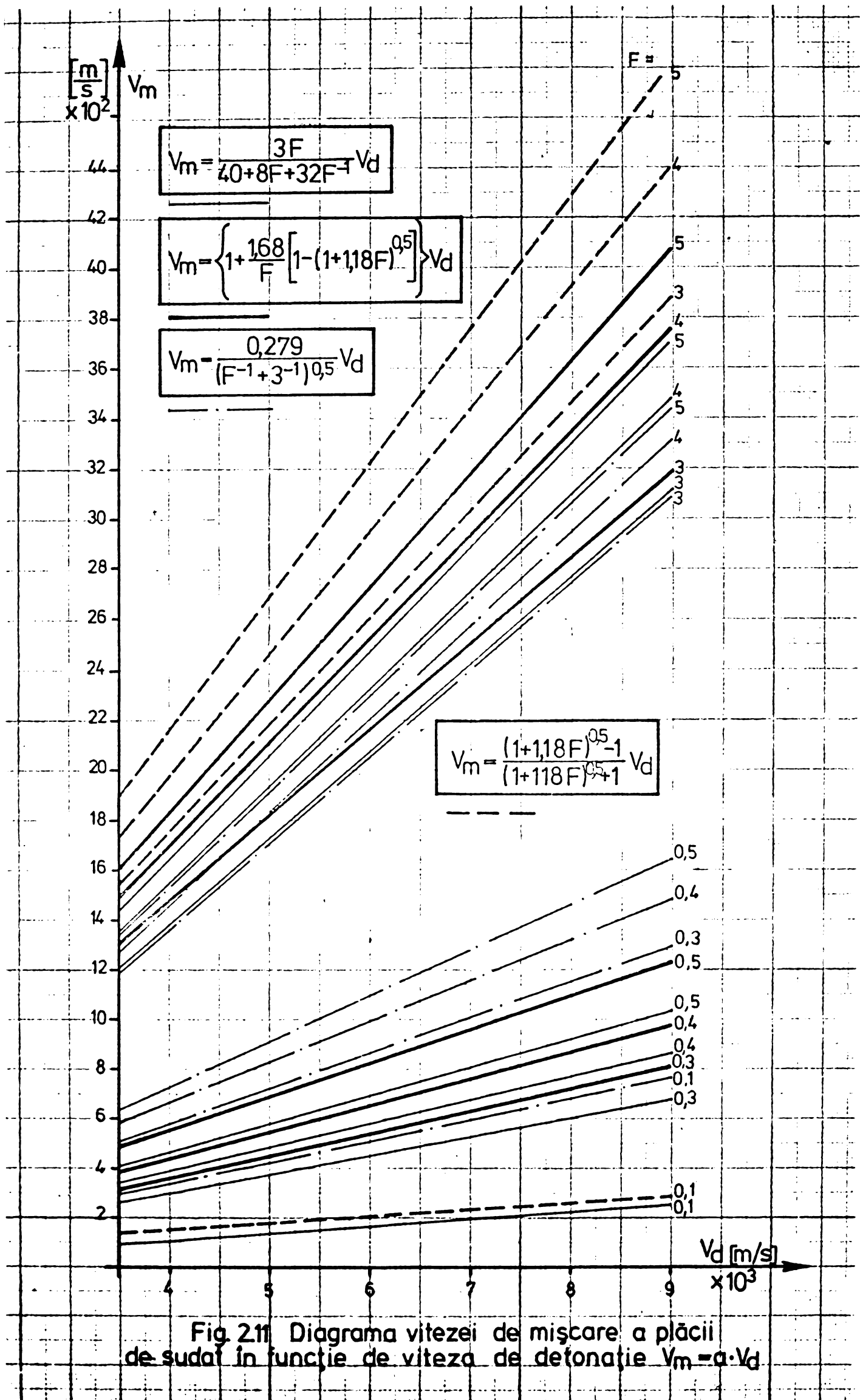
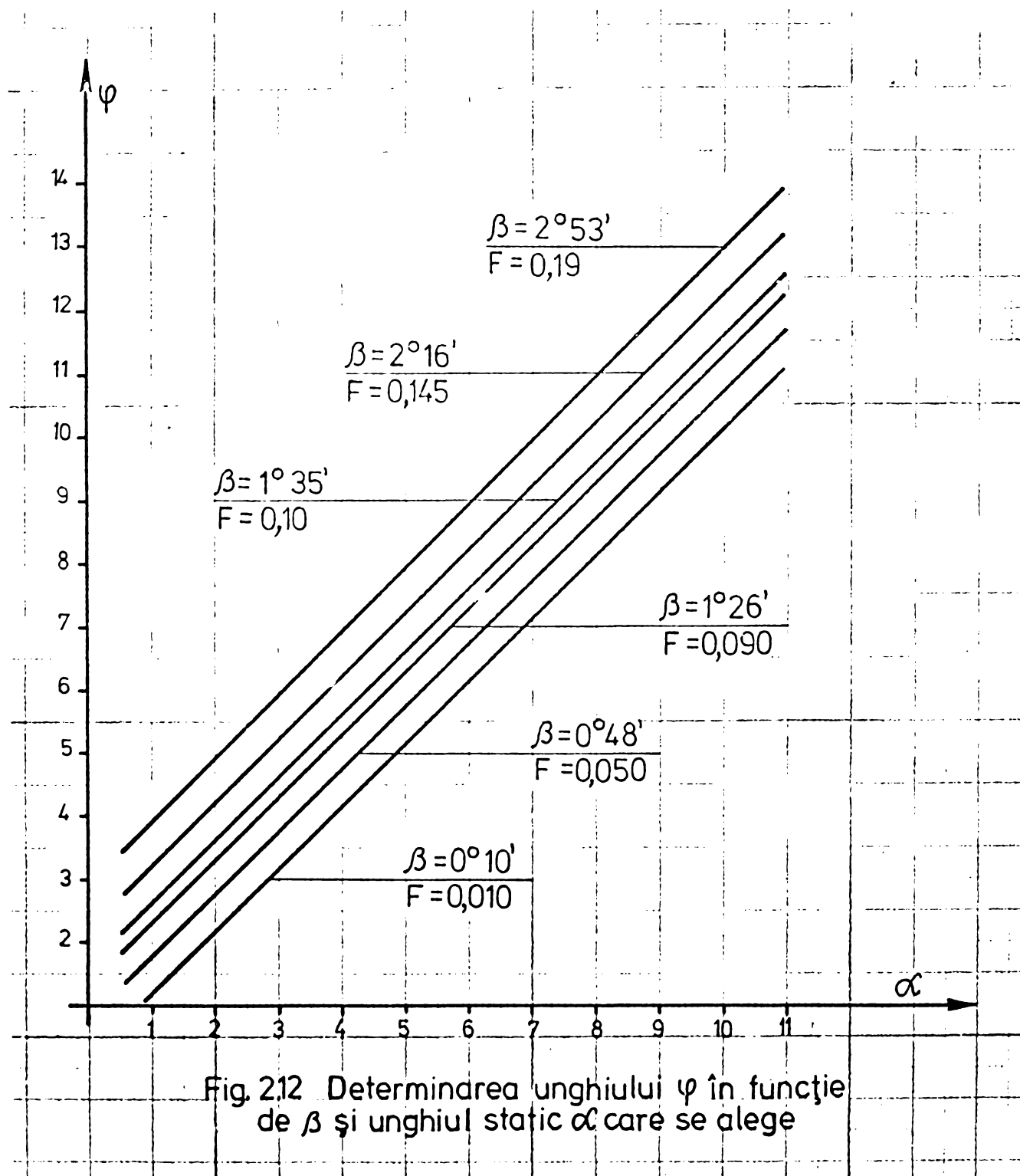


Fig. 211 Diagrama vitezei de mișcare a plăcii de sudat în funcție de viteza de defonajie  $V_m = a \cdot V_d$



In relațiile (1.30)...(1.37) apare numai viteza de de-tonație a explozivului și raportul dintre masa explozivului și masa plăcii de sudat, neluându-se în considerare și alte carac-teristici ce pot constitui factori destul de importanți.



In lucrarea lor [84] I.Nemecek și J.Vacek iau în con-siderație și proprietățile explozivului (căldura de explozie  $Q_e$ , densitatea  $\rho_e$  și presiunea de detonare  $p_d$ ) sub forma:

$$\frac{Q_e \cdot \rho_e}{p_d} = \delta \quad (2.5)$$

In final ei obțin pentru viteza de mișcare a plăcii de sudat, relația:

$$V_m = F^{\frac{1}{2}} [0,263 + 0,191 \lg \delta] V_d \quad (2.6)$$

în care

$$F = \frac{\rho_{e,y}}{\rho_p \cdot h} = 0,3...5$$

$$\delta = 0,19...1,1$$

S-au calculat o serie de variante pentru relația (2.6) obținând în funcție de F și  $\delta$  valorile cu care înmulțind viteza de detonație se determină viteza de mișcare  $V_m$  (tabelul 2.9). Comparând aceste valori cu cele din tabelul 2.8 se constată că ele sînt apropiate, cele pentru relația (2.6) fiind mai mari.

Tabel 2.9

$\delta \backslash F$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5
0,19	0,040	0,056	0,079	0,097	0,120	0,125	0,177	0,217	0,250	0,280
0,30	0,052	0,073	0,103	0,126	0,146	0,163	0,231	0,283	0,326	0,354
0,40	0,059	0,084	0,118	0,145	0,167	0,187	0,264	0,324	0,374	0,418
0,50	0,065	0,092	0,130	0,159	0,184	0,206	0,291	0,360	0,412	0,460
0,60	0,070	0,099	0,140	0,171	0,197	0,221	0,312	0,382	0,442	0,493
0,70	0,074	0,104	0,148	0,181	0,209	0,233	0,330	0,404	0,466	0,522
0,80	0,077	0,109	0,155	0,189	0,219	0,244	0,346	0,423	0,488	0,547
0,90	0,080	0,114	0,161	0,197	0,227	0,254	0,360	0,440	0,508	0,570
1,00	0,083	0,118	0,166	0,204	0,235	0,263	0,372	0,456	0,526	0,588
1,10	0,086	0,121	0,171	0,210	0,242	0,271	0,383	0,469	0,542	0,606

Autorii lucrării [84] au verificat și ei relațiile (1.30)...(1.36) măsurînd în cadrul experimentărilor viteza de mișcare a plăcii de sudat. În tabelul 2.10 au fost înscrise rezultatele obținute precum și diferența în procente calculată cu expresia  $\Delta = \frac{V_{m,calc.} - V_{m,m\acute{a}s.}}{V_{m,m\acute{a}s.}} \cdot 100$ .

Din analiza datelor din tabel se constată că relația (2.6) dă valori foarte apropiate de valorile măsurate, iar relația (1.35) dă cele mai mari diferențe. Nici celelalte relații nu dau valori apropiate de cele măsurate.

Tabel 2.10

$V_d$	Viteza de mișcare $V_m = [\dots] V_d$ pentru $F=2$								$V_m$ măsurat
	Rela- ția	1 30	1 32	1 33	1 34	1 35	1 36	2 6	
7400	$V_m$	2139	2242	2227	2168	7400	2620	1913	2028
	$\Delta \%$	+5,5	+10,5	+9,8	+6,9	+265	+29,2	-5,7	
5500	$V_m$	1590	1667	1655	1612	5500	1965	1008	1084
	$\Delta \%$	+46,7	+53,8	+52,7	+48,7	+407	+81,1	-7,0	
4090	$V_m$	1182	1239	1231	1198	4090	1444	773	814
	$\Delta \%$	+45,2	+52,2	+51,2	+47,2	+401	+77,4	-5,0	
5440	$V_m$	1572	1648	1637	1594	5440	1926	1708	1750
	$\Delta \%$	-10,2	-5,8	-6,5	-8,9	+211	+10,1	-2,4	
3100	$V_m$	896	939	933	908	3100	1097	1163	1149
	$\Delta \%$	-22,0	-18,3	-18,8	-21,0	+170	-4,5	+1,2	
4400	$V_m$	1272	1333	1324	1289	4400	1557	1098	1086
	$\Delta \%$	+17,1	+22,7	+22,0	+18,7	+305	+43,4	+0,8	
2780	$V_m$	803	842	837	815	2780	984	710	693
	$\Delta \%$	+15,9	+21,5	+20,8	+17,6	+301	+42,0	+2,5	

Decarece nici în relația (2.6) nu se includ caracteristicile metalului de sudat asupra căruia acționează undele de șoc rezultate din detonarea explozivului se impune găsirea unor relații de calcul care să dea valori cât mai reale și totodată să poată conduce la determinarea cantității de exploziv necesare pentru sudarea fiecărui reper precum și a unghiului static inițial  $\alpha$ .

### 2.5.2. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a plăcilor

#### 2.5.2.1. Plăci înclinate

La orice îmbinare sudată prin explozie cunoaștem dimensiunile plăcii de sudat ( $L \times b \times h$ ), metalul din care s-a confecționat placa, limita de curgere a metalului plăcii de sudat ( $\sigma_c$ ), viteza sunetului în metal ( $V_g$ ), greutatea specifică ( $\gamma_p$ ) a metalului precum și viteza de detonație ( $V_d$ ) și densitatea

( $\rho_e$ ) se caracterizează explozivul avut la dispoziție.

Se impune a calcula parametri de lucru numai în funcție de aceste elemente.

Din experimentările efectuate precum și din unele lucrări [36;48] a rezultat că presiunea exercitată în punctele de impact ale celor două plăci care se sudează prin explozie trebuie să fie de cel puțin 10 ori mai mare decât limita de curgere ( $\sigma_c$ ) a plăcii de sudat.

Referindu-se la acest aspect, Rice, Mc. Queen și Walsh [93] ajung la concluzia că în punctul de impact presiunea este:

$$p_1 = \frac{V_m}{2} \cdot V_s \cdot \rho \quad (2.7)$$

unde:

$V_m$  = viteză de mișcare a plăcii de sudat;  
 $V_s$  = viteza undei de șoc.

În general, pentru două corpuri care se ciocnesc (A și B) vitezele particulei  $V_{p(A)}$  și  $V_{p(B)}$  sînt legate de viteza corpului care se mișcă  $V_m$  prin relația:

$$V_m = V_{p(A)} + V_{p(B)} \quad (2.8)$$

Dacă corpurile izbite sînt din același material sau similare, atunci:

$$V_{p(A)} = V_{p(B)} = \frac{V_m}{2} \quad (2.9)$$

În consecință, viteza de mișcare a plăcii de sudat, pentru a avea presiunea de sudare în punctul de impact, va fi:

$$V_m = \frac{2 p_s}{V_s \cdot \rho} \quad (2.10)$$

De aici se obține și valoarea presiunii de sudare:

$$p_s = c,5 V_m \cdot V_s \cdot \rho \quad (2.11)$$

Presiunea de sudare trebuie să fie mult mai mare decât limita de curgere a metalului de sudat:

$$p_s = n \cdot \sigma_c \quad (2.12)$$

unde  $n = 10...50$ .

Inlocuind această valoare în relația (2.10) rezultă

să:

$$V_m = \frac{2n \cdot \sigma_c}{V_s \cdot \rho} \quad (2.13)$$

Notînd  $\rho = \frac{\delta}{g}$  și  $2n = K$ , se obține în final

$$V_m = K \cdot \frac{g}{\delta} \cdot \frac{\sigma_c}{V_s}, \quad (2.14)$$

în care  $K = 20 \dots 100$  pentru sudări în atmosferă;

$K_1 = 5 \dots 50$  pentru sudări în vid.

Cu ajutorul vitezei de mișcare a plăcii de sudat  $V_m$  se pot determina unghiurile dinamice  $\varphi$  și  $\beta$ , a căror diferență este unghiul static  $\alpha$  minim de înclinare a plăcilor de sudat prin explozie.

Din geometria deformării plăcii de sudat (fig.2.6) rezultă:

$$\varphi = \arcsin \frac{V_m}{V_s}, \quad (2.15)$$

$$\beta = \arctg \frac{V_m}{V_d}, \quad (2.16)$$

și

$$\alpha = \arcsin \frac{V_m}{V_s} - \arctg \frac{V_m}{V_d} \quad (2.17)$$

Cunoscînd unghiurile dinamice și se poate calcula viteza de sudare ( $V_p$ ) în funcție de viteza de detonație ( $V_d$ ) pe baza relației (1.40):

$$V_p = V_d \frac{\sin \beta}{\sin \varphi}.$$

Mărimea vitezei de sudare ( $V_p$ ) obținută din calcul se compară cu mărimea vitezei sunetului în metalul de sudat ( $V_s$ ) astfel ca  $V_p \leq V_s$ , în scopul de a se crea condițiile unei bune sudări prin explozie.

În caz că  $V_p > V_s$ , pentru micșirarea vitezei de sudare, între stratul de exploziv și placa de sudat se așează un strat de protecție confecționat din material plastic. Acest strat are rolul de a modera amplitudinea undelor de șoc. Dacă nu se cunoaște viteza sunetului în materialul plastic ( $V_p$ ) folosit, aceasta se poate calcula cu relația cunoscută:

$$V_t = \left[ E \cdot \varphi^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

In aceste condiții se recalculează viteza de sudare, care pe lungimea de sudare este:

$$V_p = \frac{L}{L \cdot V_d^{-1} \cos \alpha + L \cdot V_t^{-1} \sin \alpha} \quad (2.19)$$

ssu

$$V_p = \frac{1}{V_d^{-1} \cos \alpha + V_t^{-1} \sin \alpha} \quad (2.20)$$

Presiunea de sudare ( $p_s$ ) se determină cu ecuația (2.7) sub forma:

$$p_s = 0,5 \cdot V_m \cdot V_s \cdot \tau_p \cdot g^{-1} \quad (2.21)$$

Deoarece viteza de mișcare a plăcii de sudat ( $V_m$ ) este direct proporțională cu coeficientul  $K$ , iar unghiurile  $\alpha$ ,  $\beta$  și  $\varphi$  sînt dependente de viteza de mișcare ( $V_m$ ) și cantitatea de exploziv necesară va fi proporțională cu unghiul  $\alpha$ . In acest caz și raportul  $m_e/m_p = F$  va fi determinat în funcție de viteza de mișcare ( $V_m$ ) și viteza de detonație ( $V_d$ ).

In calcule, pentru raportul  $F$  s-a folosit relația (1.37) însă la experimentări nu a dat satisfacție în toate cazurile, în special pentru explozivii cu  $V_d > 5000 \text{ ms}^{-1}$ .

In acest sens, s-a constatat că termenul liber de la numitor din relația (1.37) este o valoare medie și el trebuie calculat pentru fiecare caz în parte.

Pentru aceasta, s-a înlocuit acest termen cu coeficientul  $C_K$ , relația luînd forma:

$$\frac{V_m}{V_d} = \frac{0,578 F}{C_K + F} \quad (2.22)$$

Coeficientul  $C_K$  este dependent de raportul  $K$  din relația (2.14) și conform expresiei (2.16) relația devine:

$$\text{tg } \beta = \frac{0,578 F}{C_K + F} \quad (2.23)$$

De aici se obține destul de ușor, valoarea raportu-

$$F = \frac{C_K \cdot \operatorname{tg} \beta}{0,578 - \operatorname{tg} \beta} \quad (2.24)$$

În acest caz se respectă condiția ca  $F \approx 0,1$  în fiecare caz, valoarea lui fiind dependentă de unghiul dinamic  $\beta$ .

Valorile coeficientului  $C_K$  au fost determinate pentru o serie de metale și aliaje și înscrise în tabelul 2.11 și utilizate la experimentări.

Tabel 2.11

K	$C_K$			K	$C_K$		
	Cupru și aliaje	Aluminiu și aliaje	Oțeluri inox.		Cupru și aliaje	Aluminiu și aliaje	Oțeluri inox.
10	3,60	5,84	7,70	60	0,60	0,98	1,28
20	1,80	2,92	3,84	70	0,52	0,84	1,10
30	1,20	1,96	2,56	80	0,46	0,74	0,96
40	0,90	1,46	1,92	90	0,40	0,66	0,86
50	0,72	1,16	1,54	100	0,36	0,59	0,78

Cunoscând dimensiunile plăcii de sudat ( $L \times b \times h = V$ ) și greutatea specifică ( $\gamma_p$ ) se calculează greutatea explozivului ( $G_e$ )

$$G_e = \gamma_p \cdot V \cdot F \quad (2.25)$$

În continuare se determină volumul explozivului ( $V_e$ ) și grosimea stratului de exploziv ( $y$ ) astfel:

$$V_e = \frac{G_e}{\gamma_e} \quad (2.26)$$

și

$$y = \frac{V_e}{L \cdot h} \quad (2.27)$$

Dacă în relația (2.27) se introduc valorile din (2.26) și (2.25) se obține direct grosimea stratului de exploziv:

$$y = \frac{\gamma_p}{\gamma_e} h \cdot F \quad (2.28)$$

iar cantitatea de exploziv va fi:

$$G_e = L.b.y. \dot{f}_e \quad (2.29)$$

Deoarece este necesar să se aleagă cea mai bună soluție, calculele pentru determinarea parametrilor de lucru se vor face tabelar (cap.2.5.6).

### 2.5.2.2. Plăci paralele

Din fig.2.7, pe lângă parametrii de lucru rezultă și schema procesului de sudare prin explozie a două plăci așezate paralel. Pentru asemenea poziționări sînt necesari explozivi plastici cu viteză "subsonică" ( $V_d = 3000...5000 \text{ ms}^{-1}$ ).

Condiția ca  $V_p \leq V_s$  este satisfăcută, deoarece viteza punctelor de contact (viteza de sudare)  $V_p$  este egală cu viteza de detonație a explozivului.

Analizînd procesul de sudare (fig.2.7) rezultă că de la timpul  $t_1 = 0$  pînă la  $t_2$  se produce - sub influența presiunii de detonație - înclinarea plăcii de sudat și ciocnirea acesteia de placa de bază în punctul B. În timp ce placa de sudat se mișcă de la C la D, punctele de contact se deplasează de la B la D cu viteza:

$$V_p = \frac{V_m}{\sin \varphi} \quad (2.30)$$

Atunci cînd toate punctele plăcii de sudat vin simultan în contact cu placa de bază - întocmai ca la experimentările undelor de șoc plane - viteza punctelor de contact (viteza de sudare) va fi  $V_p = \infty$ . Aceasta poate avea loc cînd  $\beta = 0$ .

Cauza care conduce la  $V_p = V_d$  este ușor de determinat. Placa de sudat va presa la început placa de bază după un timp  $dt = t_2 - t_1$ , timp care se determină cu relația:

$$dt = x/V'_m \quad (2.31)$$

Cînd frontul exploziei ajunge la sfîrșitul plăcii de sudat, timpul  $t = t_f$ , ultimul element al plăcii de sudat va fi accelerat și va izbi placa de bază la timpul  $t = t_f + dt$ .

În acest caz, viteza de sudare va fi:

$$\frac{L}{(t_f + dt) - dt} = \frac{L}{t_f} = V_d = V_p \quad (2.32)$$



Acest fapt este valabil numai dacă întârzierea timpului  $t$  este constantă pe timpul sudării, deoarece creșterea întârzierii timpului conduce la utilizarea unor explozivi cu viteză de detonație supersonică, cu sau fără geometrie paralelă.

Deoarece plăcile sînt așezate paralel,  $\varphi = \beta$  iar  $V_p = V_d$ , calculul parametrilor de lucru este mult simplificat.

Ca și în cazul precedent, se calculează întâi viteza de mișcare ( $V_m$ ) a plăcii de sudat cu relația (2.14) iar după aceasta se determină valoarea unghiului  $\varphi$  din expresia (2.30) considerînd că  $V_p = V_d$ :

$$\sin \varphi = \frac{V}{V_d} \quad (2.33)$$

În continuare se calculează distanța  $x$  dintre cele două plăci de sudat.

Conform teoriei lui Duvall și Erkman [36], după trei impulsuri ale undei de șoc, placa de sudat accelerată a atins 90% din viteza de mișcare  $V_m$ .

Pe baza acestei teorie putem estima distanța minimă  $x$ , astfel:

- timpul  $t$ , înainte de ciocnire este

$$t = \frac{2x}{V_m} \quad (2.34)$$

unde  $s$  - considerat viteza medie de mișcare  $V_m/2$ ;

- timpul cerut pentru 3 impulsuri este timpul necesar undei de șoc pentru a trece de 6 ori prin grosimea plăcii de sudat  $h$ :

$$t_n = \frac{6h}{V_s} \quad (2.35)$$

admițînd că  $t_n < t$ ;

- rezultă că distanța minimă dintre plăci va fi:

$$x = 3h \frac{V_m}{V_s} \quad (2.36)$$

Ținînd seama de faptul că la majoritatea metalelor viteza sunetului  $V_s < 6000$  m/s iar viteza de mișcare a plăcii de sudat  $V_m \approx 100$  m/s rezultă că:

$$x \approx 0,05 h, \quad (2.37)$$

formulă adoptată de cercetătorii americani din laboratoarele Du Pont [121].

Distanța minimă  $x$  se poate determina mult mai exact. Astfel, din fig. 2.7 rezultă că din triunghiul dreptunghic  $DF$ , cateta  $DF = x$ , se determină destul de ușor. În acest scop considerăm că timpul de deplasare a punctelor de impact de la  $D$  la  $F$  este  $t = 10^{-5}$  s iar  $V_p = V_d$ . În aceste condiții rezultă:

$$x = 10^{-5} \cdot V_d \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ [mm]}. \quad (2.38)$$

Pentru simplificarea calculelor, în relația (2.36) se înlocuiește expresia vitezei de mișcare  $V_m$  din relația (2.14) obținând direct mărimea distanței minime:

$$x = 3 \cdot h \cdot K \cdot \frac{g}{\delta} \cdot \frac{\sigma_c}{V_s^2} \quad (2.39)$$

Decarece termenii  $g/\delta$ ,  $\sigma_c/V_s$  și  $\sigma_c/V_s^2$ , pentru fiecare metal sînt de fapt constante, au fost calculați cu datele din tabelul 2.4 și valorile înscrise în tabelul 2.12.

În acest sens, dacă se notează  $A = g/\delta$ ;  $B = \sigma_c/V_s$  și  $C = \sigma_c/V_s^2$ , relațiile de calcul (2.14) și (2.39) vor deveni:

$$V_m = K \cdot A \cdot B, \quad (2.40)$$

$$x = 3 \cdot h \cdot K \cdot A \cdot C. \quad (2.41)$$

Tabel 2.12

Metale și aliaje	$A = \frac{g}{\delta_p}$	$B = \frac{\sigma_c}{V_s}$	$C = \frac{\sigma_c}{V_s^2}$
	$\frac{\text{cm}^4}{\text{daNS}^2}$	$\frac{\text{daNS}}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{daNS}^2}{\text{cm}^4}$
Cupru Cu5	112.233	$7993 \cdot 10^{-6}$	$22497 \cdot 10^{-12}$
Alama Am63	119.904	$5302 \cdot 10^{-6}$	$14951 \cdot 10^{-12}$
Aluminiu Al 995	370.370	$1784 \cdot 10^{-6}$	$3492 \cdot 10^{-12}$
Dural simb.2024	373.134	$6214 \cdot 10^{-6}$	$12065 \cdot 10^{-12}$
Zicral simb.7075	357.143	$9505 \cdot 10^{-6}$	$18822 \cdot 10^{-12}$
Y Sn 83	132.450	$3083 \cdot 10^{-6}$	$12186 \cdot 10^{-12}$
10 NC 180	124.688	$4082 \cdot 10^{-6}$	$8329 \cdot 10^{-12}$
Incoloy 825	121.000	$6358 \cdot 10^{-6}$	$11408 \cdot 10^{-12}$

In continuare se calculează în funcție de dimensiunile plăcii de sudat și a vitezei de mișcare valoarea raportului  $F$  cu relația (2.24) și cantitatea de exploziv cu formula (2.25).

După aceasta, cu ajutorul formulelor (2.26), (2.27) și (2.28) se calculează grosimea stratului de exploziv necesar pentru sudarea prin explozie.

### 2.5.3. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare

Din analiza mecanismului sudării țevii la placa tubulară, ilustrat în fig.2.8 se constată că avem de a face cu aceiași parametri de lucru, cu deosebirea că sudarea se face pe un con și nu pe o suprafață plană.

In plus, trebuie să se țină seama de faptul că țeava se deformează de la cilindru la con. In acest caz, viteza de deformare (de mișcare), a peretelui țevii, în special atunci când ea este semnificativă, trebuie calculată ținând seama și de energia absorbită de țeavă înainte impactului cu placa tubulară.

Parametrii de lucru ( $V_m, \varphi, \beta, \alpha$ ) se vor determina ca și la plăcile plane cu relațiile (2.14), (2.15), (2.16) și (2.17).

Dacă limita de curgere a metalului țevii  $\sigma_c < 20 \text{ daN mm}^{-2}$  iar  $\alpha$  calculat cu  $V_m$  este mai mare de  $10^0$ , se calculează viteza de deformare  $V_r$  și se recalculează  $\alpha$ .

Viteza de deformare  $V_r$  se determină pe baza legii conservării energiei astfel:

$$0,5 m V_r^2 = 0,5 m V_m^2 - \xi \quad (2.42)$$

unde  $\xi$  este energia absorbită de țeavă înainte de producerea impactului țevii cu placa tubulară.

Notînd cu  $l$  extensia circumferențială a țevii și cu  $P$  forța care produce extensia, se poate scrie că energia absorbită de țeavă este:

$$\xi = \int_{l=c}^{l=l} P dl . \quad (2.43)$$

Considerăm geometria din fig.2.8 pentru o țeavă avînd diametrul mediu  $D_m$ , grosimea peretelui ( $a$ ), limita de curgere

$\sigma_c$  iar înclinarea peretelui slezajului din placa tubulară  $2\alpha$ , energia absorbită de un inel elementar la o distanță  $L$  de la vârful unghiului  $\alpha$  va fi:

$$\varepsilon = 2\pi \cdot a \cdot L \cdot \sigma_c \cdot \delta L \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.44)$$

Folosind aceleași notații se poate scrie că masa acestui inel este:

$$m = \pi \cdot a \cdot \rho \cdot D_m \cdot \delta L. \quad (2.45)$$

Neluînd în considerare deformarea, energia cinetică, în acest caz, va fi:

$$0,5 m v_p^2 = 0,5 \pi \cdot a \cdot \rho \cdot D_m v_m^2 \cdot \delta L. \quad (2.46)$$

Înlocuind în ecuația (2.42) pe  $m$  și  $\varepsilon$  cu valorile din (2.44) și (2.45) rezultă:

$$\begin{aligned} 0,5 \pi \cdot a \cdot \rho \cdot D_m v_p^2 \delta L = 0,5 \pi \cdot a \cdot \rho \cdot D_m v_m^2 \delta L - \\ - 2\pi \cdot a \cdot L \cdot \sigma_c \operatorname{tg} \alpha \cdot \delta L, \end{aligned} \quad (2.47)$$

iar după simplificări obținem:

$$v_p^2 = \frac{\rho D_m v_m^2 - 4 L \sigma_c \operatorname{tg} \alpha}{\rho D_m} \quad (2.48)$$

În final, viteza de deformare (mișcare) a părții țevii de sudat este:

$$v_m = \left[ v_p^2 - 4 \frac{L}{D_m} \cdot \frac{\sigma_c}{\rho} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.49)$$

După determinarea vitezei de deformare (mișcare)  $v_p$  se recalculează unghiurile  $\varphi$ ,  $\beta$  și  $\alpha$ . Cu valorile obținute se calculează viteza de sudare  $v_p$  cu relația (2.20) urmărind să se respecte condiția ca  $v_p \leq v_s$  și apoi presiunea de sudare  $p_s$  cu ecuația (2.21).

Cantitatea de exploziv  $G_e$  se va determina cu relațiile (2.24) și (2.25) în care  $V = \pi \cdot a \cdot D_m \cdot L$ .

Volumul explozivului  $V_e$  se calculează cu relația

(2.26), iar diametrul  $d$  al cordonului de exploziv cu formula cunoscută:

$$d = 1,127 \left[ \frac{v_e}{L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

În funcție de dimensiunile țevii și ale cordonului de exploziv se va dimensiona teaca din material plastic.

#### 2.5.4. Calculul parametrilor de lucru la mandrinarea prin explozie a țevelor la plăcile tubulare

După cum rezultă din fig.2.9, mandrinarea prin explozie este de fapt sudarea prin explozie a țevelor la placa tubulară, diferența constând în aceea că la mandrinare suprafețele de îmbinat sînt așezate paralel, pe cînd la sudare alezajele din placa tubulară sînt conice.

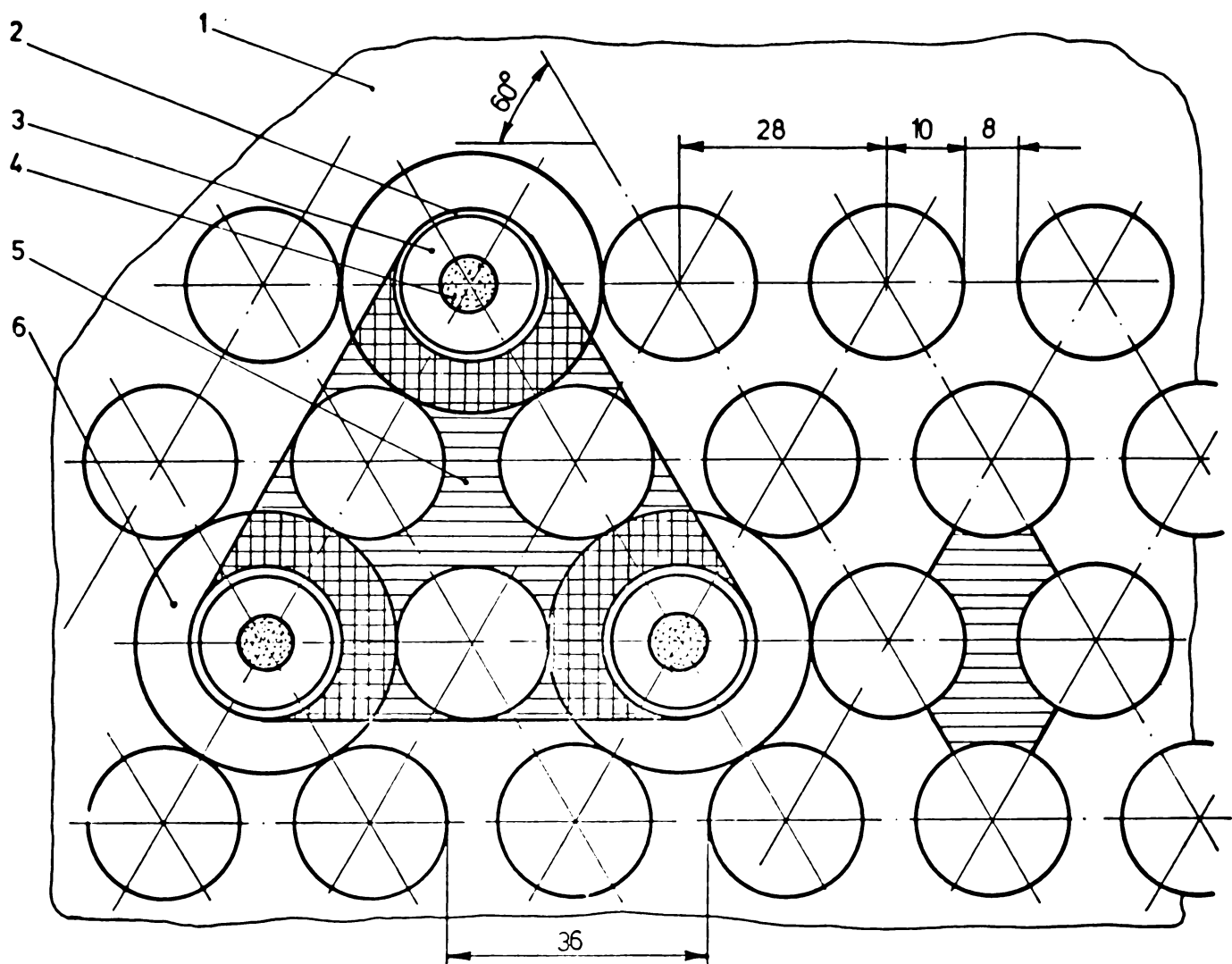


Fig. 2.13 Poziționarea țevelor în placa tubulară și zonele posibile de deformare la mandrinare și sudare prin explozie  
1-Placa tubulară; 2-Țeavă; 3-Teaca de protecție; 4-Cordonul de exploziv;  
5-Puntea dintre țevi; 6-Zona de deformare din placa tubulară.

În acest caz, viteza de detonație a explozivului trebuie să fie mai mică decât viteza sunetului în metalul țevii ( $V_d < V_s$ ).

În unele cazuri (fig. 2.5 a, b, c) se poate combina mandrinarea cu sudarea prin explozie.

La determinarea parametrilor de lucru a trebuit să se ia în considerare condițiile impuse prin proiecte. Aceste condiții sînt:

- dimensiunile găurilor din placa tubulară și ale țevilor;
- distanțe dintre axele găurilor și dintre găuri (fig. 2.13);
- grosimea pereților țevii să nu se reducă cu mai mult de 5%;
- să nu se producă deformarea țăvilor în afara grosimii plăcii tubulare sau în zona de gardă de 1,5 mm prevăzută la fața dinspre circuitul secundar al generatorului;
- mandrinarea să se facă pe toată grosimea plăcii mai puțin 20 mm la partea dinspre circuitul primar al generatorului și 1,5 mm la partea dinspre circuitul secundar;
- îmbinările rezultate trebuie să reziste la o forță de smulgere de  $(11...12) \cdot 10^3$  N pentru țevile avînd  $d_e = 20$  mm și  $a = 1,5$  mm;
- jocul maxim dintre țeavă și alezajul găurii va fi de 0,35 mm.

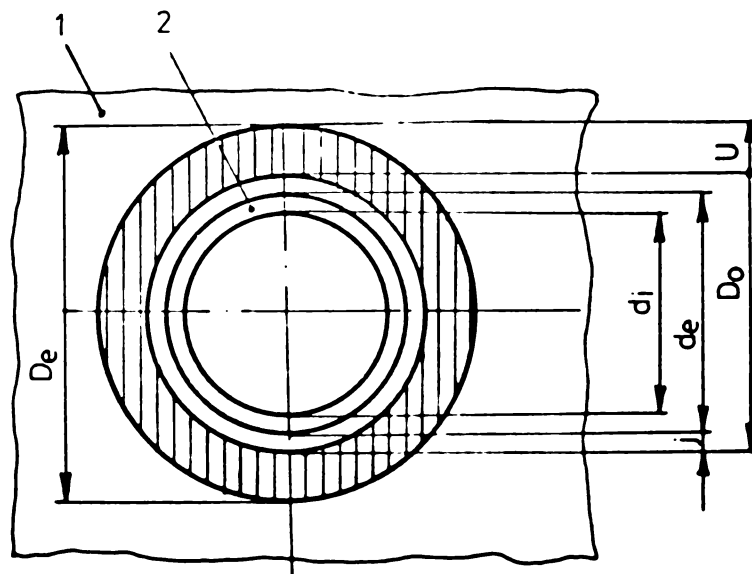


Fig. 2.14 Zona posibilă de deformare a plăcii tubulare din jurul unei găuri la mandrinarea și sudarea prin explozie a țevii.

Avînd în vedere condițiile impuse, în procesul de mandrinare și sudare prin explozie a țevilor la placa tubulară, energia totală necesară ( $W_t$ ) este formată din energia potențială de deformare ( $W_d$ ) și energia cinetică ( $W_c$ ).

La rîndul ei, energia de deformare este compusă din energia de deformare a țevii în zona de mandrinare și sudare ( $W_{d1}$ ) și de energia de deformare a plăcii tubulare (fig.2.14) din jurul găurii ( $W_{d2}$ ).

Tinînd seama de notațiile din fig.2.9 și 2.14 - în condițiile impuse - energia de deformare a țevii este:

$$W_{d1} = 2\pi \cdot L \cdot r_m \cdot a \cdot \sigma_{ct} \frac{\Delta r_m}{r_m} \quad (2.51)$$

în care:

$r_m$  - raza medie a țevii;

$a$  - grosimea peretelui țevii;

$L$  - lungimea de mandrinare;

$\sigma_{ct}$  - limita de curgere a metalului țevii

$$\Delta r_m = \varepsilon^* \cdot r_m ;$$

$\varepsilon^*$  - gradul de reducere a grosimii peretelui în %; iar energia de deformare a zonei din jurul găurii din placa tubulară va fi:

$$W_{d2} = 2\pi \cdot L \cdot R_o (\Delta r_m - J) \sigma_{cp} \ln \frac{R_e}{R_o} \quad (2.52)$$

unde:

$R_o$  - raza găurii din placa tubulară;

$R_e$  - raza cilindrului ipotetic în care se produc deformații plastice în placa tubulară (fig.2.14);

$\sigma_{cp}$  - limita de curgere a metalului plăcii de bază;

$J$  - jocul radial.

