UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIŞOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. Gabriella Magdalena Mészár

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător ştiinţific

Prof. Livius Miloş

2009

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIŞOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. Mészár Gabriella Magdalena

TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții privind reducerea deformațiilor şi tensiunilor la sudarea tablelor subțiri utilizate în construcția vagoanelor

Conducător ştiințific

Prof. Livius Miloş

2009

CUPRINS

Pag.

1. INTRODUCERE 6

2. PROCEDEE DE SUDARE UTILIZATE LA SUDAREA TABLELOR SUBȚIRI 9

2.1. Sudarea manuală cu electrozi înveliți 9
2.2. Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG 10
2.3. Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG 12
2.4. Sudarea prin presiune în linie 13

3. DEFORMAȚII ŞI TENSIUNI APĂRUTE LA SUDAREA TABLELOR SUBȚIRI 15

3.1. Deformații 15
3.1.1. Modelul structural al apariției deformațiilor 15
3.1.2. Tipuri de deformații 16
3.1.2.1. Contracția longitudinală 20
3.1.2.2. Contracția transversală 20
3.1.2.3. Deformația unghiulară 22
3.1.3. Efectele deformațiilor asupra structurii sudate 23
3.2. Tensiuni 23
3.2.1. Modelul structural al apariției tensiunilor 23
3.2.2. Tipuri de tensiuni 24
3.2.3. Efectele tensiunilor asupra structurii sudate 26
3.3. Metode de reducere a tensiunilor şi deformațiilor 27
3.3.1. Considerații generale 27
3.3.1.1. Măsurile constructive 27
3.3.1.2. Măsurile tehnologice 28
3.3.2. Ordinea de sudare 28
3.3.2.1. Ordinea prinderilor provizorii 28
3.3.2.2. Ordinea de sudare propriu zisă 30
3.3.3. Pretensionarea 33
3.3.4. Preîndoirea 33
3.3.4.1. Ciocănirea 34
3.3.4.2. Încălzirea cu flacără 34
3.3.5. Sudarea în dispozitive 35
3.3.6. Preîncălzirea 36
3.3.7. Detensionarea 36

4. METODE DE ÎNDREPTARE A TABLELOR SUBȚIRI 38

4.1. Considerații generale 38
4.2. Clasificarea metodelor de îndreptare 41
4.2.1. Îndreptarea cu flacără oxigaz 42
4.2.2. Îndreptarea cu arc electric cu electrod învelit 43
4.2.3. Îndreptarea cu arc electric cu electrozi de cărbune 43
4.2.4. Îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale 44
4.2.5. Îndreptarea prin metode mecanice 45
4.3. Îndreptarea la rece 45
4.3.1. Ciocănirea 46
4.3.2. Laminarea 47
4.4. Îndreptarea la cald 48
4.4.1. Îndreptarea prin încălziri punctiforme 49
4.4.2. Îndreptarea prin încălzire continuă 50
4.5. Îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale 52

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR TABLELOR SUBȚIRI 55

5.1. Cercetări privind sudarea manuală cu electrozi înveliți 55
5.1.1. Determinarea deformațiilor 56
5.1.2. Concluzii privind deformațiile 63
5.2. Cercetări privind sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MAG 64
5.2.1. Sudarea MAG 64
5.2.1.1. Determinarea deformațiilor 65
5.2.1.2. Concluzii privind deformațiile 67
5.2.2. Sudarea MAG în curent pulsat 68
5.2.2.1. Determinarea deformațiilor 69
5.2.2.2. Concluzii privind deformațiile 72
5.3. Cercetări privind sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG 73
5.3.1. Determinarea deformațiilor 73
5.3.2. Concluzii privind deformațiile 75
5.4. Cercetări privind sudarea prin presiune în linie 76
5.4.1. Determinarea deformațiilor 76
5.4.2. Concluzii privind deformațiile 77
5.5. Concluzii generale privind sudarea tablelor subțiri din construcția vagoanelor de călători 78
5.5.1. Schelet perete lateral 80
5.5.2. Tabla învelitoare 80
5.5.3. Perete lateral-acoperiş 81

5.6. Concluzii privind contracţia transversală şi longitudinală obţinută cu diferite procedee de sudare 82
5.7. Măsuri de reducere a deformaţiilor la sudarea pereţilor vagoanelor de călători utilizând diferite procedee de sudare 83

6. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎNDREPTAREA TABLELOR SUBŢIRI 85

6.1. Stabilirea programului de experimentări 85
6.2. Determinarea experimentală a dilataţiei şi contracţiei cauzată de aplicarea unor rânduri de sudură 86
6.2.1. Instalaţia de măsurare 86
6.2.2. Măsurători şi rezultate 88
6.3. Determinarea experimentală a dilataţiei şi contracţiei cauzate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără oxiacetilenică 95
6.3.1. Instalaţia de măsurare 96
6.3.2. Măsurători şi rezultate 96
6.4. Determinarea experimentală a forţelor respectiv ondulării tablelor apărute în epruvete rigidizate la aplicarea unor rânduri de sudură . 102
6.4.1. Instalaţia de măsurare 102
6.4.2. Măsurători şi rezultate 105
6.5. Determinarea experimentală a forţelor respectiv ondularea tablelor rigidizate ocazionate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără 110
6.5.1. Instalaţia de măsurare 110
6.5.2. Măsurători şi rezultate 111

7. OPTIMIZAREA ÎNDREPTĂRII TABLELOR SUBŢIRI 116

7.1. Optimizarea îndreptării peretelui lateral 116
7.1.1. Îndreptarea cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă 117
7.1.2. Îndreptarea cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliţi şi răcire cu apă 120
7.1.3. Îndreptarea cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi de cărbune şi răcire cu apă 123
7.1.4. Îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale 125
7.1.5. Îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale 126
7.2. Concluzii privind optimizarea îndreptării tablelor subţiri 127
7.2.1. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subţiri din punct de vedere al costurilor 127
7.2.2. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subţiri din punct de vedere al timpului de lucru 131

7.2.3. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri din punct de vedere al eficienței procedeului de îndreptare 134
7.2.4. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri din punct de vedere a calității tablelor îndreptate 135
7.2.5. Alegerea procedeului de îndreptare optim a tablelor subțiri din construcția de vagoane 138

8. CONCLUZII ŞI CONTRIBUȚII PERSONALE 141

... BIBLIOGRAFIE 145

... ANEXE 152

1. INTRODUCERE

Tablele subţiri sunt utilizate în diferite structuri sudate ca şi table învelitoare, la vagoane de cale ferată de marfă, dar mai ales de călători, autobuze, troleibuze, tramvaie, metrou etc. În marea majoritate a cazurilor se utilizează oţeluri de uz general: S235 J G3, S275 J2 G3 conform SR EN 10025+A1/1994, FePO3 conform SR EN 10130/1991, respectiv S235J2W conform SR EN 10155/1995 în cazul în care se doreşte a se conferi rezistenţă faţă de coroziune atmosferică.

În construcţia de vagoane există diverse îmbinări pe table subţiri:

- îmbinări care realizează scheletul pereţilor laterali, frontali şi a acoperişurilor. În acest caz tabla subţire este îndoită la rece sub formă de profile L, Z, sau Ω. Îmbinarea acestora se realizează cu suduri cap la cap şi în colţ;
- îmbinări cap la cap care realizează învelişul pereţilor laterali, frontali şi a acoperişurilor;
- îmbinări în colţ care realizează legătura dintre scheletul şi tabla învelitoare a subansamblelor amintite anterior.

Realizarea acestor îmbinări trebuie să îndeplinească diverse condiţii calitative, mai importante fiind:

- montarea elementelor componente să respecte planeitatea în spaţiu;
- sudarea să fie executată cu procedeul care introduce număr minim de defecte;
- sudarea să fie executată cu procedeul care introduce nivel redus de tensiuni şi deformaţii;
- sudarea să fie executată cu procedeul care realizează productivitate maximă, pe cât posibil o variantă mecanizată sau automatizată de sudare;
- să se elimine pe cât posibil operaţia de polizare a supraînălţării sudurilor.

