

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA  
FACULTATEA DE MECANICA

Ing. VICTOR BUDAU

CERCETARI PRIVIND CORELATIA DINTRE FENOMENELE  
METALURGICE SI PARAMETRII PROCESULUI DE SUDARE  
A OTELURILOR CRIOGENICE ALIATE CU 9% NICHEL

TEZA DE DOCTORAT

CONDUCATOR STIINTIFIC

Prof.dr.ing.MARIN TRUSC

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

TIMIȘOARA  
1982

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA |            |
| BIBLIOTECA<br>CENTRALA          |            |
| Volumul Nr.                     | 44901      |
| Dupa                            | 288 Lit. G |

## C O N T I N U T

. pag.

### CAPITOLUL I.

|   |    |
|---|----|
| MATERIALE CRIOGENICE CARACTERISTICI-PROPRIETATI .....   | 1  |
| 1.1. Alegerea materialelor crio-genice și domeniul<br>utilizării lor.....                     | 1  |
| 1.2. Oțeluri aliate cu bază de nichel (2,25...9%Ni)....                                       | 6  |
| 1.3. Diagrama de echilibru Fe-Ni.....   | 7  |
| 1.4. Influența nichelului asupra punctelor critice<br>ale diagramei Fe-Fe <sub>3</sub> C..... | 8  |
| 1.5. Trăitamentul termic și proprietățile fizico-<br>mecanice ale oțelului aliat cu 9%Ni..... | 9  |
| 1.6. Scopul și obiectivul lucrării.....   | 19 |

### CAPITOLUL II.

#### CERCETARI PRIVIND INFLUENȚA CICLULUI TERMIC ASUPRA CARACTERISTICILOR DE REZISTENȚĂ LA ȘOC A OTELURILOR

|   |    |
|---|----|
| CRIOGENICE ALIATE CU Ni.....  | 17 |
| 2.1. Considerații teoretice privind ciclurile<br>termice la sudare.....                           | 17 |
| 2.2. Materiale și metode folosite.....  | 19 |
| 2.3. Simularea ciclurilor termice de sudare pentru<br>oțelurile crio-genice aliate cu 9%Ni.....   | 20 |
| 2.4. Analize structurale asupra probelor simulate.....  | 22 |
| 2.5. Analize sclerometrice asupra probelor simulate....   | 24 |
| 2.6. Încercări de încovoiere prin șoc.....  | 29 |
| 2.7. Aspecte metalografice ale epruvetelor de<br>rezistență simulate.....                         | 35 |
| 2.8. Corelații dintre grosimea tablelor, energia<br>liniară și parametrii răcirii $t_{5/5}$ ..... | 40 |
| CONCLUZII.....  | 46 |

### CAPITOLUL III.

#### CERCETARI ASUPRA CINETICII METALURGICE LA SUDARE

|  |    |
|--|----|
| A OTELURILOR CRIOGENICE ALIATE CU 9%Ni.....  | 48 |
| 3.1. Influența compoziției chimice asupra comportării<br>metalurgice la sudare a oțelurilor crio-genice<br>aliate cu 9%Ni..... | 48 |
| 3.2. Materiale de referință.....   | 52 |

|  | pag.       |
|--|------------|
| 3.3. Pregătirea materialului în vederea sudării.....   | 63         |
| 3.4. Procedee de sudare aplicate.....  | 67         |
| 3.5. Tratamente termice ante și post sudare.....   | 69         |
| 3.6. Examinări la microsonda electronică a<br>îmbinărilor sudate.....                                | 75         |
| 3.7. Proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate...  | 80         |
| CONCLUZII.....   | 100        |
| <b>CAPITOLUL IV.</b>   |            |
| <b>TRANSFORMARI STRUCTURALE LA SUDAREA OTELURILOR</b>  |            |
| <b>CRIOGENICE ALIATE CU 9%Ni.....</b>  | <b>103</b> |
| 4.1. Corelația dintre transformările structurale<br>și energia liniară de sudare.....                | 103        |
| 4.2. Corelația dintre transformările structurale<br>și tipul metalului de adaos.....                 | 108        |
| 4.3. Corelația dintre transformările structurale<br>și proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate | 117        |
| CONCLUZII.....   | 128        |
| <b>CAPITOLUL V.</b>  |            |
| <b>CONSIDERAȚII FINALE CONTRIBUTII ORIGINALE SI</b>  |            |
| <b>PROBLEME DE VIITOR.....</b>   | <b>130</b> |
| 5.1. Considerații finale.....  | 130        |
| 5.2. Contribuții originale.....  | 131        |
| 5.3. Probleme de viitor.....   | 133        |
| BIBLIOGRAFIE.....  | 150        |

## CAPITOLUL I.

### MATERIALE CRIOGENICE CARACTERISTICI-PROPRIETATI

#### 1.1. ALEGEREA MATERIALELOR CRIOGENICE SI DOMENIUL UTILIZARII LOR.

Necesitatea creerii și folosirii materialelor la temperaturi din ce în ce mai scăzute, a apărut odată cu extinderea folosirii gazelor lichefiate, cu construcția avioanelor, rachetelor, stațiilor de exploarări cosmice, care în multe situații lucrează la temperaturi apropiate de 0 K.

Construcția avioanelor stratosferice, a capsulelor aerospațiale, a rachetelor balistice, rezervoarelor și navelor pentru transportul gazelor lichefiate solicită utilizarea materialelor de înaltă rezistență mecanică, care să asigure o securitate ridicată în exploatare.

Economicitatea stocajului și transportului gazelor în stare lichidă prezintă avantaje deosebite, rezultate din compararea volumelor ocupate de un gaz la 293 K în stare gazoasă și lichidă.

Tabelul 1.1. [96]

Comparație între volumele ocupate de un gaz la 293 K în stare gazoasă și lichidă.

Tabelul 1.1.

| Denumirea gazului | Greutatea specifică a lichidului [g/cm <sup>3</sup> ] | Temperatura de lichefiere [K] | Volumul gazului / Volumul lichidului |
|-------------------|---|-------------------------------|--------------------------------------|
| Propan            | 0,580   | 231                           | 316                                  |
| Etilen            | 0,564   | 169                           | 455                                  |
| Metan             | 0,421   | 111,5                         | 630                                  |
| Oxigen            | 1,140   | 90                            | 850                                  |
| Azot              | 0,807   | 77                            | 690                                  |
| Hidrogen          | 0,071   | 20,2                          | 850                                  |
| Heliu             | 0,125   | 4                             | 755                                  |

Faptul că un metru cub de gaz, de exemplu de metan lichid, eliberează 630 m<sup>3</sup> gaz când trece în condiții normale este suficient de a justifica cercetările întreprinse cu privire la folosirea aliajelor metalice pentru astfel de aplicații.

Realizarea caosulelor aerospațiale și a avioanelor stratosferice necesită materiale cu caracteristici de rezistență mecanică deosebite ( $G/R_m$  cât mai mic) asociate unor valori favorabile ale ductilității și tenacității în intervalul de temperatură de exploatare 473...4 K.

În general se tinde de a lega comportarea materialului la temperaturi joase de sistemul lui cristalin.

Metalele și aliajele care cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate ca spre exemplu: aluminiul, cuprul, nichelul, plumbul și oțelurile austenitice, au o bună comportare la temperaturi joase. Cele care cristalizează în alte sisteme cristaline - cubic centrat, hexagonal sînt considerate ca fragile la temperaturi scăzute, ca de exemplu fierul  $\alpha$ , zincul, magneziul, oțelurile feritice [7,18,25].

Se precizează că pe lângă factorul cristalin intervin și alți factori care influențează comportarea materialelor la temperaturi scăzute.

Magneziul și zincul care au o rețea cristalină hexagonală deopotrivă au un comportament la temperaturi joase total diferit. Magneziul și aliajele lui ultraușoare se comportă bine la 193 K, fapt care justifică folosirea lor în construcția avioanelor stratosferice, zincul însă devine fragil la temperaturi de 263...253 K.

De asemenea oțelurile feritice sînt fragile la temperaturi scăzute de ordinul 73 K și este bine să se ia în considerare modul în care este afectată temperatura de tranziție a rezilienței și nu sistemul cristalin al materialului [7,18,35].

Pînă în 1952 pentru fabricarea conductelor, rezervoarelor din domeniul criogenic, se utilizau aliaje pe bază de aluminiu sau cupru, a căror slabă rezistență la rupere era sensibil compensată de reducerea lor greutate specifică. Pentru a se mări rezistența la rupere a acestor aliaje li s-a adăugat magneziu, dar creșterea conținutului acestuia favorizează formarea porozităților și a oxizilor în timpul sudării și ca atare le scade reziliența la temperaturi joase.

Rezistența la rupere a aliajelor pe bază de aluminiu sau cupru se situează la 5...10 daN/mm<sup>2</sup> și nu este prea mult ridicată prin adăosuri de magneziu [7,113].

Oțelurile austenitice (tipul 18-8 și altele) constituie un material excelent pentru întrebuințări la temperaturi joase dar prețul lor de cost fiind ridicat nu se justifică utilizarea lor decât la temperaturi sub 73 K.

După 1944 apare tendința de fabricare a oțelurilor cu 1,5... 9%Ni pentru temperaturi de 223...73 K.

Folosindu-se efectul cunoscut de multă vreme că nichelul deplasează temperatura de tranziție a rezilienței oțelului spre valori din ce în ce mai joase, s-au elaborat oțeluri aliate cu 2,25; 3,5; 5 și 9%Ni care dădeau rezultate bune în exploatare la 213; 169; 147 și 77 K.

După catastrofa de la Cleveland (USA) se părea că oțelurile pe bază de Ni sînt complet condamnate pentru a fi folosite la temperaturi joase și în special pentru transportul și stocajul gazelor lichefiate [69,70].

Studiile făcute în perioada 1948...1961 au demonstrat însă că aceste oțeluri pot și dau rezultate bune în domeniul criogenic [7,48,69].

După operațiunea criogenică în urma rezultatelor bune ASTM publică specificații care stabilesc tipurile de oțeluri criogenice aliate cu Nichel, compozițiile chimice și caracteristicile mecanice [7,68,69].

Funcție de temperaturile de exploatare și de condițiile de solicitare, materialele criogenice se clasifică în:

- Aliaje neferoase pe bază de Al,Cu,Ni,Ti,Li,Mg etc;
- Fonte austenitice cu grafit nodular;
- Oțeluri aliate cu bază de nichel (2,25...9%Ni);
- Oțeluri austenitice Cr-Ni.

Intervalul de temperaturi și sfera de aplicabilitate a acestor materiale reiese în evidență din tabelul 1.2 și figura 1.1.

Făcînd o comparație între unele materiale folosite la temperaturi joase (Tabelul 1.3) se remarcă faptul că prezintă avantaj oțelul cu 9%Ni.

La construirea unor rezervoare de dimensiuni mici se realizează o economie de 15%, iar la rezervoare de dimensiuni mari se realizează o economie de 10% dacă se utilizează oțel aliat cu nichel în loc de oțel austenitic 18-8 [7].

Actualmente, 40% din utilajele mondiale destinate, să lucreze la temperaturi de 293...77 K sînt confecționate din oțel aliat cu

Tab.1.2.

RECOMANDARI DE MATERIALE PENTRU DOMENIUL CRIOGENIC

| Temperatura de lucru [K] | Rm [dy/mm <sup>2</sup> ] | Alte caracteristici   | Produce lichide la presiunea atmosferică        |
|--------------------------|--------------------------|---|---|
| pînă la 238 K            | 45<br>1,4                | Nivelul minim de energie CHARPY V [daJ]<br>53<br>21   | Amoniac lichid (-238 K)                         |
| pînă la 222 K            | 45<br>1,8                | oțeluri carbon cu conținut de 0,85... 1,2 % Mn (ASTM 201)   |   |
| pînă la 222 K            | 45<br>1,8                | oțeluri carbon cu 0,85... 1,2 % Mn, ASTM 201 și A 300 A   | Propan pur și industrial (-231... 225 K)        |
| pînă la 172 K            | 45<br>1,8                | oțeluri aliate cu 3,5 % Ni, ASTM A 203 D și A 300   | Bioxid de carbon, acetonă, etan (-195... 184 K) |
| pînă la 75 K             | 45<br>1,8                | Fonte cu grafit modular: 2,6 % C, 2,12 % Si, 3,75 % Mn, 21,5 % Ni. oțeluri inoxidabile cu max. 0,1 % C ASTM A 240 | Etan, metan, argon, oxigen, azot (169... 77 K)  |
| pînă la 4 K              | 45<br>1,8                | Aluminii și aliaje de Al-Mg oțeluri inoxidabile cu max. 0,1 % C, Tip 304, 304 L și 347 ASTM A 204                 | Neon, hidrogen, heliu (27... 4°K)               |

9% Ni, 40% din aliaje pe bază de aluminiu și restul din oțel austenitic Cr-Ni și aliaje Ni-Fe cu 36% Ni [47].

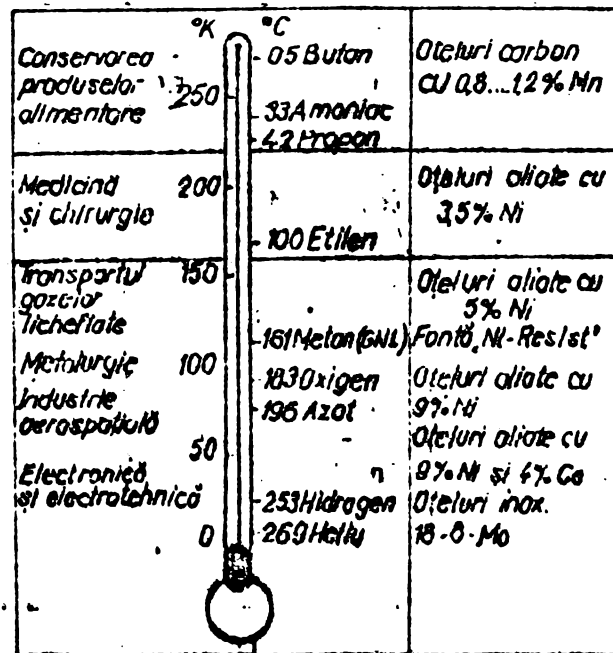


Fig. 1.1. Recomandări de materiale pentru domeniul criogenic.

Comparație între unele materiale din domeniul criogenic

Tabelul 1.3.

| Calitatea materialului | $R$ [ $\text{daN/mm}^2$ ] | $R_{0,2}$ [ $\text{daN/mm}^2$ ] | $E \cdot 10^3$ [ $\text{daN/mm}^2$ ] | Coefficientul de dilatare $\times 10^{-6}$ la $293 \dots 77 \text{ K}$ | Preț de cost |
|------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--|--------------|
| Oțel aliat cu 9% Ni    | 65                        | 50                              | 20                                   | 9,5  | 0,5          |
| Oțel austenitic 18-8   | 50                        | 22                              | 19,6                                 | 15   | 1            |
| Aliaje de Al + 5% Mg   | 25                        | 13                              | 6,6                                  | 18   | 0,5          |

Alegerea marcii de oțel studiate și a metodologiei de lucru, fructifică cunoștințele dobândite de doctorand în cadrul colectivului de studii metale și tratamente termice pe probleme de materiale criogenice precum și în cercetarea oțelurilor speciale cu bază de Ni (2,25...9%) la care a participat în cadrul contractelor de colaborare cu CEM București și R. I. R. București.



Sugestiile prețioase de înaltă competență științifică primite din partea conducătorului științific precum și îndrumarea continuă pe toată durata elaborării lucrării, au constituit un sprijin deosebit și un imbold pentru o continuă perfecționare a activității de cercetare. Pentru toate acestea precum și pentru generozitatea cu care a oferit din timpul prețios al Domniei Sale, autorul mulțumesc conducătorului său științific Prof.dr.ing.Marin Trușculescu, inițiatorul cercetării materialelor criogenice în țara noastră.

## 1.2. OTELURI ALIATE CU BAZA DE NICHEL (2,25...9%Ni)

Proprietățile acestor oțeluri sînt dependente de natura, cantitatea și mărimea constituenților structurali : ferită, perlită, bainită, martensită.

Oțelurile cu structura ferito-perlitică au un conținut de pînă la 3,5% Ni și proprietăți dependente de dimensiunea grăuntelui feritic, de cantitatea de perlită, de natura elementelor participante la formarea soluțiilor solide și de morfologia precipitatelor fine. Limita de curgere este cu atît mai ridicată, cu cît dimensiunea grăuntelui este mai mică și cu cît fazele secundare sînt mai fine. Elementele care formează soluții solide de inserție sau substituție au aproape toate, într-un mod gradat o influență pozitivă (cele mai active sînt C și N, apoi P, Mn și Ni) asupra limitei de curgere. Cantitatea de perlită influențează sensibil rezistența la rupere a aliajului.

Rezistența de rupere fragilă este influențată favorabil de prezența Ni ca element de aliere și de un grăunte feritic cît mai fin.

Oțelurile cu structură bainitică sau martensitică posedă proprietăți dependente de cantitatea constituenților prezenți de mărimea grăuntelui, de natura elementelor din soluția solidă și de morfologia compușilor precipitați.

În categoria acestora, intră și oțelurile aliate cu 9% Ni, respectiv 9% Ni și 4% Co la care printr-o simplă răcire în aer se obțin fie structuri intermediare fie în afară de echilibru.

Caracteristicile de rezistență mecanică sînt superioare oțelurilor austenitice, ele utilizîndu-se cu succes pînă la temperaturi de exploatare de 77 K [7,97].

Oțelurile cu 9% Ni fiind utilizate în construcții sudate de mare rezistență, eforturile cercetătorilor sînt orientate spre

utilizarea cât mai rațională a metalului de bază prin aplicarea de noi procedee și materiale de sudare oferind în același timp garanții din punct de vedere al fiabilității și securității produselor.

În acest sens folosirea unor electrozi și sârme (cu 9...13%Ni) care dau caracteristici mecanice ( $R_m$ , KCV) apropiate de ale metalului de bază față de electrozii și sârmele bogat aliate cu nichel (de tip INCONEL și INCOWELD) care au un preț de cost mult prea ridicat și caracteristici mecanice inferioare metalului de bază constituie posibilități certe de realizare a acestui deziderat.

### 1.3. DIAGRAMA DE ECHILIBRU Fe-Ni

Nichelul cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate și este total solubil în stare solidă la temperaturi ridicate, deschizând domeniul fierului  $\gamma$  prin efectul său puternic gamagen.

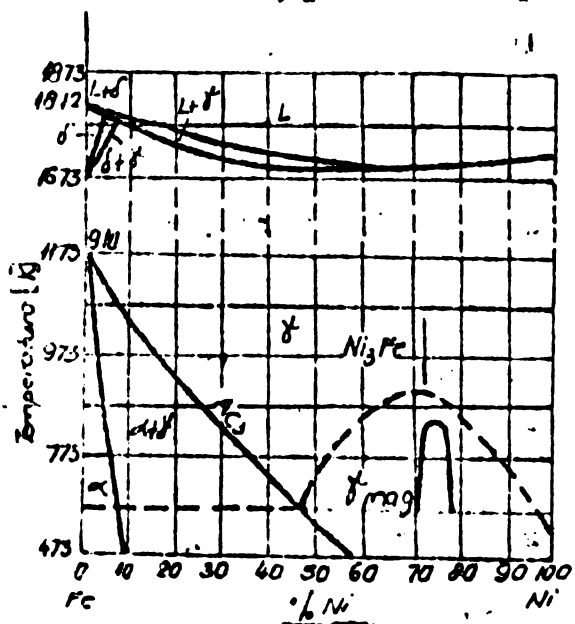


Fig.1.2. Diagrama de echilibru Fe-Ni

slabă și ca urmare la aliaje cu peste 10% Ni, austenita nu se transformă nici la o răcire foarte lentă, ci are loc o transformare în martensită cubică. Această transformare austenită-martensită a aliajelor Fe-Ni, decurge în același mod ca la călirea oțelului carbon și a altor oțeluri, cu deosebirea că în celulele elementare ale martensitei nu sînt incluși atomi de carbon, deci martensita nu apare în formă tetragonală ci în formă cubică. Această martensită cubică denumită și soluție solidă  $\alpha_c$  prezintă aceeași compoziție ca și

Așa după cum se observă din figura 1.2. pe măsura creșterii conținutului în nichel se mărește domeniul de existență al fierului  $\gamma$  și se îngustează sau chiar se suprimă domeniul fierului  $\alpha$ . La concentrații mari în Nichel apare pe diagramă un domeniu al compusului intermetalic  $Ni_3Fe$ .

Transformarea de bază  $\gamma \rightarrow \alpha_c$  este însoțită de o modificare accentuată a concentrației și este deplasată la temperaturi tot mai coborîte. La temperaturi mai joase, difuziunea este

austenita din care s-a format, de aceea ea este o soluție solidă metastabilă suprasaturată, care are stabilitate la temperatura ambiantă.

Din diagrama prezentată în figura 1.3. se observă că transformarea  $\gamma \rightarrow \alpha$  are loc pînă la conținuturi de 34% Ni.

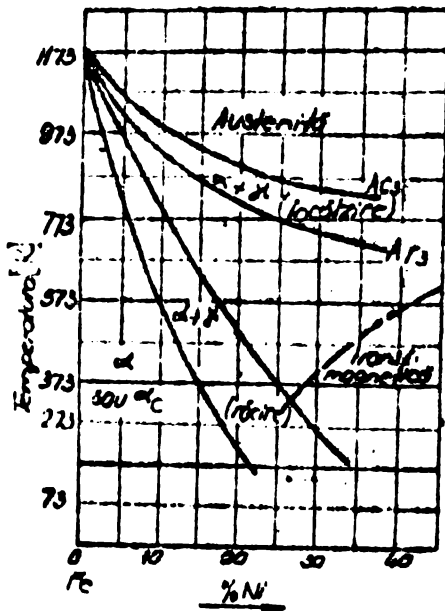


Fig.1.3. Diagrama reală a  $(\alpha_c)$  și austenită netransformată a aliajelor Fe-Ni.

Austenita aliajelor cu peste 34% Ni este metastabilă și poate fi transformată în martensită dacă se aplică răcirii sub zero grade Celsius.

Aliajele Fe-Ni prezintă un puternic histeresis termic, a cărui valoare crește pe măsura ridicării conținutului în nichel (fig.1.3).

Aliajele cu peste 7% Ni care au fost încălzite peste  $Ac_3$  iar ulterior supuse răcirii, nu vor suferi nici un fel de transformări pînă la temperatura punctului  $M_s$ .

La temperatura ambiantă, structura lor va fi formată din martensită cubică

( $\alpha_c$ ) și austenită netransformată.

Dacă un asemenea aliaj (cu structura alcătuită din  $\alpha_c + \gamma_{rez}$ ) va fi din nou încălzit, va suferi schimbări numai dacă temperatura va fi superioară lui  $Ac_3$ . Menținerea acestui aliaj un timp îndelungat la temperaturi apropiate de  $Ac_3$ , va favoriza transformarea  $\alpha_c \rightarrow \alpha + \gamma$ . Fenomenul de stabilitate al austenite la răcire sau încălzire în intervalul  $Ac_3 \dots M_s$  este numit ireversibilitate. Acest lucru poate fi explicat prin modificarea difuziunii atomilor de nichel. Micșorîndu-se difuziunea pe măsura coborîrii temperaturii zonele din austenită devin mai bogate în nichel și ca atare crește stabilitatea acestei faze.

#### 1.4. INFLUENȚA NICHELULUI ASUPRA PUNCTELOR CRITICE

##### ALE DIAGRAMEI Fe-Fe<sub>3</sub>C.

Nichelul micșorează concentrația în carbon a entectoidului și deplasează punctele critice ale diagramei Fe-Fe<sub>3</sub>C spre temperaturi mai coborîte. Totodată, nichelul coboară poziția punctelor critice ale transformării martensitice.

Carbonul cu nichelul pur formează soluții solide (pînă la 0,5 și o combinație endotermică nestabilă:carbura de nichel Ni<sub>3</sub>C.

(6,33% C). În aliajele Fe-Ni-C nu are această carbură, din contră prezența nichelului contribuie la descompunerea cementitei. Nichelul micșorează tendința de supraîncălzire și împiedică creșterea grăunțurilor. Aliajele Fe-Ni-C după răcirea lentă pot avea diferite structuri în funcție de conținutul în carbon și nichel (figura 1.4).

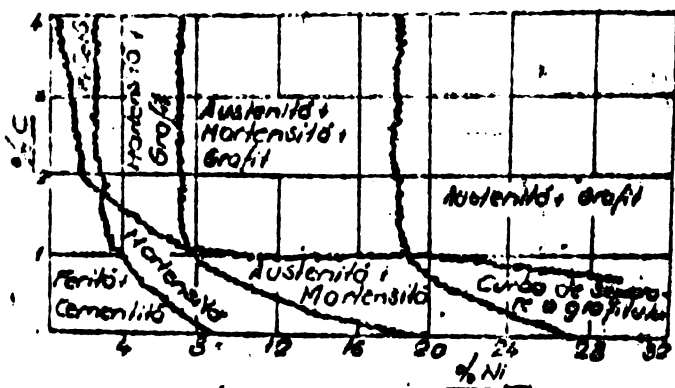


Fig.1.4. Diagramă structurală a oțelurilor aliate cu Ni la răcirea lentă.

nichel sînt de dimensiuni mici, tendința acestora de creștere în timpul austenitizării de lungă durată este foarte mică și ca urmare se favorizează obținerea unor structuri fine.

Deoarece nichelul e în general deficitar, oțelurile aliate cu nichel sînt utilizate doar pentru scopuri speciale acolo unde influența specifică a nichelului nu poate fi înlocuită de către nici o altă combinație de aliere. Tenacitatea mare la temperaturi scăzute a oțelurilor de construcție aliate cu nichel nu se poate depăși. Reziliența unui oțel aliat cu Ni este excelentă la temperaturi foarte scăzute. În consecință orientarea în domeniul construcțiilor criogenice către oțeluri de construcție aliate cu nichel este pe deplin justificată.

### 1.5. TRATAMENTUL TERMIC SI PROPRIETATILE FIZICO-MECANICE

#### ALE OTELULUI ALIAT CU 9% NI.

Acest material este un oțel economic, folosit pentru construcția recipientelor și instalațiilor destinate transportului și stocajului gazelor lichefiate pînă la temperatura corespunzătoare azotului lichid 77 K. Ductilitatea, rezistența mecanică și comportarea sa metalurgică de sudare sînt foarte bune și ca urmare acest

oțel este fabricat în Europa, S.U.A. și Japonia sub formă de table, piese forjate, bare și profile [ 5,6,7,115,116 ] .

### 1.5.1. Tratamentul termic.

De obicei, oțelul aliat cu 9% Ni este supus următoarelor tratamente termice:

1. Dublă normalizare prima la 1153...1193 K, iar a doua la 1053...1093 K urmată de o revenire la 833...873 K.

2. Călire de la 1063...1093 K urmată de o revenire la 833...873 K.

Prezența în structura oțelului revenit a unor mici insule de austenită reziduală, stabilă chiar la temperatura azotului lichid conferă materialului o excelentă reziliență la temperaturi joase. De asemenea, prin cea de a doua normalizare, respectiv prin călire, se obține o structură martensito-bainitică, care datorită compoziției chimice posedă valori foarte favorabile pentru caracteristicile de ductilitate și reziliență. Actualmente pe plan mondial, se studiază și alte posibilități de tratamente termice clasice sau termomecanice care aplicate acestui oțel conduc la creșterea caracteristicilor de rezistență mecanică, fără diminuarea sensibilă a celor de tenacitate [ 59 ] .

Pentru obținerea anumitor structuri se aleg parametrii regimului de tratament termic din diagramele TTT sau CCT ale oțelului prezentate în fig.1.5 și 1.6.

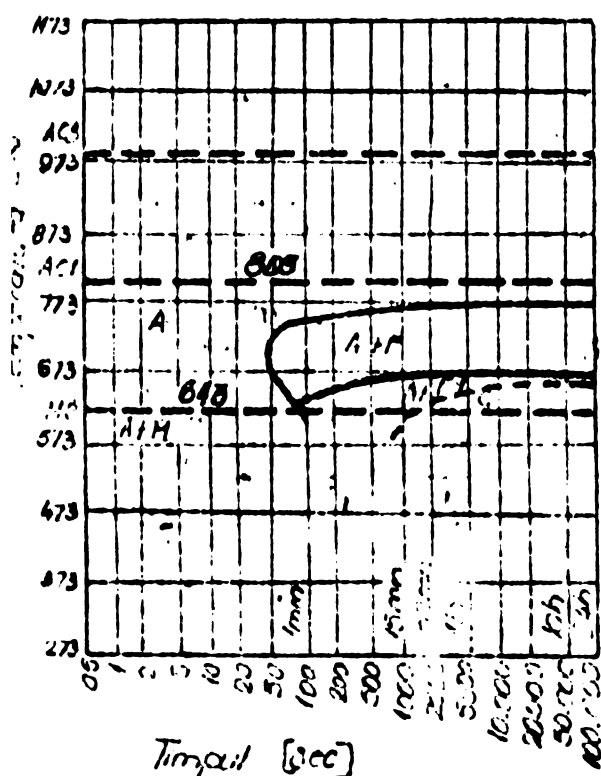


Fig.1.5. Diagrama TTT a oțelului aliat cu 9% Ni.

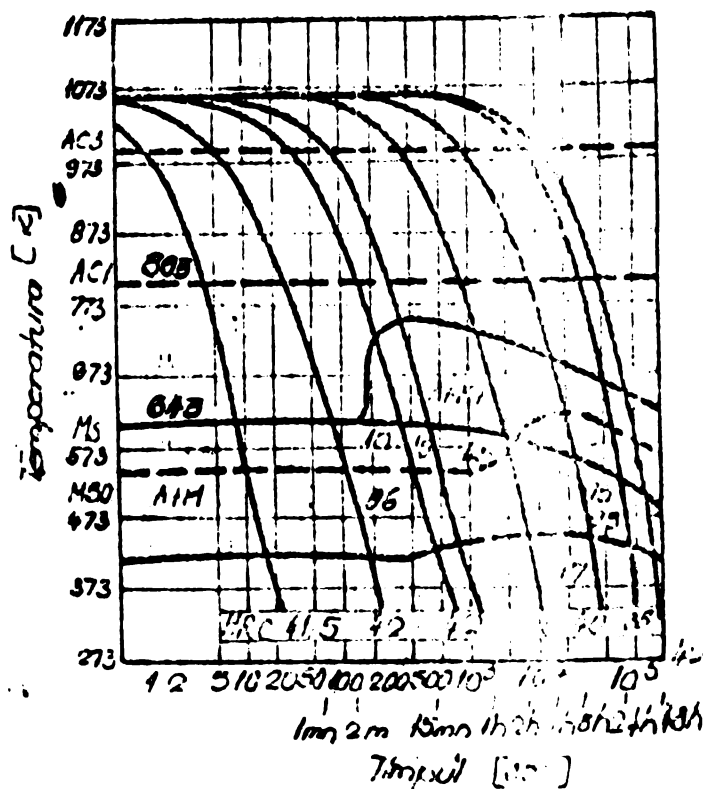


Fig.1.6. Diagrama CCT a oțelului aliat cu 9% Ni.

Pentru oțelurile aliate cu 9% Ni se recomandă aplicarea următoarelor tipuri de tratamente termice:

- normalizare la 1153...1193 K /1,5 min/1 mm grosime/aer + normalizare la 1053...1093 K/1,5 min/1 mm grosime/ aer + revenire la 833...873 K/120 min/aer.

- călire la 1063...1093 K/1,5 min/1 mm grosime/apă + revenire la 833...873 K/120 min/aer

### 1.5.2. Proprietăți fizice.

Modul de variație a citorva proprietăți fizice ale oțelului aliat cu 9% Ni în funcție de temperatura de încercare este redat în tabelul 1.4.

Se remarcă faptul că schimbări esențiale apar pentru valorile conductivității termice și ale coeficientului mediu de dilatare termică liniară.

Proprietățile fizice ale oțelului cu 9% Ni funcție de temperatura de încercare

Tabelul 1.4.

| Nr. crt. | Proprietatea fizică                    | Unitatea de măsură  | Temperatura de încercare [K]  | Valori medii  |
|----------|--|---------------------|---|---|
| 1.       | Densitatea                             | Kg/m <sup>3</sup>   | 293   | 7,86.10 <sup>3</sup>  |
| 2.       | Căldura specifică                      | J/kg.grd            | 77... 300<br>300... 643   | 358<br>438  |
| 3.       | Modulul de elasticitate                | daN/mm <sup>2</sup> | 293<br>77   | 13.600<br>20.700  |
| 4.       | Rezistivitatea                         | μΩ/cm               | 293   | 33  |
| 5.       | Conductivitatea termică                | J/m.s.grd.          | 73<br>123<br>193<br>223<br>273<br>373<br>473                                    | 12,48<br>19,13<br>22,88<br>26,20<br>28,28<br>31,60<br>33,69   |
| 6.       | Coeficientul de dilatare liniară mediu | 1/grd               | 73... 289<br>173... 289<br>198... 289<br>198... 373<br>289... 373<br>289... 473 | 8,3.10 <sup>-6</sup><br>9,5.10 <sup>-6</sup><br>9,6.10 <sup>-6</sup><br>10,4.10 <sup>-6</sup><br>11,6.10 <sup>-6</sup><br>11,8.10 <sup>-6</sup> |

1.5.3. Caracteristici mecanice

Oțelul aliat cu 9 % Ni se comportă foarte bine într-un domeniu de temperaturi extrem de larg 723 K ... 77 K. In tabelul 1.5 sînt prezentate caracteristicile mecanice impuse de anumite norme și specificații străine. In figurile 17 și 18 este redată evoluția caracteristicilor de tracțiune respectiv a rezilienței, în funcție de temperatura de incercare. Se remarcă în special valorile mari ale rezilienței, obținute la temperaturi scăzute ( 73... 23 K).

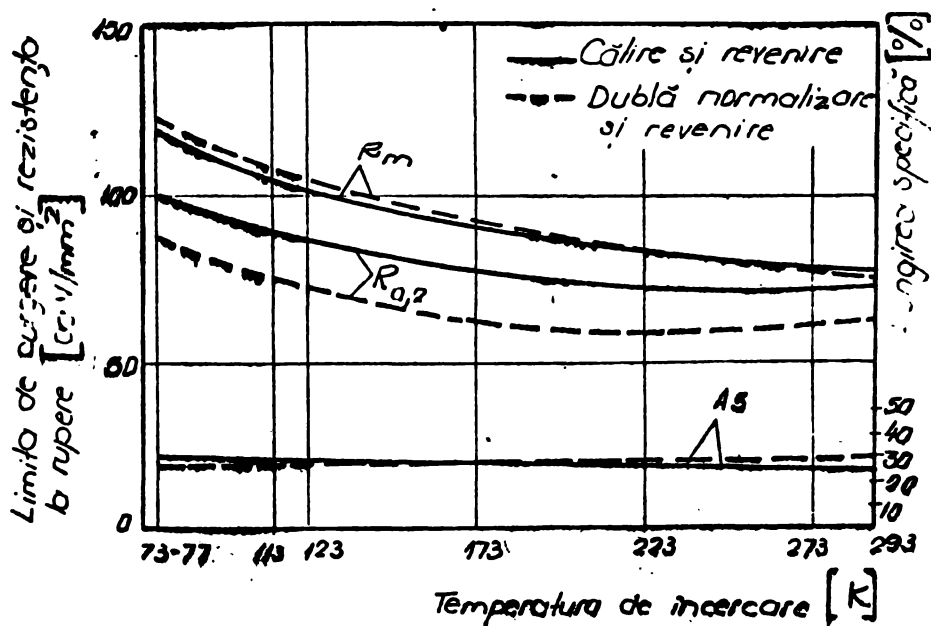


Fig.1.7. Caracteristicile mecanice ale oțelului cu 9 % Ni funcție de temperatura de incercare.

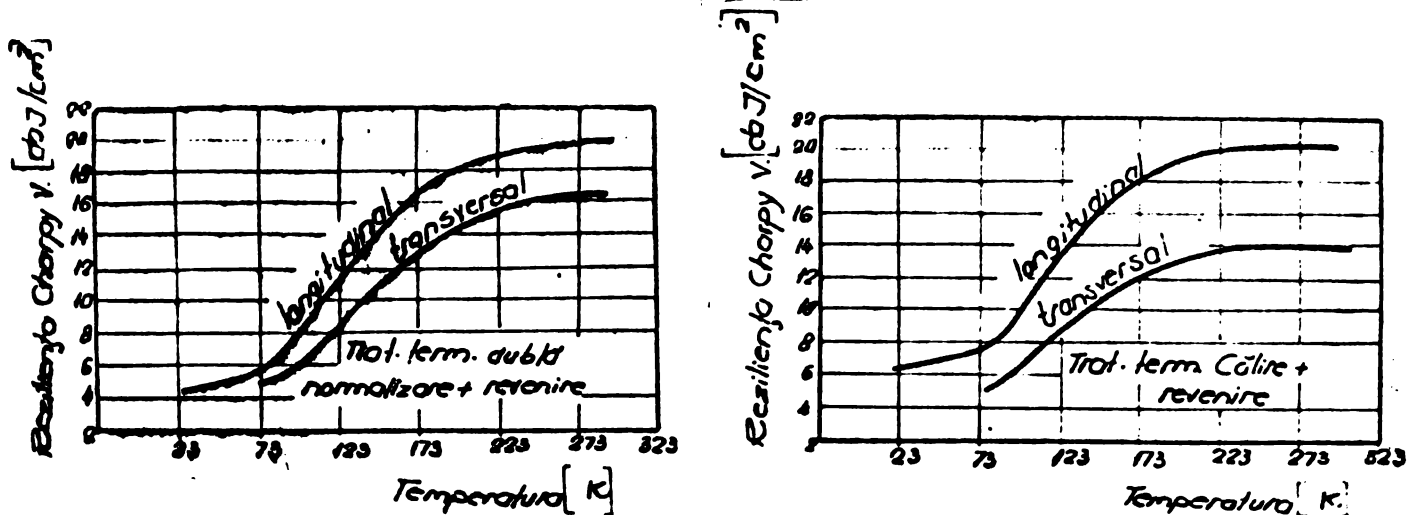


Fig.1.8. Reziliența Charpy V Obținută pe epruvete prelevate longitudinal și transversal din table de oțel cu 9 % Ni funcție de temperatura de incercare și starea de tratament termic.

TABEL 1.5.

CARACTERISTICILE MECANICE ALE OTELULUI CU 9 % Ni  
IMPUSE DE ANUMITE NORME SI SPECIFICATII STRAIKE

| Nr. | Starea de livrare și proprietăți                                | ENGLIA          | BELGIA     | FRANTA           | R.F.G.             | ITALIA          | NORVEGIA    | S.U.A.          |
|-----|---|-----------------|------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------|
|     |   | BS 1501-1970    | NBN 509    | AFNOR NFA 36-208 | Werkstoffol 680-70 | UNI 5920-66     | Dn7 NV 20-2 | ASTM A 553-70 a |
|     |   | 510 630-70      | 10N136     | 9 % Ni           | x8 Ni9             | x10Ni9          | (1971)      | Grade A         |
| 1.  | Tratament termic  | N.N.R. sau C.R. | -          | -                | N.N.R. sau C.R.    | N.N.R. sau C.R. | -           | N.N.R. C.R.     |
| 2.  | Grosimea mm   | -               | -          | 16-40            | -                  | -               | 30-50       | -               |
| 3.  | Rm daN/mm <sup>2</sup> la T = 293 K                             | 69,5            | 69,5       | 63,7-83,7-83,3   | 68,6               | 63,7-83,4       | 68,6-83,4   | 63,7            |
| 4.  | R <sub>0,2</sub> daN/mm <sup>2</sup> la T = 293 K               | 52,5            | 58,7       | 52,9             | 58,8               | 49,0            | 49,0        | 44,1            |
| 5.  | Z % la T = 293 K  | -               | -          | -                | -                  | 50,0            | 50,0        | 50              |
| 6.  | A % la T = 293 K  | 18,0            | 18,0       | 17,0             | 19,0               | 19,0            | 17,0        | 20              |
| 7.  | Reziliența daJ/cm <sup>2</sup> Tip și temperaturi de încercare. | KCV lungit      | KCV lungit | KCV lungit       | DVM                | KCV lungit      | KCV lungit  | KCV             |
|     |   | T = 77          | T = 77     | T = 77           | T = 77             | T = 77          | T = 77      | T = 77          |
|     |   | L               | L          | L                | L                  | L               | L           | L               |

|      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 42,1 | 4,2 | 4,9 | 6,0 | 5,9 | 3,4 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 3,4 | 4,2 | 3,4 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

N - normalizare ; C - călire ; R - revenire.



Efectul numărului de cicluri de răcire între 293... 77 K cu sau fără aplicarea unor tensiuni de întindere, asupra rezilienței KCV pentru starea de tratament - dublă normalizare și revenire este dat în tabelul 1.6.

Comportarea bună a oțelului și la temperaturi ridicate reiese clar în evidență din tabelul 1.7. unde sînt prezentate cîteva valori ale caracteristicilor mecanice pentru diferite variante de tratament termic și două grosimi de tablă.

Efectul numărului de cicluri de răcire între 293 K și 77 K asupra rezilienței oțelului cu 9 % Ni.

Tabelul 1.6.

| Nr. crt. | Tensiunea aplicată daN/mm <sup>2</sup> | Nr. ciclurilor de răcire între 293 K și 77 K | Reziliența KCV daJ / cm <sup>2</sup> |                    |          |                    |
|----------|--|--|--------------------------------------|--------------------|----------|--------------------|
|          |  |  | T = 293 K                            |                    | T = 77 K |                    |
|          |  |  | KCV                                  | Ruptură fibroasă % | KCV      | Ruptură fibroasă % |
| 1.       | 0                                      | 0  | 18,7                                 | 100                | 7,75     | 65                 |
| 2.       | 0                                      | 20   | 18,6                                 | 100                | 8,50     | 67                 |
| 3.       | 15,3                                   | 20   | 18,5                                 | 100                | 8,50     | 67                 |

Caracteristicile mecanice ale oțelului cu 9 % Ni la temperaturi ridicate.

Tabelul 1.7.

| Nr. crt. | Temperatura de încercare K | Grosime tablă mm | Tratament termic            | Proprietăți mecanice              |                                     |     |     |
|----------|----------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----|-----|
|          |                            |                  |                             | R <sub>m</sub> daN/m <sup>2</sup> | R <sub>0,2</sub> daN/m <sup>2</sup> | A % | Z % |
| 1.       | 293                        | 13               | călire + revenire           | 76                                | 64                                  | 25  | 74  |
|          | 393                        |                  |                             | 70                                | 63                                  | 23  | 73  |
|          | 503                        |                  |                             | 70                                | 62                                  | 23  | 73  |
|          | 613                        |                  |                             | 66                                | 56                                  | 31  | 78  |
|          | 723                        |                  |                             | 52                                | 47                                  | 26  | 79  |
| 2.       | 293                        | 13               | Dublă normalizare +revenire | 76                                | 61                                  | 26  | 71  |
|          | 393                        |                  |                             | 69                                | 53                                  | 24  | 71  |
|          | 503                        |                  |                             | 70                                | 52                                  | 26  | 69  |
|          | 613                        |                  |                             | 63                                | 48                                  | 30  | 77  |
|          | 723                        |                  |                             | 48                                | 41                                  | 30  | 61  |
| 3.       | 293                        | 51               | Călire + revenire           | 75                                | 69                                  | 25  | 72  |
|          | 393                        |                  |                             | 70                                | 63                                  | 23  | 73  |
|          | 503                        |                  |                             | 70                                | 61                                  | 22  | 69  |
|          | 613                        |                  |                             | 66                                | 57                                  | 29  | 77  |
|          | 723                        |                  |                             | 52                                | 48                                  | 26  | 82  |
| 4.       | 293                        | 51               | Dublă normalizare +revenire | 71                                | 55                                  | 26  | 69  |
|          | 393                        |                  |                             | 63                                | 50                                  | 25  | 72  |
|          | 503                        |                  |                             | 62                                | 49                                  | 25  | 70  |
|          | 613                        |                  |                             | 61                                | 47                                  | 32  | 76  |
|          | 723                        |                  |                             | 46                                | 39                                  | 34  | 85  |

## 1.6. SCOPUL SI OBIECTIVELE LUCRARIII.

Actualmente interesul pentru utilizarea rațională a oțelurilor la temperaturi joase este deosebit, iar diferitele studii întreprinse tind să mărească atât capacitatea cât și securitatea instalațiilor în acest domeniu.

Oțelurile criogenice aliate cu 9% Ni trebuie să prezinte o bună tenacitate la temperatura așotului lichid ( la 77 K,  $KV > 28$  J). Cu tot efortul experimental care se desfășoară în prezent, numai pentru puține materiale sînt cunoscute caracteristicile de tenacitate, aceasta în primul rînd datorită extremei sensibilități a acestor caracteristici la microstructură și impurități care pot diferi esențial chiar în cadrul aceleiași mărci de material în funcție de evoluția concretă a elaborării pînă în stadiul destinat aplicații.

Oțelurile criogenice aliate cu 9% Ni se folosesc în construcții sudate de mare răspundere (rezervoare și nave pentru transportu gazelor lichefiate etc.) motiv pentru care cunoașterea comportării la sudare a acestora prezintă importanță deosebită.

Dacă pentru oțelurile criogenice cu 9% Ni din import (NFA36-208-U din Franța, ASTM A353-70a din USA, VDEh 680-70 din R.F.G., BS 1501-509.70 din Anglia, NBN 630-70 din Belgia) există indicații mai detaliate privind comportarea la sudare [ 2,3,4,5,6,7,29,47,94,95,117,122 ] pentru oțelurile criogenice românești indicațiile sînt mai reduse [14,16,105] .

De menționat că electrozii utilizați la sudarea oțelului aliat cu 9% Ni au fost de mai multe tipuri și se pare că nu a fost fabricat un electrod care să satisfacă toate cerințele impuse. În literatură apar des citați electrozii Incowel A și Inconel 132 care dau reziliență de oca 9...12 daJ/cm<sup>2</sup> la 77 K, au însă caracteristici mecanice de rezistență în special limita de curgere mult mai mică decît a mătăului de bază și un preț de cost mult prea ridicat în comparație cu a oțelului cu 9% Ni [7,47,50,70,80,95,109] .

Pornind de la aceste considerații și ținînd seama de metodele existente în literatură de specialitate cu încercările caracteristice transformărilor din zona influențată termic și a unor criterii cunoscute de apreciere a comportării la sudare a oțelurilor teza de doctorat urmărește două obiective importante:

- Cercetarea modificărilor structurale din zona influențată termic (ZIT) a oțelurilor criogenice aliate cu 9% Ni în urma simulării ciclurilor termice de la sudare folosind energii liniare diferite.

Analizând comparativ reziliența, duritatea și starea structurală se scot în evidență particularitățile transformărilor structurale din ZIT a oțelurilor criogenice românești.

- Studiarea influenței naturii metalului depus asupra tenacității cusăturii și a ZIT-ului, atât la temperatura ambiantă cât și la 77 K. În acest scop s-au folosit electrozii austenitici Cr25Ni20B din producția curentă și două categorii de electrozi elaborați experimental (electrozi cu compoziția chimică similară cu a materialului de bază simbolizați cu EL9Ni respectiv electrozi cu 17% Cr, 12% Ni, 8% Mn, 3,5% W simbolizați cu ERGL11.1) precum și sîrmă cu 9% Ni de 1,2 și 1,6 mm.

Îmbunătățirea substanțială a rezistenței mecanice prin folosirea electrozilor cu 9...13% Ni, față de electrozii austenitici Cr25Ni20B din producția curentă cu menținerea unor valori corespunzătoare pentru caracteristicile de plasticitate, permit realizarea unor produse mai ușoare, cu o rezistență și securitate mărită în exploatare, respectiv o utilizare rațională a aliajelor metalice în construcția de mașini.

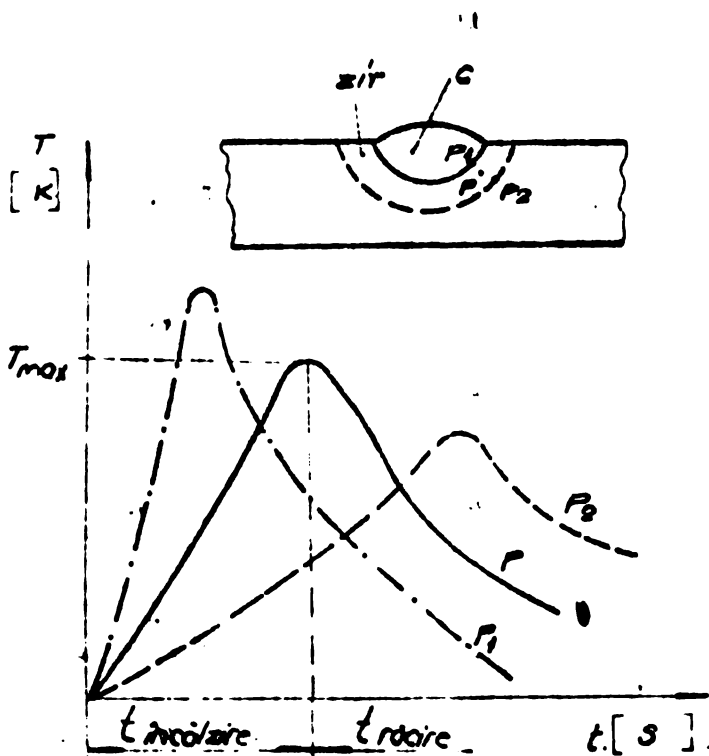
CAPITOLUL II

CERCETARI PRIVIND INFLUENTA CICLULUI TERMIC  
ASUPRA CARACTERISTICILOR DE REZISTENTA LA SOC  
A OTELURILOR CRICGENICE ALIATE CU 9% Ni.

2.1. CONSIDERATII TEORETICE PRIVIND CICLURILE  
TERMICE DE LA SUDARE.

La sudarea cu arcul electric componentele se încălzesc datorită căldurii metalului topit al băii metalice și se formează zona influențată termic ZIT.

Variația temperaturii în orice punct al ZIT-ului decurge conform unui ciclu termic (fig.2.1).



Se remarcă faptul că un ciclu termic parcurs de către un anumit punct (P) constă dintr-o încălzire rapidă pînă în vecinătatea unei temperaturi maxime unde viteza de încălzire scade treptat pînă la zero, după care urmează o răcire cu o viteză din ce în ce mai mică pe măsura scăderii temperaturii.

Fig.2.1. Ciclul termic într-un punct din zona influențată termic (ZIT) la sudarea cu arcul electric.

Încălzirea este cu atât mai rapidă cu cît punctul este mai apropiat de cusătură (punctul P<sub>1</sub>) iar răcirea cu atât mai încetă cu cît punctul este mai depărtat de cusătură (punctul P<sub>2</sub>).

Viteza de răcire este în general mult mai mică decît viteza de încălzire, iar timpul de menținere în zona temperaturilor maxime este relativ scurt în raport cu durata întregului ciclu încălzire-răcire pînă la temperatura ambiantă.

444017  
208 G

Caracteristic pentru ciclurile termice parcurse la sudare este că atât vitezele de încălzire cât și cele de răcire variază continuu și sînt foarte mari în raport cu cele întîlnite la tratamente termice.

Ciclurile termice exercită o acțiune esențială asupra însușirilor îmbinărilor sudate, mai ales în cazul oțelurilor aliate. Linia modernă la stabilirea procesului tehnologic optim de sudare se bazează pe posibilitățile crescînde de predeterminare a structurii metalografice din diferitele zone ale îmbinării sudate și implicit a însușirilor tehnice a acestor zone ca atare și în ansamblu.

O asemenea predeterminare este posibilă dacă se pot urmări pe cale de calcul sau experimental ciclurile termice parcurse de diferitele zone ale îmbinării, dacă se cunosc modificările structurale ale materialului în urma acestor cicluri precum și dacă se dispune de datele privind însușirile tehnice ale diferitelor structuri apărute.

În sudarea oțelurilor aliate parametrii cei mai interesați ai ciclului termic sînt viteza instantanee de răcire la o anumită temperatură, viteza medie de răcire într-un anumit interval de temperatură, temperatura maximă atinsă și timpul de menținere pentru o anumită temperatură. Acești parametri pot fi calculați cu ajutorul relațiilor stabilite de N.V. Nikalin [75] prezentate și în lucrările [57,77].

Urmărirea ciclului termic însă numai pe bază de calcul poate da naștere unor erori care au la bază ipotezele simplificatoare acceptate la stabilirea formulelor sau utilizarea unor valori neadecvate pentru constantele termofizice sau alte mărimi care intervin în calcul. Din aceste motive în stadiul actual de dezvoltare este necesară o verificare experimentală a rezultatelor calculului în vederea definitivării tehnologiei.

Ciclurile termice pot fi reproduse și experimental cu ajutorul simulatoarelor de cicluri termice. Simulatorul de cicluri termice este un aparat care produce într-o epruvetă cicluri termice de tipul celor provocate în ZIT de procesele de sudare. Se obține astfel un metal de bază omogen afectat de ciclul termic cu parametrii dorți. Epruvetele astfel pregătite pot fi supuse la diferite încercări

O caracteristică foarte importantă a ciclului termic la sudarea cu arcul electric respectiv a ciclului termic simulat este că viteza de răcire instantanee în intervalul 1073...773 K (800...500°C este practic independentă de poziția punctului considerat în raport

cu linia de fuziune. Acest interval de temperatură este important din punct de vedere al modificărilor structurale la răcirea continuă.

Pornind de la aceste considerente în cele ce urmează se prezintă modificările structurale din ZIT a oțelurilor criogenice cu 9%Ni prin simularea unor cicluri termice (cazul S) și prin suprapunerea peste aceste cicluri a unui tratament termic de detensiionare (cazul S+DT) în vederea stabilirii tehnologiei optime de sudare a acestor oțeluri.

## 2.2. MATERIALE SI PROBE FOLOSITE

Lucrările publicate în domeniul criogenic precizează că la oțelurile aliate cu 9%Ni, conținutul în carbon trebuie să fie cât mai mic posibil (sub 0,15%) pentru a se obține o tenacitate bună la temperatura azotului lichid (77 K). Elementele însoțitoare permanente se limitează la următoarele valori: Si = 0,15...0,30%; Mn < 0,8%; S < 0,04%; P < 0,035%

Prezența Ni ca element de aliere face să crească tenacitatea, călibilitatea și să scadă fragilitatea materialului. Atât carbonul cât și siliciul provoacă durificarea și fragilizarea oțelului. Dacă conținutul în aceste elemente este ridicat, este necesară mărirea și a procentajului de nichel pentru a nu se diminuea rezistența la solicitări dinamice.

În scopul menținerii unor valori ridicate ale caracteristicilor de ductilitate și la temperaturi scăzute se impune ca, conținutul de incluziuni nemetalice și de gaze (hidrogen, oxigen) să fie cât mai mic posibil. Din aceleași motive este limitat și conținutul în S și P.

Elaborarea acestui oțel se poate face în cuptoare Martin, cuptoare electrice acide sau bazice, aceasta nepunând probleme deosebite. Unele țări au trecut la elaborarea acestui oțel în convertizor cu însuflare de oxigen, dar se condiționează gradul de puritate al materiei prime.

Deoarece la acest material există tendința de formare a unor fisuri interne (fisuri de contracție în miezul lingoului) este necesar ca viteza de răcire a lingoului să nu depășească pe cea corespunzătoare structurilor de echilibru ( $V_r \leq 4^\circ\text{K}/\text{min}$ ).

Pentru experimentări s-au folosit șarje din oțel elaborate în cuptoare electrice în unități siderurgice din țară după o tehnologie stabilită în lucrările [96,99]. Compoziția chimică a acestora

este prezentată în tabelul 2.1. și se încadrează în normele și specificațiile naționale ale țărilor producătoare și consumatoare de oțeluri criogenice din lume: NFA 36-208-U din Franța; ASTM A 353-70a și ASTM 553-70a Grade A din S.U.A. VDEh 680-70 din RFG; BS1501-509.70 din Anglia. După turnare și laminare semifabricatele au fost supuse tratamentului termic de răcoacere completă la 1173 K urmată de călire și revenire.

Compoziția chimică a oțelului cu 9%Ni folosită în cadrul încercărilor experimentale.