Adunînd cele două energii de deformare  $W_{d1}$  și  $W_{d2}$  și admitînd că  $R_o \approx r_m$ , în final se obține:

$$W_d = \pi \cdot L \cdot r_m^2 \varepsilon^* \sigma_{cp} \left[ \left(1 - \frac{i}{\varepsilon^*}\right) \ln \frac{R_e}{r_m} + 2 \frac{\sigma_{ct}}{\sigma_{cp}} \cdot \frac{a}{r_m} \right], \quad (2.53)$$

$$\text{unde } i = \frac{J}{r_m}. \quad (2.54)$$

Deplasarea radială ( $U_o$ ) a punctelor de pe peretele găurii din placa tubulară este:

$$U_o = \varepsilon^* \cdot r_m - J, \quad (2.55)$$

iar deplasarea radială (U) pînă la  $R_0$  va fi:

$$U = U_0 \cdot r_m / R_0 \quad (2.56)$$

energiea cinetică rezultă din expresia:

$$W_0 = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_m \cdot a \cdot \rho_t \cdot v_m^2 / 2 \quad (2.57)$$

sau

$$W_0 = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_m^2 \cdot 1 \cdot p \quad (2.58)$$

in care:

$v_m$  - viteza de mișcare a țevii spre peretele găurii;

$\rho_t$  - densitatea metalului țevii;

$p$  - presiunea de mandrinare.

Dacă se egalează (2.57) cu (2.58) și se înlocuiește  $i$  cu valoarea din (2.54) se ajunge la ecuația:

$$a \cdot \rho_t \cdot v_m^2 / 2 = p \cdot J \quad (2.59)$$

din care rezultă viteza de mișcare a peretelui țevii  $v_m$  spre peretele găurii din placa tubulară:

$$v_m = \left[ 2 \frac{J}{a} \cdot \frac{p}{\rho_t} \right]^{0.5} \quad (2.60)$$

Dacă se consideră o presiune de referință ( $p_r = 10^3 \text{ daN/cm}^2$ ) viteza de mișcare a țevii se poate determina - pentru diferite valori ale presiunii de mandrinare ce se stabilesc în funcție de rezistența punții dintre țevi - cu relația (2.60) care capătă forma:

$$v_m = \left[ \frac{p}{p_r} \right]^{0.5} \cdot \left[ 2 \frac{J}{a} \cdot \frac{p_r}{\rho_t} \right]^{0.5} \quad (2.61)$$

În acest sens în tabelul 2.13 au fost înscrise valorile factorului  $\left[ p/p_r \right]^{0.5}$  din relația (2.61).

Energia totală necesară pentru mandrinarea prin explozie (cu exploziv avînd  $v_d < v_g$ ) este:

$$W_t = W_d + W_0 \quad (2.62)$$

care după înlocuirea valorilor lor din (2.53) și (2.57) devine:

$$W_t = \pi \cdot L \cdot r_m \left\{ \varepsilon^x \cdot r_m \cdot \sigma_{op} \left[ \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^x} \right) \ln \frac{R_0}{r_m} + 2 \frac{\sigma_{ct}}{\sigma_{op}} \cdot \frac{a}{r_m} \right] + 2 \cdot a \cdot \rho \cdot \frac{v_m^2}{2} \right\} \quad (2.63)$$



Tabel 2.13

$p$ [daN·cm <sup>-2</sup> ]	$[p/P_r]^{0,5}$	$p$ [daN·cm <sup>-2</sup> ]	$[p/P_r]^{0,5}$	$p$ [daN·cm <sup>-2</sup> ]	$[p/P_r]^{0,5}$
1000	1,000	4000	2,000	7000	2,645
1250	1,118	4250	2,061	7250	2,693
1500	1,225	4500	2,121	7500	2,739
1750	1,323	4750	2,179	7750	2,784
2000	1,414	5000	2,234	8000	2,828
2250	1,500	5200	2,291	8250	2,872
2500	1,581	5500	2,345	8500	2,915
2750	1,658	5750	2,348	8750	2,958
3000	1,732	6000	2,448	9000	3,000
3200	1,803	6250	2,500	9250	3,041
3500	1,871	6500	2,550	9500	3,082
3750	1,936	6750	2,598	9750	3,123

Referitor la energia totală de deformare, A.Ezra [38] ajunge la relație:

$$W_t = 2 \pi G_e \cdot C \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{a}{L} \right)^2 + \left( \frac{D_0}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left( 1 - \frac{a}{L} \right)^2 + \left( \frac{D_0}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.64)$$

în care:

- $Q_0$  - este cantitatea de exploziv necesară, iar
- $C$  - este o constantă a explozivului avînd valori între  $3,8 \cdot 10^{-5}$  și  $6,4 \cdot 10^{-5}$ .

Această relație impune cunoașterea cantității de exploziv necesară pentru mandrinare, parametru care de fapt trebuie determinat.

Deoarece jocul radial ( $J$ ) dintre țevă și alezajul găurii din placă tubulară este destul de mic trebuie să fie verificat, astfel ca el să permită o bună mandrinare.

Pentru aceasta am considerat un element radial din țevă văzut longitudinal (fi .2.15), după detonarea explozivului.

Analizînd mecanismul mandrinării prin explozie din fig.2.15 se constată că este asemănător cu sudarea prin explozie a plăcilor paralele (fig.2.7). Dacă la sudarea plăcilor așezate paralel trebuie să se determine distanța minimă dintre ele fără nîci o condiție, în cazul mandrinării țevilor la plăcile tubulare această distanță este de fapt jocul dintre peretele țevii și alezajul din placa tubulară.

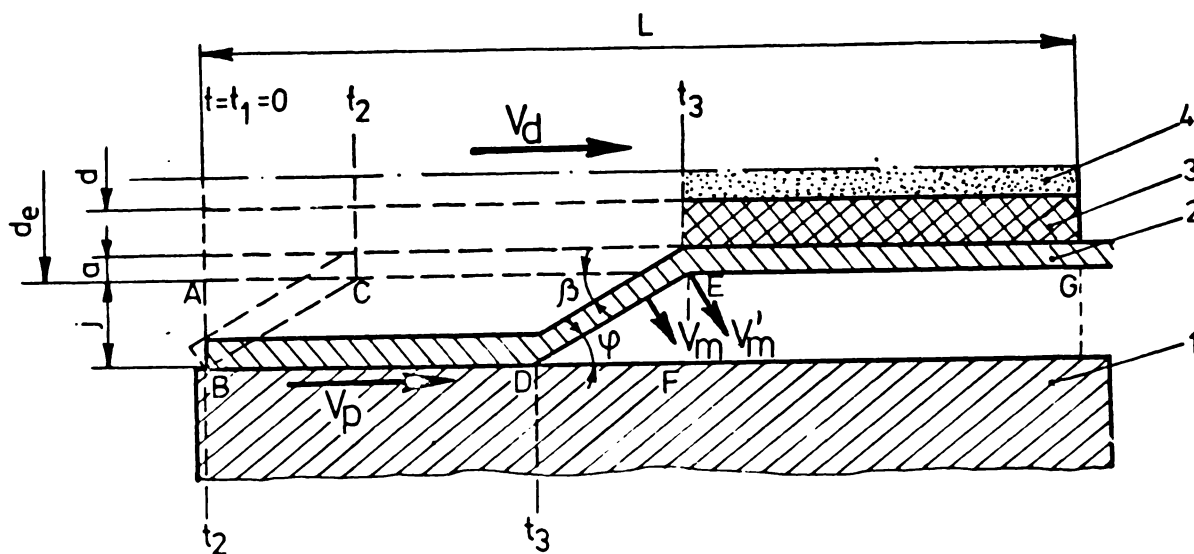


Fig. 2.15 Mecanismul mandrinării prin explozie a țevilor la placa tubulară

1-Placa tubulară; 2-Țeavă; 3-Teacă de protecție;  
4-Cordonul de exploziv

La stabilirea acestui joc trebuie să se țină seama de gradul de subțiere a peretelui țevii, impus prin proiectul de execuție. În acest caz se va proceda ca la sudarea prin explozie a plăcilor paralele, distanța minimă dintre plăci fiind jocul maxim, el determinîndu-se cu relația (2.39) care devine:

$$J_{\min} = 3 K.a. \frac{g}{\delta} \cdot \frac{\sigma_c}{v_s^2} \quad (2.65)$$

sau

$$J_{\min} = 3.K.a.A.C. \quad (2.66)$$

După determinarea valorii jocului minim, aceasta se compară cu jocul prescripș. Această relație poate fi acceptată pentru calculele de proiectare a proceselor de mandrinare.

Cantitatea de exploziv necesară pentru mandrinarea fiecărei țevi se poate determina din relația (2.64):

$$G_e = \frac{W_t}{2 \pi c \left\{ \left[ \left(1 + \frac{a}{L}\right)^2 + \left(\frac{D_0}{L}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left(1 - \frac{a}{L}\right)^2 + \left(\frac{D_0}{L}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad (2.67)$$

în care energia totală  $W_t$  s-a calculat cu relație (2.63). În rezolvarea acestei probleme se întâmpină greutăți din cauză că nu am putut găsi valorile constantei  $C$  pentru explozivii utilizați. Din această cauză am stabilit [57;63] o relație bazată pe elementele cunoscute, sub formă:

$$G_e = F \cdot \gamma_t \cdot \pi \cdot D_m \cdot s \cdot L \quad (2.68)$$

în care:

$F$  - are valorile din relațiile (2.23) sau (2.24) în funcție de viteza de detonație  $V_d$  ;

$\gamma_t$  - greutatea specifică a metalului țevii.

Volumul corespunzător cantității de exploziv ( $V_e$ ) se calculează cu relația (2.26) iar diametrul cordonului de exploziv ( $d$ ) cu relația (2.38).

Dimensiunile țevii de protecție din material plastic se vor determina în funcție de diametrul cordonului de exploziv ( $d$ ), diametrul interior al țevii ( $d_1$ ) și de lungimea de mandrinare ( $L$ ).

#### 2.5.5. Calculul temperaturilor ce se dezvoltă la sudarea prin explozie

Pentru determinarea temperaturilor ce se pot dezvolta în timpul sudării prin explozie s-a apelat la expresia (1.27) în care coeficientul Grüneisen  $\Gamma$  s-a calculat cu relația (1.29).

În acest sens s-a calculat coeficientul  $\Gamma$  pentru valori ale raportului  $\rho/\rho_0$  de la 0,1 la 2,0. În tabelul 2.14 au fost înscrise valorile obținute.

Tabel 2.14

$\rho/\rho_0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Gamma$	39,05	18,01	10,10	7,09	5,39	4,34	3,07	3,02	2,62	2,30
$\rho/\rho_0$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$\Gamma$	2,05	1,84	1,67	1,51	1,39	1,29	1,19	1,10	1,05	0,97

Cu valorile obținute din tabelul 2.12 s-a trasat diagrama coeficientului Grüneisen  $\Gamma(\rho)$  (fig.2.16).

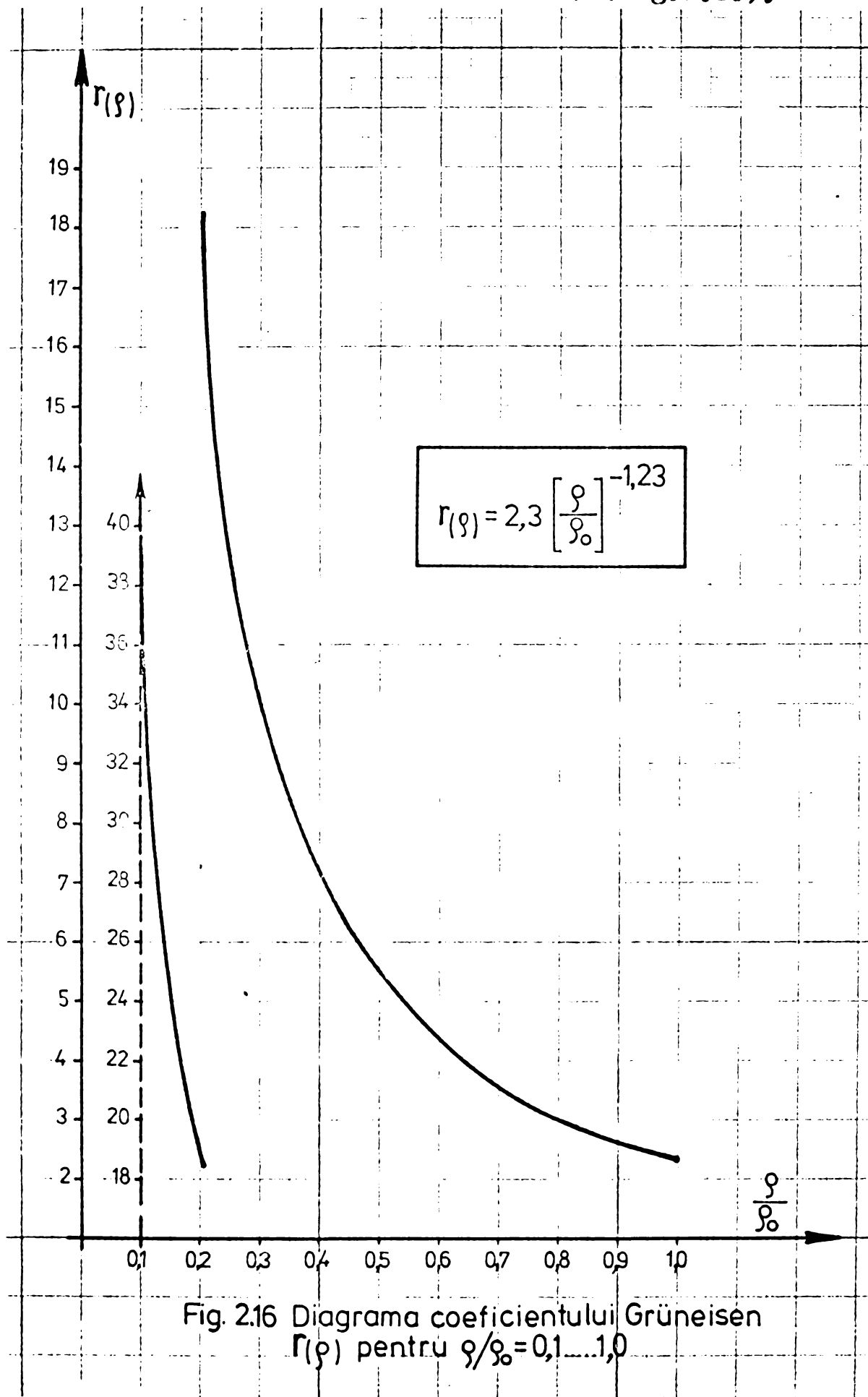


Fig. 2.16 Diagrama coeficientului Grüneisen  $\Gamma(\rho)$  pentru  $\rho/\rho_0=0,1 \dots 1,0$

Pentru determinarea temperaturilor ce se pot dezvolta la sudarea prin explozie s-au efectuat calcule pe baza relației (1.27), admițând ipoteza că coeficientul Grüneisen  $\Gamma$  - practic -

este constant față de valoarea sa inițială pentru un raport  $\rho/\rho_0$  aceasta cu atât mai mult cu cât procesul de sudare prin explozie are o durată extrem de redusă ( $10^3 \dots 10^{-6}$  s).

În calcule s-a plecat de la temperaturile inițiale  $T_0 = 300 \dots 1100^\circ\text{K}$ , considerînd că temperatura normală medie este

Tabel 2.15

$\frac{\rho}{\rho_0}$	$\Gamma$	Temperatura inițială $T_0$ [ $^\circ\text{K}$ ]								
		300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
0,4	7,09	19870	26490	33110	39732	46354	52976	59598	66220	72842
0,5	5,39	12595	16792	20990	25188	29386	33584	37782	41980	46178
0,6	4,34	26671	34428	4375	5250	6125	7000	7875	8570	9625
0,7	3,57	1074	1432	1790	2148	2506	2864	3222	3581	3938
0,8	3,02	562	750	940	1128	1316	1500	1692	1875	2070
0,9	2,62	307	410	510	612	714	816	918	1023	1122
1,0	2,30	300	450	500	600	700	800	900	1000	1100
1,1	2,05	365	486	610	732	854	976	1098	1216	1342
1,2	1,84	420	560	700	840	980	1120	1260	1400	1540
1,3	1,67	465	620	775	930	1085	1240	1395	1550	1705
1,4	1,51	500	665	830	1000	1162	1330	1495	1663	1826
1,5	1,39	520	694	867	1040	1214	1387	1560	1734	1907
1,6	1,29	550	733	916	1100	1280	1466	1649	1832	2015
1,7	1,19	564	752	940	1128	1316	1504	1692	1879	2068
1,8	1,10	573	764	955	1146	1337	1528	1720	1910	2100
1,9	1,05	581	775	970	1164	1358	1552	1746	1936	2134
2,0	0,97	588	784	980	1176	1372	1568	1764	1959	2156
2,5	0,74	592	789	986	1183	1380	1578	1775	1972	2169
3,0	0,59	574	766	960	1152	1344	1536	1728	1914	2112
3,5	0,49	555	740	925	1110	1295	1480	1665	1849	2035
4,0	0,40	523	697	871	1045	1230	1394	1568	1742	1916

de 27°C, iar celelalte în ipoteza că asupra metalului de sudat acționează și o parte din temperatura de detonație a explozivului. Rezultatele obținute au fost înscrise în tabelul 2.15 iar pe baza lor s-a trasat diagrama 2.17.

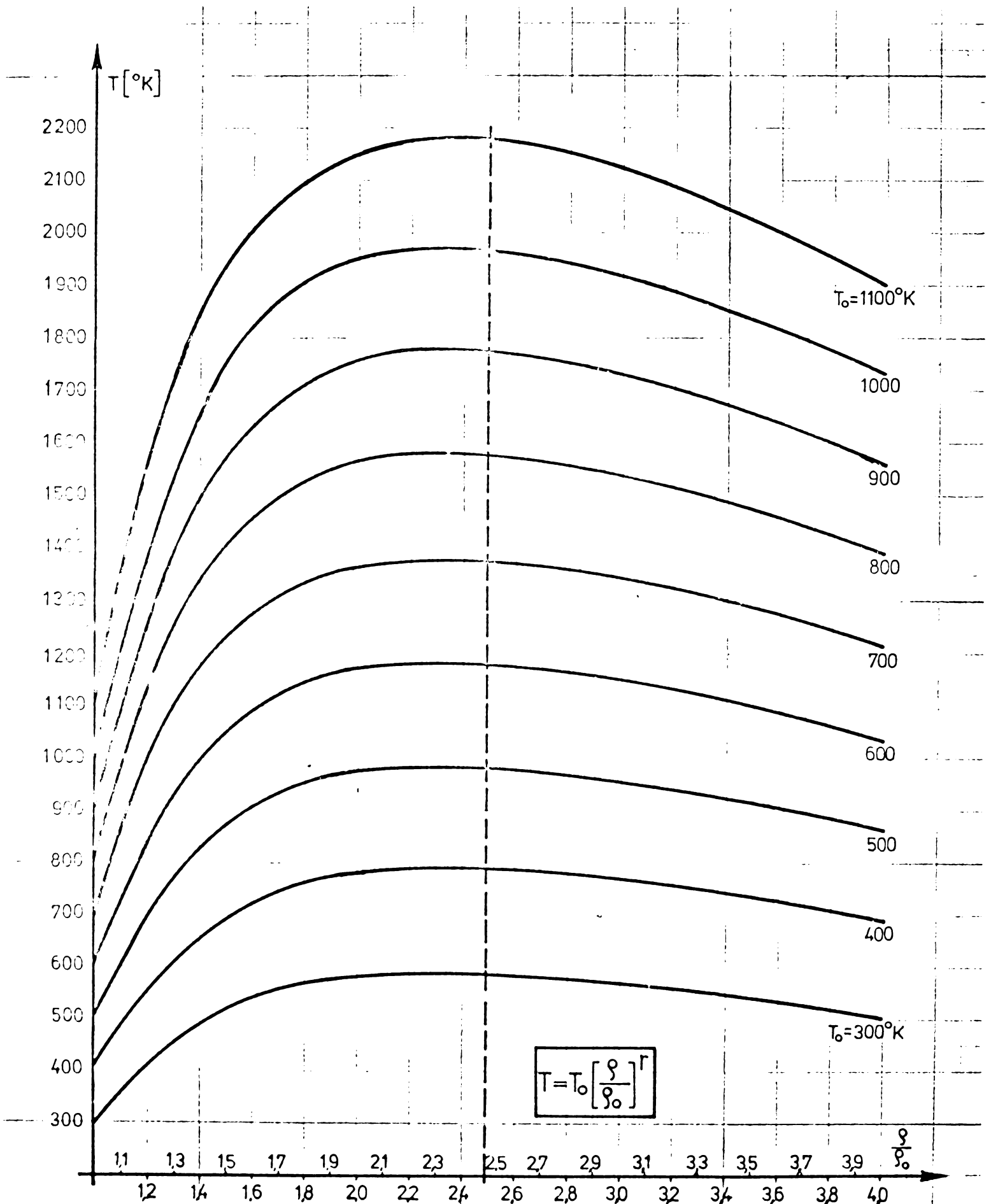


Fig. 2.17 Diagrama temperaturilor la sudarea prin explozie

Din analiza datelor cuprinse în tabelul 2.15 rezultă că temperaturi mari se sting la rapoarte  $\rho/\rho_0 = 0,4...0,5$ . Temperaturile scad pînă la  $\rho/\rho_0 = 1$ , după care urmează o creștere pînă la  $\rho/\rho_0 = 2,5$  și apoi scad din nou.

Came temperaturilor obținute datorate undelor de șoc confirmă pe deplin existența proceselor metalurgice la sudarea metalelor prin explozie.

#### 2.5.6. Tabele de calcul și întocmirea diagramelor de lucru

În scopul determinării rapide a mai multor variante și alegerea soluțiilor de eficiență economică s-a recurs la metoda calculului tabelar pentru fiecare tip de sudare prin explozie în funcție de materialele folosite.

În același timp, tabelele de calcul constituie și baza pentru întocmirea fișelor tehnologice de lucru pentru sudarea prin explozie a diferitelor repere.

Tabelele de calcul cuprind rubrici în care se înscriu metalele ce urmează a fi sudate, forma și dimensiunile respective, caracteristicile principale ale metalului de sudat ( $\rho_p, \sigma_e, v_s$ ), ale explozivului ( $\rho_e, v_d$ ) și ale materialului moderator ( $\rho_m, v_t$ ) care intră în calcule, precum și relațiile de calcul ale parametrilor.

Calcululele se efectuează în diferite variante în funcție de valoarea coeficientului K din relația (2.14) sau a presiunii de mandrinare din relația (2.61). Sirul de calcule se termină cu determinarea cantității ( $G_e$ ) și grosimii stratului ( $y$ ) de exploziv ce urmează a fi folosit.

Pentru exemplificare s-au efectuat tabelar calcule pentru sudarea prin explozie a:

- plăcilor așezate înclinat (tabel 2.16);
- plăcilor așezate paralel (tabel 2.17) și a
- țevilor la placă tubulară (tabel 2.18).

Pe baza calcululelor efectuate pentru experimentările din laborator și poligon s-au întocmit următoarele diagrame pentru determinarea rapidă a parametrilor tehnologici ai sudării prin explozie:

Tabel 2.16

Metale de sudat : Am 63 ( 1/2 A ) - OLC 45						
Formă , dimensiuni : placă 70x180 x3,2 mm			L · b = 126 cm <sup>3</sup>		V = 40 3 cm <sup>3</sup>	
Caracteristicile metalului de sudat			$\sigma_c = 186 \cdot 10^6$ [N./m <sup>2</sup> ]			
$\rho_p = 834 \cdot 10^3$ [kg / m <sup>3</sup> ]		$V_s = 3460$ [m / s]				
Exploziv : P.R. $\rho_e = 1,5$ [g / cm <sup>3</sup> ]		$V_d = 7065$ [m / s]		Detonator electronic sau capse nr. 8		
$A = \rho_p^{-1} = 12 \cdot 10^{-7}$ [m <sup>3</sup> /kg]			$B = \sigma / V_s = 53757$ [kg / m <sup>2</sup> s]			
A · B		6,4				
K	-	20	30	40	50	60
$V_m = K \cdot A \cdot B$	m / s	128	192	256	320	384
$\sin \varphi = V_m / V_s$	-	0,03700	0,05549	0,07399	0,09248	0,11098
$\varphi$	° , '	2° 10'	3° 10'	4° 15'	5° 20'	6° 20'
$\text{tg} \beta = V_m / V_d$	-	0,01812	0,02717	0,03623	0,04529	0,05435
$\beta$	° , '	1° 02'	1° 33'	2° 05'	2° 35'	3° 00'
$\alpha = \varphi - \beta$	0'	1° 08'	1° 57'	2° 10'	2° 45'	3° 20'
$C = \sin \beta / \sin \varphi$	-	0,489				
$V_p = C \cdot V_d$	m / s	3455				
$V_p - V_s$	m / s	-5				
$p = 0,5 \rho_p V_d V_m$	daNcm <sup>2</sup>					
$F = \frac{V_m}{0,289 V_d - 0,5 V_m}$	-	0,065	0,099	0,134	0,170	0,207
$G_{eu} = F \cdot \rho_p$	gr / cm <sup>3</sup> Am	0,542	0,826	1,117	1,418	1,726
$G_e = G_{eu} V$	g	21,8	33,3	45,0	57,1	69,6
$V_e = G_e / \rho_e$	cm <sup>3</sup>	15,4	23,4	31,7	40,2	49,0
$Y = V_e / A$	mm	1,2	1,9	2,5	3,2	3,9



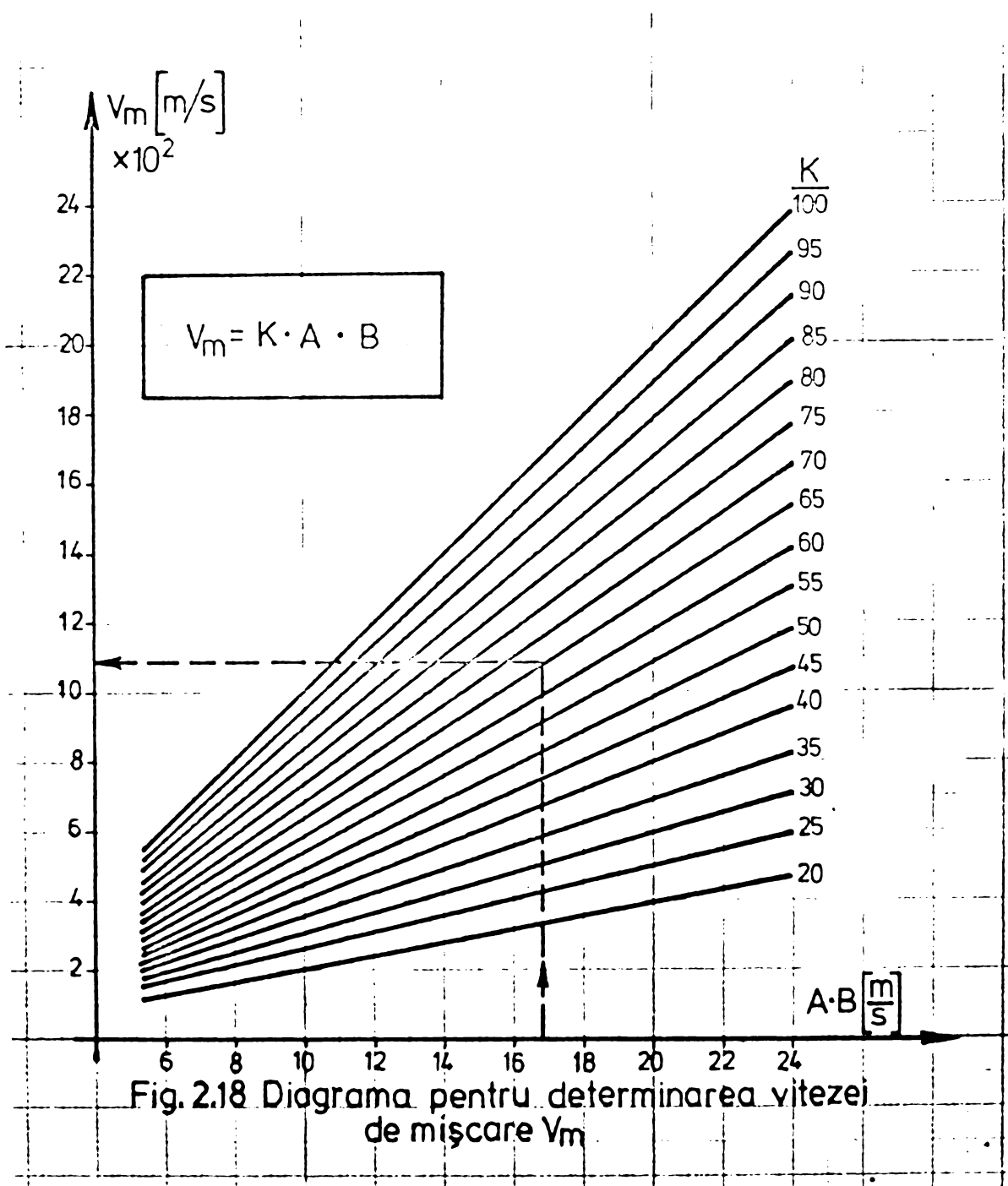
Tabel.217

Metale de sudat: Al.99 5 1/2t -STAS 7607-72/OL 37-STAS 500/1 -68						
Poziția plăcilor: paralel	Dimensiuni:		L · b = 200 cm <sup>2</sup>			
	L = 200; b = 100; h = 16 mm;		V = 100 cm <sup>3</sup>			
Caracteristicile metalului de sudat:						
$\sigma_c = 910$	$\delta_p = 270 \cdot 10^{-5}$ [daN · cm <sup>-3</sup> ]		$V_s = 51 \cdot 10^4$ [cm · s <sup>-1</sup> ]			
Exploziv: E. P - S. Detonator: electronic	$\delta_e = 120 \cdot 10^{-5}$ [daN cm <sup>-3</sup> ]		$V_d = 49 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]			
Moderator: opanal.	$\delta_t = 112 \cdot 10^{-5}$ [daN cm <sup>-3</sup> ]		$V_t = 11 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]			
$A = 370370$ [cm <sup>4</sup> · daN <sup>-1</sup> · s <sup>-2</sup> ]	$B = 1784 \cdot 10^{-6}$ [daN · s <sup>-1</sup> · cm <sup>-3</sup> ]		$C = 3942 \cdot 10^{-12}$ [daN · s <sup>2</sup> · cm <sup>-4</sup> ]			
A · B	cm · s <sup>-1</sup>	661				
K	-	20	40	60	80	100
$V_m = K \cdot A \cdot B$	cm · s <sup>-1</sup>	13 220	26 440	39 660	52 880	66 100
$\sin \varphi = V_m / V_d$	-	0,02698	0,05396	0,08094	0,10792	0,13490
$\varphi$	0'	1 - 33	3 - 05	4 - 38	6 - 12	7 - 45
A · C	-	0,001 · 293				
$X = 3h K \cdot A \cdot C$	m · m	1,24	2,48	3,72	4,97	6,21
$p = 0,5 V_m V_s \delta_p / g$	daNcm <sup>-2</sup>					
$C_K$	-	2,92	1,46	0,98	0,74	0,59
tg $\varphi$	-	0,02706	0,05404	0,08104	0,10863	0,13609
$F = \frac{C_K \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,143	0,151	0,160	0,171	0,182
$G_e = F \cdot V \cdot \rho_p$	g	123,6	130,5	134,3	147,7	157,3
$V_e = G_e / \delta_e$	cm <sup>3</sup>	103,0	108,75	119,42	123,08	131,08
$Y = V_e / L \cdot b$	mm	5,2	5,4	6,0	6,2	6,6
$G_{eu} = G_e / V$	g/cm <sup>3</sup> Al	0,386	0,408	0,420	0,420	0,492

Tabela 2.18

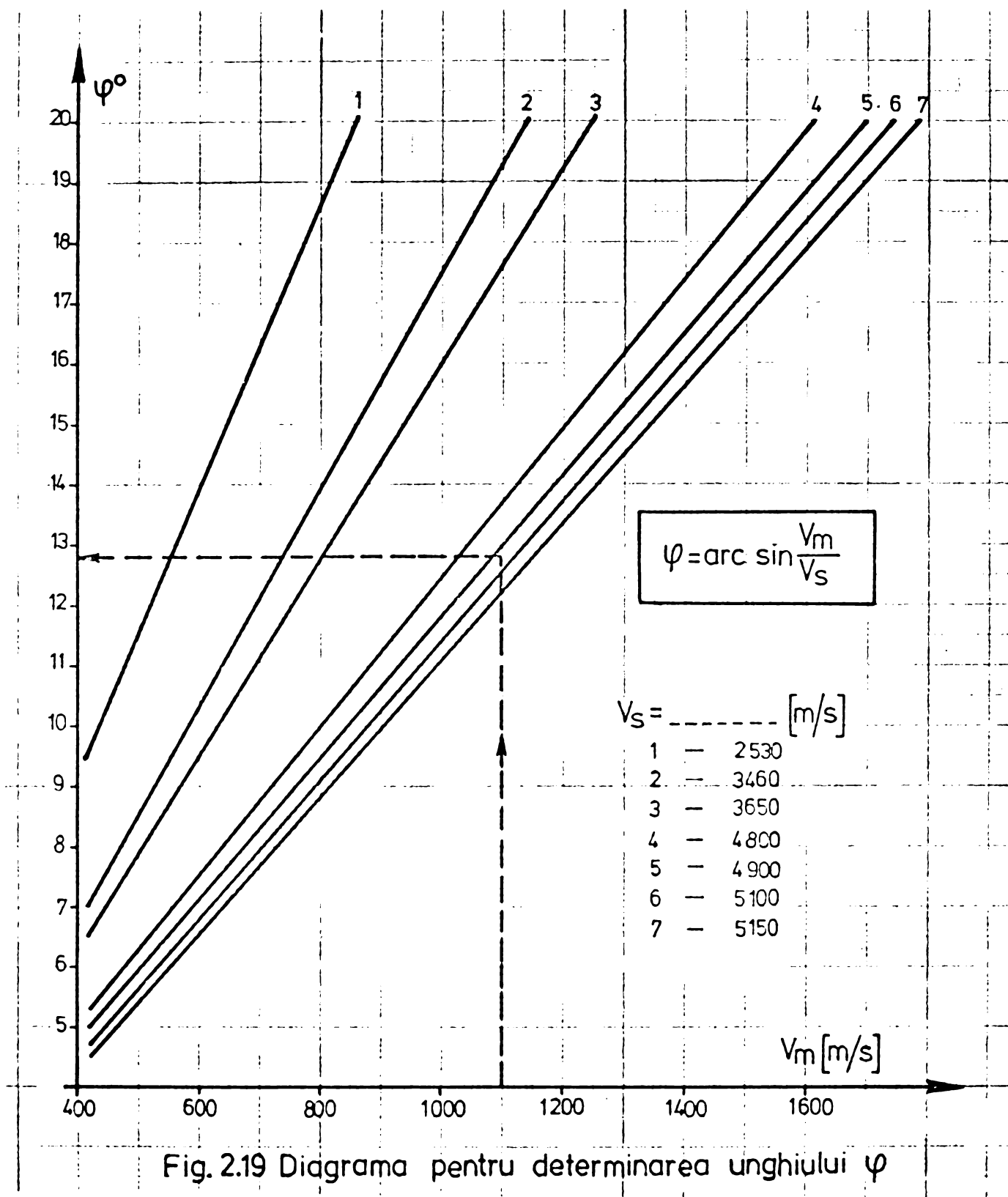
Metale de sudat: Oțel 10 NC 180 / oțel OL 37.3K						
Forma, dimensiuni: Țeavă $De=19\text{mm}$ ; $Dm=18\text{mm}$ ; $s=1\text{mm}$ ; $h=3\text{mm}$ ; $H=17\text{mm}$ .						
Caracteristicile metalului de sudat:						
$\sigma_c = 1960$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}\right]$	$\gamma_p = 775 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^3}\right]$	$V_s = 490 \cdot 10^3$	$\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	
Exploziv: Compus F Detonator: Capse nr.8		$\gamma_e = 155 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^3}\right]$	$V_d = 70 \cdot 10^4$	$\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	
Tampon:						
$V_t = 75900$	$\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	$A = \frac{g}{\gamma_p} = 126 \cdot 10^3$	$\left[\frac{\text{cm}^4}{\text{daNs}^2}\right]$	$B = \frac{\sigma_c}{V_s} = 400 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{\text{daNs}}{\text{cm}^3}\right]$	
$A \cdot B$	$\text{cm/s}$	504				
$K$	—	20	40	60	80	100
$V_m = K \cdot A \cdot B$	$\text{cm/s}$	10080	20160	30240	40320	50400
$\sin \varphi = V_m / V_s$	—	0,02175	0,04350	0,06535	0,08710	0,10885
$\varphi$	grad min	1°16'	2°32'	3°48'	5°04'	6°20'
$\text{tg} \beta = V_m / V_d$	—	0,01440	0,02880	0,04320	0,05760	0,07200
$\beta$	grad min	0°50'	1°40'	2°30'	3°20'	4°10'
$\alpha = \varphi - \beta$	grad min	0°26'	0°52'	1°18'	1°44'	2°10'
$\sin \beta$	s/cm	0,01454	0,02908	0,04362	0,05814	0,07266
$C = \sin \beta / \sin \varphi$	s/cm	0,668	0,667	0,665	0,663	0,661
$V_p = C \cdot V_d$	$\text{cm/s}$	467600	466900	465500	464100	462700
$V_p \leq V_s$	$\text{cm/s}$	-22400	-23100	-24500	-25900	-27300
$p = 0,5 V_m V_s \gamma_p / g$	$\text{daN/cm}^2$	21980	43960	65940	87920	109900
$F = \frac{V_m}{0,289 V_d - 0,5 V_m}$	—	0,056	0,115	0,178	0,244	0,316
$V = \pi \cdot s \cdot D_m \cdot H$	$\text{cm}^3$	0,961				
$G_e = \gamma_p \cdot V \cdot D$	gr	0,42	0,86	1,33	1,82	2,35
$V_e = G_e / \gamma_e$	$\text{cm}^3$	0,271	0,555	0,878	1,174	1,516
$d = 1,13 (V_e / H)^{0,5}$	mm	4,5	6,4	8,1	9,4	10,7

- diagrama 2.18 pentru determinarea vitezei de mișcare  $V_m = f(K, \delta, \sigma_e, V_g)$  cu relația (2.14);
- diagrama 2.19 pentru determinarea unghiului  $\varphi = f(V_m, V_g)$  cu relația (2.15);
- diagrama 2.20 pentru determinarea unghiului  $\beta = f(V_m, V_d)$  cu relația (2.16);
- diagrama 2.21 pentru determinarea vitezei de sudare  $V_p = f(\beta, \varphi, V_d)$  pe baza relației (1.40);
- diagrama 2.22 pentru determinarea cantității de exploziv  $G_e = f(F, V, \rho_p)$  pe baza relației (2.25).