Forma exterioră a vagoanelor de marfă dar mai ales a vagoanelor de călători trebuie să îndeplinească câteva cerinţe importante. La viteze mari se crează vârtejuri puternice de aer, care produc un zgomot intens. Pentru a micşora zgomotul este necesar ca suprafaţa exterioară a vehiculelor să aibă o suprafaţă cât mai apropiată de forma teoretică aerodinamică şi să fie cât mai netedă, reducând astfel forţele de frecare şi de frânare în timpul deplasării vehicolului cu viteze mari, peste 160km/oră. De aceea ferestrele şi uşile de intrare ale vehicolului se plasează în planurile suprafeţelor exterioare ale vehicolului şi se acoperă cu table netede piesele şi dispozitivele aşezate sub şasiul vagonului, prelungind astfel pereţii laterali prin carenaje sub formă de şorţuri. Carenarea boghiurilor prezintă însă dificultăţi, roţile sunt greu accesibile pentru supravegherea continuă şi îngrijirea în exploatare, chiar dacă se prevăd obloane de vizitare.

Tabla învelitoare a cutiei este fixată pe schelet prin sudare, operaţie care produce tensiuni şi deformaţii/ondulări de până la 12-15mm / metru liniar.

Cauzele principale ale apariţiei deformaţiilor/ondulărilor la sudarea cutiei vagoanelor sunt:

- contracţiile cauzate de sudarea cap la cap a panourilor tablei învelitoare;

- contracţiile cauzate de sudurile în colţ dintre scheletul peretelui lateral şi tabla învelitoare;
- îndreptarea scheletului cutiei vagonului;
- abaterile dimensionale de debitare;
- tensiunile remanente apărute la montarea forţată a componentelor scheletului;
- deformările posibil a apare la manipularea peretelui lateral;
- contracţiile cauzate de sudarea peretelui lateral schelet + tabla învelitoare, de şasiu.

Din cele prezentate rezultă că, principala cauză a deformării tablei învelitoare sunt contracţiile remanente datorită procesului de sudare.

La structurile sudate din table subţiri apar deformaţii însemnate care îngreunează executarea în continuare a operaţiilor de asamblare – sudare şi micşorează caracteristicile de exploatare a produselor finite, mai ales aspectual dar şi din punct de vedere funcţional.

Spre deosebire de tablele groase, tabla subţire îşi pierde stabilitatea mai repede la şi după sudare şi iese din plan, respectiv suferă burduşiri.

Realizarea suprafeţelor netede se obţine prin aplicarea unor straturi de chit, care după uscare se şlefuiesc. Se obţine astfel o calitate exterioară a peretelui lateral corespunzător cerinţelor. Grosimea stratului de chit aplicat în vederea eliminării ondulărilor este direct proporţională cu aceste deformaţii. Experimental s-a stabilit că o grosime de până la 0,5 mm de chit este optimă din toate punctele de vedere. Cu cât grosimea chitului este mai mare cu atât pericolul de desprindere de pe suprafaţa peretelui lateral în timpul exploatării este mai mare, din cauza vibraţiilor.

De aici rezultă, că după ce se realizează carcasa vagonului pentru a reduce aceste ondulări este necesar a aplica diverse procedee tehnologice de îndreptare, de reducere a acestor ondulări.

Teza de doctorat încearcă să contribuie prin cercetări teoretice şi experimentale la optimizarea metodelor tehnologice de reducere a acestor deformaţii/ondulări. Aceste măsuri sunt orientate spre realizarea pereţilor laterali a vagoanelor de călători, tramvaielor, metroului, autobuzelor etc. cu o deformaţie/ondulare maximă de 0,5 mm /1 m liniar.

Teza este structurată pe 8 capitole după cum urmează:

- Capitolul 1 „Introducere” prezintă o scurtă descriere asupra problemelor care apar la sudarea tablelor subţiri în construcţia de vagoane călători;
- „Procedee de sudare utilizate la sudarea tablelor subţiri” face obiectul capitolui 2. Se stabilesc procedeele de sudare posibile a se aplica la sudarea tablelor subţiri din componenţa vagoanelor de călători, se stabilesc domeniile de variaţie a parametrilor de sudare si performanţele fiecărui procedeu în astfel de aplicaţii;
- Capitolul 3 intitulat „Deformaţii şi tensiuni apărute la sudarea tablelor subţiri” sintetizează modelul structural de apariţie al deformaţiilor şi tensiunilor,

tipurile deformațiilor şi tensiunilor, efectele lor asupra structurii sudate, metode de reducere a deformațiilor şi tensiunilor. Se prezintă şi un dispozitiv de sudat schelet pe tablă, dispozitiv care ar reduce simțitor deformațiile şi manopera atât la sudare cât şi la îndreptare;