Tabelul 2.1.

| Marca  | Grosimea<br>mm | Compoziția chimică % |      |      |       |       |      |      |      |       |  |
|--------|----------------|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|--|
|        |                | C                    | Si   | Mn   | S     | P     | Cu   | Ni   | Cr   | Al    |  |
| 12Ni90 | 12             | 0,11                 | 0,11 | 0,17 | 0,020 | 0,013 | 0,04 | 9,35 | 0,64 | 0,012 |  |
|        |                | 0,13                 | 0,18 | 0,21 | 0,025 | 0,020 |      | 9,38 |      |       |  |
|        | 30             | 0,14                 | 0,26 | 0,40 | 0,003 | 0,011 | -    | 8,80 | -    | 0,005 |  |
|        |                | 0,15                 | 0,34 | 0,45 | 0,006 | 0,020 | -    | 8,90 | -    | 0,027 |  |

De menționat că oțelurile criogenice aliate cu 9%Ni pot fi tratate termic fie prin dublă normalizare și revenire fie prin călire și revenire parametrii termici fiind următorii:

a. Normalizare la 1173 K/2min/1mm grosime/aer + Normalizare la 1033 K/2min/1 mm grosime + Revenire la 848 K/120 min/aer;

b. Călire la 1083 K/2 min/ 1 mm grosime + Revenire la 848 K/120 min/aer. Caracteristicile de rezistență mecanică sînt sensibil apropiate la ambele variante de tratament, în schimb tenacitatea este mai favorabilă la starea de călire și revenire [101;105] motiv pentru care s-a ales varianta călire la 1083 K/2 min/ 1 mm grosime + Revenire la 848 K/120 min/aer.

Ciclograma de tratament termic este prezentată în figura 2.2

Structura obținută în urma tratamentului termic de călire și revenire este formată din sorbită de revenire și precipitari de carburi de tip cementită.

### 2.3. SIMULAREA CICLURILOR TERMICE DE RĂCOACERE PENTRU OȚELURILE CRIOGENICE ALIATE CU 9% Ni.

Din tabla de oțel criogenic cu 9% Ni de 12x120x300 mm, respectiv 30x130x300 mm în stare călită și revenită s-au prelevat probe de reziliență de 11x11x55 mm care au fost supuse simulării de cicluri termice.

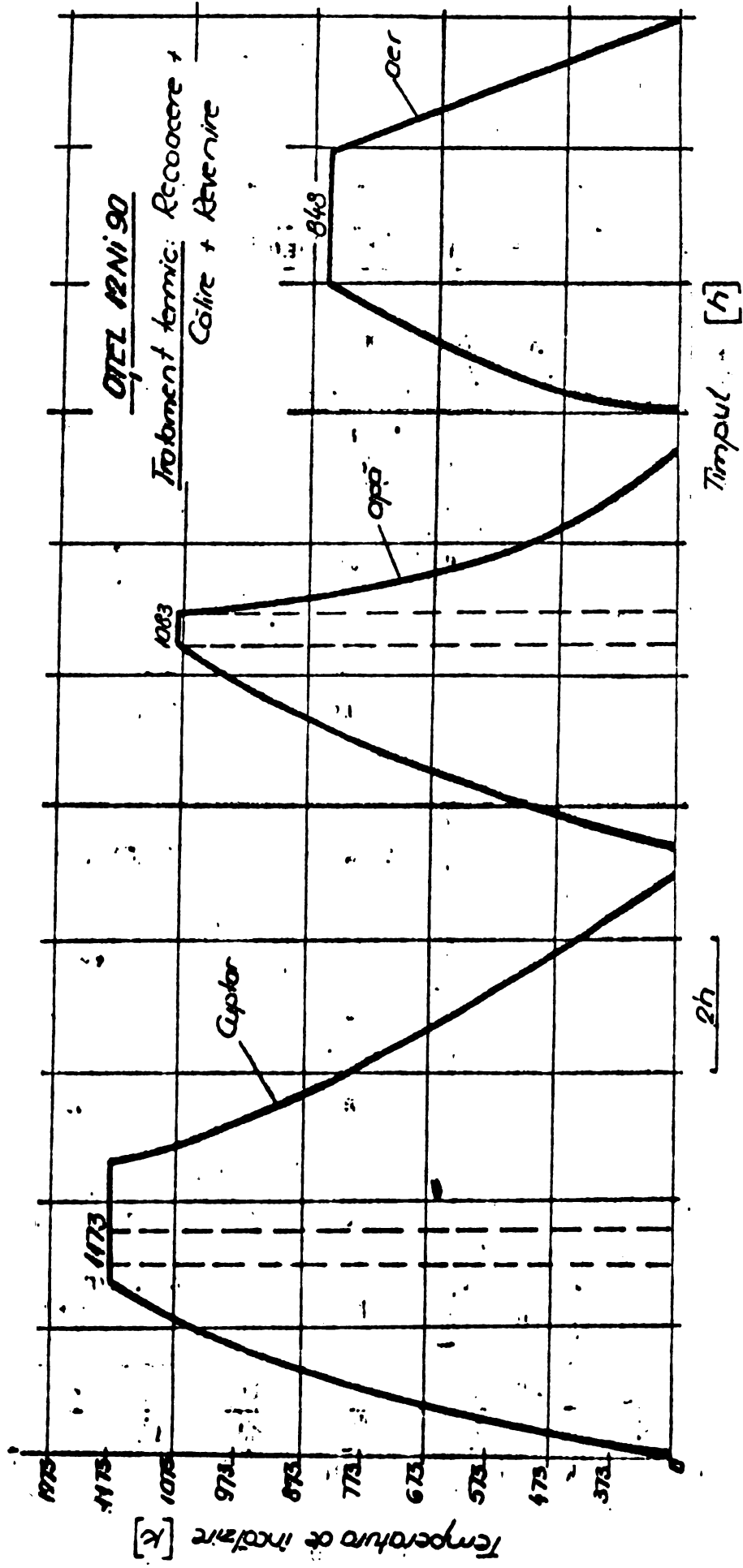


Fig. 2.2. Ciclograma de tratament termic



S-au considerat ciclurile termice simulate având următoarele caracteristici (fig.2.3 și tabelul 2.2)

- temperaturi de vîrf variabile și anume 1273; 1473 și 1623 K;
- atingerea temperaturii de vîrf considerate într-un timp de încălzire de 10 secunde;
- viteza de răcire ale ZIT-ului, în intervalul 1073...773 K (800-500°C) constante și anume 30°C/s ceea ce corespunde la timpi de răcire variabili  $t_{8/5}$  în funcție de energia liniară introdusă și de grosimea tablei (tabelul 2.2).

Simularea s-a făcut cu aparatul Smitwield LS1402.

După simulare un număr de probe au fost detensionate la temperatura de 848 K timp de 2 ore conform diagramei din fig.2.3b.

Timpi de răcire ( $t_{8/5}$ ) funcție de energia liniară și grosimea tabelor.

Tabelul 2.2.

| Energia liniară $E_L$ [KJ/cm]  | 10 | 40  | 80 | 12 | 14 | 18 | 20 | 30 | 35 | 40 |
|--------------------------------|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Timpul de răcire $t_{8/5}$ [s] | 8  | 133 | 4  | 6  | 8  | 10 | 11 | 17 | 20 | 23 |
| Grosimea tablei [mm]           | 12 |     |    |    |    | 30 |    |    |    |    |

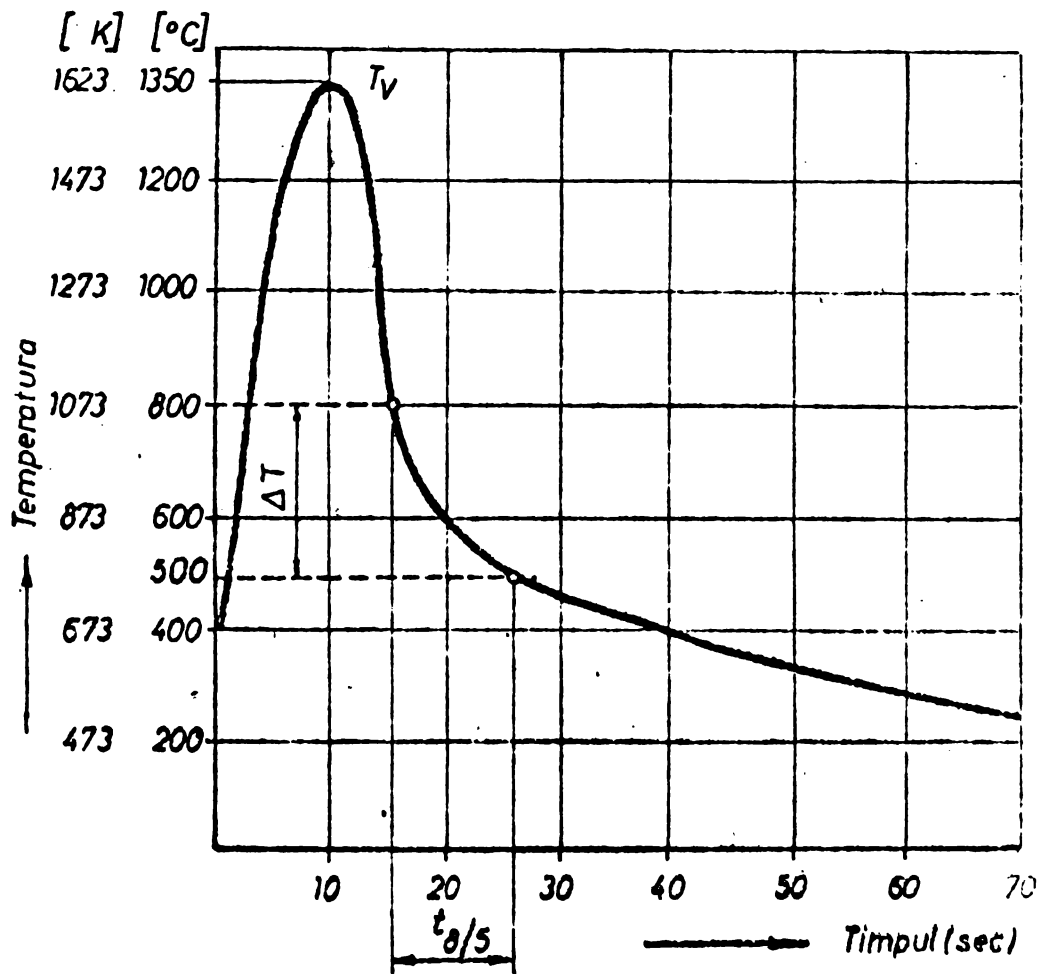
#### 2.4. ANALIZE STRUCTURALE ASUPRA PROBELOR SIMULATE

Cercetarea microstructurală s-a făcut cu ajutorul microscopului optic tip Epytip și cu ajutorul microscopului electronic BS613 folosind o replică dublă de acetat de celuloză și carbon umbrată cu crom.

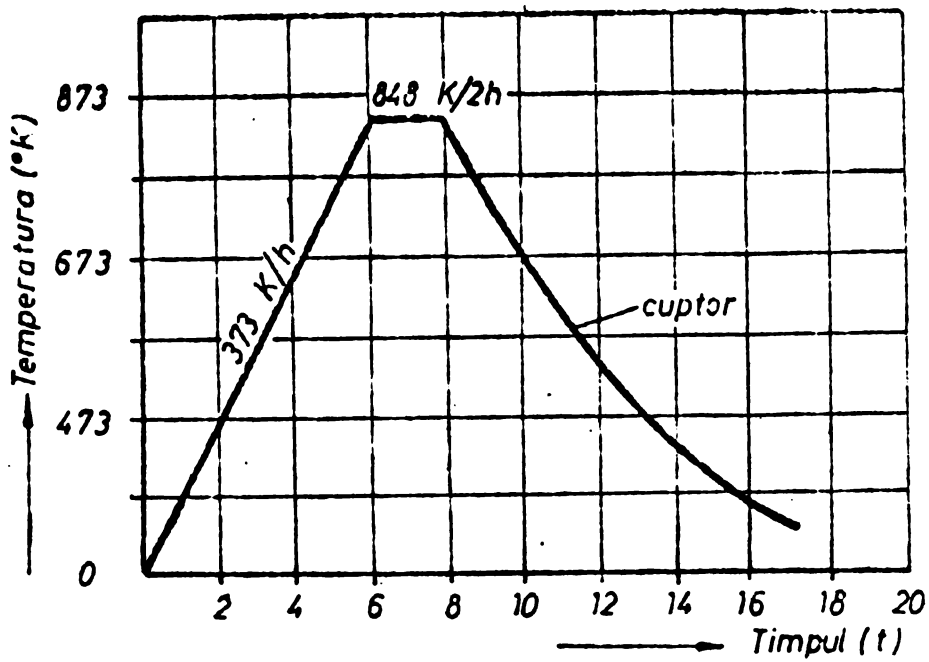
În planșele I și II sînt redată microfotografiile realizate cu ajutorul microscopului electronic pe probe simulate respectiv simulate și detensionate folosind pentru simulare diferite energii liniare, acestea reliefînd următoarele:

- la  $T_v = 1273^{\circ}K$  structurile obținute sînt formate din cristale aciculare de martensită cubică și austenită reziduală în centrul ZIT-ului (planșa I fig. 1) iar la marginea ZIT-ului structura este alcătuită din bainită granulară (Planșa I fig. 2)

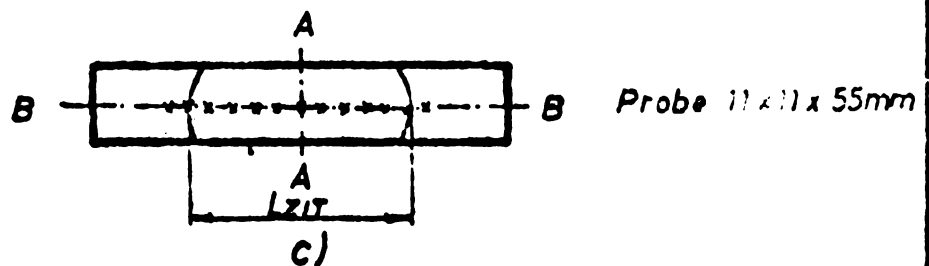
În cazul probelor simulate și detensionate structura este formată din ferită și carburi intermediare în centrul ZIT-ului (Planșa fig.1), iar la marginea ZIT-ului apare un amestec de ferită și carburi (Planșa II fig.2).



a)



b)



c)

Fig 2.3 Ciclu termic (S), tratamentul termic (DT) și tipul probei

- la  $T_v = 1473$  K în centrul ZIT-ului structura este formată din martensită cubică de dimensiuni ceva mai mari comparativ cu cea obținută la  $T_v = 1273$  K (Plansa I fig.3) iar la marginea ZIT-ului apare martensită cubică mult mai fină comparativ cu centrul ZIT-ului și austenită reziduală (Plansa I fig.4).

La probele simulate și detensionate structura în centrul ZIT-ului este alcătuită din ferită aciculară și carburi cementitice precipitate la limita de separație dintre cristale (Plansa II fig.3) iar la marginea ZIT-ului apare amestec de ferită și carburi cementitice de formă globulară care au suferit fenomenul de coalescență (Plansa II fig.4).

- la  $T_v = 1623^{\circ}$ K în centrul ZIT-ului structura este alcătuită din cristale martensitice orientate sub formă de plachete și simțute la limite datorită îngrădirii proceselor de alunecare (Plansa I fig.5) iar la marginea ZIT-ului apare amestec de bainită granulară și aciculară (Plansa I fig.6)

La probele simulate și detensionate structura este alcătuită din ferită cu caracter acicular și carburi intermediare de formă lamelară în centrul ZIT-ului (Plansa II fig.5) iar la marginea ZIT-ului apare ferită, carburi cementitice și carburi intermediare (Plansa II fig.6).

## 2.5. ANALIZE SCLEROMETRICE ASUPRA PROBELOR SIMULATE

Determinările de duritate, urmărind ridicarea sclerogramelor în zona influențată termic a probelor simulate s-au efectuat conform STAS 492-78 cu ajutorul metodei Vickers, folosind sarcina de 49,6 N(HV5). Imprimările s-au efectuat în lungul axelor de simetrie a epruvetelor, pe direcțiile A-A și B-B (fig.2.3c)

Prin folosirea unui pas  $p$  aproximativ constant de 0,5 mm s-a respectat atât condiția de non influență reciprocă  $p > 2,5d$ ,  $d$  fiind diagonala medie a amprentei cât și o densitate suficientă pentru determinarea cu acuratețea necesară a lungimii zonei influențate termic.

Imprimările pe direcția B-B, au urmărit determinarea valorilor de referință ale durificării din ZIT precum și verificarea de secțiune a regimurilor de simulare.

Rezultatele măsurătorilor de duritate au fost prelucrate statistic și anume:

a. Credibilitatea datelor experimentale a fost verificată cu ajutorul criteriului Chauvenet;

PLANSĂ I



a.  $E_L = 10\text{KJ/cm}$



b.  $E_L = 40\text{KJ/cm}$

Fig.1 Microstructura în centrul ZIT-ului  
MEx2700;  $T_v = 1273^\circ\text{K}$



a.  $E_L = 10\text{KJ/cm}$



b.  $E_L = 40\text{KJ/cm}$

Fig.2. Microstructura la marginea ZIT-ului  
MEx2700;  $T_v = 1273^\circ\text{K}$

PLANSA I (continuare)



a.  $E_L = 10\text{KJ/cm}$



b.  $E_L = 40\text{KJ/cm}$

Fig.3 Microstructura în centrul ZIT-ului  
ME<sub>x</sub>2700;  $T_v = 1473^\circ\text{K}$



a.  $E_L = 10\text{KJ/cm}$



b.  $E_L = 40\text{KJ/cm}$

Fig.4. Microstructura la marginea ZIT-ului  
ME<sub>x</sub>2700;  $T_v = 1473^\circ\text{K}$

PLANSĂ I (continuare)



a.  $E_L = 10 \text{ KJ/cm}$

b.  $E_L = 40 \text{ KJ/cm}$

Fig.5. Microstructura în centrul ZIT-ului  
ME x 2700;  $T_v = 1623^\circ\text{K}$



a.  $E_L = 10 \text{ KJ/cm}$

b.  $E_L = 40 \text{ KJ/cm}$

Fig.6 Microstructura la marginea ZIT-ului  
ME x 2700;  $T_v = 1623^\circ\text{K}$

PLANSA II

Probe simulate cu  $E_f = 10 \text{ kJ/cm}$  și detensionate la  $848^\circ\text{K}/2\text{h}$



Fig.1 .Microstructura  
in centrul ZIT-ului  
MEx2700.  $T_v = 1273^\circ\text{K}$



Fig.2. Microstructura  
la marginea ZIT-ului  
MEx2700.  $T_v = 1273^\circ\text{K}$



Fig.3. Microstructura  
in centrul BIT-ului  
MEx2700.  $T_v = 1473^\circ\text{K}$  .



Fig.4. Microstructura  
la marginea ZIT-ului  
MEx2700,  $T_v = 1473^\circ\text{K}$

PLANSA II (continuare)  
Probe simulate cu  $E_T = 10 \text{ kJ/cm}$  și detensionate la  $848^\circ \text{K}/2\text{h}$



Fig.5. Microstructura  
in centrul ZIT-ului  
MEx2700,  $T_v = 1623^\circ \text{K}$



Fig.6. Microstructura  
la marginea ZIT-ului  
MEx2700,  $T_v = 1623^\circ \text{K}$



b. Limitele intervalelor de confidență între care urmează să fie cuprinsă o proporție  $P = 0,95$  din numărul măsurărilor efectuate s-a calculat cu o încredere  $\gamma = 0,99$ .

Spre exemplificare în tabelele 2.3 și 3.4 se prezintă metodologia de calcul statistic utilizată în cazul folosirii pentru simulare o energie liniară de  $10 \text{ kJ/cm}$  și temperaturi de vîrf  $T_V = 1273, 1473$  și  $1623^\circ \text{K}$ , iar în tabelul 2.5 se prezintă valoarea medie și limitele intervalelor de confidență pentru toate încercările efectuate.

Sclerogramele determinate pentru cele trei variante de temperatură de vîrf ( $T_V$ ) și două energii liniare  $10$  și  $40 \text{ kJ/cm}$  sînt prezentate în figurile 2.4...2.11.

Analiza valorilor măsurătorilor de duritate evidențiază următoarele aspecte:

- nu apar diferențe semnificative între rezultatele măsurătorilor de duritate, folosind pentru simulare energii liniare cuprinse între  $8...40 \text{ kJ/cm}$  la aceeași temperatură de vîrf;

- la aceeași temperatură de vîrf aspectul curbelor de variație a durității de probe simulate respectiv simulate și detensionate este asemănător;

- cu cît temperatura de vîrf  $T_V$  se deplasează spre valori mai ridicate cu atît diferența dintre duritățile probelor simulate respectiv simulate și detensionate măsurate pe lungimea ZIT-ului este mai mare;

- tratamentul termic de detensionare conduce la scăderea durității din ZIT, la valori apropiate de ale metalului de bază fiind astfel oportun în îmbunătățirea structurii influențate de ciclurile termice de la sudare;

- calculul statistic a valorilor măsurătorilor de duritate atoe-tă o bună omogenitate a structurii în ZIT, la aceeași temperatură de vîrf ( $T_V$ ) toate valorile de duritate fiind cuprinse între limitele intervalelor de confidență calculate cu o încredere  $\gamma = 0,99$ .

## 2.6. INCERCARI DE INCOVOIERE PRIN SOC

Incercările de incovoiere prin șoc s-au făcut conform STAS 7511-73 pe epruvete ISO-V obținute din probe sudate respectiv sudate și detensionate la temperatura de încercare de  $213$  și  $77 \text{ K}$ .

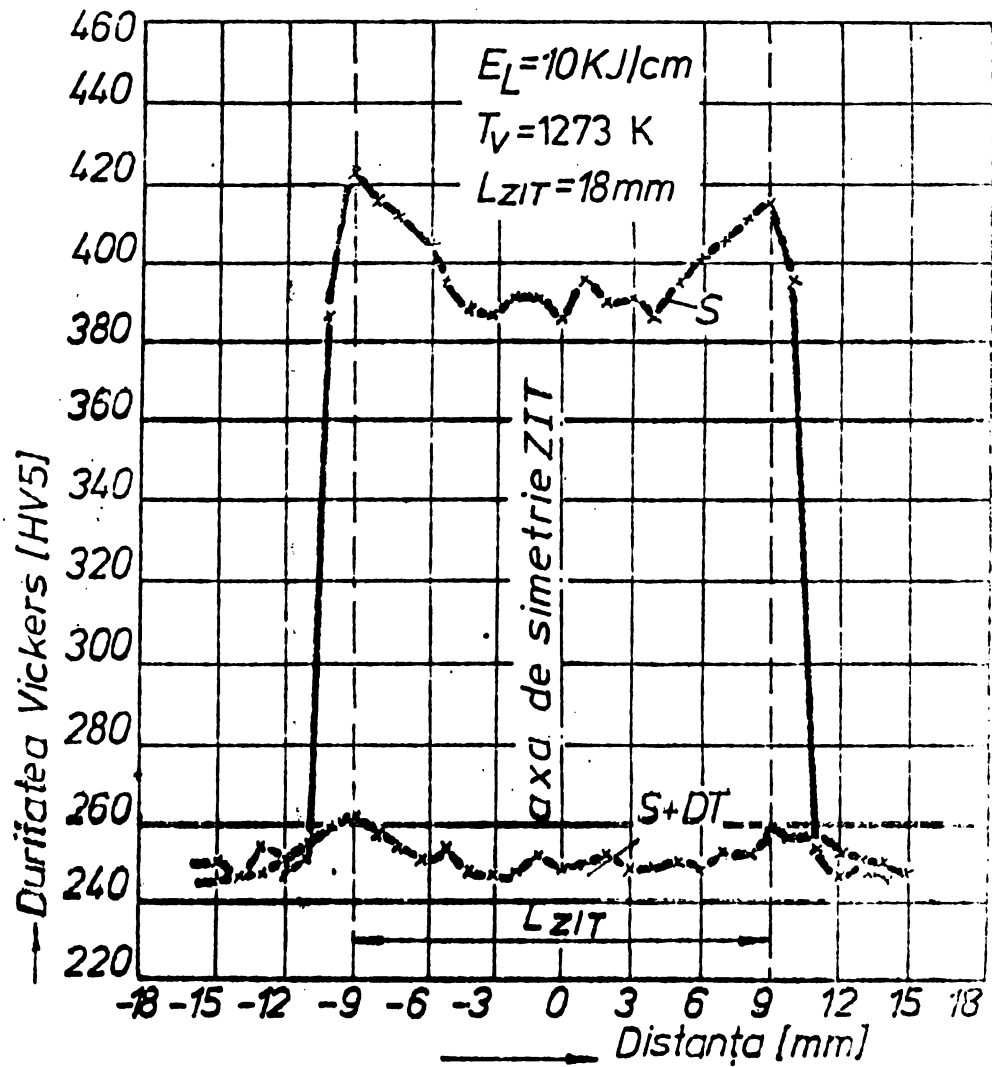


Fig. 2.4. Variația durității HV5 funcție de distanță la  $T_v=1273$  K

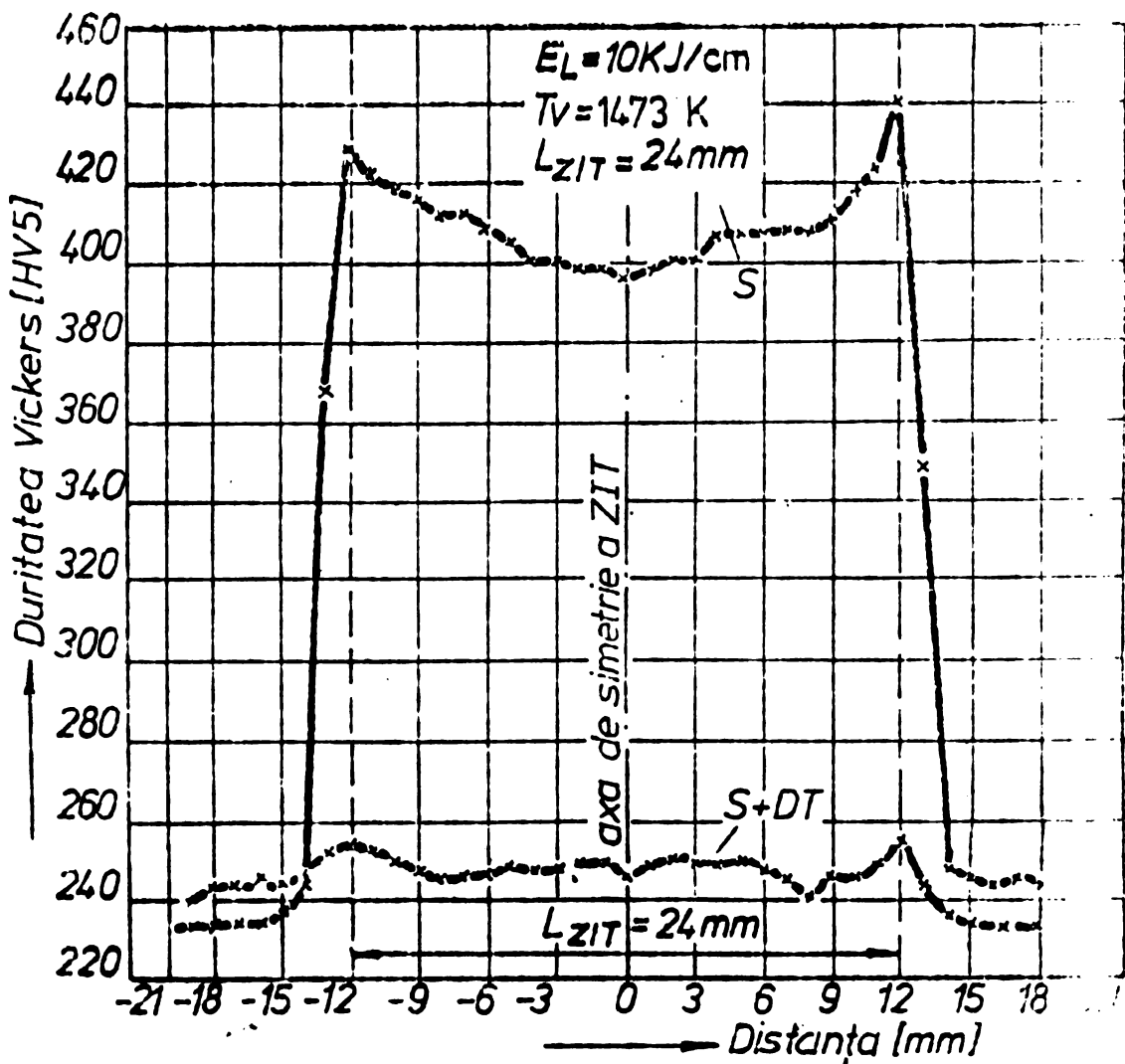


Fig. 2.5. Variația durității HV5 funcție de distanță la  $T_v=1473$  K

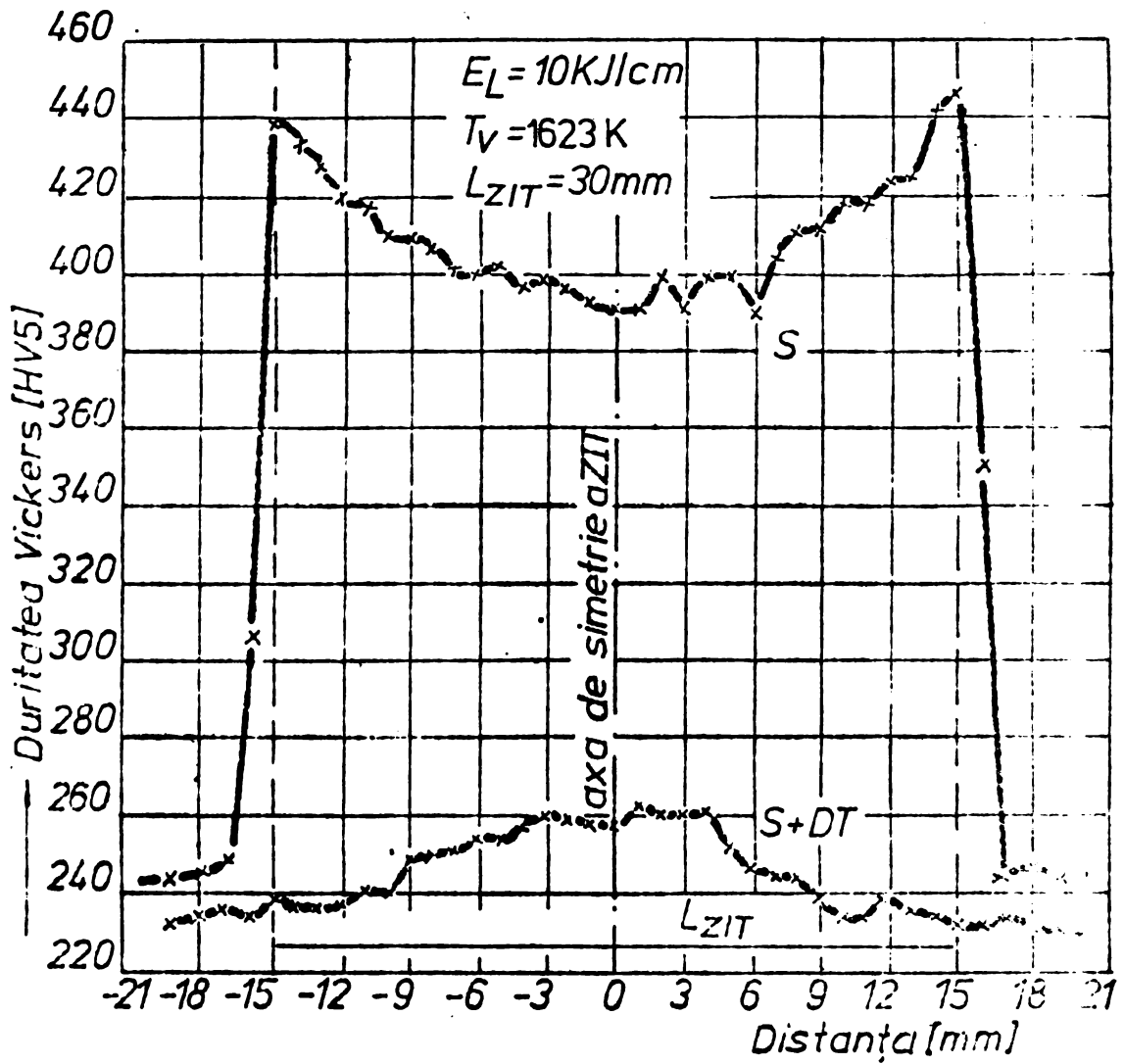


Fig. 2.6. Variația durtății HV5 funcție de distanță la  $T_v = 1623 \text{ K}$

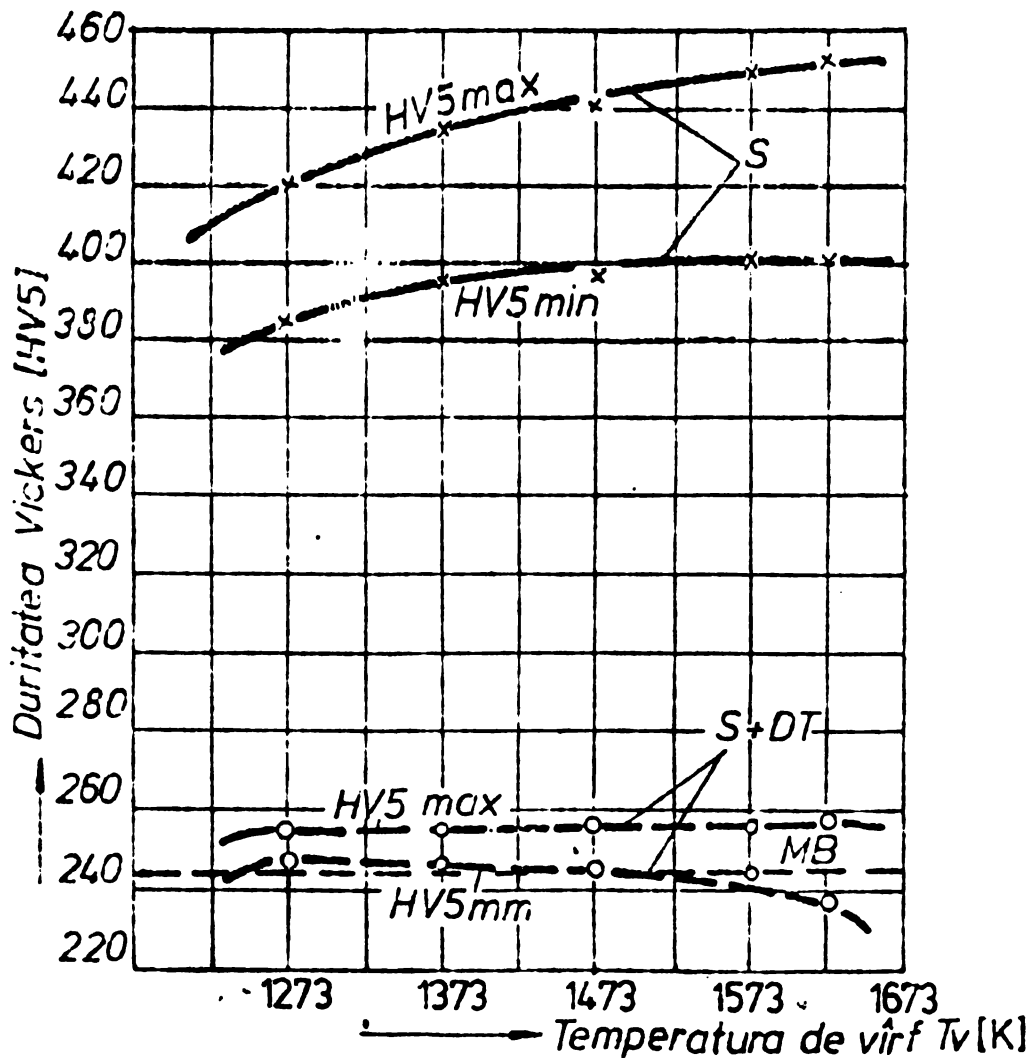


Fig. 2.7. Variația durtății funcție de temperatura de vîrf  $T_v$ .

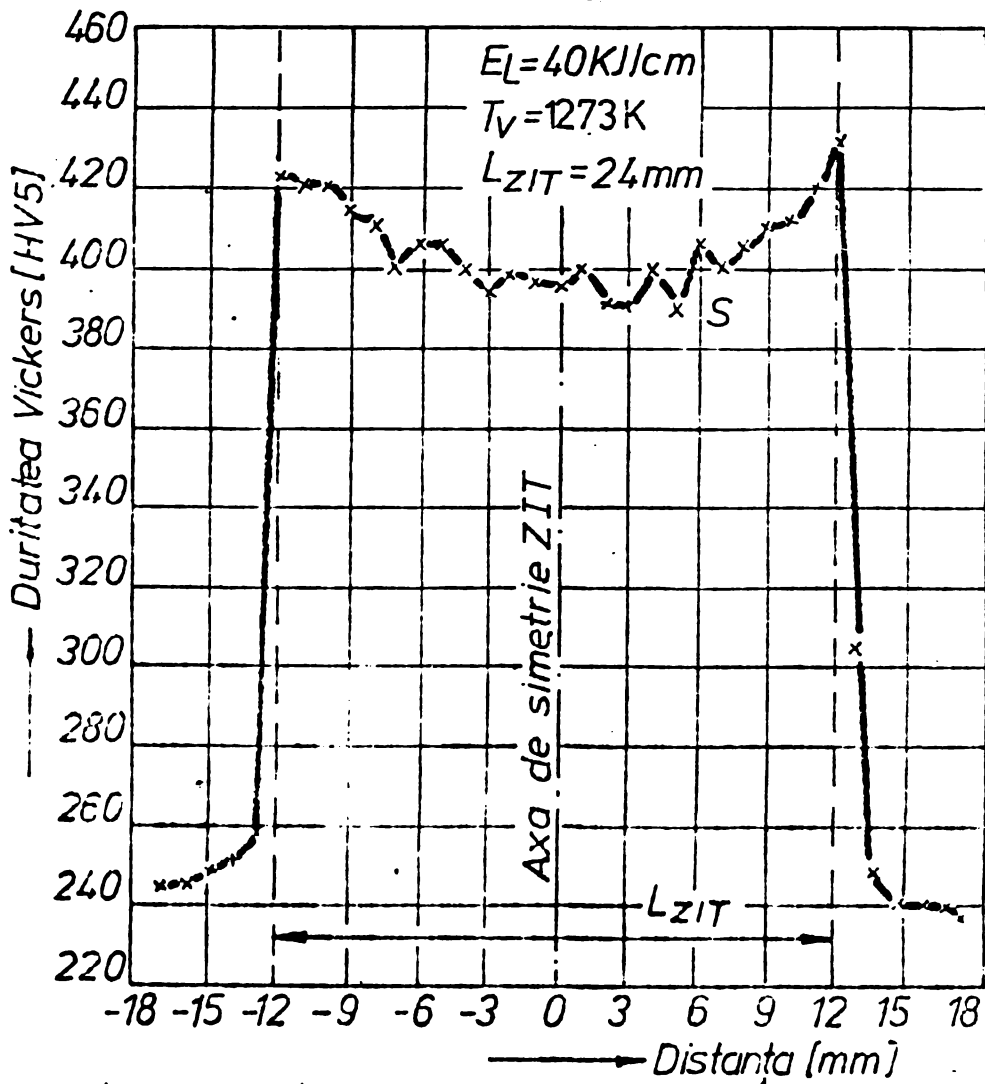


Fig.2.8. Variația durității funcție de distanța la  $T_v = 1273\text{K}$

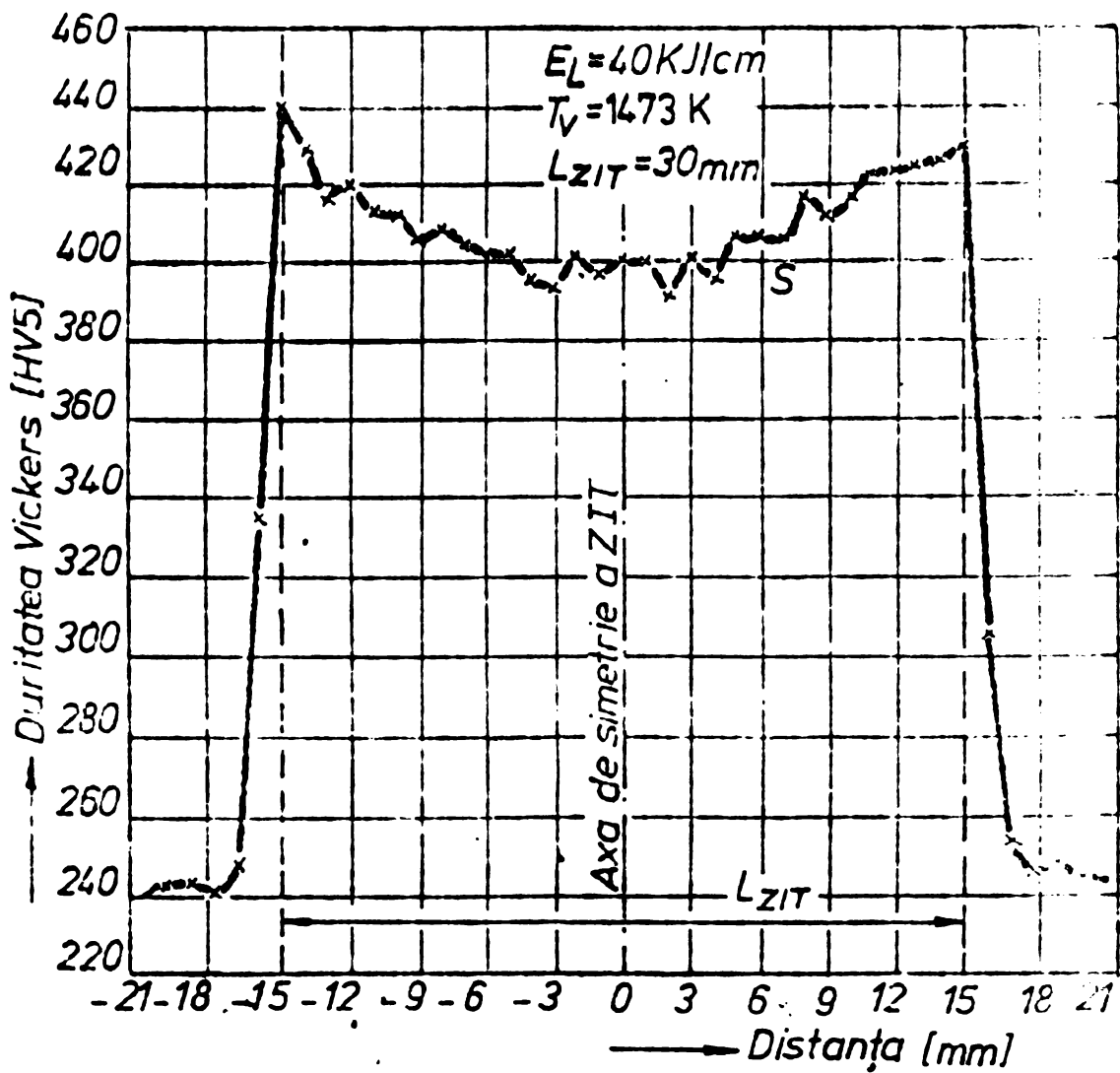


Fig.2.9. Variația durității funcție de distanța la  $T_v = 1473\text{K}$

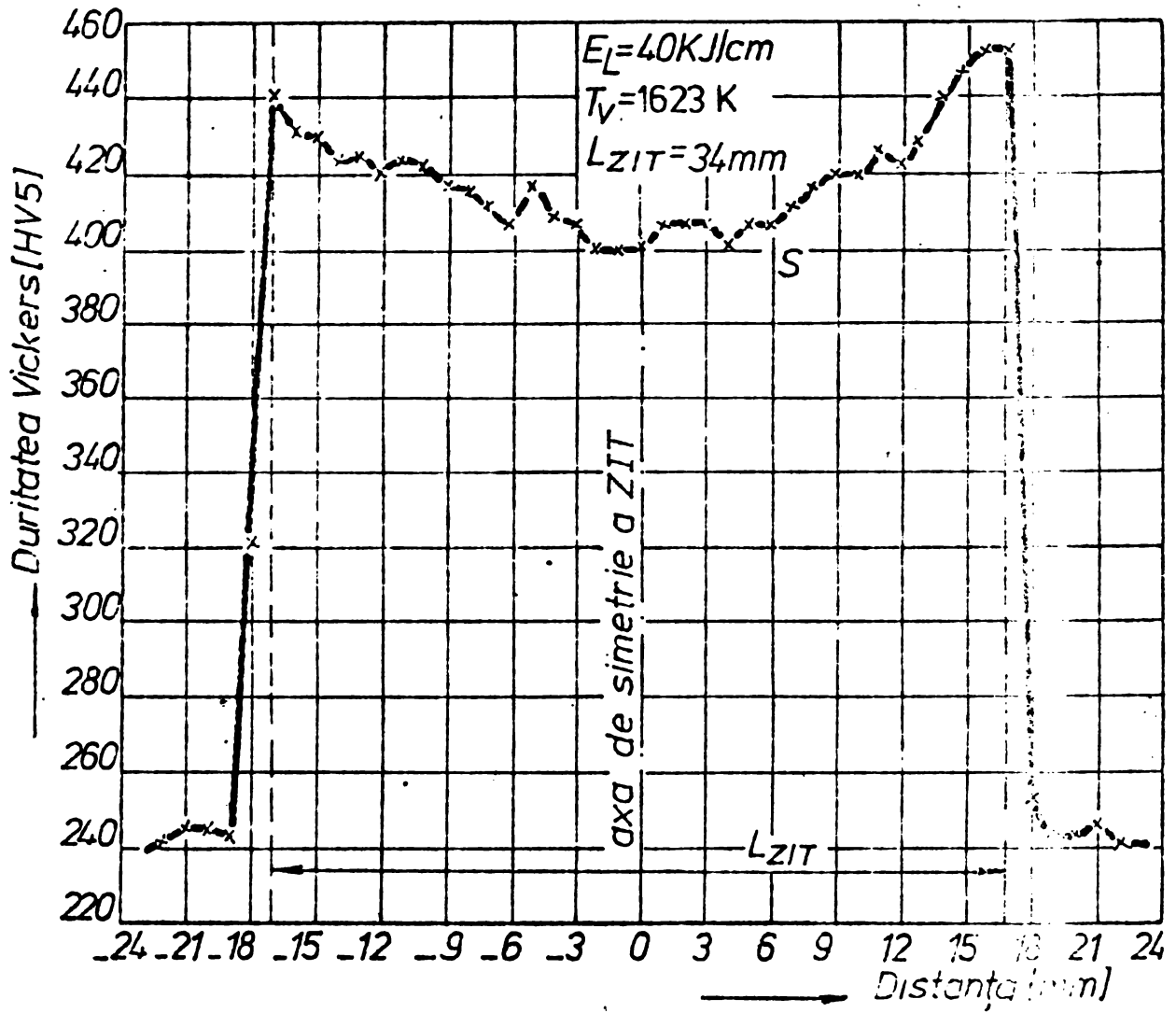


Fig. 2.10. Variația durității funcție de distanță la  $T_v = 1623 \text{ K}$

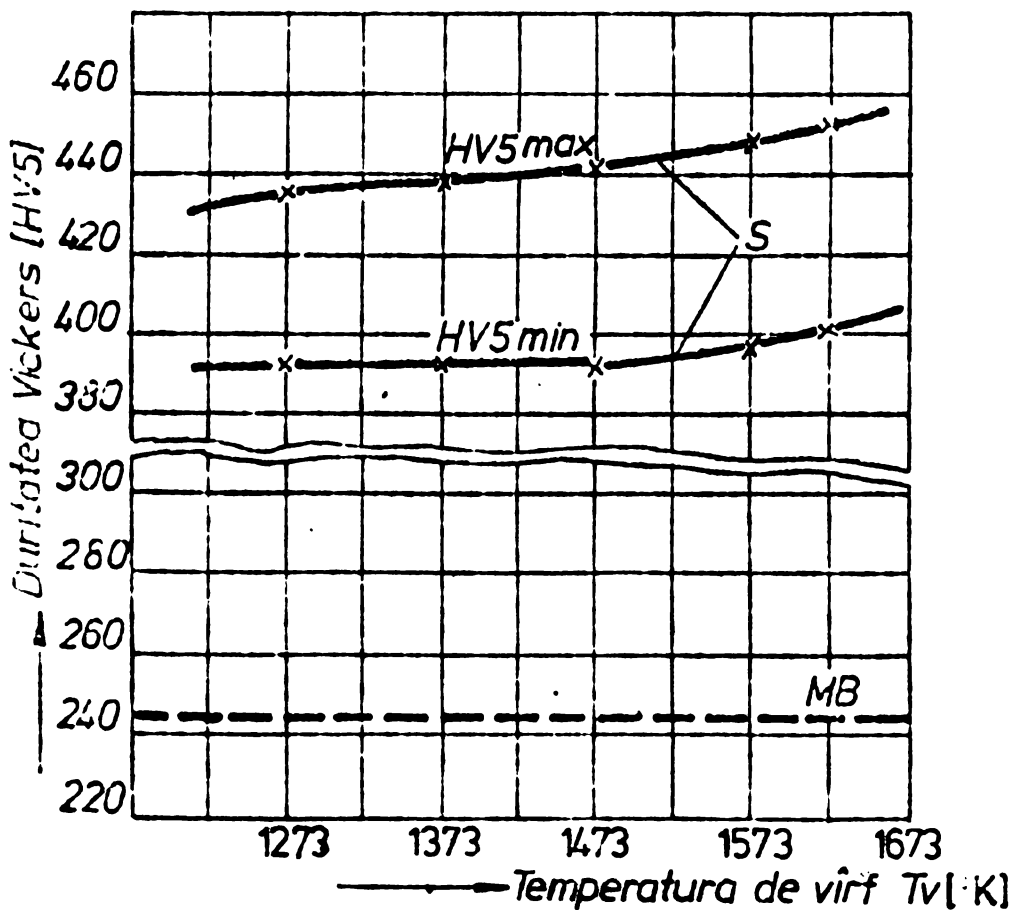


Fig. 2.11. Variația durității funcție de temperatura de vîrf  $T_v$ .

Credibilitatea datelor experimentale obținute cu ajutorul criteriului Chauvenet.

Tabelul 2.3.

| Nr. măs. n | T <sub>v</sub> [K] | Tipul probei | $\bar{x}$ | S      | $\bar{x}$ | X <sub>min</sub> | X <sub>max</sub> |
|------------|--------------------|--------------|-----------|--------|-----------|------------------|------------------|
| 19         | 1273               | S            | 398,8     | 3266   | 28,8      | 370              | 428              |
|            |                    | S + T        | 254       | 447,9  | 11,1      | 242              | 265              |
| 25         | 1473               | S            | 408,7     | 3217,2 | 29,7      | 383              | 435              |
|            |                    | S + T        | 248,8     | 239,1  | 7,4       | 241              | 256              |
| 31         | 1623               | S            | 412,8     | 11523  | 46,9      | 366              | 480              |
|            |                    | S - T        | 246,6     | 3279,7 | 24,8      | 222              | 271              |

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{- media măsurătorilor făcute}$$

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{- deviația}$$

$$h = \frac{H}{n} \quad \text{unde } h = \sqrt{\frac{n}{25}} \quad H \Rightarrow \text{din tabele statistice funcție de } n$$

$$X_{\min} = \bar{x} - h \quad \text{valorile extreme între care trebuie să fie}$$

$$X_{\max} = \bar{x} + h \quad \text{cuprinse măsurătorile făcute}$$

Limităle intervalelor de confidență calculate cu o încredere  $\gamma = 0,99$

Tabelul 2.4.

| Nr. măs. n | T <sub>v</sub> [K] | Tipul probei | $\bar{x}$ | s     | K <sub>2</sub> | L <sub>1</sub> | L <sub>3</sub> |
|------------|--------------------|--------------|-----------|-------|----------------|----------------|----------------|
| 19         | 1273               | S            | 398,4     | 3,09  | 3,221          | 388            | 408            |
|            |                    | S + T        | 254       | 1,14  | 3,221          | 250            | 258            |
| 25         | 1473               | S            | 409       | 11,2  | 2,972          | 376            | 442            |
|            |                    | S - T        | 248,8     | 3,15  | 2,972          | 239            | 258            |
| 31         | 1623               | S            | 412,8     | 19,59 | 2,84           | 357            | 468            |
|            |                    | S + T        | 246,6     | 10,45 | 2,84           | 217            | 276            |

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{media măsurătorilor făcute}$$

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \right]^{1/2} \quad \text{- abaterea standard}$$

K<sub>2</sub> - coeficient ce rezultă din tabele statistice în funcție de încrederea  $\gamma = 0,99$  și de proporția măsurătorilor din totalul de probe încercate  $p = 0,95$

$$L_1 = \bar{x} - K_2 \cdot s \quad \text{limităle intervalelor de confidență}$$

$$L_3 = \bar{x} + K_2 \cdot s$$

Valorile medii ale durității din ZIT și limitele intervalelor de confidență calculate cu o încredere  $\gamma = 0,99$  pentru cazurile studiate.

Tabelul 2.5.

| Grosimea<br>tablei<br>mm | Energia<br>liniară<br>$E_L$ (KJ/cm) | Tempe-<br>ratura<br>de vîrf<br>$T_V$ [K] | Nr. de<br>măsură-<br>tori<br>n | $\bar{X}$ | s     | $K_2$ | $L_1$ | $L_3$ |
|--------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 0                        | 1                                   | 2  | 3                              | 4         | 5     | 6     | 7     | 8     |
| 12                       |                                     | 1273                                     | 19                             | 398,8     | 3,09  | 3,221 | 398   | 408   |
|                          | 10                                  | 1473                                     | 25                             | 409       | 11,2  | 2,972 | 376   | 442   |
|                          |                                     | 1623                                     | 31                             | 412,8     | 19,59 | 2,84  | 357   | 468   |
| 40                       |                                     | 1273                                     | 24                             | 406       | 6,66  | 3,004 | 386   | 426   |
|                          |                                     | 1473                                     | 30                             | 411       | 10,20 | 2,841 | 382   | 440   |
|                          |                                     | 1623                                     | 34                             | 416       | 18,55 | 2,748 | 365   | 467   |
| 8                        |                                     | 1273                                     | 18                             | 408       | 7,62  | 3,279 | 383   | 433   |
|                          |                                     | 1473                                     | 21                             | 402       | 9,61  | 3,121 | 382   | 432   |
|                          |                                     | 1623                                     | 23                             | 421       | 16,12 | 3,040 | 372   | 470   |
| 12                       |                                     | 1273                                     | 19                             | 406       | 7,14  | 3,221 | 383   | 429   |
|                          |                                     | 1473                                     | 21                             | 391       | 9,93  | 3,121 | 360   | 422   |
|                          |                                     | 1623                                     | 23                             | 423       | 16,78 | 3,040 | 372   | 474   |
| 14                       |                                     | 1273                                     | 19                             | 389       | 5,59  | 3,221 | 371   | 407   |
|                          |                                     | 1473                                     | 21                             | 393       | 9,29  | 3,121 | 364   | 422   |
|                          |                                     | 1623                                     | 23                             | 396       | 14,14 | 3,040 | 353   | 439   |
| 18                       |                                     | 1273                                     | 20                             | 408       | 6,62  | 3,168 | 387   | 429   |
|                          |                                     | 1473                                     | 22                             | 411       | 9,74  | 3,078 | 381   | 441   |
|                          |                                     | 1623                                     | 25                             | 419       | 16,82 | 2,972 | 369   | 469   |
| 20                       |                                     | 1273                                     | 20                             | 409       | 4,73  | 3,168 | 394   | 424   |
|                          |                                     | 1473                                     | 22                             | 413       | 10,72 | 3,078 | 380   | 446   |
|                          |                                     | 1623                                     | 25                             | 421       | 17,49 | 2,972 | 362   | 472   |
| 30                       |                                     | 1273                                     | 23                             | 417       | 8,22  | 3,040 | 392   | 442   |
|                          |                                     | 1473                                     | 26                             | 418       | 10,20 | 2,941 | 388   | 448   |
|                          |                                     | 1623                                     | 28                             | 424       | 16,12 | 2,914 | 377   | 471   |
| 35                       |                                     | 1273                                     | 24                             | 410       | 6,99  | 3,004 | 389   | 431   |
|                          |                                     | 1473                                     | 26                             | 417       | 10,89 | 2,941 | 385   | 449   |
|                          |                                     | 1623                                     | 29                             | 423       | 19,35 | 2,841 | 368   | 478   |
| 40                       |                                     | 1273                                     | 25                             | 407       | 6,72  | 2,972 | 387   | 427   |
|                          |                                     | 1473                                     | 28                             | 415       | 11,32 | 2,914 | 382   | 448   |
|                          |                                     | 1623                                     | 33                             | 419       | 19,65 | 2,748 | 365   | 473   |

Anterior încercării de încovoiere prin șoc, epruvetele au fost supuse unei verificări a razei și aspectului calității suprafeții fundului creștăturii prin compararea la mărimi de  $\times 50$ - cu etaloane.

Rezultatele încercărilor sînt prezentate în tabelul 2.6 și figurile 2.12...2.14.