Pentru determinarea grafică a vitezei de mișcare  $V_m$  se iau pentru metalul de sudat valorile A și B din tabelul 2.12 și se înmulțesc. Valoarea respectivă este căutată pe abscisa diagre-

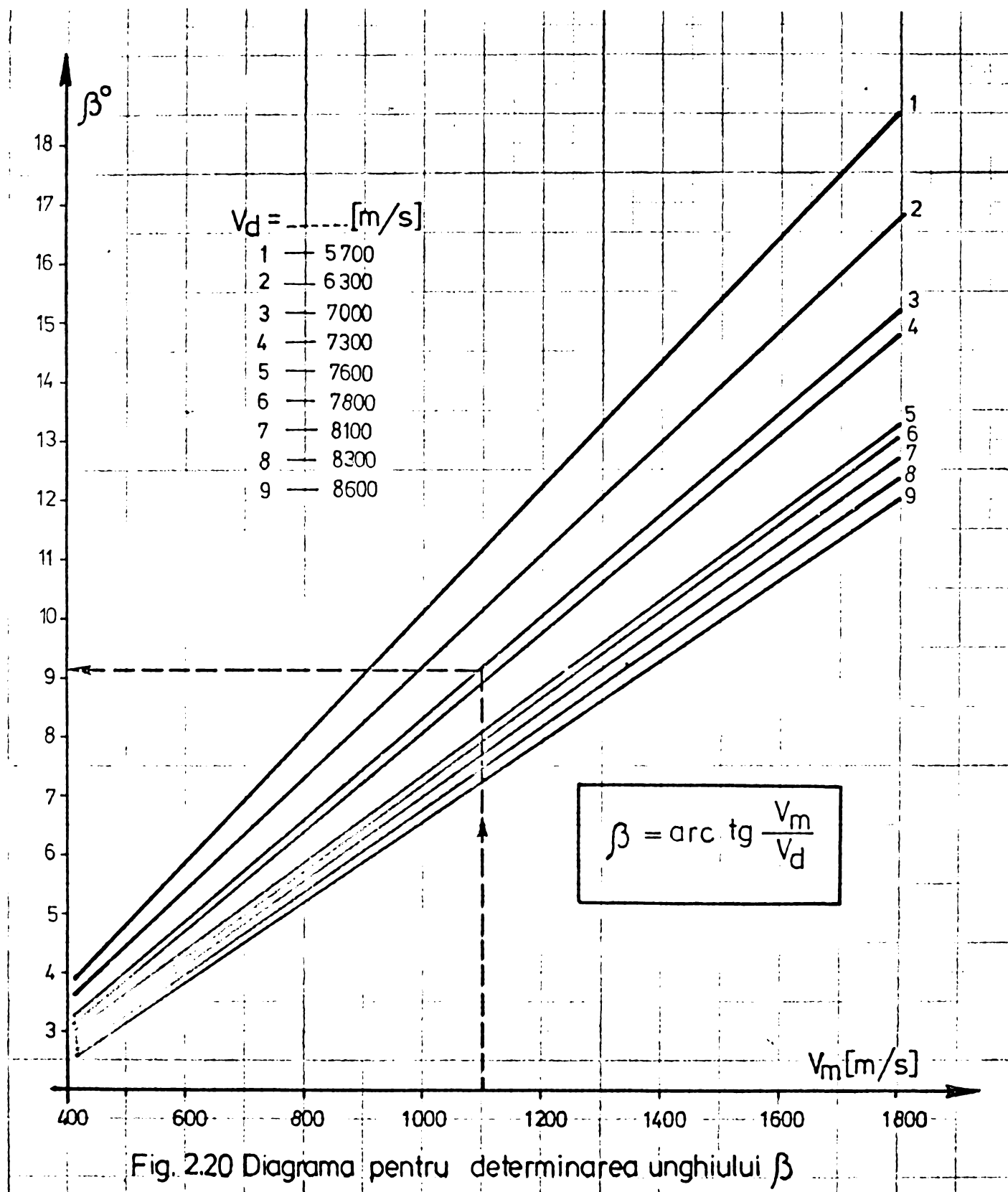
mei 2.18 din care se urcă pe verticală pînă se întâlnește dreapta corespunzătoare lui K ales și se citește pe ordonată valoarea vitezei de mișcare  $V_m$ .



Cu această valoare se operează în același mod diagrama 2.19 și în funcție de viteză sunetului în metalul de sudat se obține mărimea unghiului  $\varphi$ .

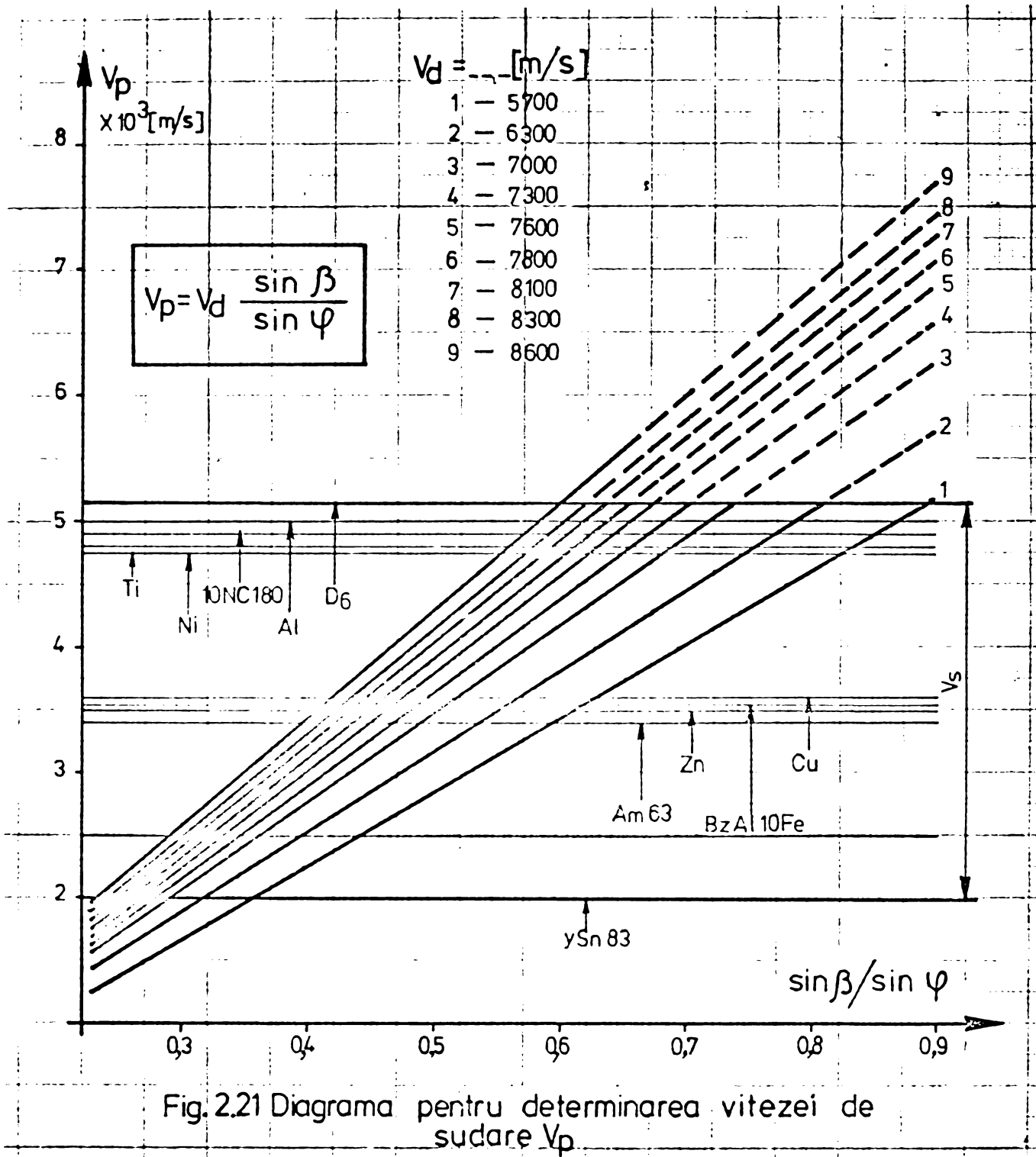
În mod asemănător, pentru aceeași valoare a vitezei de mișcare  $V_m$ , în funcție de viteză de detonație a explozivului

ce urmează a fi folosit se obține mărimea unghiului  $\beta$  din diagrama 2.20. Din diferența celor două unghiuri se obține unghiul inițial de înclinare a plăcilor,  $\alpha$ .



În continuare, se calculează raportul  $\sin \beta / \sin \varphi$  și în funcție de viteza de detonatie  $V_d$  se determină din diagrama 2.21 viteza de sudare  $V_p$  care pentru metalul plăcii de sudat trebuie să fie mai mică (sub linia paralelă cu abscisa) decât viteza sunetului în metalul respectiv. Dacă diferența celor două

viteze este pozitivă se impune aplicarea unui strat moderat din material plastic între stratul de exploziv și placa de sudat.



După aceste, se calculează mărimea raportului  $F$  și a volumului plăcii de sudat și în funcție de valoarea produsului lor și a densității metalului de sudat se operează în diagrama 2.22, aflându-se cantitatea de exploziv necesară pentru o placă.

În același timp, diagramele trasate pot fi folosite pentru analiza parametrilor de lucru ai sudării prin explozie.

In acest sens, din analiza diagramei 2.18 rezultă că pentru metalele și aliajele folosite la experimentări, viteza de mișcare  $V_m$  este maximum  $2400 \text{ ms}^{-1}$  pentru  $K = 100$  (presiunea de sudare mai mare de 50 ori decât limita de curgere a metalului plăcii de sudat).

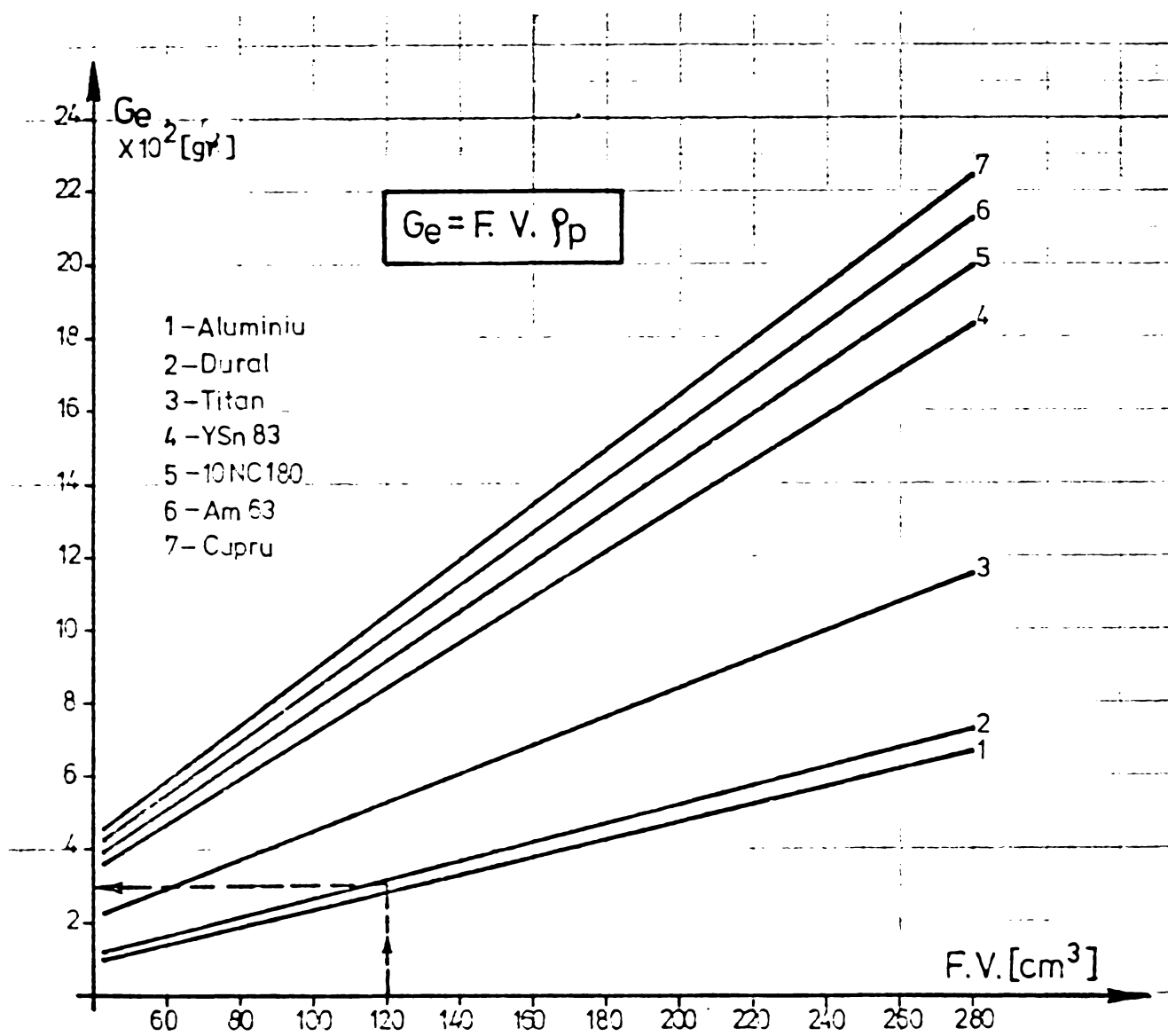


Fig. 2.22 Diagrama pentru calculul cantității de exploziv  $G_e$  la sudarea plăcilor înclinate

Din diagramele 2.19 și 2.20 rezultă că unghiurile  $\varphi$  și  $\beta$  au valori pînă la  $18^\circ \dots 20^\circ$  iar unghiul  $\alpha$  va avea valori sub  $15^\circ$ .

Diagrama 2.22, pentru scopuri industriale trebuie lărgită pentru dimensiunile pieselor ce urmează a fi sudate.

## 2.6. Echipamente folosite la sudarea prin explozie

Comparativ cu alte procedee de sudare, echipamentele pentru sudarea prin explozie sînt în general mai simple și mai ușor de executat.

Pentru experimentările efectuate în laborator și în poligon s-au utilizat platforme și dispozitive, instalații experimentale pentru sudarea prin explozie în aer și instalații experimentale pentru sudarea prin explozie în vid.

### 2.6.1. Platforme și dispozitive

Pentru executarea sudării prin explozie la scară redusă în scopul verificării parametrilor de lucru calculați, s-au folosit platforme simple prevăzute cu dispozitive de fixare a plăcii de bază.

Platforma de lucru - fig.2.23 - se compune dintr-o placă de oțel (OL 37) cu o grosime de 40...70 mm, lată de 300...400 mm și lungă de 400...500 mm(1). La un capăt se fixează prin șuruburi sau sudură, o plăcuță de sprijin și legarea conductorilor electrici pentru detonarea explozivului (2).

Pe părțile laterale se fac găuri filetate pentru fixarea barelor de prindere a plăcii de bază (3). Găurile din barele de prindere permit deplasarea acestora în funcție de lățimea plăcii de bază.

Pentru manevrare, platforma este prevăzută cu minere sudate pe părțile laterale (4).

Placa de bază se fixează pe platforma de lucru cu ajutorul barelor care se apasă pe placa de bază și se strîng cu șuruburi.

După fixarea plăcii de bază, se așează peste aceasta placa de sudat și se leagă conductorii electrici pentru detonator.

În caz că placa de sudat este mai îngustă decît placa de bază, aceasta se fixează pe platformă cu ajutorul unor cleme cu șuruburi.

Barele de fixare se construiesc de grosimi diferite în așa fel ca prin combinarea lor să se obțină o grosime egală cu a plăcii de bază peste care se așează placa de sudat. Clemele se vor fixa cu șuruburi în găurile practicate în platforma metalică.



Platforma se așează direct pe pământ sau pe un bloc de beton armat. De asemenea, platforma de lucru se poate așeza pe un banc de lemn sau metalic.

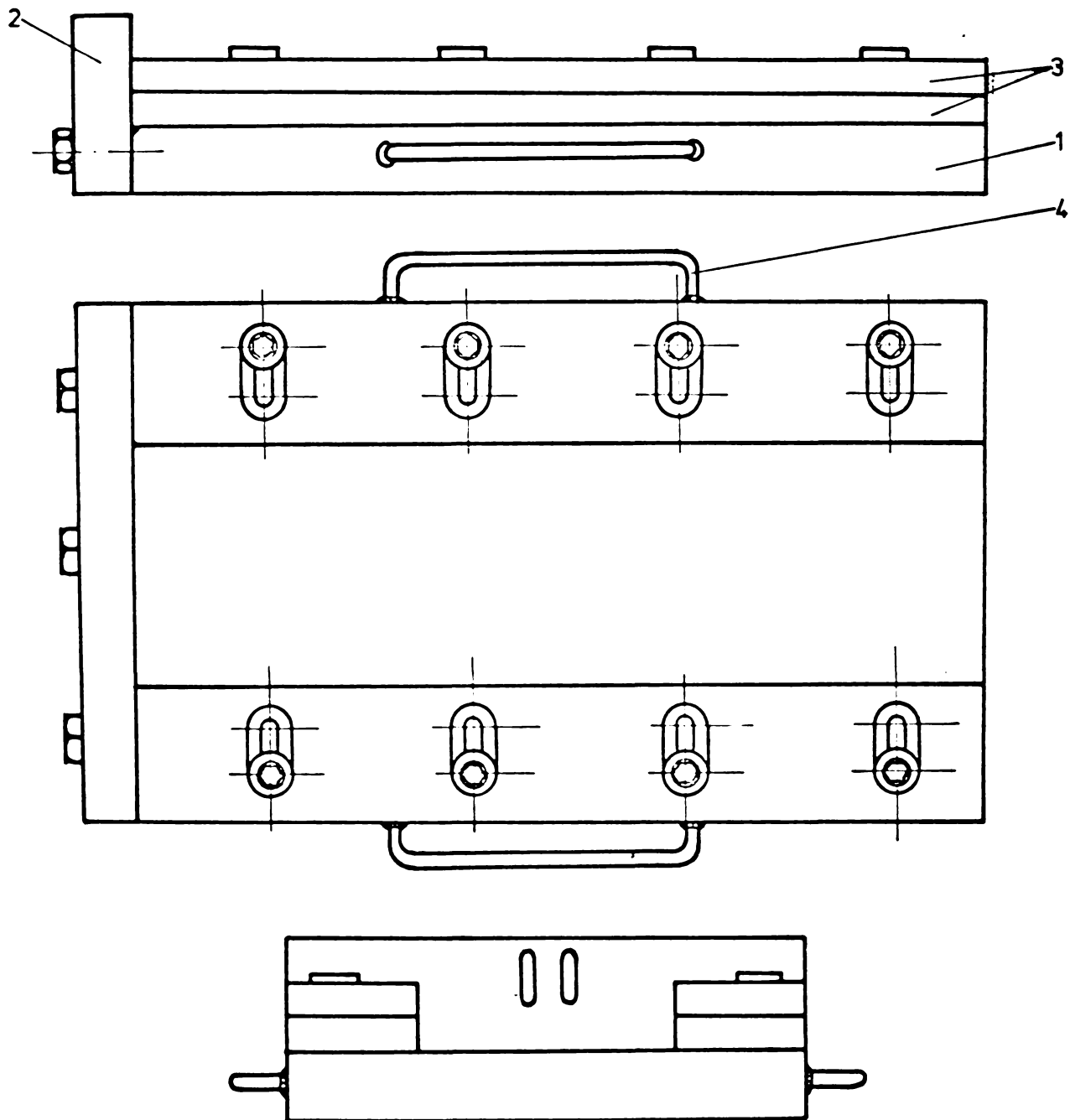


Fig.2.23 Platforma de lucru

### 2.6.2. Instalație experimentală pentru sudarea prin explozie în aer

În scopul efectuării experimentărilor la scară normală precum și pentru a stabili și stabili componente și dimensiunile echipamentelor de sudare în vederea aplicării industriale, s-a proiectat și construit o instalație experimentală pentru sudarea prin explozie în aer.

Instalația se compune din:

- platforma tunel;
- dispozitiv pentru laminarea foliilor de exploziv;
- detonator electric;
- panouri de protecție;
- banc de lucru;
- trusă cu scule.

#### 2.6.2.1. Platforma tunel

Platforma tunel (fig.2.24) se compune din placa de bază (1) de care se sudează acoperișul (2). Pe placa de bază se sudează două lonjeroane cu locașe (3), pe care se fixează cu șuruburi benzile (4). Prin locașe se deplasează masa de lucru (5) care se blochează cu dispozitivul (6).

Pe masa de lucru se fac găuri filetate pentru fixarea barelor de prindere a pieselor de sudat.

Platforma tunel (placa de bază și acoperișul) se construiesc din tablă de oțel OL 37...42, iar masa de lucru din OLC 35...65.

Platforma tunel se fixează pe un bloc de beton armat. Pentru amortizarea șocurilor între platformă și bloc se pun foi de cauciuc.

Dimensiunile platformei oferă posibilitatea de a suda prin explozie plăci de 300 x 800 mm cu 1,5...2 kg.exploziv.

#### 2.6.2.2. Dispozitivul de laminarea foliilor de exploziv

Deoarece stratul de exploziv trebuie să aibă grosimea rezultată din calcule și verificată prin încercări, s-a construit un dispozitiv pentru laminarea foliilor de exploziv (fig. 2.25).

Dispozitivul este alcătuit din placa de bază (1) pe laturile căreia se fixează cu șuruburi două plăci (2) prevăzute cu canale longitudinale pe care se rostogolește prin împingere ruloul (3). Intre plăcile laterale se fixează cu șuruburi placa de laminat (4). Placa se sprijină pe trei șuruburi de calare (5) cu ajutorul cărora se reglează distanța dintre rulou și placa de laminat (grosimea foliei de exploziv).

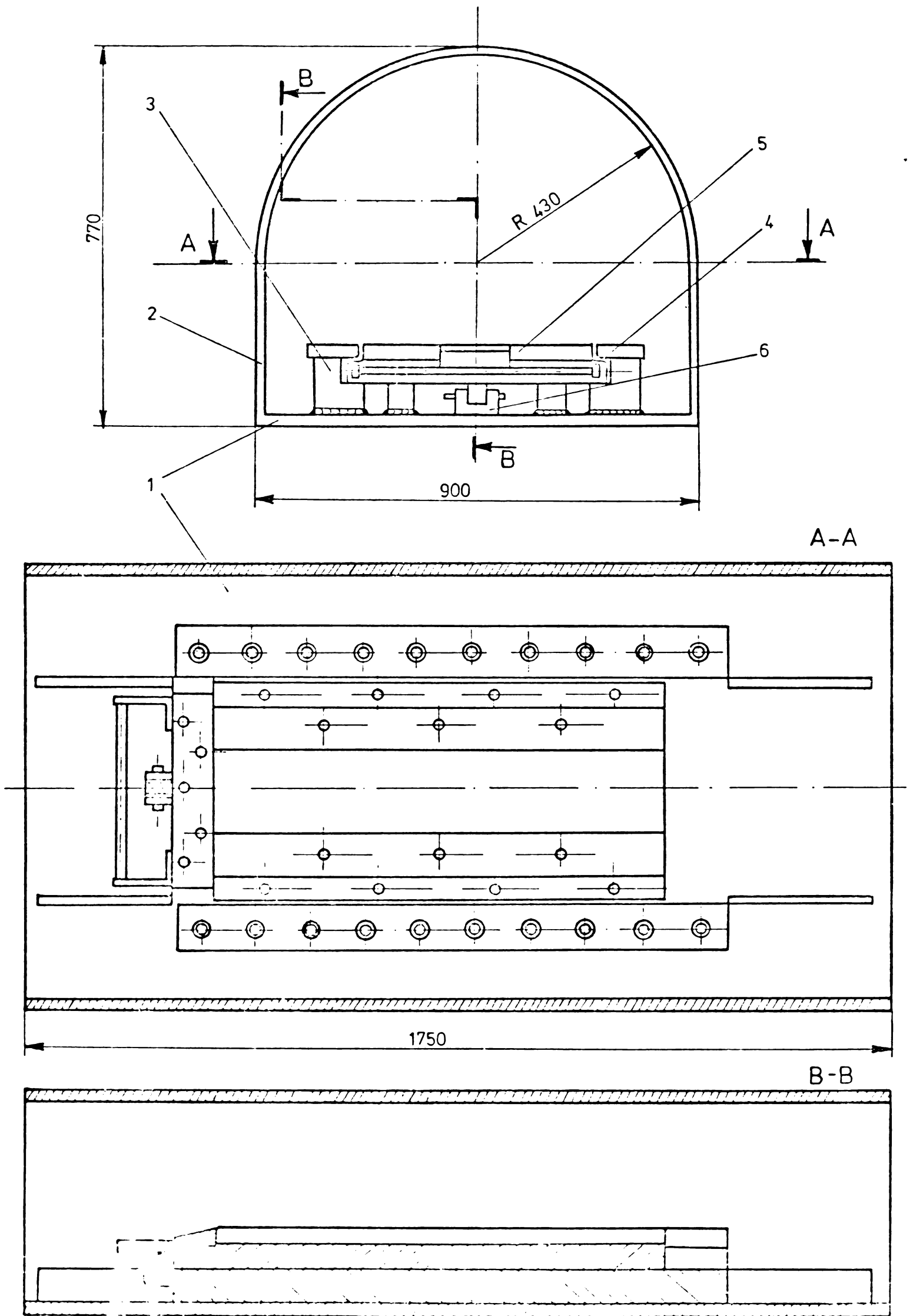


Fig 2.24 Platforma tunel pentru sudarea prin explozie

Atît ruloul cît și placa de laminat vor fi tratate termic (HRC 40...52) și bine lustruite. Dispozitivul se va construi din oțel OLC 35...65.

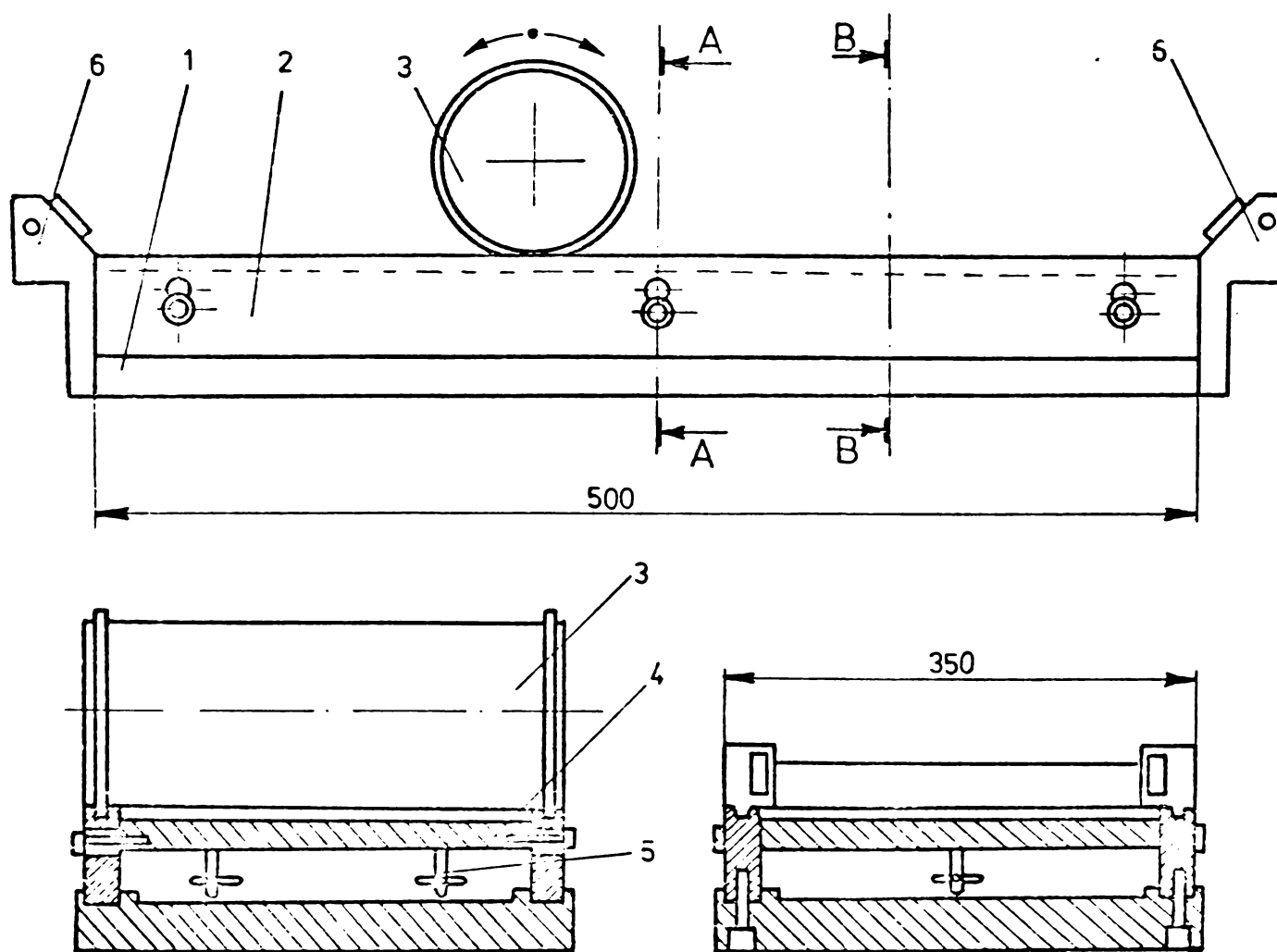


Fig.2.25 Dispozitiv pentru laminarea foliilor de exploziv

### 2.6.2.3. Detonatorul electric

Din cauză că la sudarea prin explozie, grosimea foliei de exploziv este de 1...4 mm, capsele detonante sînt destul de puternice și produc deformări importante și pierderi din materialele de sudat. La acestea trebuie să se adauge și grija deosebită cu care trebuie să se manipuleze. Pentru eliminarea acestor neajunsuri, s-a recurs la conceperea, proiectarea și construcția unui detonator electric (fig.2.26).

Detonatorul electric realizat de autor - în colaborare - este de fapt un generator de impulsuri de înaltă tensiune

( $U_1 = 30 \text{ kV}$ ;  $Q = 0,3 \text{ J}$ ;  $t_1 = 50 \mu\text{s}$ ;  $t_r \approx 0,3 \text{ s}$ ) alimentat de la rețea 220 V, 50 Hz).

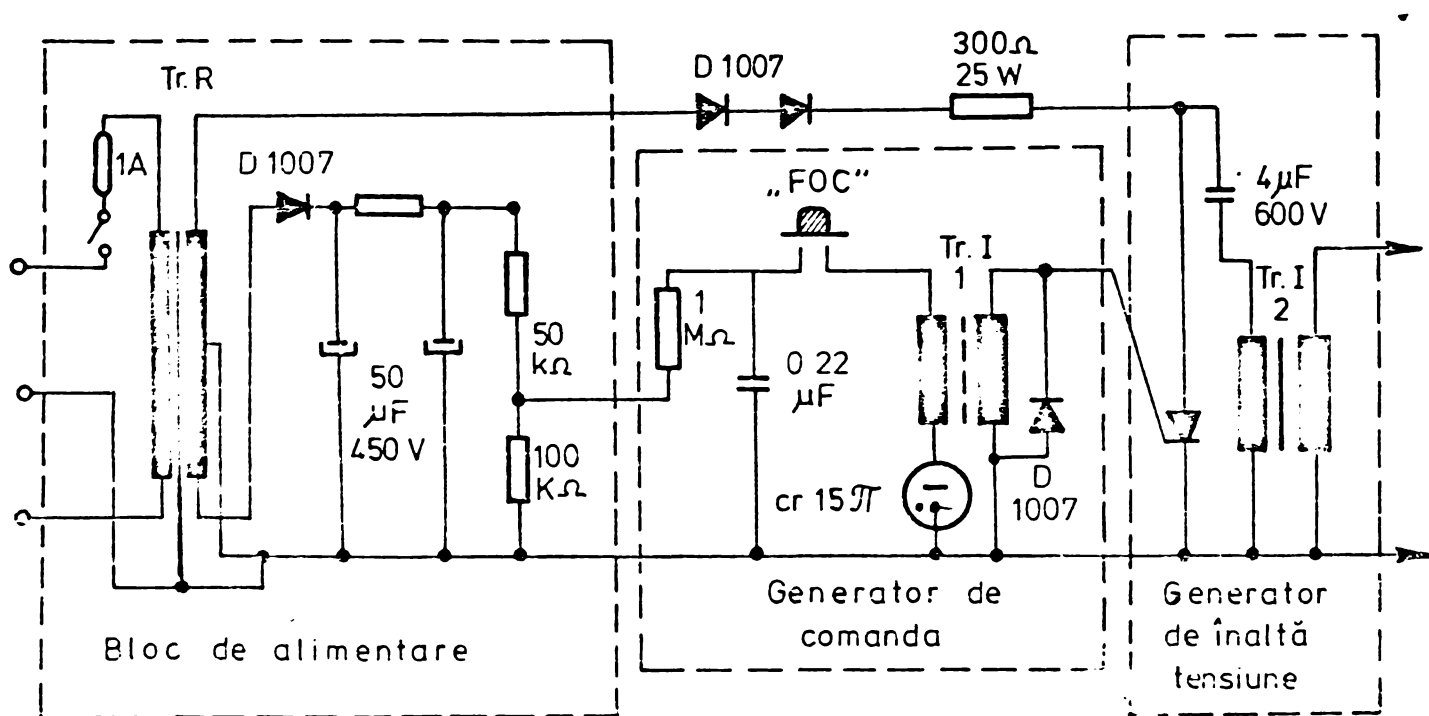


Fig.2.26 Schema de principiu a detonatorului electric

Schema bloc cuprinde:

- blocul de alimentare;
- generatorul de comandă (de tact);
- generatorul de înaltă tensiune în impulsuri.

Blocul de alimentare, după conectare la rețea, debitează două ieșiri:

- prima, filtrată, cu o schemă  $\pi$  și o tensiune de ieșire continuă de cca 400 V, pentru generatorul de comandă;
- a doua, nefiltrată, avînd un redresor cu o rezistență de limitare de  $300 \Omega$ , destinată să încarce condensatorul de acumulare de  $4 \mu\text{F}$ .

Generatorul de comandă este o schemă de relaxare echipată cu stabilizatorul  $CT 15T$  și circuitul de temporizare  $t_r \approx 0,5 \text{ s}$ . Generatorul de comandă funcționează (generează) doar cînd este cuplat butonul "FOC".

Generatorul de înaltă tensiune în impulsuri se compune din:

- un element de acumulare (condensatorul  $C = 4 \mu\text{F}/600 \text{ V}$ ;

- o bobină de inducție cu raportul de transformare de cca 100 ridicător;

- un contactor destinat să desearce energia acumulată în condensator prin primarul bobinei de inducție.

Generatorul este capabil să debiteze impulsuri de înaltă tensiune de 30 kV;  $t_1 = 50 \mu\text{s}$ ;  $t_r \approx 0,3 \text{ s}$ ;  $Q = 0,32 \text{ J}$ .

Detonatorul electric poate să producă descărcări electrice cu lungimi ale arcului între 5 și 25 mm în aer uscat.

Constructiv, detonatorul este realizat într-o casetă metalică, protejat împotriva atingerilor accidentale a electrodului de înaltă tensiune. Pentru comanda de la distanță, detonatorul este prevăzut cu o serie de borne pentru cuplarea legăturilor. În acest scop, cablurile coaxiale se conectează la bornele detonatorului iar capetele libere la electrozii fixați izolat la masa de lucru a platformei tunel.

#### 2.6.2.4. Panouri de protecție

Pentru asigurarea măsurilor de tehnica securității muncii, în lungul platformei tunel de o parte și alta se montează panouri de protecție confecționate din table de oțel groase de 10...20 mm. Dimensiunile lor vor fi de 1500 x 2500 mm. Panourile vor fi prevăzute cu picioare - din țevă - care se fixează în blocuri de beton îngropate.

O protecție foarte bună se asigură prin montarea platformei tunel într-un adăpost ( $L = 4000 \text{ mm}$ ,  $B = 3000 \text{ mm}$  și  $H = 1500 \text{ mm}$ ) săpat în teren avînd pereții protejați cu plăci de beton. Fundul adăpostului se pavează cu plăci de beton ce înconjoară blocul de beton armat. Pe o parte laterală se vor săpa trepte pentru accesul ușor în și din adăpost.

#### 2.6.3. Instalația experimentală de laborator pentru sudarea prin explozie în vid

Din studiul proceselor termice și metalurgice ce au loc la sudarea prin explozie în aer liber a rezultat că în îmbinare pot să apară unele defecte, în special la plăcile subțiri și la aliajele metalice ce au nevoie de o atmosferă inertă. Utilizarea unor camere de vid cu posibilități de efectuare a operațiilor procesului de sudare dă rezultate mult mai bune. Această situație a fost remarcată și de W. Johnson și P. Travis [69] și

confirmate de W.Gilde [45] și L.Zernow [116].

Pentru satisfacerea acestor cerințe s-a adoptat această soluție și în colaborare [60] s-a proiectat și realizat o instalație experimentală de laborator pentru sudarea prin explozie în vid.

Schema de principiu a instalației (fig.2.27) include:

- o cameră de vid;
- sistemul de vidare;
- sistemul de măsurarea vidului;
- sistemul de sudare prin explozie;
- sistemul de curățire a camerei vid.

Constructiv, instalația experimentală de laborator pentru sudarea prin explozie în vid (fig.2.30) se compune din:

- camera de vid;
- pompa de vid secundar;
- căruciorul cu aparate și accesorii.

#### 2.6.3.1. Camera de vid

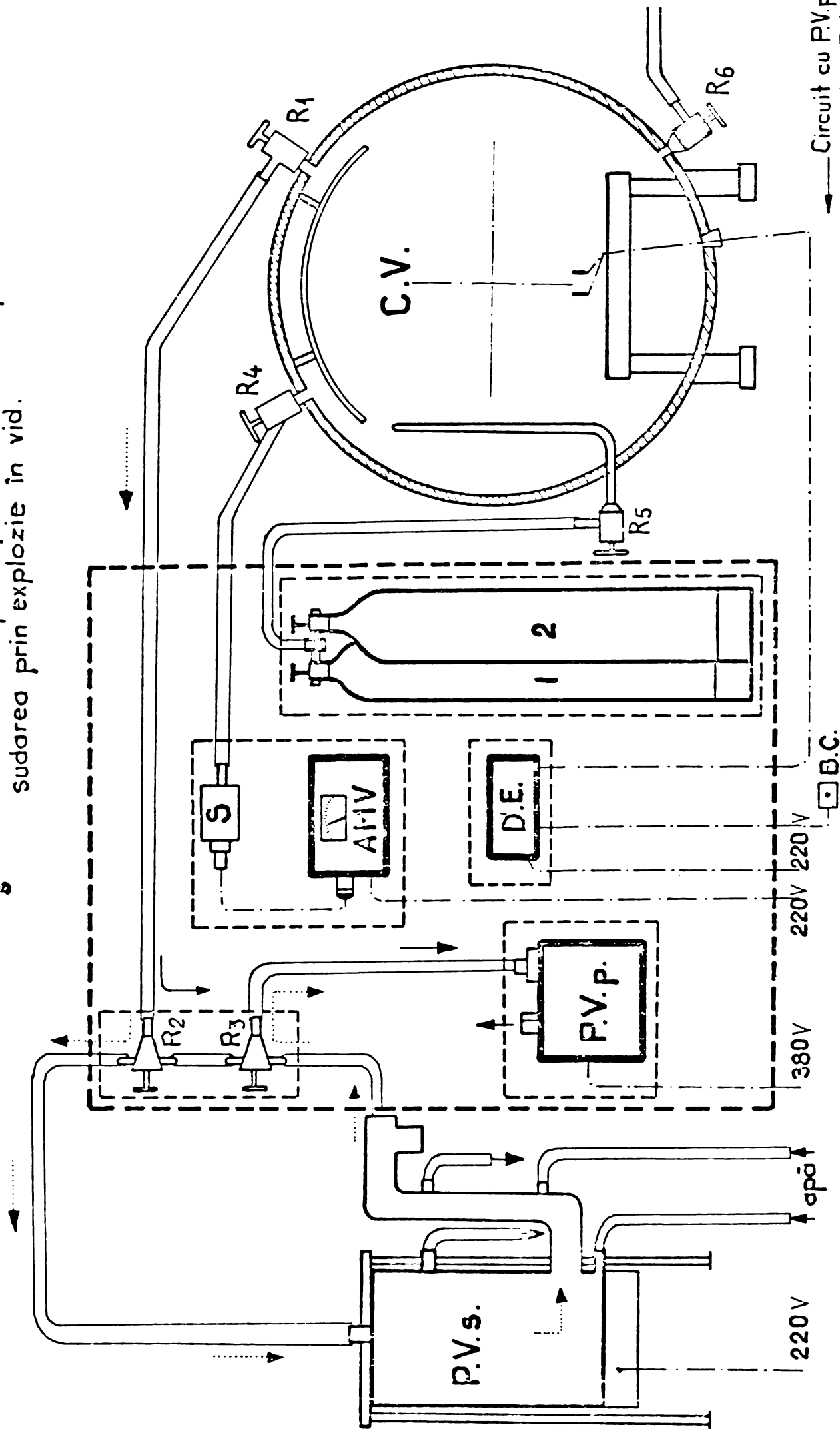
Camera de vid (fig.2.28) este un recipient cilindric cu flanșă (2) la care se fixează cu șuruburi fundurile. Camera de vid se sprijină pe un suport din oțel profilat (fig.2.29). Fundul frontal are o ușă de vizitare (3). În interior pe partea superioară se fixează un ecran de protecție (4) iar pe partea inferioară se fixează masa de lucru (5). Masa de lucru se construiește în mod asemănător cu platforma de lucru (fig.2.23).

În partea superioară a camerei de vid (în zona ecranului de protecție se fac găuri filetate (6) pentru fixarea robinetilor pentru conductele de vid. În partea inferioară se fac trei găuri la care se sudează trei ștuțuri filetate (7). Un ștuț, la care se montează un robinet pentru recipientii de aer, azot sau argon, se continuă la interior cu o țevă. La al doilea ștuț se montează robinetul pentru evacuarea gazelor de explozie. Al treilea ștuț filetat cu piuliță și dop de cauciuc servește pentru trecerea conductorilor electrici.

Camera de vid construită din tablă de oțel OL 37-2 K STAS 500/2-68 cu grosimea de 10 mm are următoarele caracteristici:

- diametrul interior.....1150 mm;
- lungimea.....1300 mm;

Fig. 2.27 Schema de principiu a instalației pentru sudarea prin explozie în vid.