- „Metode de îndreptare a tablelor subțiri" la cald şi la rece aplicabile la tablele subțiri din componența cutiei vagoanelor călători sunt prezentate în capitolul 4, capitolul ce prezintă şi metoda de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale a pereților laterali deformați în urma sudării lor pe scheletul cutiei vagonului;
- Capitolul 5 intitulat „Cercetări experimentale privind determinarea deformațiilor tablelor subțiri" cuprinde cercetările experimetale privind sudarea subansamblelor vagoanelor călători. Aceste încercări s-au realizat pe probe relevante din table subțiri, de grosimea celor utilizate la fabricarea vagoanelor călători, încercări care stau şi la baza încercărilor din capitolul 6. Sudarea probelor în poziție liberă s-a realizat cu procedeele: sudarea manuală cu electrozi înveliți, sudarea MAG, sudarea MAG în curent pulsat, sudarea WIG şi sudarea prin presiune în linie. Cercetările experimentale au permis stabilirea procedeului de sudare optim în cazul sudării îmbinărilor scheletului peretelui lateral, al tablei învelitoare şi îmbinărilor dintre peretele lateral şi acoperiş. De asemenea s-au prezentat măsuri de reducere a deformațiilor la sudarea pereților vagoanelor de călători;
- În capitolul 6 „Cercetări experimentale privind îndreptarea tablelor subțiri" cu dispozitive concepute şi realizate s-au efectuat încercări experimentale privind deformațiile şi forțele apărute la îmbinarea subansamblelor vagoanelor călători. S-au efectuat şi încercări privind îndreptarea tablelor subțiri din componența vagoanelor călători utilizând metoda de îndeptare cu încălziri locale cu flacără. Totodată s-a realizat vizualizarea deformației tablelor prin utilizarea programului MATLAB R2007B, această prezentare stând la baza comparării modului de deformare a tablelor cu grosimi diferite;
- Capitolul 7 „Optimizarea îndreptării tablelor subțiri" conține date care permit alegerea procedeului de îndreptare optim a tablelor subțiri din construcția de vagoane. De asemenea capitolul prezintă o metodologie de calcul economic, elaborat de autor, privind calculul costurilor îndreptării pentru diferite metode de îndreptare;
- În final capitolul 8 „Concluzii şi contribuții personale" prezintă concluziile şi contribuțiile personale ale autorului prezentei teze.

2. PROCEDEE DE SUDARE UTILIZATE LA SUDAREA TABLELOR SUBȚIRI

Noțiunea de table subțiri în construcția vagoanelor se referă la grosimea de 0,5-2,5mm. Principalele procedee de sudare utilizate la realizarea structurii vagoanelor sunt:

- sudarea manuală cu electrozi înveliți;
- sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG;
- sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG;
- sudarea prin presiune în linie.

2.1. Sudarea manuală cu electrozi înveliți

Grosimea minimă care poate fi sudată cu electrozi înveliți depinde de experiența operatorului sudor.

În poziție orizontală, PA conform SR ISO 6947, tablele subțiri se sudează fără prelucrarea marginii tablelor. Se utilizează rost în I (fig.2.1.a), rost în I cu suport de oțel la rădăcină (fig.2.1.b), îmbinare în colț (fig.2.1.c) şi îmbinare în colț prin suprapunere laterală (fig.2.1.d). Formele de rosturi utilizate la sudarea manuală cu electrozi înveliți sunt standardizate.