Analiza rezultatelor încercărilor la încovoiere prin șoc evidențiază următoarele aspecte:

- Nu apar diferențe semnificative între energiile de rupere obținute folosind pentru simulare energii liniare cuprinse între 8...35 KJ/cm, la aceeași temperatură de vîrf, la table cu grosimea de 30 mm.

- Temperaturile de vîrf introduc diferențe semnificative la aceeași energie liniară folosită atât la  $T_{inc} = 293$  K  $T_{inc} = 77$  K.

- La table cu grosimea de 12 mm apar diferențe mai mari între energiile de rupere la diferitele temperaturi de vîrf față de table cu grosimea de 30 mm în cadrul folosirii aceleiași energii liniare;

- Tratatamentul termic de detensionare conduce la creșterea energiei de rupere la valori apropiate de ale metalului de bază la  $T_{inc} = 293$  K iar la  $T_{inc} = 77$  K creșterea este nesemnificativă.

- Folosind pentru simulare energia liniară de 40 KJ/cm la ambele grosimi de tablă (12 respectiv 30 mm) energia de rupere la  $T_{inc} = 293$  K a fost sub 20 J la  $T_v = 1273$  K și sub 10 J la  $T_v = 1473$  K.

De menționat că la probele prelevate din tablă cu grosimea de 12 mm simulate cu energia liniară de 40 KJ/cm au fost cazuri cînd proba s-a rupt în timpul operației de rectificare datorită fragilității ridicate.

## 2.7. ASPECTE MICROFRACTOGRAFICE ALE EPRUVETELOR DE REZILIENȚA SIMULATE.

În caracterizarea oțelurilor de înaltă rezistență cu structură martensitică sau bainitică importanță deosebită prezintă și analiza caracteristicilor suprafețelor de rupere. Aspectul unei suprafețe de rupere permite determinarea precisă a condițiilor care au favorizat apariția și dezvoltarea microfisurilor în cristalele de martenită.

Epruvetele de reziliență rupte la temperatura ambiantă și la 77 K, au fost supuse examinărilor microfractografice la un microscop electronic prin transmisie tip BS-613, folosind replici duble de acetat de celuloză și carbon umbrită cu crom.



Valorile energiei de rupere obținute la 293 și 77 K pe probe simulate cu diferite energii liniare și temperaturi de vîrf.

Tabelul 2.6.

| Nr. probă   | $E_L \cdot 10^3$<br>KJ/cm | $T_v$<br>[K] | $T_{inc}$<br>[K] | Energia de rupere [ J ] |       | Obs. |
|-------------|---------------------------|--------------|------------------|-------------------------|-------|------|
|             |                           |              |                  | Valori individuale      | Medie |      |
| 0           | 1                         | 2            | 3                | 4                       | 5     | 6    |
| 1,2,3       |                           | 1273         | 293              | 118; 108; 110           | 112   |      |
| 4,5,6       |                           |              | 77               | 30; 35; 37              | 34    |      |
| 7,8,9       |                           | 1473         | 293              | 83; 94; 100             | 92,3  |      |
| 10,11,12    | 8                         |              | 77               | 32; 31; 37              | 32,3  |      |
| 13,14,15    |                           | 1623         | 293              | 98; 69; 78              | 81,6  |      |
| 16,17,18    |                           |              | 77               | 15; 16; 15              | 15,3  |      |
| 19,20,21    |                           | 1273         | 293              | 100; 93; 96             | 96,3  |      |
| 22,23,24    |                           |              | 77               | 41; 34; 36              | 37    |      |
| 25,26,27    |                           | 1473         | 293              | 107; 93; 100            | 100   |      |
| 28,29,30    | 10                        |              | 77               | 28; 30; 27              | 28,3  |      |
| 31,32,33    | $S=12mm$                  | 1623         | 293              | 80; 83; 79              | 81,3  |      |
| 34,35,36    |                           |              | 77               | 16; 19; 17              | 17,3  |      |
| 37,38,39    |                           | 1273         | 293              | 93; 95; 89              | 92,3  |      |
| 40,41,42    |                           |              | 77               | 41; 43; 35              | 39,6  |      |
| 43,44,45    |                           | 1473         | 293              | 98; 103; 100            | 100   |      |
| 46,47,48    | 12                        |              | 77               | 35; 32; 36              | 34,3  |      |
| 49,50,51    |                           | 1623         | 293              | 90; 73; 87              | 82,3  |      |
| 52,53,54    |                           |              | 77               | 25; 17; 17              | 19,6  |      |
| 55,56,57    |                           | 1273         | 293              | 87; 97; 102             | 95,3  |      |
| 58,59,60    |                           |              | 77               | 47; 43; 44              | 44,6  |      |
| 61,62,63    |                           | 1473         | 293              | 92; 88; 89              | 89,6  |      |
| 64,65,66    | 14                        |              | 77               | 26; 33; 27              | 28,6  |      |
| 67,68,69    |                           | 1623         | 293              | 72; 76; 77              | 75    |      |
| 70,71,72    |                           |              | 77               | 27; 22; 22              | 24,6  |      |
| 73,74,75    |                           | 1273         | 293              | 95; 87; 98              | 93,3  |      |
| 76,77,78    |                           |              | 77               | 41; 39; 35              | 38,3  |      |
| 79,80,81    | 18                        | 1473         | 293              | 100; 104; 101           | 101,6 |      |
| 82,83,84    |                           |              | 77               | 35; 37; 31              | 34,3  |      |
| 85,86,87    |                           | 1623         | 293              | 74; 71; 71              | 72    |      |
| 88,89,90    |                           |              | 77               | 24; 22; 20              | 22    |      |
| 91,92,93    |                           | 1273         | 293              | 87; 105; 109            | 100,3 |      |
| 94,95,96    |                           |              | 77               | 30; 36; 30              | 32    |      |
| 97,98,99    | 20                        | 1473         | 293              | 105; 107; 95            | 102,3 |      |
| 100,101,102 |                           |              | 77               | 44; 40; 37              | 40,3  |      |

| 0           | 1  | 2    | 3   | 4           | 5     |
|-------------|----|------|-----|-------------|-------|
| 103,104,105 | 20 | 1023 | 293 | 93;111;104  | 104,3 |
| 106,107,108 |    |      | 77  | 21; 21; 19  | 21,3  |
| 109,110,111 |    | 1273 | 293 | 100;102;101 | 101,3 |
| 112,113,114 |    |      | 77  | 45; 43; 38  | 43,3  |
| 115,116,117 | 30 | 1473 | 293 | 101;115;106 | 107,3 |
| 118,119,120 |    |      | 77  | 32; 30; 35  | 32,3  |
| 121,122,123 |    | 1623 | 293 | 77; 78; 73  | 77,3  |
| 124,125,126 |    |      | 77  | 35; 28; 28  | 30,3  |
| 127,128,129 |    | 1273 | 293 | 90; 92; 87  | 87,6  |
| 130,131,132 |    |      | 77  | 43; 47; 43  | 45,3  |
| 133,134,135 | 35 | 1473 | 293 | 94; 91; 99  | 94,6  |
| 136,137,138 |    |      | 77  | 37; 37; 33  | 35,3  |
| 139,140,141 |    | 1623 | 293 | 81; 78; 73  | 77,3  |
| 142,143,144 |    |      | 77  | 25; 27; 24  | 25,3  |
| 145,146,147 |    | 1273 | 293 | 18; 25; 23  | 22,3  |
| 148,149,150 | 40 |      | 77  | 6; 9; 7     | 7,3   |
| 151,152,153 |    | 1473 | 293 | 4; 6; 7     | 5,6   |

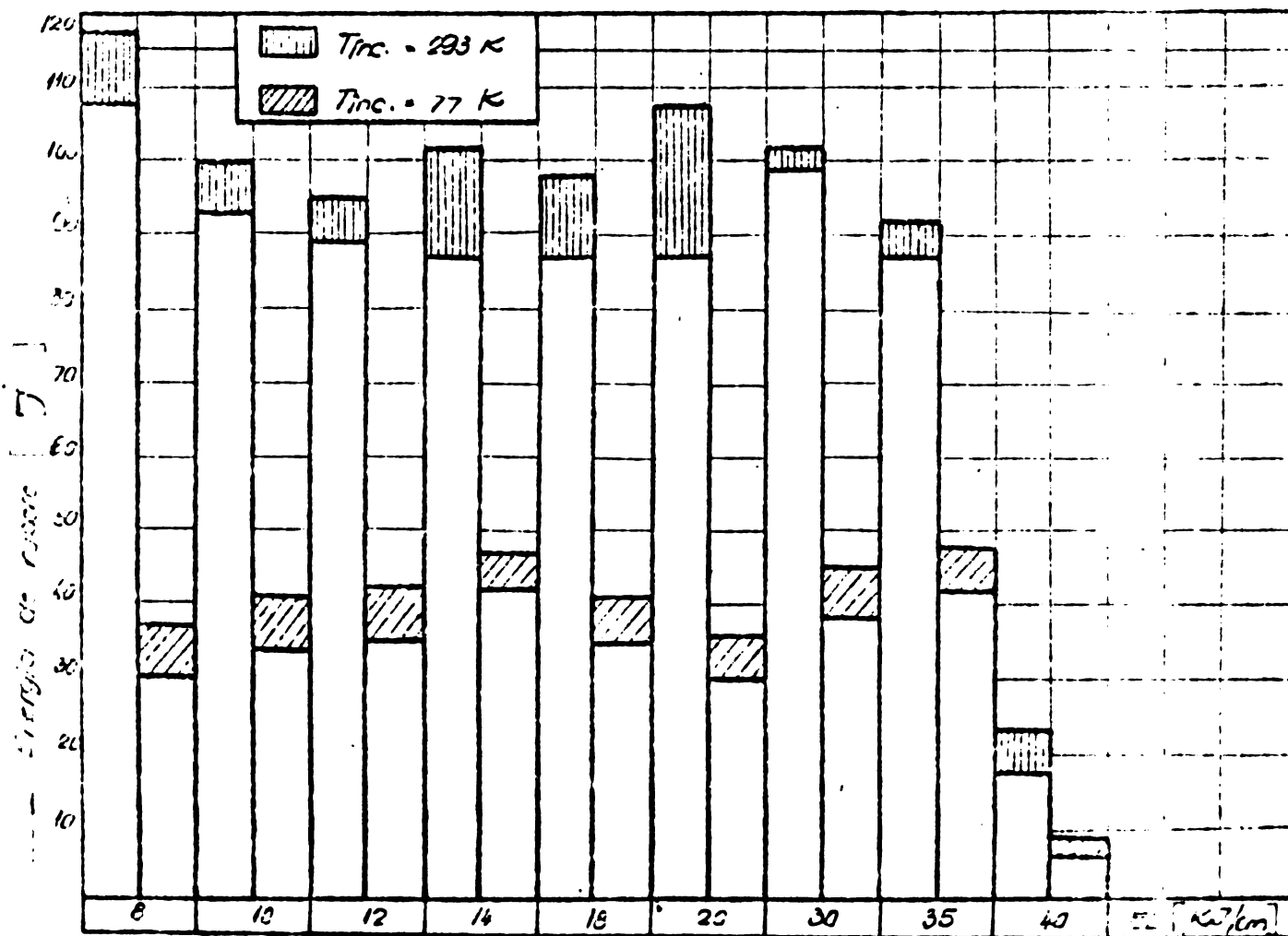


Fig. 2.12. Variația energiei de rupere funcție de energia ligandă și temperatura de încercare la  $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

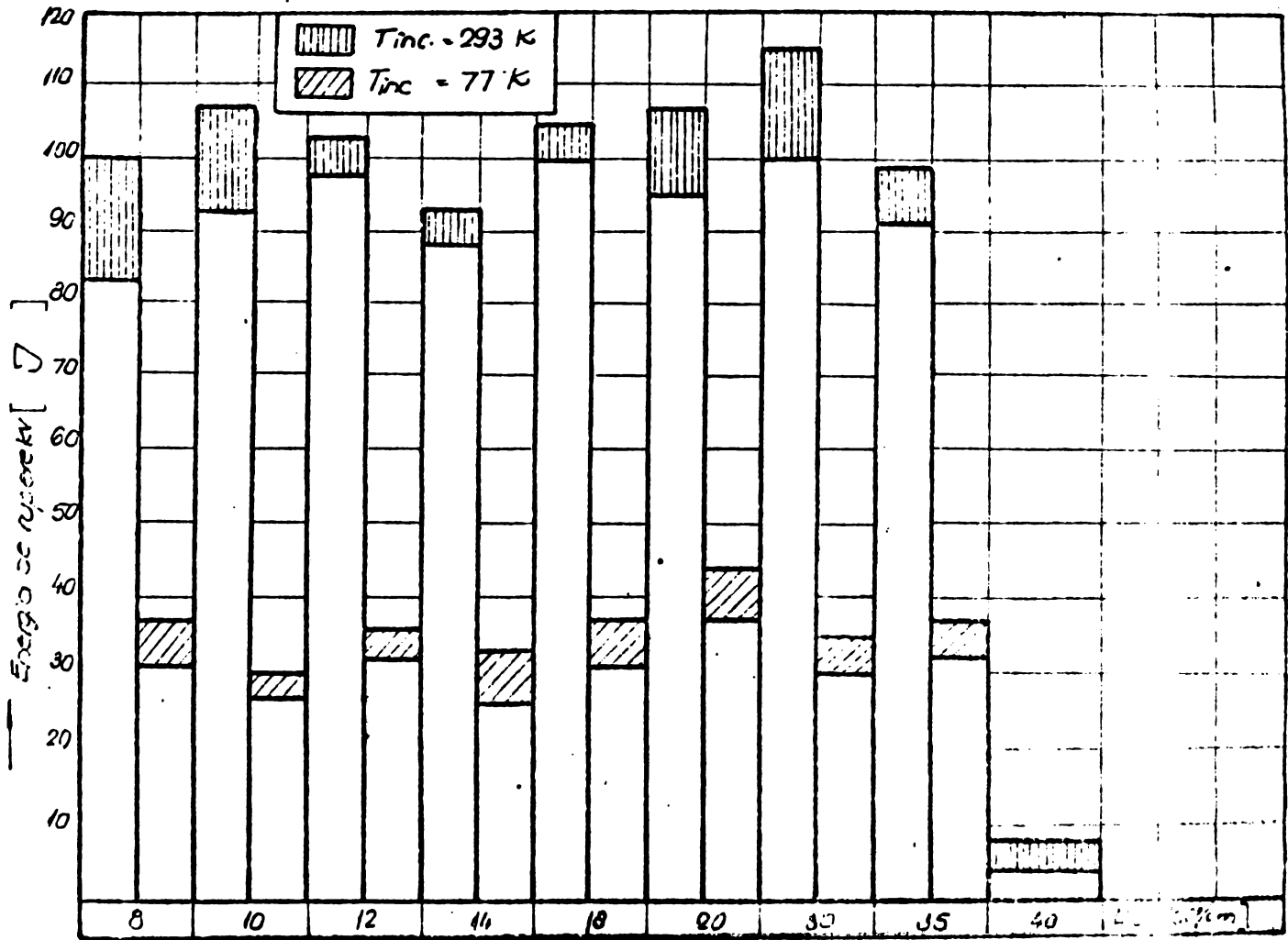


Fig.2.13 Variația energiei de rupere funcție de energia liniară și temperatura de încercare la  $T_v = 1473^{\circ}\text{K}$ .

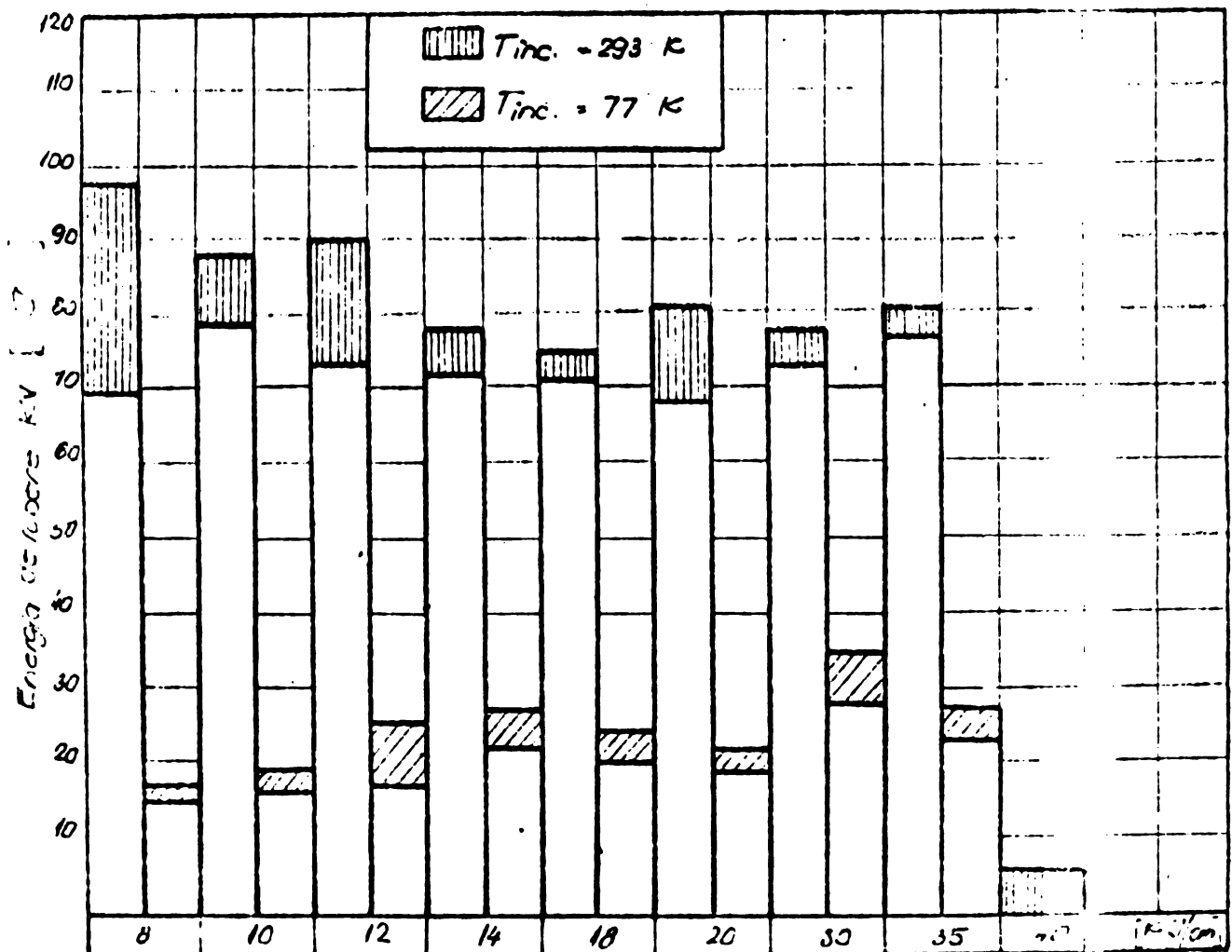


Fig.2.14. Variația energiei de rupere funcție de energia liniară și temperatura de încercare la  $T_v = 1623^{\circ}\text{K}$ .

În planșa III sînt prezentate microfractografiile caracteristice probelor simulate respectiv simulate și detensionate, temperatura de încercare fiind de 293 și 77 K.

În cazul probelor simulate cu o energie liniară de 10KJ/cm table cu grosimea de 12 mm la  $T_v = 1273$  și 1473 K atît la probe simulate cît și simulate și detensionate rîntura are un caracter ductil, la ambele temperaturi de încercare (Planșa III fig.1 și 2). La  $T_v = 1623$  K și  $T_{inc} = 77$  K rîntura prezintă o mare componentă fragilă (Planșa III fig.3).

În cazul probelor simulate cu o energie liniară de 8...35 KJ table cu grosimea de 30 mm la  $T_v = 1273$  și 1473 K atît la  $T_{inc} = 293$  cît și  $T_{inc} = 77$  K rîntura are un caracter ductil (Planșa III fig.4 și 5) iar la  $T_v = 1623$  K și  $T_{inc} = 293$  K rîntura are un caracter ductil - fragil (Planșa III fig.6).

În cazul probelor simulate cu energia liniară de 40 KJ/cm la toate temperaturile de vîrf se observă o rupere fragilă atît la  $T_{inc} = 293$  K cît și la  $T_{inc} = 77$  K (Planșa III fig.7).

În metalul de bază (starea C+R) se observă că rîntura are un pronunțat caracter ductil atît la  $T_{inc} = 293$  K cît și la  $T_{inc} = 77$  K (Planșa III fig.8).

## 2.8. CORELATIA DINTRE GROSIMEA TABLELOR, ENERGIA LINIARA SI PARAMETRUL RACIRII $t_{8/5}$

Încercările efectuate pe eoruvete relevate din table de oțel criogenic cu 9% Ni de grosime 12 și 30 mm în stare C+R, supuse ciclurilor termice de sudare, folosind ca parametri variabili temperatura de vîrf ( $T_v = 1273, 1473$  și 1623 K) și energia liniară ( $E_L = 8...40$  KJ/cm) permit stabilirea unei corelații între grosimea componentelor de sudat, energia liniară de sudare și legea de răcire între 1073...773 K (800...500°C) caracterizată prin parametrul răcirii notat cu  $t_{8/5}$ .

Pentru calculul parametrului răcirii  $t_{8/5}$  se poate folosi următoarea metodă:

a. Se determină grosimea de calcul  $s'$  a componentelor cu relația

$$s' = \left[ \frac{E}{2 \rho c} \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

PLANSA III



Fig.1.  $E_L = 10\text{KJ/cm MEx}2700$   
 $T_V = 1473^\circ\text{K}$ ;  $T_{inc} = +293^\circ\text{K}$



Fig.2.  $E_L = 10\text{KJ/cm MEx}2700$   
 $T_V = 1473^\circ\text{K}$ ;  $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$



Fig.3.  $E_L = 10\text{KJ/cm MEx}2700$   
 $T_V = 1623^\circ\text{K}$ ;  $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$



Fig.4.  $E_L = 20\text{KJ/cm MEx}2700$   
 $T_V = 1473^\circ\text{K}$ ;  $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$

PLANSA III



Fig.5.  $E_L = 30\text{KJ/cm}$  MEx2700  
 $T_V = 1273^\circ\text{K}$   $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$



Fig.6.  $E_L = 10\text{KJ/cm}$  MEx2700  
 $T_V = 1623^\circ\text{K}$   $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$



Fig.7.  $E_L = 40\text{KJ/cm}$  MEx2700  
 $T_V = 1273^\circ\text{K}$ ;  $T_{inc} = 293^\circ\text{K}$



Fig.8. Metal de bază  
MEx2700;  $T_{inc} = 77^\circ\text{K}$

b. Dacă grosimea reală a componentelor  $s > s'$  atunci  $t_{8/5}$  se calculează cu relația:

$$t_{8/5} = \frac{E}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0} \right) \quad (2)$$

c. Dacă  $s < s'$ , atunci  $t_{8/5}$  se calculează cu formula:

$$t_{8/5} = \frac{E}{4\pi\lambda\rho c s^2} \left[ \left( \frac{1}{500-T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800-T_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

în care notațiile au următoarele semnificații:

$\lambda$  = conductivitatea termică între 1073...773°K (800-500°C) în  $\left[ \frac{J}{m \cdot s \cdot ^\circ C} \right]$

$c$  = căldura specifică

$\rho$  = masa specifică

$E = 0,85 E_L$  pentru sudarea manuală

$E = 0,88 E_L$  pentru sudarea automată

$E_L$  = energia liniară în  $[KJ/cm]$ .

$T_0 = 293^\circ K$

Introducând valorile numerice în relațiile 1, 2, 3 se obțin relațiile simplificată pentru calculul lui  $t_{8/5}$  date în tabelul 2.7

Relații pentru calculul duratei de răcire a ZIT-ului în intervalul 1073-773°K (800...500°C) în cazul oțelului aliat cu 9% Ni.

Tabelul 2.7

| Oțel<br>cu<br>9%Ni | Relația de cal-<br>cul pentru $s'$<br>în $[cm]$ | Relațiile pentru calculul lui $t_{8/5}$ în<br>[s]cînd |   |
|--------------------|---|---|---|
|                    |   | $s > s'$  | $s < s'$  |
|                    | $s' = 0,4526 E_L$                               | $t_{8/5} = 0,94 E_L$                                  | $t_{8/5} = 0,1125 \left( \frac{E_L}{s} \right)^2$ |

Avînd parametrul răcirii  $t_{8/5}$  determinat se reprezintă grafic legea de răcire în funcție de grosimea componentelor de sudat, pentru diferite energii liniare,  $t_{8/5} = f(s)$  (fig. 2.15) respectiv legea de răcire în funcție de energia liniară de sudare pentru diferite grosimi de tablă,  $t_{8/5} = f(E_L)$  (fig. 2.16).

Din analiza dependențelor prezentate în fig. 2.15 rezultă că există pentru fiecare energie liniară folosită o grosime limită în-  
nă la care viteza de răcire crește cu grosimea și de la care ciclul termic (viteza de răcire) este practic independent de grosimea tablei.

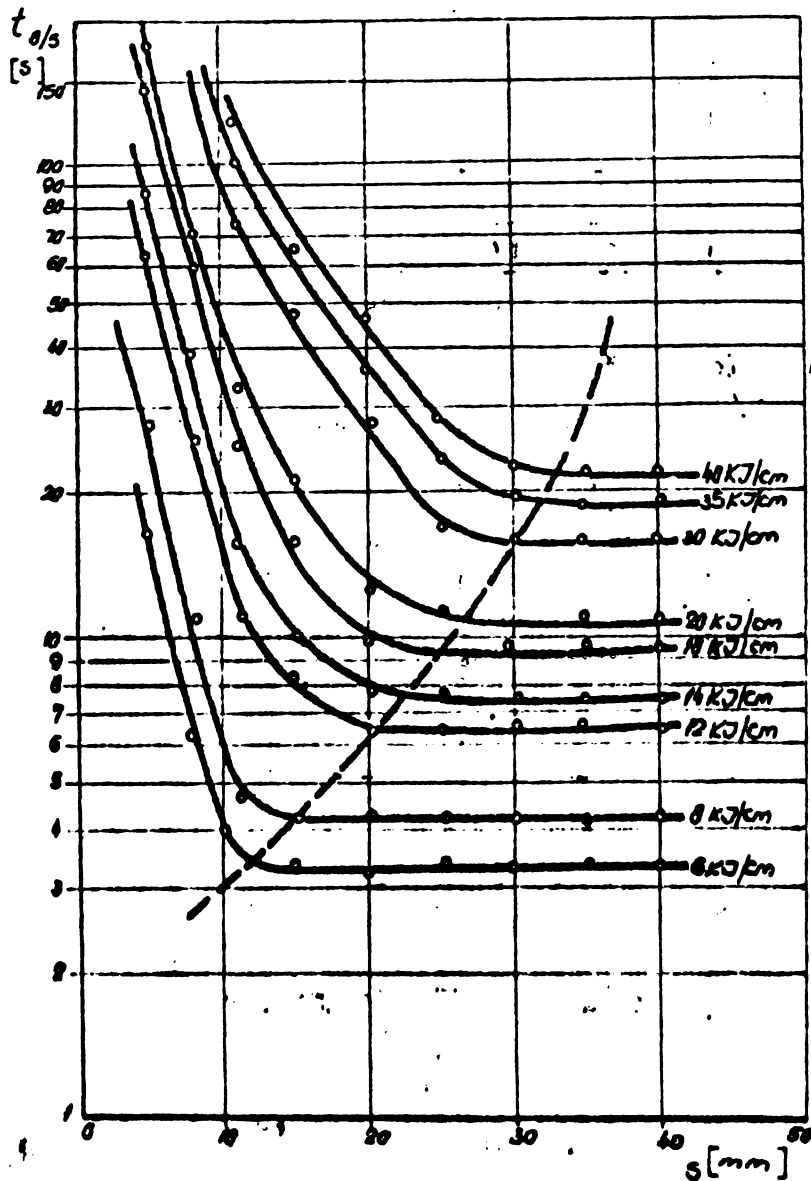


Fig.2.15. Legea de răcire funcție de grosimea tablelor.

30 mm. nu pot fi sudate cu energie liniară mai mare decât 35 KJ/cm iar table cu grosimea de 12 mm nu pot fi sudate cu energie liniară mai mare de 16 KJ/cm.

La timp de răcire  $t_{g/5} > 20$ s desi nu apar diferențe semnificative între valorile măsurătorilor de duritate, energia de rupere atât la  $T_{inc} = 293$  K cât și la  $T_{inc} = 77$  K a fost sub 20 J, iar analiza microfractografică a suprafețelor de rupere indică o mare componentă fragilă.

Aceasta se explică prin faptul că la  $t_{g/5} > 20$  s se necesită energii liniare mari care produc o întăzire puternică a materialului, apar tensiuni termice de valori mari și pot apărea și toniri locale la limita grăunților, cresc grăunții și materialul devine fragil.

Luând în considerare parametrul răcirii  $t_{g/5}$  și rezultatele experimentale valorile durității, KV5 în ZIT și energia de rupere la  $T_{inc} = 293$  K și  $T_{inc} = 77$  K se reprezintă grafic variația  $KV5 = f(t_{g/5})$  (fig.2.17) respectiv  $KV = f(t_{g/5})$  fig.2.18.

Din analiza curbelor de variație a durității respectiv a energiei de rupere cu parametrul răcirii  $t_{g/5}$  (fig.2.17 și 2.18) se remarcă faptul că table din oțel cu 9% Ni pot fi sudate fără precauții speciale la valorile parametrului răcirii  $t_{g/5} = 20$  s.

Corelând parametrul răcirii ( $t_{g/5} = 20$  s) cu grosimea tablei și cu energia liniară fig.2.16 rezultă că table din oțel criogenic cu 9% Ni de grosime



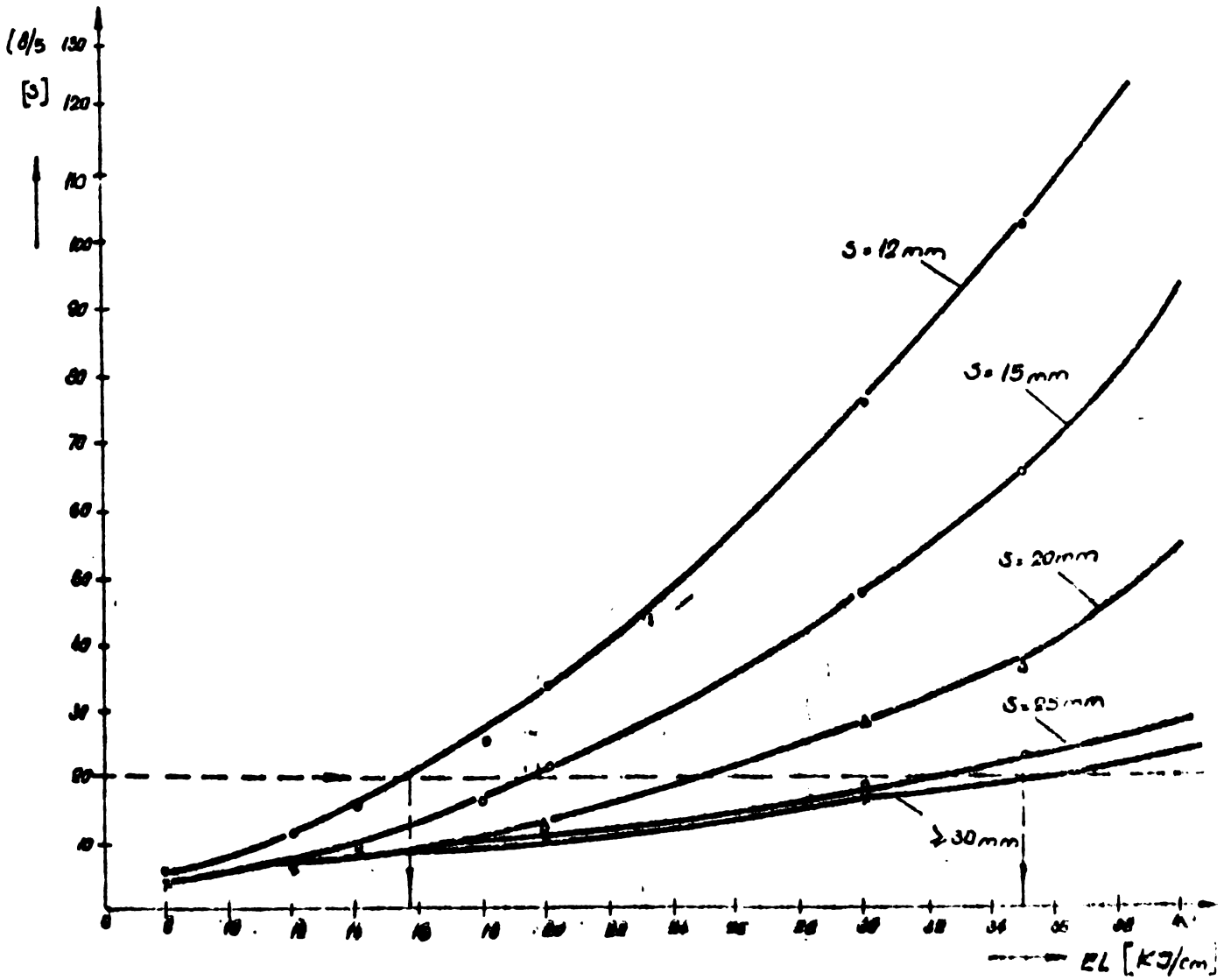


Fig.2.16. Legea de răcire funcție de energia liniară.

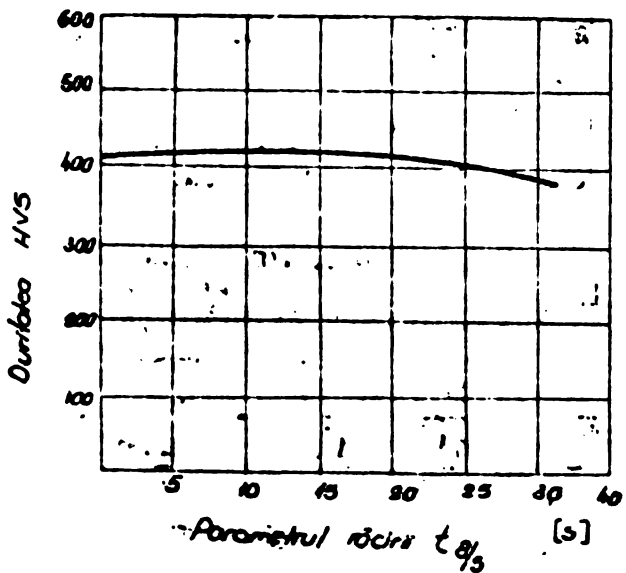


Fig.2.17. Variația durității funcție de parametrul răcirii  $t_{8/5}$

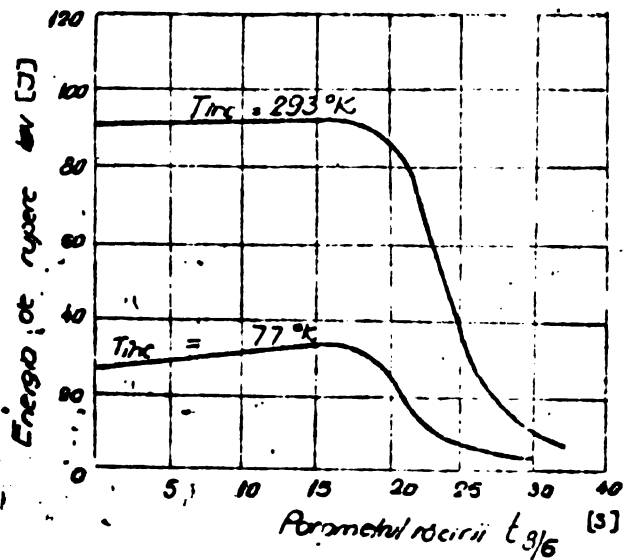


Fig.2.18. Variația energiei de rupere funcție de parametrul răcirii  $t_{8/5}$

## CONCLUZII

Incercările efectuate pe epruvete prelevate din tablă de oțel criogenic cu 9 % Ni, de grosime 12 și 30 mm în stare C + R, supuse ciclurilor termice de sudare folosind ca parametrii variabili temperatura de vîrf ( $T_v = 1273, 1473, 1623$  K) și energia liniară ( $E_L = 8... 40$  KJ/cm) scot în evidență următoarele :

- Din punct de vedere al valorilor măsurătorilor de duritate, nu apar diferențe semnificative între probele simulate, folosind pentru simulare energii liniare de 8...40 KJ/cm la aceeași temperatură de vîrf. Ridicarea temperaturii de vîrf produce în ZIT-ul probelor simulate durități cuprinse între 380 .... 450 HV5. Duritățile de valori ridicate se datoresc prezenței nichelului în compoziția oțelului, element care duce la micșorarea vitezei critice de călire și la apariția de structuri în afară de echilibru chiar la viteze de răcire mai mici de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Tratamentul termic de detensionare la 848 K/ 2h aplicat probelor simulate pentru toate temperaturile de vîrf uniformizează în ZIT structurile reducînd duritățile la nivelul metalului de bază în plajă de valori de 230.... 260 HV5, fiind astfel oportun în îmbunătățirea structurii influențate de ciclurile termice de sudare.

- Din punct de vedere al valorilor energiilor de rupere nu apar diferențe semnificative între probele simulate din tablă cu grosimea de 30 mm folosind pentru simulare energii liniare de 8... .. 35 KJ/cm și temperaturi de vîrf  $T_v = 1273$  și  $1473$  K atît la  $T_{inc} = 293$  K cît și la  $T_{inc} = 77$  K.

Ridicarea temperaturii de vîrf la 1623 K conduce la scăderea valorilor energiei de rupere atît la  $T_{inc} = 293$  K cît și la  $T_{inc} = 77$  K.

Acest lucru se datorește creșterii grăuntelui austenitic cu temperatura care la răcirea ulterioară va da naștere la structuri grosolane și fragile.

Tratamentul termic de detensionare conduce la creșterea energiei de rupere la valori apropiate de ale metalului de bază la  $T_{inc} = 293$  K iar la  $T_{inc} = 77$  K creșterea este ne semnificativă.

Deși duritățile în ZIT depășesc valoarea de 350 HV5, materialul se comportă satisfăcător atît la  $T_{inc} = 293$  K cît și la  $T_{inc} = 77$  K ( $KV > 35$  J) iar analiza microfractografică a suprafețelor de rupere indică în ambele temperaturi de încercare o rupere ductilă în cazul

probelor din table de 30 mm grosime simulate cu  $E_L = 8... 35$  KJ..

Din analiza acestor date rezultă că pentru oțelul aliat cu 9 % Ni valoarea durtății de 350 HV5 nu este un criteriu de apreciere a comportării metalurgice la sudare.

Parametrul care trebuie luat în considerare în aprecierea comportării metalurgice la sudare a oțelului cu 9 % Ni este timpul de răcire  $t_{8/5}$  care trebuie corelat cu grosimea pieselor de sudat și cu energia liniară folosită la sudare.

Cercetările experimentale au stabilit că la sudarea oțelurilor criogenice cu 9 % Ni timpii de răcire care dau valori corespunzătoare caracteristicii de rezistență la încovoiere prin șoc în ZIT ( $KV > 30$  J) la temperatura azotului lichid (77 K) sînt  $t_{8/5} = 4...20$  s la table cu grosimea cuprinsă între 12...30 mm.

### CAPITOLUL III

#### CERCETARI ASUPRA COMPORTARII METALURGICE LA SUDARE

##### A OTELURILOR CRIOGENICE ALIATE CU 9%Ni.

#### 3.1. INFLUENTA COMPOZITIEI CHIMICE ASUPRA COMPORTARII METALURGICE LA SUDARE A OTELURILOR CRIOGENICE ALIATE CU 9%Ni.

In cazul oțelurilor criogenice aliate cu nichel studiul variației rezilientē la  $T = 77\text{ K}$  în funcție de conținutul în nichel a fost criteriul care a condus în cele din urmă la reținerea procentului de 9% Ni care oferă securitatea la această temperatură fig.3.1. [8;70].

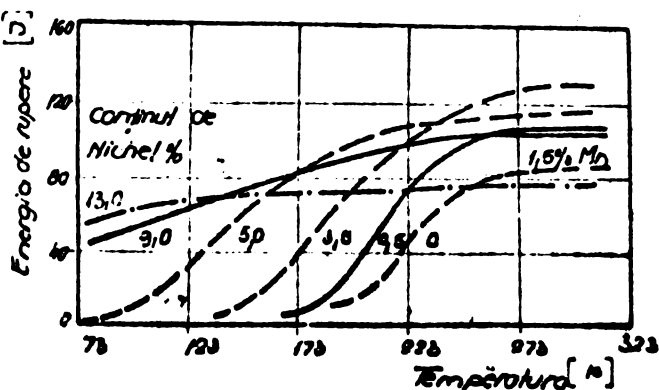


Fig. 3.1. Influența conținutului de nichel asupra energiei de rupere la diferite temperaturi de încercare

asupra rezilienței martensitei. Această remarcă a condus la studiul influenței conținutului în Al asupra plasticității martensitei cu 9% Ni [7,48].

Cercetări numeroase efectuate în Franța au avut drept scop studiarea influenței unui conținut în Al cuprins între 0,020 și 0,050%, cercetări care au valoare pentru ansamblul oțelurilor feritice, ele stau la baza fabricării oțelurilor sudabile cu granulație fină.

Rezultatele studiilor asupra oțelului cu 9% Ni sînt prezentate în figura 3.2.

Conținutul în carbon a constituit obiectul unor largi consultări și studii importante. Preocuparea principală a fost aceea de a conferi o bună reziliență în zona influențată termic (ZIT). [7.48].

R.M.Abom a arătat influența conținutului în carbon asupra plasticității martensitei slab sau mediu aliate și a subliniat influența mărimii grăunților de austenit

Analiza rezultatelor prezentate în figura 3.2. demonstrează  
 - conținuturi în Al de 0,04% sînt net favorabile față de conținuturi scăzute (0,01%) sau ridicate (0,07%):  
 - oțelurile cu un conținut în carbon scăzut sînt mai sensibile la influența Al, decît cele cu conținut ridicat:

- conținutul în C influențează mărimea grăunților de austenită înainte de interveni creșterea grăunților datorită temperaturii fapt important în structurile calite și reonite.

Studiul temperaturilor de determinării elasticității în ZIT a fost făcut pe o serie de șar experimentale avînd conținuturile în C și Al în limite foarte largi. Incercările efectuate au fost următoarele:

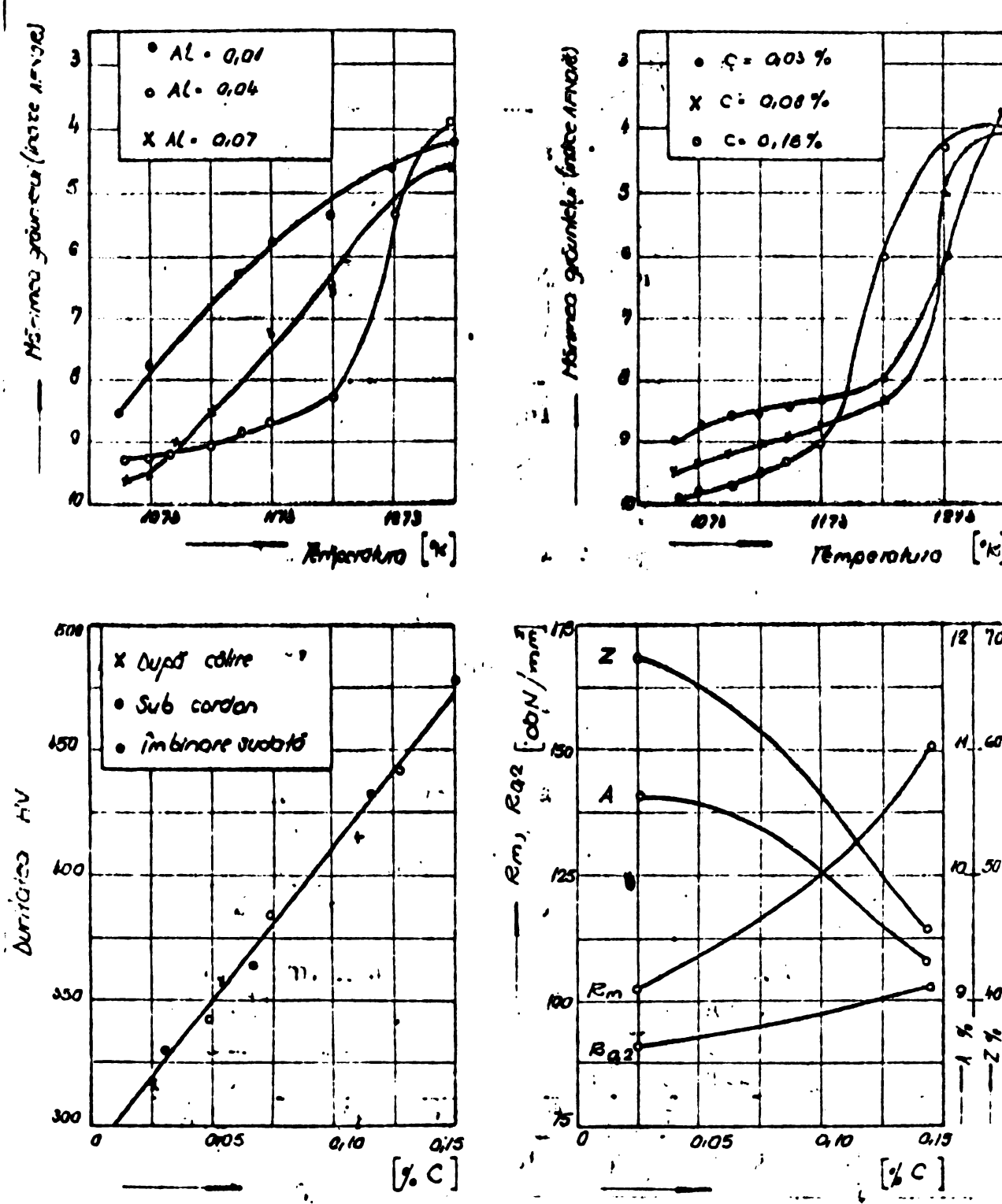


Fig.32. Influența conținutului în C și Al asupra măririi grăunților de austenită și asupra proprietăților mecanice.

- Incercări de duritate efectuate pe probe călite pe un cordon dens prin sudură și pe îmbinări sudate; în ultimul caz trecerile succesive au un efect de revenire care provoacă o variație a durității și nu au fost luate în considerare acelea obținute în ultima trecere. Rezultatele obținute depind doar de conținutul în carbon al oțelului; când conținutul în carbon al oțelului variază de la 0,025% la 0,145% duritatea Vickers crește de la 320 la 470 HV.

Incercările de duritate efectuate pe probe din oțeluri orionice aliate cu 9% Ni având compoziția chimică prezentată în tab. 2.1. ZIT-ul fiind creat prin simularea ciclurilor termice de sudare atestă că duritatea este independentă de parametrul de răcire  $t_{3/5}$  depinzând doar de conținutul în C al oțelului.

Rezultatele obținute pot fi comparate cu cele obținute de IRSID 121 pe un oțel aliat cu 9% Ni, ZIT-ul fiind creat prin decuparea unui cordon de sudură (fig. 3.3).

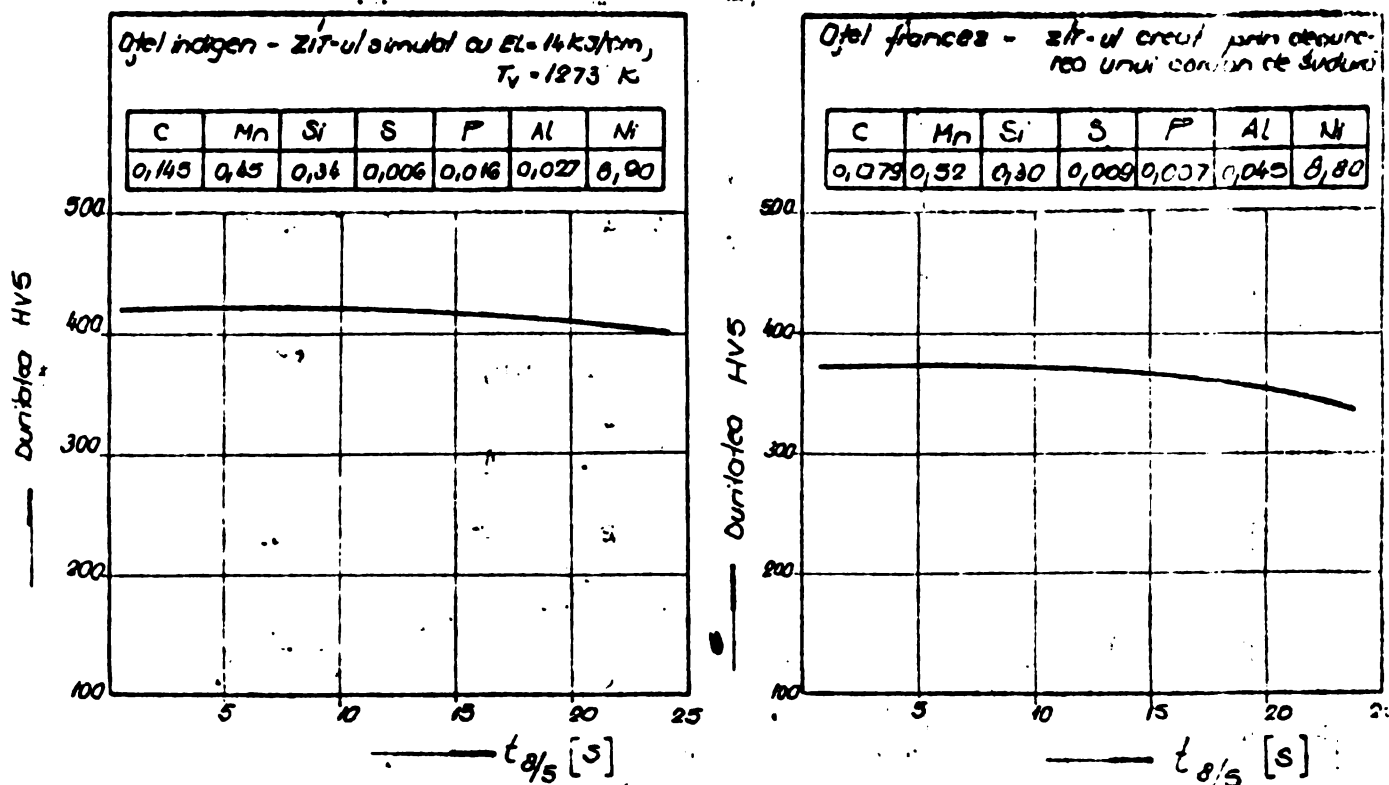


Fig. 3.3. Variația durității HV5 funcție de parametrul răcirii  $t_{3/5}$ .

Se confirmă astfel cele prezentate în lucrarea 121 că valoarea maximă a durității (duritatea martensitică) nu depinde practic decât de conținutul în carbon. Studiile și încercările efectuate de IRSID pe oțeluri cu diferite conținuturi în carbon (0,06 C - 0,21) au permis stabilirea unei relații între duritatea maximă în ZIT și conținutul în carbon al oțelului de forma:

$$HV_{\max_{ZIT}} = 283 + 930\% C$$

Această relație se verifică experimental și în cazul oțelurilor criogenice cu 9%Ni indigene care au fost suvuse simulării ciclurilor termice de la sudare.

Pentru 0,13%C  $HV_{\max_{ZIT}} = 283 + 930 \cdot 0,13 = 404$

Pentru 0,15%C  $HV_{\max_{ZIT}} = 283 + 930 \cdot 0,15 = 423$

- Incercări de reziliență efectuate pe epruvete Charoy V la 77°K Epruvetele au fost călite, prelevarea lor s-a făcut din ZIT. Când conținutul în Al este cel normal (0,04%) reziliențele pe epruvete călite scad proporțional cu creșterea conținutului în C (fig.3.4)

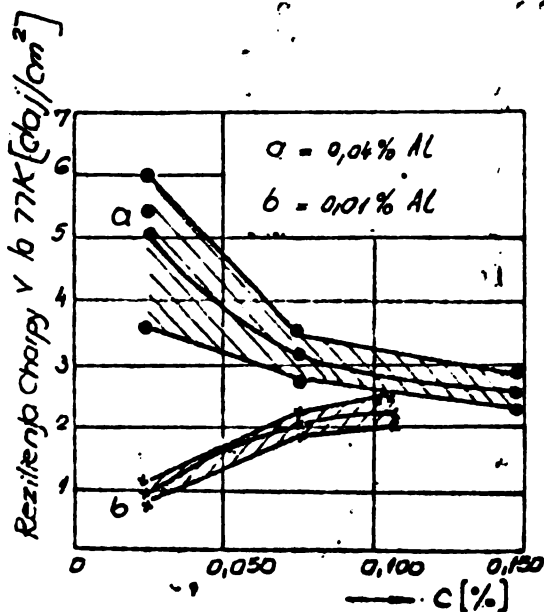


Fig. 3.4. Variația rezilienței Chery V la 77 K funcție de conținutul în C și Al.

și consumatoare de oțeluri criogenice din lume (Tabelul 2.1)

Incercările prezentate în lucrările [48,70] au condus la concluzia că cele mai bune rezultate se obțin în cazul în care se realizează simultan un conținut scăzut în C și conținut în Al convenabil.

Conținuturile între 0,020% și 0,050% sînt cele mai favorabile pentru ambele elemente. Totuși se vede că un conținut în C puțin mai ridicat, de ordinul 0,06% C ar fi preferabil pentru o comportare bună a ansamblului construcției.

Studiile efectuate pe rezervoare din oțel cu 0,09% C au demonstrat că se pot obține rezultate satisfăcătoare în cazul oțelului cu conținut în C sensibil mai ridicat.

Rezultatele obținute în cazul șarjelor experimentale fără adaos de Al sînt mult mai slabe, diferența apare mai evident în cazul oțelurilor cu conținut scăzut în C.

Caracteristicile mecanice ale oțelului cu 9%Ni de proveniență indigenă (tabelul 2.1) obținute pe probe în stare călită și revenită respectiv simulate sînt prezentate în tabelul 3.1.

Valori din tabel sînt media a trei măsurători.

Valorile obținute se încadrează în normele și specificațiile naționale ale țării producătoare

Caracteristicile mecanice ale oțelului cu 9% Ni de proveniență indigenă, obținute pe probe în stare C+R, respectiv simulate, simulate și detensionate

Tabelul 3.1.

| Nr. crt. | Tipul probei                    | T <sub>inc</sub><br>K | Caracteristici mecanice               |   |                     |        |                            | Obs.                    |
|----------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---|---------------------|--------|----------------------------|-------------------------|
|          |                                 |                       | R <sub>m</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | R <sub>0,2</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | A <sub>5</sub><br>% | Z<br>% | KCV<br>daJ/cm <sup>2</sup> |                         |
| MB       | oțlit și                        | 293                   | 76,7                                  | 71,4                                    | 69,7                | 20,5   | 15,2                       | Table cu grosimea 30 mm |
|          | revenit                         | 77                    | 108,2                                 | 104,9                                   | 66,3                | 19,4   | 8,3                        |                         |
| ZIT      | simulat                         | 293                   | 134,2                                 | 120,1                                   | 67                  | 18     | 12,3                       |                         |
|          | Cu E <sub>L</sub> =<br>=14KJ/cm | 77                    |                                       |   |                     |        | 4,8                        |                         |
| ZIT      | simulat și                      | 293                   | 94                                    | 82,1                                    | 70                  | 21     | 15,1                       |                         |
|          | detensionat                     | 77                    |                                       |   |                     |        | 5,6                        |                         |

Tinând seama de necesitatea de a limita duritatea în ZIT la 400 HV și de scăderea progresivă a plasticității metalului cu creșterea conținutului în C, apare necesitatea de-a limita la maximum 0,1% C, în cazul construcțiilor la care nu se aplică tratament termic de detensionare după sudare, în toate cazurile apare necesitatea calmării cu Al, astfel ca să rămână 0,09% Al rezidual.

### 3.2. MATERIAL DE ADAOS.

#### 3.2.1. Condiții impuse materialelor de adaos.

Materialele de adaos folosite la sudarea oțelurilor cu 9% Ni trebuie să asigure în același timp o rezistență la rupere de valori ridicate peste 70 daN/mm<sup>2</sup>, o reziliență KCV de 4...6 daJ/cm<sup>2</sup> la 77°K și să fie și economice.

Ca materiale de adaos se pot utiliza:

- aliaje de bază de Cu care în general nu corespund datorită rezistenței de rupere mici [50:95]

- aliaje cu conținut ridicat în Ni care au un coeficient de dilatare apropiat de cel al metalului de bază, dar au un preț de cost ridicat.