- C.V. - camera de vid
- S - sondă de vid
- AMV - aparat de măsurarea vidului
- R1,2 - robineti de vid
- P.V.P. - pompă de vid primar
- P.V.S. - pompă de vid secundar
- D.E. - detonator electric
- 1,2 - recipienti aer, argon, a 20t
- B.C. - Buton comandă
- Circuit cu P.V.P.
- - - - - Circuit cu P.V.P.+P.V.S.



- grosimea fundurilor..... 15 mm;
- volumul de lucru..... $1,225 \text{ m}^3$
- presiunea de vidare..... $10^{-2} \dots 5 \text{ torr}$ ;
- presiunea interioară după detona-  
res explozivului..... $(0,58 \dots 296) \cdot 10^{-3}$   
 $\text{daN} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;
- timpul de vidare..... $10 \dots 15 \text{ min.}$

Fundurile camerei de vid precum și ușa de vizitare se etanșează cu garnituri de cauciuc. Ușa de vizitare se prinde de fundul frontal cu ajutorul a șase șuruburi mobile cu piulițe cu mâner de strângere.

#### 2.6.3.2. Sistemul de vidare

Sistemul de vidare al instalației de vid se compune din:

- pompa rotativă pentru vidul primar;
- pompa de difuzie cu ulei pentru vidul secundar;
- robineti;
- conducte;

Pompa rotativă de vid se leagă cu camera de vid prin robinetul  $R_1$ , conductă și robinetii cu trei căi  $R_2$  și  $R_3$  poziționați către pompă.

Pompa de vid prin difuzie cu ulei se leagă cu camera de vid prin robinetul  $R_1$  și robinetul  $R_2$  în poziția "deschis". La această pompă, evacuarea făcându-se prin pompa rotativă cu robinetul  $R_3$  în poziția "închis" la pompa secundară.

Conductele sînt din cauciuc cu inserții textile.

#### 2.6.3.3. Sistemul de măsurarea vidului

Măsurarea vidului se face cu ajutorul unui aparat alimentat la rețeaua electrică de 220 V cuplat cu o sondă legată prin intermediul unei conducte și robinetul  $R_4$  la camera de vid,

Gradul de vidare se măsoară de la început atît pentru pompa rotativă cît și pentru pompa cu difuzie.

#### 2.6.3.4. Sistemul de sudare prin explozie

În camera de vid se montează platforma de lucru cu dispozitivele de fixare a pieselor de sudat. Prin ștuțul cu dop de cauciuc se aduc conductorii electrici ce sînt legați la detonatorul electric.

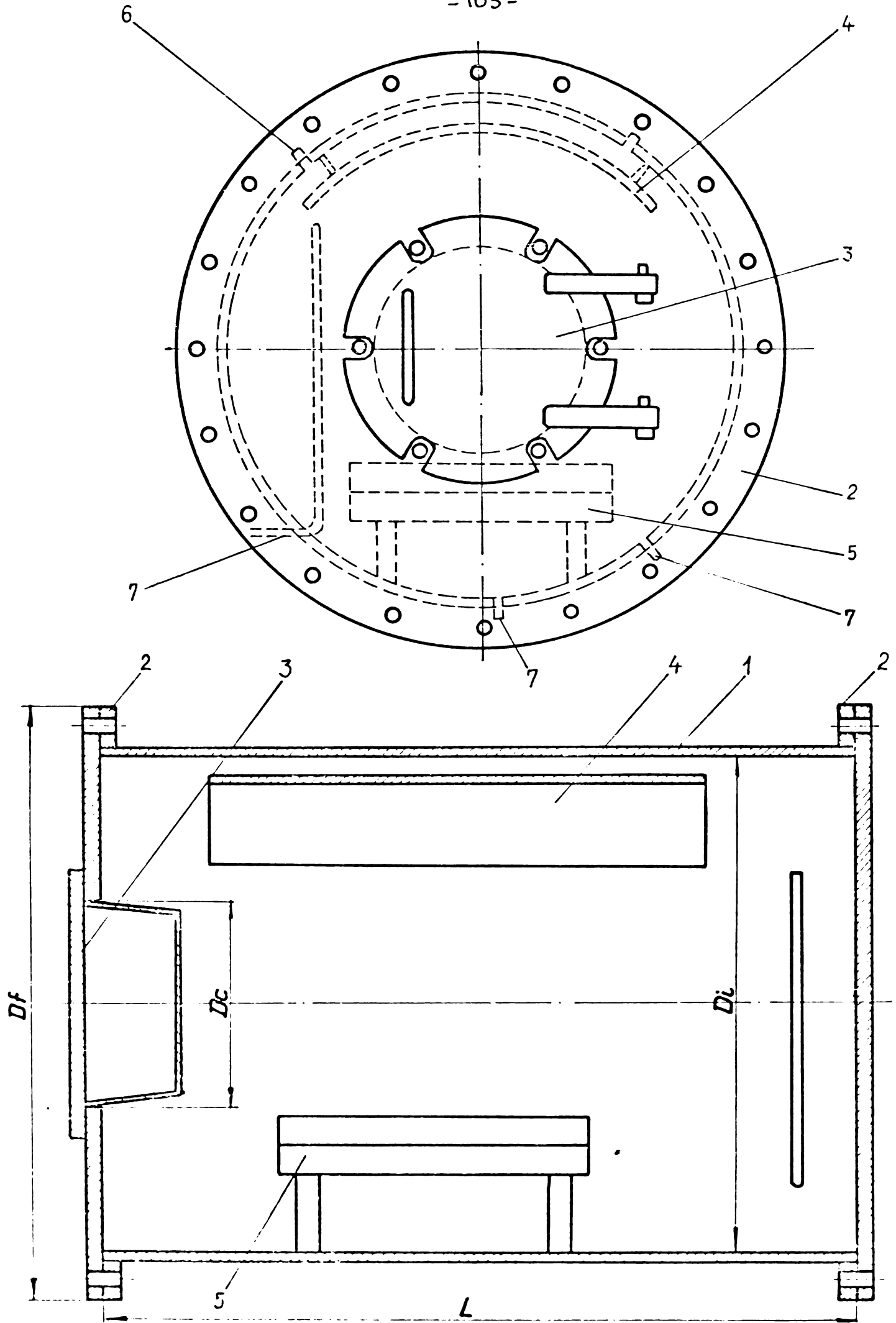


Fig. 2.28 Camera de vid

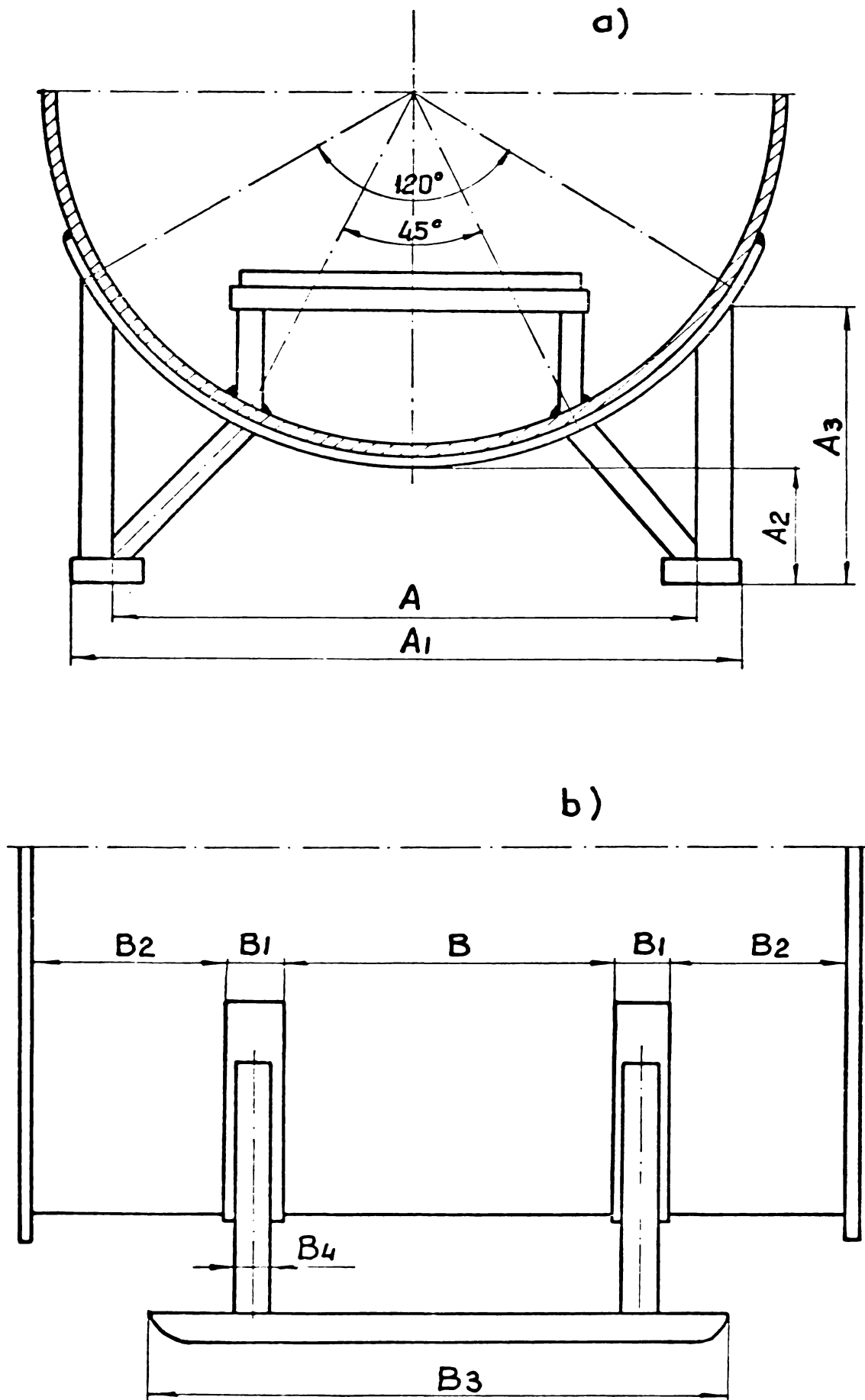


Fig. 2.29 Suportul camerei de vid

INSTITUTUL NAȚIONAL  
DE RECHERȘI ȘI  
DEZVOLTĂRI ȘTIINȚIFICE

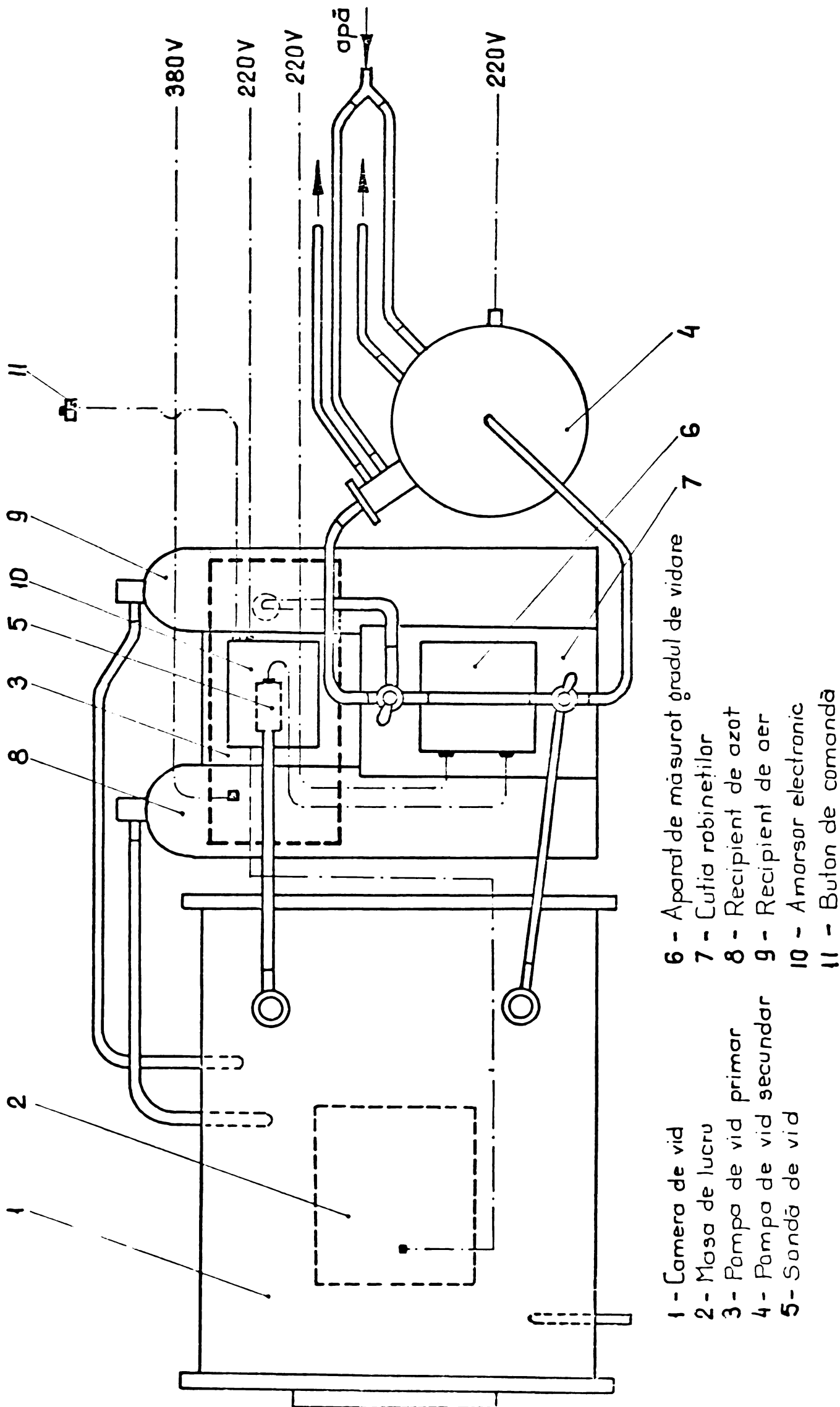


Fig. 2.30 Schema de montare a instalației de vid pentru sudare prin explozie

#### 2.6.3.5. Sistemul de curățire a camerei de vid

Restabilirea presiunii în camera de vid și evacuarea gazelor se face de la recipientii de aer sau azot prin robinetii  $R_5$  și  $R_6$ .

#### 2.6.3.6. Căruciorul cu aparate și accesorii

Pe cărucior se fixează 2 recipiente, pompa de vid primar, robinetii cu trei căi  $R_2$  și  $R_3$ , aparatura de măsurarea vidului, detonatorul electric, accesoriile instalației și sculele necesare pentru montare, demontare și executarea sudării prin explozie (fig.2.3D).

**3. TEHNOLOGII SI METODE DE LUCRU LA SUDAREA  
METALELOR PRIN EXPLOZIE**

- 3.1. Tehnologia sudării prin explozie în aer**
- 3.2. Tehnologia sudării prin explozie în vid**
- 3.3. Tehnologia sudării prin explozie a țevilor  
la placa tubulară**
- 3.4. Tehnologia mandrinării prin explozie a  
țevilor la placa tubulară**

### 3. TEHNOLOGII SI METODE DE LUCRU LA SUDAREA METALELOR PRIN EXPLOZIE

#### 3.1. Tehnologia sudării plăcilor metalice prin explozie în aer

Din experimentările efectuate atât la scară redusă cât și la mărime normală a rezultat că tehnologia sudării plăcilor metalice prin explozie în aer comportă următoarele operațiuni:

- stabilirea geometriei de sudare;
- calculul parametrilor de lucru;
- întocmirea fișei tehnologice pentru pregătirea explozivilor;
- întocmirea fișei tehnologice pentru sudarea prin explozie;
- pregătirea materialelor;
- pregătirea echipamentelor pentru sudare;
- montarea pieselor pentru sudare;
- executarea sudării prin explozie;
- operații ulterioare;
- măsuri de protecția muncii.

##### 3.1.1. Stabilirea geometriei de sudare

Geometria de sudare a plăcilor metalice prin explozie se stabilește în funcție de viteza de detonație a explozivului precum și de eficiența economică. Pentru explozivi cu viteza de detonație mai mică decât viteza sunetului în placa de sudat ( $V_d < V_s$ ) se va alege geometria de sudare cu plăcile paralele (fig.2.1 d). Aceeași geometrie se poate alege și pentru explozivi cu  $V_d > V_s$  însă trebuie să splice peste placa de sudat o cală unghiulară din material plastic (fig.2.1 c) sau peste placa de sudat se așează o placă metalică înclinată cu unghiul inițial (fig.2.1 b), însă aceste geometrii implică cheltuieli în plus. De regulă se alege geometria cu plăcile înclinate cu unghiul (fig.2.1 a).

##### 3.1.2. Calculul parametrilor de lucru

În funcție de geometria de sudare stabilită, se calculează parametrii de lucru conform cap.2.5.2.1 sau 2.5.2.2. În ambele cazuri trebuie să se determine cantitatea de exploziv și grosimea stratului. În cazul plăcilor înclinate trebuie determi-

ACADEMIA MILITARA Catedra de mecanică		Produsul		Desen		Comandă(contract)		
FIȘĂ TEHNOLOGICĂ pregătire încărcături exploziv		Subansamblu		Desen		Dispozitia de lucru Nr. pentru ziua de		
		Fișa de calcul nr.	Tehnolog	Verificat				
Exploziv	Tip			Cantitate pe buc.		Cantitate totală		
Formă, dimensiuni								
N crt.	DENUMIREA OPERAȚIEI		Utilaj		Materiale		Norma de timp	
			Instalații	Dispozitive	Calit.	Cantit.	Preg.	Unitar
CONSUM DE MATERIALE				CONSUM SPECIFIC MANOPERĂ				
Explozivi utilizați		kg	Categorie		TIMP		Remedieri	
Explozivi distrusi		kg	Pregătire		Total			
Piese auxiliare		buc						



nat unghiul inițial de înclinare  $\alpha$  , iar în al doilea caz se calculează distanța X dintre plăcile de sudat.

Calcululele se efectuează tabelar în câteva variante (tabel 2.16 și 2.17).

### 3.1.3. Intocmirea fișei tehnologice pentru pregătirea explozivilor

Pe baza datelor rezultate din calculul parametrilor se întocmește fișa tehnologică pentru pregătirea explozivilor (tabel 3.1). Operațiile de pregătirea foliilor (straturilor) de exploziv se prescriu în funcție de forma în care se găsesc explozivii. Dacă se prezintă în folii de o anumită grosime se prescrie presarea a 2...3 foi și tăierea la lungimea și lățimea plăcii de sudat. Dacă se găsesc în pungi ei se frământă pînă la plasticizare și apoi se lamineză în dispozitivul de laminare (fig.2.25).

### 3.1.4. Intocmirea fișei tehnologice pentru sudarea prin explozie

Fișa tehnologică pentru sudarea prin explozie (tabel 3.2) se întocmește pe baza parametrilor rezultați din calcule și a ordinea cronologică a operațiunilor procesului tehnologic ce urmează a fi efectuate în atelier, poligon și laborator.

În caz că cele trei locuri de lucru sînt separate, se vor întocmi fișe separate pentru fiecare loc de muncă.

### 3.1.5. Pregătirea materialelor

#### 3.1.5.1. Pregătirea plăcilor de sudat

Plăcile de sudat se vor curăți pe fețele de îmbinat. Pentru aceasta, după caz se vor freca cu abrazivi (șmirghel, paste sau pulberi abrazive) și se curăță cu cîrpe de bumbac îmbibat în acetonă, toluen sau neofalină pentru degresare. Se va avea grijă ca aceste suprafețe să nu mai fie atinse.

Dacă este nevoie de prelucrări mecanice, ele se vor face în atelierul mecanic. Se va urmări ca suprafețele de îmbinat să aibă o rugozitate cît mai mică posibil.

Pentru tablele laminate este necesar să se facă un control defectoscopic în scopul de a se depista eventualele defecte din interiorul plăcilor de sudat.



### 3.1.5.2. Pregătirea materialelor auxiliare

Materialele auxiliare necesare sudării plăcilor metalice prin explozie includ: materialele plastice și elastomere din care trebuie confecționat stratul tampon ce urmează să fi așezat între placa de sudat și folia de exploziv, folii de celofan sau P.V.C. ce se pun între materialul plastic și exploziv precum și benzile distanțoare și șuruburile cu piulițe pentru montarea plăcilor de sudat.

### 3.1.5.3. Pregătirea explozivilor

După aducerea explozivilor de la depozit (se vor aduce numai cantitățile necesare pentru sudările din ziua respectivă), aceștia vor fi înmușați prin frământare manuală până capătă plasticitatea dorită. După aceasta, explozivul se laminează la grosimea stabilită și se taie cu un cuțit la dimensiunile stabilite.

Pentru laminare, peste placa dispozitivului de laminare se așează folia de celofan sau folie de P.V.C. și apoi se pune explozivul. Cilindrul de laminare se va curăța și șterge. După laminare se așează peste explozivul laminat o altă folie de celofan sau P.V.C.

Foliile de exploziv astfel confecționate, se așează în pachete.

Pregătirea explozivilor se face într-o cameră separată, în ordinea înscrisă în fișa tehnologică.

### 3.1.6. Pregătirea echipamentelor pentru sudarea prin explozie

Pregătirea echipamentelor de sudare constă în:

- curățirea și verificarea platformelor de lucru;
- întinderea cablurilor electrice normale și ecranate de la cuplarea la rețea la detonatoare și de la acestea la platforma de lucru;
- verificarea dispozitivelor de fixare a plăcii de sudat;
- pregătirea sculelor necesare pe bancul de lucru.

Înainte de verificarea echipamentelor de sudare se va curăța locul de lucru prin măturare și udare cu apă.

### 3.1.7. Montarea pieselor pentru sudare prin explozie

Placa de bază se așează pe platforma de lucru și se fixează cu ajutorul dispozitivelor de prindere prin strângerea șuruburilor. După aceasta se curăță cu acetonă, toluen sau neofalină suprafața de îmbinat. La fel se curăță și suprafața de îmbinat a plăcii de sudat, după care se așează peste placa de bază fie înclinat (fig.2.1 a), fie paralel (fig.2.1 d) fixându-se cu șuruburi.

Peste placa de sudat se așează stratul de material plastic iar peste acesta folia de exploziv. Se montează electrozii cu capetele în stratul de exploziv. Dacă se folosesc capse detonante se fixează pe folia de exploziv.

### 3.1.8. Executarea sudării prin explozie

După montarea pieselor de sudat se verifică montajul, se strâng toate sculele folosite și se părăsește locul de lucru, personalul adăpostindu-se în locul stabilit. Artificierul conectează conductorii electrici ecranati la detonator și după darea semnalului "FOC" apasă pe butonul de comandă al detonatorului. După detonarea explozivului, personalul destinat merge la platforma de lucru și desprinde piesele sudate.

În caz că nu s-a produs explozia, se așteaptă 2...5 minute și artificierul merge la platforma de lucru pentru a constata cauzele și a hotărî dacă se repetă tragerea sau se scot pentru remediere. Se va avea grijă ca de fiecare dată să se curețe bine suprafețele de îmbinat.

Dacă plăcile de sudare sînt reci, înseamnă că sudarea a avut loc (energia undelor de șoc rezultate din detonarea explozivului a fost consumată pentru realizarea îmbinării, adică s-au format valurile îmbinării). În caz contrar, plăcile sînt calde, chiar fierbinți.

### 3.1.9. Operații ulterioare sudării prin explozie

Dacă plăcile au fost sudate, după desprindere de pe platformă se fac următoarele operațiuni:

- curățirea pieselor sudate;
- prelucrarea pieselor sudate;
- verificarea îmbinărilor.

### 3.1.9.1. Curățirea pieselor sudate

Piesele luate de pe platformă se așează pe bancul de lucru și se curăță cu bumbac îmbibat în acetona sau toluen de resturile de exploziv și material plastic, arse în timpul detonării.

### 3.1.9.2. Prelucrarea pieselor sudate

Piesele curățate se duc la atelierul mecanic pentru prelucrare. Acestea constau din debitarea în plăcuțe, dacă s-a prevăzut acest lucru, precum și prin frezarea marginilor și a suprafeței superioare a plăcii de sudat în caz că grosimea inițială a plăcii a fost mai mare decât cea finală.

### 3.1.9.3. Verificarea îmbinărilor sudate prin explozie

Calitatea îmbinărilor sudate prin explozie se va verifica și controla prin:

- control defectoscopic ultrasonic;
- probe metalografice;
- încercări mecanice de rezistență;

Controlul defectoscopic ultrasonic se va aplica tuturor pieselor sudate prin explozie.

Probele metalografice și încercările mecanice se fac prin prelevări de epruvete din piesele sudate. Aceste probe se fac la fiecare lot de piese sudate zilnic. Prelevarea epruvetelor și modul de lucru al probelor se face conform cap.4.5.

### 3.1.10. Măsuri de protecția muncii

Pe parcursul desfășurării procesului tehnologic de sudare a metalelor prin explozie, se vor aplica cu strictețe Normele republicane de protecție a muncii art.429...463, prevederile H.C.M.nr.2509/1969 privind regimul materiei explozive în economie și pentru stabilirea și sancționarea contravențiilor la acest regim precum și ale Decretului nr.232/1974 privind prevenirea și stingerea incendiilor.

În plus, pentru fiecare loc de muncă din sectorul de sudare prin explozie, se vor elabora instrucțiuni specifice de protecție a muncii. Se vor stabili locuri pentru fumst, iar personalul care lucrează în sectorul de sudare prin explozie, nu are voie să aibă asupra lor chibrituri sau brichete.

Se va face instructajul de protecție a muncii conform normelor în vigoare și se vor întocmi fișele de protecție a muncii

### 3.2. Tehnologia sudării plăcilor metalice prin explozie în vid

Procesul tehnologic de sudare prin explozie în vid este asemănător cu procesul tehnologic în ser, cuprinzând aceleași operațiuni. Probleme specifice sînt numai la:

- calculul parametrilor de lucru - unde în relația (2.14)  $K$  va avea valori de la 5 la 50;
- pregătirea echipamentelor pentru sudare;
- executarea sudării prin explozie.

#### 3.2.1. Pregătirea echipamentelor pentru sudare

Camera de vid se va curăți și se verifică modul de funcționare a robinetelor. Se va verifica și starea conductelor și a cablurilor electrice.

Se realizează montajul instalației (fig.2.30), făcîndu-se legăturile conductelor la pompele de vid, la sistemul de răcire a pompei de vid prin difuzie precum și conectarea aparatelor la camera de vid și la rețeaua electrică.

După aceasta se verifică funcționalitatea instalației urmărindu-se în special gradul de vid primar și secundar în timp precum și funcționarea sistemului de curățire cu aer sau azot a camerei de vid.

Se va verifica funcționarea detonatorului electric. După terminarea verificărilor se trece la pregătirea instalației pentru sudare care va consta în:

- deschiderea ușii de vizitare a camerei de vid;
- introducerea plăcii de bază în camera de vid, fixarea ei pe platforma de lucru și curățirea cu acetona sau toluen;
- pregătirea plăcii de sudat (așezarea stratului de material plastic, a foliei de exploziv și curățirea cu acetona sau toluen);
- introducerea plăcii de sudat în camera de vid și fixarea pe placa de bază;
- se montează electrozii la platforma de lucru și stratul de exploziv;
- se verifică montajul pieselor de sudat în camera de vid;

- se închide ușa de vizitare strângându-se piulițele cu mâner;
- se manevrează robinetii de vid în poziția vid primar;
- se închid robinetii pentru curățirea camerei de vid;
- după realizarea vidului primar (citire pe aparatul de măsurarea vidului) se manevrează robinetii în poziția vid secundar.

### 3.2.2. Executarea sudării prin explozie în vid

La atingerea vidului secundar stabilit se conectează detonatorul electric la rețea și se apasă pe butonul de comandă pentru detonarea explozivului. După detonarea explozivului (realizarea îmbinării) se procedează astfel:

- se deconectează de la rețea pompele de vid;
- se deschide robinetul de la recipientul de aer ori azot;
- se deschide robinetul de la țeava camerei de vid;
- se deschide robinetul de evacuarea gazelor;
- se deșurubează piulițele cu mâner de ușa de vizitare și se deschide ușa;
- se desprinde de pe platformă piesa sudată.

În caz că nu s-a produs detonarea explozivului se procedează în același fel după ce s-a așteptat 2...3 minute de la apăsarea pe butonul de comandă. Artificierul, după examinarea pieselor pentru sudat, hotărăște dacă se reface montajul electrozilor și se face o nouă detonare ori se scot piesele și se înlocuiesc cu altele, cele scoase fiind duse pentru remediere.

### 3.3. Tehnologia sudării prin explozie a țevilor la placa tubulară

Sudarea prin explozie a țevilor la placa tubulară, comportă următoarele operațiuni:

- stabilirea geometriei de sudare pe baza proiectului de execuție a subansamblului;
- calculul parametrilor de lucru;
- întocmirea fișei tehnologice pentru pregătirea explozivilor;
- întocmirea fișei tehnologice pentru sudarea prin explozie;

- pregătirea pieselor pentru sudare;
- pregătirea materialelor auxiliare;
- pregătirea încărcăturilor explozive;
- pregătirea echipamentelor pentru sudare;
- montarea pieselor pentru sudare;
- executarea sudării prin explozie a țevilor la placa tubulară;
- operațiuni ulterioare;
- măsuri pentru protecția muncii.

Comparativ cu tehnologia sudării plăcilor metalice prin explozie în aer, tehnologia sudării țevilor la placa tubulară prezintă o serie de particularități.

### 3.3.1. Stabilirea geometriei de sudare

La sudarea prin explozie a țevilor la placa tubulară, geometria de sudare se stabilește în funcție de condițiile impuse de proiectul de execuție (grosimea plăcii tubulare, diametrul exterior și interior al țevilor, distanța dintre axele țevilor, mărimea punții dintre țevi, numărul de țevi ce urmează a fi sudate la placa tubulară), proprietățile fizico-mecanice ale metalelor ce urmează a fi sudate, caracteristicile explozivilor și materialele auxiliare de care se dispune.

În afară de aceste condiții, trebuie să se țină seama și de posibilitățile de prelucrare a plăcii tubulare și a țevilor. În general se pot stabili geometrii de tipul celor din fig.2.2 a și b precum și alte tipuri.

### 3.3.2. Calculul parametrilor de lucru

Parametrii de lucru se calculează ținând seama de geometria de sudare conform cap.2.5.3. Interesează în special valoarea unghiului precum și lungimea de sudare și diametrul cordonului de exploziv.

Calcululele se vor efectua tabelar în mai multe variante, în scopul de a se alege soluția convenabilă din toate punctele de vedere.

### 3.3.3. Intocmirea fișei tehnologice pentru pregătirea explozivilor

În fișă se va înscris dimensiunile cordonului de sudură precum și modul de formare a încărcăturii (modul de umplere



a tecilor din material plastic) și de montare a capselor detonante sau a electrozilor detonatorului electric.

#### 3.3.4. Intocmirea fișei tehnologice pentru sudarea prin explozie a țevilor la placa tubulară

În fișa tehnologică pentru sudare, pe lângă operațiunilor de pregătire a unei țevi, se va înscrie și ordinea în care se așează țevile în placa tubulară pentru a fi sudate, precum și modul de legare a electrozilor la detonatorul electric.

#### 3.3.5. Pregătirea pieselor pentru sudare

##### 3.3.5.1. Pregătirea plăcii tubulare

Plata tubulară se verifică dacă corespunde condițiilor impuse de proiectant. Placa tubulară se prelucurează la exterior la forma și dimensiunile cerute. Se trasează centrele găurilor și se dau găurile cilindrice și apoi se prelucurează alezajele conice cu înclinarea corespunzătoare unghiului  $\alpha$ . Se curăță bavurile iar alezajele se curăță cu acetonă sau toluen. Este necesar ca înainte de prelucrări să se facă un control defectoscopic ultrasonic al plăcii tubulare.

##### 3.3.5.2. Pregătirea țevilor

După debitare (și îndoire dacă este cazul) capetele țevilor se debavurează și se curăță de unsoare, ulei și alte impurități cu cîrpe sau bumbac. Se polizează cu hîrtie pentru șlefuire uscată cu granulație fină (600...800) și se curăță cu acetonă. La interior se curăță cu acetonă folosind o perie cilindrică. Este necesar ca stratul îndepărtat să nu depășească 0,038...0,050 mm din grosimea peretelui țevii.

#### 3.3.6. Pregătirea materialelor auxiliare

Materialele auxiliare - tecile și capacele - se confecționează din materiale plastice (p.v.c.sau polistiren) în matrițe la cald sau din bare prin așchiere. Dacă se matrițează, după ce se scot din matriță, se debavurează și se curăță.

După curățire, tecile și capacele sînt duse la locul de pregătire a explozivilor pentru a fi încărcate cu exploziv.

### 3.3.7. Pregătirea încărcăturilor explozive

Explozivul adus din depozit în cantitate necesară pentru ziuă respectivă se va împărți în bucăți ce vor fi frământate pentru a căpăta plasticitate dorită. Explozivul se va modela sub formă de cordon cilindric și apoi va fi introdus în tecile de material plastic.

Tecile de protecție astfel încărcate cu exploziv se vor transporta la locul de sudare unde se află placa tubulară.

Ordinea operațiunilor se înscrie în fișa tehnologică pentru pregătirea explozivilor.

### 3.3.8. Pregătirea echipamentelor de sudare prin explozie

Pregătirea echipamentelor de sudare, constă în:

- verificarea dispozitivelor de fixare a plăcii tubulare pe platforme de lucru;
- verificarea dispozitivelor de susținere a țevilor;
- întinderea cablurilor electrice normale și ecranate de la priza de rețea la detonator și de aici la placa tubulară;
- verificarea funcționării detonatoarelor;
- realizarea legăturilor electrice la rețea, detonator și placa tubulară;
- verificarea legăturilor electrice și modul de funcționare a detonatorului la comanda "FOC".

### 3.3.9. Montarea pieselor pentru sudarea prin explozie

După aducerea la locul de lucru a pieselor de sudat, placa tubulară se fixează în dispozitiv, găurile se curăță cu acetonă cu ajutorul unor perii cilindrice, iar țevile cu bumbac.

Înainte de montare, atât găurile cât și țevile se curăță cu aer furnizat de un compresor.

După curățire, țevile se urmează a fi sudate, se introduc în găurile din placa tubulară având grijă ca ele să iasă în afara plăcii cu 1...3 mm. La celălalt capăt, țevile se prind în dispozitivul de susținere.

În fiecare țevă se introduce teaca încărcată cu exploziv și apoi se montează capsele sau electrozii detonatoarelor.

Imediat după terminarea montajului, se verifică modul de amplasare a țevilor cu tecile încărcate cu exploziv și se leagă conductorii electrici la cablurile ecranate ale detonatorului.

### 3.3.10. Executarea sudării prin explozie

După o ultimă verificare a modului de realizare a legăturilor și a măsurilor de protecție a muncii, se părăsește locul de sudare, personalul adăpostindu-se în locul stabilit. Conducătorul atelierului de sudare sau artificierul de comandă "FOC". La această comandă se apasă pe butonul de comandă al detonatorului.

Dacă nu s-a produs detonarea explozivului, se decuplează detonatorul, se așteaptă 2...5 minute, după care artificierul merge la platforma de lucru pentru a constata situația și împreună cu conducătorul atelierului de sudură prin explozie, vor lua măsurile corespunzătoare.

În caz că s-a produs detonarea explozivului la toate țevile montate, se desfac legăturile, se verifică vizual fiecare țevă sudată și apoi se curăță cu acetonă, bumbac și aer celelalte găuri și țevi ce urmează a fi sudate, realizându-se un nou montaj. La țevile la care nu s-a produs detonarea, se vor scoate tecile cu exploziv și vor fi înlocuite cu alte teci, cele defecte urmând a fi refăcute.

Se procedează în același fel ca și la primul rând de țevi și după terminarea sudării prin explozie a tuturor țevilor, placa tubulară se scoate de pe platformă și se transportă la atelierul mecanic.

Ordinea operațiilor de sudare prin explozie și conținutul fiecăreia, se înscrie în fișe tehnologică pentru sudare.

### 3.3.11. Operațiuni ulterioare.

Aceste operațiuni se execută la atelierul mecanic sau pe un banc de lucru. Placa tubulară se curăță cu o perie de zgură rezultată din arderea explozivilor și se spală cu acetonă. La interior țevile se curăță cu o perie cilindrică și acetonă. După curățire se face un control defectoscopic ultrasonic pe fiecare țevă sudată.

La probele de verificare a parametrilor de lucr pe esenționale, după sudarea țevilor și curățirea cu acetonă, se stabilesc probele de verificare și se prelevează epruvetele conform cap.4.5.

### 3.4. Tehnologia mandrinării prin explozie a țevilor la placa tubulară

Mandrinerea prin explozie a țevilor la placa tubulară se execută după tehnologia de sudare prin explozie a țevilor la plăcile tubulare și cu unele mici deosebiri.

Alezejele găurilor din placa tubulară vor fi cilindrice pe toată lungimea de mandrinare (grosimea plăcii) avându-se grijă ca jocul dintre peretele găurii și suprafața exterioară a țevii să fie în limitele impuse sau calculate în scopul de a nu subția prin deformarea de lărgire grosimea țevii sub limitele admise.

În caz că prin proiect se impune ca la partea superioară a plăcii tubulare, țevile să fie sudate (fig.2.3 și 2.4), această operație se poate face fie înainte, fie după mandrinare. Aceasta este în funcție de lungimea țevilor, de posibilitatea de manevrare a plăcii tubulare și țăevilor.

Deoarece la generatoarele de abur ale centralelor nucleare electrice, plăcile tubulare au grosimi de 160...500 mm, lungimea de mandrinare impune ca tecile să fie făcute din 2...5 bucăți. Tecile se vor confecționa la cald, în matrițe pe mașini de prelucrat materiale plastice, astfel încât să poată fi asamblate și încărcate cu exploziv relativ ușor.

Se va acorda o atenție deosebită curățirii locului de lucru precum și a echipamentelor de mandrinare.

#### **4. EXPERIMENTARI EFECTUATE SI REZULTATE**

- 4.1. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetal în aer.**
- 4.2. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetal în vid**
- 4.3. Sudarea prin explozie a țevilor la placa tubulară**
- 4.4. Mandrinarea prin explozie a țevilor la placa tubulară**
- 4.5. Incercarea și verificarea pieselor sudate prin explozie**
  - 4.5.1. Încercări mecanice de rezistență**
  - 4.5.2. Verificarea rezistenței electrice**
  - 4.5.3. Probe metalografice**
  - 4.5.4. Control defectoscopic**
  - 4.5.5. Verificarea etanșeității**

#### 4. EXPERIMENTARI EFECTUATE SI REZULTATE

La experimentări s-au folosit metalele din tabelul 2.2, accentul punându-se pe sudarea prin explozie Cu-OL și Al-OL pe baza contractelor de cercetare științifică pentru Intreprinderea constructoare de mașini - Reșița și Intreprinderea de aluminiu Slatina.

Pentru lărgirea gamei posibilităților de îmbinare s-a experimentat și sudarea plăcilor Cu-Al și Am-OL.

În același timp au fost întreprinse cercetări pentru mandrinarea prin explozie a țevilor din Incoloy 800 la placa tubulară din oțel 22 Ni Mo Cr 37 în cadrul contractului cu Intreprinderea de mașini grele - București, însă fără experimentări, deoarece nu s-a dispus de materialele necesare (țevi și placă).

La sudările prin explozie s-au folosit explozivi din producția curentă, încercându-se toate tipurile înscrise în tabelul 2.6.

Experimentările de sudare prin explozie au fost efectuate pe baza tehnologiei descrise la cap.3.1.

În cadrul experimentărilor s-au urmărit următoarele probleme:

- verificarea parametrilor de lucru calculați cu relațiile din tabelul 2.8 ale unor cercetători străini;

- calculul parametrilor de lucru pentru fiecare caz în parte pe baza relațiilor stabilite de autor (2.14)...(2.41);

- verificarea parametrilor de lucru calculați;

- încercarea materialelor plastice pentru stratul tampon;

- încercarea unor sisteme și dispozitive de detonare;

- stabilirea metodelor de încercare a rezistenței mecanice;

- verificarea rezistenței îmbinărilor sudate;

- controlul defectoscopic și probe metalografice;

- încercarea și verificarea echipamentelor de sudare prin explozie concepute, proiectate și construite pentru a fi utilizate și la scară industrială.

După fiecare serie de experimentări - în urma concluziilor - s-a stabilit tehnologia de lucru, tehnologie ce a fost verificată cu seria următoare de experimentări.

**4.1. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetal în aer**

De la început s-a căutat să se verifice modul de lucru pe baza literaturii de specialitate. În acest sens s-au utilizat relațiile de calcul din tabelul 2.8 pentru sudarea prin explozie a plăcilor de cupru pe oțel.