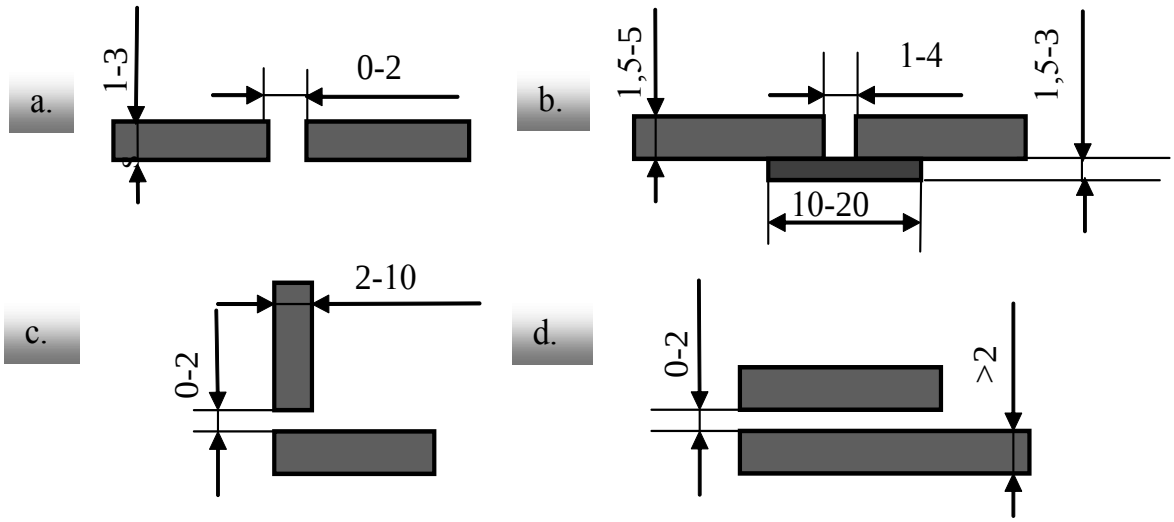


Fig.2.1. Rosturi de sudare utilizate la sudarea tablelor subțiri
a. sudură cap la cap în I; b. sudură cap la cap pe suport de oțel; c. sudură în colț;
d. sudură în colț cu margini suprapuse

Ca diametru se aleg electrozi cu diametru de d_e=1,6; 2; 2,5 mm pentru table cu grosimi de s=1,0-3,0 mm. Numărul de treceri este de n_t=1.

Curentul de sudare pentru diametrele de 1,6-2,5 mm variază în gama 30-90A.

În cazul sudării în poziție verticală PF respectiv PG sau peste cap PE, curentul de sudare se micşorează cu cca. 10-25% față de sudarea în poziție orizontală PA. Tensiunea arcului variază între 15-20V.

2.2. Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG

Un domeniu specific sudării MIG/MAG este sudarea tablelor subțiri. Tipuri de îmbinări ale tablelor subțiri care se pot realiza cu procedeul MIG/MAG sunt: îmbinări cap la cap cu sau fără suport, sudate dintr-o parte sau din ambele părți, îmbinări în colț şi îmbinări suprapuse. Rosturile de sudare utilizate la sudarea tablelor subțiri sunt prezentate în figura 2.2.