- oțeluri bifazice austenito-feritice care având structuri fragile au fost abandonate;

- oțelurile austenitice care rezolvă problema rezilienței la temperaturi scăzute, dar prezintă pericolul fisurării la cald și au o rezistență la tracțiune mai mică decât a MA.

Cu toate aceste neajunsuri electrozii austenitici apar ca cei mai indicați [50,95].

Materialele de adaos (MA) folosite trebuie să asigure ca îmbinările sudate să satisfacă următoarele condiții:

- nici o fisură să nu apară în MA;
- coeficientul de dilatare termică a MA să fie apropiat de cel al MB;
- proprietățile mecanice ale cupaturilor să fie sensibile egale cu cele ale MB mai ales în ceea ce privește rezistența la tracțiune și reziliența la 77 K.

Cu privire la alegerea MA adecvate pentru sudarea oțelurilor criogenice cu 9% Ni părerile sînt contradictorii. Dacă în U.S.A. și parțial în Franța se folosesc aliaje pe bază de Ni cu limita de curgere scăzută dar cu coeficient de dilatare avantajos în Europa se folosesc MA speciale pe bază de Cr-Ni cu limita de curgere mai ridicată. [47; 50L 110; 117].

### 3.2.2. Tipuri de electrozi și sîrme pentru sudarea oțelurilor cu 9% Ni.

#### 3.2.2.1. Electrozi tip INCONEL

Electrozii încercați la sudarea oțelurilor cu 9% Ni au fost de mai multe tipuri și se pare că încă nu a fost găsit un electrod care să satisfacă toate cerințele impuse.

Construcțiile de rezervoare realizate pînă în prezent în U.S. și Franța au fost sudate cu electrozi tip INCONEL.

Compoziția chimică a sîrmelor inconel folosite la electrozii înveliți pentru sudarea oțelurilor criogenice cu 9% Ni este prezentată în tabelul 3.2.

La toate sîrmele conținutul în Ni este restul pînă la 100%

La toate sîrmele  $Si \leq 0,75\%$ ;  $P \leq 0,02\%$ ;  $S \leq 0,02\%$

Încercările efectuate pe îmbinările sudate cu electrozii INCONEL ale oțelului criogenic cu 9% Ni sînt prezentate în cele ce urmează [7].

Compoziția chimică a sîrmelor Inconel folosite la electrozii înveliți pentru sudarea oțelurilor criogenice cu 9% Ni

Tabelul 3.2.

| Tipul   | Compoziția chimică % |          |        |           |          |          |       |     |
|---------|----------------------|----------|--------|-----------|----------|----------|-------|-----|
|         | C                    | Mn       | Cr     | Mo        | Nb       | W        | Fe    | Cu  |
| WELDB   | 0,10                 |          | 13..17 | 0,5..2,5  | 1,0-3,0  | -        |       |     |
| WELDBM  |                      |          |        | 1,5..2,5  |          | -        | 6..12 | 0,5 |
| WELD42  |                      | 1,0..3,5 |        |           | 1,5..3,0 |          |       |     |
|         | 0,15                 |          | 11..15 | 1,3..2,5  |          | 2,0..3,0 |       |     |
| WELDA4  |                      |          | 11..17 | 3,5..6,0  |          |          | 2,5   | 12  |
|         |                      |          |        |           |          |          |       | -   |
| WELD112 | 0,10                 | 1,0      | 16..21 | 7,0..10,0 | 2,0..3,0 | -        | 7     | -   |

Analiza metalului dens %

| C        | Si       | Mn      | Cr    | Mo    | Co      | Fe       | Cu  | S    | N  |
|----------|----------|---------|-------|-------|---------|----------|-----|------|----|
| max 0,15 | max 0,75 | 1,0-3,5 | 13-17 | 0,5-2 | 1,0-3,0 | 6,0-12,0 | 0,5 | 0,02 | re |

Proprietățile mecanice ale metalului dens sînt:

$R_m = 64 \text{ daN/mm}^2$ ;  $R_{0,2} = 26,6 \text{ daN/mm}^2$   $A_5 = 43\%$   $Z = 55\%$  la  $T_{inc} = 293 \text{ K}$

$R_m = 0,3 \text{ daN/mm}^2$ ;  $A_5 = 21\%$  la  $T_{inc} = 77 \text{ K}$

În tabelul 3.3. sînt prezentate proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate ( $R_m$  în  $\text{daN/mm}^2$ ) în diferite poziții de sudare

$R_m$  [ $\text{daN/mm}^2$ ] a îmbinări sudate realizate cu electrozi Inconel în diferite poziții de sudare

Tabelul 3.3.

| Nr. crt. | Metal dublu normalizat și revenit |       | Metal călit și revenit |       | Poziția de sudare |       |       |       |
|----------|-----------------------------------|-------|------------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
|          | vert.                             | oriz. | vert.                  | oriz. | vert.             | oriz. | vert. | oriz. |
| 1.       | 64,5                              | 77,0  | 66,3                   | 75,4  | 71,8              | 78,9  | 71,5  | 76,7  |
| 2.       | 66,0                              | 76,0  | 65,0                   | 75,3  | 73,5              | 80,0  | 68,0  | 76,6  |

În tabelul 3.4. sînt prezentate reziliențele Charpy V

la 77 K în  $\frac{\text{daJ}}{\text{cm}^2}$

Reziliențele Charpy V  $\frac{\text{daJ}}{\text{cm}^2}$  la 77 K funcție de poziția creștăturii.

Tabelul 3.4

|                   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Creștătura în ZIT | 3,7 | 4,4 | 3,8 | 2,8 | 4,0 | 3,0 | 3,3 | 3,9 |
| Creștătura în MA  | 5,0 | 4,9 | 5,0 | 6,0 | 5,1 | 5,9 | 5,3 | 5,0 |

Valorile indicate în tabel sînt medie a trei încercări.

În tabelul 3.5 se prezintă stabilitatea proprietăților mecanice ale oțelului cu 9%Ni după menținerea la  $T_{inc} = 77 \text{ K}$ .

Influența menținerii la 77 K asupra caracteristicilor de tracțiune ale oțelului cu 9%Ni [7]

Tabelul 3.5

| Proprietăți mecanice                            | Înainte de menținere | După menținerea la 77°K |        |
|---|----------------------|-------------------------|--------|
|   |                      | 1 lună                  | 3 luni |
| $R_m$ daN/mm <sup>2</sup>                       | 178,5                | 83,5                    | 90,0   |
| $R_{0,2}$ daN/mm <sup>2</sup>                   | 57,2                 | 57,0                    | 57,0   |
| Alungirea $A_5$ %                               | 22,0                 | 20,3                    | 20,0   |
| Întinderea $Z$ %                                | 68,5                 | 66                      | 67,0   |
| Reziliențe KCV $\frac{\text{daJ}}{\text{cm}^2}$ | 9,5                  | 10                      | 10     |
| ne metal denus tip Inconel                      |                      |                         |        |

### 3.2.2.2. Electrocul Z-20CVMW17-3

Literatura studiată nu prezintă construcții sudate cu acest tip de electrod ci doar încercări de laborator [3]. Compoziția chimică medie a metalului denus este:

| Tip | Compoziția chimică % |      |     |    |      |     |
|-----|----------------------|------|-----|----|------|-----|
|     | C                    | Si   | Mn  | Ni | Cr   | W   |
| A   | 0,18                 | 0,25 | 6,0 | 12 | 15,5 | 3,0 |
| B   | 0,25                 | 0,60 | 9,0 | 13 | 17,5 | 4,5 |

Stabilitatea austonitei metalului denus cu acest tip de electrod a fost urmărită prin încercări de reziliență și prin urmărirea evoluției permeabilității magnetice pe epruvete menținute timp de o lună la 77 K, respectiv 180 ore la 293 K și 77 K. Ambele

încercări au arătat o bună stabilitate a eustenitei.

Coeficientul de dilatare ( $13,1 \cdot 10^{-6}$ ) este mai ridicat decât cel al oțelului cu 9% Ni.

Electrodul are învelis bazic cu puțin hidrogen și permite sudarea în toate pozițiile. Reziliențele obținute sînt deosebit de satisfăcătoare. Încercările au arătat că adaosul de Mn elimină pericolul de fisurare la cald, deci din acest punct de vedere este superior electrozilor tip Inconel. Se utilizează ca electrod pentru sudarea manuală și sîrmă pentru sudarea MIG.

În tabelul 3.6 se prezintă caracteristicile mecanice ale metalului depus cu electrodul Z20CrNiW17-13

Caracteristicile mecanice ale metalului depus cu electrodul Z20CrNiW17-13

Tabelul 3.6

| T <sub>înc</sub><br>K | R <sub>m</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | R <sub>0,2</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | A <sub>5</sub><br>% | Reziliența KCV<br>daJ/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------|---------------------------------------|---|---------------------|---------------------------------------|
| 293                   | 64-70                                 | 49-52                                   | 37-42               | 12,5-13,5                             |
| 77                    | 113-117                               | 85-86                                   | 22-29               | 7-9                                   |

### 3.2.2.3. Electrozii 25Cr20Ni, 17Cr14Ni și 18Cr9Ni12Mo

În ideea utilizării unor electrozi mai economici și mai manevranți decât electrozii tip Inconel au fost experimentați electrozii de alte compoziții. Astfel sînt electrozii de tip 25Cr20Ni și 17Cr14Ni de natură austenitică și electrozii 18Cr9Ni12Mo care conțin cantități variabile de ferită [7].

Proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate realizate cu diferite sorturi de electrozi sînt prezentate în tabelul 3.7.

Tabelul 3.7

| Marca<br>electrod | Metal<br>denus          | Caracteristici mecanice               |   |                     |                      |                                   | Tendința<br>la<br>fisurare |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|---------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|                   |                         | R <sub>m</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | R <sub>0,2</sub><br>daN/mm <sup>2</sup> | A <sub>5</sub><br>% | A <sub>10</sub><br>% | Reziliența<br>daJ/cm <sup>2</sup> |                            |
| 1                 | 2                       | 3                                     | 4                                       | 5                   | 6                    | 7                                 | 8                          |
| 17Cr70Ni          | Aliaj<br>tip<br>inconel | 67-72                                 | 42-47                                   | 30-34               | 30-34                | 9-12                              | da                         |
| 17Cr60Ni          | Aliaj<br>tip<br>inconel | 56                                    | 36                                      | 20                  | 34                   | 10                                | da                         |

| 1                | 2                           | 3             | 4             | 5     | 6           | 7       | 8  |
|------------------|-----------------------------|---------------|---------------|-------|-------------|---------|----|
| 25Cr20Ni         | C scăzut<br>Mn normal       | 59            | 37,2          | 37    | 35          | 5,1     | da |
|                  | C scăzut<br>+ Mo            | 62,2          | 40            | 26    | 32          | 0,5-3   | da |
|                  | C scăzut<br>Mn ridicat      | 58,6          | 45            | 30    | -           | -       | -  |
|                  | C scăzut<br>Mn normal       | 43-61         | 36-45         | 14-28 | 14-15       | 6,5-7,5 | da |
| 17Cr14Ni         | C scăzut<br>Mn ridicat      | 50,3          | 34            | 35    | 43,2        | 5,1     | -  |
|                  | 10-20%Fe                    | 73,4          | 57            | 29,8  | 43          | 2,0     | -  |
| 18Cr10Ni<br>12Mo | Fe-5%<br>Mn-2%              | 58,5-<br>62,5 | 40-51         | 23-26 | 28,5-<br>54 | 3,7-4,7 | nu |
|                  | Fe-5%<br>Mn ridicat         | 62-64         | 46,6-<br>49,4 | 35    | 50          | 3,9-4,6 | nu |
|                  | * C <sub>max</sub><br>0,126 | 56-70         | 39-45         | 36-42 | -           | 6,8-8   | nu |

\* Electrozi românești.

Se observă că:

- reziliența satisfăcătoare se obține cu condiția ca fecita să nu depășească 6% și conținutul în C 0,08%;
- rezistența la rupere este în general insuficientă în cazul electrozilor 25Cr20Ni și 17Cr14Ni, cu electrozii 18Cr10Ni12Mo se poate însă obține  $R_m = 63 \text{ daN/mm}^2$ ;
- necesitatea obținerii unei limite de curgere înalte nu pune probleme;

- fragilizarea metalului deșus este întotdeauna mai mare la electrozii austenitici cu toate că au un conținut în C mai scăzut.

Electrozii 18Cr10Ni12Mo au părut ca cei mai promițători datorită prezenței Mo care are un efect favorabil atât asupra rezistenței la fisurare cât și asupra  $R_m$ .

În tabelul 3.8 se prezintă mărcile de electrozi produse de diferite firme care dau caracteristici mecanice asemănătoare și în special reziliență la 77 K și care pot fi recomandate la sudarea oțelurilor austenitice pline cu Ni.

ELECTROZI RECOMANDATI PENTRU SUDAREA OTELURILOR CRIOGENICE

ALIATE CU 9 % NI

| Nr. crt. | TARA FIRMA | MARCA                    | PROPRIETATILE METALULUI DAIUS |      |       |    |      |     |     |    |         |      | Templa<br>material<br>termic |     |          |    |          |      |
|----------|------------|--------------------------|-------------------------------|------|-------|----|------|-----|-----|----|---------|------|------------------------------|-----|----------|----|----------|------|
|          |            |                          | C                             | Mn   | Si    | Cr | Ni   | Mo  | W   | NE | Spec.Rm | Re   |                              | A   | % KV daj |    |          |      |
| 1.       |            | FKB 25.20                | 0,15                          | -    | -     | 24 | 19   | -   | -   | -  | 4       | -    | -                            | 590 | 395      | -  | -        | -    |
| 2.       |            | GRV 22.16.               | 0,15                          | 0,07 | 0,07  | 19 | 15   | 2   | -   | -  | 2       | -    | -                            | 640 | 510      | -  | -        | -    |
| 2.       |            | GRV 17.13                | 0,22                          | 0,14 | 0,14  | 24 | 17   | 2,5 | 3   | -  | -       | -    | -                            | 735 | 490      | -  | -        | -    |
| 4.       |            | SENAC 15                 | 0,15                          | 0,15 | 0,15  | 16 | 14   | -   | 4   | -  | 1       | -    | -                            | 785 | 490      | -  | -        | -    |
|          |            | FOXB                     | 0,15                          | 0,15 | 0,15  | 17 | 70   | 2   | -   | 4  | -       | -    | -                            | 590 | 375      | -  | -        | -    |
| 5.       | AUSTRIA    | DOHLER                   | FOXT200                       | 0,10 | 0,10  | 8  | 17,5 | 13  | 2   | 7  | -       | -    | 0,1 N                        | 733 | 490      | 30 | 7 la     | 77 K |
| 6.       | R.F.G.     | MESSER<br>GRIES-<br>HEIM | Grinox 41<br>(SKOLA)          | 0,2  | 0,10  | 1  | 16   | 12  | -   | 3  | -       | -    | -                            | 600 | 490      | 30 | 7 la     | 77 K |
|          |            |                          |                               | 0,2  | 0,10  | 1  | 16   | 14  | -   | 4  | -       | -    | -                            | 750 | 490      | 35 | 7-10 la  | 77 K |
|          |            |                          |                               | 0,2  | 0,10  | 1  | 16   | 14  | -   | 4  | -       | -    | -                            | 600 | 460      | 35 | 7-10 la  | 77 K |
|          |            |                          |                               | 0,2  | 0,10  | 1  | 16   | 14  | -   | 4  | -       | -    | -                            | 720 | 460      | 35 | 7-10 la  | 77 K |
| 7.       | R.F.G.     | MESSIR<br>GRIES-<br>HEIM | Grinox 23                     | 0,1  | 0,1   | 1  | 23   | 19  | -   | -  | -       | -    | -                            | 550 | 400      | 35 | 8-12 la  | 77 K |
| 8.       | R.F.G.     | "                        | GRINI 7                       | 0,07 | 0,075 | 1  | 13   | 60  | 1   | -  | 2       | -    | -                            | 650 | 400      | 35 | 9-17 la  | 77 K |
|          |            |                          | NCF                           | 0,07 | 0,075 | 1  | 17   | 75  | 2   | -  | 3,5     | 6 Fe | -                            | 600 | 380      | 30 | 5-11 la  | 77 K |
| 9.       | R.F.G.     | "                        | GRINOX 51                     | 0,04 | 0,04  | 1  | 17,5 | 14  | 4,5 | -  | -       | -    | 0,15-0,60                    | 700 | 450      | 35 | 5-8 la   | 77 K |
|          |            |                          |                               | 0,04 | 0,04  | 1  | 20   | 16  | 3,2 | -  | -       | -    | 0,20-0,70                    | 700 | 450      | 35 | 10-14 la | 77 K |

|             | 1     | 2          | 3    | 4   | 5    | 6    | 7      | 8   | 9   | 10     | 11    | 12  | 13   | 14     | 15 | 16 | 17 |
|-------------|-------|------------|------|-----|------|------|--------|-----|-----|--------|-------|-----|------|--------|----|----|----|
| 10. JAPONIA | kobe  |            |      |     |      |      |        |     |     |        |       |     |      |        |    |    |    |
|             | STEEL | NIC-50     | 0,14 | 2,6 | 0,4  | 13   | 49     | 1,7 | 0,8 | 630    | 410   | 36  | 77 K | 7,5 la |    |    |    |
| 11. JAPONIA | KOBE  |            |      |     |      |      |        |     |     |        |       |     |      |        |    |    |    |
|             | STEEL | NIC-70     | 0,04 | 2,9 | 0,25 | 15   | 70     |     | 2,1 | 8,5 Fe | 630   | 41  | 77 K | 9,5 la |    |    |    |
| 12. JAPONIA | "     | NIC-70NH   | 0,07 | 6   | 0,6  | 13,5 | 70,5   |     | 6   | 8 Fe   | 730   | 36  | 77 K | 7,5 la |    |    |    |
| 13. R.F.G.  | TEN   | TRIPMANIT  | 0,10 | 3,5 |      | 25   | 30     |     |     |        | 500   | 30  | 77 K | 4 la   |    |    |    |
| 14. R.F.G.  | TEN   | TRIPMANIT  | 0,04 | 5   |      | 20,5 | 16     | 3   |     |        | 9,13N | 650 | 450  | 6 la   |    |    |    |
|             |       | 19115      |      |     |      |      |        |     |     |        |       |     |      | 4 K    |    |    |    |
| 15. "       | "     | TRIP       | 0,05 | 4   | 0,5  | 19   | restul |     | 2   | 3 Fe   | 550   | 30  | 77 K | 6 la   |    |    |    |
|             |       | MICRO 82TT |      |     |      |      |        |     |     |        |       |     |      |        |    |    |    |
| 16. "       | "     | TRIP       | 0,05 | 7   | 0,5  | 15   | restul |     | 2   | 7,5 Fe | 650   | 30  | 77 K | 5 la   |    |    |    |
|             |       | MICRO 182  |      |     |      |      |        |     |     |        |       |     |      |        |    |    |    |

Reziliența pe sruvete DVM.

### 3.2.3. Elaborarea unor noi tipuri de sârme și electrozi pentru sudarea oțelurilor criogenice cu 9%Ni.

Desecori a apărut ideea de a folosi un electrod similar cu 9...12% Ni pentru sudarea oțelurilor criogenice cu 9%Ni, dar literatura consultată nu prezintă nici construcții sudate și nici încercări de laborator cu acest tip de electrod.

Pornind de la aceste considerente am căutat elaborarea unei mărci de electrozi cu compoziție chimică similară cu a metalului de bază.

#### 3.2.3.1. Material folosit - compoziție chimică - pregătire.

Oțelul cu 9%Ni a fost elaborat în cuptor electric de 500 kg și turnat în lingouri de 170 kg. Lingourile au fost laminate la țagăle cu latura 75 mm. Încălzirea țagălelor s-a făcut într-un cuptor electric, viteza de încălzire fiind de 1,5 min. pentru fiecare mm din latura sem fabricatului. Temperatura de încălzire a fost de 1423 K.

Țagălele au fost supuse în continuare laminării până la  $\varnothing 6$ mm.

Schema de laminare este prezentată în figura 3.5.

Compoziția chimică a oțelului criogenic cu 9% Ni folosit la elaborarea sîrmelor este prezentată în Tabelul 3.9.

Tabelul 3.9.

| Marca  | Compoziția chimică % |      |      |       |       |      |      |       |
|--------|----------------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
|        | C                    | Mn   | Si   | P     | S     | Ni   | Cr   | Al    |
| 12Ni90 | 0,11                 | 0,39 | 0,20 | 0,010 | 0,004 | 8,95 | 0,04 | 0,006 |
|        | 0,14                 | 0,43 | 0,36 | 0,012 | 0,006 | 9,28 |      | 0,012 |

#### 3.2.3.2 Încercări și rezultate privind elaborarea sîrmelor de sudare

Datorită ecruisării interne a materialului în timpul laminării, la toate categoriile de oțeluri după laminare în vederea trefilării se necesită un tratament termic de recoacere care să ducă la creșterea însușirilor de plasticitate.

La oțelurile obișnuite recoacerea se face la temperaturi de 1073... 1173 K.

La oțelul cu 9 Ni recoacerea la 1123...1173 K nu a dat rezultate scontate motiv pentru care s-au făcut încercări experimentale



folosind diferite regimuri de tratament termic ( Tabelul 3.10) în vederea obținerii caracteristicilor de rezistență și elasticitate dorite ( $R_m = 80 \text{ daN/mm}^2$  și  $Z$  peste 65%)

| Caja         | Tipul | Forma colibrului | Dimensiuni Colibrul | Secțiunea | Dul. (mm) |     |
|--------------|-------|------------------|---------------------|-----------|-----------|-----|
| Pregătitor I | 1     | -                | 75 x 75             | 5850      | -         |     |
|              |       | 3                |                     | 90 x 42   | 3065      | 580 |
|              |       | 4                |                     | 49        | 2336      | 580 |
|              |       | 5                |                     | 70 x 28   | 1680      | 580 |
|              |       | 6                |                     | 36,5      | 1300      | 580 |
|              |       | 7                |                     | 52 x 20   | 920       | 580 |
| Preg. I.     | 2     | 8                |                     | 26        | 667       | 340 |
|              |       | 9                |                     | 42 x 14   | 460       | 340 |
| Preg. II.    | 3     | 10               |                     | 18,5      | 336       | 350 |
| Preg. III.   | 4     | 11               |                     | 30 x 10   | 230       | 355 |
| Tras final   | 1     | 12               |                     | 13 x 13   | 165       | 200 |
|              | 2     | 13               |                     | 21 x 7,4  | 116       | 305 |
|              | 3     | 14               |                     | 9,5 x 9,5 | 85,2      | 340 |
|              | 1     | 15               |                     | 18 x 5,4  | 64        | 310 |
|              | 2     | 16               |                     | 7,4 x 7,4 | 52,5      | 280 |
|              | 3     | 17               |                     | 11 x 5,6  | 44        | 310 |
|              | 1     | 18               | $\phi$              | 7         | 39,5      | 40  |
|              | 2     | 19               |                     | 10 x 4,35 | 32,3      | 310 |
|              | 3     | 20               | $\phi$              | 6         | 28,8      | 310 |

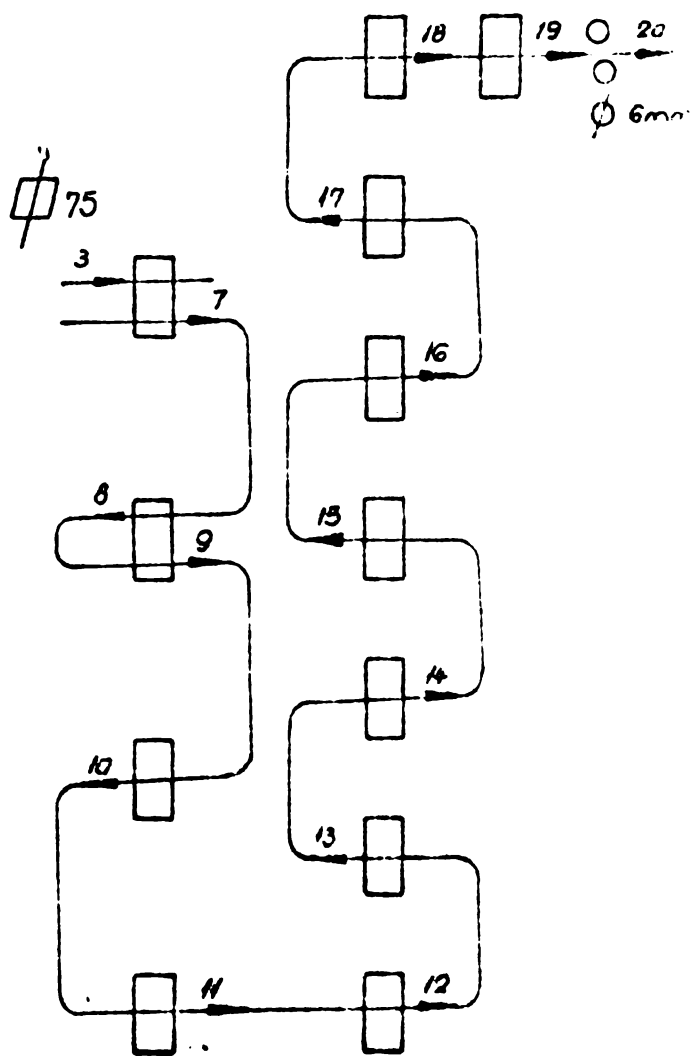


Fig.3.5. Schema de laminare a țazlelor din oțel cu 95Ni

Caracteristici mecanice ale oțelului cu 9%Ni  
funcție de tratamentul termic aplicat.

Tabelul 3.10

| Tipul probei   | $R_m$ [daN/mm <sup>2</sup> ] |       | $A_5$ [%]            |       | $Z$ [%]            |       |
|--|------------------------------|-------|----------------------|-------|--------------------|-------|
|  | Valori individuale           | Media | Valori individuale   | Media | Valori individuale | Media |
| După laminare la Ø6mm                                    | 138,3<br>140,1<br>136,2      | 138,2 | 13,3<br>14,8<br>14,5 | 14    | 62<br>60<br>62     | 61,3  |
| Recoacere la 1173 K/2h/cuptor                            | 96,6<br>98,3<br>98,7         | 97,8  | 14,8<br>15<br>14,6   | 14,8  | 60<br>60<br>60     | 60    |
| Recoacere la 1123 K/2h/cuptor                            | 108,3<br>105,4<br>106,2      | 106,6 | 14,6<br>14<br>14,3   | 14,3  | 59<br>60<br>60     | 59,6  |
| Recoacere la 1123 K/2h/cuptor + revenire la 848 K/2h/aer | 80,6<br>78,1<br>80,2         | 79,6  | 21,1<br>22,1<br>22,3 | 22    | 68<br>68<br>68     | 68    |
| Încălzire la 848 K/2h/aer                                | 82,6<br>81,9<br>81,3         | 81,9  | 14,6<br>16,1<br>17,3 | 16    | 70<br>69<br>67     | 68,6  |

3.2.3.2.1. Încercări de tracțiune

Toate încercările de tracțiune s-au făcut conform STAS 200-79 și rezultatele obținute sînt prezentate în tabelul 3.10.

Analiza acestor rezultate sugerează următoarele observații:

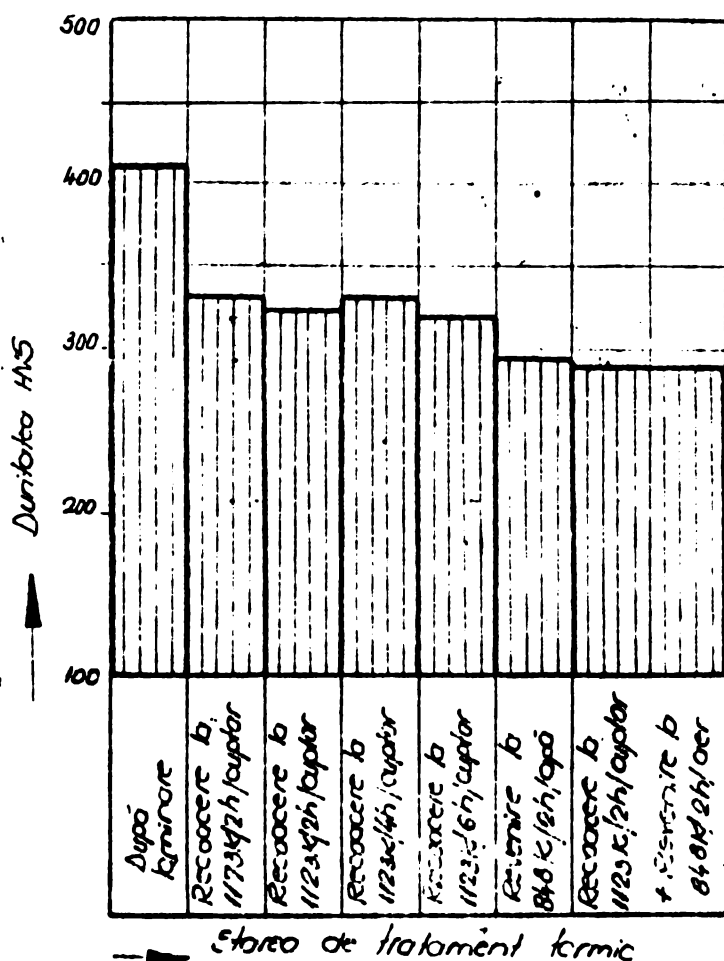
- Recoacerea la 1173 K/2h/cuptor duce la obținerea unor caracteristici de rezistență de valori ridicate ( $R_m = 98...107$  daN/mm<sup>2</sup>) și a unor caracteristici de plasticitate necorespunzătoare ( $A_5 = 14,3...14,8$  și  $Z = 59,6...60\%$ ).
- Recoacerea la 1123 K/2h/cuptor urmată de revenire la 848 K/2h/aer a condus la obținerea următoarelor caracteristici,  $R_m = 79,6$  daN/mm<sup>2</sup>;  $A_5 = 22\%$ ;  $Z = 68\%$ .
- Încălzirea la 848 K/2h/aer a condus la obținerea următoarelor caracteristici:  $R_m = 81,9$  daN/mm<sup>2</sup>;  $A_5 = 16\%$ ;  $Z = 68,6\%$ .

Conform acestor încercări tratamentul termic optim aplicat după laminarea la Ø 6 mm ar fi încălzirea la 848 K/2h/aer care asigură însușiri de plasticitate corespunzătoare deformării în bune condiții a materialului.

### 3.2.3.2.2. Incercări de duritate.

Incercările de duritate s-au făcut prin metoda Vickers ( $HV_5$ ) respectându-se condițiile STAS 492-73.

Valorile măsurătorilor de duritate în funcție de starea de tratament termic aplicată sînt prezentate în figura 3.6.



De menționat că valorile prezentate sînt media a 5 măsurători individuale. Din analiza rezultatelor prezentate în graficul din figura 3.6. rezultă că în urma tratamentelor termice de recoacere la 1123 K/2h/cuotor+revenire la 848 K/2h/aer sau încălzire la 848 K/2h/aer duritatea scade cu ca. 120 unități  $HV_5$  față de starea inițială ceea ce duce la îmbunătățirea deformabilității materialului.

Fig.3.6. Variația durității  $HV_5$  funcție de tratamentul termic aplicat

### 3.2.3.2.3. Structura probelor.

Examinarea structurii s-a făcut cu ajutorul microscopului electronic folosind o replică dublă de celuloză și carbon umbrită cu crom.

Cercetările metalografice electronice scot în evidență următoarele:

- structura probelor după laminare este alcătuită din bainită aciculară, constituent care asigură caracteristici de rezistență de valori ridicate (Planșa IV fig.1);

- în urma recoacerii la 1123 K respectiv 1173 K/2h/cuotor structura obținută este alcătuită din bainită granulară. La 1123 K/2h/cuotor structura obținută este mai fină decât la 1173 K/2h/cuotor (Planșa IV fig.2 și 3).

Pe măsură ce crește durata de menținere la aceeași temperatură de recoacere structura devine mai grosolană datorită efectului timpului asupra fenomenelor de difuziune (Planșa IV fig.4 și 5)

- în urma recoacerii la 1123 K/2h/cuptor urmată de revenire la 848 K/2h/aer structura este formată din ferită și o mică cantitate de bainită constituenți ce asigură caracteristici de rezistență și plasticitate de valori ridicate (Planșa IV fig.6);

- în urma încălzirii la 848 K/2h/apă structura este formată din ferită și cementită globulară (Planșa IV fig.7) constituenți care asigură însușiri de plasticitate corespunzătoare deformării în bune condițiuni a materialului.

Pe baza încercărilor efectuate se poate concluziona că oțelul aliat cu 9%Ni poate fi utilizat la fabricarea sîrmelor de sudare în următoarele condiții:

- temperatura de laminare este de 1423...1123 K; viteza de încălzire este de 1,5 min/mm din latura semifabricatului;

- răcirca se efectuează pe natul de laminare cu viteza de răcire sub 473 K/min;

- după laminarea la  $\phi 6$  mm în vederea trefilării la  $\phi 4$ ; 3,25; 1,2 și 0,8 mm se necesită fie o recoacere la 1123 K/2h/cuptor urmată de revenire la 848 K/2h/aer fie o încălzire la 848 K/2h/apă.

Din motive economice se recomandă încălzirea la 848 K/2h/apă.

Sîrmele cu 9%Ni obținute după tehnologia prezentată au fost folosite la elaborarea electrozilor cu 9%Ni respectiv 12%Ni, 16%Cr, 8%Mn, 3,5%W utilizați în încercările experimentale prezentate în cele ce urmează.

### 3.3. PREZENTAREA MATERIALELOR ÎN VEDEREA SUDĂRII

Cercetarea experimentală a cuprins două mari grupe de ecuaționale avînd ca material de bază oțelul criogenic cu 9%Ni de grosime 12 și 30 mm.

Compoziția chimică a tablelor din oțel criogenic cu 9%Ni de grosime 12 și 30 mm este prezentată în tabelul 2.1.

Deoarece aceste oțeluri se utilizează pentru fabricarea inelurilor în stare tratată termic s-a efectuat după laminarea semifabricatelor o recoacere completă urmată de călire și revenire.

Regimul de tratament termic a fost: recoacere la 1173 K/2h/cuptor + călire la 1083 K/2 min/mm/apă + revenire la 848 K/2h/aer.

PLANSA IV



MEx6300

Fig.1. Starea inițială



a. MEx6300



b. MEx2500

Fig.2. Recrăscere la 1173°K/2h/cuntor

PLANSA IV (continuare)



a.MEx6300



b.MEx2500

Fig.3. Recoacere la 1123°K/2h/cuptor



a.MEx6300



b.MEx2500

Fig.4. Recoacere la 1123°K/4h/cuptor

PLANSĂ IV (continuare)



a. MEx6300



b. MEx2500

Fig.5. Reconacere la 1123°K/6h/cuntor

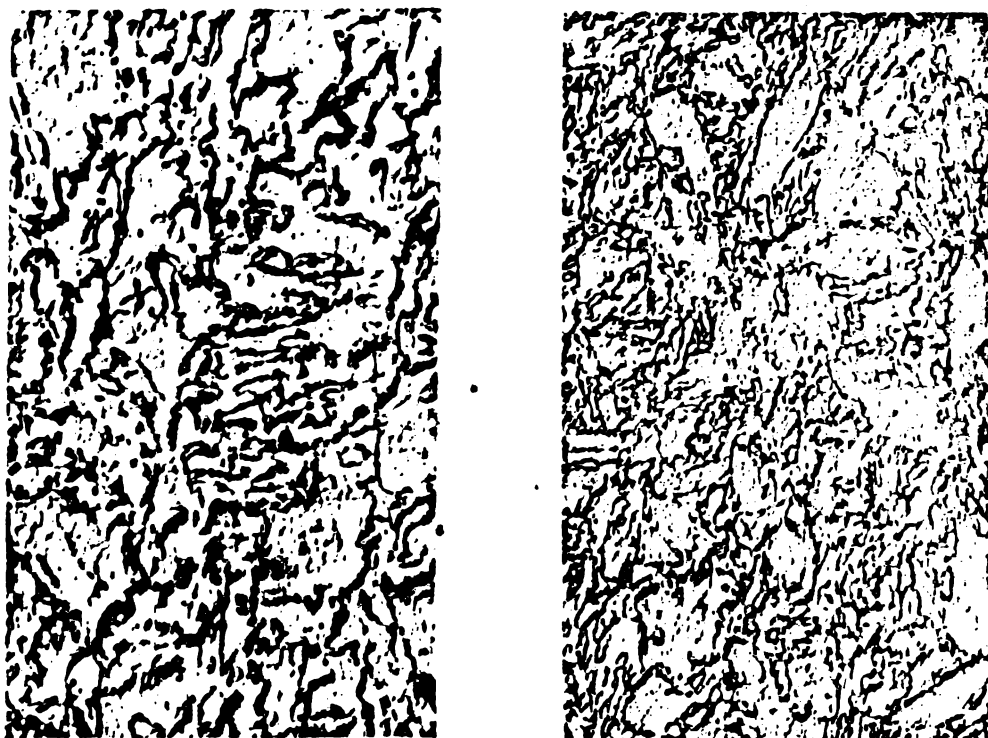


a. MEx6300



b. MEx2500

Fig.6. Reconacere la 1123°K/2h/cuntor +  
Revenire la 848°K/2h/aer



a. MEx6300

b. MEx2500

Fig.7. Incalzire la 848°K/2h/apă

Marginile tablelor au fost prelucrate în V cu unghiul deschiderii rostului de  $60^\circ$  și umărul rostului 2...2,5 mm la tabla de 12 mm și în X cu unghiul rostului de  $60^\circ$ , respectiv în X cu unghiul deschiderii rostului de  $45^\circ$  și umărul rostului de 2...3 mm la tabla de 30 mm.

Prelucrarea rostului a fost efectuată numai prin rabotare.

În vederea sudării s-a făcut curățirea tablelor până la luciu metalic cu o perie de sîrmă pe o distanță de cel puțin 30 mm de o parte și alta a rostului, iar în cazurile în care stratul de oxizi a avut o adîncime mai mare de 0,5 mm, curățirea s-a făcut prin polizare pe aceeași distanță.

#### 3.4. PROCEDEE DE SUDARE APLICATE

Executarea probelor sudate a constatat în sudarea cap la cap a cîte două table avînd dimensiunile 12 x 90 x 300 mm și 30x130x300mm în variantele de rost și procedee de sudare prezentate în figura 3.

Sudarea manuală s-a făcut, în curent continuu cu polaritate inversă folosind ca materiale de adaos electrozii ELCr25V12oB din



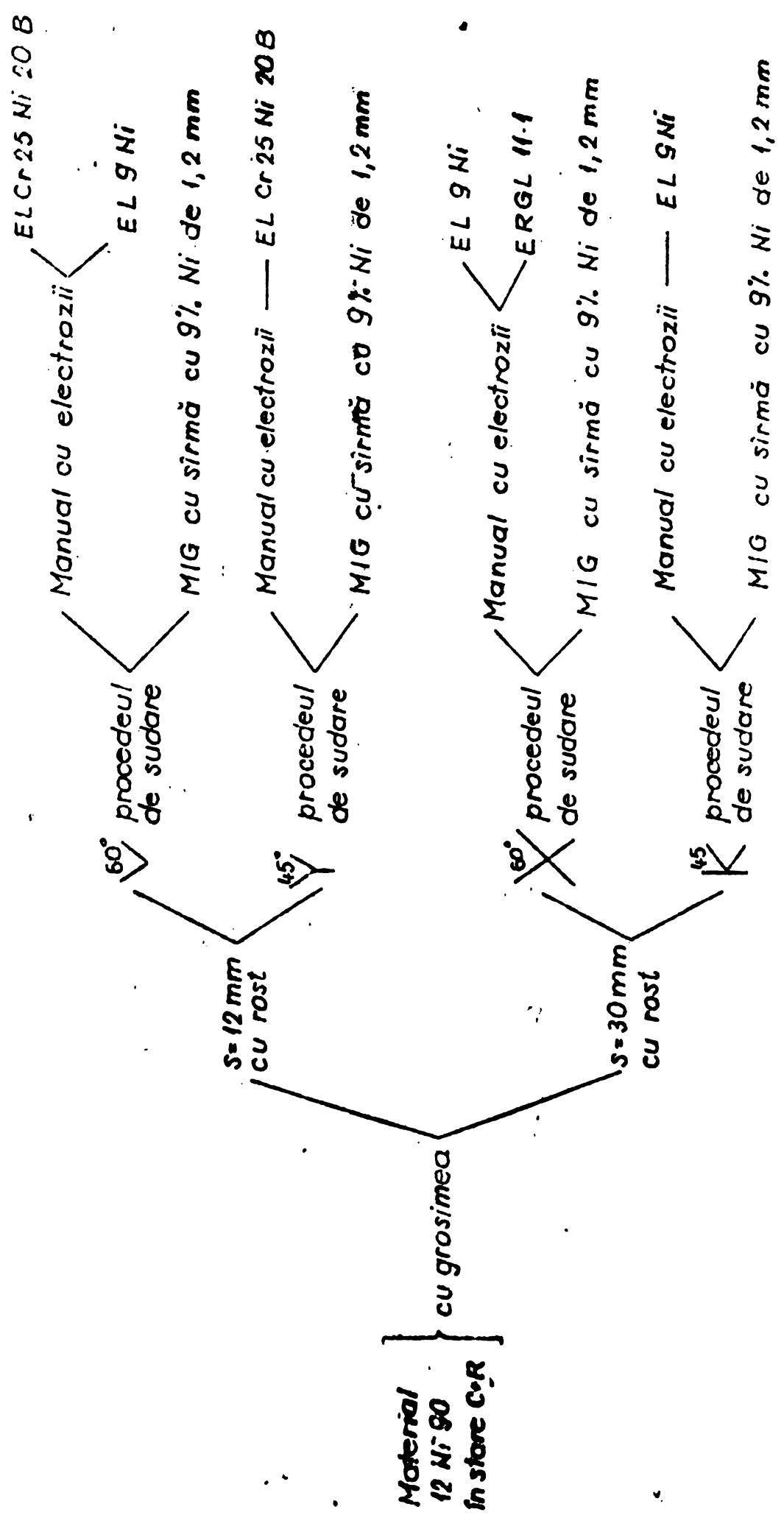


Fig. 3.7 Modul de realizare a îmbinărilor sudate

producția curentă, electrozi EL9Ni și ERGL11.1 realizați experimental iar ca sursă, generatorul monobloc tip GBS-350. Electrozii au fost uscați timp de 120 minute la 473-573K înainte de utilizare.

Sudarea în mediu protector de argon (sudarea MIG) s-a făcut folosind sîrmă cu 9%Ni avînd compoziția chimică apropiată de a metalului de bază iar ca și sursă de sudare instalația Tip ARCOS - Micromatic TC.300.

Compoziția chimică a metalului depus cu electrozii menționați respectiv cu sîrma cu 9%Ni este prezentată în tabelul 3.11.

Tabelul 3.11

| Tipul<br>electrodului | Compoziția chimică % |      |      |       |       |       |      |       |       |      |
|-----------------------|----------------------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
|                       | C                    | Mn   | Si   | S     | P     | Ni    | Cu   | Cr    | Al    | W    |
| ELCr25Ni20B           | 0,10                 | 0,60 | 0,15 | 0,010 | 0,01  | 21,1  |      | 24,8  | -     | -    |
| EL9 Ni                | 0,08                 | 0,55 | 0,17 | 0,009 | 0,02  | 9,02  | -    | 0,08  | 0,010 | -    |
| ERGL11.1              | 0,15                 | 7,63 | 0,62 | 0,005 | 0,015 | 11,98 | 0,11 |       |       | 3,31 |
|                       |                      |      |      |       |       |       |      | 16,77 |       |      |
| Sîrmă cu<br>9%Ni      | 0,08                 | 0,60 | 0,18 | 0,010 | 0,018 | 9,05  | -    | 0,05  | 0,012 | -    |

În cadrul încercărilor s-a urmărit influența numărului de treceri și a ordinii de depunere a straturilor asupra calității îmbinărilor și asupra tensiunilor și deformațiilor care apar în urma sudării.

Pe baza rezultatelor experimentale și a datelor existente în literatura de specialitate [3,5,28,50,71,95] s-au stabilit parametrii regimului de sudare, în table cu grosimea de 12 și 30 mm.

Modul de realizare a îmbinărilor sudate (forma rostului, numărul și ordinea straturilor și parametrii regimului de sudare) sînt prezentate în tabelul 3.12

### 3.5. TRATAMENTE TERMICE. ANTE ȘI-POST SUDARE

Problema de bază a tratamentelor termice în legătură cu sudarea este de a găsi acel ciclu termic care suprapus peste ciclul parcurs la sudare să dea un ciclu rezultat în urma căreia îmbinarea să obțină însușirile dorite.

Tabelul 3.12






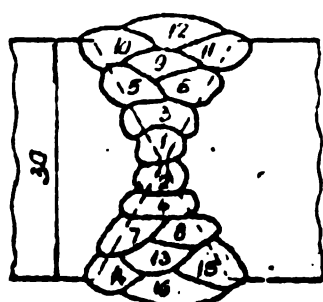
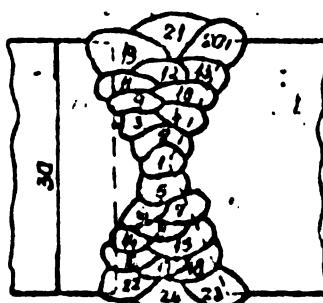
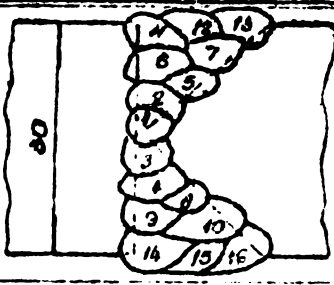
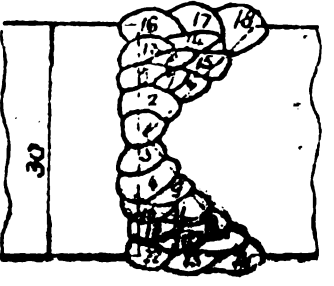
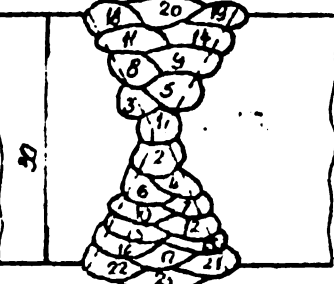
| Nr. ord. | Forma îmbinării   | Procedeu de sudare | Material de ocobos            | Nr. de treceri | de [mm]   | $J_s$ [A]       | $U_b$ [V] | $E_L$ [kJ/cm <sup>2</sup> ] | $Q_{dr}$ [l/min] | $V_{de}$ [m <sup>2</sup> /h] |
|----------|---|--------------------|-------------------------------|----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------------|------------------|------------------------------|
| 1        |    | Manual             | ELCr 25Ni 20                  | 1x2<br>3...5   | 3,25<br>4 | 90±5<br>120±5   | 22±2      | 8... 14                     | —                | —                            |
| 2        |    | Manual             | EL 9 Ni                       | 1x2<br>2-4     | 3,25<br>4 | 90±5<br>125±5   | 22±2      | 8... 14                     | —                | —                            |
| 3        |  | MIG                | Sîrmă cu<br>9% Ni<br>φ 1,2 mm | 1...5          | 1,2       | 235±10          | 26±2      | 7... 14                     | 22<br>~<br>25    | 7,5                          |
| 4        |  | Manual             | ELCr 25Ni208                  | 1x2<br>3...5   | 3,25<br>4 | 90±5<br>120±5   | 22±2      | 8... 14                     | —                | —                            |
| 5        |  | MIG                | Sîrmă cu<br>9% Ni             | 1...5          | 1,2       | 235±10          | 28        | 7... 14                     | 22<br>~<br>25    | 7,5                          |
| 6        |  | MIG                | Sîrmă cu<br>9% Ni             | 1x2<br>3...16  | 1,2       | 225±5<br>235±10 | 28        | 7... 14                     | 22<br>~<br>25    | 7,5                          |
| 7        |  | Manual             | EL 9 Ni                       | 1x5<br>2-24    | 3,25<br>4 | 90±5<br>125±5   | 22±2      | 8... 14                     | —                | —                            |

Tabela 3.12 (continuare)

| 1  | 2   | 3      | 4                    | 5              | 6         | 7               | 8    | 9      | 10            | 11 |
|----|---|--------|----------------------|----------------|-----------|-----------------|------|--------|---------------|----|
| 8  |    | MIG    | Sirmo<br>cu<br>9% Ni | 2...16         | 42        | 235±5           | 28   | 7...14 | 22<br>~<br>25 | 75 |
| 9  |   | Manual | EL 9Ni               | 10/3<br>2...24 | 3,25<br>4 | 90±5<br>125±5   | 22±2 | 8...14 | -             | -  |
| 10 |  | Manual | ERGL 11.1            | 10/2<br>3      | 3,25<br>4 | 110±10<br>60±10 | 22±2 | 8-14   | -             | -  |

Luând în considerare modul de suprapunere în timp a ciclurilor termice corespunzătoare sudării și tratamentului termic în cazul sudării oțelurilor criogenice cu 9%Ni se întâlnesc ca și tratamente termice în legătură cu sudarea preîncălzirea și detensiionarea...

### 3.5.1. Preîncălzirea

Preîncălzirea piocelor în vederea sudării este utilă pentru reducerea tendinței spre fisurare, prevenirea porilor și a fragilizării în ZIT, pentru micșorarea tensiunilor interne. În același timp însă preîncălzirea mărește cheltuielile de producție îngreunază munca sudorului și poate duce la efecte negative cum sînt: creșterea grăunților cristalini în ZIT, deformații în structură.

Oportunitatea preîncălzirii și temperatura de preîncălzire necesară se determină luând în considerare atât compoziția chimică a metalului de bază cât și concepția constructivă a produsului sudat împreună cu parametrii procesului de sudare și caracteristicile materialului de adăos 57,80 .

În cazul oțelurilor criogenice aliate cu 9%Ni s-au făcut determinări teoretice ale temperaturii de preîncălzire prin mai multe metode [77,80,84,103] rezultatele fiind prezentate în tabelul 3.13

Tabelul 3.13

| Tipul oțelului | Grosimea tablei<br>mm | Normele japoneze |          | Metoda Prosko |          | Metoda IIS |          | Norma M-27-50 |          |
|----------------|-----------------------|------------------|----------|---------------|----------|------------|----------|---------------|----------|
|                |                       | Ce<br>%          | Tpr<br>K | Ce<br>%       | Tpr<br>K | Ce<br>%    | Tpr<br>K | Ce<br>%       | Tpr<br>K |
| 12Ni90         | 12                    | 0,42             | -        | 0,80          | x        | 0,82       | x        | 0,81          | x        |
|                | 30                    | 0,45             | -        | 0,83          | x        | 0,85       | x        | 0,84          | x        |

Obs. x în tabel arată că preîncălzirea nu este eficientă  
 - în tabel arată că preîncălzirea nu este necesară

S-a verificat și experimentat problema preîncălzirii, folosind metoda C.T.S. [103,105] și se confirmă cele stabilite prin calcul (Tabelul 3.13).

Se confirmă astfel cele prezentate în literatura de specialitate că table din oțelul criogenic aliate cu 9%Ni pot fi sudate fără preîncălzire până la grosimi de 50 mm [30,47] .

### 3.5.2. Detensionarea

Detensionarea este tratamentul termic aplicat structurilor sudate pentru a reduce tensiunile interne produse de fabricația structurii.

Normele franceze nu prevăd tratament termic de detensionare după sudare pentru rezervoarele realizate din oțel cu 9%Ni. Rezervoarele construite în Franța au fost sudate în șantier și nu au fost supuse la nici-un tratament termic după sudarea elementelor constructive. În U.S.A. situația este diferită ASME Boiler and Pressure Vessel Code prevede ca rezervoarele fabricate din oțel cu 9%Ni trebuie să fie supuse la tratamentul termic de detensionare după sudare la 838 K durata acestuia fiind funcție de grosimea tablelor utilizate. Această prevedere este realizată dacă rezervoarele au

un gabarit care permite tratamentul termic în cuptoare de tratament clasice. Până în 1960 în U.S.A. peste 200 de rezervoare construite din oțel cu 9%Ni au fost supuse după sudare la un astfel de tratament termic. Dacă rezervoarele au dimensiuni mari tratamentul termic de detensionare după sudare este foarte dificil de realizat.

Deoarece aceste rezervoare au diametru și înălțime de ordinul zecilor de metri uneori sudarea trebuie făcută pe șantier și nu este avantajos tratamentul termic de detensionare după sudare. Chiar admitând transportul lor posibil, tratamentul termic în uzină presupune existența de cuptoare gigantice.

Din punct de vedere metalurgic nu este evident că tratamentul termic de detensionare al rezervorului cu 9%Ni este absolut necesar: unele cercetări efectuate în U.S.A. pe rezervoare din oțel cu 9%Ni au demonstrat că tratamentul termic de detensionare prescris în norme nu este totdeauna favorabil pentru tenacitatea ansamblului. Aceste considerații au condus în U.S.A. la realizarea unui program important de încercări pentru a stabili:

- dacă oțelul cu 9%Ni este un material tenace și rezistent la temperatura azotului lichid sau temperaturi mai joase;

- dacă metalul călit și revenit prezintă caracteristicile mecanice apropiate de cele ale metalului supus la tratamentul termic de dublu normalizare și revenire prevăzut de ASTM;

- dacă este necesară efectuarea după sudare a unui tratament termic de detensionare.

Pe scurt acest program de încercări denumit operațiunea Criogenic [70] a constat în a încerca la șoc sau la presiune un număr de rezervoare rectangulare și cilindrice din oțel cu 9%Ni umplute cu azot lichid. Aceste rezervoare au fost analoge cu cele utilizate în practică, rezervoare rectangulare similind pe cele montate pe metaniere, iar rezervoare cilindrice ca și cele utilizate pentru stocarea gazelor lichefiate. Unele rezervoare au fost fabricate din table dublu normalizate și revenite, celelalte din metal călit în apă și revenit. Din fiecare categorie unele rezervoare au suferit tratament termic de detensionare, celelalte nu.

Elementele de rezervor care au fost ecruisate puternic în cursul deformării la rece au fost supuse la tratamentul termic de detensionare.

Toate rezervoarele au fost sudate cu electrozii INCOVELD A. Rezervoarele au fost umplute succesiv cu azot lichid la  $T=77\text{ K}$  apoi

supuse la șocuri repetate de către o masă de 1970 kg care cădea de la înălțimi diferite, înălțimea maximă fiind de 5,8 m.

O primă serie de încercări s-a rezumat la efectul de șoc care doar a deformat plastic materialul în jurul punctului de impact. Apoi s-a aplicat o presiune internă. Rezervorul construit din metal călit și revenit cât și cel din metal dublu normalizat și revenit ambele nedetensionate după sudare. Ruperea a fost făcută prin efectul conjugat al șocurilor și presiunii interne.

Eforturile care au produs ruperea au fost identice în ambele cazuri ( $p_{int} = 7 \text{ daN/cm}^2$ , energia masei de șoc a fost de 11300 daJ). Rezervoarele supuse la cele două tipuri de tratament termic detensionate după sudare s-au rupt datorită presiunii interne practic de același ordin de mărime.

Concluzia acestui program de încercări a fost că felul tratamentului termic aplicat tablelor (călire și revenire sau dublă normalizare și revenire) precum și existența sau nu a tratamentului termic de detensionare după sudare nu pare să aibă o influență sensibilă asupra rezultatelor.

În consecință, după operațiunea Criogenic s-au fabricat rezervoare din oțel cu 9%Ni supuse în prealabil tratamentului termic de dublă normalizare și revenire, fie unei căliri și reveniri, iar după sudare nu s-a mai aplicat recoacerea de detensionare [70].

De menționat că la I.P.Tr.Vuia Timișoara catedra de TMT a fost inițiat și realizat un procedeu de tratament termic integral în vederea detensionării după sudare, pe șantier a unui corp cilindric agabaritic (de dimensiuni mari) prin încălzirea lui cu gaze calde provenite de la o sursă exterioară (un generator de gaze calde) și nu prin introducerea unor arzătoare în cilindru, cum procedează unele firme străine [27].

De asemenea s-a conceput și realizat în colaborare cu TCMRIC București o stație pilot pentru încercarea procedurii și verificarea prin măsurători a rezultatelor celulelor inițiate.

Procedeu de tratare termică în vederea detensionării concepută în cadrul cătezei TMT prevede:

- încălzirea recipientului de tratat cu o viteză maximă de încălzire de 473 K/oră în intervalul dintre temperatura ambiantă și temperatura de 373...973 K în funcție de material și dimensiuni,
- menținerea temperaturii de palier prescrisă pentru recipient în limitele de  $\pm 323^\circ\text{K}$  pe timp maxim de trei ore.