Tabel 4.1

Relația	$V_m = [ \quad ] V_d$						
	$F = m_e / m_p$						
	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	3,0	4,0
1.30	176	485	737	958	1222	2180	2438
1.31						2312	2570
1.32		586	876	995	1260	2318	2621
1.33	548	914	1147	1323	1525	2161	2306
1.34, 1.37'	176'	473	725	939	1210	2274	2583
1.36	214	576	869	1128	1449	2728	3100
2.6	252	425	554	682	788	1347	1575
	... 542	... 920	... 1197	... 1424	... 1707	... 2955	... 3415

Tabel 4.2

relația \ F	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
1.30	$G_e [g]$				
1.31	71,3°	231,9	356,5	491,1	713
1.32	$V_e [cm^3]$				
1.33	50,93°	152,79	254,64	356,5	509,29
1.34	$Y [mm]$				
1.36	2,6°	7,6	12,7	17,8	25,5
1.37°					
2.6					

Dimensiunile plăcilor de Cu: 200 x 100 x 4 mm.

Exploziv: hexolită avînd  $V_d = 6300 \text{ ms}^{-1}$  și  $\rho_0 = 1,4 \text{ g/cm}^3$ .

Pe baza datelor din tabelul 2.8 și ținînd seama de caracteristicile explozivului s-au calculat viteza de mișcare  $V_M$  (tabelul 4.1), cantitatea de exploziv și grosimea stratului (tabel 4.2).

Pentru primele încercări, plăcile de sudat (Cu) au fost așezate înclinat cu unghiul  $\alpha = 3^\circ; 6^\circ; 9^\circ; 12^\circ$  și  $15^\circ$ . La fiecare înclinare s-au efectuat cîte patru încercări, de fiecare dată punînd peste placa de sudat o cantitate de exploziv mai mare, rezultate din calcul și înscrise în tabelul 4.2 ținînd seama de raportul  $F = m_e/m_p = 0,1 \dots 0,7$ . Nu s-au folosit cantități mai mari deoarece la încercările cu  $G_0 = 0,55 \text{ kg}$  plăcile de sudat au suferit deformări foarte mari, grosimea acestora după sudare ajungînd de la 4 mm la 3...2,4 mm.

După încercările efectuate s-a constatat că la înclinările peste  $9^\circ$  se produc deformări ale plăcii de sudat sau că plăcile nu s-au sudat. În cadrul experimentărilor s-a folosit o gamă largă de explozivi (trotil, hexolită 1, hexolită 2, compus A, compus B, tetril).

În urma acestor experimentări a rezultat:

- unghiul inițial de înclinare  $\alpha$  trebuie calculat;
- cantitatea de exploziv trebuie să fie determinată în funcție de raportul  $F$  precum și de caracteristicile metalului de sudat și unghiurile ce se formează în timpul procesului de sudare ( $\varphi$  și  $\beta$ ); astfel încît după sudare să nu apară deformații ale plăcii de sudat;

- este necesar să se calculeze și alți parametri pentru a se putea controla procesul de sudare prin explozie.

În acest sens s-au determinat cu ajutorul relațiilor (2.15), (2.16) și (2.17) unghiurile  $\varphi$ ,  $\beta$  și  $\alpha$  pornind de la viteza de mișcare calculată cu relațiile (1.30)...(1.37) și (2.6) în tabelul 4.1. Valorile obținute au fost înscrise în tabelul 4.3.

Din analiza valorilor unghiurilor rezultă că mărimea acestora este dependentă de viteza sunetului în metalul de sudat, de viteza de detonație a explozivului precum și de cantitatea de exploziv utilizată.

Din calculul unghiului  $\beta$  a rezultat că mărimea raportului cu care se înmulțește  $V_d$  din relațiile (1.30)...(1.37) și



(2.6) nu este altceva decît sinusul unghiului  $\beta$ .

Tabel 4.3

Unghiul [° - ']	Relația	$V_s = 3553 \text{ ms}^{-1}$			$V_d = 6300 \text{ ms}^{-1}$			
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	3,0	4,0
$\varphi$ [2.15]	1.30	2-51	7-51	11-58	15-38	20-07	37-50	43-20
	1.31						40-36	46-20
	1.32		9-29	14-16	16-16	20-46	40-44	47-32
	1.33	8-52	14-54	18-49	21-52	25-24	37-27	40-27
	1.34 1.37	2-51	7-39	11-48	15-20	19-54	39-51	46-35
	1.36	3-39	9-09	14-11	18-30	24-05	50-10	60-45
	2.6	4-02 ... 8-44	6-54 ... 15-00	8-58 ... 19-41	11-02 ... 23-37	12-49 ... 28-43	22-38 ... 56-16	26-19 ... 73-58
$\beta$ [2.16]	1.30	1-36	4-24	6-40	8-38	10-59	19-05	21-09
	1.31						20-09	22-12
	1.32		5-19	7-55	8-59	11-19	20-12	22-35
	1.33	4-58	8-15	10-19	11-51	13-36	18-56	20-05
	1.34 1.37	1-36	4-17	6-33	8-28	10-52	19-51	22-17
	1.36	1-57	5-08	7-51	10-09	12-57	23-25	26-12
	2.6	2-17 ... 4-55	3-52 ... 8-18	5-02 ... 10-47	6-11 ... 12-44	7-07 ... 15-10	12-14 ... 25-07	14-02 ... 28-27
$\alpha$ [2.17]	1.30	1-15	3-27	5-18	7-00	9-09	18-45	22-11
	1.31						20-27	24-08
	1.32		4-10	6-21	7-17	9-27	20-32	24-57
	1.33	3-54	6-39	8-30	10-01	11-48	18-31	20-21
	1.34 1.37	1-15	3-22	5-15	6-52	9-02	20-00	24-18
	1.36	1-33	4-01	6-20	8-21	11-08	26-45	34-33
	2.6	1-45 ... 3-49	3-02 ... 6-42	3-56 ... 8-54	4-52 ... 10-53	5-42 ... 13-33	10-24 ... 31-09	12-17 ... 45-31

Comparînd mărimile unghiurilor  $\alpha$  la care au fost înclinate plăcile la primele serii de experimentări cu mărimile reieșite din calcule se constată că acestea sînt direct proporționale cu valorile raportului  $F = 0,1 \dots 0,7$  și că pentru  $F = 0,7$  unghiul  $\alpha$  nu depășește  $9^\circ$ .

Pe baza rezultatelor înscrise în tabelul 4.3 (ca exemplu de calcul) pentru hexolită precum și pentru alți 3 explozivi s-au efectuat 8 serii de experimentări, în total 96 încercări. Din analiza probelor a reieșit necesitatea ca parametrii de lucru pentru sudarea prin explozie să fie calculați în funcție de caracteristicile fizico-mecanice ale metalelor de sudat.

Pentru aceasta s-au întreprins cercetări și studii care au condus la găsirea unui sistem de relații de calcul prezentate în cap.2.5. Pentru ușurință calculele se pot desfășura tabelar, așa cum se ilustrează în tabelele 2.16...218 și 10.1...10.11 (din cap.10 - anexe).

Cu elementele calculate pe baza relațiilor din cap.2.5 s-au executat sudarea prin explozie a plăcilor Cu-OL (42 de plăci) și Al-OL (122 plăci) folosind toată gama de explozivi avută la dispoziție (tabel 2.6.).

S-au întâmpinat greutăți în așezarea înclinată a plăcilor la unghiurile  $\alpha$  reieșite din calcul.

Urmărind înlăturarea acestei greutăți s-a ajuns la soluția ca din gama valorilor calculate ale unghiului  $\alpha$  să se aleagă valori numai în grade. În acest sens s-au confecționat o serie de cale unghiulare având deschiderea unghiului  $\alpha$  de  $3^{\circ}$ ;  $4^{\circ}$ ;  $5^{\circ}$ ;  $6^{\circ}$ ;  $7^{\circ}$  și  $8^{\circ}$ .

Pentru a avea un consum minim de explozivi în condițiile unei bune îmbinări a metalelor supuse sudării prin explozie și urmărindu-se ca placa de sudat să nu fie deformată sau deteriorată (cum s-a întâmplat la primele experimentări) s-au recalculat parametrii de lucru determinați prin fișele de calcul (tabelele 10.2 și 10.4).

Parametrii de lucru recalculați au fost înscrși în tabelul 4.4.

Din experimentările efectuate - care au confirmat justetea calculelor - a rezultat că unghiul  $\alpha$  trebuie să aibă valori corespunzătoare unor mărimi medii ale coeficientului K din relația (2.14) care determină viteza de mișcare a plăcii de sudat ( $K = 35...55$ ).

În acest sens, pentru recalcularea parametrilor de lucru s-a procedat după cum urmează:

Din fișa de calcul a parametrilor de calcul se stabilește valoarea unghiului  $\alpha$ .

METALE	Poziția Dimensiuni	Exploziv	$\alpha$ [° - ']	F	Ge [g]	Y [mm]
Cu 5 oțel arc 2A	încălinat L = 200 mm b = 100 mm h = 4 mm	Hexolită 2 V <sub>d</sub> = 6300 $\delta_e = 1,40$	1 - 30	0,0985	70	2,5
			2 - 20	0,0987	71	2,55
			3 - 00	0,1016	73	2,6
			4 - 00	0,1078	77	2,7
			5 - 00	0,1137	81	2,9
Al 99 5 OL 37	încălinat L = 200 mm b = 100 mm h = 16 mm S = 200 cm <sup>2</sup> V = 320 cm <sup>3</sup>	EP - 02 V <sub>d</sub> = 7065 $\delta_e = 1,5$	1 - 00	0,169	146	4,8
			1 - 30	0,295	255	8,5
			2 - 00	0,440	380	12,6
			3 - 00	0,650	562	18,2
			3 - 30	0,725	626	20,1
		EP - 01 V <sub>d</sub> = 7200 $\delta_e = 1,42$	1 - 00	0,128	90	3,0
			1 - 30	0,268	175	6,0
			2 - 00	0,411	278	9,0
			3 - 00	0,605	390	13,0
			3 - 30	0,725	430	15,0
		EP - P4 V <sub>d</sub> = 7200 $\delta_e = 1,40$	0 - 30	0,100	86,4	3,0
			1 - 00	0,101	87,3	3,1
			1 - 30	0,105	90,9	3,2
			1 - 45	0,108	93,4	3,3
			2 - 00	0,111	96,0	3,4
		EP - P3 V <sub>d</sub> = 7500 $\delta_e = 1,50$	0 - 30	0,093	80,4	2,7
			1 - 00	0,097	83,8	2,8
			1 - 30	0,101	87,3	2,9
			2 - 00	0,105	90,7	3,0
			2 - 30	0,109	94,2	3,1

Luind în considerare relația (2.17) și a raportului  $C = \sin \beta / \sin \varphi$  din relația (1.40) se ajunge la expresia:

$$\sin \varphi = \sin \alpha / (1 - C) . \quad (4.1)$$

După calculul unghiului  $\varphi$  se determină din raportul  $C$  mărimea unghiului  $\beta$  necesară pentru calculul coeficientului  $K$  și a raportului  $F$ . Coeficientul  $K$  rezultă din relația (2.14):

$$K = \frac{V_m}{A \cdot B} \quad (4.2)$$

în care numitorul ( $A \cdot B$ ) este calculat în fișa parametrilor iar viteza de mișcare se obține din relația (2.16):

$$V_m = \operatorname{tg} \beta \cdot V_d \quad (4.3)$$

Valoarea coeficientului  $C_K$  din expresia (2.24) a raportului  $F$  se obține prin interpolare din tabelul 2.11 în funcție de coeficientul  $K$  recalculat cu relația (4.2).

Avind aceste date se calculează cantitatea de exploziv  $G_e$  și grosimea stratului de exploziv necesar pentru o placă.

În același mod s-a procedat și pentru sudarea plăcilor prin explozie cu explozivi ce au viteza de detonație sub  $4900 \text{ m.s}^{-1}$ .

În acest caz, plăcile sînt așezate paralel la distanța  $x$ , care din calcule are valori care conduc la greutatea în confecționarea pieselor distanțoare (tabelele 10.5 și 10.7).

Pentru a așeza plăcile de sudat la distanțe convenabile, se face o recalculare pornindu-se de la alegerea acestora în limitele rezultate din calculul parametrilor de lucru (tabelele 10.6 și 10.8).

Calcululele au fost făcute pentru explozivul ETR-15 care are  $V_d = 3350 \text{ m.s}^{-1}$  iar  $\gamma_e = 1,1$ . Rezultatele au fost înscrise în tabelul 4.5.

Din analiza datelor din tabelele 10.5 și 10.7 rezultă că pentru plăcile de cupru, distanța este cuprinsă între 0,6 și 3,03 mm iar pentru aluminiu de la 1,24 la 6,20 mm.

În acest sens au fost efectuate și calcululele parametrilor de lucru. Astfel din tabelul 4.5 rezultă că pentru  $Cu$  s-au ales distanțe între 1 și 3 mm iar pentru  $Al$ , distanța dintre plă-

cile de sudat e fost între 1,5 și 6 mm.

Cu acești parametrii au fost făcute experimentările în poligon. Toate încercările efectuate au confirmat calculele.

Tabel 4.5

METALE	Poziția Dimensiuni	Exploziv	X [mm]	F	Ge [g]	Y [mm]
<u>Cu 5</u> Al. 99,5	paralel  L=200mm b=100 mm h= 4 mm s =200cm <sup>2</sup> V=800cm <sup>3</sup>	ETR=15  V <sub>d</sub> =3350  χ <sub>e</sub> =1,1	1,0	0,191	134,2	6,1
			1,5	0,219	153,9	6,9
			2,0	0,248	174,5	7,9
			2,5	0,286	201,2	9,1
			3,0	0,330	231,6	10,5
<u>Al. 99,5</u> OL 37	paralel  L=200mm b=100 mm h= 16 mm s =200 cm <sup>2</sup> V=320 cm <sup>3</sup>		1,5	0,226	195,2	8,8
			2,0	0,229	198,0	9,0
			2,5	0,234	202,4	9,2
			3,0	0,242	209,0	9,5
			3,5	0,251	216,6	9,8
		4,0	0,261	226,0	10,2	
		4,5	0,271	234,4	10,7	
		5,0	0,284	245,0	11,1	
		5,5	0,297	257,0	11,6	
		6,0	0,311	268,4	12,2	

Cantitatea de exploziv este mai mare (plăcile avînd aceeași mărime) decît în cazul plăcilor așezate înclinat. Aceasta pe de o parte din cauza densității mai mici iar pe de alta din cauza vitezei de detonație care în acest caz este de două ori mai mică.

#### 4.2. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetale în vid

Calculul parametrilor de lucru s-a făcut ca și în cazul precedent cu deosebirea că valoarea coeficientului K are valori între 5 și 50.

Tehnologia de pregătire este asemănătoare până la introducerea pieselor în camera de vid. Modul de lucru cu camera de vid a fost conform tehnologiei descrise în cap.3.

Schema de montaj a instalației de vid este prezentată în fig.4.1.

S-au efectuat câteva încercări de sudare a plăcilor Cu-OL și Dural-OL. Rezultatele sînt la fel (destul de bune) ca și cazurile precedente.

Avînd în vedere faptul că producerea vidului necesar conduce la cheltuieli apreciabile, nu este recomandabil să se folosească decît pentru îmbinarea unor piese din aliaje superioare, în special pentru tehnica nucleară.

Neevînd un beneficiar care să facă asigurarea materială corespunzătoare, experimentările nu au luat amploare.

Vidul de  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  torri, se realizează în 15...30 minute. Aceaste din cauză că pompele de vid instalate sînt de capacitate mică și sînt destul de vechi (aproape 25 ani).

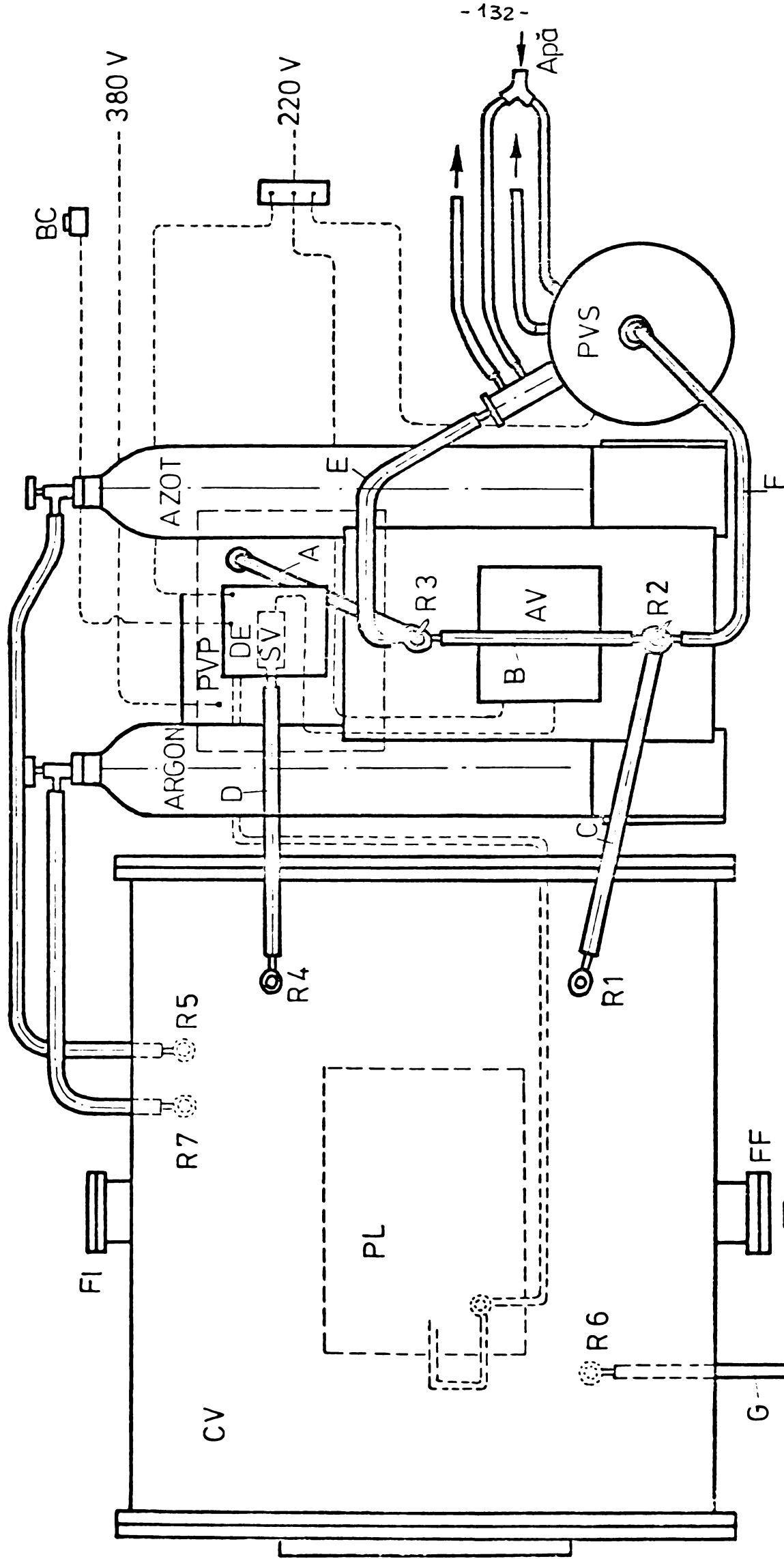
#### 4.3. Sudarea prin explozie a țevilor la placa tubulară

Experimentările de sudare prin explozie a țevilor la placa tubulară a constituit doar încercări de laborator. În acest cadru s-au sudat țevi de alamă Am 64 și Cu 5 la plăci tubulare din OL 37.

Calculul parametrilor de lucru este ilustrat în tabelele 10.9 și 10.10. La experimentări s-au utilizat două sorturi de explozivi: hexolită 1 și P-P 4. Parametrii de lucru sînt înscrși în tabelul 4.6. Unghiul  $\alpha$  de înclinare a pereților găurilor din placa tubulară are valori între  $0^{\circ}44'$  și  $3^{\circ}43'$ .

Tecile de protecție în care se introduce cordonul de exploziv au fost confecționate prin strunjire din diferite materiale plastice.

Si aici, parametrii de lucru calculați au corespuns.



LEGENDĂ

- C.V.- camera de vid;
- P.V.P.-pompa de vid primar;
- P.V.S.-pompa de vid secundar;
- R.2.3 - robineti de vid cu 3cai;
- R.1.4 - robineti de vid cu 2cai;
- R.5.7 - robineti azot, argon;
- PL.-platforma de lucru;
- F.I.-fereastră filmare;
- F.I.- fereastră iluminare;
- A.V.-aparatură măsurat vid;
- DE -demonstrator electric;
- BC -buton comandă;

Fig.4.1 Schema de montaj a instalației experimentale de laborator pentru sudarea prin vacuizare în vid.

Tabel 4.6

METALE	Poziția Dimensiuni	Exploziv	$\alpha$ [° - ']	F	$G_e$ [g]	d [mm]
Am 63 OL 37	țevi - găuri conice  $d_e = 19\text{mm}$ $a = 1\text{mm}$ $L = 17\text{mm}$ $V = 1,01\text{cm}^3$	Hexolita 1 $V_d = 5700$ $\chi_e = 1,2$	0-44	0,069	0,55	5,9
			1-29	0,146	1,17	8,5
			2-14	0,228	1,83	10,6
			2-59	0,322	2,57	12,7
			3-43	0,412	3,30	14,4
		EP-P4 $V_d = 7200$ $\chi_e = 1,4$	1-10	0,126	1,061	7,6
			1-45	0,130	1,101	7,7
			2-20	0,136	1,146	7,8
			2-55	0,140	1,188	7,9
			3-30	0,146	1,230	8,0

Tabel 4.7

METALE	Poziția Dimensiuni	Exploziv	$p$ daN/cm	F	$G_e$ g	d mm
Incoloy 800 oțel 22NiMoCr 37	țevi - găuri cilindrice  $d_e = 200\text{mm}$ $a = 1,5\text{mm}$ $= 0,17\text{mm}$ $L = 480\text{mm}$ $V = 45\,24\text{cm}^3$	ETR-15 $V_d = 3\,350$ $\chi_e = 1,1$	2500	0,107	40,0	9,8
			3000	0,118	44,0	10,3
			3500	0,127	48,0	10,7
			4000	0,136	51,0	11,0
			4500	0,145	54,0	11,4
			5000	0,153	57,0	11,7

#### 4.4. Mandrinarea prin explozie a țevilor la placă tubulară

Experimentările au fost efectuate cu țevi de Cu și Am 63 în lipsa materialelor speciale pentru centralele nucleare electrice. S-a utilizat explozivul TR-15. În tabelul 4.11 au fost calculați parametrii de lucru pentru mandrinarea țevilor din Incoloy 800 la placă tubulară din oțel 22 NiMoCr 37.



**ASPECTE DE LA SUDAREA PRIN EXPLOZIE**



**Așezarea stratului de  
exploziv**



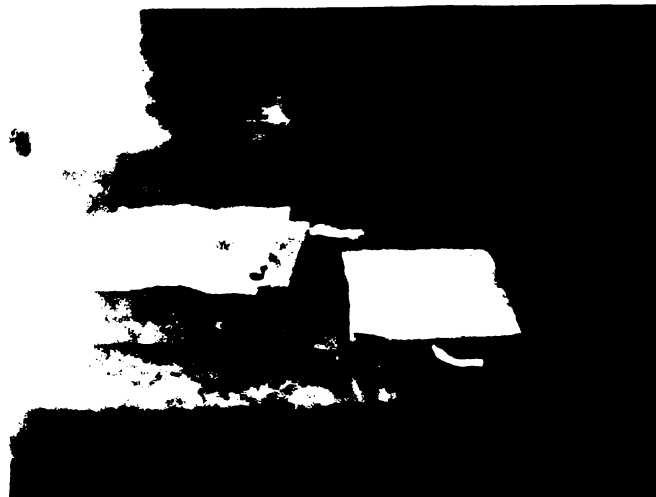
**Montarea capselor detonante în  
stratul de exploziv**



**Plăcile de sudat montate pe platforma de lucru**



**Ultima verificare**



**Piese sudate prin explozie**

#### 4.5. Încercarea și verificarea pieselor sudate prin explozie

Încercarea și verificarea pieselor sudate prin explozie, se face în general prin aceleași metode ca și la îmbinările convenționale. Astfel, încercările mecanice de rezistență vor cuprinde încercări la tracțiune, încovoiere, forfecare, foerfecare-întindere, smulțere, torsiune și reziliență.

De asemenea, operațiunile de încercare și verificare a pieselor sudate prin explozie, vor include probe metalografice, control nedistructiv precum și probe de etanșeitate.

##### 4.5.1. Încercări mecanice de rezistență

Problema principală a acestor încercări este a modului de prelevare a epruvetelor, în special în cazul sudării prin explozie a plăcilor.

##### 4.5.1.1. Încercarea la tracțiune

Pentru plăcile Al-OL epruvetele au fost confecționate ca în fig.4.2. Dimensiunile au fost alese pentru fiecare caz în parte în funcție de grosimea metalelor sudate prin explozie.

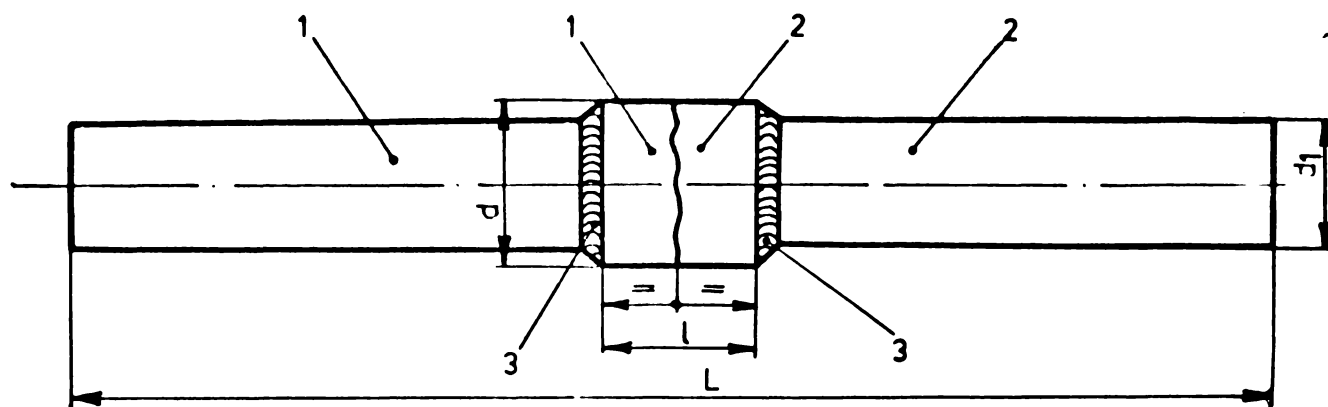


Fig.4.2 Epruveta pentru încercare la tracțiune directă  
1-metal de sudat; 2-metal de bază; 3-sudură cu arc electric în argon.

Din piesele sudate s-au prelevat epruvete cilindrice la capetele cărora s-au sudat cu arc electric în argon câte o bară din aceleași metale cu cele sudate prin explozie. Încercările au fost făcute conform STAS 200-75.

Dimensiunile epruvetei pentru Al-CL au fost:  $d = 15,96$  mm;  $d_1 = 12$  mm;  $l = 30$  mm și  $L = 250$  mm.

Realizarea epruvetelor este anevoioasă, în special în ceea ce privește sudarea barelor la epruveta prelevată din plăcile sudate prin explozie, astfel încât să se asigure coaxialitatea.

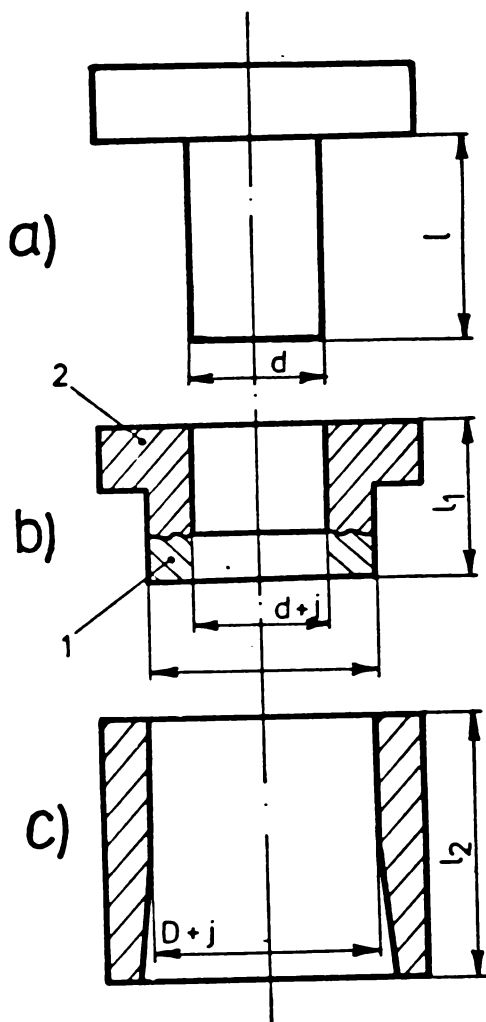


Fig. 4.3 Epruveta pentru încercare la tracțiune inversă.

Mult mai ușor - indiferent de grosimea plăcilor sudate prin explozie - se prelevează epruvetele din fig. 4.3 b.

În funcție de dimensiunile epruvetei s-a confecționat un dispozitiv alcătuit dintr-un poanson (fig. 4.3 a) și o bucsă (fig. 4.3 c).

Poansonul se introduce în epruvetă iar aceasta în bucsă. După montaj, epruveta se așează pe masa mașinii de încercat la tracțiune compresivă și peste poanson se coboară traversa în ale cărei baci s-a prins un poanson.

Prin apăsare, poansonul acționează asupra părții de jos a epruvetei - la suprafața de îmbinare - și produce ruperea în metalul mai moale, dacă sudarea prin explozie este bine făcută.

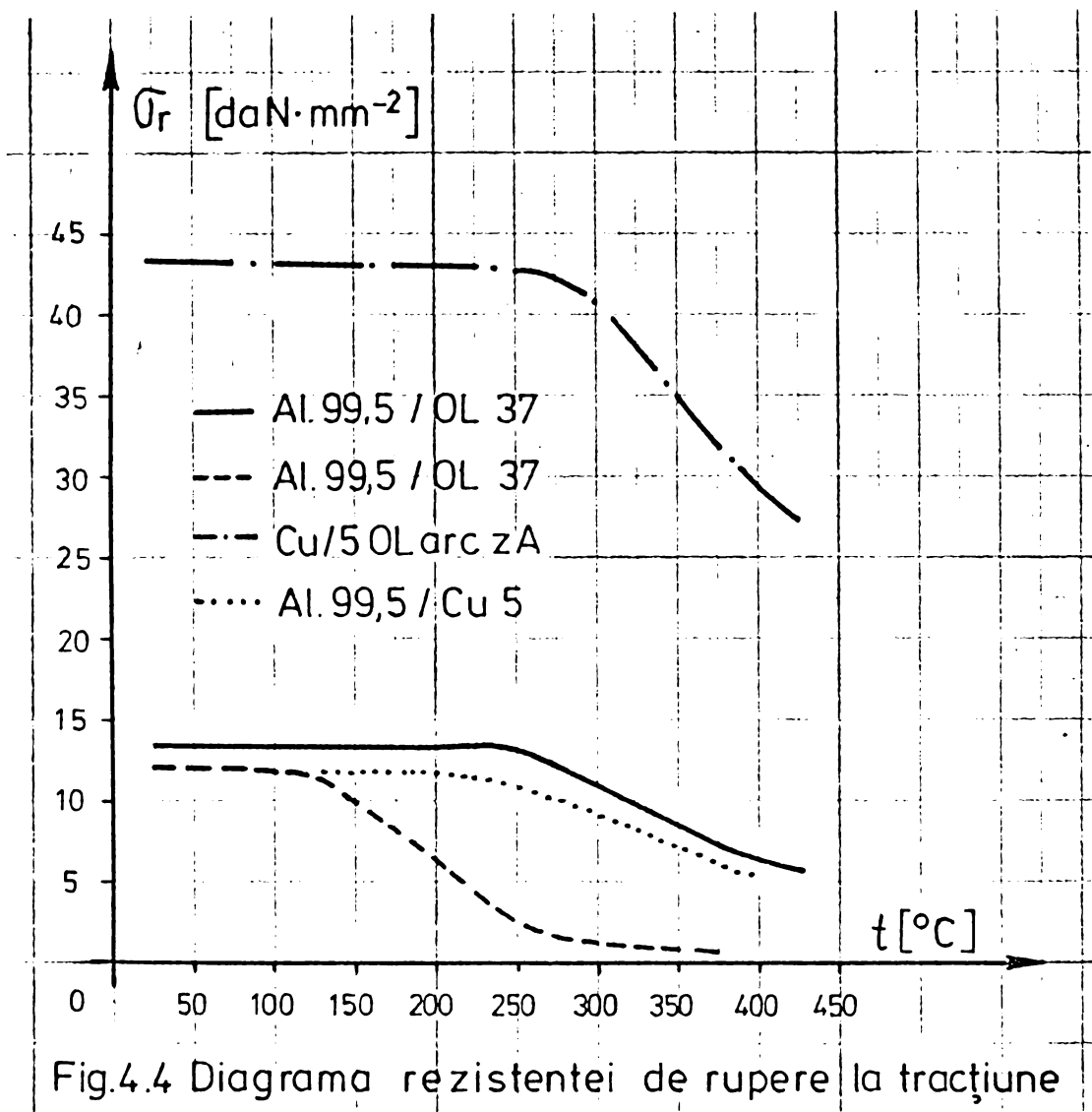
Dimensiunile epruvetelor au fost diferite, în funcție de plăcile sudate:

	$D$	$d$	$J$	$l$	$l_1$	$l_2$	(mm)
Al-OL	38,50	24,0	1,0	60	38	75	
Cu-OL	23,94	17,84	1,0	50	20	60	
Al-Cu	22,57	15,96	0,8	30	14	40	

Încercările au fost efectuate cu epruvete la temperatura camerei precum și cu epruvete menținute în cuptor la diferite temperaturi timp de 5 minute și răcite la temperatura de 20...25°C.

Plăcile bimetal Cl-OL pentru electrozii necesari întreprinderii de aluminiu - Slatina, trebuie să reziste la regimuri termice cuprinse între 175...260°C. Din analiza diagramei din

fig.4.4 se constată că plăcile Al-OL își păstrează rezistența și după 200 ore.



În cazul plăcilor subțiri sudate prin explozie, epruvetele au fost prelevate ca în fig.4.5, conform prevederilor STAS 200-75.

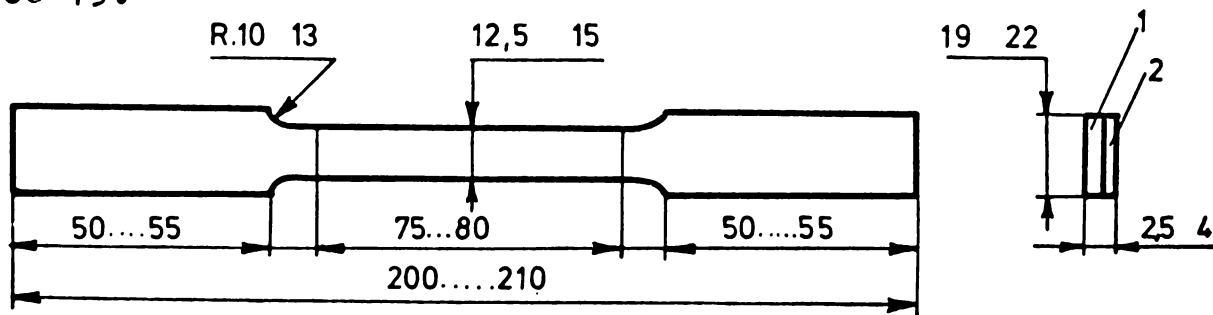


Fig.4.5 Epruvetă pentru încercarea la tracțiune

Încercările au avut un caracter de laborator, deoarece piesele sudate nu erau supuse la asemenea eforturi în timpul funcționării.

Plăcile care au fost sudate cu valuri mari și au apărut zone întinse de compuși intermetalici de tipul  $Al_3Fe$  (la plăcile Al-OL), au o rezistență scăzută la regimuri termice ce depășesc  $150^{\circ}C$ .

#### 4.5.1.2. Încercarea la încovoiere

Pentru această încercare s-au prelevat epruvete din piesele sudate (Cu-OL și Cu-Al) atât în direcția longitudinală cât și transversală a undei de șoc. Epruvetele au formă prismatică (fig.4.6) iar dimensiunile au fost alese în mod convenabil în funcție de grosimea pieselor sudate.

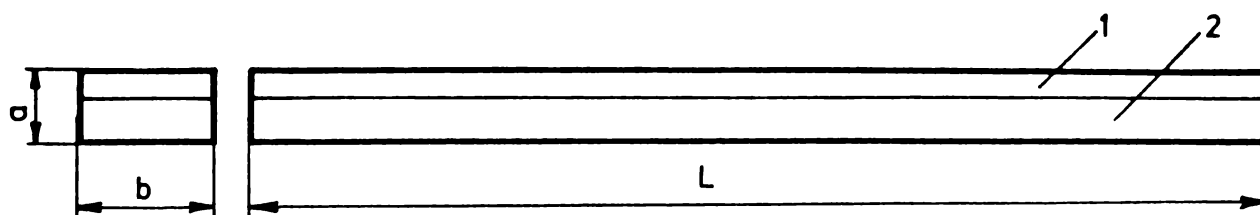


Fig.4.6 Epruvete pentru încercarea de încovoiere

Încercările la încovoiere nu au fost cerute prin contracte, însă au fost efectuate la nivel de laborator. Încercările au fost făcute în 3 variante:

- materialul sudat la partea convexă;
- materialul sudat la partea concavă;
- încovoierea paralelă cu suprafața la îmbinare.

Rezultatele au demonstrat că sudarea s-a făcut în bune condițiuni. Numai în cazurile în care nu s-a realizat o bună difuzie a metalelor sudate prin explozie, plăcile s-au desprins.

#### 4.5.1.3. Încercarea la forfecare

Această probă este recomandabilă în cazul sudării prin explozie a plăcilor subțiri precum și pentru metalele și aliajele relativ dure. La această încercare au fost supuse epruvete din toate piesele sudate prin explozie.

Epruvetele se prelevează ca în fig.4.7 a și se așează pe un suport (fig.4.7 b) după care se așează pe mașina de încercat la tracțiune-compresiune.

Din metalul de sudat (2) rămâne după prelucrare doar o mică bucată având dimensiunile stabilite în funcție de grosimea plăcii de sudat (pentru Al-OL, dimensiunile au fost  $10 \times 10 \times 10$ ).

O parte din epruvete au fost încercate la temperatura camerei iar o altă parte au fost ținute în cuptor la diferite temperaturi și apoi răcite la temperatura camerei.

Rezultatele încercărilor au fost înscrise în diagrama fig.4.9.

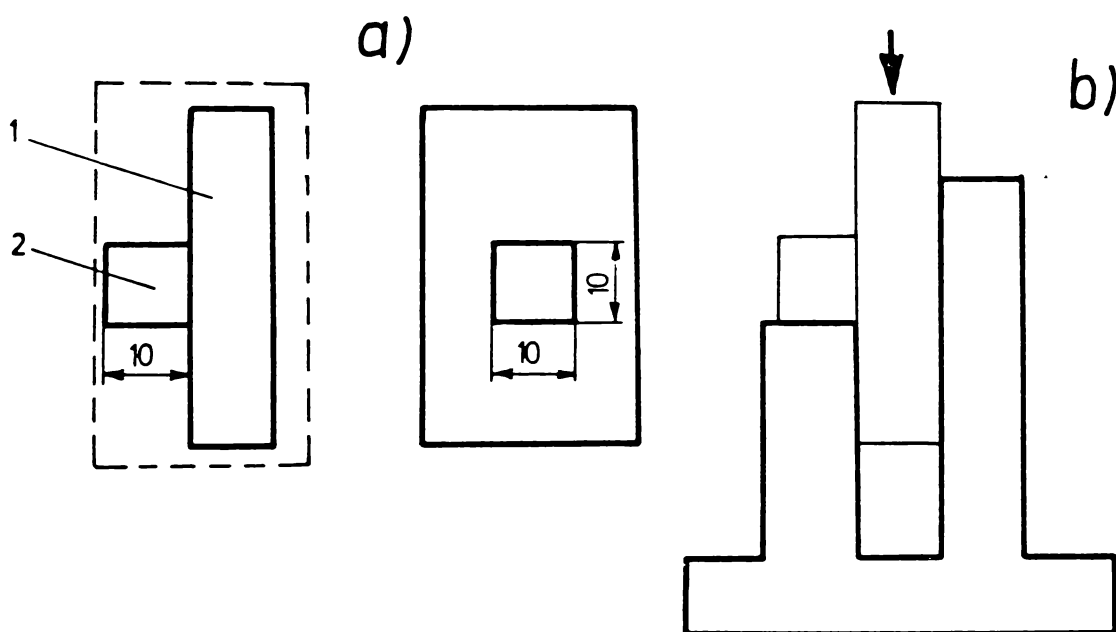


Fig.4.7 Epruveta pentru încercare la forfecare  
1-Placa de bază ; 2-Metalul de sudat.