- răcirea controlată de la 873...973 K pînă la 573 K cu o viteză de răcire care să se încadreze între aceleași limite ca și viteza de încălzire,

- răcirea necontrolată de la 573 K pînă la temperatura ambiantă.

Încălzirea recipientului se face prin schimbul nestaționar de căldură între gaze calde și mantaua recipientului.

Gazele calde, rezultate din amestecul gazelor de ardere produse într-un generator de gaze calde cu aer secundar rece intră printr-un racord dispus în partea de jos a recipientului iar după parcurgerea lui, în direct în atmosferă.

Pornind de la aceste considerații în cadrul lucrării se prezintă rezultatele încercărilor experimentale atât pe probe sudate cît și pe probe sudate și detensionate, punîndu-se în evidență influența tratamentului termic de detensionare asupra structurii și proprietăților oțelurilor origenele aliate cu 9%Ni indigene.

### 3.6. EXAMINARI LA MICROSONDA ELECTRONICĂ A ÎMBINĂRILOR SUDATE

Îmbinările sudate realizate manual cu electrozii ELCr25Ni20B și ERGL11.1 și MIG folosind sîrmă cu 9%Ni au fost supuse examinărilor calitative și cantitative la microsonda electronică JQXA-50A.

Analizele calitative și cantitative prin spectrometrie de raze X dispersivă în lungime de undă a urmărit distribuția elementelor componente din cusătură, zona influențată termic (ZIT) și metalul de bază (MB).

Analiza cantitativă s-a efectuat la o tensiune de accelerare de 25KV, și un curent de  $2,8 \cdot 10^{-8}$  A, pentru care diametrul fascicului de electroni la suprafața probei a fost de aproximativ 6  $\mu$ m.

Microzonele analizate au fost situate pe o direcție transversală zonelor caracteristice îmbinării sudate dinspre cusătură spre metalul de bază.

În cazul întinării realizate manual cu ELCr25Ni20B distribuția intensității radiației X caracteristică Ni evidențiază o creștere în cusătură, urmată de o scădere bruscă la interfața cusătură-ZIT pînă la palierul din MB (Plușa IVa, fig.1)

În fig.2 Plușa IVa se observă foarte clar scăderea continuă prin fenomene de difuzie a concentrației în Ni dinspre cusătură către MB. Totodată se poate aprecia că fenomenele de segregare a Ni sînt practic inexistente. Acest fapt contribuie la obținerea



unor însușiri de exploatare favorabile pentru îmbinarea sudată.

În cazul îmbinărilor realizate manual cu electrozii ERG11.1 distribuția intensității radiației X indică o creștere a fierului în ZIT și o scădere bruscă a cromului (Planșa IV.a, fig.3).

În Planșa IVa, fig. 4 este redată distribuția intensității radiației X caracteristică Ni evidențind o creștere în cusătură în imediata vecinătate a interfeței, urmată de o scădere lentă pînă la palierul din MB.

Wolframul urmărit pe aceeași direcție prezintă o scădere bruscă la interfața cusătură- ZIT ( Planșa IVa, fig.5).

În cazul probelor realizate MIG cu sîrmă cu 9 % Ni de 1,2 mm distribuția radiației X caracteristică Ni indică o repartiție uniformă a acestuia, neexistînd diferențe între zonele caracteristice îmbinării sudate ( Planșa IVa, fig.6).

În ZIT-ul realizat MIG (Planșa IVa, fig.7) și MB (Planșa IVa, fig.8) se observă o repartiție uniformă a nichelului.

Pe baza examinărilor efectuate se apreciază că la realizarea legăturii dintre cusătură și MB, Fe și Ni au o mare influență. Acest lucru are la bază creșterea coeficienților de autodifuzie a Fe respectiv de difuzie a Ni în Fe cu temperatura.

PLANSA IVa.

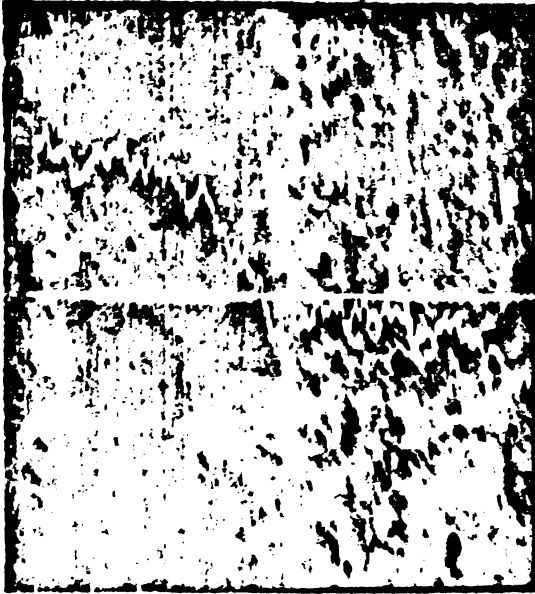


Fig.1. Variația liniară a concentrației în Ni.X1200

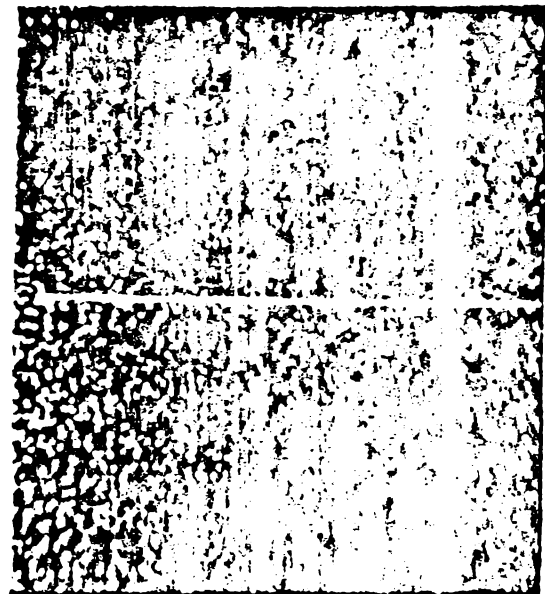


Fig.2. Repartiția Ni.X1200

Imbinare realizată manual cu electrozii ELOr25Ni20H

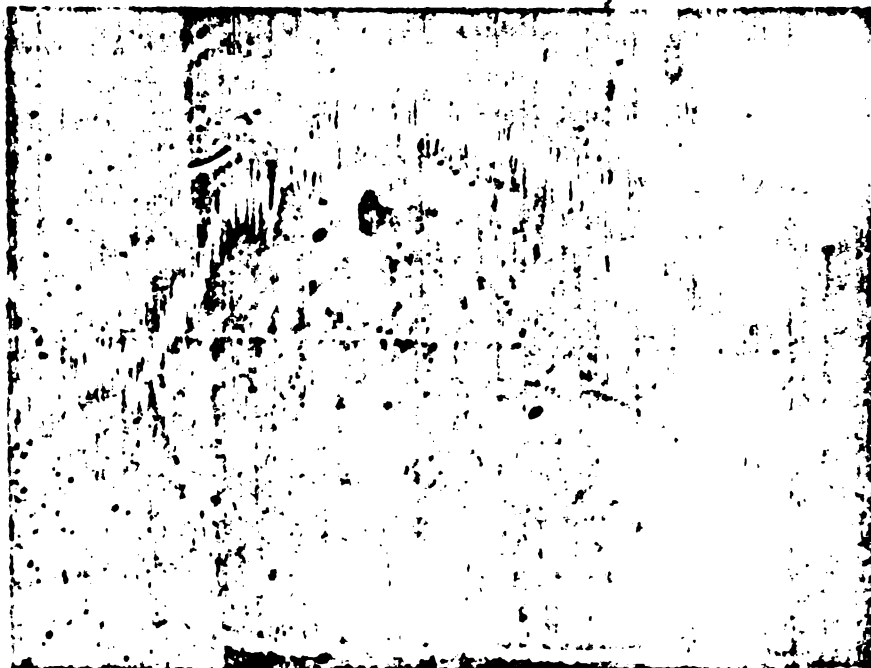


Fig.3. Variația liniară a concentrației în Fe și Cr X700.

Imbinare realizată manual cu electrozii ERGL11.

PLANSA IVa (continuare)

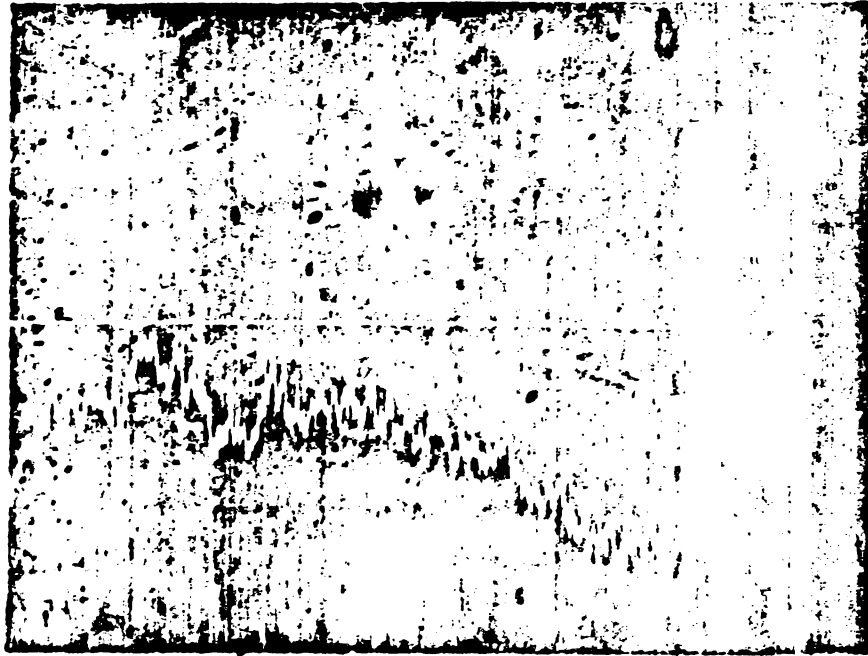


Fig.4. Variația liniară a concentrației în Ni.X700  
Imbinare realizată manual cu electrozii ERGL11.1

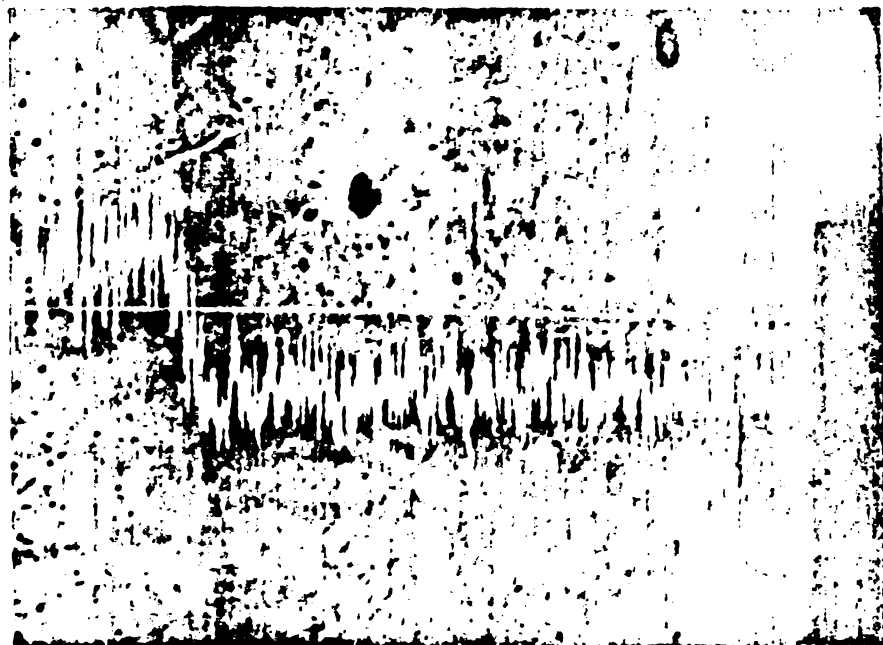


Fig.5. Variația liniară a concentrației în W.X700  
Imbinare realizată manual cu electrozii ERGL11.1

PLANSA IVa (continuare)

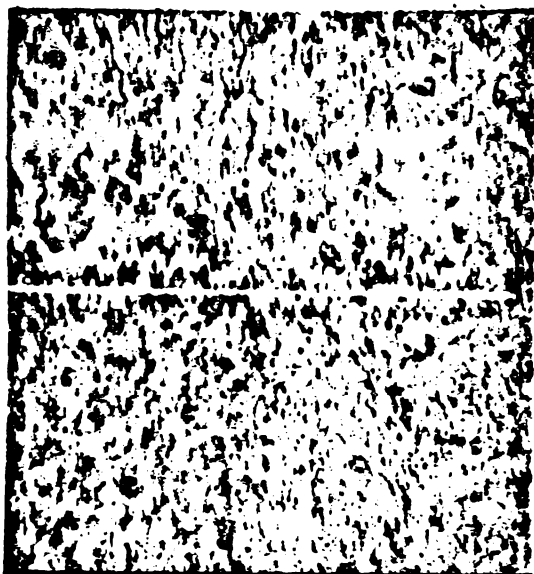


Fig.6. Variația liniară a concentrației în Ni. X1200.  
Imbinare realizată MIG cu sîrmă cu 9%Ni.

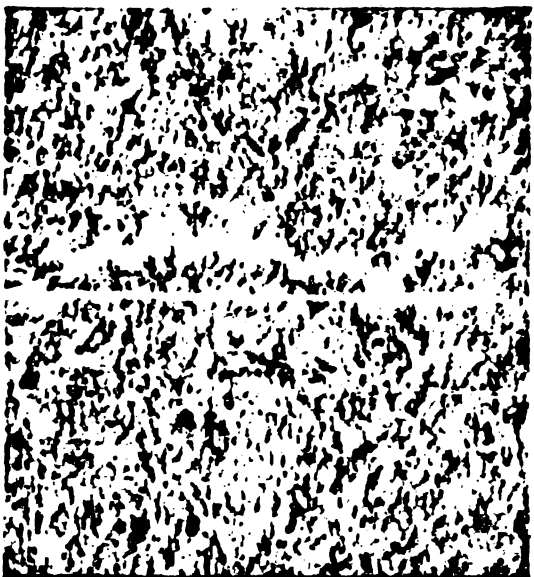


Fig.7. Variația liniară a concentrației în Ni, în ZIT-ul realizat prin procedoul MIG cu sîrmă cu 9%Ni. X1200.



Fig.8. Variația liniară a concentrației în Ni în MB în stare călită și revenită. X1200

### 3.7. PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE

Din probele supuse studiului s-au prelevat epruvete care să caracterizeze însușirile îmbinării sudate în corelație cu procesul tehnologic aplicat.

Investigațiile întreprinse pentru cele două grosimi de tablă două moduri de prelucrare a rostului și două procedee de sudare total 10 variante (Tabelul 3.12) au abordat următoarele metode de analiză și încercări:

- a. determinări de duritate HV5;
- b. încercări mecanice pentru determinarea caracteristicilor,
  - b<sub>1</sub>. energia de rupere la probe ISO-V(KV) la 293 și 77 K;
  - b<sub>2</sub>. energia de rupere la probe ISO-V(KV) după menținerea timp de o lună de zile în azot lichid (la 77 K);
  - b<sub>3</sub>. energia de rupere la probe ISO-V(KV) după 10 șocuri termice între 293 și 77 K;
  - b<sub>4</sub>. deplasarea critică la deschiderea fisurii  $CO_{Dd}-(C_{od})$ ;
- c. încercări de tracțiune.

#### 3.7.1. Determinarea variațiilor de duritate

Încercările de duritate au fost efectuate în conformitate cu STAS 492-78 și STAS 5540-77 prin metoda Vickers cu sarcina de 49,03 N (HV5). Duritățile au fost măsurate în metalul de bază (MB) în zona influențată termic (ZIT) și în metalul de adaos (MA). Imprecizia de măsurare a fost de  $\pm 5\%$ .

Evoluția durității în diferitele zone ale îmbinării este prezentată în graficele din figurile 3.8...3.13

Rezultatele obținute permit următoarele constatări mai importante.

La sudarea oțelului 12 Ni 90 (tablă cu grosimea  $s=12$  mm) cu electrozi ELCr25Ni20B duritatea maximă în ZIT nu depășește 330 daN/mm<sup>2</sup> duritatea cusăturii fiind de 190...220 daN/mm<sup>2</sup> iar a metalului de bază de 230...250 daN/mm<sup>2</sup> (fig.3.8).

La sudarea oțelului 12Ni90 cu electrozi EL9Ni respectiv cu sîrmă cu 9Ni prin procedeele MIG duritatea maximă în ZIT nu depășește 350 daN/mm<sup>2</sup> atât la table cu grosimea de 12 mm cît și 30 mm, duritatea în ultimul rînd depășind valori cuprinse între 380...430 daN/mm<sup>2</sup> avînd maximele amplasate la marginile rîndului, duritatea cusăturii în celelalte rînduri fiind sub 350 daN/mm<sup>2</sup>, iar a metalului de bază de 230...270 daN/mm<sup>2</sup> (fig.3.9,3.10,3.11,3.12)

Tăbli din oțel  
12Ni90;  
s = 12 mm  
sudată manual  
cu EL Cr 25Ni 20 B

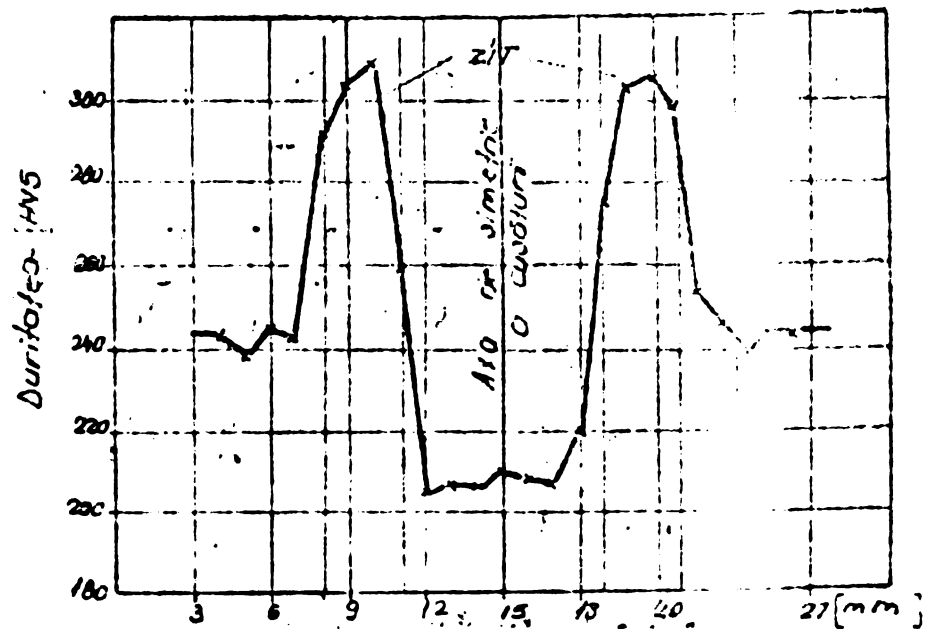
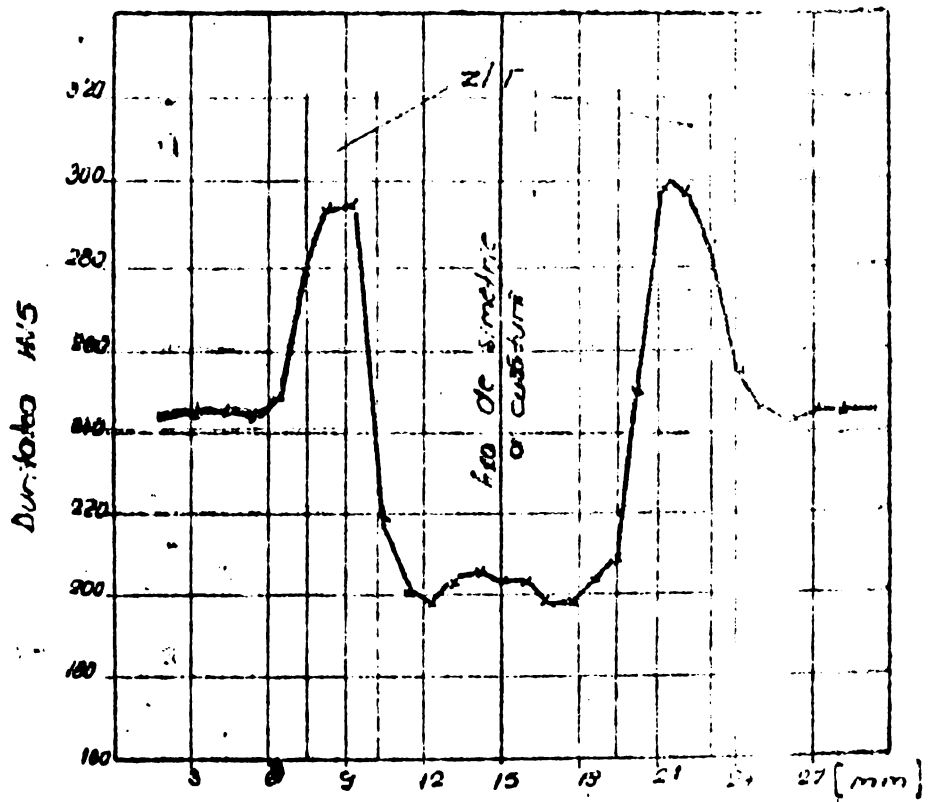
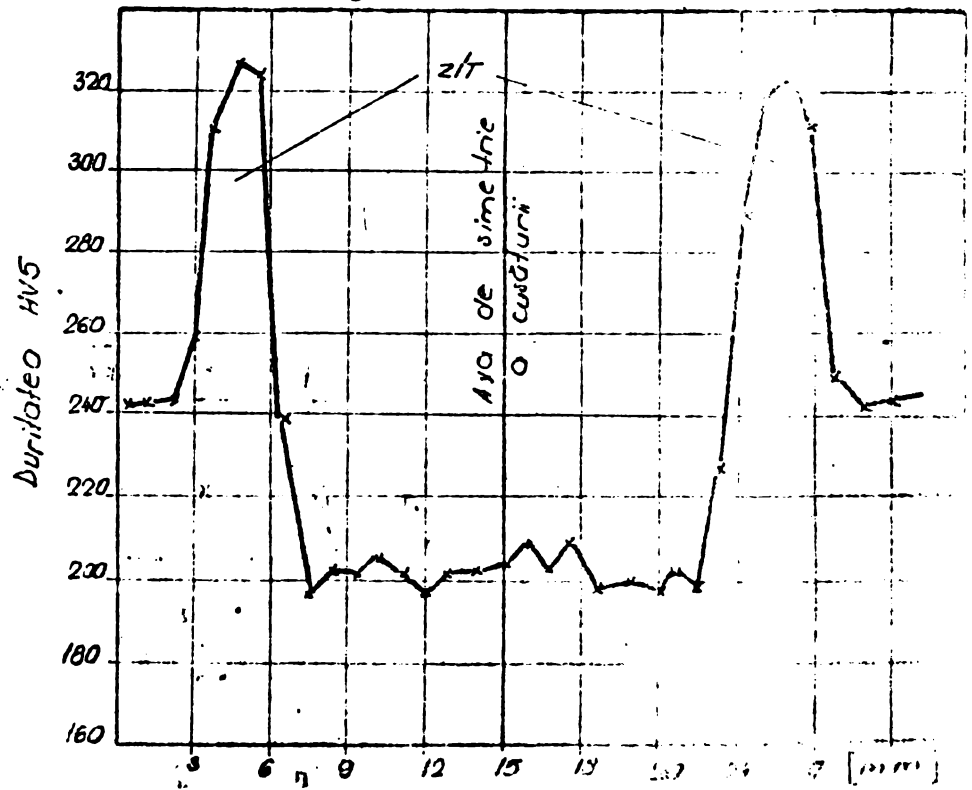
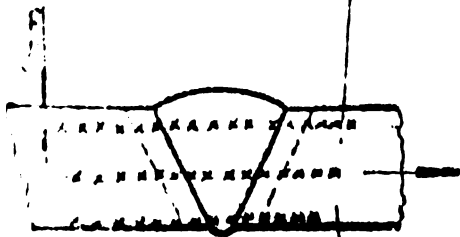
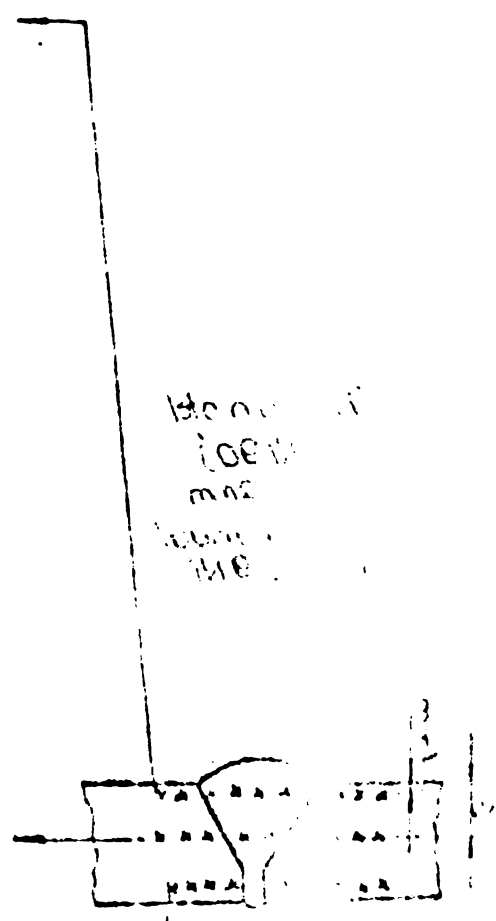
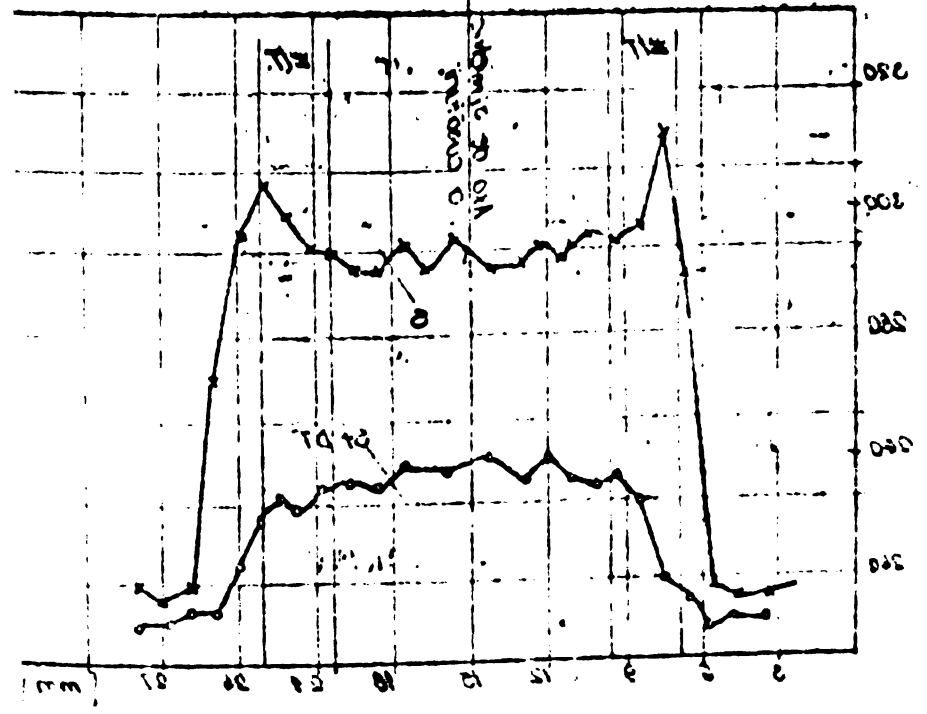
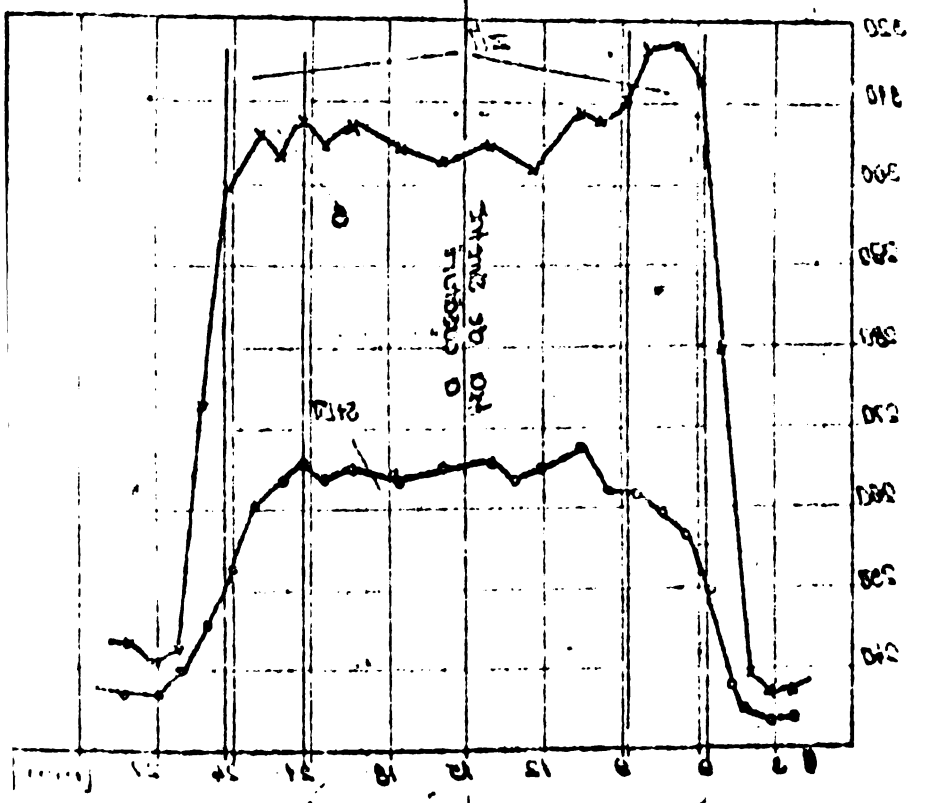
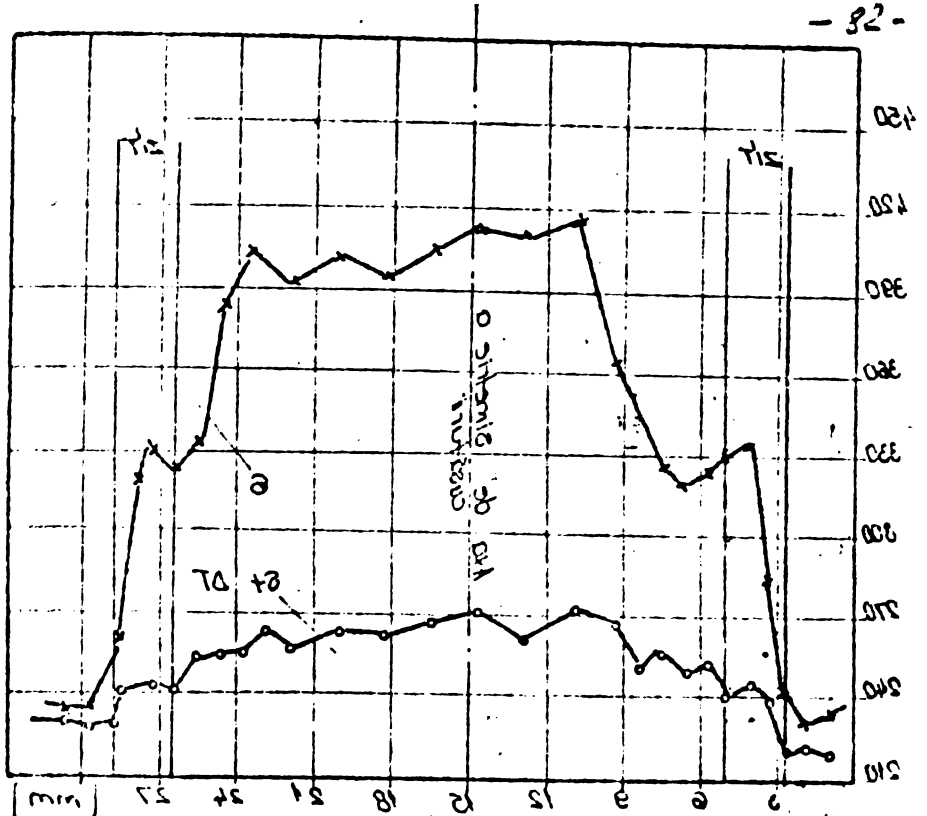


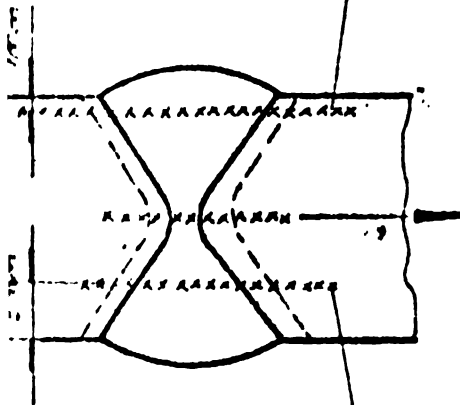
Fig. 3.18



Handwritten notes and labels next to the diagram, including '1000', '1000', '1000', '1000'.

Handwritten notes and labels below the diagram, including '1000', '1000', '1000'.

Tablă din oțel  
12Ni90;  
S = 30 mm  
Sudat manual cu  
EL 9Ni



S = probă sudată  
S+DT = probă sudată  
și detensionată

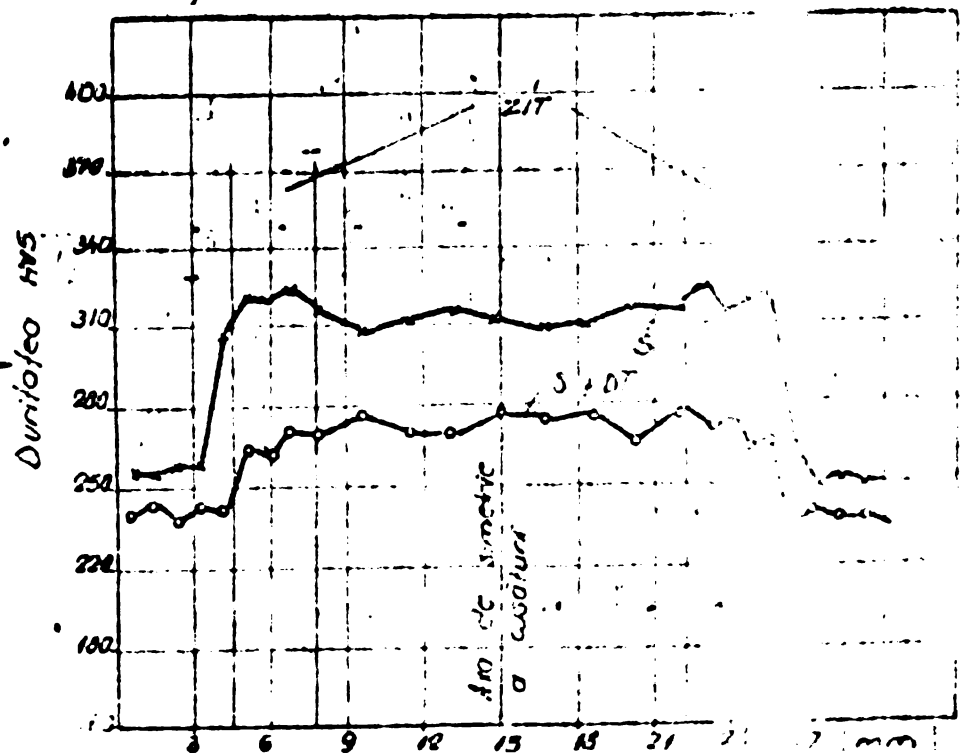
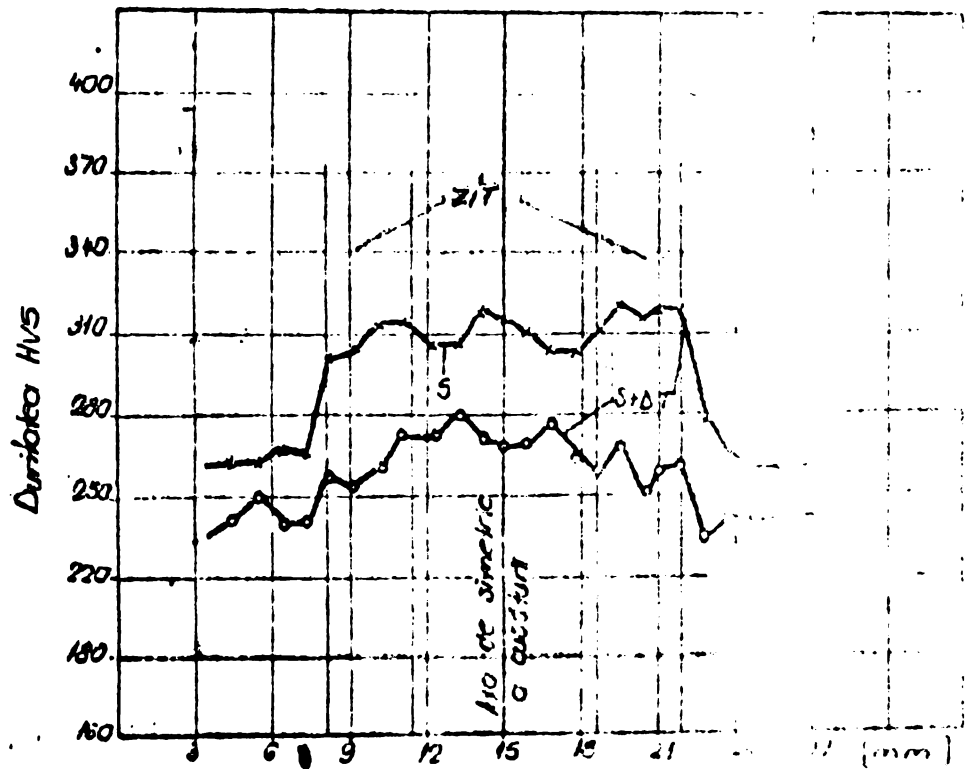
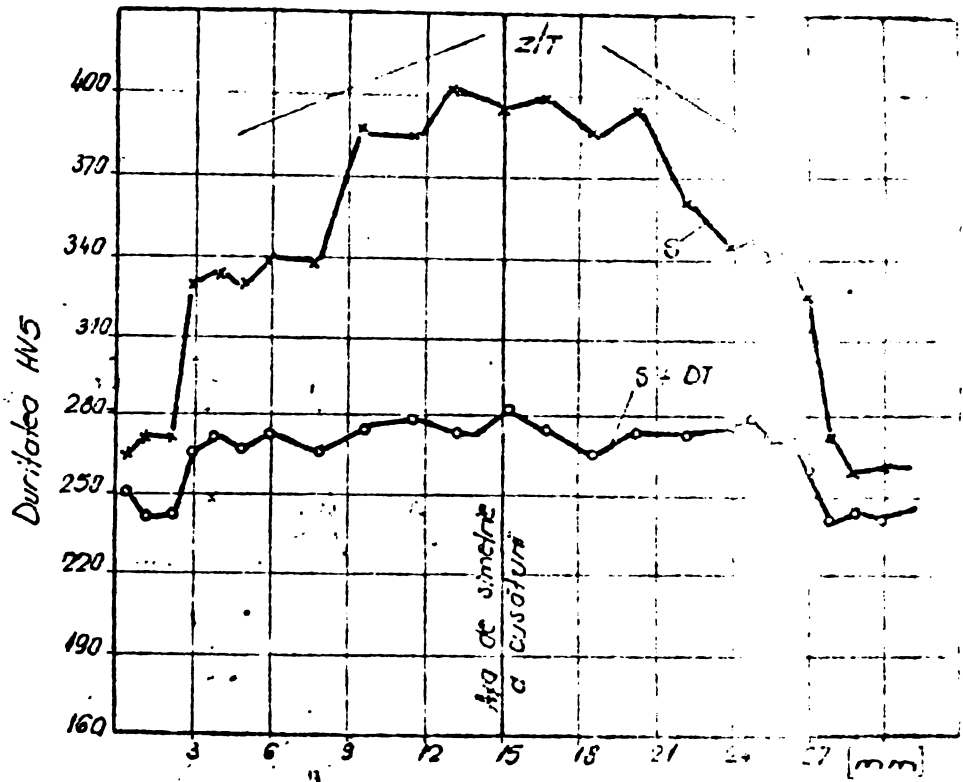


Fig. 3.10



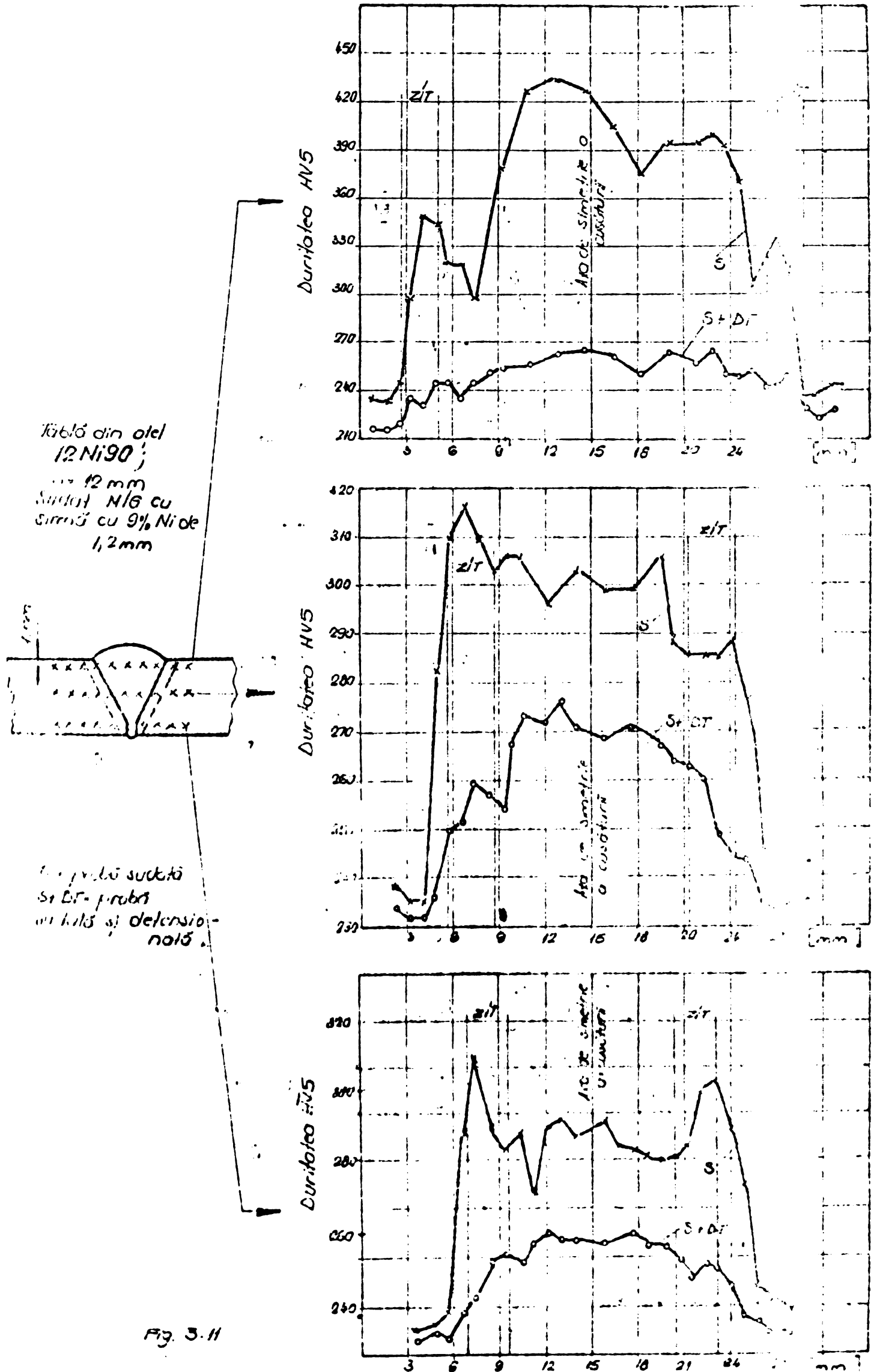


Fig. 3.11

Tablă din oțel  
12 Ni 90  
b = 31 mm  
Gurtoaj M16 cu  
șirmă 9% Ni

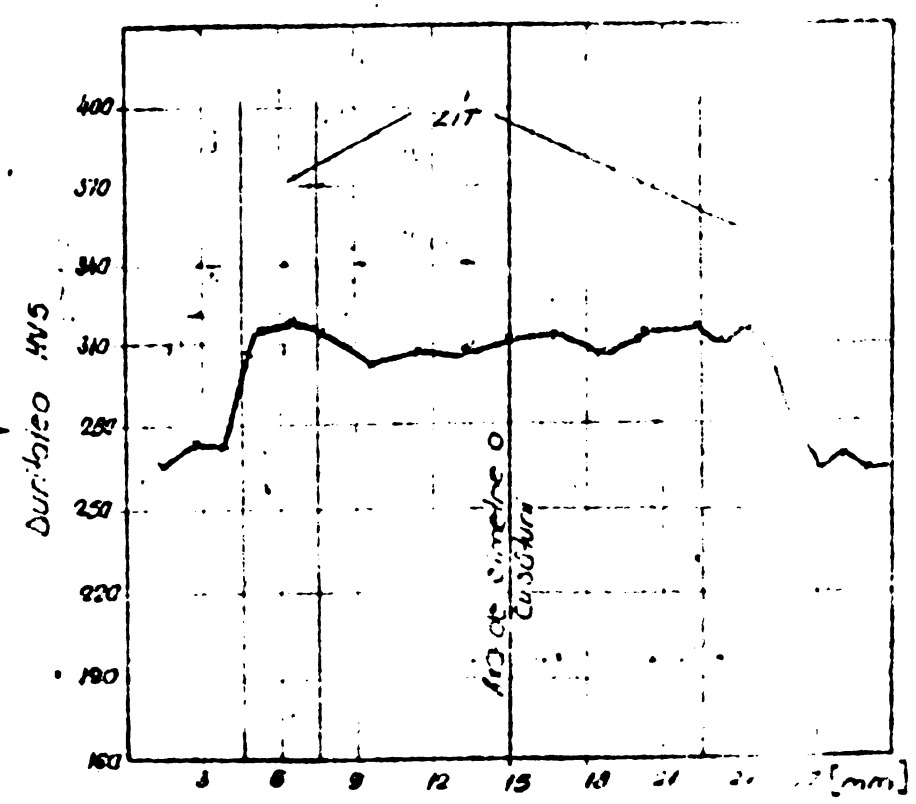
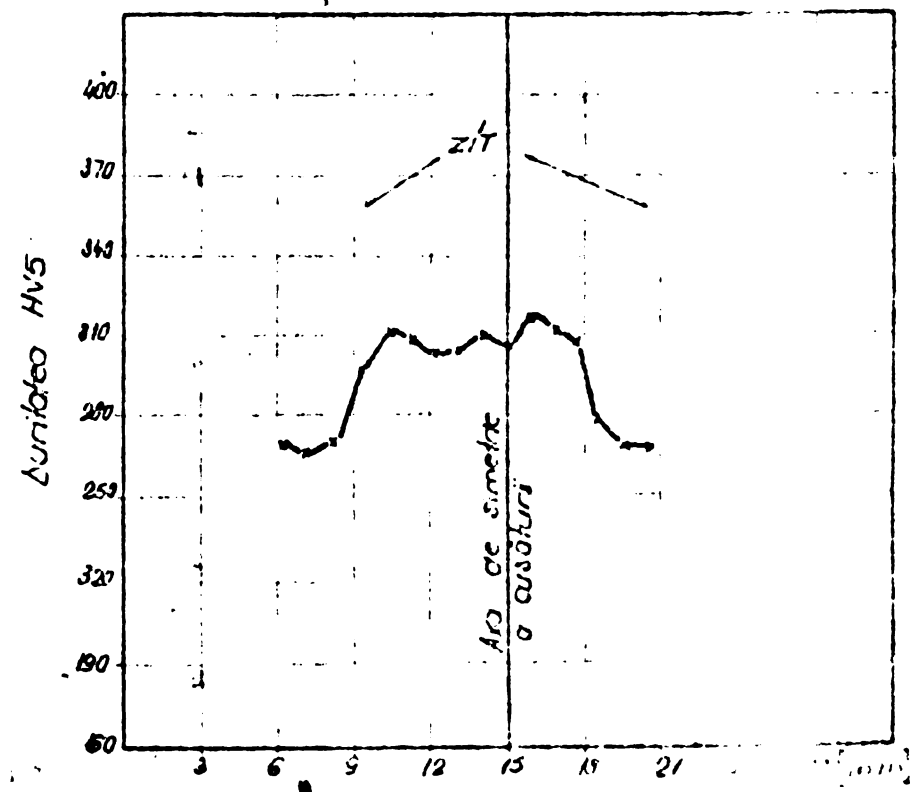
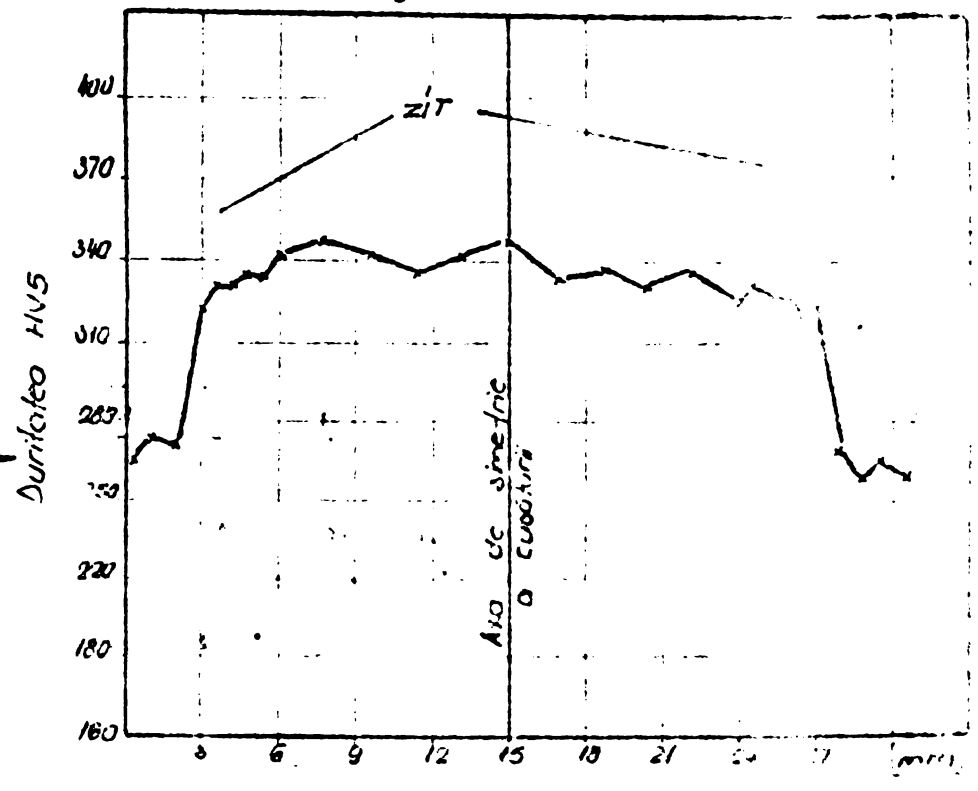
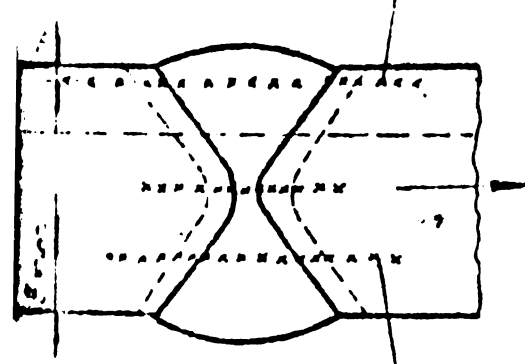
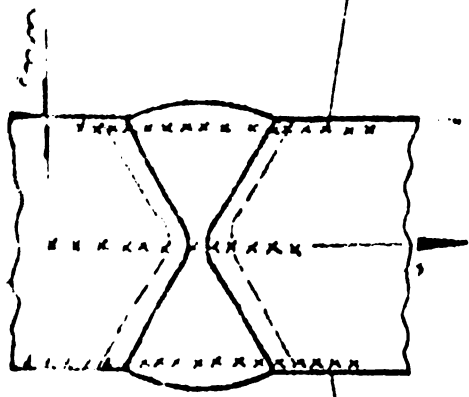


Fig. 3.12



Taie din oel  
12 Ni 90 ;  
t = 30 mm  
Sudrit manual cu  
electrozii ERGL 11.1

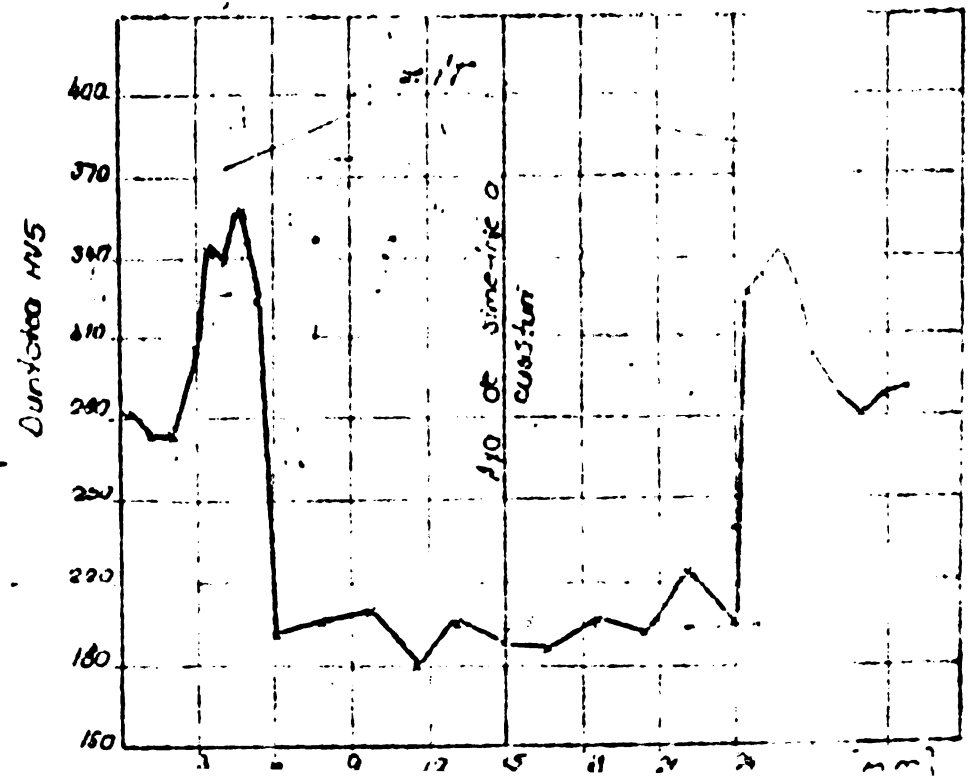
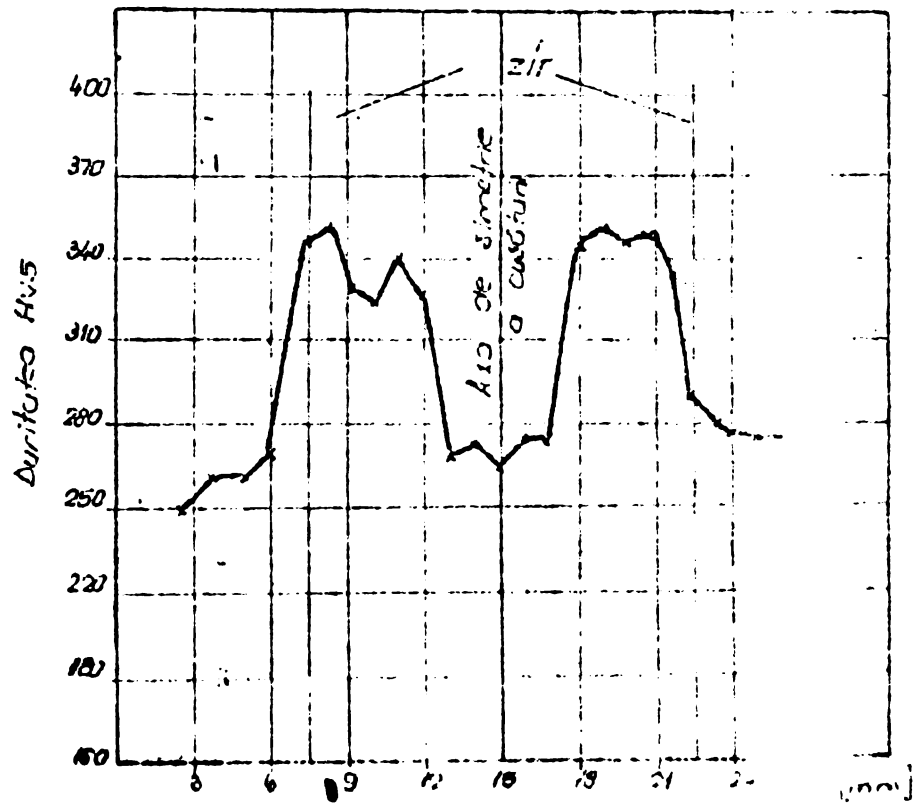
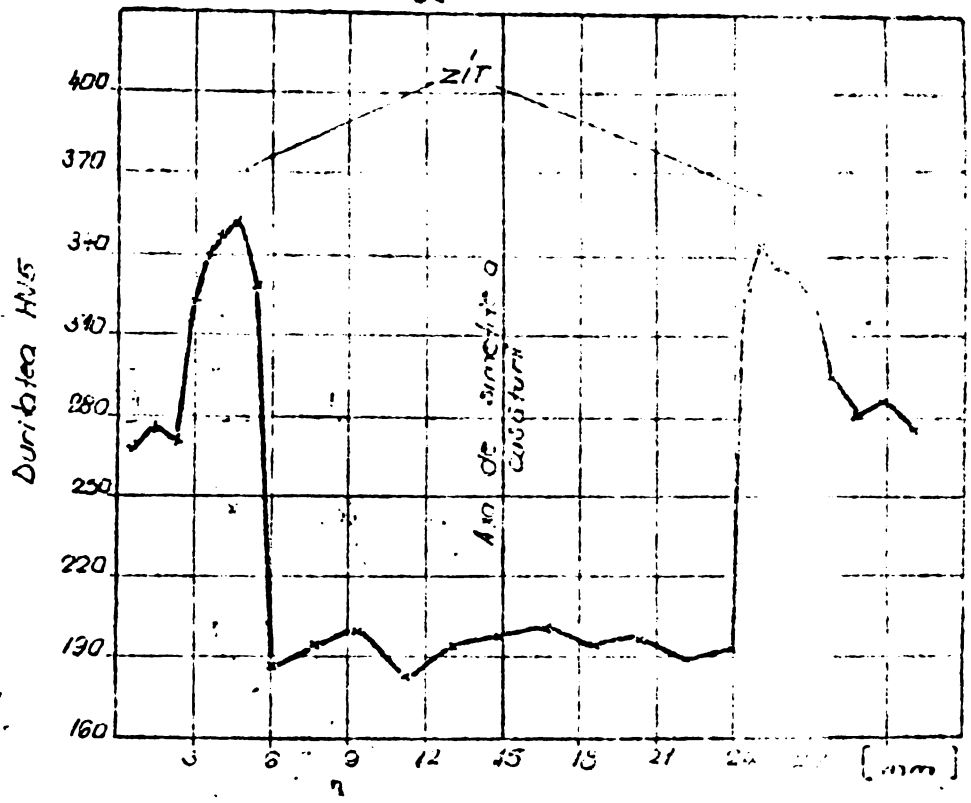


Fig. 3.13.

Tratamentul termic de detensionare în toate cazurile uniformizează în ZIT și cusătură structurile reducând duritățile HV5 la nivelul metalului de bază în plaja de valori de 230...270 daN/mm<sup>2</sup> (fig.3.9,3.10,3.11 și 3.12).

În cazul sudării cu electrozii experimentali ERGL11.1 duritatea maximă în ZIT nu depășește 350 daN/mm<sup>2</sup>; duritatea cusăturii fiind de 180...200 daN/mm<sup>2</sup> iar a metalului de bază de 250...280 daN/mm<sup>2</sup> (fig.3.13).

### 3.7.2. Determinarea caracteristicilor de tenacitate dinamică.

Încercările pentru determinarea caracteristicilor de tenacitate dinamică s-au efectuat cu ajutorul unui ciocan pendul conform STAS 7511-81 pe epruvetă de tipul Charpy V (STAS 5540-77) cu creștătura în cusătură și în ZIT conform figurii 3.14.

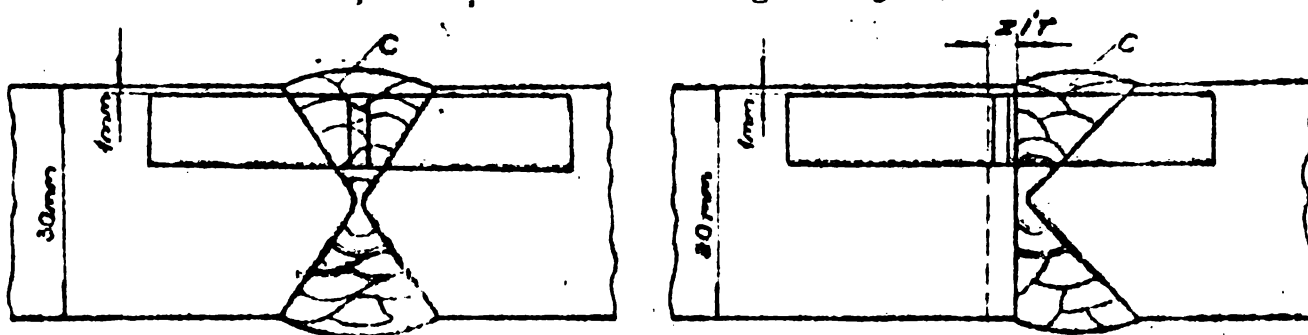


Fig.3.14 Modul de prelevare a epruvetelor de reziliență.

Pentru fiecare variantă de rost, grosime de tablă, procedeu de sudare (Tabelul 3.12) s-au prelevat câte 12...24 epruvete de reziliență corespunzătoare fiecărui lot, epruvete ce-au fost împărțite în 4 loturi numeric egale și supuse încercărilor de încovoiere prin șoc la temperatura de 293 K și 77 K, la 77 K după menținerea timp de o lună în azot lichid (la 77 K) și după 10 șocuri termice între 293 și 77 K, revenind câte trei epruvete pentru fiecare din temperaturile menționate.

Anterior încercării de încovoiere prin șoc, epruvetele au fost supuse unei verificări a razei și a spectului calității suprafeței fundului creștăturii prin compararea la mărimi de 150-cu etaloane.

De menționat că pentru variantele tehnologice semnificative s-au făcut încercări de încovoiere prin șoc la 293, 239, 185, 131 și 77 K. Folosind metoda polinoamelor ortogonale [56] s-au stabilit ecuațiile de regresie și coeficienții de corelație (tabelul 3.14).

Ecuatiile de regresie și coeficienții de corelație pentru variabilele tehnologice semnificative.

Tabelul 3.14

| Nr. cr. | Poziția creșterii  | T <sub>inc</sub> [°K] | Energia de rupere KV [J] |                   | Ecuația de regresie                              | Coefic. de corelație % |
|---------|--|-----------------------|--------------------------|-------------------|--|------------------------|
|         |  |                       | Valori experiment.       | Valori statistice |  |                        |
| 1       | MB<br>în stare<br>C+R  | 293                   | 121                      | 120,8             | $\hat{y} = 107,94 - 24,08x - 12,16x^2 - 0,98x^3$ | 99,87                  |
|         |  | 239                   | 115                      | 114,1             |  |                        |
|         |  | 185                   | 98,3                     | 97,2              |  |                        |
|         |  | 131                   | 72,6                     | 72,4              |  |                        |
|         |  | 77                    | 48                       | 46,8              |  |                        |
| 2       | Cusătura realizată manual cu EL Cr 25 Ni 20 B                                      | 293                   | 84                       | 84,025            | $\hat{y} = 87,5 - 3,29x - 0,285x^2$              | 99,975                 |
|         |  | 239                   | 80                       | 79,98             |  |                        |
|         |  | 185                   | 75                       | 75,165            |  |                        |
|         |  | 131                   | 70                       | 69,98             |  |                        |
|         |  | 77                    | 64                       | 63,925            |  |                        |
| 3       | Cusătura realizată prin procedeul MIG cu sirmă cu 9% Ni $\phi$ 1,2 mm              | 293                   | 81,5                     | 81,5              | $\hat{y} = 60,65 + 57,24x - 23,47x^2 + 2,2x^3$   | 97,25                  |
|         |  | 239                   | 95                       | 98,8              |  |                        |
|         |  | 185                   | 86,3                     | 80,5              |  |                        |
|         |  | 131                   | 51                       | 54,8              |  |                        |
|         |  | 77                    | 36                       | 35,1              |  |                        |
| 4       | ZIT realizat prin simulare cu EL = 14 kgf/cm <sup>2</sup> T <sub>v</sub> = 1273° K | 293                   | 95,3                     | 94,6              | $\hat{y} = 83,04 + 19,47x - 8,51x^2 + 0,61x^3$   | 97,49                  |
|         |  | 239                   | 90                       | 92,8              |  |                        |
|         |  | 185                   | 85,6                     | 81,3              |  |                        |
|         |  | 131                   | 61                       | 63,8              |  |                        |
|         |  | 77                    | 44,6                     | 43,9              |  |                        |
| 5       | ZIT realizat prin procedeul MIG  | 293                   | 102                      | 101,1             | $\hat{y} = 97,94 + 4,1x + 0,3x^2 - 0,67x^3$      | 99,32                  |
|         |  | 239                   | 100,3                    | 101,9             |  |                        |
|         |  | 185                   | 96,6                     | 94,8              |  |                        |
|         |  | 131                   | 74                       | 76,3              |  |                        |
|         |  | 77                    | 41,3                     | 42,2              |  |                        |

Cu valorile obținute din încercările experimentale s-au trasat graficel KV = f(T<sub>inc</sub>). Din analiza graficelor KV = f(T<sub>inc</sub>) fig.3.15...3.19 rezultă că există o bună corelație între valorile obținute experimental și cele calculate din ecuațiile de regresie dovadă coeficienții de corelație de valori ridicate 97,25...99,97 (Tabelul 3.14).

Existând o bună corelație între energia de rupere și temperatura de încercare în toate cazurile cercetate în continuare s-a verificat comportarea îmbinării numai la 293 K și 77 K.

Rezultatele încercărilor de încovoire prin șoc la 293 și 77 K sunt prezentate în Tabelul 3.15 și graficele din figurile 3.20... 3.27 și relevă următoarele:

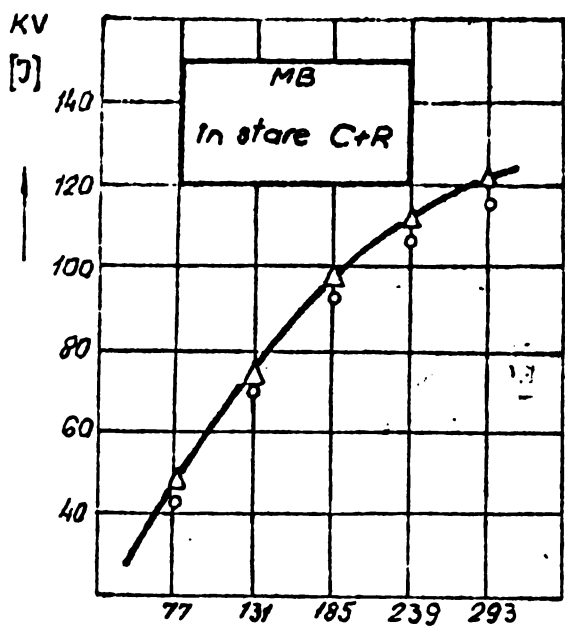


Fig. 3.15

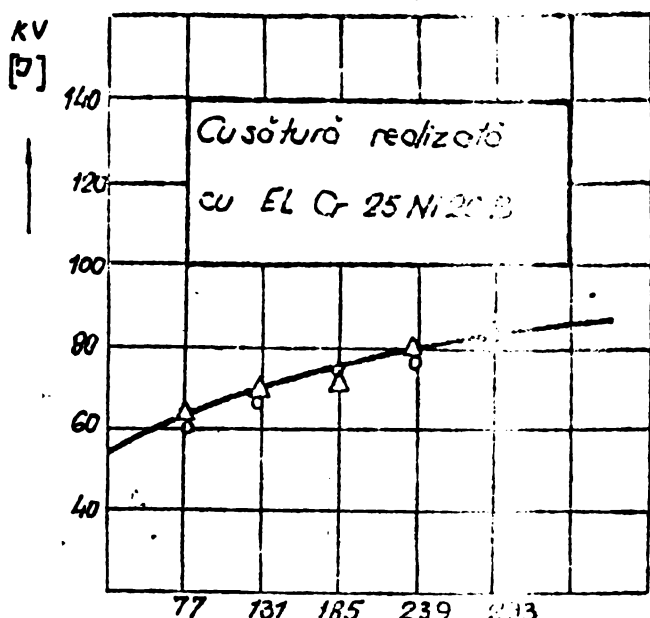


Fig. 3.16

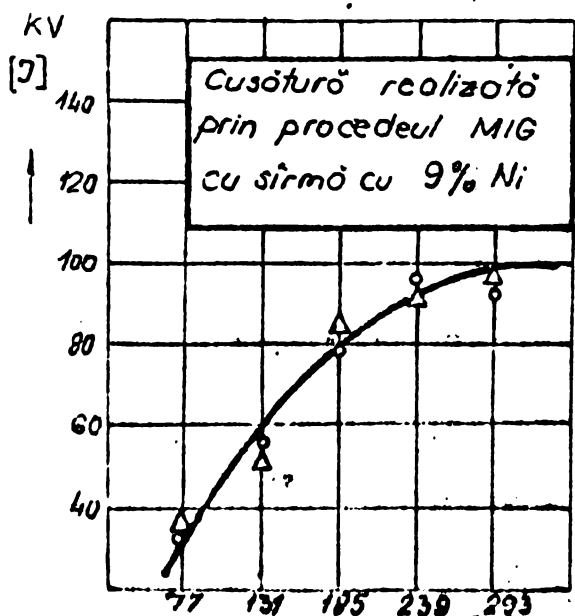


Fig. 3.17

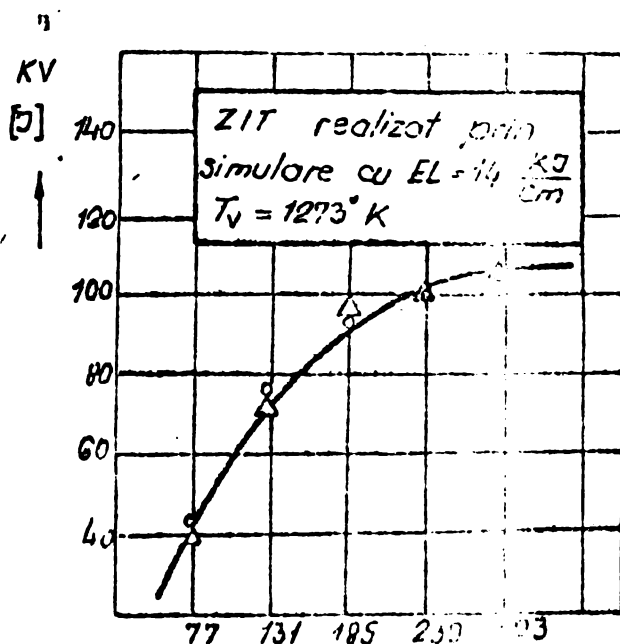


Fig. 3.18

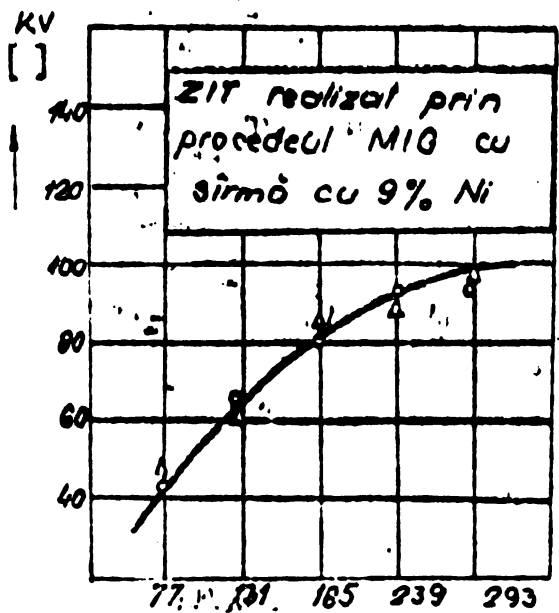


Fig. 3.19

$\Delta$  - Valori experimentale  
O - Valori statistice

Rezultatele încercărilor la încovoiere prin șoc la 293 și 77 K funcție de tipul electrodului și poziția creștăturii.

Tabelul 3.15

| Nr. crt. | Metal de bază | Procedul de sudare | Tipul electrodului | Temp. de de-tensiune [K] | Poziția creștăturii în | T <sub>inc</sub> [K] | Energia de rupere  |       |
|----------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|-------|
|          |               |                    |                    |                          |                        |                      | Valori individuale | Media |
| 0        | 1             | 2                  | 3                  | 4                        | 5                      | 6                    | 7                  | 8     |
| 1        | Oțel          |                    |                    |                          | MB                     | 293                  | 121; 123; 125      | 123   |
| 2        | 12Ni90        |                    |                    |                          | în stare               | 77                   | 56; 52; 55         | 54,3  |
| 3        | s=12mm        |                    |                    |                          |                        | 77                   | 55; 57; 59         | 57    |
| 4        |               |                    |                    |                          | O+R                    | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 49; 53; 53         | 51,6  |
| 5        |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 81; 84; 87         | 84    |
| 6        |               |                    |                    |                          |                        | 77                   | 62; 65; 65         | 64    |
| 7        | "-            | Manual             |                    |                          | Cusătură               | 77                   | 62; 63; 62         | 62,3  |
| 8        |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 63; 60; 58         | 60,3  |
| 9        |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 79; 83; 82         | 81    |
| 10       | "-            | Manual             |                    |                          |                        | 77                   | 48; 45; 45         | 46    |
| 11       |               |                    |                    |                          | ZIT                    | 77                   | 51; 50; 54         | 51    |
| 12       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 46; 41; 45         | 44    |
| 13       |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 35; 38; 31         | 34,6  |
| 14       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   | 18; 21; 19         | 19,3  |
| 15       | "-            | Manual             |                    |                          | Cusătură               | 77                   | 19; 21; 17         | 19    |
| 16       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 22; 17; 19         | 19,3  |
| 17       |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 68; 71; 65         | 68    |
| 18       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   | 25; 25; 24         | 25,6  |
| 19       | "-            | Manual             |                    | 848                      | Cusătură               | 77                   | 28; 25; 25         | 26    |
| 20       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 25; 28; 27         | 26,6  |
| 21       |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 55; 52; 56         | 54    |
| 22       |               |                    | Sîrmă              |                          |                        | 77                   | 29; 30; 33         | 30,6  |
| 23       |               | MIG                | cu 9%Ni            |                          | Cusătură               | 77                   |                    |       |
|          |               |                    | de 1,2mm           |                          |                        | 77                   | 31; 31; 32         | 31,3  |
| 24       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 26; 31; 30         | 29    |
| 25       |               |                    |                    |                          |                        | 293                  | 96; 88; 90         | 91    |
| 26       |               |                    | Sîrmă              |                          |                        | 77                   | 33; 41; 40         | 39,6  |
| 27       | "-            | MIG                | cu 9%Ni            | 848                      | Cusătură               | 77                   | 39; 35; 34         | 36    |
|          |               |                    | de 1,2mm           |                          |                        | 77                   |                    |       |
| 28       |               |                    |                    |                          |                        | 77                   |                    |       |
|          |               |                    |                    |                          |                        | 10 șocuri            | 36; 36; 35         | 35,6  |

Tabelul 3.15 (continuare)

| 0  | 1      | 2      | 3        | 4   | 5             | 6         | 7             | 8    |
|----|--------|--------|----------|-----|---------------|-----------|---------------|------|
| 29 | Oțel   |        | Sîrmă    |     |               | 293       | 69; 70; 56    | 68   |
| 30 | 12Ni90 | MIG    | cu 9%Ni  |     | ZIT           | 77        | 43; 40; 41    | 41   |
| 31 | s=12mm |        | de 1,2mm |     |               | 77        | 35; 35; 34    | 34,6 |
| 32 |        |        |          |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        |          |     |               | 10 șocuri | 37; 34; 37    | 36   |
| 33 |        |        |          |     |               | 293       | 97; 104; 102  | 101  |
| 34 |        |        |          |     |               | 77        | 51; 46; 47    | 48   |
| 35 | ---    | MIG    | Sîrmă    | 848 | ZIT           | 77        | 49; 46; 46    | 47   |
| 36 |        |        | cu 9%Ni  |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        | de 1,2mm |     |               | 10 șocuri | 44; 43; 39    | 42   |
| 37 |        |        |          |     |               | 293       | 120; 113; 115 | 116  |
| 38 | Oțel   |        |          |     | MB            | 77        | 49; 49; 46    | 48   |
| 39 | 12Ni90 |        |          |     | în stare      | 77        |               |      |
| 40 | s=30mm |        |          |     | C+R           | 77        | 51; 50; 50    | 50,3 |
|    |        |        |          |     |               | 10 șocuri | 46; 47; 46    | 46,3 |
| 41 |        |        |          |     |               | 293       | 43; 41; 39    | 40   |
| 42 |        |        |          |     |               | 77        | 21; 21; 19    | 20,3 |
| 43 | ---    | Manual | EL9Ni    |     | Cusă-<br>tură | 77        | 18; 23; 20    | 20,3 |
| 44 |        |        |          |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        |          |     |               | 10 șocuri | 21; 20; 21    | 20,6 |
| 45 |        |        |          |     |               | 293       | 73; 72; 69    | 71   |
| 46 |        |        |          |     |               | 77        | 24; 25; 24    | 25,3 |
| 47 | ---    | Manual | EL9Ni    | 848 | Cusă-<br>tură | 77        | 26; 28; 25    | 26,3 |
| 48 |        |        |          |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        |          |     |               | 10 șocuri | 23; 26; 26    | 25   |
| 49 |        |        |          |     |               | 293       | 78; 75; 74    | 75,6 |
| 50 |        |        |          |     |               | 77        | 37; 36; 34    | 36   |
| 51 | ---    | MIG    | Sîrmă    |     | cusă-<br>tură | 77        | 35; 36; 31    | 34   |
| 52 |        |        | cu 9%Ni  |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        | de 1,2mm |     |               | 10 șocuri | 35; 33; 37    | 37   |
| 53 |        |        |          |     |               | 293       | 111; 104; 106 | 107  |
| 54 |        |        |          |     |               | 77        | 49; 45; 47    | 47   |
| 55 | ---    | MIG    | Sîrmă    | 848 | Cusă-<br>tură | 77        | 46; 46; 48    | 46,6 |
| 56 |        |        | cu 9%Ni  |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        | de 1,2mm |     |               | 10 șocuri | 49; 47; 47    | 47,6 |
| 57 |        |        |          |     |               | 293       | 105; 100; 101 | 102  |
| 58 |        |        |          |     |               | 77        | 39; 43; 40    | 41,3 |
| 59 | ---    | MIG    | Sîrmă    |     | ZIT           | 77        | 48; 43; 43    | 44   |
| 60 |        |        | cu 9%Ni  |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        | de 1,2mm |     |               | 10 șocuri | 40; 40; 37    | 39   |
| 61 |        |        |          |     |               | 293       | 123; 105; 111 | 113  |
| 62 |        |        |          |     |               | 77        | 45; 49; 50    | 48   |
| 63 | ---    | MIG    | Sîrmă    | 848 | ZIT           | 77        | 49; 50; 52    | 50,3 |
| 64 |        |        | cu 9%Ni  |     |               | 77        |               |      |
|    |        |        | de 1,2mm |     |               | 10 șocuri | 46; 50; 45    | 47   |
| 65 |        |        |          |     | Cusă-<br>tură | 293       | 98; 101; 96   | 98,3 |
| 66 | ---    | Manual | EL0L11.1 |     |               | 77        | 52; 50; 50    | 52,6 |
| 67 |        |        |          |     | ZIT           | 293       | 108; 101; 103 | 104  |
| 68 |        |        |          |     |               | 77        | 48; 43; 52    | 47,6 |



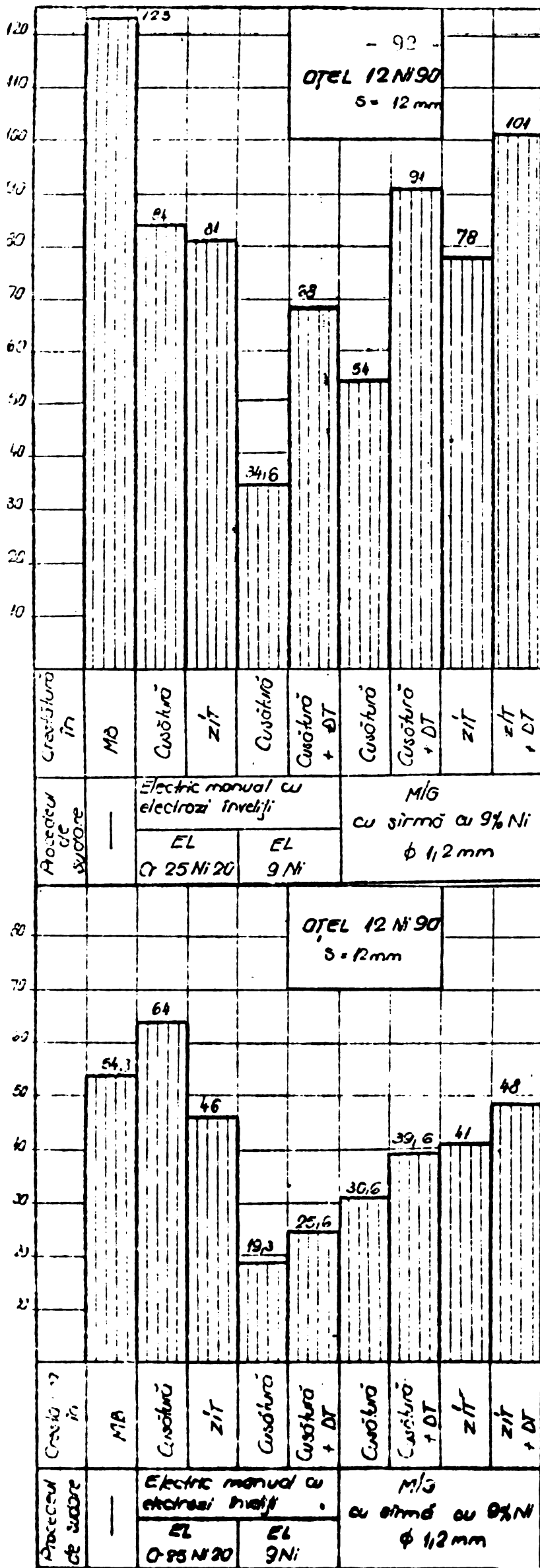


Fig.3.20. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedeul de sudare și tipul metalului de adăos la  $T_{inc} = 293\text{ K}$

Fig.3.21. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedeul de sudare și tipul metalului de adăos la  $T_{inc} = 77\text{ K}$

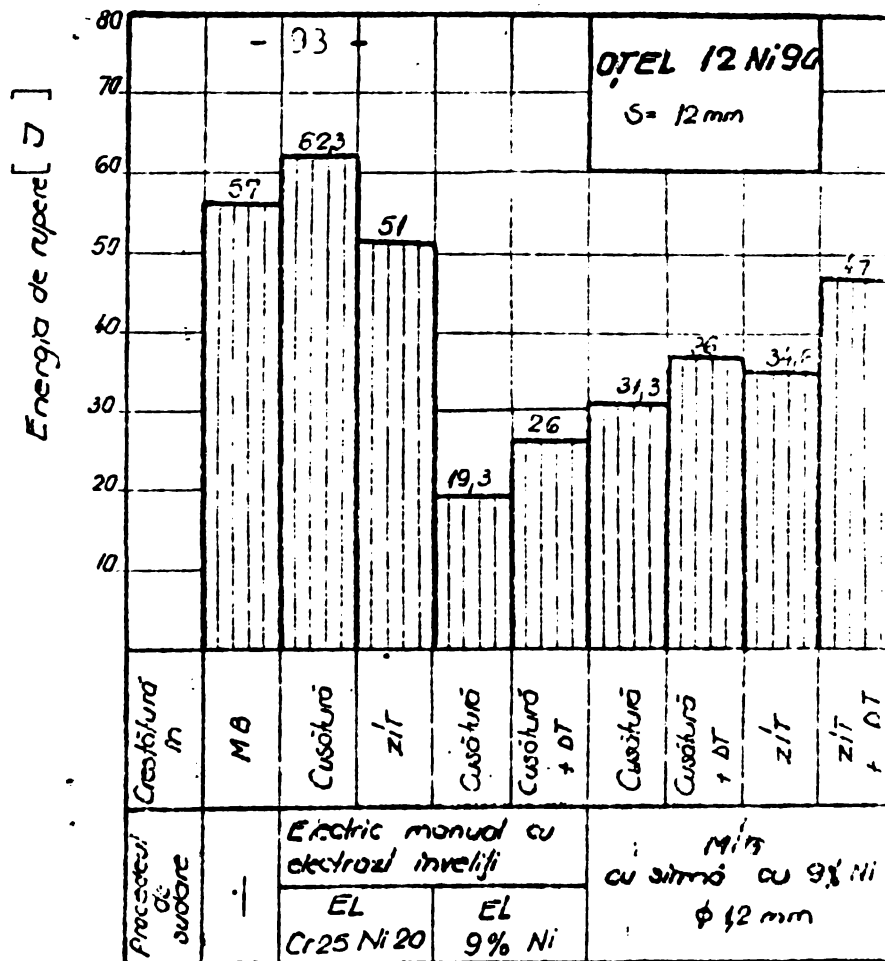


Fig.3.22. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedul de sudare și tipul metalului de adăos după menținerea timp de o lună la 77 K

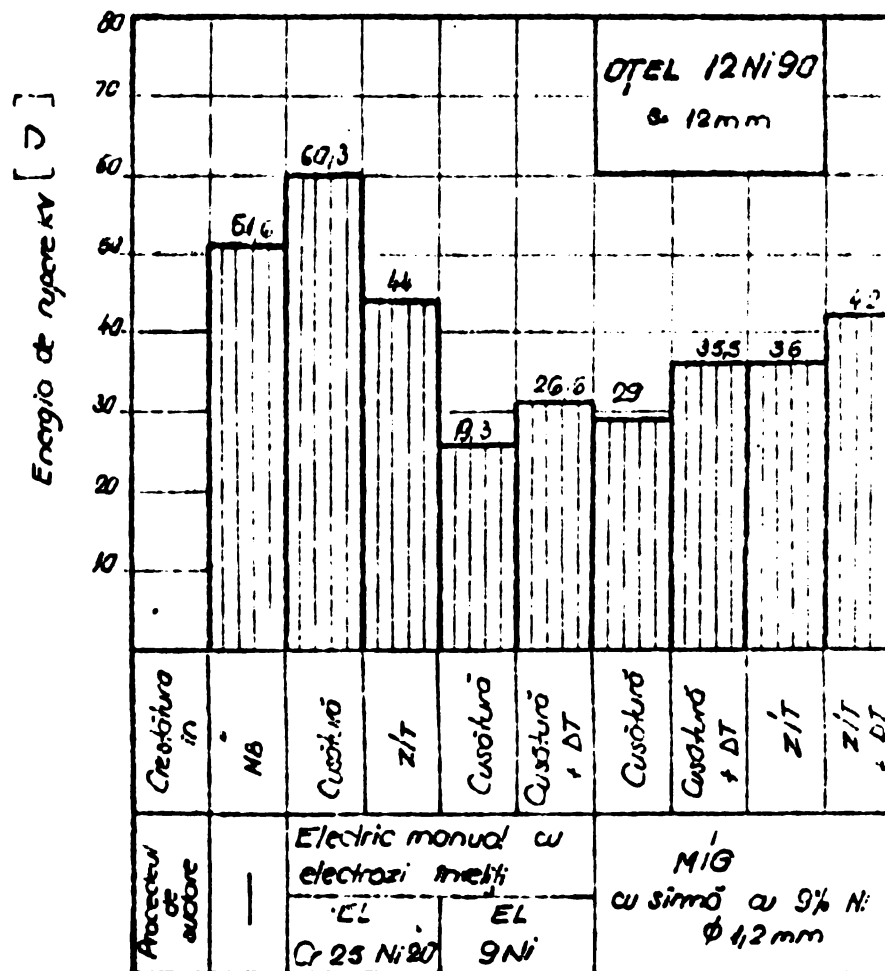


Fig.3.23. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedul de sudare și tipul metalului de adăos după loșocuri termice.  $t_{inc} = 77 K$

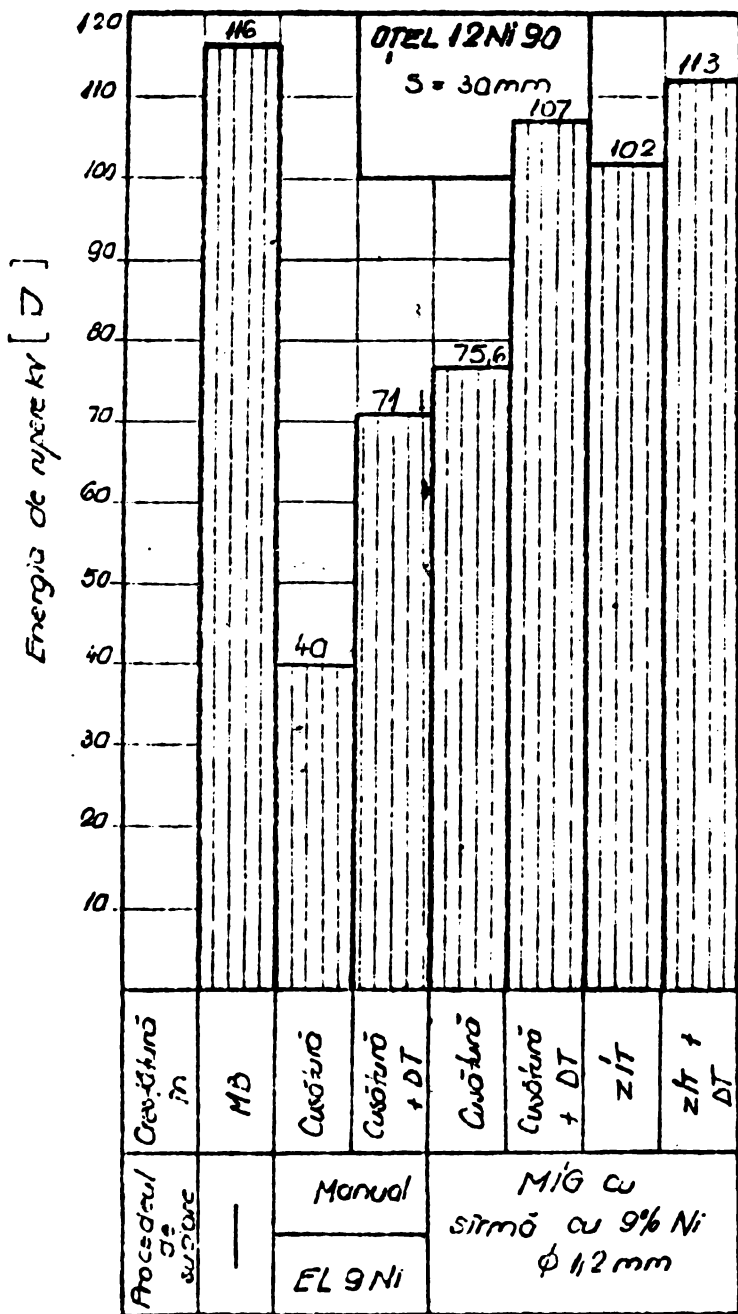


Fig.3.24. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedeul de sudare și tipul metalului de adăos la  $T_{inc} = 293 K$

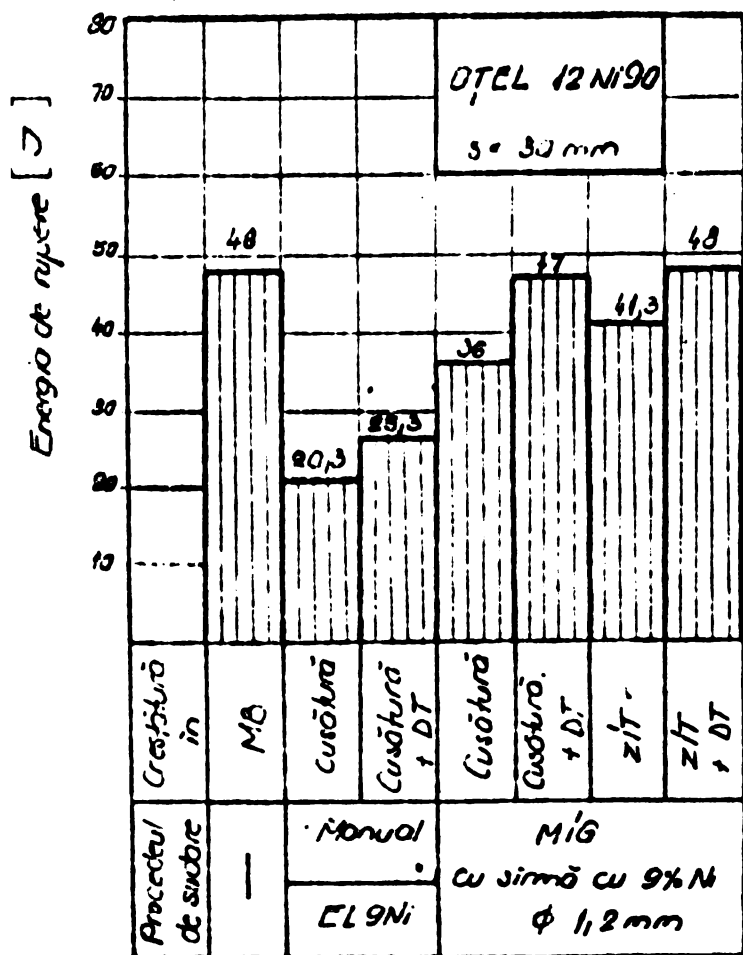


Fig.3.25. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedeul de sudare și tipul metalului de adăos la  $T_{inc} = 77 K$

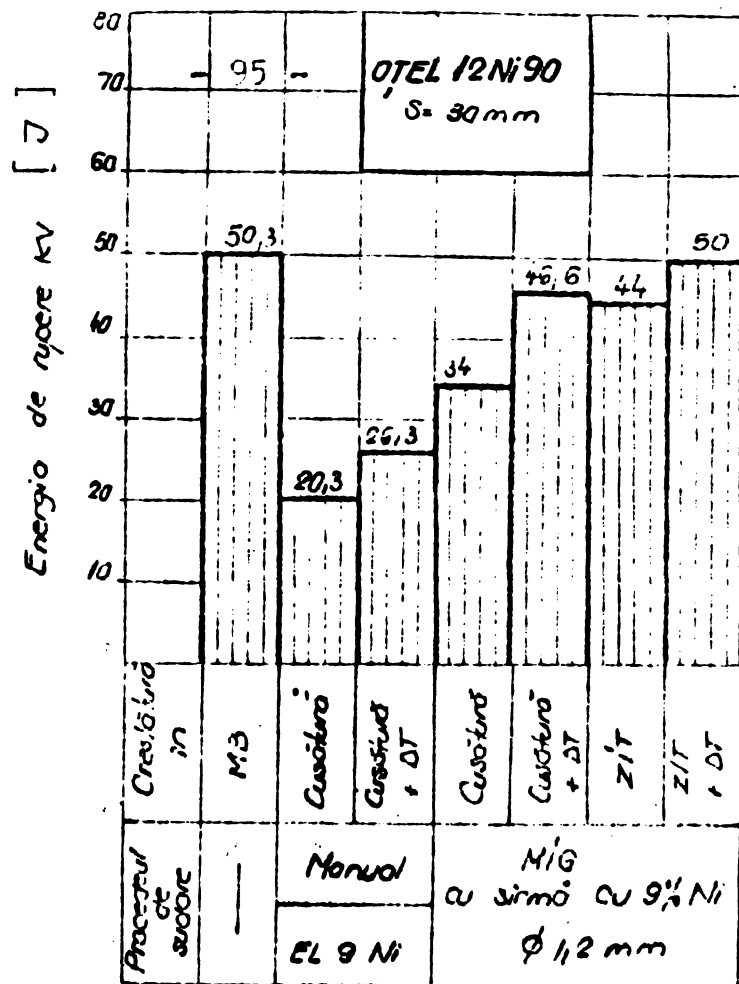


Fig.3.26. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedul de sudare și tipul metalului de adăos după menținerea timp de o lună la 77 K

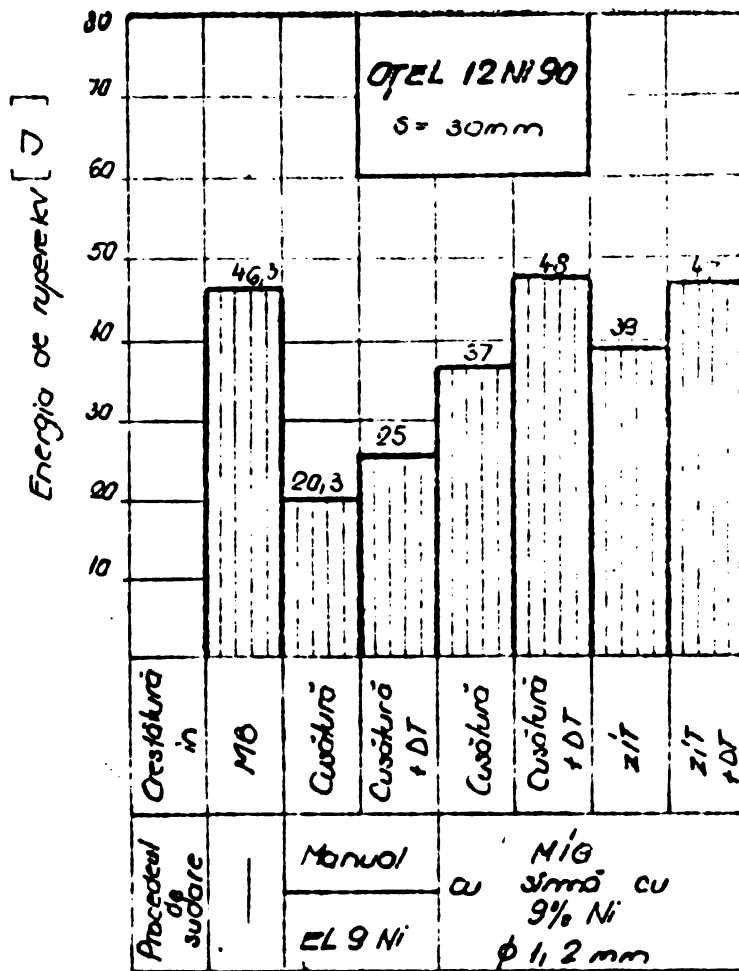


Fig.3.27. Variația energiei de rupere KV [J] în funcție de procedul de sudare și tipul metalului de adăos după 10 șocuri termice între 293 și 77 K.  $T_{inc} = 17$  K

- energia de rupere depinde de localizarea rădăcinii creștăturii. Metalul de bază în stare călită și revenită are o bună valoare a energiei de rupere atât la 293 K (KV = 120 J) cât și la 77 K (KV=54J). Cusătura realizată cu electrozii ELCr25Ni20B dă cele mai ridicate valori ale energiei de rupere la 77 K (KV=64J) datorită microstructurii sudurii care este, faza austenitică, la care dependența energiei de rupere de temperatură este mai mică decât cea a metalului de bază. Cusătura realizată prin procedeul MIG folosind sîrmă cu 9%Ni de 1,2 dă valori acceptabile ale energiei de rupere la 77 K (KV = 30J).

În figura 3.28 se prezintă rezultatele obținute și de alți cercetători privind sudarea MIG a oțelurilor criogenice cu 9%Ni folosind sîrmă cu compoziția chimică apropiată de a MB [80] comparativ cu rezultatele proprii.

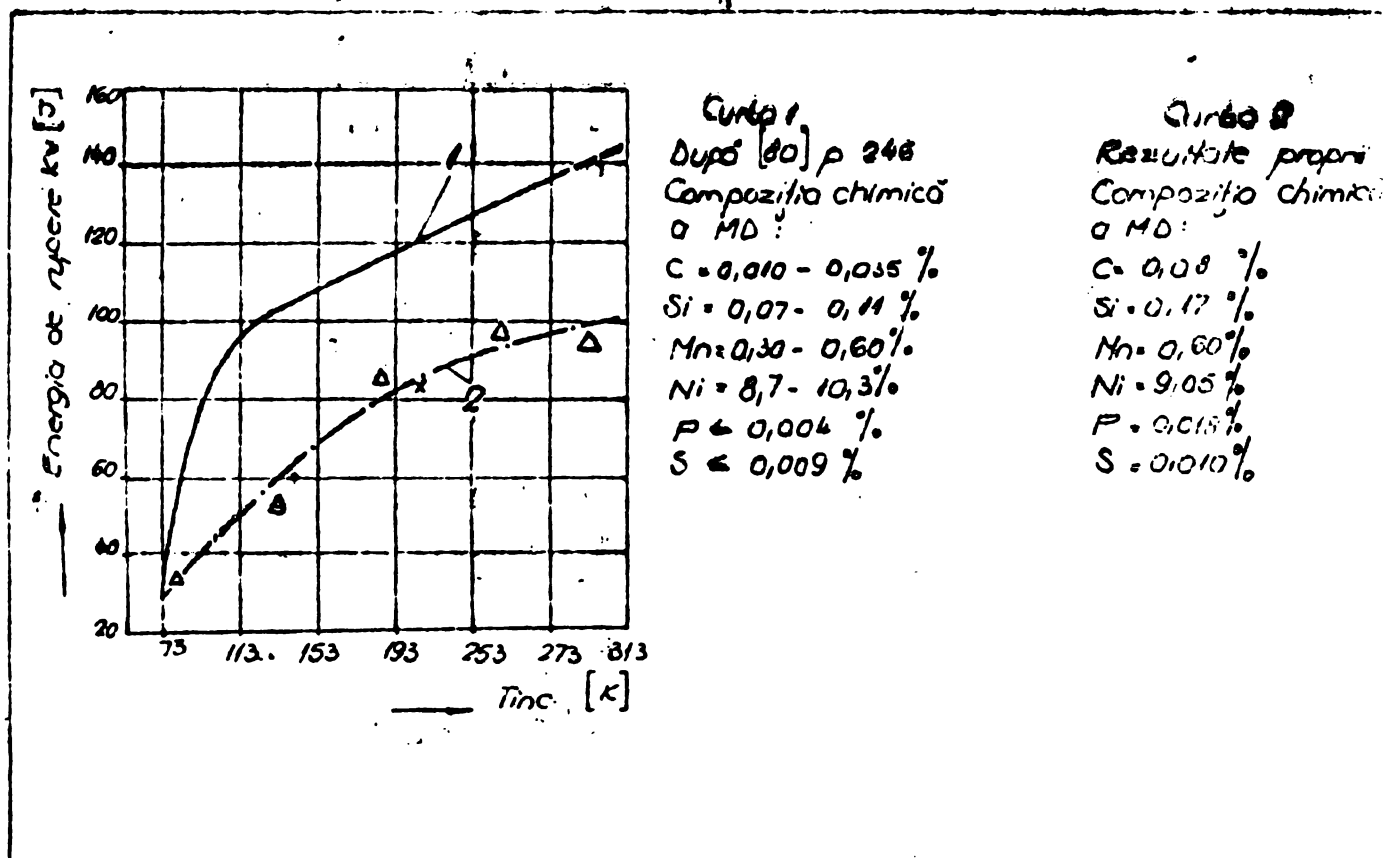


Fig.3.28. Energia de rupere funcție de temperatura de încercare.

Valorile mai scăzute ale energiei de rupere obținută la sudarea MIG a oțelului cercetat folosind sîrmă cu compoziția chimică apropiată de a MB față de cele prezentate în [80] este de presupus că se datorează conținutului mai ridicat în carbon a MD.

În cazul folosirii electrozilor EL9Ni energia de rupere la 77 K a avut valori cuprinse între 18...25 J, valori aflate sub limita inferioară de acceptare.

- reducerea energiei de rupere la ambele temperaturi de încercare este mult mai semnificativă la metalul depus ( manual cu EL9Ni și MIG cu sîrmă cu 9 % Ni) din cauza structurii de turnare care conține multe defecte ce pot constitui amorse de rupere și datorită conținutului în carbon al metalului depus ( $C = 0,08 \dots 0,1 \%$ );

- scăderea energiei de rupere a ZIT-ului ( 81 J la 293 K și 46 J la 77 K ) față de a metalului de bază poate fi atribuită creșterii mărimii grăunților, deoarece energia de rupere a acestui oțel depinde de mărimea grăunților ;

- tratamentul termic de detensionare aplicat după sudarea manuală cu EL9Ni și MIG influențează semnificativ rezultatele la 293 K ( 88 J față de 50 J la sudarea manuală și 91 J față de 60 J la MIG) și mai puțin semnificativ la 77 K ( 25 J față de 20 J la sudarea manuală și 41 J față de 35 J la MIG) ;

- valorile ridicate ale coeficienților de corelație ( $R > 97 \%$ ) obținuți la determinările energiei de rupere în intervalul de temperaturi de 293 ... 77 K ( tabelul 3.14) demonstrează că acestea au fost efectuate îngrijit și că au un grad mare de omogenitate.

Tensiunile reziduale dezvoltate în jurul metalului depus au fost reduse prin prelucrarea mecanică a epruvetelor și deci poate fi concluzionat că efectul localizării rădăcinii creștăturii asupra energiei de rupere a fost rezultatul schimbărilor în microstructură care iau naștere în timpul sudării . Schimbările sînt funcție de creșterea mărimii grăunților și introducerea de incluziuni .

Încercarea  $COD_d$  s-a realizat prin metoda secvențială, solicitărilor aplicîndu-se în trepte , cu energia crescătoare pînă la rupere .

Creștăturile avînd adîncimea de  $2 \pm 0,06$  mm și lățimea de  $0,3 \pm 0,03$  mm s-au prelucrat cu freză disc . Deplasările la deschiderea fisurii sau determinat după fiecare treaptă de energie aplicată, prin metoda rotirii flancurilor creștăturii ( fig.3.29.a) folosind relația :

$$J_{cd} = b - \delta_0 - a(b - c)$$

Distanțele b și c dintre perechile de repere trasate prin zgîrriere cu diamant pe suprafața frontală au fost măsurate la microscop cu o precizie de  $\pm 0,001$  mm.

Nivelele solicitărilor prin șocuri secvențiale au fost astfel alese încît propagarea fisurii pe suprafețele laterale ale epruvetelor să se producă după cel puțin trei trepte de solicitare. Ca valoare critică a deplasării la deschiderea fisurii s-a considerat :

$$\sigma_{cd} = \frac{\sigma_i + \sigma_f}{2}$$

unde  $\sigma_i$  este deplasarea la vârful fisurii corespunzătoare ultimei trepte de solicitare (i) care a mai produs o propagare a fisurii de la mijlocul epruvetei spre margine, iar  $\sigma_f$  este deplasarea la vârful fisurii corespunzătoare apariției fisurii pe una din fețele laterale ale epruvetei (fig.3.29b).

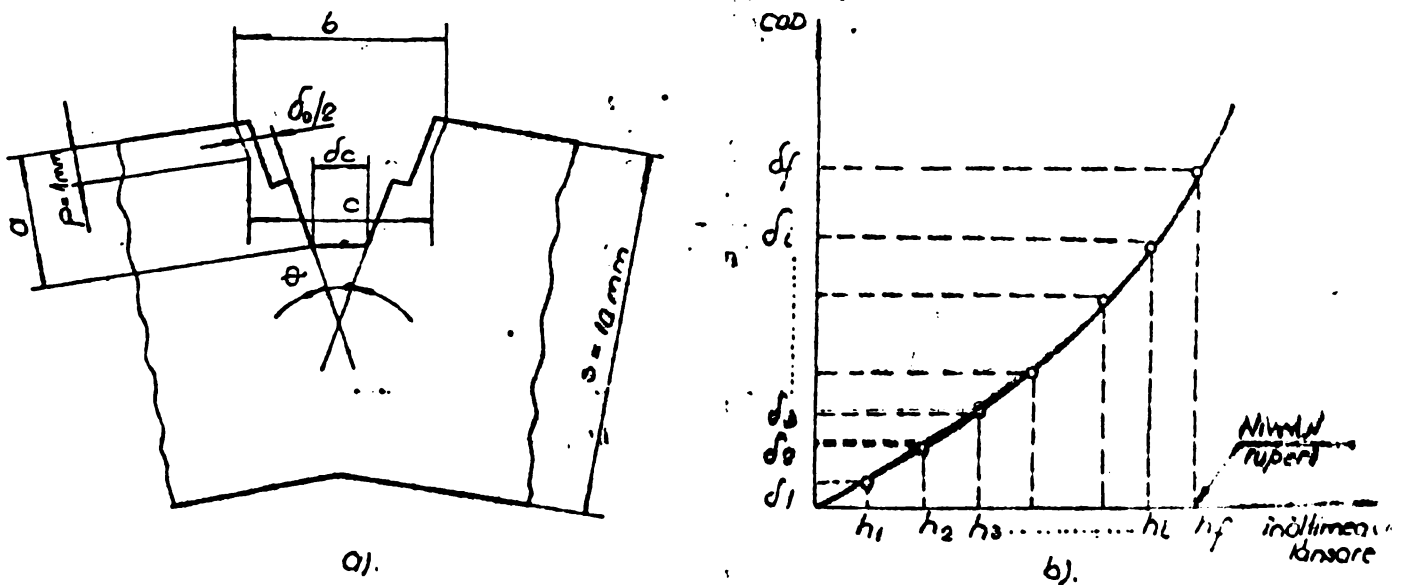


Fig.3.29. Schema de deformare a probei COD (a) și de determinare a deplasării la vârful fisurii (b).

Rezultatele încercărilor COD sînt prezentate în tabelul 3.16.

Tabelul 3.16

| Nr. probă | Tipul probei | T <sub>inc</sub><br>K | mm                 |        | Obs.          |
|-----------|--------------|-----------------------|--------------------|--------|---------------|
|           |              |                       | Valori individuale | Media  |               |
| 1         |              |                       | 0,37915            |        |               |
| 2         | MBT          | 293                   | 0,39140            | 0,3601 |               |
| 3         |              |                       | 0,30945            |        |               |
| 5         |              |                       | 0,3920             |        |               |
| 6         | MIG          | 293                   | 0,4387             | 0,4390 | Apărut fisur  |
| 7         |              |                       | 0,5464             |        | la a 5-a tre  |
| 8         |              |                       | 0,3820             |        | tă de solicio |
| 9         |              |                       | 0,5787             |        |               |
| 10        | MIG          | 293                   | 0,4168             | 0,4980 | tare          |
| 11        | +            |                       | 0,5531             |        |               |
| 12        | DT           |                       | 0,4454             |        |               |

Tabelul 3.16 (continuare)

| 0  | 1   | 2  | 3      | 4      | 5           |
|----|-----|----|--------|--------|-------------|
| 13 |     |    | 0,2275 |        |             |
| 14 | MB  | 77 | 0,1933 | 0,2094 |             |
| 15 |     |    | 0,2075 |        |             |
| 16 |     |    | 0,2235 |        | Apărut fisu |
| 17 | MIG | 77 | 0,2174 | 0,2110 | ră la a 4-a |
| 18 |     |    | 0,1922 |        | treaptă de  |
| 19 | MIG |    | 0,3405 |        | solicitare  |
| 20 | +   | 77 | 0,3307 | 0,3230 |             |
| 21 | DT  |    | 0,2978 |        |             |

Din analiza rezultatelor prezentate în tabelul 3.16 rezultă că nu apar diferențe semnificative între metalul de bază (oțel cu 9%Ni) și cusătura realizată prin procedeul MIG folosind sîrmă cu 9%Ni de diametru 1,2 mm, la aceeași temperatură de încercare.

Se pare că tratamentul termic de detensionare îmbunătățește caracteristicile de deformabilitate ale materialului, la ambele temperaturi de încercare  $\sigma_c$  obținută pe probe detensionate are valori mai ridicate decît la probele nedetensionate.

### 3.7.3. Incercări la tracțiune

Epruvetele utilizate pentru încercarea la tracțiune au fost extrase din îmbinări sudate manual și MIG (pozițiile 2,3,6 și 11 tabelul 3.12) conform figurii 3.30.