Concomitent cu această probă s-au făcut încercări la forfecare-tracțiune. Epruvetele de formă prismatică au fost preluate la dimensiunile din fig.4.8, conform ASTM.A 264-44 T.

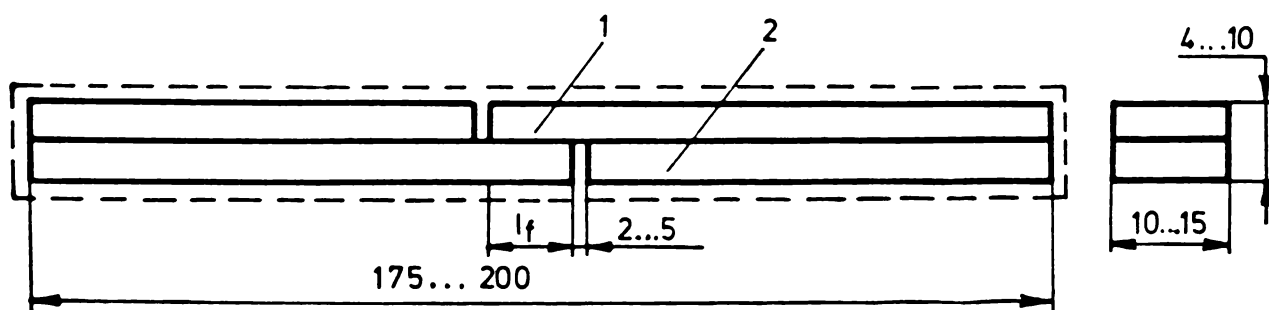


Fig.4.8 Epruveta pentru încercarea la forfecare-tracțiune

Lungimea de forfecare se alege ( $l_f = 10...15$  mm). Ca și în cazul precedent, o serie de epruvete au fost menținute în cuptor la diferite temperaturi câte 5 minute și răcite la temperatura camerei.

Din analiza diagramei (fig.4.9) rezultă că și după aceste încercări, la plăcile sudate prin explozie ruperile nu se produc în zona de îmbinare, valorile reflectând în principiu rezistența celui mai slab metal, adică a aluminiului.

După cum era de așteptat, rezistențele scad odată cu creșterea temperaturii, deoarece aluminiul din zona îmbinării începe să se recoacă. La aceasta se adaugă și prezența compuşilor intermetalici ce se formează în zona îmbinării prin explozie.

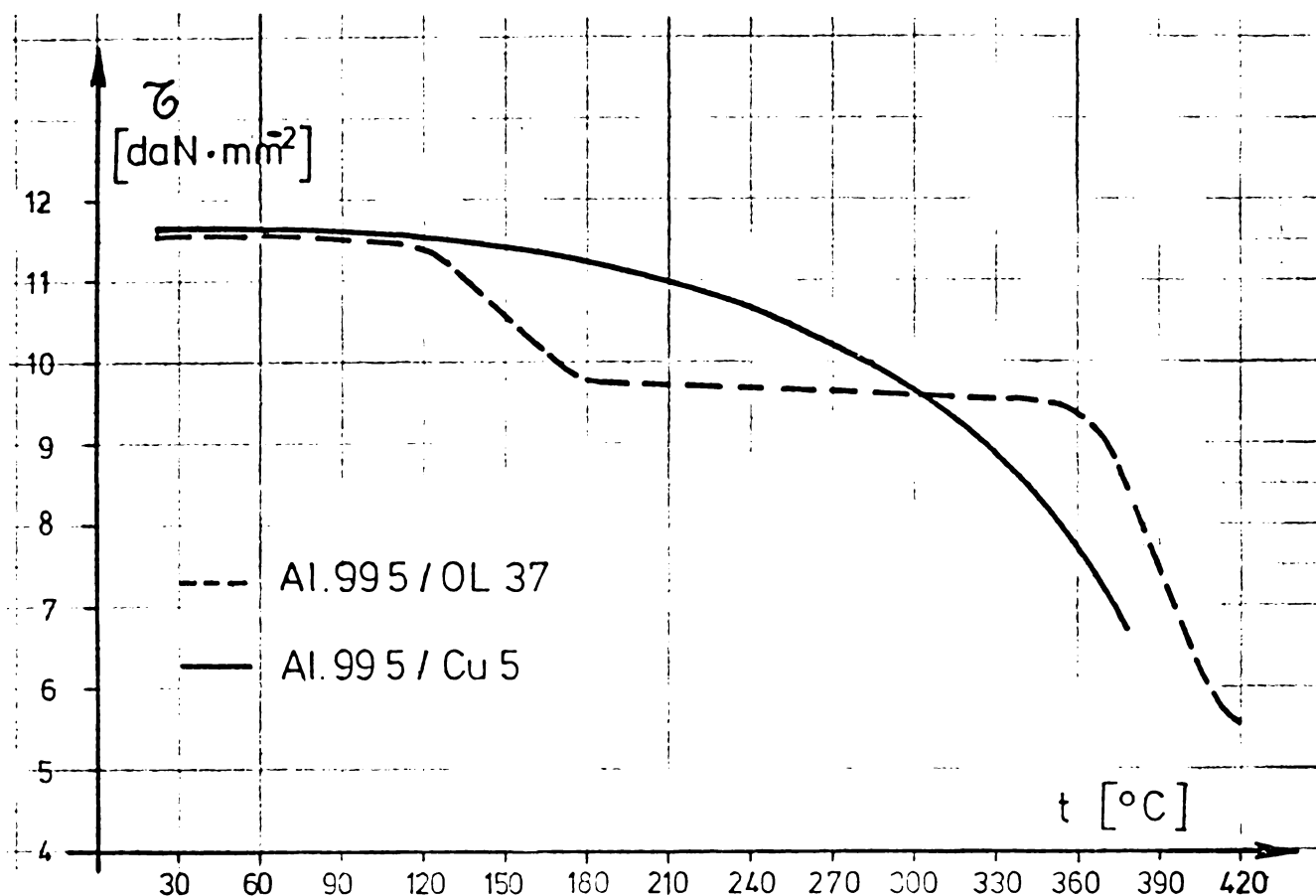


Fig.4.9 Diagrama rezistenței de rupere la forfecare

#### 4.5.1.4. Incercarea la smulgere

La această probă sînt supuse în special țevile sudate sau mandrinat prin explozie. S-au conceput apruvete atît pentru încercări de smulgere prin tracțiune (fig.4.10) cît și pentru încercări de smulgere prin compresiune (fig.4.11).

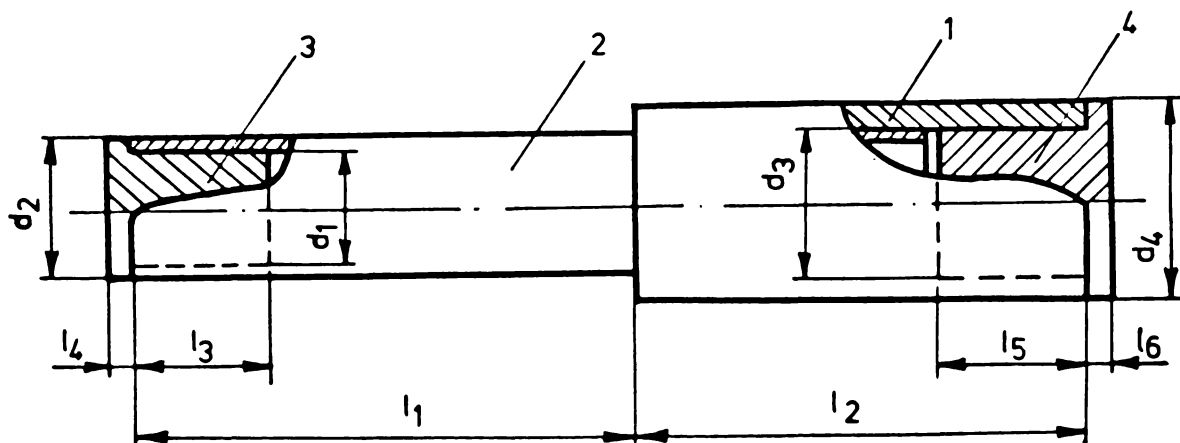


Fig.4.10 Epruveta pentru încercarea de smulgere prin tracțiune

Pentru construcția epruvetei din fig.4.10 se prelevează din eșantionul de placă tubulară bucăți (1), astfel ca fiecare să aibă o țevă (2). În același timp se confecționează și două dornuri (3) și (4) care au rolul de a înlătura strivirea epruvetei în bacurile mașinii de încercat la tracțiune. La capătul unde se montează dornul (4) epruveta se strunjește la exterior pe lungimea  $l_2$ , la interior pe lungimea  $l_5$  și diametrul  $d_3$ . Dimensiunile se aleg în mod convenabil în funcție de țevă și mărimea punții dintre țevi.

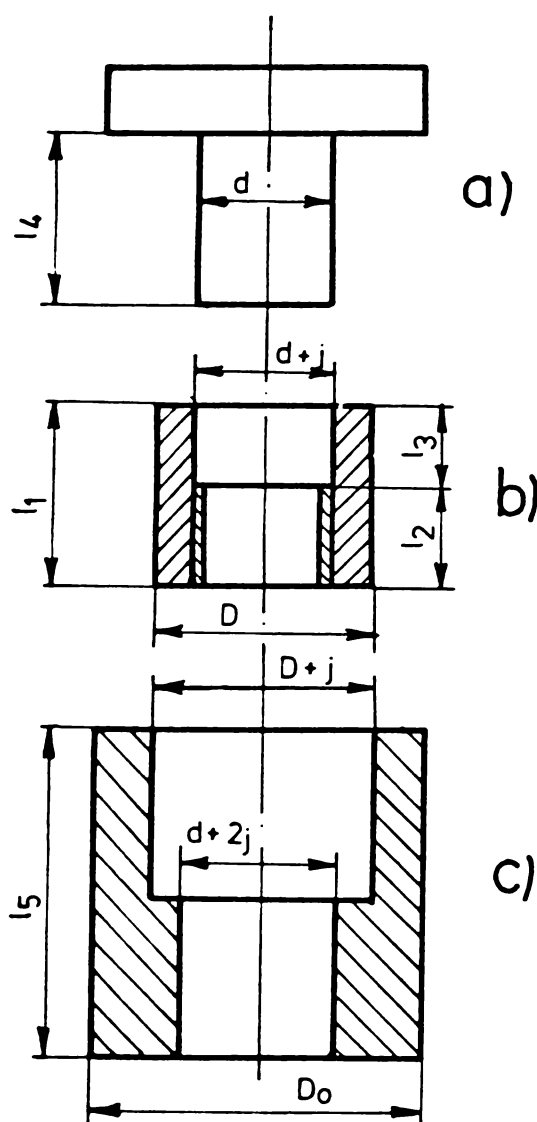


Fig.4.11 Epruvetă pentru smulgerea prin compresiune.

Epruvetele pentru încercarea de smulgere prin compresiune se prelevează ca în fig.4.11 b, construindu-se un dispozitiv format din poansonul 4.11 a și o bucă 4.11 c. Dimensiunile epruvetei și dispozitivului se stabilește în funcție de diametrul și grosimea țevii.

#### 4.5.1.5. Inercarea la torsiune

Epruvetele se prelevează din metalele sudate prin explozie sub formă de bare subțiri, prelucrate pe o lungime care să permită o torsionare completă pe toată lungimea sa.

Inercarea se desfășoară ca și în cazul metalelor omogene.

În același mod se poate încerca la torsiune și țevile sudate în placă tubulară. Pentru această încercare, epruvetele se vor preleva în același mod ca pentru probe de smulgere (fig.4.10).

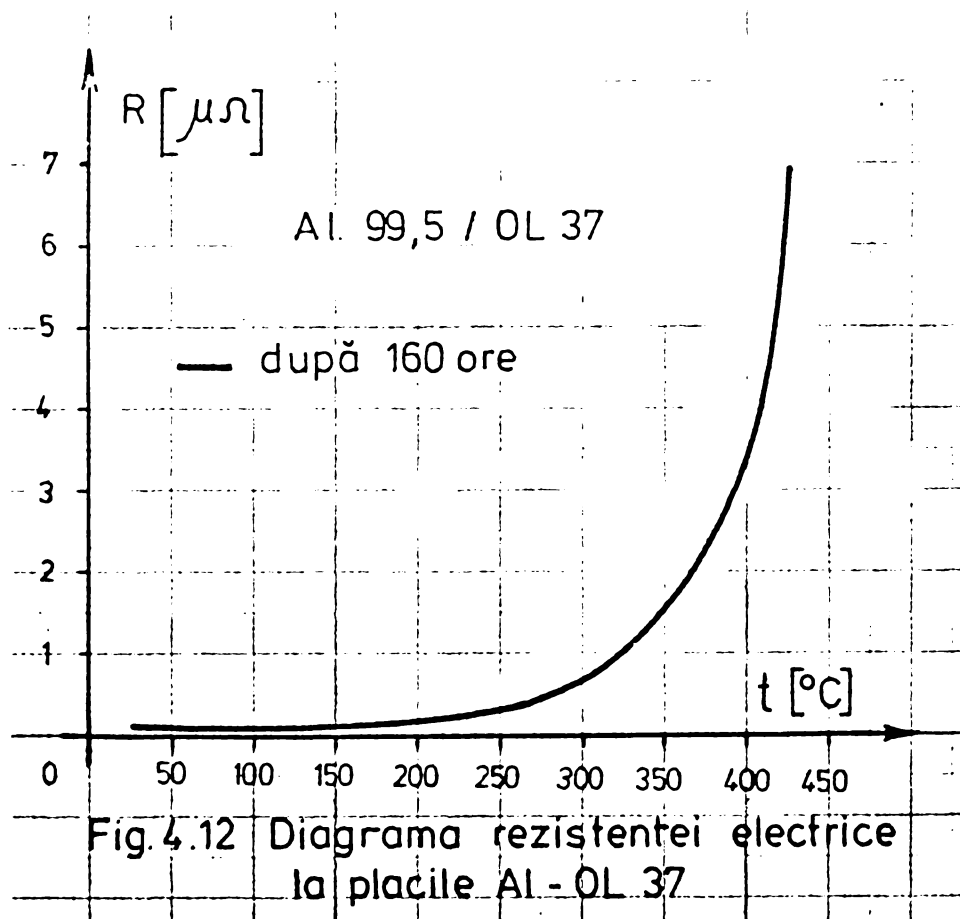
#### 4.5.1.6. Inercarea de reziliență

Pentru încercările de reziliență se prelevează epruvete Charpy, numai din metalul de bază. Dacă metalul de sudat are o grosime destul de mare, se pot preleva epruvete și din metalul de sudat. Încercările se fac pe ciocanul pendul conform specificației STAS 1400-73 și 6622-70.



#### 4.5.2. Verificarea rezistenței electrice

Această verificare se aplică numai plăcilor sudate prin explozie care au rolul de a permite trecerea curentului electric. Pentru aceasta, suprafața îmbinării trebuie să aibă o rezistență electrică scăzută. La plăcile Al-OL ce intră în compunerea electrozilor pentru elaborarea aluminiului, la aplicarea unor curenți puternici chiar o mică rezistență suplimentară va produce o pierdere importantă de energie electrică. Dacă sudura prin explozie este bine realizată, în suprafața de îmbinare se realizează o bună difuzie, fapt ce conduce la o rezistență electrică redusă. Însă compuşii intermetalici care se formează în sistemul îmbinării au o rezistență electrică mai mare decât în metalele de bază și se reduce mult eficiența îmbinării.



Pentru verificare s-au prelevat din plăcile Al-OL sudate prin explozie, epruvete cilindrice cu diametrul  $\phi = 4$  mm, suprafața de îmbinare fiind perpendiculară pe axa cilindrului.

În același timp s-au utilizat și epruvetele prelevate pentru probele metalografice. Măsurările au fost efectuate cu ajutorul unei punți calibrate cu citire de două zecimale.

Pe epruvetele cilindrice ( $\phi = 4$  mm) prelevate după sudare, s-au obținut rezistențe electrice de ordinul  $0,30 \dots 0,38 \mu\Omega$ .

O serie de epruvete au fost ținute în cuptor la diferite temperaturi și apoi răcite la temperatura camerei. Rezultatele măsurătorilor au fost înscrise în diagrama din fig.4.12.

Din analiza datelor rezultă că și după o menținere de 160 ore la temperatura de  $315^{\circ}\text{C}$ , rezistența se menține încă scăzută. Peste această temperatură, se mărește cantitatea de compuși intermetalici care contribuie la fragilizarea îmbinării. De aici concluzia că pentru a proteja îmbinările nu trebuie să se aplice o temperatură de regim peste  $260^{\circ}\text{C}$ .

Pentru îmbinările Al-Cu s-au prelevat același tip de epruvete (cilindrice cu  $\varnothing = 4 \text{ mm}$ ) iar măsurările au fost efectuate în două etape. O primă etapă a cuprins măsurările pe epruvete ținute doar 24 ore la diferite temperaturi iar în a doua etapă pe epruvete ținute la cuptor timp de 160 ore. Din analiza diagramei rezultă că în general la îmbinările Al-Cu după menținere la  $260^{\circ}$ ,

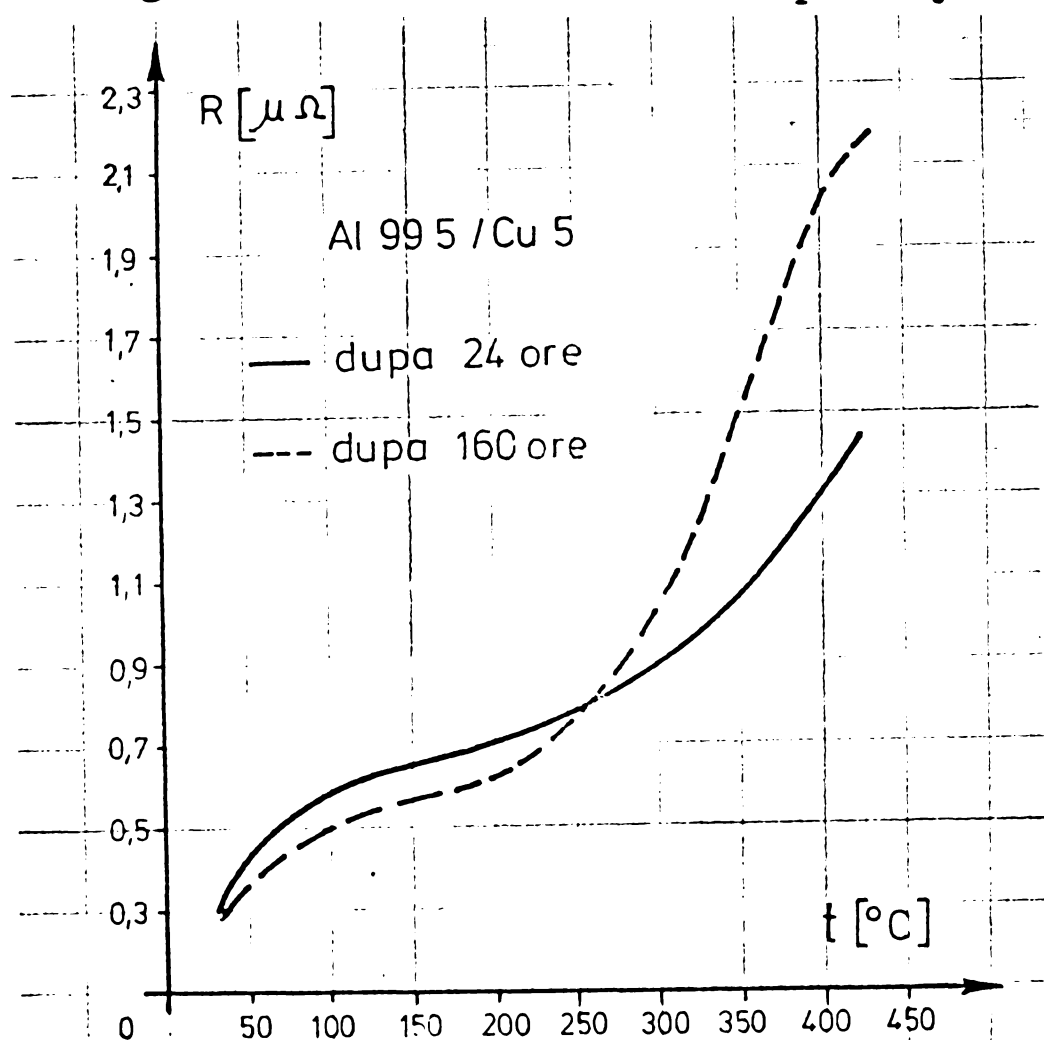


Fig. 4.13 Diagrama rezistenței electrice la plăcile Al - Cu

rezistențele electrice rămân scăzute. Din probele metalografice a rezultat că și în acest caz au apărut compuși intermetalici în zona de îmbinare.

Chiar și după mentinere la  $315^{\circ}$ , la îmbinările sudate prin explozie, rezistența electrică se menține în limite scăzute. La  $425^{\circ}\text{C}$  la plăcile Al-Cu rezistența electrică ajunge la 2,1 în timp ce la plăcile Al-OL 37 valorile urcă pînă la  $7,0 \mu\Omega$ .

#### 4.5.3. Probe metalografice și încercări tehnologice

Probele metalografice au constat din analize microstructurale efectuate pe eșantioane tăiate longitudinal, respectiv transversal pe direcția unde de șoc. S-au utilizat și șlifuri tăiate din epruvete ce au fost încercate la verificările anterioare.

Analiztele au avut un dublu scop:

- urmărirea modului de realizare a sudurii prin explozie;

- prezența unor compuși intermetalici.

În scopul punerii în evidență a structurilor, după pregătire, șlifurile au fost ataseate cu următorii reactivi:

- acid fluorhidric ( $0,5 \text{ cm}^3$  acid fluorhidric 40% în  $100 \text{ cm}^3$  apă) pentru microstructură, și

- soluție de NaOH (10 g NaOH în  $100 \text{ cm}^3$  apă) pentru punerea în evidență a compușilor intermetalici  $\text{Al}_3\text{Fe}$ . Reactivul se menține timp de 5 sec. pe șliful încălzit la  $70^{\circ}\text{C}$ , după care zona se colorează în cafeniu închis sub formă de ace sau flori.

Probele metalografice (fig. 4.14 și 4.15) au demonstrat buna calitate a îmbinării. Se observă destul de clar valurile care se formează la îmbinările Al-OL și Cu-OL.

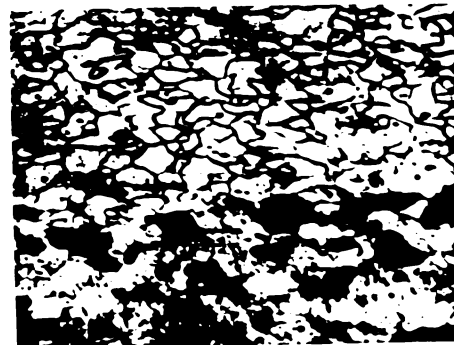
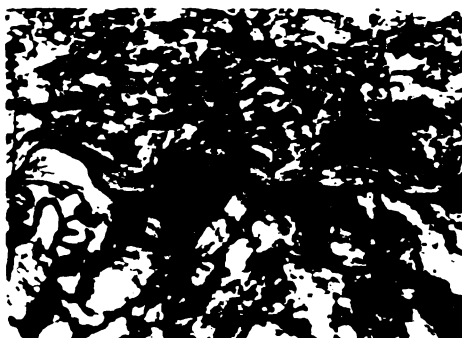


Fig. 4.14 - Zona îmbinării la sudarea Al-OL

Fig. 4.15 - Zona îmbinării la sudarea Cu-OL

Aceleași epruvete au fost folosite pentru măsurarea durității și a grosimii plăcilor. Duritatea a fost măsurată pe un aparat Brinell cu bilă de  $\phi 10 \text{ mm}$ ;  $F = 500 \text{ kg}$ ;  $t = 30 \text{ s}$ .

INSTITUTUL  
DE RESEARCH  
INSTITUTE

S-au obținut următoarele rezultate (pentru aluminiu):

HB inițial 18,6...19,2                      HB după sudare 23,8...26,1.

Grosimea plăcii de aluminiu s-a redus cu 0,15...0,22 mm.  
Înălțimea valurilor 0,12...3 mm.

#### 4.5.4. Controlul defectoscopic

Controlul defectoscopic a fost efectuat prin ultrasunete cu un aparat "Sonorizor". Controlul s-a efectuat prin așezarea sondei pe placa de bază a piesei sudate (pe oțel). Întrucât vitezele de propagarea sunetului în cele două piese sudate au valori apropiate, unda de reflexie (ecoul) a apărut în locurile nesudate, deci în zonele de discontinuitate ale suprafeței îmbinării.

Au fost cazuri când, deși sudate, au fost semnalate goluri care prin forma lor nu apăreau ca zone nesudate. Piesele respective au fost secționate și s-a constatat că în zonele respective erau goluri în placa din oțel laminat. Aceasta a condus la luarea măsurii ca înainte de sudare, plăcile de oțel să fie supuse controlului ultrasonic.

Pentru piesele sudate prin explozie compusă din metale la care diferența vitezelor de propagare a sunetului este mare, s-a utilizat un aparat ultrasonic ce lucrează prin rezonanță.

#### 4.5.5. Verificarea etanșeității

Verificarea etanșeității se face în cazul sudării și mandrinării prin explozie a țevilor la placa tubulară. În practica celor mai multe firme, controlul etanșeității se face cu ajutorul heliului sub presiune și vidului.

Pentru această verificare am conceput o epruvetă prelevată din esanșionul din placă tubulară pentru probe. Epruveta se prelucrează prin strunjire având forma cilindrică (fig.4.16) cu două gulere de care se fixează prin șuruburi cu piulițe două capace. Epruveta trebuie să cuprindă 10...15 țevi.

La un capăt se fixează un capac cilindric la care se montează recordul pentru legătura cu recipientul de heliu. Înainte de fixarea capacului la țevi, se pun dopuri de cauciuc. La celălalt capăt se fixează un alt capac cilindric cu două racorduri, unul pentru legătura la aparatul de măsură (AM) de tipul spectrometrului a scurșerii heliului prin îmbinările țevilor mandrinate sau prin explozie iar celălalt pentru legătura cu instalația de vid (I.V.).

Pentru schimbătoarele de căldură din centralele nucleare electrice este necesar ca la verificarea simultană a tuturor

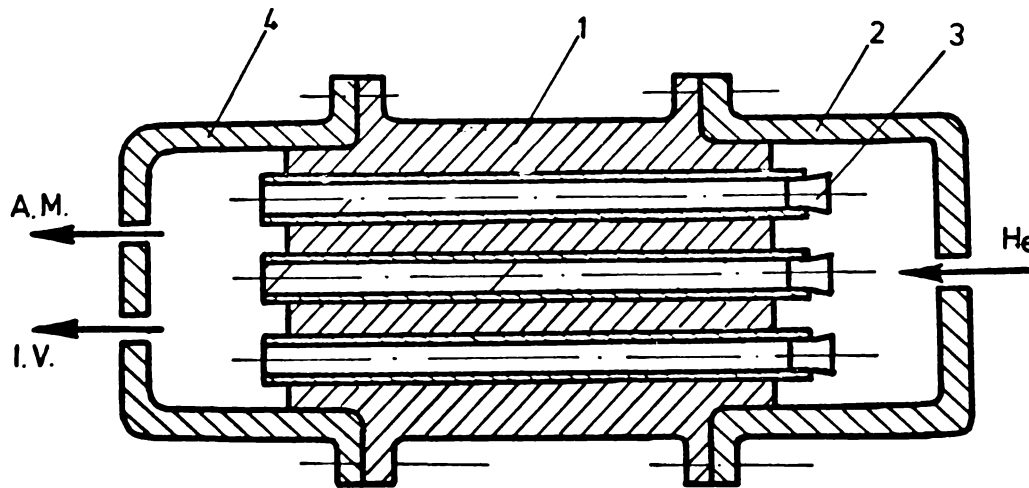


Fig. 4.16 Montajul pentru verificarea etanșeității

- 1-Eșantion placă - țevi;
- 2-Capac cu un racord;
- 3-Dop de cauciuc
- 4-Capac cu doua racorduri.

îmbinărilor dintre țevi și placa tubulară scăpările de He să fie în domeniul  $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-8}$  torr. l/s, când diferența de presiune pe cele două fețe ale plăcii tubulare este de  $1 \text{ daN/cm}^2$ .

**5. CERCETARI PRIVIND APLICAREA SUDARII PRIN  
EXPLOZIE IN INDUSTRIA CONSTRUCTIILOR DE  
MASINI**

- 5.1. Cercetări și studii pentru sudarea prin explozie a unor repere și subsansamble din compunerea hidrogeneratoarelor**
- 5.2. Cercetări și studii privind aplicarea mandrinării prin explozie la realizarea generatorului de aburi din centrale nucleare-electrice**
- 5.3. Cercetări privind realizarea în țară a plăcilor Al-OL pentru metalurgia aluminiului**

## 5. CERCETARI PRIVINE APLICAREA SUDURII PRIN EXPLOZIE IN INDUSTRIA CONSTRUCTIILOR DE MASINI SI METALUR- GIA ALUMINIULUI

De la început, cercetările întreprinse au urmărit sta-  
bilirea tehnologiei de lucru pentru a putea fi introdusă în pro-  
cesele de fabricare a diferitelor repere, subansamble și ansamble  
componente necesare industriei construcțiilor de mașini precum și  
altor ramuri industriale.

În paralel s-a căutat să se studieze fenomenele ce au  
loc la sudarea și mandrinarea prin explozie, precum și diferitele  
aspecte tehnologice ce apar în condițiile utilizării în totali-  
tate a materialelor ce se produc în țară.

### 5.1. Cercetări și studii pentru sudarea prin explozie a unor repere și subansamble din compunerea hidro- generatoarelor

În conformitate cu clauzele contractului de cercetare  
nr.850/1972 pentru întreprinderea constructoare de mașini + Reșița,  
trebuie să se elaboreze tehnologia de sudare prin explozie a lagă-  
relor axial-radiale din Cu-OL ale hidrogenatoarelor.

La baza cercetărilor aplicative a stat Protocolul pri-  
vind placarea prin explozie a lagărelor axiale-radiale și a butu-  
cilor de hidrogenatoare și alte agregate. Acest protocol a fost  
elaborat de colectivul din Academia militară condus de autor în  
colaborare cu colectivul de cercetare din I.P.T.V.- T, catedra de  
Utilajul și tehnologia sudării, condus de prof.dr.doc.ing.Vl.  
Popovici.

În perioada 1972-1974, etapele și fazele de cercetare  
au fost:

- stabilirea parametrilor de lucru pe mostre de dimen-  
siuni reduse;
- experimentări de sudare prin explozie pe probe de di-  
mensiuni reduse;
- analize de laborator asupra materialelor sudate și  
concluzii asupra calității;
- elaborarea tehnologiei de lucru pentru sudarea unor  
piese de dimensiuni mici;
- proiectarea și construirea S.D.V.-urilor, realizarea  
amenajărilor și pregătirea materialelor necesare sudării;
- experimentări de sudare prin explozie;

- efectuarea verificărilor, încercărilor și probelor privind calitatea pieselor sudate prin explozie.

Concomitent cu aceste cercetări, conform obligațiilor din anexa 2 a contractului, s-au efectuat cercetări de laborator pentru producerea în țară a explozivilor plastici precum și a unor explozivi după rețete proprii.

Concluziile rezultate din experimentări au impus efectuarea unor cercetări pentru realizarea unui detonator sigur în funcționare și manipulare.

S-a avut în vedere faptul că procedeul de sudare prin explozie trebuie să se execute atât în secții speciale, centralizat pe minister cât și la uzină într-un atelier amenajat în mod corespunzător.

În cadrul experimentărilor s-a utilizat trotilul, presat, turnat sau flegmatizat, iar pentru inițiere detonatoare pirotehnice cu aprindere electrică.

Plăcile au avut dimensiunile 136 x 68 x 10 (placa de bază din oțel), iar grosimea plăcii de sudat (Cu) a fost între 2 și 5 mm.

Tehnologia de lucru, în general, a fost descrisă în cap.3.1. O problemă grea a constituit-o detonarea explozivului, deoarece capsele nr.8 folosite sînt extrem de puternice, la detonație împrăștiind stratul de exploziv. Ca urmare a cercetărilor întreprinse, s-a ajuns la schema detonatorului electric prezentat la pct.2.6.2.3.

O etapă importantă a cercetărilor întreprinse de autor, a constat în elaborarea metodelor de calcul analitic al parametrilor de lucru [57]. Calculul parametrilor de lucru s-a efectuat pe baza studiului fenomenelor fizice [56], a proceselor metalurgice și termice [58] precum și metodele tehnologice la sudarea prin explozie [59].

În cadrul programului, cercetările s-au extins pentru a se experimenta sudarea prin explozie în vid. În acest sens a fost elaborat în colaborare, proiectul instalației experimentale de sudare prin explozie în vid [60].

Din cauză că I.C.M.- Reșița, a sistat lucrările în acest domeniu, cercetările nu au fost finalizate.



## 5.2. Cercetări și studii privind aplicarea mandrinării prin explozie la realizarea generatoarelor de abur din centralele nucleare electrice

Cercetările în acest domeniu au fost desfășurate pe baza contractului 275/1975 pentru întreprinderea de mașini grele - București prin Institutul de cercetări și proiectări pentru tehnologia construcțiilor de mașini - București.

Condițiile impuse de proiect:

- placa tubulară din oțel 22 NiMoCr 37 avînd  $S = 508$  mm;
- țevile din Incoloy 800 de dimensiuni  $20 \times 1,5$  mm;
- diametrul găurilor din placă tubulară  $20,3^{+0,05}$  mm;
- pasul găurilor  $26 \pm 0,2$  mm;
- jocul maxim  $0,35$  mm;
- jocul minim  $0,12$  mm;
- rețeaua de țevi: triunghiulară,

au creiat probleme destul de grele pentru calculul parametrilor de lucru, cu atît mai mult cu cît literatura de specialitate, nu descrie asemenea tehnologii.

Programul de lucru s-a întins pe două etape:

- studiul tehnologic privind îmbinarea țevilor la placă tubulară folosind mandrinarea și sudarea prin explozie [63] și
- proiectarea și realizarea S.D.V.-urilor, utilajelor și instalațiilor [64].

În cadrul primei etape, cercetările au cuprins:

- stabilirea geometriei de mandrinare prin explozie;
- calculul parametrilor de lucru pentru mandrinare prin explozie a țevilor la placă tubulară;
- întocmirea fișelor tehnologice pentru pregătirea exploziei și pentru mandrinare;
- tehnologia de mandrinare prin explozie a țevilor la placă tubulară;
- verificările, probele și încercările calității îmbinărilor realizate;
- stabilirea măsurilor de protecția muncii;
- aplicarea tehnologiei la scară industrială.

În a doua etapă, s-au desfășurat activități de proiectare a S.D.V.-urilor, utilajelor și instalațiilor pentru mandrinarea prin explozie a țevilor la placă tubulară. Concomitent s-au

proiectat și executat adaptările la instalațiile existente în Academia militară.

Deoarece beneficiarul nu a dat cercetătorului materialele pentru experimentări, experimentările au fost numai la nivel de laborator cu materialele autorului.

În finalul acestor cercetări, s-a stabilit tehnologia de mandrinare prin explozie ce a fost predată beneficiarului, însă acesta a renunțat la continuarea cercetărilor.

### 5.3. Cercetări privind realizarea în țară a plăcilor Al-OL pentru metalurgia aluminiului

Prin contractul de cercetare nr.2370/1976, s-a stabilit să se realizeze pentru Intreprinderea de Aluminiu - Slatina, plăcuțe bimetale Al-OL sudate prin explozie, concomitent cu stabilirea tehnologiei de sudare și a utilajelor aferente necesare.

Cercetările au fost îndreptate spre următoarele direcții:

- stabilirea tehnologiei de îmbinare a plăcuțelor Al-OL;
- alegerea materialelor pentru sudarea prin explozie;
- calculul parametrilor de lucru;
- experimentări efectuate cu piese de dimensiuni reduse;
- tehnologia de sudare prin explozie a plăcilor Al-OL;
- metodologia de verificare și control a calității îmbinărilor Al-OL sudate prin explozie;
- stabilirea operațiunilor ulterioare executării sudării;
- proiectarea utilajelor și S.D.V.-urilor necesare sudării prin explozie;
- colaborarea cu Combinatul Chimic Făgăraș pentru preluarea producției de plăci Al-OL și realizarea de noi explozivi plastici.

Toate prevederile contractuale au fost realizate folosind explozivi produși în țară. O greutate a constituit-o faptul că plăcile de bază au fost tăiate din tablă de OL 37 în loc de OLC 10 cum sînt plăcile din import. Plăcile sudate prin explozie și verificate corespund parametrilor proiectați.

Conform înțelegerilor încheiate în luna iulie 1977 cu Combinatul chimic Făgăraș, autorul a primit în iulie 1978 noi sorturi de explozivi plastici pentru experimentări. Cu ocazia primirii materialelor, autorul a predat Combinatului chimic Făgăraș, tehnologia de sudare prin explozie a plăcilor Al-OL.

**6. APLICAREA SUDARII PRIN EXPLOZIE LA SCARA  
INDUSTRIALA**

- 6.1. Organizarea atelierului pentru sudarea prin explozie a metalelor în aer.**
- 6.2. Organizarea atelierului pentru sudarea prin explozie în vid.**
- 6.3. Organizarea atelierului mobil pentru sudarea și mandrinarea prin explozie a subansamblelor din compunerea centralelor nucleare electrice.**

## 6. APLICAREA SUDARII PRIN EXPLOZIE LA SCARA INDUSTRIALA

Ca urmare a experimentărilor de laborator și în poli-gon, s-a putut trece la aplicarea sudării prin explozie la scară industrială. Acestea cu atât mai mult cu cât toate materialele necesare se găsesc în țară. În acest sens, pentru fiecare beneficiar în parte (I.C.M.-Reșița, I.M.G.București și I.A.I.Slatina) s-au întocmit teme de proiectare a atelierelor de sudare prin explozie. Toate acestea au fost elaborate de autor în scopul ca fiecare întreprindere să-și poată realiza singură reperatele su-date prin explozie de care are nevoie.

Având în vedere posibilitățile de sudare prin explozie, precum și felul reperelor ce trebuiesc îmbinate s-au întocmit teme de proiectare și elaborat organizarea următoarelor ateliere:

- atelier pentru sudarea prin explozie în aer;
- atelier pentru sudarea prin explozie în vid;
- atelier pentru sudarea prin explozie în aer și în vid;
- atelier mobil pentru sudarea și mandrinarea țevilor la placa tubulară de dimensiuni mari.

Fiecare atelier poate fi realizat de către beneficiar în forțele proprii și cheltuieli minime.

### 6.1. Organizarea atelierelor pentru sudarea prin explozie a metalelor în aer

Atelierul se poate amplasa în incinta întreprinderii la extremitatea perimetrului, către câmp. Atelierul se poate amenaja fie într-o clădire existentă, fie prin amenajări treptate în cadrul planului de dezvoltare a întreprinderii. Atelierul se poate amenaja și organiza în 3 etape, fiecare etapă constituind o extindere pe module care să nu afecteze construcția de bază iar funcționarea atelierului să nu sufere.

Pentru exemplificare se ia cazul întreprinderii de alu-miniu - Slatina.

În prima etapă atelierul va avea dotarea minimă pentru sudarea prin explozie a 6000...10.000 plăcuțe necesare pentru un an de producție.

Atelierul va avea două platforme (fig.6.1): una acoperită și una descoperită.

**Platforma acoperită va avea următoarele compartimente:**

- camera de curățire și asamblare a plăcilor;
- camera de pregătire a explozivilor;
- magazia pentru S.D.V.-uri și A.M.C.-uri;
- punct C.T.C.

**Platforma descoperită va avea:**

- 2...4 locuri pentru sudarea prin explozie;
- depozitul de explozivi (buncăr).

**Platforma acoperită va avea podeaua de beton iar pereții din beton sau cărămidă cu o înălțime de 3...4 m, fiind acoperită cu un planșeu de beton sau plăci ondulate din azbociment. Platforma acoperită se poate construi și din plăci prefabricate.**

**Încălzirea încăperilor, în special a camerelor pentru curățire și asamblare a plăcuțelor, pregătirea explozivilor și a punctului C.T.C. se poate face cu ajutorul unor aeroterme dacă este prea departe sau cu instalații cu apă sau abur dacă este posibil.**

**Platforma descoperită va fi construită dintr-un planșeu de beton armat cu grosimea de 20...40 cm. Locurile de lucru vor fi despărțite prin pereți de beton armat cu înălțimea de 1,5...2 m sau prin panouri de tablă cu grosimea de 20 mm. În interiorul fiecărui loc de lucru se va așeza câte un cilindru de oțel înalt de 1000 mm și  $\phi = 3000...4000$  mm. sau platforme tunel.**

**Camera de curățire și asamblare a plăcuțelor pentru sudare va fi dotată cu două bancuri de lucru cu câte o menghină fiecare, un dulap de fier pentru materialele de curățire și asamblare.**

**Pe măsura dezvoltării, camera de asamblare va fi dotată cu mașini unelte (de frezat, de găurit, de rectificat) transformându-se în atelier mecanic și lăcătușerie.**

**Camera pentru pregătirea explozivilor va avea un banchet de lucru și un dulap de fier pentru scule și materiale de întreținere. Camera va fi dotată cu un dispozitiv de laminare a foililor de exploziv plastic.**

**La punctul de C.T.C. vor fi două mese de lucru și rafturi pentru piesele de sudat, piese de sudat de controlat precum și aparatura de control ultrasonic.**

**Magazia de S.D.V.-uri și A.M.C.-uri va fi dotată cu rafturi pentru dispozitivele de fixarea plăcilor de sudat prin**

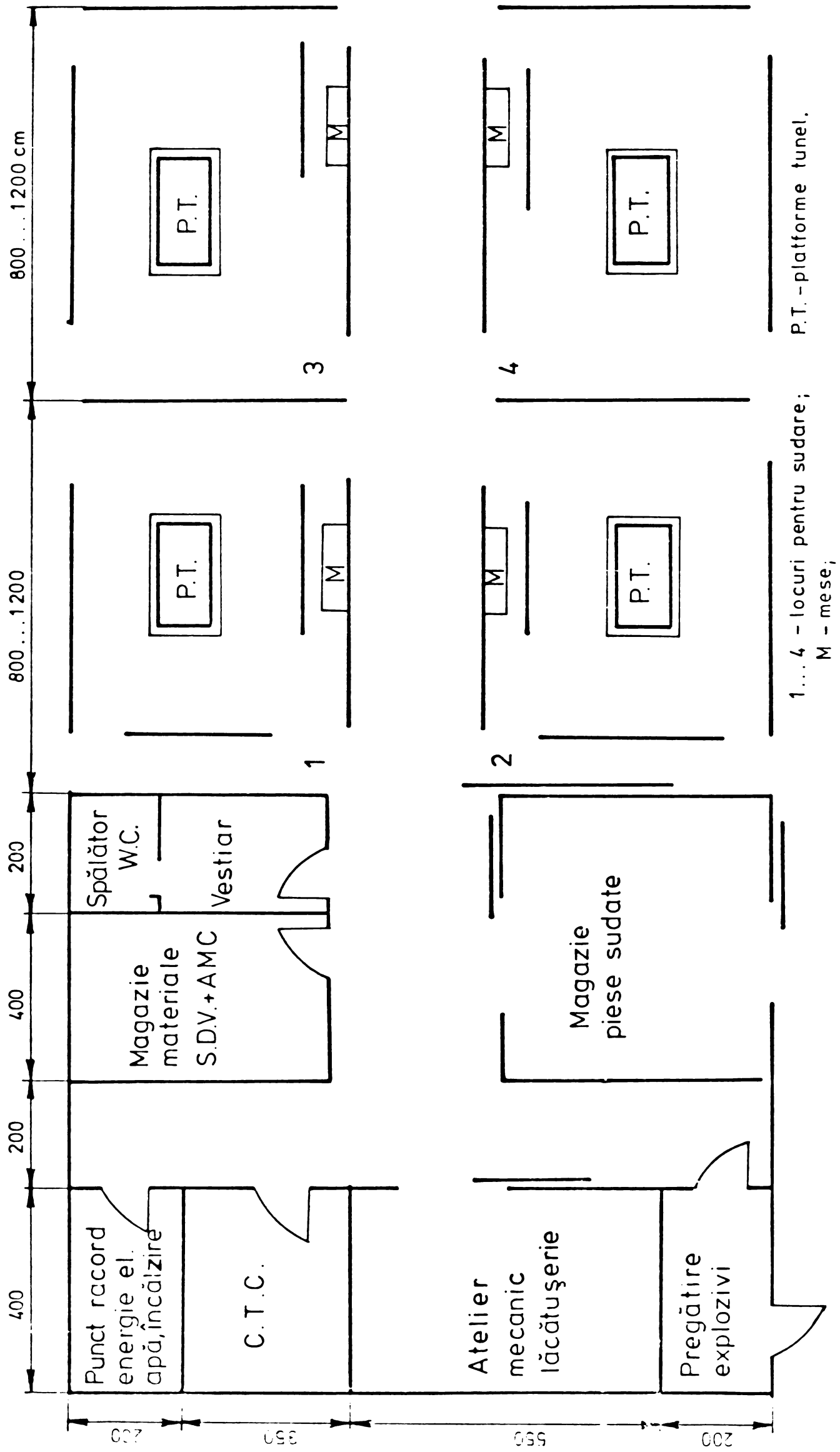


Fig. 6.1 Schița atelierului de sudare prin explozie în aer

explozie, detonatoarele electronice, instrumentele și aparatele de măsură și control.

În prima etapă, prelucrarea plăcilor înainte și după ce au fost sudate prin explozie precum și eventualele tratamente termice ulterioare se vor face în atelierul de sudură. În etapele de dezvoltare, acestea pot să fie amenajate chiar la atelierul de sudură prin explozie.

Verificările, încercările și probele vor fi efectuate în laboratoarele întreprinderii. În cadrul planului de dezvoltare a atelierului de sudură, punctul de C.T.C. se poate dota cu aparatură proprie (microscop metalografic și un dispozitiv (mașină) de încercat la tracțiune.

Depozitul pentru explozivi se va construi din beton având dimensiuni reduse (200 x 200 x 250 cm), la suprafață sau îngropat. Depozitul va fi plasat la o distanță de 50...100 m de atelier sau orice altă clădire.

Transportul materialelor la și de la atelierul de sudură se va face cu un electrocar.

Suprafețele construite se pot esalonă pe etape, așa cum se prezintă în tabelul 6.1, într-o variantă studiată pentru întreprinderea de aluminiu - Slatina (Tema de proiectare la contractul de cercetare științifică nr.2370/1976).

Tabel 6.1

ETAPA \ DESTINATIA	I [m <sup>2</sup> ]	II [m <sup>2</sup> ]	III [m <sup>2</sup> ]
Platforma acoperită	80	150	150
Platforma descoperită	130	260	390
Depozit de exploziv	4	4	4
SUPRAFAȚA TOTALA	214	414	544

Atelierul de sudură prin explozie necesită, în funcție de etapa de dezvoltare, 4...18 oameni în specialitățile specificate în tabelul 6.2.

Specializarea și autorizarea personalului care va lucra în atelierul de sudură prin explozie în aer se poate asigura de către Combinatul chimic Făgăraș în colaborare cu colectivul de cercetare din Academia militară condus de autor.

Tabel 6.2

Nr. crt.	SPECIALITATEA	E t a p a		
		I	II	III
1.	Inginer tehnolog	-	-	1
2.	Subinginer tehnolog	1	1	1
3.	Mastru artificier	1	1	1
4.	Mastru mecanic	-	-	1
5.	Muncitori artificieri	2	4	8
6.	Muncitori (mașini unelte)	-	2	4
7.	Muncitor electrician	-	1	1
8.	Magazioner	-	1	1
T O T A L		4	10	18

Tema de proiectare a unui asemenea atelier a fost predată Combinatului chimic Făgăraș, care a preluat producerea plăcilor bimetal Al-OL folosind sudarea prin explozie.

#### 6.2. Organizarea atelierului pentru sudarea prin explozie în vid

Atelierul pentru sudare prin explozie în vid va avea aceeași organizare ca și atelierul pentru sudarea prin explozie în aer, cu deosebirea că pe platformele de lucru scoperite vor ocupa o suprafață mai mare. Aceasta datorită faptului că pe această platformă se vor amplasa camerele de vid pentru sudarea prin explozie și utilajele anexă.

În acest caz camerele de vid vor avea o capacitate mai mare, de 1,5...2,5 m<sup>3</sup>.

La început se vor amplasa două instalații de sudare prin explozie în vid și apoi în etapele de dezvoltare se va ajunge la 4,6 sau 8 instalații. Schița unui asemenea atelier este prezentată



în fig.6.2. Lîngă platforma acoperită se va construi și o platformă descoperită.

Platforma acoperită se poate construi din elemente prefabricate tip hală (de dimensiuni reduse) cu despărțituri care să limiteze camerele de lucru.

Instalațiile de sudare prin explozie în vid vor fi despărțite prin panouri de beton sau plăci din tablă de OL 37 cu grosimea de 20...30 mm și înălțimea de 2,5...3 m.

Si în acest caz, personalul necesar va fi același ca și în cazul atelierelor de sudură prin explozie în aer.

Punctul de racord la energia electrică, apă și încălzire va fi dotat în etapele de dezvoltare și pentru racordul la coloana de aer comprimat.

Atelierul de sudură prin explozie în vid va fi înzestrat cu aparate pentru măsurarea vidului (cîte un aparat pentru fiecare instalație).

Conductele de evacuare a aerului vor fi racordate la o țeavă ce iese în afara halei.

S-au elaborat teme de proiectare a unui asemenea atelier pentru I.C.M.Reșița și I.Al. Slatina.

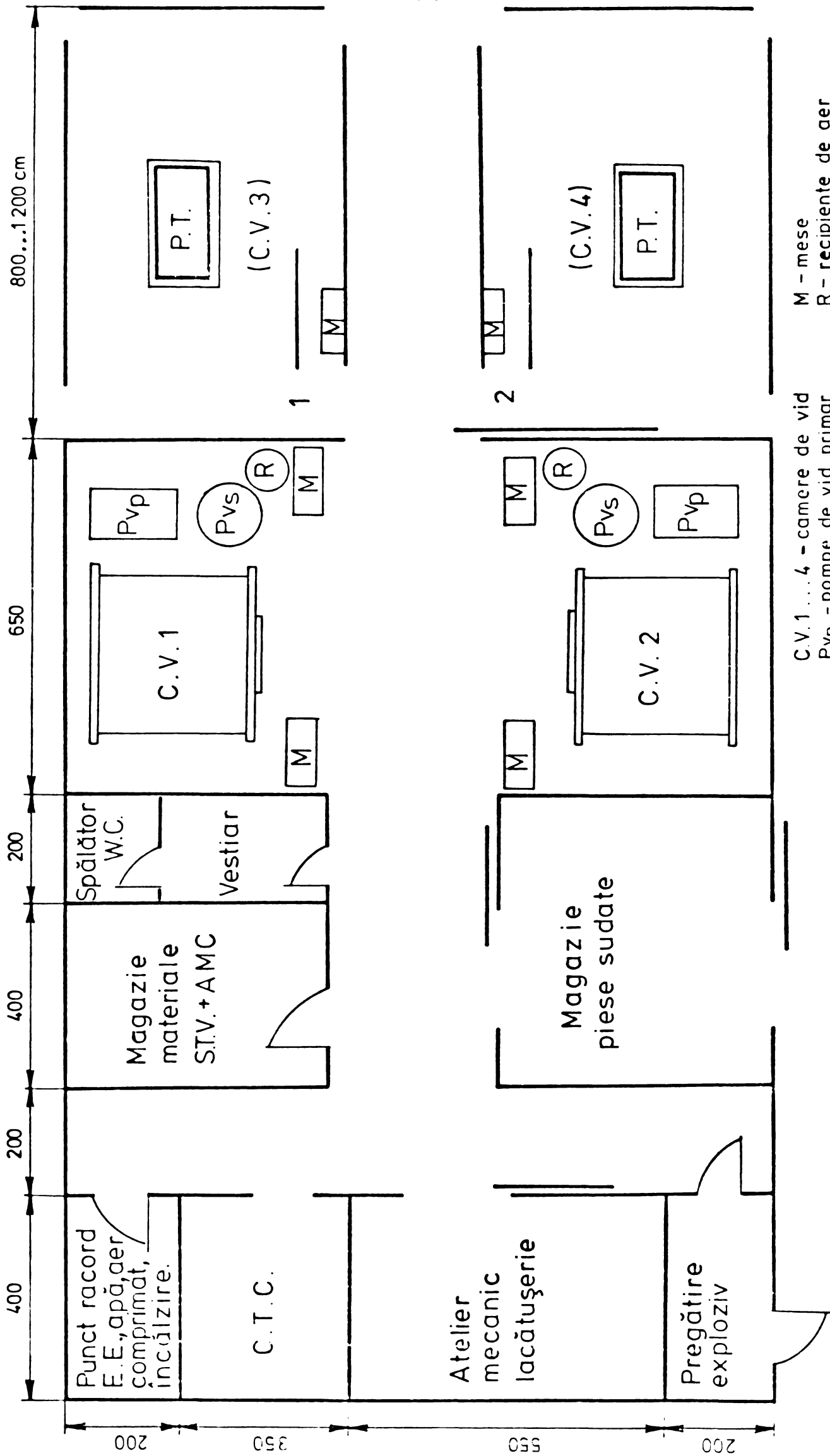
Au fost elaborate teme de proiectare și pentru ateliere de lucru mixte (în aer și în vid).

### 6.3. Organizarea atelierului mobil pentru sudarea și mandrinarea prin explozie a subansamblelor generatorului de abur al centralei nucleare electrice

Avînd în vedere lungimea țevilor (3...5 m) ce trebuie sudate și mandrinete în placa tubulară cu diametrul de 2500...3500 mm și grosimea de 160...500 mm precum și de numărul acestora (3000...6600 țevi) impun mari greutatea la transportul piesei asamblate de la locul de înclinare la locul de amplasare.

În acest sens s-a preconizat ca soluție de eficiență tehnologică și economică, realizarea unui atelier mobil pentru sudarea și mandrinarea prin explozie.

Proiectarea unui asemenea atelier se face pe baza temei de proiectare elaborate de colectivul de cercetare din Academia militară în cadrul contractului de cercetare științifică nr. 1752/1975 pentru I.C.P.T.S.C.- București.



C.V.1 ... 4 - camere de vid  
 Pvp - pompe de vid primar  
 Pvs - pompe de vid secundar  
 M - mese  
 R - recipiente de aer comprimat și argon

Fig. 6.2 Schița atelierului de sudură prin explozie în vid și în aer

Pentru a se asigura o funcționare corespunzătoare, atelierul mobil pentru mandrinarea și sudarea prin explozie va dispune de următoarele componente:

- două autoateliere;
- un grup electrogen;
- o autodubă;
- un autolaborator;
- un autobuz-dormitor;
- un autoturism ARO.

Cele două ateliere vor fi înzestrate și utilizate după cum urmează:

Un autoatelier dotat cu un strung normal SN 250, o mașină de sudat prin frecare ( $\emptyset$  15...40), o instalație de sudură cu microplasmă în argon, un transformator de sudură cu arc electric, un polizor dublu, un polizor de mână, o mașină de găurit portabilă, trusă de scule, o trusă de electrician.

Acest autoatelier este destinat pentru prelucrări mecanice, sudură și lăcătușerie.

Al doilea autoatelier dotat cu un banc de lucru, dispozitive pentru laminarea explozivului, detonatoare electrice, explozoare electronice, două instalații pentru îmbinări prin șoc electromagnetic, materiale de întreținere. Pe timpul cât nu se lucrează, detonatoarele și explozoarele vor fi închise în lăzi. În acest autoatelier se vor pregăti încărcăturile explozive cu ajutorul dispozitivelor.

Instalațiile de sudare prin șoc electromagnetic, detonatoarele electrice și explozoarele electronice vor fi amplasate în apropierea locului de mandrinare de pe platforma betonată construită pe șantier.

Grupul electrogen trebuie să asigure autonomia de funcționare a atelierului mobil pentru mandrinarea și sudarea prin explozie.

Autoduba este destinată transportului materialelor necesare echipării platformei de lucru (țevi, bare, prelate), electrocompresorului, electropompei de apă, cablurilor electrice, a furtunurilor de aer și apă, a materialelor de întreținere.

Autolaboratorul va fi amenajat într-o autodubă. Pentru aceasta va fi dotată cu două mese și patru scaune, lăzi pentru aparate, dispozitive și instrumente de măsură și un dulap de fier pen-

tru documentația tehnică. Autolaboratorul va fi de fapt punctul C.T.C.

Autobuzul-dormitor va fi amenajat într-un autobuz Diesel-UD prin scoaterea scaunelor și montarea a 13 paturi suprapuse, între ele avînd noptiere fixe.

Autoturismul ARO este destinat pentru recunoașteri, pentru transportul la platforma de lucru a materialelor ușoare precum și a explozivilor necesari mandrinării și sudării. Va fi dotat cu două lăzi metalice cu încuietori ce se vor fixa în podea.

Pe timpul deplasărilor, personalul va merge în cabinele mijloacelor auto pe care le deservește.

Personalul unui atelier mobil va fi format din:

- 1 subinginer care este și șeful atelierului;
- 2 artificieri (un maestru și un muncitor);
- 1 muncitor pe mașini unelte;
- 1 muncitor sudor;
- 1 muncitor electrician;
- 1 tehnician (laborant) tehnolog;
- 6 conducători auto.

Pe timpul activităților pe platforma de lucru, personalul atelierului va fi ajutat și de conducătorii auto ce vor avea o a doua specialitate ca mecanici, electricieni, lăcătuși.

Atelierul mobil poate fi mărit prin dotarea lui cu alte mijloace auto și personalul muncitor aferent putînd efectua și alte prelucrări prin explozie cum ar fi: deformări plastice, ambuțisarea și durificarea.

**7. CONSIDERATII ASUPRA APLICARII IN TARA A  
SUDARII PRIN EXPLOZIE**

- 7.1. Concluzii privind aplicarea la scară industrială a sudării prin explozie.**
- 7.2. Propuneri pentru extinderea procedurii de sudarea prin explozie.**

## 7. CONSIDERATII ASUPRA APLICARII IN TARA A SUDARII PRIN EXPLOZIE

### 7.1. Concluzii privind aplicarea la scară industrială a sudării prin explozie

Din cercetările și experimentările de laborator și în poligon, a rezultat că sudarea prin explozie este un procedeu de sudare în stare solidă - fără material de adaus - ce se poate aplica cu succes în realizarea îmbinărilor sudate atunci când nu se pot utiliza procedeele clasice de sudare.

Analizele metalografice ale pieselor sudate prin explozie au demonstrat că se realizează o bună îmbinare prin difuziune dacă parametrii au fost bine determinați și verificați prin încercări. Apariția compuşilor intermetalici nu constituie defecte ale îmbinării atît timp cît aceștia nu formează un strat continuu.

Rezistența la încercările mecanice precum și rezistența electrică arată cu prisosință că sudarea metalelor prin explozie este un procedeu de îmbinare eficient atît tehnologic cît și economic.

Sudarea prin explozie își găsește un domeniu larg de aplicare în special la îmbinările aliajelor metalelor neferoase cu aliaje metalice feroase, a diferitelor aliaje neferoase, oțelurilor inoxidabile și refractare, a superaliajelor - care suportă cu greu regimurile de sudare clasice - cu oțeluri carbon sau alte aliaje și metale.

Experimentările efectuate de autor, precum și eforturile entuziaștilor de la Combinatul chimic Făgăraș, de a realiza noi rețete de explozivi care să corespundă cerințelor impuse de elaborarea noilor tehnologii, au dovedit și vor dovedi că sudarea prin explozie își găsește un domeniu larg de aplicare - la scară industrială - în industria construcțiilor de mașini, a utilajului chimic și în metalurgia diferitelor metale și aliaje.

În acest sens - avînd în vedere rezultatele obținute în cadrul contractelor de cercetare pentru I.C.M.-Reșița, I.Al.-Slatina și I.M.G.-București - se poate afirma cu certitudine că sudarea prin explozie se poate aplica cu rezultate sigure pentru realizarea:

- segmentelor lagărelor axiale-radiale de mari dimensiuni ale hidrogenatoarelor (Cu-OL);
- învelirea paletelor rotoarelor din CLC cu tablă din oțel inoxidabil;
- plăci bimetel Al-OL pentru electrozii necesari elab-  
rării aluminiului;
- căptușirea recipientilor din CLC cu table din oțel inoxidabil și titan;
- table multistrat din două sau mai multe plăci (alu-  
miniu, dur aluminiu, zicral, oțel, cupru, alamă,  
oțel carbon, oțel aliat și înalt aliat etc.);
- sudarea țevilor la plăcile tubulare;
- mandrinarea țevilor la plăcile tubulare pentru gene-  
ratoarele de aburi din compunerea centralelor termo  
și nucleare-electrice;
- sudării dopurilor la țevile instalațiilor nucleare  
(oțel 18-8, Zr, Nb etc.);
- sudării pieselor din pulberi metalice de aluminiu  
(SAP);
- înădirea țevilor de același diametru, diametre dife-  
rite, din același metal sau diferite;
- înădirea tablelor (sudarea pe margine) din același  
metal sau diferite.

Tocute aceste tipuri de îmbinări prin explozie se pot aplica în industria construcțiilor de mașini, industria utilajelor chimice, industria construcțiilor aerospațiale, tehnologiile nucleare, construcțiile navale, construcțiile hidro și termoenergetice, industria electrotehnică și electronică etc.

Sudarea prin explozie a pieselor atât din aliaje metali-  
lice feroase și neferoase de orice dimensiuni se pot efectua în  
ser pe platforme de lucru, iar cele din metale și aliaje specifice  
tehnologiilor nucleare și dimensiuni ce pot încăpea în camere cu  
volumul de pînă la  $2,5 \text{ m}^3$  se vor suda în instalații de vid.

Pentru producția de serie se pot organiza și amenaja  
atelieri speciale pentru sudarea prin explozie.

Prin aplicarea la scară industrială a sudării prin ex-  
plozie, se pot realiza însemnate economii de valută pentru reperele  
ce se importă (cazul plăcilor bimetel Al-OL), cît și prin reduce-  
rea prețului de cost la o serie de produse (cazul lagărelor axiale-

radiale ale hidrogenatoarelor). Aceasta cu stît mai mult cu cît toate materialele necesare sudării prin explozie se produc în țară. În același timp trebuie avut în vedere faptul că prețul de cost și consumul de energie este mult mai mic decît la procedeele de sudare clasice.

## 7.2. Propuneri pentru extinderea procedului de sudare prin explozie

Aplicarea pe scară industrială a sudării prin explozie întîmpină încă greutăți cu toate că unele întreprinderi au întreprins acțiuni în această direcție prin încheierea unor contracte de cercetare științifică cu colectivul de cercetare-proiectare din Academia militară, condus de autor.

Numai întreprinderea de aluminiu Slatina, a înțeles necesitatea aplicării sudării prin explozie la scară industrială. Astfel realizarea în țară a plăcilor Al-OL a fost preluată de către Combinatul chimic Făgăraș.

În spiritul Programului Partidului Comunist Român, hotărîrilor de partid și a documentelor de stat, a indicațiilor date de secretarul general al partidului și avînd în vedere prevederile de colaborare stipulate în minuta încheiată între Combinatul chimic Făgăraș și Academia militară (nr.2020/25.07.77), extinderea procedului de sudare prin explozie, se poate face astfel:

- colectivul de cercetare din Academia militară în colaborare cu Combinatul chimic Făgăraș, să elaboreze tehnologiile de sudare prin explozie pentru reperele solicitate pe bază de contracte de cercetare științifică;
- după stabilirea tehnologiilor, Combinatul chimic Făgăraș care dispune de un poligon să preia producția de serie;
- pentru executarea sudării și mandrinării prin explozie la locul de montare (cazul centralelor hidro și nucleare electrice sau a subansamblelor pentru care transportul de la poligon la locul de montaj pune probleme greu de rezolvat), este necesar să se organizeze și doteze corespunzător un atelier mobil;



- să se informeze prin publicații (de exemplu, revista Construcția de mașini, sau buletine de informare editate de ISIM - Timișoara), centrele industriale, institutele de cercetare-proiectare și întreprinderile;
- ministerele prin direcțiile generale tehnice precum și centralele industriale să facă cunoscut procedeul de sudare prin explozie, să sprijine aplicarea și extinderea procedurii în tehnologia de fabricare a unor repere, acolo unde se poate introduce;
- colectivul de cercetare-proiectare din Academia militară, condus de autor, să continue cercetările în domeniul sudării metalelor prin explozie;
- să se creeze autorului posibilitatea de a publica o lucrare de amploare, privind sudarea metalelor prin explozie;
- în programele de curs la tehnologia metalelor să se introducă în capitolul "Imbinări" prezentarea procedurii de sudare prin explozie iar la cursurile de sudură ale specialiștilor un capitol destinat special acestui procedeu de sudare.

B I B L I O G R A F I E

1. ABRAHAMSON.G.R.- Permanent periodic surface deformation due to a traveling jet - Journal Applied mechanical nr.28/1961 pp 519-528.
2. ALDER,B.I.: Experiments with strong pressure pulses (Paul and D.Warschauer ed.) - Solids under Pressure, New-York, Mc.Graw Gill.pp 419.
3. ALTSHULER,L.V., KORMER,S.B., BRAZHNIK,M.I.,VLADIMIROV L.A., FUNIKOV,A.I.: The izentropic compressibility of alumium, copper, lead an iron at high pressures - Soviet Physik JETP (English Transl.) nr.11/1960 pp 766-775.
4. ALTSHULER,L.V.: Use of shock waves in high - pressure physics - Soviet Physik Usp. (English transl.) nr.8/1965 pp 52-91.
5. AMESZ.J.,HOLTBECKER.H.,MONTAGNANI.M.,VERZELETTI.G.,: Explosive welding of a fuel element. - Nuclear Engineering and Design. vol.8/1968 - North - Holland publishing Company - Amsterdam, pp.337-348.
6. ATROSCENKO.S.B.,PASKOV.O.P.,RIADINSKAIA.M.I.: Uproczenie metallov pri vzrîvom nagrajenui + Fizika metallov i metallovedenie.Tom.19/1965 pp 619-623.
7. AZIS.A.K.,HURWITZ.H.,STERNBERG,H.M.: Energy transfer to rigid piston under detonation loading - Physik of Fluids nr.4/1961, pp.380-384.
8. BABUL.V.,: Laczemie wybuchowe metali - Przegląd mechaniczny. Dwutygodnik Simp. ROK. XXVIII - zeszyt 15/1969, pp. 475-479.
9. BABUL.W.,WŁODARCZIK,E.: On the conditions for the occurrence of the wave surface of metal bonding made by explosive technique - Proceedings of vibration problems vol.11 - nr.3/1970 - Warsaw.
10. BAHRANI.S.A.,GROSSLAND,B.,: The Techniques and the mechanism of Explosive welding - The Production Engineer - Febr.1969 pp.69-83.

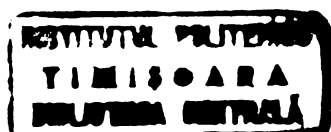
11. BARRRIS.K.S.,CROSSLAND.B.: Mechanical properties of explosively. Claded platen - metal construction. Jul. 1971.
12. BAUK.P.A.,STANIUKOVICI.P.K., SECHTER.B.I. - Fizika Vzriva Moskva, 1959.
13. BELIAKOV.T.I.,BCRISCV.D.I.: Tehnologie v kosmose - Magino-stroenie - 1974, Moskva.
14. BERGER.J.,VIARD.J.: Physique des explosifs solides, Paris 1962.
15. BERNHARTO.T.B.: Compressed - Air Explosive - Forming System - Engineers Digest, vol.32 nr.3/1971.
16. BIRKHOPF,G.,DOUGALL MAC D.P.,FUCH...M.,TAYLOR.R.; Explosives with lined cavities - J.Appl.Phys.19 - 1948 pp.563-582.
17. BODIN.C.: Cours de fizica explozivilor - Academia militară, 1972.
18. BODIN.C.: Explosivi plastici - Buletinul Academiei militare, nr.4/1970.
19. BOSSY.J.,HAURI.H.: Sprengstoffe in der Fertigungs - technik - Schweiss technik Soudure - nr.4/1971.
20. BRIDGEAN.P.F.: General outlook on the field of high pressure research 1-14 (Paul et Warshauer ed.) Solids under pressure - New-York, Mc.Graw Hill, 1963.
21. CAIRNS.H.J.: "YIN part" welding of tubes in to tubeplates "Use of explosives in forming. Welding su compaction" - Belfast - 1969.
22. CAIRNS.H.J.;HARDWICH.R.: Explosive welding of tubes into tubeplates usig angular geometry - Proceedings of Select conference, Hove, Sept.1968. The Welding Institute.1969, Paper nr.1.
23. CARLSON.J.R.,SIMONS.C.C.: Joining of zircaloy and inconel 600 tubes by explosive welding - Battelle memorial institute - OHIO - report No.B.M.I.1715/1965.
24. CHADWICH.D.M.- Some aspects of explosive Welding in different geometries - Proceedings of the Select Conference,Hove, Sept.1968 - Explosive welding - The Welding Institute - 1969, Paper nr.2.

25. CHADWICH.D.M., HOWD.D., WILDSMITH.G.: Explosive Welding of tube-plate. - British Welding Journal - oct. 1968, pp.48c-492.
26. COHAN.G.R., HOLTZEAN.A.H., Flow configurations in colliding plates - J.Appl.Phys.nr.34, 1963 pp.928-939.
27. CRISTESCU.N.: Dinamic plasticity. North-Holland Publishing Company - Amsterdam - 1967.
28. CROSSLAND.B.: Explosive Cladding - Proceedings of the meeting of the Pressure technology association on "Use of explosives in forming, Welding and compaction" held in The department of mechanical engineering of the Queen's University of Belfast 19 th March 1968. Paper 8.
29. CROSSLAND.B., WILLIAMS.D.J., SHRIBMAN.V.: Explosive cladding of large plates. Proceedings of Select Conference, Hove Sept.1968. The Welding Institute 1969. Paper nr.12.
30. CROSSLAND.B., WILLIAMS.D.J., SHRIBMAN.V.: Developments in Explosive Welding - Aircraft engineering 40 - 1968, nr.12, pp.11-13.
31. DALRYMPLE.G.D., JOHNSON.W.: Explosive cladding of thin steel tub with copper: an exploratory study.- Journal mach.Tool Design Research.vol.7/1967 Pergamon Press.pp.257-267.
32. DAVENPORT.D.E., DUVALL.G.E.: Explosive Welding - Technical Paper S.P.60-169, ASTM - Detroit 1960-61.
33. DERIBAS.A.A., KUDINOV.V.M., MATVEJENKOV.P.I., SIMONOV.V.A.: Opređenje parametrow Soudarenja polskih tel netajemych VVv uslovijach Swarki Vzryvom.Fizika Gtoreniya I Vzryva nr.3 - 1967; pp.291-298.
34. DERIBAS.A.A., and A.L.: Symposium on High Dinamic Pressure Paris, 1967.
35. DUGDALE.J.S., Mc.DONALD.D.K.C.: The thermal expansion of solids - Physik Revuen nr.89/1953 pp.833-834.
36. DUVALL.S.E., ERKMAN.J.O.: Acceleration of a plate by a high explosive - Technical report nr.1 SR 1 Project G.U. - 2426.

37. **BLWELL.T.W., WOOD.F.D.:** Analysis of the New Metals - Titanium, Zirconium, Hafnium, Niobium, Tantalum, Tungsten and their Alloys - Pergamon Press - Oxford, 1966.
38. **EZNA.A.A.:** Principles and practice of explosive metal working. Vol.I - Industrial News - papers Limited London, 1973.
39. **PORJHAM.S.:** The scope of metal cladding by explosives. Proceedings of select conference, Hove, sept.1968. The Welding Institute 1969, Paper nr.4.
40. **FREY.P.A.F** Some methodes of testing for explosive welded metal. Proceedings of select conference, Hove, Sept.1968.The Welding Institute 1969, Paper nr.5.
41. **GHIZDAVU.V.:** Cu privire la arbutisarea metalelor prin explozie - Buletinul Academiei militare nr.2/1964.
42. **GHIZDAVU.V.:** Prelucrarea metalelor cu puteri și viteze mari. Editura tehnică - București 1967.
43. **GHIZDAVU.V.:** Bazele sudării și placării metalelor prin explozie. Cursurile de perfecționare în domeniul sudării - 1972, vol.12 pp.348-372.
44. **GHIZDAVU.V., IONESCU.N.:** Studiu tehnico-economic pentru construcția secției pilot de prelucrarea metalelor prin explozie - M.I.C.M.- 1970.
45. **GILDE.W.:** Reisebericht des Zis Halle vom 2.7. 1969 über eine Dienstreise nach der Ud SSR.
46. **GRIN.M., MARCHAL.F., PRUSS.D.:** Le magnésoudage Revue de Métallurgie - fevr.1970 pp 125-136.
47. **GRÜNELS W.E.:** Zustand des festen Körpers, 22, in Geiger H und Scheel (ed).Handbuch der Physik, 10, Berlin, S. Springer 1963.
48. **GURNEY.T., STINE.T.F.:** Ballistic Research - Laboratories Report nr.648 - Aberdeen Proving Corund, Maryland 1947.
49. **HARDIE.W.M.:** Mildsteel tube to tubeplate welding.Proceedings of select Conference, Hove, Sept.1968. The Welding Institute, 1969, Paper nr.14.

50. HERMAN.H.,: **Trestise on Materials Science and Technology Vol.I. Academic Press. New York, 1972.**
51. HEYDA.J.F.,: **Correlation of two universal Hugoniot - Journal Applied Physics nr.49 - 4873.**
52. HOLLAND MERTEN,L.F.,: **Manual de tehnica vidului. Editura tehnică, București, 1953.**
53. HOLTBECKER,H.,MONTAGNANI,M.,: **Saldatura e formatura del SAP con esplosivi - Euratom - 1818 I - Bologna 1964.**
54. HORN van,R.,K.,: **Aluminium - American Society for metals. Park Ohio - 1972, vol.1,2 și 3.**
55. IONESCU.N.N.,: **Presarea pulberilor metalice prin explozie - Materialele Conferinței Naționale de tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, 14-16 oct.1971 - Timișoara pp.535-544.**
56. IONESCU.N.N.,: **Fenomene fizice la sudarea metalelor prin explozie - Buletinul Academiei militare nr.2/1973 pp 49-70.**
57. IONESCU.N.N.,: **Sudarea metalelor prin explozie. Calculul parametrilor de lucru - Buletinul Academiei militare nr.4/1972, pp.99-113.**
58. IONESCU.N.N.,: **Procese metalurgice și termice la sudarea prin explozie - Buletinul Academiei militare nr. 1/1976.**
59. IONESCU N.N.,: **Metode tehnologice în sudarea și placarea metalelor prin explozie. Curs pentru perfecționarea în domeniul sudării, vol.12, CNIT 1972 pp. 373-398.**
60. IONESCU N.N.,POPOVICI.VL.,IANCU.I.: **Instalații pentru cercetări experimentale și aplicații ale sudării prin explozie. Comunicare la sesiunea științifică a Academiei militare, 16-17 sept.1974.**
61. IONESCU N.N.,GHIZDAVU.V.: **Placarea și sudarea prin explozie a metalelor. Editura Academia militară, 1971.**
62. IONESCU N.N.,: **Plăci bimetale aluminiu-oțel sudate prin explozie pentru industria de aluminiu - Comunicare la sesiunea științifică a Academiei militare - octombrie 1976.**

63. IONESCU N.N.,ș.a.: Imbinarea țevilor la placa tubulară folosind mandrinarea și sudarea prin explozie. Studiu tehnologic pentru I.M.G.București. Contract cercetare nr.275/1975.
64. IONESCU N.N.: Imbinarea țevilor la placa tubulară folosind mandrinarea și sudarea prin explozie. S.D.V.-uri, utilaje și instalații. Proiect - 1250 (desene de execuție) - pentru I.M.G.București. Contract cercetare nr.275/1975.
65. IONESCU N.N.: Aplicații industriale ale sudării prin explozie - Buletinul Academiei militare nr.2/1976.
66. IONESCU N.N.: Imbinări sudate prin explozie - Lucrările Simpozionului "Rezistența îmbinărilor sudate" vol. II - Institutul Politehnic Iași - 1973 pp.304-316.
67. JAUMOTTE L.A.et.al.: Chocs et ondes de choc - Tom I.- Masson et Cie.Editeurs - Paris 1971 - p.286.
68. JENKINS.W.A.,TOR.S.S.,FISCHER.E.L.,WITTMAN.R.H.: ~~Explosion~~ Welding. Welding handbook,Section 38,Chapter 51, 6 th Ed.American welding Society, New York, 1971.
69. JOHNSON,W.,TRAVIS,W.F.: Peeling hot forming of tungsten and mildsteel discs and the use of a vacuum chest with explosives - Proc.6 the International M.T.D.R. Conference Manchester - sept.1965.
70. JOHNSON,W.,TRAVIS,W.F.,LOH.Y.S.: ~~High-speed impact of wax and plasticine~~ - Proceedings of the meeting of the pressure technology association on "Use of explosives in forming, welding and compaction" held in the department of mechanical engineering of the Queen's University of Belfast - march 1968, paper 5.
71. KOGEL,H.: Aufschweissen mit sprengstoffen - ZIS Mitteilungen nr.1, - Ian.1971, pp.75.
72. KOWALICK,F.J.,HAY.D.R.: A flow analog for explosive Bonding - Proceedings of Third International Conference of the Centre for high energy. Vail, Colorado, July, 1971.



73. KRUPIN,V.A.,SOLOVIEV,I.V.,SABTEL,I.N.,KOBLEV,G.A.,: De-  
formatsia metallor varivom - Izdatelstvo Metallur-  
gia - Moskva, 1975.
74. LANDAU,A.,LIFCHITZ,L.,: Physique théoretique - Physique  
Statistique - Tom.V - Edition MIR - Moscou, 1967  
pp 314-331.
75. LUCAS,W.,WILLIAMS,D.J.,: Some metallurgical aspects of ex-  
plosive welding - Proceedings of the meeting of  
the high pressure technology association -  
Queen's University of Belfast - march 1968, papers  
9.
76. MARQUARDT,F.,: Schweißvorgang und Nahtausbildung beim  
Explosionsschweißen. ZIS - Mitteilungen, Heft 9  
(1967) 12; pp 1706-1712.
77. MEDARD,L.,: Onde de choc - Memorial de l'artillerie fran-  
çaise, vol.36 nr.140.
78. MONTAGNANI,F.,VERZILLETI,G.,GRIN,W.,: Anwendungsmöglich-  
keiten des Schock - Schweißens an Beispielen aus  
der Kerntechnik - Schweißen und Schneiden - Jahr-  
gang 23 (1971). Heft 12.
79. MOTTRAM,A.R.,: Explosive tube to tubeplate expansion -  
Proceedings of the meeting of the pressure techno-  
logy association - Belfast 1968 - paper 5.
80. MULLER,W.A.F.,: Handbuch der zerstörungs freien material-  
prüfung. Vol.I. R.Oldenbourg München, 1968.
81. MULLER,W.A.F.,: Idem vol.2 - 1968.
82. MULLER,W.A.F.,: Idem vol.3 - 1971.
83. MULLER,W.A.F.,: Idem vol.5 - 1973.
84. NEMČEK,I.,VACEK,J.,: Rozbor podmínek srážu při svařování  
kova vybuchem - Strojirenstvi nr.20/1970, Praha.  
pp 464-470.
85. NICOLA,V.A.G.,OLSAŃSKI,A.H.,: Specialne metodi svařki.  
Masinostroenie - 1975 - Moskva.
86. PANNANICH,L.J.,: Soudage et placage à l'explosif - Revue  
de la Soudure nr.3 - 1970.
87. PARKER,R.R., COLOMBO,U.,: The Science of materials Used in  
Advanced Technology - J.Wiley & Sons - New York  
1974.



88. PEARSON, J.,: Explosive Welding, ASTM Creative Manufacturing Seminars 1960 - 1, Paper S.P., 60-159.
89. PHILIPCHUK, V.,: Welding Forming and Cutting with Explosive. ASTM Paper no. 350 vol. 61 Book 1 of 24 may 1961.
90. PIETTEUR, J.,: Le Mécanisme des procédés de déformation et de Soudure des métaux a l'explosif.- Division application des metaux - Liège, 1966, pp. 7-33.
91. POLLANZ, A.,: Explosionsschweissen insbesondere Explosionsplattieren grossflächiger Stahlbleche mit Titan und deren Verarbeitung - Schweissen und Schneiden Jahrgang 21 (1969). Heft 9. pp. 434-436.
92. POPOVICI, V.L., IONESCU, N.M., GHIZDAVU, V.,: Placares prin explozie a lagărelor axiale radiale și a butucilor de hidrogenatoare și alte agregate. Protocol pentru I.C.M. Reșița, 1971.
93. RICE, M.H., QUEEN, Mc.R.G.; WALSH, J.M.,: Compression of solids by strong waves - Solid state physics, nr. 6, 1958 pp. 1-63.
94. RICHTER, U.,: Sprengplattierte Verbundwerkstoffe und ihre Anwendungsmöglichkeiten im Schiffbau - Schiff und Hafen - Sept. 1970.
95. RINEHART, I.S., PEARSON, J.,: Explosive working of metals New York, 1963.
96. ROBINSON, P., ABRAHAMS, J.C., GIBSON, R.,: Ultrasonic examination of explosively welded tube to tubeplate joints - Proceedings of the Select Conference, Hove, Sept. 1968. The Welding Institute 1969. Paper nr. 3.
97. RONDEAU, F.H.,: Ist there a better way to join two metals - Iron Age metalworking international - iunie 1971.
98. ROSENSTIEL, P.A., GHIRER, G.E., BOES, M.J.P.,: Gefügeuntersuchungen mit der Mikrosonde an explosiv hergestellten Schweiss - Verbindungen - Zeitschrift für metallkunde nr. 55/1964, pp. 732-736.
99. ROTH, A.I.,: Tehnice vidului și a aparatelor electrice cu vid, Ed. Energetică de Stat, 1955.