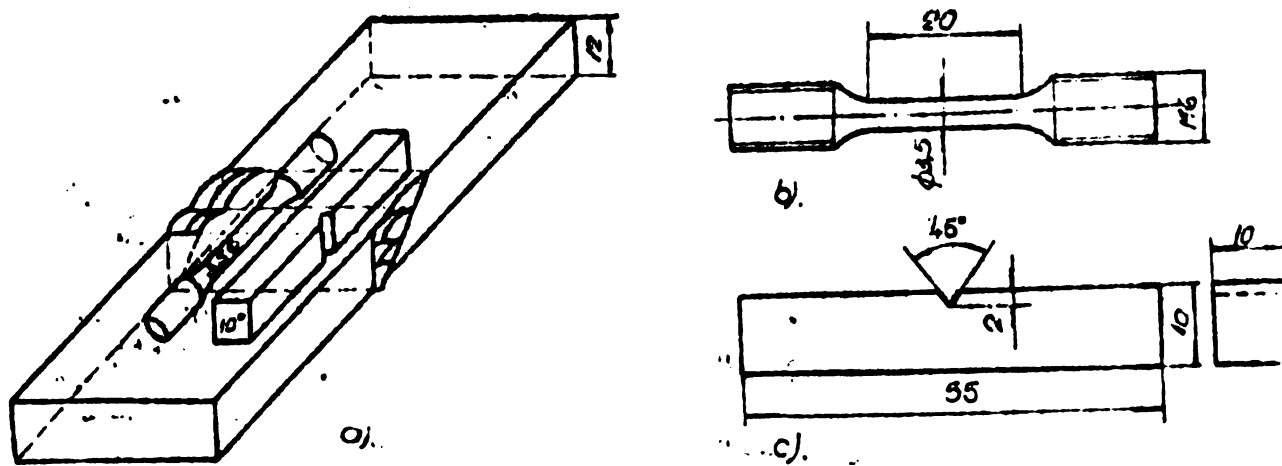


Fig.3.30. Modul de prelevare (a), forma și dimensiunile epruvetelor de tracțiune (b) și reziliență (c).

Incercările au fost efectuate conform STAS 200-75 numai la temperatura de încercare de 293 K.



Rezultatele încercărilor sînt prezentate în tabelul 3.17.

Tabelul 3.17.

| Tipul probei          | $R_m$ daN/mm <sup>2</sup> |       | Locul ruperii |
|-----------------------|---------------------------|-------|---------------|
|                       | Valori individuale        | Media |               |
| MB                    | 79,1 ; 80,3 ; 79,4 .      | 79,6  | MD            |
| Manual cu EL9Ni       | 71 ; 69,3 ; 70            | 70,1  | MD            |
| MIG                   | 74,0 ; 72,9 ; 73,0        | 73,3  | MD            |
| Manual cu ERGL 11.1.  | 70,1 ; 69,5 ; 69,8        | 69,8  | MD            |
| Manual cu ELCr25Ni20B | 64,9 ; 66 ; 65,9          | 65,6  | MD            |

Ruperea epruvetelor a avut loc în toate cazurile în metalul depus. Aceasta arată că rezistența zonei de trecere este mai mare decît a cusăturii. În plus nu s-a observat fisuri la cald sau la rece la nici una din epruvetele sudate.

Microfractografiile caracteristice combinației MB- electrod, respectiv procedeul de sudare folosit a indicat existența unor rupturi cu caracter ductil.

#### CONCLUZII

În cazul oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni, conținutul în carbon trebuie să fie cît mai mic posibil (sub 0,15 %) pentru a obține o tenacitate bună la temperatura azotului lichid ( 77 K) . Elementele însoțitoare permanente se limitează la următoarele valori: Si = 0,15... 0,30 %; Mn = 0,8 % ; S = 0,04 % ; P = 0,035 %.

Prezența Ni ca element de aliere face să crească tenacitatea, călibilitatea și să scadă fragilitatea materialului. Atît carbonul cît și siliciul provoacă durificarea și fragilizarea oțelului. Dacă conținutul în aceste elemente este ridicat, este necesară mărirea și a procentului de Ni pentru a nu diminua rezistența la solicitări dinamice.

În scopul menținerii unor valori ridicate ale caracteristicilor de ductilitate și la temperaturi scăzute se impune ca, conținutul în incluziuni nemetalice și de gaze (hidrogen, oxigen, etc) să fie cît mai mic posibil ( punctajul N = 3). Din aceleași motive este limitat și conținutul în fosfor și sulf.

Oțelurile criogenice aliate cu 9 % Ni cercetate (tabelul 2.1) au o comportare bună la sudare, nu este necesară preîncălzirea pînă

la grosimi a tabelelor de 30 mm.

Insușirile cusăturii și a zonei influențate termic depinde de tipul electrozilor și energia liniară folosită la sudare.

Cusătura realizată cu electrozii ELCr25Ni20B dă cele mai ridicate valori ale energiei de rupere la 77 K (64J), în schimb rezistența la rupere și limita de curgere sînt mult mai scăzute decît la metalul de bază ( $R_m = 65 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  față de  $79 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB și  $R_{0,2} = 42 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  față de  $68 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB).

Cusătura realizată cu electrozii EL9Ni dă valori ale energiei de rupere la 77 K de 16.... 20 J, valori care nu se acceptă în schimb rezistența la rupere se apropie de a metalului de bază ( $R_m = 70 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB; R ).

Valorile scăzute ale energiei de rupere se datoresc structurii de turnare a cusăturii care conține multe defecte pentru inițierea fisurilor precum și conținutului ridicat în carbon al metalului depus ( C = 0,08 .... 0,1 % ).

Cusătura realizată prin procedeul MIG folosind sîrmă cu 9 % Ni de 1,2 mm dă valori acceptabile la 77 K ( KV > 30 J) și rezistența la rupere a îmbinării apropiindu-se de a metalului de bază ( $R_m = 73,3 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  față de  $79,1 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB ).

Cusătura realizată cu electrozii ERGL11.1 dă valori de energie de rupere de peste 50 J la  $T_{inc} = 77$  K respectiv valori acceptabile ale rezistenței la rupere și a limitei de curgere ( $R_m = 69,8 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  față de  $79,1 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB și  $R_{0,2} = 52,3 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  față de  $68,3 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$  la MB).

Folosind pentru sudare energii liniare de 8...14 KJ/cm indiferent de tipul electrozilor folosiți respectiv de procedeul de sudare (manual sau MIG) s-au obținut în ZIT energii de rupere de peste 30 J la 77 K. Scăderea energiei de rupere a ZIT-ului față de a metalului de bază poate fi atribuită creșterii mărimii grăunților în ZIT, deoarece energia de rupere a acestui oțel depinde de mărimea grăunților.

Rezultatele obținute după menținerea timp de o lună în azot lichid la 77 K precum și la loșocuri termice între 293 și 77 K sînt comparabile cu cele obținute conform STAS la temperatura de încercare de 77 K. Rezultă, deci, că materialul de bază oțel criogenic cu 9 % Ni ZIT-ului și cusătura au o bună stabilitate la temperatura azotului lichid (77 K) precum și la șocuri termice.

Încercarea COD efectuată asupra MB și cusăturii realizată

prin procedeul MIG nu relevă diferențe semnificative între MB și cusătură nici la 293 K și nici la 77 K COD la vârful creștăturii fiind atribuită cantității de deformare plastică se presupune că MB și cusătura realizată prin procedeul MIG din punct de vedere al deformării plastice au o comportare asemănătoare.

Tratamentul termic de detensionare în toate cazurile uniformizează în ZIT și cusătură structurile reducând duritățile HV5 la nivelul metalului de bază în plajă de valori de 230... 270 daN/mm<sup>2</sup>. De asemenea prin detensionare cresc valorile energiei de rupere atât la 293 K cât și la 77 K creșteri mai semnificative obținându-se la 293 K.

Ruperea epruvetelor sudate nu a avut loc niciodată la limita dintre metalul de bază și sudură. Aceasta arată că rezistența zonei de trecere este mai mare decât a sudurii. În plus nu s-a observat fisuri la cald sau rece la nici una din epruvetele sudate.

Microfractografiile caracteristice combinației MB-electrod respectiv procedeu de sudare folosit indică existența unor rupturi cu caracter ductil atât la 293 K cât și la 77 K.

## CAPITOLUL IV

### TRANSFORMARI STRUCTURALE LA SUDAREA OTELURILOR

#### CRIOGENICE ALIATE CU 9% NI

#### 4.1. CORELATIA DINTRE TRANSFORMARILE STRUCTURALE SI ENERGIA LINIARA DE SUDARE

Cel mai periculos fenomen la sudare este supraîncălzirea oțelului. Viteza de încălzire influențează modul de creștere al grăunțurilor. Pe măsura creșterii vitezei de încălzire liniile  $A_{c1}$  și  $A_{c3}$  ale diagramei de echilibru Fe-Fe<sub>3</sub>C se deplasează spre temperaturi mai înalte respectiv grăunții de austenită se dezvoltă mai lent. Aceste constatări au la bază inerția proceselor de formare a austenitei și de creștere a grăunțurilor, inerție care se manifestă cu atât mai pregnant cu cât viteza de încălzire este mai mare.

La încălzire în timpul sudării trebuie ținut seama de cele două tendințe contrare care se manifestă: în primul rând datorită temperaturilor ridicate din câmpul austenitic are loc creșterea dimensiunii grăunțurilor cristalini și totodată omogenizarea austenitei iar în al doilea rând încălzirea cu viteză mare și durata de menținere redusă frânează creșterea grăunțului și duce la formarea unei austenite eterogene.

Măsura în care una din cele două tendințe depășește pe cealaltă este determinată de prezența sau absența elementelor de aliere și în special a elementelor ce formează carburi.

Nichelul nu formează carburi în oțeluri, din contră contribuie la descompunerea cementitei și micșorează tendința la supraîncălzire.

Pornind de la aceste considerente rezultă că în cazul sudării oțelurilor criogenice aliate cu 9%Ni un rol important în creșterea grăunțului austenitic îl au temperatura de încălzire și energia liniară de sudare.

La aceeași energie liniară de sudare pe măsura ridicării temperaturii de încălzire grăunțele de austenită crește, datorită intensificării fenomenelor de difuzie în stare solidă.

Nichelul conferă oțelurilor o mare calibilitate. Dintr-o sau martensita cu puțin carbon sînt structurile care apar cel mai frecvent la aceste oțeluri prin răcirea fie în aer, fie în apă de la temperatura de austenitizare.

Viteza de răcire din domeniul austenitic este aceeași indiferent de temperatura la care s-a făcut austenitizarea, ea depinzând doar de energia liniară de sudare. Astfel la energii liniare mici corespund viteze mari de răcire (parametrul răcirii  $t_{8/5}$  are valori mici) situație în care gradul de omogenizare al austenitei fiind mic numărul centrelor de cristalizare fiind mare structura rezultată va fi fină (Planșa V fig.1...4)

Pe măsură ce crește energia liniară vitezele de răcire devin mai mici (parametrul răcirii  $t_{8/5}$  crește) gradul de omogenizare al austenitei este mai ridicat stabilitatea la transformare crește și structura rezultată va fi formată din cristale martensitice de dimensiuni mai mari (Planșa V fig.5...7).

#### PLANSA V

Microstructuri caracteristice probelor simulate cu diferite energii liniare.



Fig.1a ME x 5000  
EL= 8KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$



Fig.1b ME x 10000  
EL= 8KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$

PLANSA V (continuare)



Fig.2a.ME x 5000  
EL = 12KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

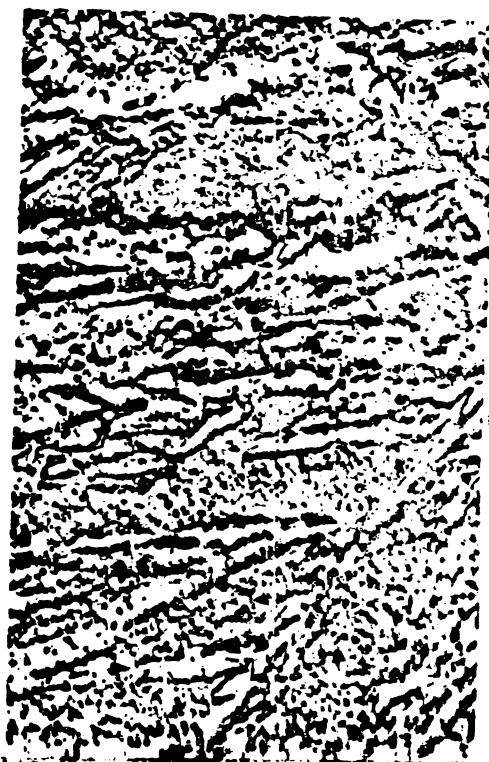


Fig.2b.ME x 10000  
EL = 12KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

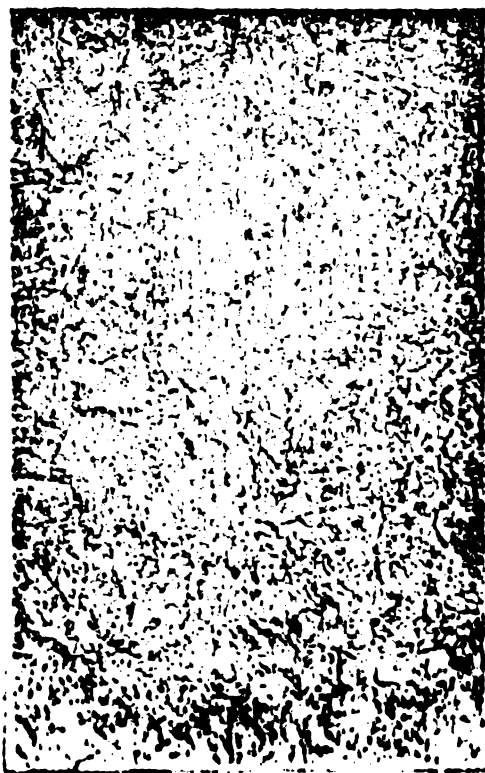


Fig.3a.ME x 5000  
EL = 14 KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

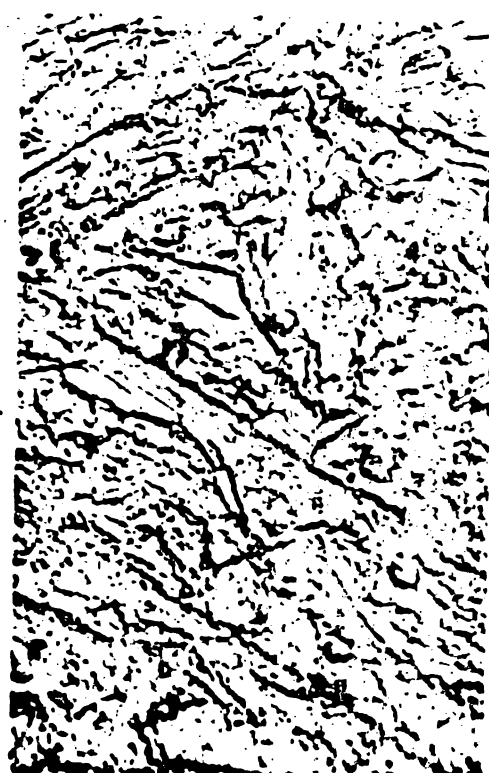


Fig.3b.ME x 10000  
EL = 14KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

PLANSA V (continuare)



Fig.4a. ME x 5000  
EL = 18KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$



Fig.4b. ME x 10000  
EL = 18KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$



Fig.5a. ME x 5000  
EL = 20KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$



Fig.5b. ME x 10000  
EL = 20KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}\text{K}$

PLANSA V (continuare)



Fig.6a.ME x 5000  
EL = 30KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$



Fig.6b.ME x 10000  
EL = 30KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$



Fig.7a.ME x 5000  
EL = 35KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$



Fig.7b.ME x 10000  
EL = 35KJ/cm  
 $T_v = 1273^{\circ}K$



#### 4.2. CORELATIA DINTRE TRANSFORMARILE STRUCTURALE SI TIPUL METALULUI DE ADAOS

La sudare s-au folosit electrozii ELCr25Ni20B din producția curentă, electrozii EL9Ni și ERGL11.1 elaborați experimental și sîmă cu 9%Ni de 1,2mm.

Pornind de la rezultatele obținute în urma simulării ciclurilor termice de la sudare atît la sudarea manuală cît și la sudarea MIG s-au folosit energii liniare de 8...14 KJ/cm. Folosindu-se aceleași energii liniare transformările structurale vor depinde de natura materialului de adaos.

În Plansa VI sînt prezentate microstructurile caracteristice îmbinărilor sudate din oțel criogenic cu 9%Ni realizate cu diverși electrozi iar în Plansa VII sînt prezentate microfractografiile probelor încercate. Din analiza acestora rezultă următoarele observații:

In cazul folosirii electrozilor ELCr25Ni20B;

- cusătura are o structură austenitică cu precipitări de carburi și cu orientare dendritică (Plansa VI fig.1d);

- zona influențată termic are o structură troostito-bainitică (Plansa VI fig.1b);

- zona de trecere are o structură eterogenă austenită + troostit + bainită + carburi (Plansa VI fig.1c);

- metalul de bază are o structură sorbitică de revenire (Plansa VI fig.1a);

- microfractografiile probelor rupte la 293 K prezintă o ruptură ductilă (Plansa VII fig.1) iar cele la 77 K au o ruptură tot ductilă dar rupele con-cupă sînt în număr mai mic (Plansa VII fig.2).

In cazul folosirii electrozilor EL9Ni;

- cusătura are o structură bainito-martensitică aciculară și orientată pe direcția fluxului termic (Plansa VI fig.2d și 3d);

- zona influențată termic are o structură formată din bainită aciculară (Plansa VI fig.2b și 3b);

- ruptura probelor încercate la 293 K și la 77 K au caracter ductil (Plansa VII fig.3 și 4).

In cazul folosirii electrozilor ERGL11.1;

- cusătura are o structură austenitică cu precipitări de carburi și orientare dendritică (Plansa VI fig.4d);

- zona de trecere are o structură eterogenă formată din austenită + troostită + bainită + carburi (Plansa VI fig.4c);

- zona influențată termic are o structură troostito-bainitică (Plansa VI fig.4b);

- ruptura probelor are un caracter ductil atît la 293 K cît și la 77 K (Plansa VII fig.4 și 5).

La sudarea MIG cu sîrmă din oțel cu 9%Ni de diametru 1,2 mm apar următoarele transformări:

- în cusătură apare o structură bainito-martensitică aciculară orientată pe direcția fluxului termic (Plansa VI fig.5d și 6d);
- în zona influențată termic apare o structură formată din bainită aciculară (Plansa VI fig.5b și 6b);
- microfractografia probelor încercate prezintă o ruptură ductilă atât la 293 K cît și la 77 K (Plansa VII fig.7 și 8).

În urma tratamentului termic de detensionare se favorizează precipitarea carburilor fine de tip cementitic pe limitele de separație a feritei aciculare, susceptibilitatea la atac chimic a probelor este mai mică iar ferita își păstrează caracterul acicular (Plansa VI fig.2 și 5 e, f, g, h și fig.3 și 6 m, n, p și r).

Așadar tratamentul termic de detensionare uniformizează în 20 și cusătură structurile menținîndu-se unele aspecte legate de orientarea și distribuția carburilor și a cristalelor de ferită.

#### 4.3. CORELAȚIA DINTRE TRANSFORMĂRILE STRUCTURALE ȘI PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE

Analizele microstructurale și microfractografice ale îmbinărilor sudate realizate din oțel criogenic aliat cu 9%Ni folosind diferite materiale de adaos atestă transformări de fază cu răspunzătoare și ruperi cu caracter ductil, care justifică valorile proprietăților mecanice obținute.

Înșugirile cusăturii și a zonei influențate termic depind de tipul electrozilor și energia liniară folosită la sudare.

Cusătura sudată este o formațiune eterogenă din punct de vedere chimic și structural și al înșugirilor pendinte de aceasta.

Încercarea de reziliență pe epruvete Charpy V este utilă în aprecierea înșugirilor de plasticitate preținzînd în momentul de față și cele mai multe rezultate experimentale în domeniu, rezultatul cu pot servi unor comparații.

Datorită eterogenității cusăturii ca mod de cristalizare, orientarea creștăturii epruvetei de reziliență influențează semnificativ rezultatele măsurătorilor.

Creștătura orientată paralel cu suprafețele tablelor îmbinate fiind așezate în unul din straturile ce formează cusătura, reflectă situația din respectivul strat pe o lungime egală cu cea a cusăturii iar materialul din vârful creștăturii este supus la întindere într-un plan paralel cu suprafețele tablelor (la sudarea cap la cap).

PLANSA VI

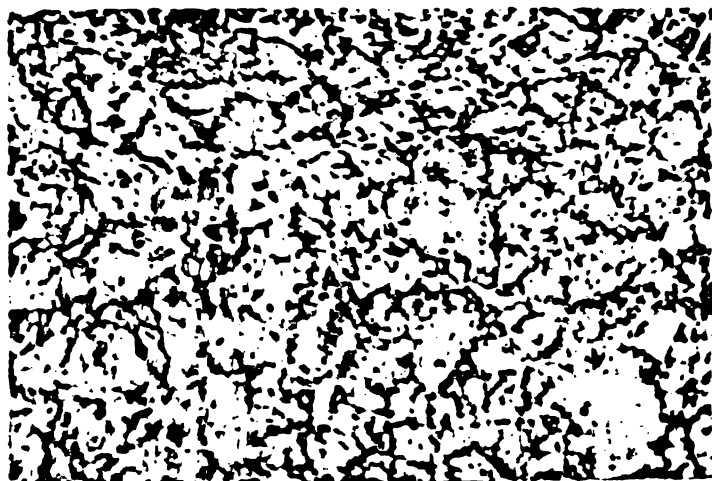


Fig.1a.MB.M0x500

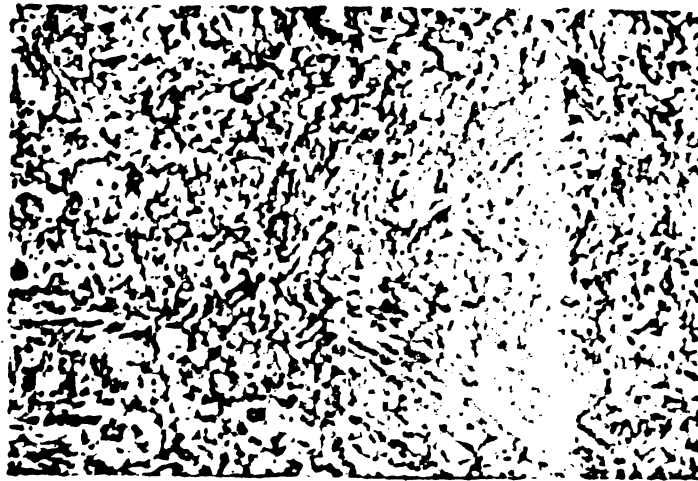


Fig.1b. ZIT.M0x500

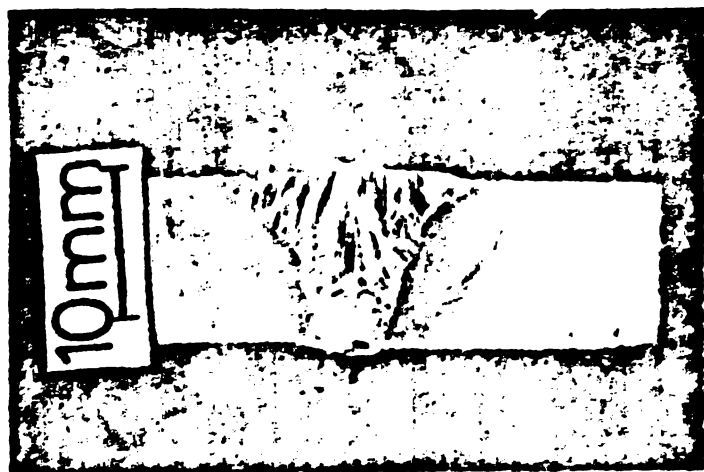


Fig.1.Imbinarea realizată manual  
cu ELCr25Ni20B



Fig.1c.ZIT, cusătură  
M0 x 100

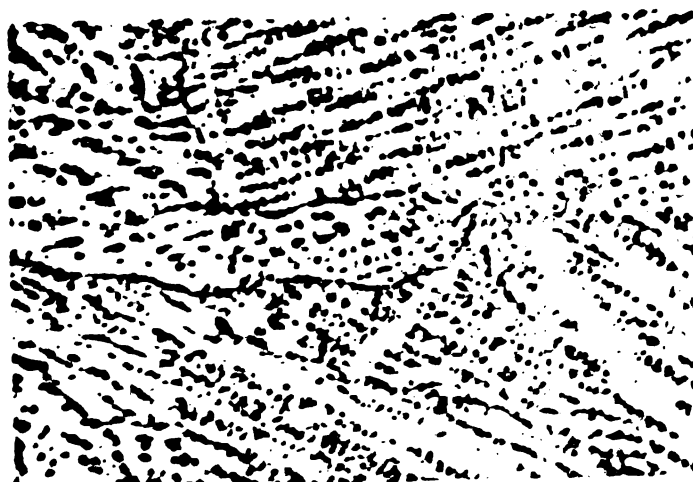


Fig.1d.Cusătură  
M0 x 100

PLANSĂ VI (continuare)



Fig.2a.MB.M0x500



Fig.2b.ZIT.M0x500

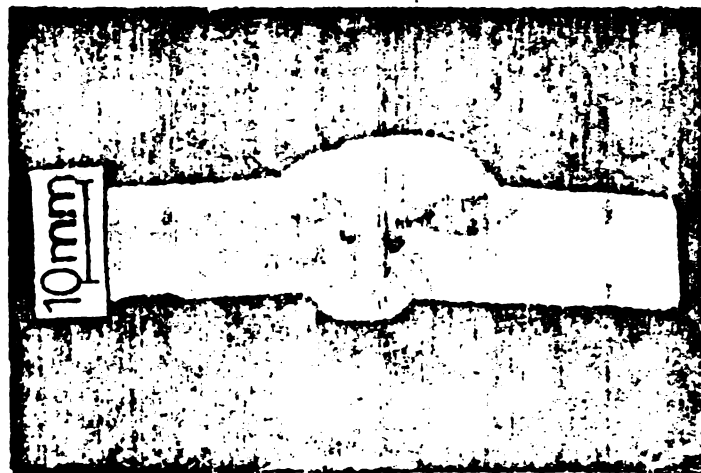


Fig.2. Imbinarea realizată manual  
cu EL9NI

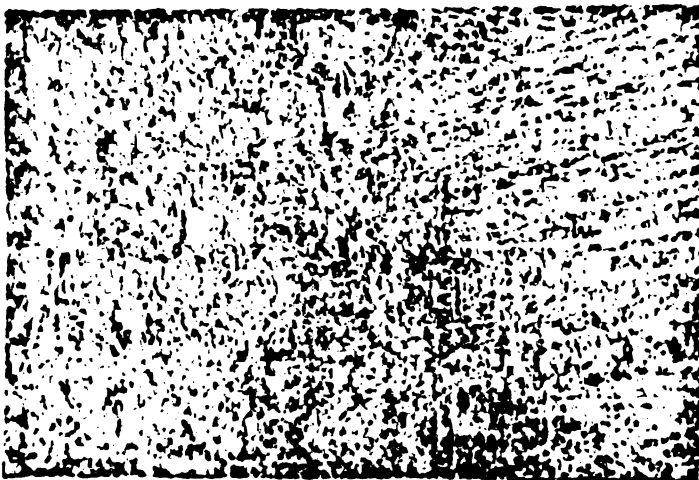


Fig.2c.ZIT+cusătură  
M0 x 100



Fig.2d.Cusătură  
No x 100

Fig.2c. ZIT+cusătură  
M0 + 100

Fig.2d. Cusătură  
M0+ 100

PLANSA VI (continuare)  
Imbinare realizată manual cu EL9Ni și detensionată



Fig.2e.Cusătură  
MEx5000



Fig.2f.Cusătură  
MEx10000



Fig.2g.ZIT  
MEx5000



Fig.2h.ZIT  
MEx10000



Fig.3a.MB.MOx500

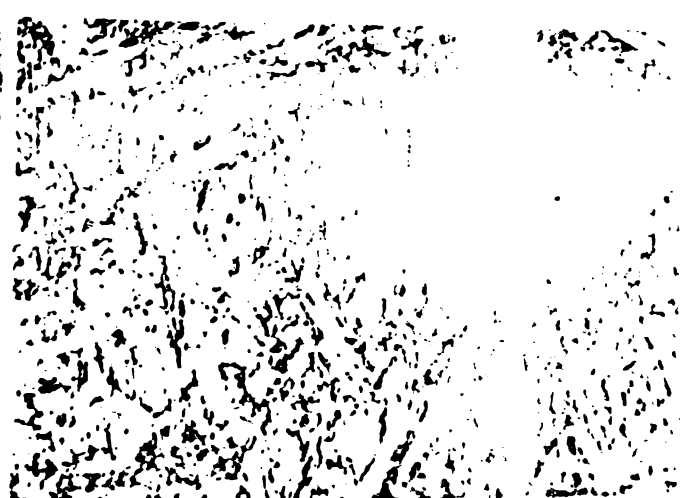


Fig.3b.ZIT.MOx500

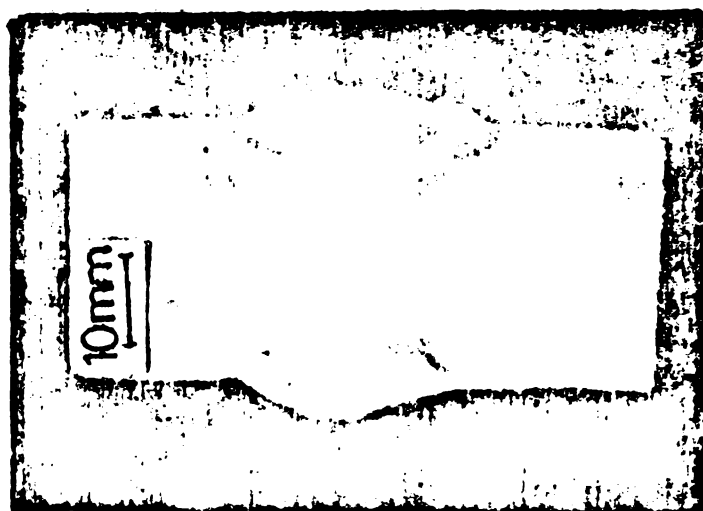


Fig.3. Combinare realizată manual  
cu EL9Ni

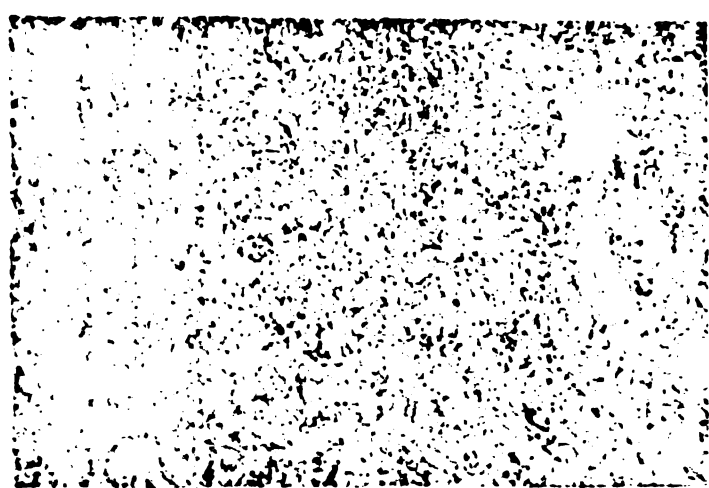


Fig.3c.ZIT+Cusătură  
MO x 100

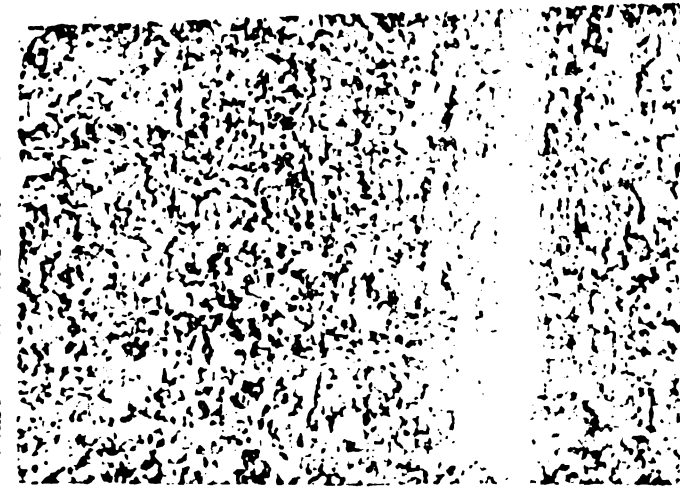


Fig.3d.Cusătură  
MO x 100

PLANSA VI (continuare)

Imbinarea realizată manual cu EL9Ni și detensionată

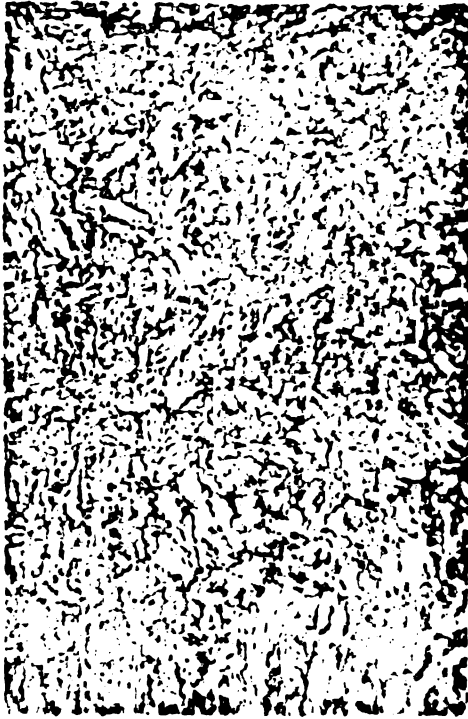


Fig. 3e. MBx500

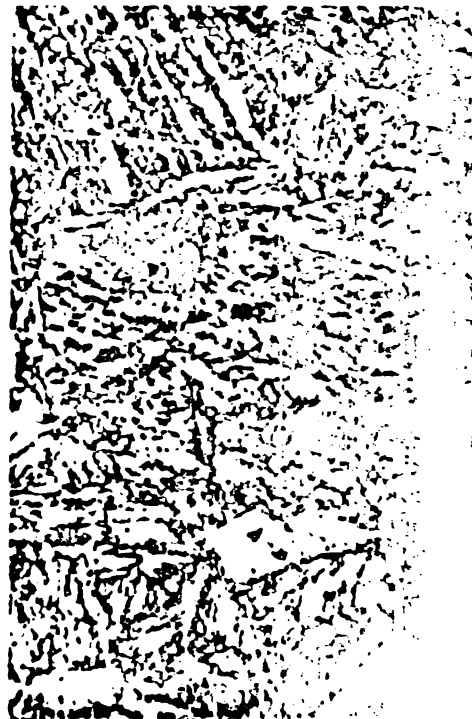


Fig. 3f. ZITx500



Fig. 3g. ZIT+Cusătură  
M0 x 100

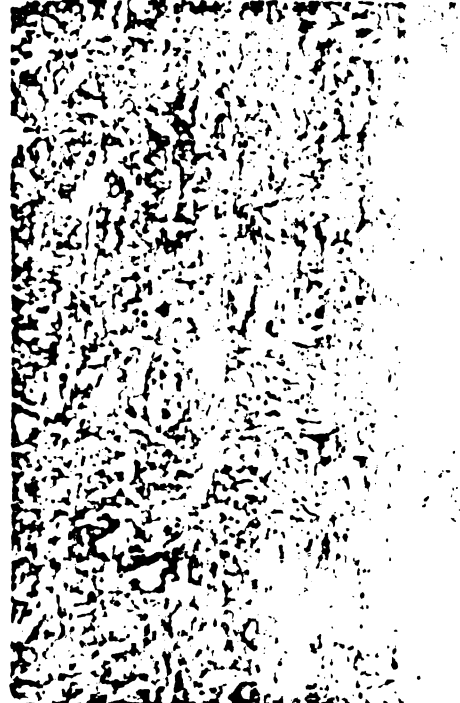


Fig. 3h. Cusătură  
M0 x 100

PLANSA VI (continuare)  
Imbinare realizată manual cu EL9Ni



Fig. 3i. Cusătură  
ME x 5000

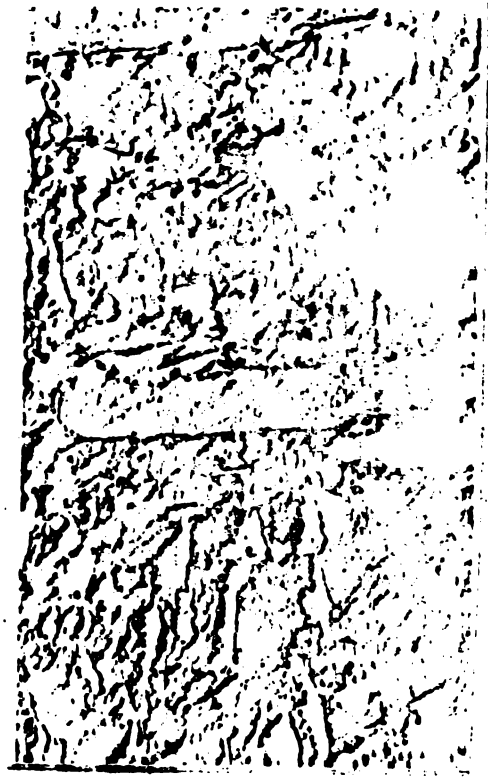


Fig. 3j. Cusătură  
ME x 10000

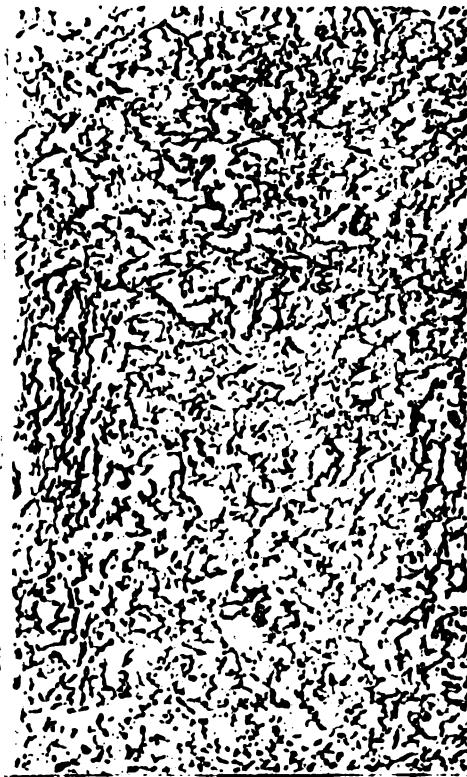


Fig. 3k. ZIT  
ME x 5000

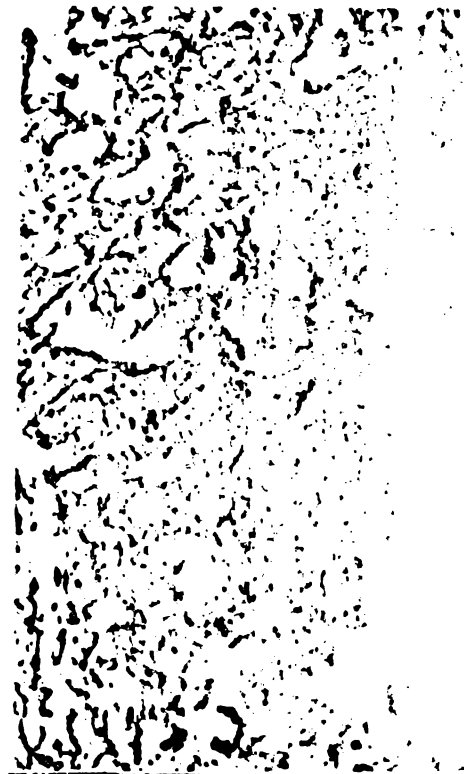


Fig. 3l. ZIT  
ME x 10000



PLANSA VI (continuare)

Imbinare realizată cu EL9Ni și detensionată



Fig. 3m. Cusătură  
ME x 5000



Fig. 3n. Cusătură  
ME x 10000



Fig. 3p. ZIT  
ME x 5000

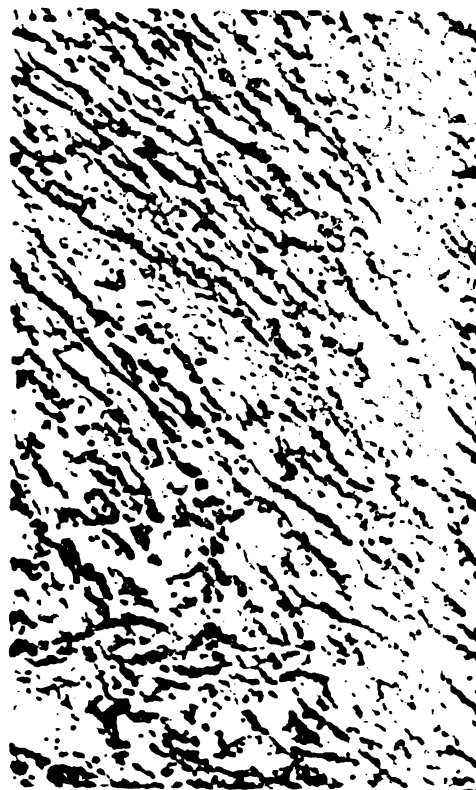


Fig. 3r. ZIT  
ME x 10000

PLANSA VI (continuare)

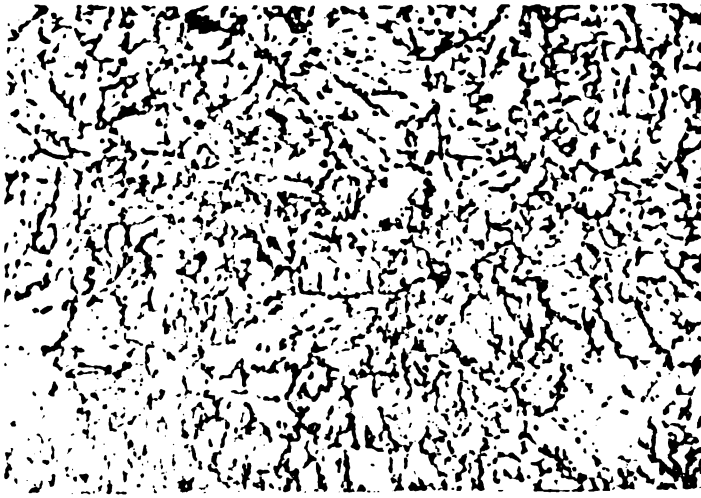


Fig. 4a. MB. MOx500



Fig. 4b. ZIT. MOx500



Fig. 4 îmbinare realizată manual  
cu electrozi ERGL11.1

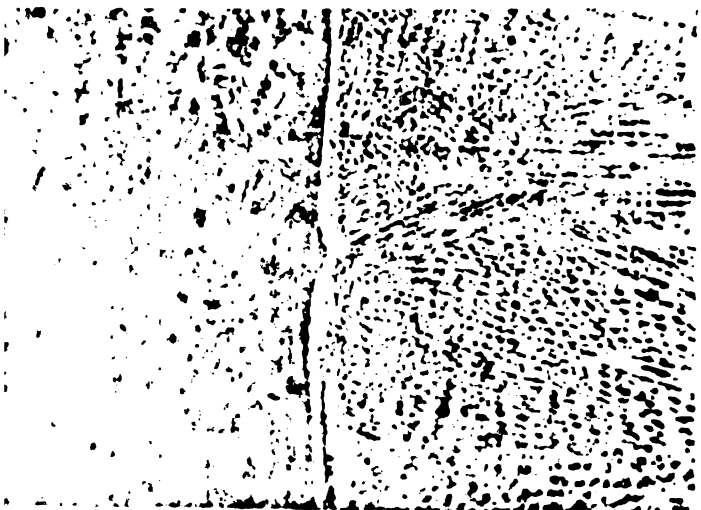


Fig. 4c. ZIT+Cusătură  
MO x 100

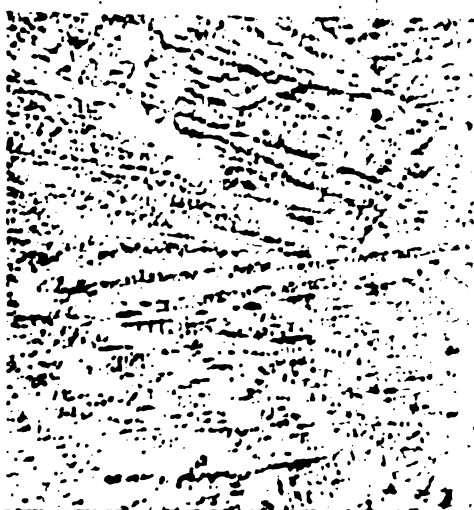


Fig. 4b. Cusătură  
MO x 100

PLANSA VI (continuare)

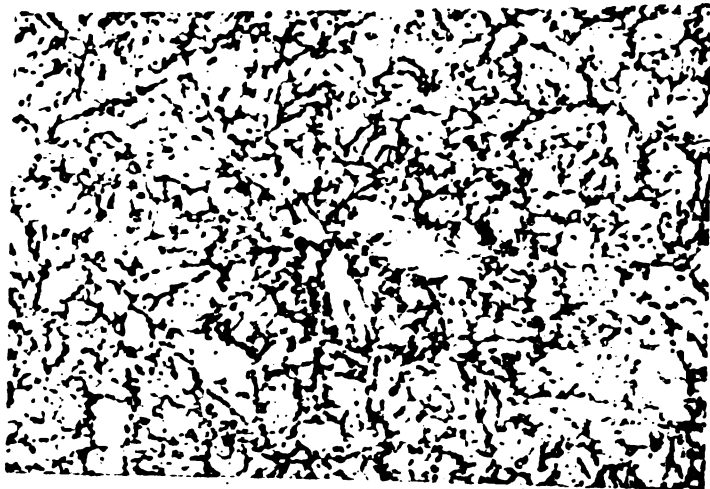


Fig. 5a. MB. M0x500

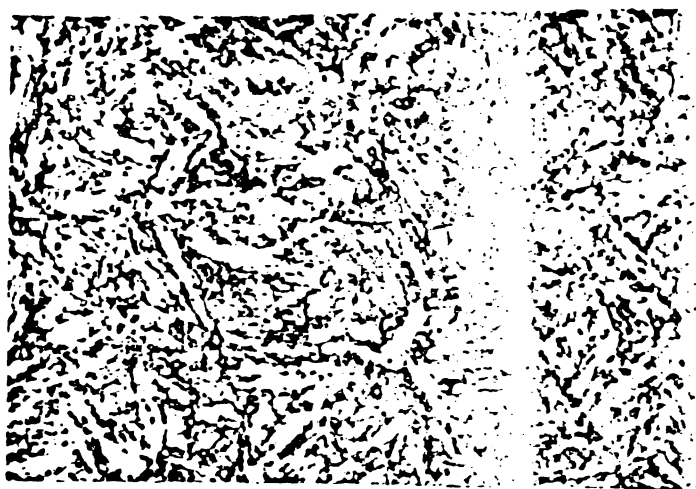


Fig. 5b. ZIT. M0x500

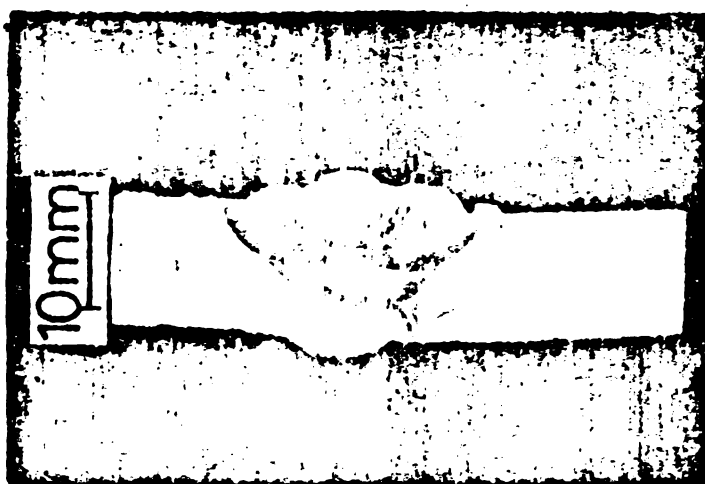


Fig. 5. Imbinarea realizată MIG

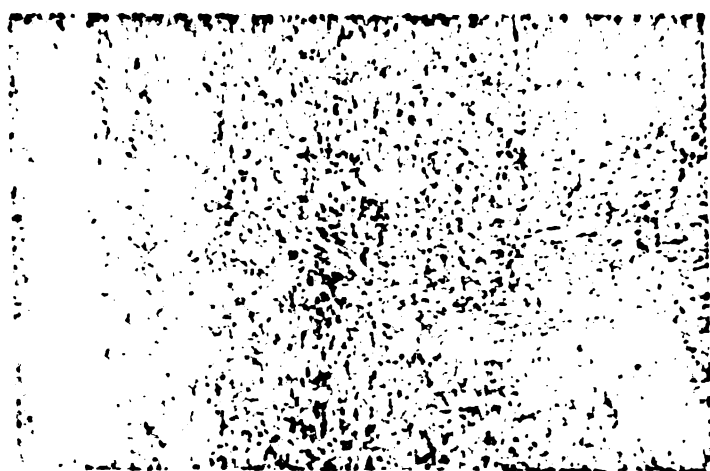


Fig. 5c. ZIT+Cusătură  
M0 x 100



Fig. 5d. Cusătură  
M0 x 100

PLANSA VI (Continuare)  
Imbinare realizată MIG și detensionată

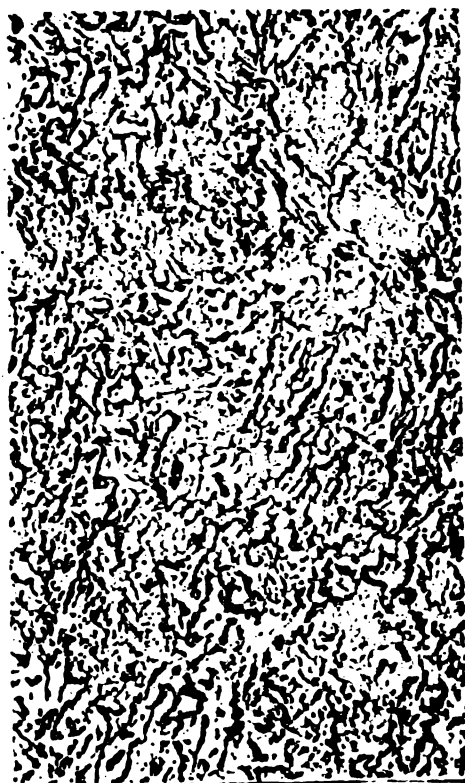


Fig.5e. Cusătură  
ME x 5000

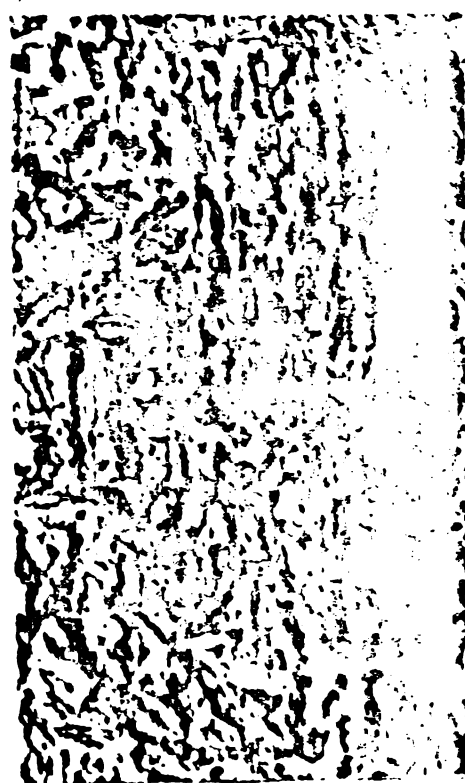


Fig.5f. Cusătură  
ME x 10000



Fig.5g. ZIT  
ME x 5000

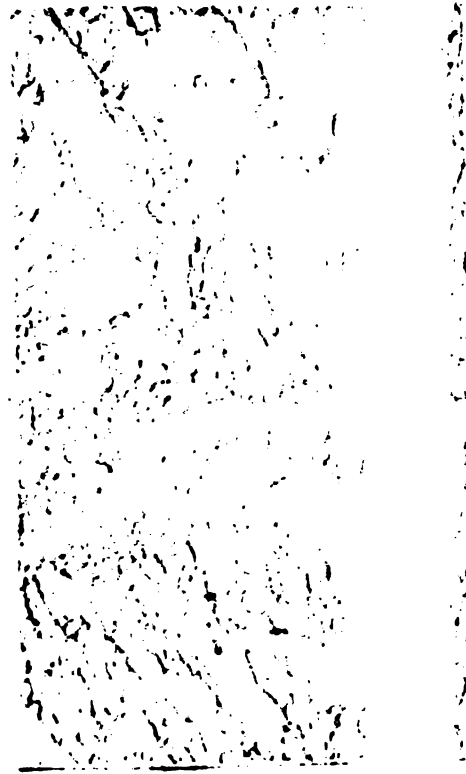


Fig.5h. ZIT  
ME x 10000

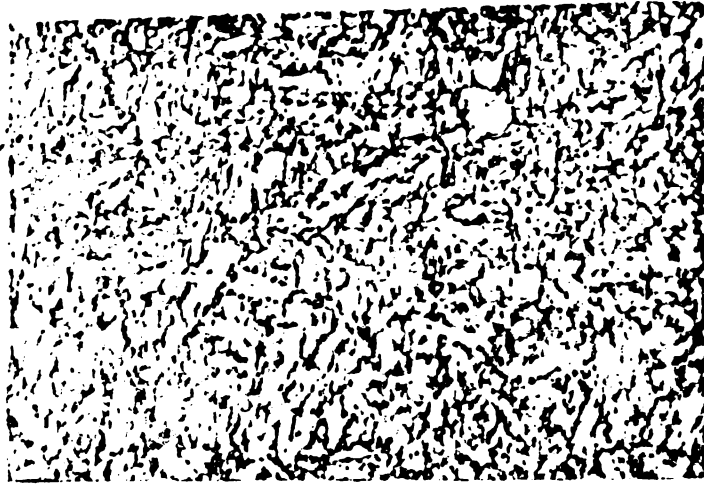


Fig. 6a. MB.MOx500

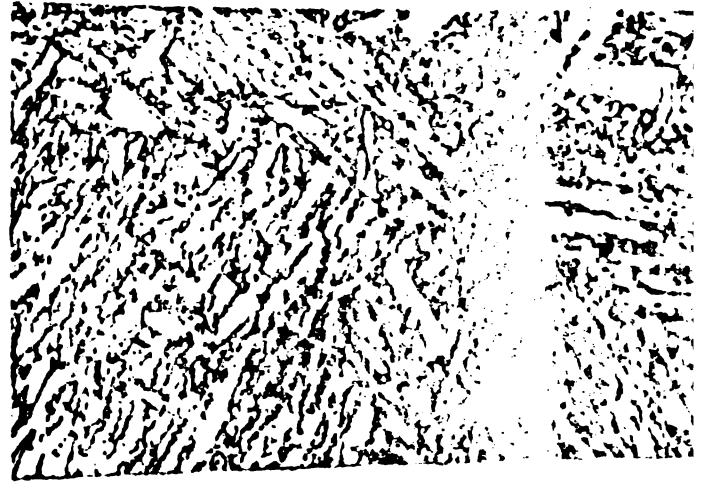


Fig. 6b. ZIT.MOx500

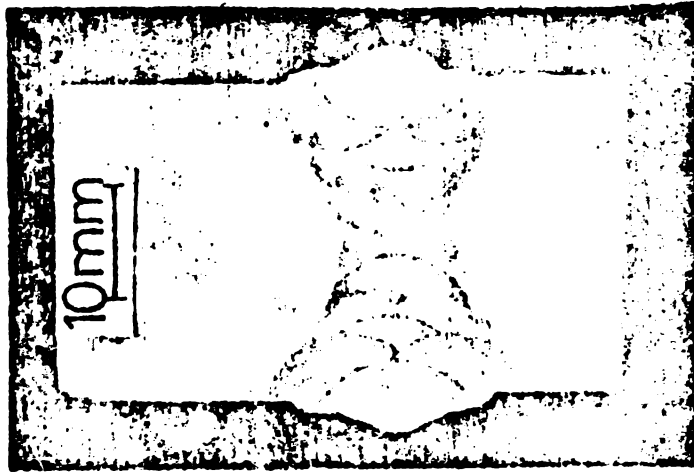


Fig. 6 Imbinare realizată MIG

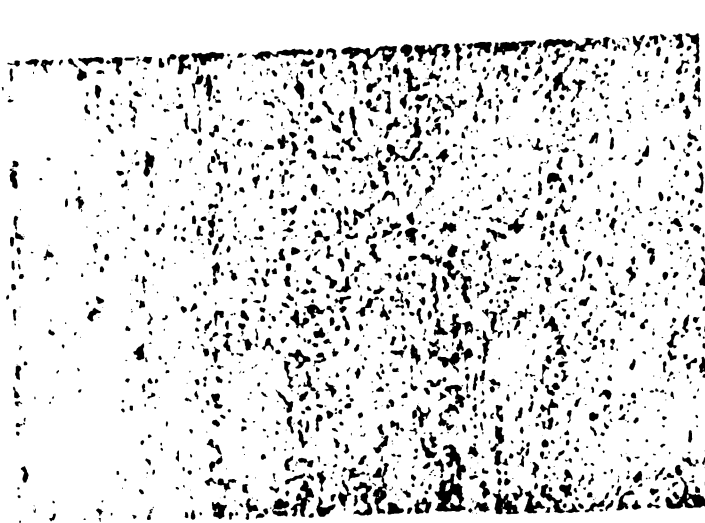


Fig. 6c. Cusătură+ZIT  
MO x 100

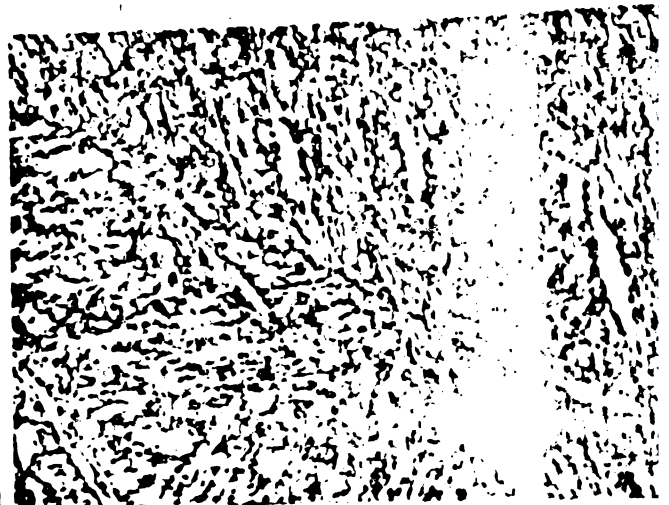


Fig. 6d. Cusătură  
MO x 100

PLANSA VI (continuare)  
Imbinare realizată MIG și detensionată.