100. ROWDEN, G.,: The effect of explosive welding on the properties of BS 1501-161-28 A, en 58 J and titanium 115. Proceedings of Select Conference, Hove, Sept.1968, The welding Institute 1969. Paper no.9.
101. SCHMIDTMANN, L., KOCH, W., SCHNECK, H.,: Vorgänge beim Explosivschweißen metallischer Werkstoffe. Archiv f.d. Eisenhüttenwesen - 36; 1965 pp.667-676.
102. SEDYCH, V.S., BONDAR, M.P.,: Osnovnyje parametry svarki vzryvom i prochnostnyje charakteristiki svarnych sojedinenij - Svaroc.proizvodstvo nr.2 - 1963, pp.1-5.
103. SHELZNOV, G.A., HRISTOFOROV, J.A., MOJAROV, V.M., BUGAEV, P.G.,: Issledovanie s pomocju radioaktivnih izotopov Stoenia perehodnogo sloia pri svarke treniem - Avtomaticheskaja Svarka nr.1 (202) 1970, pp.21-24.
104. SHRIBMAN, V., BAHRAMI, S.A., CROSSLAND, B.,: The Technique and the Mechanism of Explosive Welding - The Production Engineer - Feb.1969, pp.69-83.
105. SHRIBMAN, V., WILLIAMS, D.J., CROSSLAND, B.,: Some problems of explosively welding tube to tubeplates - Proceedings of the select conference, Hove, sept.1968. The welding Institute 1969. Paper no.13.
106. SIMS, T.C., HAGEL, C.W.,: The Superalloys - J.Wiley & Sons 1972.
107. SLATER, J.C.,: Introduction to chemical Physik, 1st edition New York, 1939, Mc.Graw Hill.
108. STANIUKOVICI, P.K., Fizika vzriva - Izdatelstva "Nauka" Moskva, 1975, pp.210-237.
109. STONE, M.J.,: The properties and applications of explosion-bonded clads. - Proceedings of the select conference, Hove, sept.1968. The welding Institute 1969. Paper no.10.
110. TRAVIS, W.F., JOHNSON, W.,: Explosive welding of Stellite to Stainless steel. - The 8 th International M.T.D.R. Conference held at the University Manchester, 12-15 sept.1967. Pergamon Press - Oxford 1967.

111. VERZELETTI, G., MONTAGNANI, M., BEGHI, G., GOLINELLI, P.: Explosive welding of nuclear reactor materials.- The Welding Institute - Explosive welding - Proceedings of select Conference - Editech Working, Surrey, England, 1969.
112. VOLCEENKO, N.V.: Controlî kacestva svarki v maşinostroenie 1975 - Moskva.
113. WALSH, J.M., SHREFFLER, R.G., WILLIG, F.J.: Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. Journal Applied Physics, nr.34 - 1963, pp.928-939.
114. WODARA, J.: Explosionsschweissen - ein Kaltpress schweissen mit Kurzen Schweisszeiten - Schweiss technik, october 1963, Heft - 10 - pp.433-437.
115. WRIGHT, S., BAYCE, E.A.: Current methode and rezults in explosive welding - Proc.of NATO Advanced Study Institute on High Energy of metals - Sandefjord - Lillehammer, Norwai, 1964, vol.I, p.448.
116. ZERNOW, L.: Explosive welding - Mechanical Engineering, S.U.A., 92, nr.5 - 1970 pp.39-43.
117. x x x - Stăbilirea soluțiilor constructive și a condițiilor tehnice preliminare pentru fabricarea elementelor componente ale centralelor nucleare electrice. L.nr.1232, vol.1 - Generator de abur. Imbinarea țevi-placă tubulară - I.C.P.E.T.
118. x x x - British Patent no.21840 - 23 sept.1898.
119. x x x - U.S.Patent 93970 - 9 noemb.1909.
120. x x x - U.S.Patent 3.137.937. June 1964.
12. x x x - U.S.Patent 3.397.944 - 1965.
122. x x x - Patent Application nr.20957/1968 - International Research Debelopment Co, Ltd - S.U.A.

## 9. NOTATII FOLOSITE IN TEXT

9. NOTATIILE FOLOSITE IN TEXT

- a - grosimea peretelui țevii de sudat;
- b - lățimea plăcii de sudat;
- c - raportul sinusurilor unghiurilor  $\beta$  și  $\varphi$ ;
- d - diametrul cordonului de exploziv;
- $d_e$  - diametrul exterior al țevii de sudat;
- $d_i$  - diametrul interior al țevii de sudat;
- f - raportul  $Q_e \cdot \rho_e / p_d$ ;
- g - gravitatea;
- g - grame;
- h - grosimea plăcii de sudat;
- i - raportul dintre jocul radial și raza medie;
- J - jocul dintre țevă și alezajul din placa tubulară;
- $J_r$  - jocul radial;
- l - lungimi de mandrinare;
- K - constanta Boltzman;
- $m_e$  - masa explozivului;
- $m_p$  - masa plăcii de sudat;
- n - coeficient politropic;
- p - presiune;
- $p_d$  - presiune de detonație;
- $p_0$  - presiunea în starea inițială;
- $p_r$  - presiunea de referință;
- $p_s$  - presiunea de sudare;
- $r_m$  - raza medie a țevii;
- s - secunde;
- t - timp;
- u - energia pe unitatea de masă în stare comprimată;
- $u_0$  - energia pe unitatea de masă în stare inițială;
- $V_d$  - viteza de detonație a explozivului;
- $V_m$  - viteza de mișcare a plăcii de sudat;
- $V_p$  - viteza punctelor de contact (viteza de sudare);
- $V_r$  - viteza de deformare (de mișcare) a țevii;
- $V_s$  - viteza de propagare a sunetului în placa de sudat;
- $V_t$  - viteza de propagare a sunetului în materialul moderator;
- X - distanța dintre plăcile de sudat;
- Y - grosimea stratului de exploziv;
- A - raportul dintre  $g$  și  $\tau_p$ ;
- B - raportul dintre  $\sigma_e$  și  $V_s$ ;
- C - raportul dintre  $\sigma_e$  și  $V_s^2$ ;

- $C_K$  - coeficient dependent de numărul  $K$ ;
- $C_V$  - căldura specifică;
- $D$  - diametrul alezajului din placa tubulară pentru mandrinare
- $D_{\bullet}$  - diametrul exterior al țevii de mandrinat;
- $D_i$  - diametrul interior al țevii de mandrinat;
- $D_m$  - diametrul mediu al țevii de mandrinat;
- $E$  - modulul de elasticitate;
- $F$  - raportul dintre mase explozivului și mase plăcii de sudat
- $G_e$  - cantitatea de exploziv pentru o sudare sau mandrinare;
- $G_{cu}$  - cantitatea de exploziv pentru unitatea de volum a plăcii de sudat;
- $K$  - coeficient de amplificare;
- $L$  - lungimea de mandrinare;
- $N$  - numărul de atomi pe unitatea de masă;
- $P$  - puterea;
- $Q_e$  - căldura de explozie;
- $R_e$  - raza cilindrului ipotetic;
- $R_o$  - raza alezajului din placa tubulară;
- $S$  - frontul undei de detonație la timpul  $t$ ;
- $S_o$  - frontul undei de detonație la timpul  $t_o$ ;
- $T$  - temperatură termodinamică absolută;
- $U$  - deplasarea radială;
- $V$  - volumul piesei de sudat (mandrinat);
- $V_e$  - volumul explozivului pentru o sudare;
- $W$  - viteza de deformare (mișcare) a țevii la sudarea prin explozie;
- $W_o$  - energia cinetică;
- $W_d$  - energia de deformare a țevii la mandrinare;
- $W_t$  - energia totală la mandrinare;
- ZEP- zona de expansiune a produselor explozive;
- ZNE- zona neexplodată;
- ZNP- zona neperturbată;
- ZUC- zona undelor de compresie;
- $\alpha$  - unghiul static de înclinare a plăcii de sudat;
- $\beta$  - unghiul dinamic de înclinare (curtură) a plăcii de sudat;
- $\gamma_e$  - greutatea specifică a explozivului;
- $\gamma_p$  - greutatea specifică a plăcii de sudat;
- $\epsilon$  - energia internă (energie absorbită);
- $\epsilon^*$  - gradul de reducere a grosimii peretelui țevii;
- $\varphi$  - unghiul dinamic de înclinare sub care placa de sudat izbește placa de bază;

- $\lambda$  - lungimea de undă;
- $\eta$  - indice de utilizare a energiei explozivului;
- $\rho$  - densitatea;
- $\rho_e$  - densitatea explozivului;
- $\rho_p$  - densitatea plăcii de sudat;
- $\rho_t$  - densitatea materialului plastic moderator;
- $\Gamma$  - coeficientul Grüneisen.

10.    A N N E X E



Tabel 10.1

Metale de sudat Cu5 STAS 270/1-74 / otel lat arc 2A STAS 3020-69						
Poziția plăcilor: înclinate		Dimensiuni: L=200; b=100; h=4 mm; V=80 cm <sup>3</sup>				
Caracteristicile metalului de sudat:						
$\bar{\sigma}_c = 2840$ [daNcm <sup>-2</sup> ]		$\bar{\sigma}_p = 877 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_s = 365 \cdot 10^3$ [cms <sup>-1</sup> ]		
Exploziv: hexolită 2 Detonator: capsă nr. 8		$\bar{\sigma}_e = 140 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_d = 63 \cdot 10^4$ [cms <sup>-1</sup> ]		
$A = 112 \cdot 233$ [cm <sup>4</sup> daN <sup>1</sup> s <sup>-2</sup> ]		$B = 7993 \cdot 10^{-6}$ [daNscm <sup>-3</sup> ]		Moderator opanal $V_t = 5 \cdot 10^3$ [cms <sup>-1</sup> ]		
A · B	cms <sup>-1</sup>	897				
K	—	20	40	60	80	100
$V_m = K \cdot A \cdot B$	cms <sup>-1</sup>	17940	35880	53820	71760	89700
$\sin \varphi = V_m / V_s$	—	0,04915	0,09830	0,14745	0,19660	0,24575
$\varphi$	0'	2 - 49	5 - 38	8 - 28	11 - 20	14 - 13
$\operatorname{tg} \beta = V_m / V_d$	—	0,02848	0,05695	0,08543	0,11391	0,14238
$\beta$	0'	1 - 38	3 - 15	4 - 53	6 - 30	8 - 06
$\alpha = \varphi - \beta$	0'	1 - 11	2 - 23	3 - 35	4 - 50	6 - 07
$c = \sin \beta / \sin \varphi$	—	0,5736				
$V_p = c \cdot V_d$	cm·s <sup>-1</sup>	361368				
$V_p \leq V_s$	cm·s <sup>-1</sup>	-3632				
$p = 0,5 V_m V_s \bar{\sigma}_p / g$	daNcm <sup>-2</sup>	29300	58600	87900	117200	146500
$C_K$	—	1,80	0,90	0,60	0,46	0,36
$F = \frac{C_K \cdot \operatorname{tg} \beta}{0,578 - \operatorname{tg} \beta}$	—	0,093	0,098	0,104	0,113	0,118
$G_e = F \cdot V \cdot \rho_p$	g	66,65	70,28	74,34	80,66	84,06
$V_e = G_e / \rho_e$	cm <sup>3</sup>	47,60	50,20	53,10	57,61	60,04
$Y = V_e / L \cdot b$	mm	2,38	2,50	2,66	2,88	3,00
$G_{eu} = G_e / V$	g·cm <sup>-3</sup> cu	0,833	0,879	0,929	1,008	1,051

Tabel 10.2

Metale de sudat: Cu 5 STAS 270/1-74 / otel arc 2 A - STAS 3020 - 69						
Poziția plăcilor: încinat		Dimensiuni L=200; b=100; h=4 mm			L · b = 200 cm <sup>2</sup> V = 80 cm <sup>3</sup>	
Exploziv: Hexolită 2		Detonator: capse nr. 8			Moderator: - opanol	
$\alpha$	° - '	1 - 30	2 - 00	3 - 00	4 - 00	5 - 00
$\sin \alpha$	-	0,02612	0,03490	0,05234	0,06976	0,08716
c	-	0,5784				
1 - c	-	0,4216				
$\sin \varphi = \sin \alpha / (1 - c)$	-	0,06218	0,08308	0,12459	0,16606	0,20747
$\varphi$	° - '	3 - 34	4 - 46	7 - 09	9 - 32	11 - 55
$\sin \beta = c \cdot \sin \varphi$	-	0,03606	0,04818	0,07225	0,09630	0,12032
$\beta$	° - '	2 - 04	2 - 46	4 - 09	5 - 32	6 - 55
$\operatorname{tg} \beta$	-	0,03608	0,04824	0,07244	0,09675	0,12131
$V_m = V_d \cdot \operatorname{tg} \beta$	cm · s <sup>-1</sup>	22732	30389	45638	60952	76424
A · B	cm · s <sup>-1</sup>	897				
$K = V_m / A \cdot B$	-	25,34	33,88	50,88	67,95	85,20
$C_k$	-	1,479	1,084	0,709	0,536	0,428
$F = \frac{C_k \operatorname{tg} \beta}{0,578 - \operatorname{tg} \beta}$	-	0,0985	0,0987	0,1016	0,1078	0,1137
$G_e = F \cdot V \cdot \rho_p$	g	70	71,0	73,0	77,0	81,0
$V_e = G_e / \rho_e$	cm <sup>3</sup>	50,13	50,71	51,73	54,86	57,88
$Y = V_e / L \cdot b$	mm	2,5	2,5	2,6	2,7	2,9
$G_{eu} = G_e / V$	g cm <sup>-3</sup>	0,87	0,89	0,91	0,96	1,01

Tabel 10.3

Metale de sudat : Al 99,5 1/2t-STAS 7607-72 / OL 37-STAS 500 / 1 - 68						
Pozitia placilor: înclinate		Dimensiuni: L=200; b=100; h=16mm; V=320 cm <sup>3</sup>				
Caracteristicile metalului de sudat						
$\bar{G}_c = 910$ [daNcm <sup>-2</sup> ]		$\bar{\chi}_p = 270 \cdot 10^5$ [daNcm <sup>-3</sup> ]			$V_s = 51 \cdot 10^4$ [cm·s <sup>-1</sup> ]	
Exploziv: E.P. - P.3		$\chi_e = 15 \cdot 10^{-6}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]			$V_d = 75 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]	
A=370·370 [cm <sup>4</sup> daN <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> ]		$\beta = 1784 \cdot 10^{-6}$ [daN s cm <sup>-3</sup> ]			Moderator: chit termostabil $V_t = 5 \cdot 10^3$ [cm s <sup>-1</sup> ]	
A · B	cm s <sup>-1</sup>	661				
K	-	20	40	60	80	100
$V_m = K \cdot A \cdot B$	cm s <sup>-i</sup>	13 220	26 440	39 660	52 880	66 100
$\sin \varphi = V_m / V_s$	-	0,02592	0,05184	0,07776	0,10368	0,12960
$\varphi$	° - '	1-29	2-58	4-27	5-57	7-27
$\text{tg } \beta = V_m / V_d$	-	0,01763	0,03525	0,05288	0,07051	0,08813
$\beta$	° '	1-00	2-00	3-00	4-00	5-00
$\alpha = \varphi - \beta$	° '	0-29	0-58	1-27	1-57	2-27
$C = \sin \beta / \sin \varphi$	-	0,6733				
$V_p = C \cdot V_d$	cm s <sup>-1</sup>	504988				
$V_p \leq V_s$	cm s <sup>-1</sup>	- 5012				
$p = 0,5 V_m V_s \bar{\chi}_p / g$	daNcm <sup>-2</sup>	10000	18 200	27 300	36 400	45 500
$C_k$	-	2,92	1,46	0,98	0,74	0,59
$F = \frac{C_k \cdot \text{tg } \beta}{0,578 - \text{tg } \beta}$	-	0,092	0,095	0,098	0,103	0,106
$G_{eu} = \bar{\chi}_p \cdot F$	g	0,248	0,257	0,266	0,278	0,287
$G_e = G_{eu} \cdot V$	cm <sup>3</sup>	79,4	82,1	85,3	89,0	91,7
$V_e = G_e / \bar{\chi}_e$	mm	52,92	54,7	56,8	59,3	61,2
$Y = V_e / L \cdot b$	gcm <sup>-3</sup> Al	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0

Tabel 10.4

Metale de sudat: Al 99,5 1/2t-STAS 7607-72 / OL 37-STAS 500 / 1 - 68						
Poziția plăcilor: încălate		Dimensiuni: L=200; b=100; h=16mm			L · b = 200cm <sup>2</sup> V=320 cm <sup>3</sup>	
Exploziv: E.P. - P. 4		Detonator: -capse nr. 8		Moderator: -opanol		
$\alpha$	° - '	0 - 30	1 - 00	1 - 30	1 - 45	2 - 00
$\sin \alpha$	-	0,00873	0,01745	0,02618	0,03054	0,03490
C		0,70826				
1 - C		0,29174				
$\sin \varphi - \sin \alpha / 1 - C$	-	0,02992	0,05981	0,08974	0,10468	0,11962
$\varphi$	° - '	1 - 42	3 - 26	5 - 09	6 - 01	6 - 52
$\sin \beta - C \cdot \sin \varphi$	-	0,02119	0,04236	0,06356	0,07444	0,08473
$\beta$	° - '	1 - 12	2 - 26	3 - 39	4 - 16	4 - 52
$\operatorname{tg} \beta$	-	0,02120	0,04240	0,06369	0,07464	0,08503
$V_m = V_d \cdot \operatorname{tg} \beta$	cm s <sup>-1</sup>	15 263	30 529	45 854	53 747	61 224
A · B	cm s <sup>-1</sup>	661				
$K = V_m / A \cdot B$	-	23,09	46,19	69,37	81,31	92,62
$C_K$	-	2,623	1,274	0,849	0,729	0,642
$F = \frac{C_K \cdot \operatorname{tg} \beta}{0,578 - \operatorname{tg} \beta}$	-	0,100	0,101	0,105	0,108	0,111
$G_{eu} = \check{\gamma}_p \cdot F$	g · cm <sup>3</sup>	0,270	0,273	0,284	0,292	0,300
$G_e = G_{eu} \cdot V$	g	86,4	87,3	90,9	93,4	96,0
$V_e = G_e / \check{\gamma}_e$	cm <sup>3</sup>	61,71	62,33	64,91	67,74	68,57
$Y = V_e / L \cdot b$	mm	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4

Tabel 10.5

Metale de sudat: Cu 5 STAS 270/1-74 / OL 37-STAS 500 / 1-68						
Pozitia plăcilor: paralel	Dimensiuni L=200; b=100; h=4 mm	L · b = 200 cm <sup>2</sup> V = 80 cm <sup>3</sup>				
Caracteristicile metalului de sudat						
$\bar{C}_c = 2\,840$ [daN·cm <sup>-2</sup> ]	$\bar{\gamma}_p = 877 \cdot 10^{-5}$ [daN·cm <sup>-3</sup> ]	$V_s = 365 \cdot 10^3$ [cm·s <sup>-1</sup> ]				
Exploziv: E.P.-S Detonator: electronic	$\bar{\gamma}_e = 120 \cdot 10^{-5}$ [daN·cm <sup>-3</sup> ]	$V_d = 335 \cdot 10^3$ [cm·s <sup>-1</sup> ]				
Moderator: opanol	$\bar{\gamma}_t = 112 \cdot 10^{-5}$ [daN·cm <sup>-3</sup> ]	$V_t = 11 \cdot 10^4$ [cm·s <sup>-1</sup> ]				
A = 112233 [cm <sup>4</sup> daN <sup>1</sup> s <sup>-2</sup> ]	B = 7993 · 10 <sup>-6</sup> [daN s cm <sup>3</sup> ]	C = 22497 · 10 <sup>-12</sup> [daN s <sup>2</sup> cm <sup>-4</sup> ]				
A · B	cm · s <sup>-1</sup>	897				
K	-	20	40	60	80	100
$V_m = K \cdot A \cdot B$	cm · s <sup>-1</sup>	17940	35880	53820	71760	89700
$\sin \varphi = V_m / V_d$	-	0,05355	0,10710	0,16066	0,21421	0,26776
$\varphi$	° - ' - "	3 - 04 - 11	6 - 08 - 54	9 - 14 - 42	12 - 22 - 09	15 - 31 - 52
A · C	-	0,002525				
$X = 3h \cdot K \cdot AC$	mm	0,61	1,22	1,82	2,42	3,03
$p = 0,5 V_m V_s \bar{\gamma}_p / g$	daNcm <sup>2</sup>	29278	58556	87834	117112	146390
$C_k$	-	1,80	0,90	0,60	0,46	0,36
tg $\varphi$	-	0,05363	0,10772	0,16277	0,21930	0,27791
$F = \frac{C_k \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,184	0,206	0,235	0,281	0,333
$G_{eu} = \bar{\gamma}_p \cdot F$	g · cm <sup>-3</sup>	1,614	1,807	2,063	2,466	2,924
$G_e = G_{eu} \cdot V$	g	129,1	144,5	165,0	197,3	233,9
$V_e = G_e / \bar{\gamma}_e$	cm <sup>3</sup>	117,4	131,4	150,0	179,4	212,6
$\gamma_i = V_e / L \cdot b$	mm	5,8	6,6	7,5	8,9	10,6

Tabel 10,6

Metale de sudat: Cu5 STAS 270/1-74 / Al 99 5 1/2t-STAS 7607-72						
Poziția plăcilor: paralel		Dimensiuni: L=200; b=100; h=4 mm			L·b = 200 cm <sup>2</sup> V = 80 cm <sup>3</sup>	
Exploziv: E.T.R. - 15		Detonator: electronic			Moderator: opanol	
X	mm	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
3h·A·C	mm	0,0303				
K = X / 3h·A·C	-	33,00	49,50	66,00	82,50	99,00
A·B	cm·s <sup>-1</sup>	897				
V <sub>m</sub> = K·A·B	cm·s <sup>-1</sup>	29 601	44 401	59 202	74 002	88 803
sin φ = V <sub>m</sub> / V <sub>d</sub>	-	0,08836	0,13254	0,17672	0,22090	0,26508
φ	° - ' - "	5-04 -10	7-36-59	10-10-44	12-45-43	15-22-19
tg φ	-	0,08871	0,13372	0,17955	0,22650	0,27492
C <sub>K</sub>	-	1,098	0,729	0,552	0,445	0,364
$F = \frac{C_K \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,191	0,219	0,248	0,286	0,330
G <sub>eu</sub> = δ <sub>p</sub> · F	g/cm <sup>3</sup>	1,677	1,924	2,181	2,515	2,896
G <sub>e</sub> = G <sub>eu</sub> · V	g	134,2	153,9	174,5	201,2	231,6
V <sub>e</sub> = G <sub>e</sub> / δ <sub>e</sub>	cm <sup>3</sup>	122,0	139,93	158,65	182,89	210,59
Y = V <sub>e</sub> / L · b	mm	6,1	6,9	7,9	9,1	10,5

Tabel 10.7

Metale de sudat: Al 99,5 ½ t - STAS 7607-OL 37 STAS 500/1 - 68						
Poziția plăcilor: paralel		Dimensiuni: L=200; b=100; h=16mm			L · b = 200 cm <sup>2</sup> V = 320 cm <sup>3</sup>	
Caracteristicile metalului de sudat:						
$\bar{\sigma}_c = 910$ [daNcm <sup>-2</sup> ]		$\bar{\chi}_p = 270 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_s = 51 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
Exploziv: E.T.R. - 15 Detonator: electronic		$\bar{\chi}_e = 110 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_d = 335 \cdot 10^3$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
Moderator: Opanol		$\bar{\chi} = 112 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V = 11 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
A = 370 · 370 [cm <sup>4</sup> daN <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> ]		B = 1784 · 10 <sup>-6</sup> [daN s <sup>-1</sup> cm <sup>3</sup> ]		C = 3499 · 10 <sup>-12</sup> [daN s <sup>2</sup> cm <sup>4</sup> ]		
A · B		cm s <sup>-1</sup> 661				
K		-				
V <sub>m</sub> = K · A · B		cm s <sup>-1</sup>				
sin φ = V <sub>m</sub> / V <sub>d</sub>		-				
φ		° ' "				
A · C		-- 0,001296				
X = 3h · K · A · C		mm				
$p = \frac{1}{2} V_m V_s \bar{\chi}_p / g$		daNcm <sup>-2</sup>				
C <sub>K</sub>		-				
tg φ		-				
$F = \frac{C_K \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$		-				
G <sub>eu</sub> = $\bar{\chi}_p \cdot F$		g · cm <sup>-3</sup>				
G <sub>e</sub> = G <sub>eu</sub> · V		g				
V <sub>e</sub> = G <sub>e</sub> / $\bar{\chi}_e$		cm <sup>3</sup>				
Y = V <sub>e</sub> / L · b		mm				

Tabel 10.8 urmare

X	mm	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$3h \cdot A \cdot C$	mm	0,0622				
$K = X / 3h \cdot A \cdot C$	-	64,31	72,35	80,38	88,42	96,46
$A \cdot B$	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	661				
$V_m = K \cdot A \cdot B$	$\text{cm s}^{-1}$	42 509	47 822	53 131	58 446	63 762
$\sin \varphi = V_m / V_d$	-	0,12689	0,14275	0,15860	0,17446	0,19033
$\varphi$	° - ' - "	7 - 17 - 24	8 - 12 - 26	9 - 07 - 32	10 - 02 - 51	10 - 58 - 20
$\text{tg } \varphi$	-	0,12793	0,14423	0,16063	0,17718	0,19388
$C_k$	-	0,920	0,816	0,737	0,673	0,635
$F = \frac{C_k \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,261	0,271	0,284	0,297	0,311
$G_{eu} = \check{\chi}_p \cdot F$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0,706	0,733	0,766	0,803	0,839
$G_e = G_{eu} \cdot V$	g	226,0	234,4	245,0	257,0	268,4
$V_e = G_e / \check{\chi}_e$	$\text{cm}^3$	205,4	213,1	222,8	233,7	244,0
$Y = V_e / L \cdot b$	mm	10,2	10,7	11,1	11,6	12,2

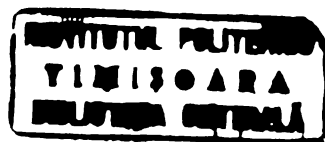


Tabel 10.9

Metale de sudat: alamă Am 63 / oțel OL 37.3-K						
Forma: țevă						
Dimensiuni: $d_e = 19\text{mm}$ $a = 1\text{mm}$ $l = 3\text{mm}$ $L = 17\text{mm}$ $V = 1,01\text{cm}^3$						
Caracteristicile metalului de sudat:						
$\bar{C}_c = 1880$ [daNcm <sup>-2</sup> ]		$\bar{\chi}_p = 834 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_s = 336 \cdot 10^3$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
Exploziv: E.P.P.4						
Detonator: capse		$\bar{\chi}_e = 1,4$ [g · cm <sup>-3</sup> ]		$V_d = 72 \cdot 10^4$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
Moderator: tema polietilen		$\bar{\chi}_t = 94 \cdot 10^{-5}$ [daNcm <sup>-3</sup> ]		$V_t = 2 \cdot 10^5$ [cm s <sup>-1</sup> ]		
A · B	cm · s <sup>-1</sup>	635,7				
K	-	20	30	40	50	60
$V = K \cdot A \cdot B$	cm · s <sup>-1</sup>	12 714	19 071	25 428	31 785	38 142
$\sin \varphi = V_m / V_s$	-	0,03784	0,05576	0,07568	0,09460	0,11352
$\varphi$	° - '	2 - 10	3 - 15	4 - 20	5 - 25	6 - 30
$\text{tg } \beta = V_m / V_d$	-	0,01756	0,02549	0,03532	0,0414	0,05297
$\beta$	° - '	1 - 00	1 - 30	2 - 00	2 - 30	3 - 00
$\alpha = \varphi - \beta$	° - '	1 - 10	1 - 45	2 - 20	2 - 55	3 - 30
$\sin \beta$	-	0,01755	0,02648	0,03529	0,04412	0,05290
$C = \sin \beta / \sin \varphi$	-	0,4666				
$V_p = C \cdot V_d$	cm s <sup>-1</sup>	335784				
$V_p \leq V_s$	cm s <sup>-1</sup>	- 216				
$p = 0,5 V_m V_s \bar{\chi}_p / g$	daNcm <sup>2</sup>	18 181	27 271	36 362	45 452	54 543
$C_k$	-	1,80	1,20	0,90	0,72	0,60
$F = \frac{C_k \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,126	0,130	0,136	0,140	0,146
$G_{eu} = \bar{\chi}_p \cdot F$	g · cm <sup>-3</sup>	1,051	1,090	1,134	1,176	1,218
$G_e = G_{eu} \cdot V$	g	1,061	1,101	1,146	1,188	1,230
$V_e = G_e / \bar{\chi}_e$	cm <sup>3</sup>	0,758	0,786	0,818	0,848	0,878
$D = [V_e / L]^{0,5}$	mm	6,70	6,80	6,94	7,06	7,18
$d = 1127 D$	mm	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0

Tabela 10.10

<b>Metale de sudat:</b> Alamă AM63 / otel 37.3-K						
<b>Forma, dimensiuni:</b> $d_e = 19\text{mm}$ $a = 1\text{mm}$ $h = 3\text{mm}$ $H = 17\text{mm}$						
<b>Caracteristicile melalului de sudat:</b>						
$\sigma_c = 1670$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}\right]$	$\delta_p = 834 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^3}\right]$	$V_s = 346 \cdot 10^3$	$\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	
<b>Exploziv:</b> Hexolita 1						
<b>Detonator:</b> Capse nr.8		$\delta_e = 120 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^3}\right]$	$V_d = 57 \cdot 10^4$	$\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$	
$A = \frac{g}{\gamma} = 118 \cdot 10^3$		$\left[\frac{\text{cm}^4}{\text{daN s}^2}\right]$	$M = \frac{H}{D_m} = 0,944$	$N = 4AMR_c = 794546 \cdot 10^3$		
$Vm^2$	$\text{cm}^2/\text{s}^2$	$1295 \cdot 10^5$	$5101 \cdot 10^5$	$11656 \cdot 10^5$	$20721 \cdot 10^5$	$32376 \cdot 10^5$
$\dot{\epsilon}g c$	-	0,01310	0,02619	0,03923	0,5241	0,0554
$N \cdot \dot{\epsilon}g c$	$\text{cm}^2/\text{s}^2$	11000553	20317105	31225657	41534210	52042763
$T = Vm^2 - N \dot{\epsilon}g c$	$\text{cm}^2/\text{s}^2$	$11049 \cdot 10^4$	$49723 \cdot 10^4$	$113467 \cdot 10^4$	$203047 \cdot 10^4$	$313556 \cdot 10^4$
$Wm = T^{0,5}$	$\text{cm}/\text{s}^2$	10360	22300	33630	45150	56460
$\sin \varphi = Wm/V_s$	-	0,03133	0,05445	0,09723	0,13049	0,16313
$\varphi$	grad min	1° 43'	3° 43'	5° 35'	7° 30'	9° 21'
$\dot{\epsilon}g_p = Wm \cdot h/c$	-	0,01905	0,03912	0,05995	0,07921	0,09900
$\beta$	grad min	1° 05'	2° 14'	3° 21'	4° 31'	5° 38'
$\alpha = \varphi - \beta$	grad min	0° 44'	1° 29'	2° 14'	2° 59'	3° 43'
$\sin \beta$	-	0,01230	0,02339	0,03397	0,05205	0,05432
$C = \sin \beta / \sin \varphi$		0,405	0,403	0,401	0,399	0,397
$V_p = C \cdot V_d$	$\text{cm}/\text{s}$	230950	229710	223570	227430	226290
$V_p \leq V_s$	$\text{cm}/\text{s}$	-115150	-116290	-113290	-118570	-119710
$p = 0,5 Wm V_s \delta_p / g$	$\text{daN}/\text{cm}^2$	16720	33450	50180	66900	83610
$F = \frac{Wm}{0,25 W_s - 0,5 Wm}$	-	0,069	0,146	0,228	0,322	0,412
$= \sigma_a D_m L$	$\text{cm}^3$	0,961				
$Ge = \delta_p V F$	g	0,55	1,17	1,83	2,57	3,30
$Ve = Ge / \delta_e$	$\text{cm}^3$	0,459	0,975	1,525	2,141	2,750
$d = 1,13 (Ve / H)^{0,5}$	mm	5,9	8,5	10,6	12,7	14,4



Tabel 10.11

Metale de mandrinat: Incoloy - 800 A.S.M.E. S.B.163/otel 22NiMoCr 37							
Formă : țevă - placa tubulară							
Dimensiuni $d_e=20\text{ mm}$ $a=1,5\text{ mm}$ $J_r = 0,175\text{ mm}$ $L=480\text{ mm}$ $V=45\ 24\text{ cm}^3$							
Caracteristicile metalului țevii							
$\sigma_c=2120$ [daN·cm <sup>-2</sup> ]		$\chi_p=824 \cdot 10^{-5}$ [daN·cm <sup>-3</sup> ]			$V_s=49 \cdot 10^4$ [cm·s <sup>-1</sup> ]		
Exploziv:							
E.T.R. - 15		$\chi_e = 1,1$ [g·cm <sup>-3</sup> ]			$V_d = 335 \cdot 10^3$ [cm·s <sup>-1</sup> ]		
Moderator : teacă							
Polietilen		$\chi_m = 0,94$ [g·cm <sup>-3</sup> ]			$V_t = 2 \cdot 10^5$ [cm·s <sup>-1</sup> ]		
$A = \left[ 2 \frac{J_r}{a} \cdot \frac{Pr}{\delta t} \right]^{0,5}$	cm·s <sup>-1</sup>	168,5					
$p$	daN/cm <sup>2</sup>	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$B = \left[ \frac{p}{Pr} \right]^{0,5}$	-	1,581	1,732	1,871	2,000	2,121	2,236
$K$	-	10					
$V_m = K \cdot A \cdot B$	cm·s <sup>-1</sup>	2664	2918	3153	3370	3574	3758
$\sin \varphi = \frac{V_m}{V_d}$	-	0,007951	0,008710	0,009412	0,010059	0,010669	0,011247
$\varphi$	° - ' - "	0-27-20	0-29-57	0-32-21	0-34-35	0-36-41	0-38-40
$\text{tg } \varphi$	-	0,007952	0,008712	0,009413	0,010060	0,010669	0,011248
$C_k$	-	7,7					
$F = \frac{C_k \cdot \text{tg } \varphi}{0,578 - \text{tg } \varphi}$	-	0,107	0,118	0,127	0,136	0,145	0,153
$G_{eu} = \chi_p \cdot F$	g·cm <sup>-3</sup>	0,885	0,971	1,050	1,124	1,193	1,259
$G_e = G_{eu} \cdot V$	g	40,0	44,0	48,0	51,0	54,0	57,0
$V_e = G_e / \chi_e$	cm <sup>3</sup>	36,4	40,0	43,2	46,2	49,0	51,8
$D = [V_e / L]^{0,5}$	mm	0,871	0,912	0,948	0,981	1,010	1,039
$d = 1,127D$	mm	9,8	10,3	10,7	11,0	11,4	11,7

<b>1. INTRODUCERE</b>	
1.1. Considerente asupra procedeelor de sudare. . . . .	1
1.2. Scurt istorie al dezvoltării îmbinării metalelor prin explozie. . . . .	6
1.3. Necesitatea aplicării sudării prin explozie la realizarea unor repere din industria construcțiilor de mașini și pentru metalurgia aluminiului. ..	11
1.4. Stadiul actual al cunoștințelor în domeniul sudării metalelor prin explozie. . . . .	15
1.4.1. Principiul sudării prin explozie. . . . .	15
1.4.2. Fenomenul fizic la sudarea prin explozie. . . . .	19
1.4.3. Procese metalurgice la sudarea prin explozie. ..	34
1.4.4. Metode pentru determinarea parametrilor de lucru la sudarea prin explozie. . . . .	39
1.4.5. Aplicații ale sudării prin explozie. . . . .	43
<b>2. CERCETARI PRIVIND ELABORAREA TEHNOLOGIEI DE SUDARE PRIN EXPLOZIE</b>	
2.1. Cupluri de metale utilizate pentru experimentări și caracteristicile lor. . . . .	46
2.2. Explozivi folosiți la experimentări și caracteristicile lor. . . . .	49
2.3. Materiale moderatoare și de protecție folosite la sudarea prin explozie. . . . .	50
2.4. Geometrii de sudare prin explozie și parametri de lucru. . . . .	50
2.5. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a metalelor. . . . .	58
2.5.1. Analiza metodelor de calcul a parametrilor folosite de unele laboratoare. . . . .	58
2.5.2. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a plăcilor. . . . .	65
2.5.3. Calculul parametrilor de lucru la sudarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare. . .	73
2.5.4. Calculul parametrilor de lucru la mandrinarea prin explozie a țevilor la plăcile tubulare. . .	75
2.5.5. Calculul temperaturilor la sudarea prin explozie. 81	
2.5.6. Tabele de calcul a parametrilor de lucru și întocmirea diagramelor. . . . .	85

	<u>pag.</u>
2.6. Echipamente folosite la sudarea prin explozie. . . . .	93
2.6.1. Platforme și dispozitive. . . . .	93
2.6.2. Instalații experimentale pentru sudarea prin explozie în aer. . . . .	94
2.6.3. Instalații experimentale pentru sudarea prin explozie în vid. . . . .	99
<b>3. TEHNOLOGII SI METODELE DE LUCRU LA SUDAREA METALILOR PRIN EXPLOZIE</b>	
3.1. Tehnologia sudării prin explozie în aer. . . . .	108
3.2. Tehnologia sudării prin explozie în vid. . . . .	115
3.3. Tehnologia sudării prin explozie a țevilor la placa tubulară. . . . .	116
3.4. Tehnologia mandrinării prin explozie a țevilor la placa tubulară. . . . .	121
<b>4. EXPERIMENTARI EFECTUATE SI REZULTATE</b>	
4.1. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetal în aer. . . . .	124
4.2. Sudarea prin explozie a plăcilor bimetal în vid. . . . .	131
4.3. Sudarea prin explozie a țevilor la plăci tubulare. . . . .	131
4.4. Mandrinarea prin explozie a țevilor la placa tubulară. . . . .	133
4.5. Incercarea și verificarea pieselor sudate prin explozie. . . . .	135
4.5.1. Incercări mecanice de rezistență. . . . .	135
4.5.2. Verificarea rezistenței electrice. . . . .	142
4.5.3. Probe metalografice. . . . .	144
4.5.4. Control defectoscopic. . . . .	145
4.5.5. Verificarea etanșeității. . . . .	145
<b>5. CERCETARI PRIVIND APLICAREA SUDARII PRIN EXPLOZIE IN INDUSTRIA CONSTRUCTIILOR DE MASINI</b>	
5.1. Cercetări și studii pentru sudarea prin explozie a unor repere din compunerea hidrogenatoarelor. . . . .	148
5.2. Cercetări și studii privind aplicarea mandrinării prin explozie la realizarea generatorului de aburi din centrale nucleare-electrice. . . . .	150
5.3. Cercetări privind realizarea în țară a plăcilor Al-0L pentru metalurgia aluminiului. . . . .	151

**6. APLICAREA SUDARII PRIN EXPLOZIE LA SCARA  
INDUSTRIALA**

6.1. Organizarea atelierului pentru sudarea prin explozie în aer. . . . .	153
6.2. Organizarea atelierului pentru sudarea prin explozie în vid. . . . .	157
6.3. Organizarea atelierelor mobile pentru sudarea și mandrinarea prin explozie a subansamblelor din compunerea centralelor nucleare electrice. . . . .	158

**7. CONSIDERATIILE ASUPRA APLICARII ÎN TARA A SUDARII  
PRIN EXPLOZIE**

7.1. Concluzii privind aplicarea pe scară industrială a sudării prin explozie. . . . .	163
7.2. Propuneri pentru extinderea procedurii de sudare prin explozie. . . . .	165
8. Bibliografie. . . . .	167
9. Notații folosite în lucrare. . . . .	177
10. Anexe. . . . .	180