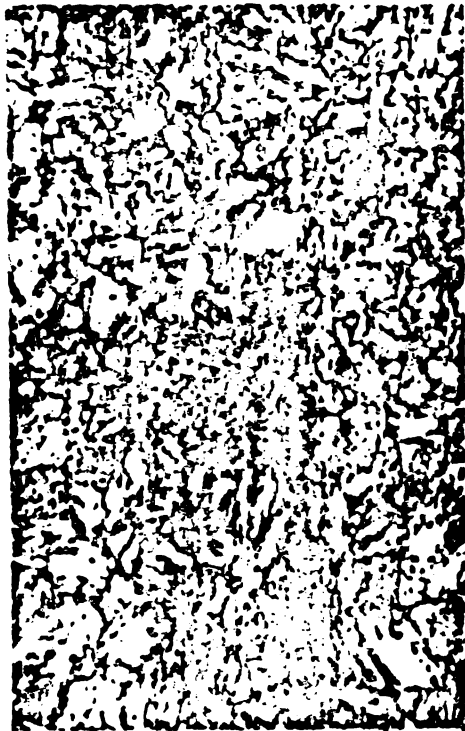


Fig. 6e. MB. M0x500

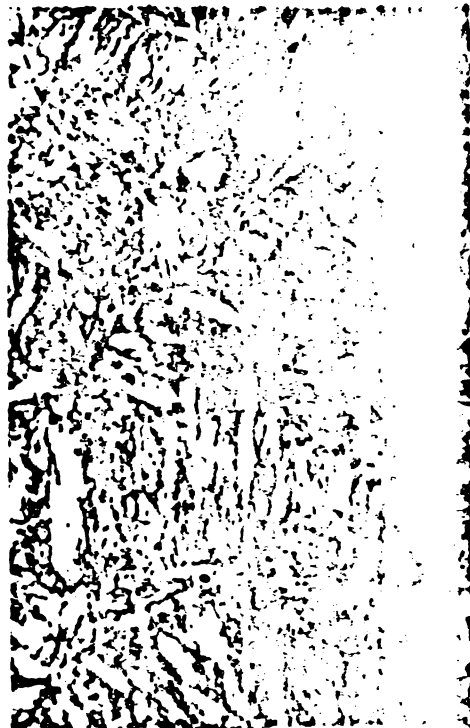


Fig. 6f. ZIT. M0x500

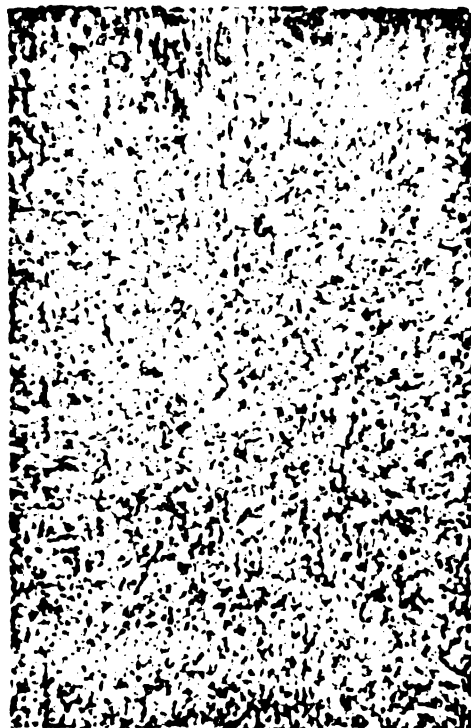


Fig. 6g. ZIT+Cusătură  
Mo x 100

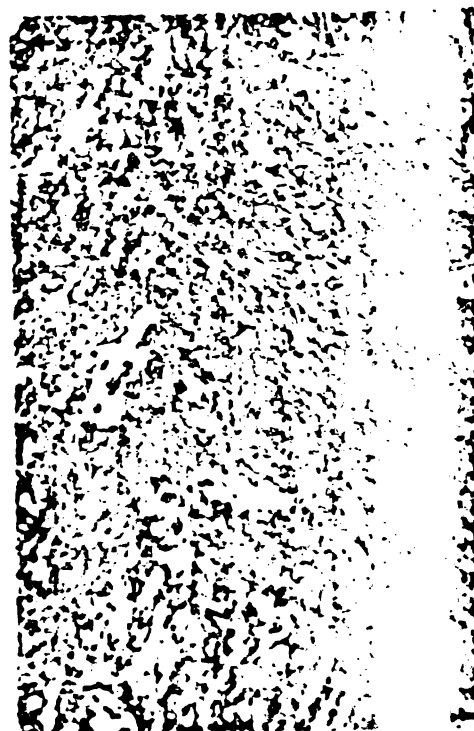


Fig. 6h. Cusătură  
Mo x 100

PLANSA VI (Continuare)  
Imbinare realizată MIG ( $s = 30$  mm)



Fig. 6i. Cusătură  
ME x 5000

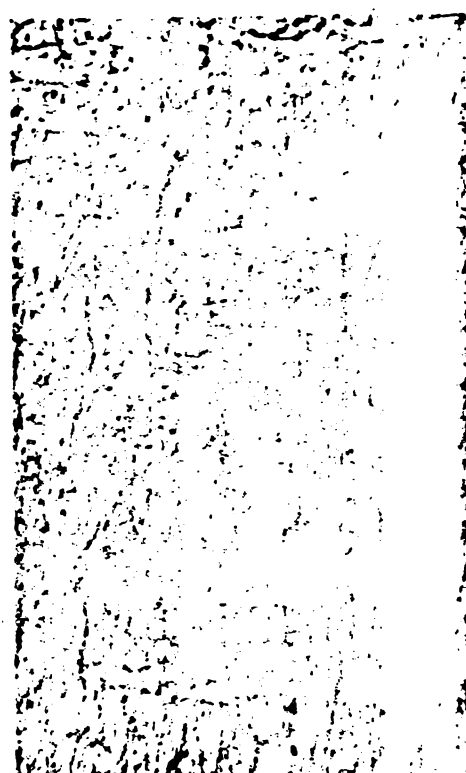


Fig. 6j. Cusătură  
ME x 10000



Fig. 6k. ZIT  
ME x 5000

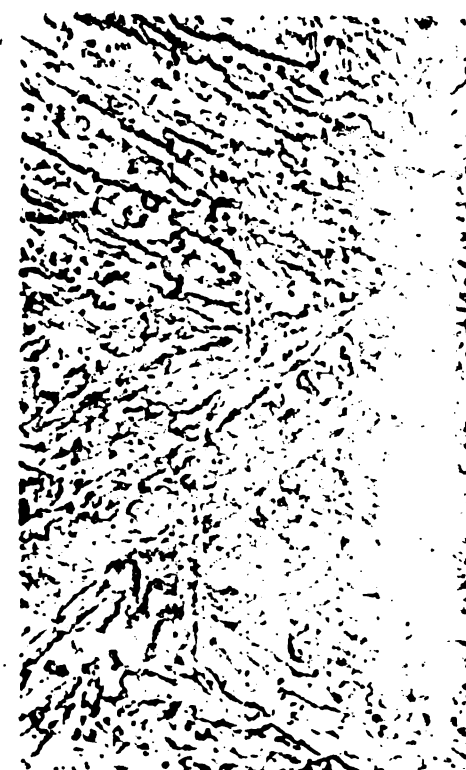


Fig. 6l. ZIT  
ME x 10000

PLAȘA VI (Continuare)  
Imbinare realizată MIG și detensionată ( $s=30$  mm)



Fig. 6m. Cusătură  
ME x 5000

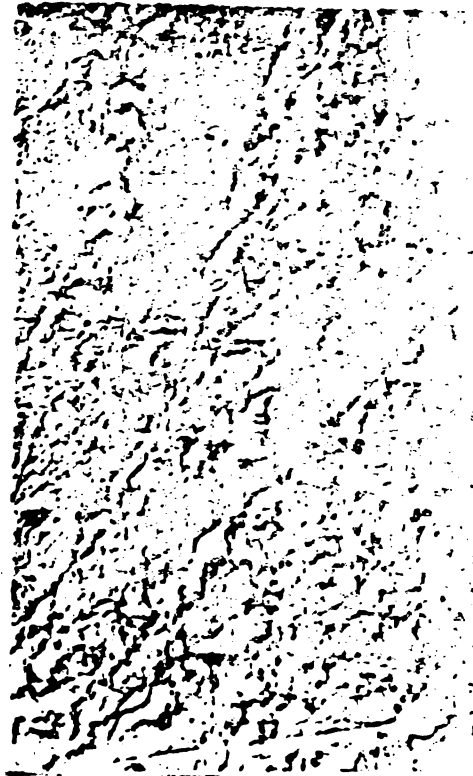


Fig. 6n. Cusătură  
ME x 10000



Fig. 6p. ZIT  
ME x 5000

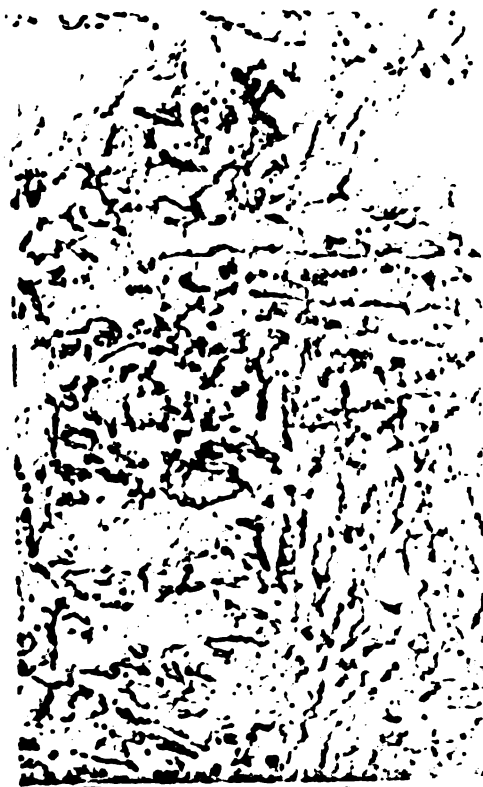


Fig. 6r. ZIT  
ME x 10000



PLANSA VII

Aspecte microfractografice ale probelor încercate

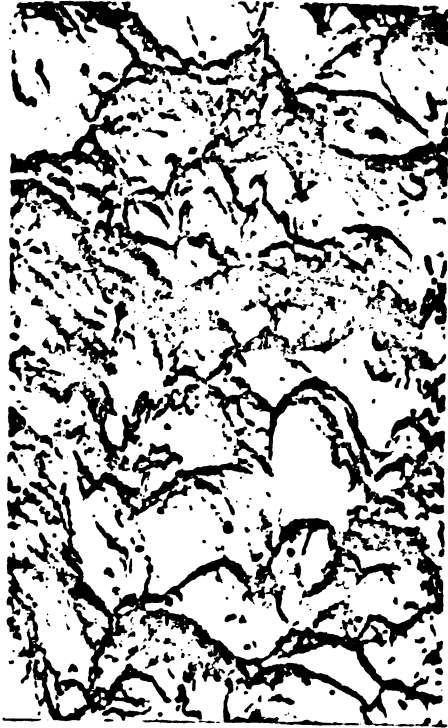


Fig.1.  $T_{inc} = 293^{\circ}K$



Fig.2.  $T_{inc} = 77 K$

Cusătură. Electrozi ELCr25Ni20B



Fig.3.  $T_{inc} = 293^{\circ}K$



Fig.4  $T_{inc} = 77^{\circ}K$

Cusătură. Electrozi EL9Ni.

PLANSA VII (Continuare)



Fig.5.  $T_{inc} = 293^{\circ}K$



Fig.6.  $T_{inc} = 77^{\circ}K$

Cusătură. Electrozi ERGL11.1



Fig.7.  $T_{inc} = 293^{\circ}K$



Fig.8.  $T_{inc} = 77^{\circ}K$

Cusătură realizată MIG cu sîrmă cu 9%Ni

Crestătura orientată perpendicular în raport cu suprafețele tablelor îmbinate cuprinde însă cel puțin două straturi iar materialul din vârful crestăturii este supus la întindere într-un plan perpendicular pe suprafețele menționate.

Apare deci o diferență atât valorică cât și ca semnificație fizică între cele două moduri de orientare. Din acest motiv recomandările și prescripțiile cu privire la reziliența cusăturii impun cu precădere epruvete cu crestătura perpendiculară pe suprafața tablelor ce se îmbină, încercarea de reziliență în acest caz pretinzând o sensibilitate sporită în comparație cu cea pe epruvete cu crestătura orientată paralel cu suprafețele tablelor.

Pornind de la aceste considerente toate încercările experimentale au fost făcute pe epruvete Charpy V având crestătura orientată perpendicular în raport cu suprafețele tablelor îmbinate.

Majoritatea prescripțiilor privind modul de încercare și acceptare a cusăturii se situează pe poziția ca însușirile acestora să fie la nivelul metalului de bază. Asupra rezilienței KCV (respectiv a energiei de rupere KV) majoritatea valorilor de acceptare se situează în jurul mediei de  $3,5 \text{ daJ/cm}^2$  (respectiv 28 J) cu vederi diferite asupra modului de calcul a mediei și limitei inferioare pentru valorile individuale.

Reziliența și rezistența cusăturii în cazul oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni sînt mult influențate de tipul electrozilor folosiți, respectiv de procedeul de sudare.

Cusătura realizată cu electrozii ELCR25Ni20B dă cele mai ridicate valori ale energiei de rupere la 77 K (64 J) datorită microstructurii sudurii care este fază austenitică, la care dependența energiei de rupere de temperatură este mai mică decît a metalului de bază. În schimb rezistența la rupere și limita de curgere sînt mai scăzute decît la metalul de bază ( $R_m = 65 \text{ daN/mm}^2$  față de  $79 \text{ daN/mm}^2$  la MB și  $R_{0,2} = 42 \text{ daN/mm}^2$  față de  $68 \text{ daN/mm}^2$  la MB).

Cusătura realizată cu electrozii EL9Ni dă valori ale energiei de rupere la 77 K de 18 ... 25 J, valori aflate sub limita inferioară de acceptare în schimb rezistența la rupere se apropie de a materialului de bază ( $R_m = 70 \text{ daN/mm}^2$  față de  $79,1 \text{ daN/mm}^2$  la MB) În acest ultim caz, deși în cusătură apare tot o structură tipică de turnare

datorită modificării rețelei cristaline de la CPC (austenită) la FVC (ferită) apar diferențe în privința numărului de sisteme de alunecare cu implicații în scăderea caracteristicilor de deformabilitate.

Cusătura realizată prin procedeul MIG folosind sîrmă cu 9,6Ni de 1,2 mm dă valori acceptabile ale energiei de rupere la 77 K ( $KV > 30$  J) și rezistența la rupere a îmbinării apropiindu-se de a metalului de bază ( $R_m = 73,3$  daN/mm<sup>2</sup> față de 79,1 daN/mm<sup>2</sup> la MB) ca urmare a omogenității și purității cusăturii MIG comparativ cu cea realizată manual.

Cusătura realizată cu electrozii ERGL11.1 (structură cristalină CPC) dă valori ale energiei de rupere de cca 55 J la 77 K și de cca 90 J la 293 K, valori ale rezistenței la rupere de peste 70 daN/mm<sup>2</sup>, ale limitei de cîrcere de peste 50 daN/mm<sup>2</sup> și alungirea de peste 25%.

Deși apar valori ridicate ale durității în ZIT-ul probelor simulate (peste 350 HV5) ZIT-ul se comportă corespunzător, energia de rupere la 77 K fiind în toate cazurile peste 30 J. Valorile ridicate ale durității se datoresc conținutului ridicat în carbon al oțelului cercetat ( $C \approx 0,145\%$ ) care face să apară în structură martensită indiferent de viteza de răcire aplicată. Martensita aliată cu Ni este însă o martensită cubică care este mult mai plastică și tenace decît martensita oțelurilor obișnuite.

Scăderea energiei de rupere a ZIT-ului față de a metalului de bază este o consecință a structurii bainito-martensitice rezultate în urma răcirii la sudare.

Energia de rupere a ZIT-ului simulat este mai mică decît a ZIT-ului real datorită faptului că la sudarea multistrat, stratul de sus ulterior produce o normalizare a stratului de sus anterior deci o finisare a granulației. Ca urmare a acestui fapt și duritatea ZIT-ului real este mai mică decît a ZIT-ului simulat.

Tratamentul termic de detensionare în toate cazurile uniformizează în ZIT și cusătură structurile reducînd duritățile HV5 la nivelul metalului de bază în plaja de valori de 230...270 daN/mm<sup>2</sup>. De asemenea prin detensionare cresc valorile energiei de rupere atât la 293 K cît și la 77 K creșteri mai semnificative obținîndu-se la 293 K.

Deși nu apar diferențe semnificative între valorile măsurătorilor de duritate obținute pe probe simulate respectiv simulate și detensionate folosind diferite energii liniare la scară microscopică fină se obțin, anumite aspecte caracteristice legate de

orientarea, distribuția carburilor și dimensiunea cristalelor de ferită respectiv martensită (Planșa I, V și VI).

### CONCLUZII

Încercările mecanice de duritate și încovoiere prin șoc la 293 și 77 K coroborate de analizele metalografice, electrice și microfractografice pe probe simulate cu diferite energii liniare (8...40 KJ/cm) precum și pe probe sudate din oțeluri orientative aliate cu 9%Ni relevă următoarele :

- la energii liniare mici de sudare corespund valori mici ale parametrului răcirii  $t_{8/5}$  (viteză mare de răcire) situație în care gradul de omogenizare al austenitei fiind mic, numărul centrelor de cristalizare fiind mare structura rezultată va fi fină și în consecință se obțin proprietăți mecanice corespunzătoare;

- pe măsură ce crește energia liniară parametrul răcirii  $t_{8/5}$  crește (viteze mici de răcire gradul de omogenizare al austenitei este mai ridicat stabilitatea la transformare crește și structura rezultată va fi formată din cristale de dimensiuni mai mari;

- la aceeași energie liniară deci  $t_{8/5}$  constant pe măsură ce crește temperatura de vîrf ( $T_V = 1273, 1473, 1623$  K) grăunțele de austenită crește, procesul de transformare în stare solidă se desfășoară într-un timp mai scurt și în timpul de menținere grăunțele se poate dezvolta. Grăunțele de austenită se uniformizează dimensional atingînd dimensiunea de echilibru și nu mai apare creșterea granulației;

- crescînd energia liniară deși nu apar creșteri ale granulației datorită stării de tensiuni din material, materialul devine fragil. Mai mult sînt situații cînd pot apărea în locurile cu defecte de material topiri locale la limita grăunților;

- tratamentul termic de detensionare în toate cazurile conduce la descompunerea structurii bainito-martensitice în ferită și carburi, grăunții de ferită păstrîndu-și caracterul acicular;

- deși nu apar diferențe semnificative între duritățile obținute folosind pentru simulare energii liniare cuprinse între 8...40KJ/cm la scară microscopică fină se mențin unele aspecte legate de orientarea, distribuția carburilor și dimensiunea cristalelor de ferită respectiv martensită.

Cercetările experimentale au scos în evidență faptul că oțelurile criogenice aliate cu 9%Ni nu pot fi sudate cu energie liniară mare. Energia liniară trebuiește corelată cu grosimea tablelor sudate și cu parametrul răcirii  $t_{8/5}$ .

Pentru sudare manuală pot fi folosiți electrozii 18Cr25Ni200 din producția curentă și electrozii elaborați experimental SRG11.3 (cu 17%Cr; 12%Ni; 3%Mn; 3,5%W) iar pentru sudarea MIG aliați cu 9%Ni de 1,2 mm diametru.

## CAPITOLUL V

### CONSIDERATII FINALE, CONTRIBUTII ORIGINALE SI PROBLEME DE VIITOR

Din coroborarea necesității de asigurare a economiei naționale cu materiale și produse realizate în țară cu dezideratele economice legate de utilizarea rațională a oțelurilor, apare la adevărată amploare importanța cunoașterii comportării mecanice a oțelurilor în domeniul criogenic (la temperaturi sub 233 K).

Oțelurile criogenice aliate cu 9 % Ni au caracteristici de rezistență mecanică superioare oțelurilor inoxidabile austenitice ele utilizându-se cu succes pînă la temperatura de exploatare de 77 K [7;96;97].

Problema elaborării, deformării plastice și a tratamentului termic a acestora în condițiile concrete ale țării noastre a fost studiată și prezentată în lucrările [96; 97; 99; 101].

Pentru punerea în operă a acestor oțeluri se impune aplicarea unor procedee și materiale de sudare care să ofere garanții din punct de vedere al fiabilității și securității produselor, dat fiind utilizarea lor în special în construcții sudate de mare răspundere (rezervoare pentru transportul și depozitarea gazelor lichefiate etc).

Linia modernă la stabilirea procesului tehnologic optim de sudare se bazează pe posibilitățile crescînde de determinare a structurii metalografice din diferite zone ale îmbinării sudate și implicit a însușirilor tehnice a acestora ca atare și în ansamblu.

Pornind de la acest stadiu al cunoștințelor în cadrul lucrării se fundamentează științific morfologia transformărilor structurale din zona influențată termic a oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni românești prin simularea unor cicluri termice (cazul S) și prin suprapunerea peste aceste cicluri a unui tratament termic de detensiionare (cazul S + DT) precum și morfologia transformărilor structurale din zona influențată termic și cusătura îmbinărilor sudate realizate folosind electrozi indigeni, corelarea acestora cu caracteristicile mecanice, în scopul aprofundării cunoașterii mai complete a rezervelor materialului și a stabilirii tehnologiei optime de sudare a acestor oțeluri.

In baza lucrării elaborate se pot preciza următoarele considerații finale, concluzii în ceea ce privesc contribuțiile originale și recomandări pentru viitor.

## 5.1. CONSIDERATII FINALE

- 5.1.1. Oțelurile criogenice aliate cu 9 % Ni și  $C \leq 0,15$  % pot fi utilizate pentru construcții sudate exploatate între 293 și 77 K.
- 5.1.2. Tratamentul termic aplicat semifabricatelor (produselor laminate) înainte de sudare constă din recoacere la  $1173 \pm 10$  K / 2 h / cuptor urmat de călire la  $1083 \pm 10$  K / 2 min/mm/apă + revenire la  $848 \pm 10$  K / 2 h/aer.
- 5.1.3. Caracteristicile mecanice obținute în urma tratamentului termic de călire și revenire fiind :
- a. La temperatura de 293 K
- $$R_m = 76,7 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} ; R_{0,2} = 71,4 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} ; Z = 69,7 \% ;$$
- $$A_5 = 20,5 \% ; KCV = 15,2 \frac{\text{daJ}}{\text{cm}^2}$$
- b. La temperatura de 77 K
- $$R_m = 108,2 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} ; R_{0,2} = 104,9 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} ; Z = 66,3 \% ;$$
- $$A_5 = 18,4 \% ; KCV = 6,8 \frac{\text{daJ}}{\text{cm}^2}$$
- 5.1.4. Structura rezultată în urma tratamentului termic de călire și revenire este formată din ferită aliată cu Ni și precipitări de carburi de tip cementitic.
- 5.1.5. Cercetările efectuate pe table cu grosimea de 12 și 30 mm din oțel criogenic cu 9 % Ni atestă că preîncălzirea nu este necesară, confirmându-se astfel cele prezentate în literatura de specialitate că table din oțel criogenic cu 9 % Ni pot fi sudate fără preîncălzirea pînă la grosimea tablelor de 50 mm 30 ; 47.
- 5.1.6. La sudarea manuală pot fi folosiți electrozii indigeni ELCr25Ni20B din producția curentă precum și electrozii austenitici elaborați experimental cu 17 % Cr; 12 % Ni, 8 % Mn și 3,5 W iar pentru sudarea MIG sîrmă cu 9 % Ni de 1,2 mm.
- 5.1.7. Sudarea se recomandă să se facă cu energie liniară mică (8... 16 kJ/cm) iar la sudarea în mai multe straturi temperatura între treceri să fie sub 373 K.
- 5.1.8. Luînd ca și criteriu valoarea durității de 350 HV5, după sudarea MIG cu sîrmă cu 9 % Ni se recomandă tratamentul termic de detensionare la 848 K / 2 h/aer,
- 5.1.9. Tratamentul termic de detensionare uniformizează în ZIT și cusătură structurile reducînd duritatea la nivelul



metalului de bază . De asemenea prin detensionare se reduc tensiunile interne și cresc valorile energiei de rupere ale ZIT-ului și cusăturii atât la 293 K cât și la 77 K, creșteri mai semnificative obținându-se la 293 K.

## 5.2 CONTRIBUTII ORIGINALE

5.2.1. Cercetarea influenței energiei liniare în procesul de sudare asupra caracteristicilor mecanice ale îmbinărilor sudate realizate din oțel criogenic aliat cu 9 % Ni . Pe baza acestor cercetări s-au stabilit limitele maxime ale energiei liniare recomandate pentru table cu grosimea de 12 ... 30 mm.

Deși duritatea în zona influențată termic a depășit la unele probe 350 HV5 îmbinarea sudată s-a comportat satisfăcător atât la temperatura de 293 cât și la 77 K, energia de rupere KV fiind mai mare de 35 J, iar analiza microfractografică a suprafețelor de rupere relevând la ambele temperaturi de încercare o rupere ductilă. Pe baza acestora s-a tras concluzia că pentru oțelul criogenic aliat cu 9 % Ni duritatea sub cordon nu este singurul criteriu de apreciere a comportării la sudare a acestui oțel .

5.2.2. Cercetînd influența energiei liniare și a temperaturii de vîrf asupra caracteristicilor zonei influențate termic la oțelul studiat s-a ajuns la concluzia că pentru aprecierea comportării metalurgice la sudare, trebuie să se ia în considerare și timpul de răcire între 1073 ... 773 K (800 ... 500°C) ( parametrul răcirii ) notat cu  $t_{8/5}$ . S-au determinat parametrul  $t_{8/5}$  optim ( $t_{8/5} = 4 \dots 20$  s) pentru grosimi de tablă de 12...30mm.

5.2.3. Elaborarea tehnologiei optime de sudare și tratament termic a oțelurilor criogenice aliate cu 9 % pentru grosimi de tablă de 12 și 30 mm. Cu această ocazie s-a pus în evidență o oarecare diminuare a caracteristicilor zonei influențate termic simulate față de cea reală. Această diminuare provine de la faptul că la sudarea multistrat zona influențată termic suferă o normalizare reducîndu-se duritatea și crescînd tenacitatea materialului. Deci se poate afirma că simularea în laborator a ciclurilor termice permite urmărirea modificărilor caracteristicilor mecanice și structurale la nivelul satisfăcătoare de certitudine.

- 5.2.4. Cercetări privind elaborarea unor noi sorturi de electrozi și sârme pentru sudarea electrică manuală și MIG a oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni (EL 9 Ni și ERGL 11.1 cu 17 % Cr, 12 % Ni, 3,5 % W și 8 % Mn precum și sîrmă cu 9 % Ni de 1,2 și 1,6 mm).  
Cu electrozii elaborați s-au realizat îmbinări sudate verificate la șocuri termice între temperaturile de 293 și 77 K și la menținerea de durată. Imbinările sudate experimentate au avut o bună stabilitate nu au apărut modificări structurale și nici diminuări ale energiei de rupere comparativ cu încercarea la 77 K.
- 5.2.5. Prin încercări mecanice și cercetări metalografice optice și electronice s-a demonstrat menținerea plasticității îmbinărilor sudate realizate din oțel criogenic aliat cu 9 % Ni folosind electrozi indigeni, pe tot intervalul de temperaturi analizat, rupturile avînd un pronunțat caracter ductil.
- 5.2.6. Cercetarea corelației dintre energia liniară folosită la sudare și structura din zona influențată termic și cusătură relevă unele diferențieri în ceea ce privește orientarea și distribuția carburilor, dimensiunea cristalelor de ferită respectiv martensită.
- 5.2.7. Examinarea microcompoziției chimice a zonelor caracteristice a îmbinărilor sudate cu ajutorul microsondei electronice a permis studiul variației elementelor componente Fe, Ni, Cr, W. Pe baza examinării efectuate se apreciază că la realizarea legăturii dintre cusătură și metalul de bază o mare influență o au Fe și Ni. Totodată se poate aprecia că fenomenele de segregare ale Ni sînt practic inexistente.
- 5.2.8. Cercetările efectuate cu privire la verificarea tehnologiei elaborate au scos în evidență că la temperatura azotului lichid se obțin  $KV = 30... 50 \text{ J}$  și  $R_m = 65... 70 \text{ daN/mm}^2$  la 293 K, în zona influențată termic și cusătură, valori foarte apropiate de ale metalului de bază ( $KV = 48... 55 \text{ J}$ ;  $R_m = 75... 79 \text{ daN/mm}^2$ ). Aceste rezultate permit obținerea de economie de material și realizarea de instalații criogenice care să lucreze în condiții de siguranță sporită. Totodată se oferă posibilitatea folosirii oțelurilor criogenice aliate cu

9 % Ni și la temperaturi mai joase de 73 K precum și înlocuirea oțelurilor inoxidabile austenitice care au un preț de cost ridicat,

### 5.3. PROBLEME DE VIITOR

Prezenta lucrare nu are și nu poate avea pretenția unei tratări exhaustive a problemei abordate.

Autorul consideră că pe viitor cercetările în domeniul comportării la sudare a oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni să se concentreze asupra următoarelor probleme:

- 5.3.1. Aprofundarea cercetărilor privind studiul influenței conținutului în carbon asupra tenacității și ductilității metalului depus cu electrozi aliați cu 9 % Ni respectiv sîrmă cu 9 % Ni.
- 5.3.2. Inițierea unui program de cercetări privind completarea informațiilor existente despre sudarea automată sub flux a oțelurilor cu 9 % Ni. În acest sens se necesită elaborarea de sîrme de fabricație indigenă cu compoziția chimică apropiată de a MB, avînd un indice economic mai ridicat decît sîrmele de tip INCONEL precum și de fluxuri adecvate.
- 5.3.3. Stabilirea unei corelații între  $\sigma_{cd}$  și KV în cazul oțelurilor criogenice aliate cu 9 % Ni. În acest sens se necesită inițierea unui program de cercetări bazat pe principiile mecanice ruperii materialelor care să se refere la precizarea parametrilor asociați stării critice în domeniile adiacente fisurilor și la descrierea estinderii fisurilor sub acțiunea celor mai diverse forme de solicitare (statică, dinamică, variabilă sau de lungă durată) atît pentru MB în stare călită și revenită cît și pentru ZIT și cusătura realizată cu diferite materiale de adaos.
- 5.3.4. Elaborarea unei norme privind aprecierea comportării la sudare a oțelurilor după  $t_{8/5}$  corelat cu grosimea tablei și energia liniară.

- 5.3.2. Inițierea unui program de cercetări privind completarea informațiilor existente despre sudarea automată sub flux a oțelurilor cu 9%Ni. În acest sens se necesită elaborarea de sârme de fabricație indigenă cu compoziția chimică apropiată de a MB, având un indice economic mai ridicat decât sârmele de tip INCONEL precum și de fluxuri adecvate.
- 5.3.3. Stabilirea unei corelații între  $\sigma_{cd}$  și KV în cazul oțelurilor criogenice aliate cu 9%Ni. În acest sens se necesită inițierea unui program de cercetări bazat pe principiile mecanicii ruperii materialelor care să se refere la precizarea parametrilor asociați stării critice în domeniile adiacente fisurilor și la descrierea extinderii fisurilor sub acțiunea celor mai diverse forme de solicitare (statică, dinamică, variabilă sau de lungă durată) atât pentru MB în stare calită și revenită cât și pentru ZIT și cusătură realizate cu diferite materiale de adaos.
- 5.3.4. Elaborarea unei norme privind aprecierea comportării la sudare a oțelurilor după  $t_{8/5}$  corelat cu grosimea tablei și energia liniară.

BIBLIOGRAPHIE

1. ADRIAN M. - "Tehnologia laminării". E.T. București 1978
2. ALBRITTON O.W., ORR D.E. - "Successful Welding for Low temperature"  
Welding Journal vol.45, nr.12, 1966 p.  
983-984; 987-989.
3. AMIOT P., HOLLAND M., HOCHMANN J., QUIORA P., ROSENZWEIG J. - "Contribution a la mise en oeuvre par soudage des aciers, utilisés aux très basses températures"  
Revue de Metallurgie vol.62, nr.9, 1965 p.835-845.
4. ARIKAWA M. - "Mechanization of welding 9%Ni steels".  
IIS/IIW. XIIB - 164-74.
5. AUSTEN W., MOIDORN C. - "Erfahrungen beim bau eines 30.000 m<sup>3</sup>  
Langer tankts aus stahl X8Ni9 für flüssigerdgas"  
Schweissen U.Schneiden nr.6, 1973, p.210-213
6. BAKER B.H., LUCEY J.A. - "Fabrication of cryogenic pressure vessel"  
British Welding Journal vol.19, nr.5, 1968, p.205-215.
7. BASTIEN P. ș.a. - "L'acier à 9%Ni pour stockage et le transport du gaz naturel liquéfié: Metallurgie et soudage".  
Revue de la Soudure vol.19, nr.1, 1963, p.1-16. Revue de Metallurgie vol.60, nr.1, 1963, p.59-74.
8. BERSCH B., DEGENKOLBE J., HANEKE H.O., MIDDELDORF W. - "Schweissverhalten von nickellegierten Kaltzählen". Messer Griesheim GmbH.  
Schweibünd Schneidtechnik - Sonderdruck 03/78, p.763-778.
9. BERNARD G., PRUDHOMME M. - " Compléments à l'étude des phénomènes thermiques dans les joints soudés"  
Revue de Metallurgie vol.69 nr.7, 1972 p.483-496
10. BERNARD G., GAUTHIER G., PRUDHOMME M. - "La fissuration à froid des aciers en relation avec leur caractéristiques des transformation"  
Métaux Corroison industrie nr.989, 1974 p.3-16.

11. BRISSON J., MAINIER PH.,  
DOLLET J. "Etude de la dureté sous cordon des  
aciers au carbon et faiblement alliés"  
Revue de Métallurgie vol.68, nr.12, 1971  
p.791-808.
12. BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D. - "Cercetarea modificărilor structurale  
în îmbinările sudate din oțel aliat cu  
3,5%Ni folosind electrozi indigeni".  
Cercetări metalurgice vol.18, 1977,  
p.279-286.
13. BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D.,  
DOBROTA I. - "Particularități ale elaborării șirmelor  
din oțeluri criogenice cu 9%Ni folosite  
la fabricarea electrozilor de sudare".  
Buletin științific și tehnic U.P.Tr.Vuia  
Timișoara Fascicola 1, 1980,
14. BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D., - "Comportarea la temperaturi joase a îmbi-  
nărilor sudate din oțeluri criogenice  
aliante cu 9%Ni folosind electrozi indi-  
geni". Sesiunea de comunicări științifi-  
ce 9-11 sept. 1981 ICEM București.
15. BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D. - "Corelația dintre energia liniară, grosi-  
mea tablelor și viteza de răcire la su-  
darea oțelurilor criogenice aliate cu  
9%Ni". Simpozionul de Studiul metalelor  
și tratamente termice Timișoara 11-12  
decembrie 1981, vol.II p.381-388.
16. BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D. - "Influența tratamentului termic de deten-  
ționare asupra proprietăților mecanice  
și structurii îmbinărilor sudate din  
oțel criogenic aliat cu 9%Ni realizate  
prin procedeul MIG". Simpozionul de  
Studiul metalelor și tratamente termice.  
Timișoara 11-12 decembrie 1981 vol.II  
p.389-396.
17. CARTER W.P.,  
HARRISON J.C.. - "9%Nickel steel for LNG application".  
Metal Construction British Welding  
Journal nr.5, 1974, p.158-168
18. CIOGLOV D. - "Mecanica ruperii materialelor"  
Ed. Academiei RSR. București 1977.
19. CHAMBONNET A. - "Les stockages fixes réfrigérés de gaz  
liquéfiés". Soudage et techniques conne-  
xes vol.28, nr.9/10 1974, p.372-384.

20. COLAN H. - "Studiul metalelor"  
Lit. I. P. Cluj-Napoca 1977
21. CONSTANT A., MEYZAUD I., SANZ G. - "New research trends in cryogenic steels with reduced nickel content"  
Aciérs speciaux nr. 18, 1972
22. COULSON J.K. - "Shop manufacturing experience with Nickel-steel".  
Welding Metal Fabrication February 1973.  
p. 47-50.
23. CRICHTON A.B., POST A.H., SOSNIN H. - "Choosing a welding process for LNG piping and vessels".  
Welding Journal nr. 9, 1975, p. 641-646.
24. DAVIES A.C. - "The science and practice of welding".  
Seventh Edition Cambridge University Press 1977.
25. DIETER G.E. - "Metalurgie mecanică".  
E. T. București 1970.
26. DRAGULESCU D., BUDAU V. - "Cercetări privind apariția fenomenului de destrămare lamelară în table din oțeluri românești".  
Construcția de mașini vol. 27, nr. 5, 1975  
p. 200-203.
27. DRUG C. - "Cercetări privind realizarea regimului termic în vederea detensionării după sudare a corpurilor cilindrice agabaritive utilizând gaze de ardere".  
Teză de doctorat 1980, Timișoara.
28. ECHIM I., LUPESCU I., NICOARA L. - "Tehnologii pentru sudarea prin topire a oțelurilor". E. T. București 1974.
29. FREDRIKS H., NAP C., WINDEN H. - "Welding of 9% Nickel steel".  
Metal construction nr. 4, 1977 p. 162-165.
30. FROM K. - "Schweissen von 9% Nickelstahl mit hochnickelhaltigen Zusatzwerkstoffen".  
Schweissen und Schneiden nr. 8, 1973  
p. 288-291
31. GADEA S. ș.a. - "Metalografie" E. D. P. București 1974.
32. GIRALDI V., FARTOLINI M. - "La saldatura acciaio al 3,5% Ni per la costruzione di recipienti in pressione per servizio a bassa temperatura".  
Revista italiană de la Saldatura nr. 1  
1957, p. 3-20.

33. GOLDSTEIN I.E.,  
CERUSNIKOVA G.A. - "Influența nichelului asupra domeniului  
de tranziție a rezilienței oțelurilor  
cu conținut mediu în carbon".  
Metallovedenie i termiceskaia obrabotka  
metallov nr.12,1966
34. GULEAEV A.P. - "Tratamentul termic al oțelului"  
E.T.București 1962.
35. GERU N. - "Teoria structurală a proprietăților  
metalelor". E.D.P.București 1980
36. HAASSEN P. - "Physical Metallurgy" Cambridge University  
Press. London 1978.
37. HANCKE M. - "Wirtschaftliche Materialauswahl für  
geschweisste Bouwerke".  
Schweisstechnik 70, nr.8, 1980, p.163-174.
38. HANNAH P.J. - "ESAB and Kockums collaborate on LNG/LPG  
tanker production".  
Svetsaren nr.2, 1977, p.1-7.
39. HERBIET H. - "Proprietés de l'acier a 9%Ni au cours  
de sa mise en oeuvre"  
Revue de la Soudure nr.1, 1963, p.1-7.
40. HRELESCU M., SAFTA V.,  
PASCU R., MOISE T. - "Investigations on the susceptibility  
to stress relief cracking of the  
22NiMoCr37 steel".  
Doc.IIS/IIW-IX, 1092, 1978.
41. HORII Y., MIZUHASHI N.,  
FUYIMOTA R., NISHI R.,  
SUZUKI, T., ITO T. - "Developments on the welding of 9%Ni  
steel".  
Doc.IIS/IIW - XII-B-137-73.
42. HYSPECKA L.,  
MAZANEC K. - "Etude de la formation de microfissures  
dans la structure martensitique".  
Les mémoires scientifiques de la revue  
de metalurgie nr.1, 1976, p.25-30.
43. ISHIKAWA K.,  
MARUYAMA N. - "Fracture and strength of nit welded  
Fe-13%Ni-3%Mo alloy for cryogenic service  
Revue Cryogenics, october 1978, p.585-589
44. JORDAN D.E.,  
HEATH D.J. - "Gas shielded welding of nickel Steels for  
Cryogenic Applications".  
British Welding Journal nr.1, 1966, p.2-5.
45. KANEDA J.,  
TAKAHASHI H.,  
SUZUKI M. - "Residual stress relief and local  
embrittlement of HAZ in a reactor pressure  
vessel steel".  
Doc.IIS/IIW-IX, 1002.76



46. KAREL V., PAHUTA P.,  
HYSPECKA L.,  
MAZANEK K.
47. KILLING R.
48. KROM M.,  
CONSTANT A.
49. LAFRANCE M.,  
PRUDHHOMME C.,  
MURRY G.,  
CONSTANT A.
50. LANCELOTI G.,  
PEREGO E.,  
REGGI F.
51. LEBEDER D.V.,  
GADZIDALAEV G.A.
52. LEGENDRE P.,  
WACHE X.
53. LOGER J.,  
ROERE G.
54. MACHIN R.
55. MANTEA ST.,  
DULAMITA T.
- "Contribution a la fractographie de la martensite".  
Les mémoires scientifiques de la revue de metalurgie nr.1, 1974, p.17-23.
  - "Stand und Entwicklungstendenzen des Schweissens von Tief temperaturstählen".  
Schweissen u Schneiden nr.9, 1975, p.353-356.
  - "Contribution à l'étude du mode d'action du nickel (jusqu'à 9%) sur les propriétés mécaniques des aciers a basse température.  
Les memoires scientifiques de la revue de metalurgie nr.12, 1961, p.901-914.
  - "Prevision, de la dureté sous cordon d'aciers A52 à partir de l'étude des transformations de l'austénite en fonction de conditions de Soudage manual".  
Revue de Metallurgie vol.65, nr.6, 1968, p.417-425.
  - "Saldatura dell acciaio al 9%Ni costruzione di due subotoi sferici per stoccaggio di ozigeno".  
Revista italiana de la Saldatura nr.6, 1966, p.285-299.
  - "Evolution of the impact toughness, of steels at cryogenic temperatures".  
Problemy Prochnosti vol.5 August 1973.
  - "Recherches experimentales sur la formation d'austenite dans les aciers riches en nickel".  
La revue de metallurgie nr.1 1964, p.33-4.
  - "Construction des grands methaniers à cuves integrées en invar cryogenique".  
Soudage et techniques connexes. vol.30, nr.5/6, 1976 p.183-195.
  - "Welding aspects of 9% Nickel steel".  
Welding Metal Fabrication vol.34 nr.9 1966. p.266-265
  - "Teoria și practica tratamentelor termice"  
E.T. București 1968.

- 56.MG.HENRY.H.I. - "Ship Steel Weldments for Low Temperature Service".  
Veritas Vol.46,nr.5,1976,p.387-393
- 57.MICLOSI V.,  
LUPESCU I. - "Sudarea prin topire a oțelurilor aliate"  
E.T.București 1970
- 58.MILLION A.,  
MILLION C. - "Hidrogenul în oțeluri și în îmbinările  
sudate".Ed.Academiei RSR 1968.
- 59.MITELEA I. - "Contribuții la studiul mecanismului de  
durificare prin tratament termomecanic  
al oțelurilor criogenice cu baza de nichel". Teză de doctorat.Timișoara 1977.
- 60.MITELEA I.,  
TRUSCULESCU M. - "Acțiunea tratamentului termomecanic  
asupra densității de dizlocații în oțelurile  
criogenice aliate cu Ni și Ni-Co"  
Metalurgia nr.2,1976, p.88-92.
- 61.MITELEA I.,  
TRUSCULESCU M. - "Influența gradului de deformare la rece  
asupra martensitei din oțelurile  
criogenice aliate cu Ni și Ni-Co".  
Metalurgia nr.11 1976 p.
- 62.MODIN H.,  
MODIN S. - "Metalurgical Microscopy".  
London,Butterworths,1973.
- 63.MORARIU ST. - "Cercetarea durității îmbinărilor sudate"  
Studii și cercetări de metalurgie  
vol.18 nr.2, 1973, p.195-214.
- 64.MUSCAN AL. - "Energia de rupere,criteriu de apreciere  
a siguranței în funcționare".  
Rev.chimică 29,6,1978,p.580-585.
- 65.NANU A. - "Tehnologia materialelor".  
E.D.P.București 1977.
- 66.OSTLE B. - "Statistics in research". The Iowa  
University,Press,1969,London.
- 67.PANA T. - "Aplicații ingineresti ale mecanicii  
ruperilor". E.T.București,1975.
- 68.PAVEL A. - "Depozitarea gazelor lichefiate".  
Centrul de documentare al industriei  
chimice și petroliere.București,1970.
- 69.PITAND J. - "Quelques progrès effectues au cours de  
ces derniers années dans la metalurgie  
des aciers au nickel". Revue de Meta-  
llurgie nr.6,1963,p.545-546.

70. PITAND J. - "L'operations cryogenics". Revue de Metallurgie nr.1, 1963, p.83-89.
71. POPOVICI VL.  
IVANCENCO AL. - "Utilajele sudării electrice".  
E.D.P. București 1968.
72. POZZOLINI P.F.,  
LOMBARDO G. - "The Role of 9% Nickel steel in the  
transport of LNG". Welding Metal Fabrication February 1973, p.40-46.
73. PUSCHNER M.-  
KILLING R. - "Ein neuer Zusatzwerkstoff zum Schweißen  
des Kaltzähnen 9% Nickelstahles X8Ni9".  
Schweissen u. Schneden nr.5, 1965, p.207-211.
74. RADU D., BUDAU V.,  
TRUSCULESCU D. - "Contribuții privind sudarea oțelurilor  
criogenice aliate cu 3,5% Ni folosind  
electrozi indigeni". Sesiunea de comunicări  
științifice organizată în cadrul  
festivalului "Cîntarea României" ISIM  
Timișoara 28-29 aprilie 1977.
75. RIKALIN N.N. - "Rascheti teplevix procesov pri svarke  
Moskova, Mașghiz, 1951.
76. SAVAGE W.F.,  
NIPPES E.,  
MUSHALA M.C. - "Copper - contamination: cracking in the  
weld heat affected zone".  
Welding Journal, vol.57, nr.5, 1978,  
p.145-152<sub>s</sub>.
77. SALAGEAN T. - "Fenomene fizice și metalurgice la sudarea  
cu arcul electric a oțelurilor"  
Ed. Academiei R.P.R. București, 1963
78. SALAGEAN T. - "Statistica în sudură". Ed. ODPT, 1973.
79. SALAGEAN T. - "Oțeluri pentru structuri sudate".  
Ed. Pacla, 1974.
80. SALAGEAN T. - "Sudarea cu arcul electric"  
Ed. Pacla, 1977.
81. SALAGEAN T.,  
BOARNA C.,  
DENELBANU D. - "Reziliența cusăturilor la sudarea oțelurilor  
slab aliate". Studii și cercetări de metalurgie. Tom.17, nr.2, 1972.
82. SCHUMANN H. - "Metalurgie fizică". E.T. 1962.
83. SCHWARTZBERG P.R. - "Selecting structural materials for  
cryogenic service". Metal Progress  
vol.96, July 1969, p.52-57.

84. SELMEREANU H. - "Fragilizarea tenso-termică în ansamblul fenomenelor care determină comportarea la sudare a oțelurilor carbon și slab aliate cu mangan pentru structuri sudate de mare rezistență".  
Teză de doctorat. Timișoara, 1972.
85. SPAEDER G.E.,  
MAJETHICH J.,  
BRICKNER K. - "New-steels has cryogenic potential".  
Metal Progress vol.96, 1969, p.57-58.
86. STOIAN T.,  
VARJANDAN E.,  
BUDAU V. - "Sudarea unor oțeluri cu rezistență mărită". Lucrările sesiunii tehnico-stiințifice consacrate aniversării a 220 de ani de atestare documentară a industriei siderurgice hunedorene și a 90 de ani de la punerea în funcție a primului furnal la Hunedoara. Hunedoara 16-18 mai, 1974, p.551-558.
87. SURGEANU I. - "Electrozi, șirme și fluxuri pentru sudare". Ed. Facla 1976.
88. SUZUKI H. - "Les nouveaux acier japonais á haute resistance utilisés pour les construction soudées de grandes dimensions".  
Soudage et techniques connexes nr.3/4-1977.
89. TACHE A.M.,  
CARTIS I.,  
MITELEA I. - "Das anlassverhalten des 3,5%Ni haltigen Tieftemperaturstahls". Symposium Werformung und Bruch 24-27 August 1976 in Magdeburg D.D.R.
90. TAMURA H.,  
IAMADZAKI I.A.,  
KONO K. - "Svarka stalei ispolizuemih pri muzkih temperaturax".  
Mașinostroenie. Moskova, 1978.
91. TEODORESCU C.C.,  
MOCANU D.R., BUGA M. - "Imbinări sudate".  
B.T. 1973.
92. TENGE P. - "Materials for LPG and LNG Tanks".  
Veritas vol.19, nr.72, 1973, p.12-15.
93. THARBY R.H. - "Welding consumables for 9% Nickel steel  
Welding Metal Fabrication nr.2, 1973  
p.51-62.

94. THARBY R.H.,  
HEATH D.J.,  
FLANNERY J.W. - "L'acciaio al 9%Ni sue caratteristiche e saldatura". Rivista italiana della Saldatura nr.6, 1976, p.378-390.
95. THORNEYCROFF D.R.,  
HEATH D.J. - "Further aspects of the Welding of 9% Nickel steel". Welding Metal Fabricatio nr.2, 1963, p.3-14.
96. TRUSCULESCU M. - "Studiul comportării oțelurilor aliate cu 9%Ni, 4%Co folosite la temperaturi joase". Teză de doctorat Timișoara 1967
97. TRUSCULESCU M. - "Contribuții la studiul oțelurilor aliat cu 9%Ni folosite la  $-196^{\circ}\text{C}$ ". Buletin științific și tehnic I.P.Tr.Vuia Timișoara Tom 11(25), 1966. Seria mecanică.
98. TRUSCULESCU M. - "Studiul metalelor". EDP. București 1977.
99. TRUSCULESCU M.,  
ISREMIA A. - "Unele considerații asupra elaborării și deformării plastice a oțelurilor criogenice, tip 12N90 și 12N90Co40". Metalurgia vol.27, nr.8-9, 1975, p.401-405
100. TRUSCULESCU M.,  
TACHE A.M.,  
MITELEA I., BUDAU V. - "Studiul metalelor. Tehnici de laborator Ed.Facla 1977.
101. TRUSCULESCU M.,  
TACHE A.M.,  
MITELEA I., BUDAU V. - "Studiul documentar asupra materialelor folosite la temperaturi joase  $-50... -200^{\circ}\text{C}$ ". Protocol I, I.P.Tr.Vuia Timișoara, 1975.
102. TRUSCULESCU M.,  
BUDAU V.,  
MITELEA I. - "Cercetări asupra rezilienței îmbinărilor sudate din oțeluri criogenice aliate cu Ni-Co". Cercetări metalurgice vol.17, 1976, p.373-385.
103. TRUSCULESCU M.,  
BUDAU V., CARTIS I.,  
RADU D., TRUSCULESCU D. - "Cercetări asupra structurilor sudate din oțeluri criogenice aliate cu 2,5 și 9%Ni. Lucrările colocviului de supraconductibilitate și crioelectrotehnică. Craiova 14 decembrie 1977, p.262-280.
104. TRUSCULESCU M.,  
BUDAU V.,  
MITELEA I. - "Cercetarea modificărilor structurale a probelor din oțeluri criogenice aliate cu 9%Ni în urma simulării ciclurilor termice de la sudare". Buletin științific și tehnic I.P.Tr.Vuia Timișoara, fascicola 1, 1979 Seria mecanică.

105. TRUSCULESCU M.,  
CARTIS I.,  
MITTELEA I.,  
BUDAU V. - "Studii și cercetări asupra tehnologiilor  
de fabricație a rezervoarelor, navelelor  
de transport gaze lichefiate".  
Protocol I 1980, Protocol II 1981  
I.P.Tr.Vuia Timișoara.
106. TUMMERES G.E. - "Influence of the cooling rate after  
heat treatment on the impact properties  
of 9%Ni steel".  
Doc IIS/IIW-X-343-65.
107. TENCHEA P. - "ATLAS de încercări mecanice ale îmbină-  
rilor sudate". Oficiul de informare do-  
cumentare pentru construcția de mașini  
1980.
108. UWER D.J.,  
DEGENKOLBE J. - "Thermal cycles in arc welding calcula-  
tion of cooling times".  
Doc. IIS/IIW-IX, 987, 1976.
109. VAN STEYN B.J. - "Some experiences in the welding of 9%Ni  
steels". Revue de la soudure Bruxelles  
nr.1, 1977, p.15-21.
110. WATANABE M.,  
TANAKA I.,  
WATANABE I. - "Feritic Filler Material For Gas-Shielded  
Metal Arc Welding of 9% Nickel steel".  
Welding Metal Fabrication nr.5, 1973,  
p.167-176.
111. WEINBERG P. - "Tools and Techniques in physical Meta-  
llurgy. Vol.1+2. New-York. 1970.
112. WELLAND G.W. - "Producing Strong Welds in 9% Nickel steel"  
Welding Research supplement Sept. 1978  
p.263-271.
113. ZENNER G.H. - "Metal progres", oct. 1961 p.110-115.
114. x x x - "Revue generale du froid" Nr.7, 1970.
115. x x x - "Effects of Low Temperatures on Structural  
Metals"- National Aeronautics and Space  
Administration 1966.
116. x x x - "ASTM 353-72. Standard Specification for  
Pressure Vessel plates, alloy steel,  
9 percent Nickel double normalized and  
tempered". AMERICAN NATIONAL STANDARD  
G35-3 (American Standard Institute)  
p.229-231.

117. x x x - "ASTM 353-73. Standard Specification for Pressure Vessel plates, alloy steel quenched and tempered 8 and 9 percent Nickel". AMERICAN NATIONAL STANDARD G35-20". (American National Standard Institute) p.414-416.
118. x x x - "Metallovedenie i termiceskaja obrabotka metalov". Tom.7.Moscova 1973.
119. x x x - "Metals reference book? London Butterworths,1976.
120. x x x - "Specification for unifeed fusion welded pressure vessels", BS 5500:77, London British Standards Institution 1976.
121. x x x - "VEREINIGTE EDDEL-STÄHLWERKE A.G. Schwaben der stähle für tiefe Temperaturen WISSENSWERTES FÜR DEN SCHWÄBISCHER, Wien,1977 p.184-186.
122. x x x - "Courbes dureté/paramètre de refroidissement en conditions de soudage." Recueil établi à l'IRSID". Publications de INSTITUT de RECHERCHES de la SIDERURGIE FRANÇAISE (IRSID) 1977.
123. x x x - "Steels for low-temperature service in Japan". IISI Promotion Committee on april 9, 1975.Nippon Steel Corporation.