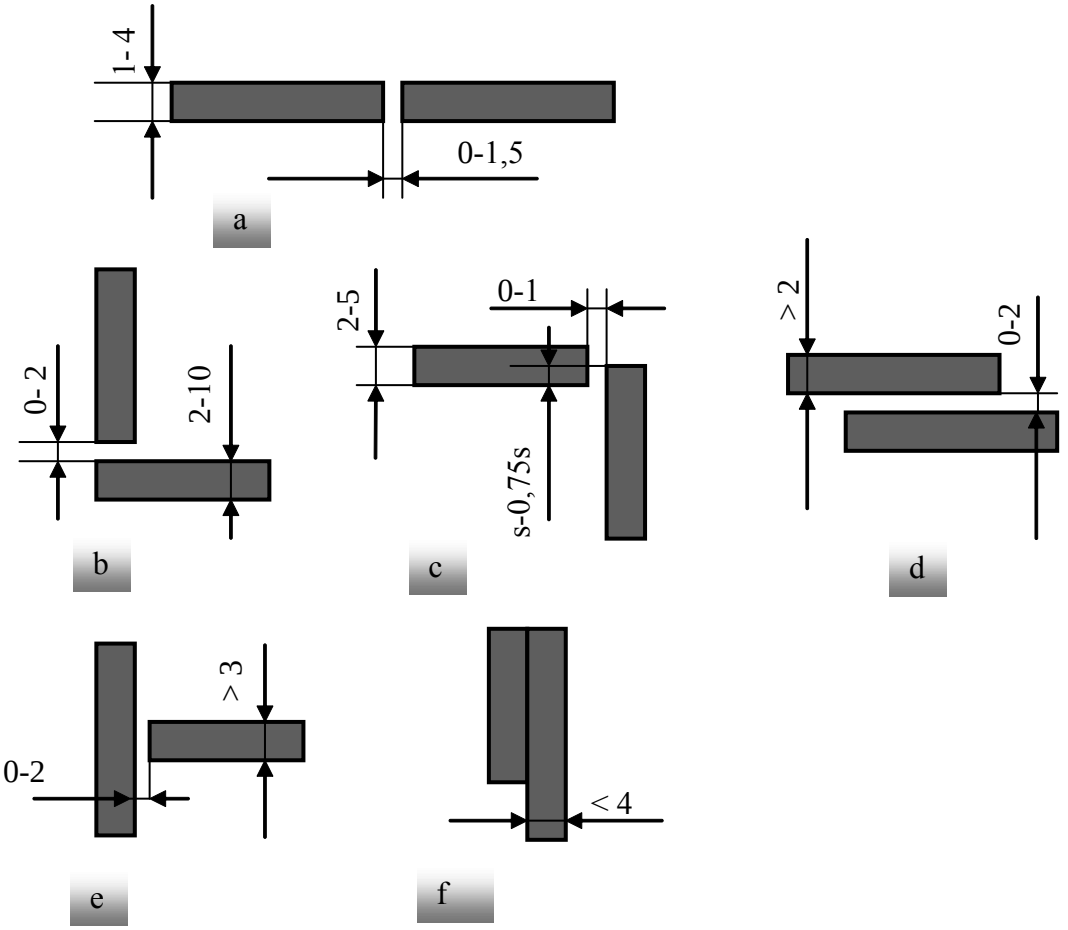


Fig.2.2. Rosturi de sudare utilizate la sudarea tablelor subțiri
a. sudură cap la cap cu rost în I; b. sudură în colț; c. sudură în colț pe muchie;
d. sudură în colț prin suprapunere laterală; e. sudură în colț în T;
f. sudură prin suprapunere frontală

Grosimea tablelor este între 0,5-3 mm, respectiv diametrul sârmei de sudare este între 0,6-1,0 mm. La sudarea tablelor subțiri este recomandată doar varianta de sudare cu transferul materialului prin scurtcircuit. Metoda de sudare este sudarea spre stânga.

Curentul de sudare depinzând de grosimea componentei ce se sudează variază în domenii largi: de la 40-75 A pentru table de 1 mm grosime, la 80-190 A pentru table de 3,0 mm grosime. Valori orientative ale curentului de sudare şi tensiunii arcului sunt date în tabelul 2.1.

Tabel 2.1. Curentul de sudare şi tensiunea arcului funcție de diametrul sârmei electrod la sudarea MAG

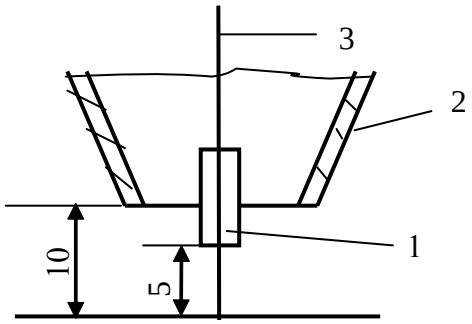
d_s, mm	0,6	0,8	1,0
I_s, A	30-70	60-180	80-180
U_a, V	13-18	17-21	19-24

La sudarea în pozițiile PC, PD, PE, PF şi PG valorile lui U_a sunt mai mici cu 1-3V. La sudarea în amestec de gaze CO_2 +Ar tensiunea arcului scade cu aproximativ 1-3V.

Viteza de sudare pentru d_s=0,8-1,2 mm poate varia în limitele 18-60m/h la sudarea mecanizată sau 5-26m/h la sudarea semimecanizată.

Viteza de avans a sârmei electrod determină curentul de sudare şi depinde de diametrul sârmei electrod, variind în intervalul 1,8-18m/min.

Poziția relativă dintre duza de contact 1, duza de gaz 2 şi sârma 3 este prezentată în figura 2.3.



I_s=50-150A

Fig.2.3. Pozițiile relative dintre duza de contact electric, duza de gaz şi sârma electrod
1-duză de contact electric; 2-duză de gaz; 3-sârmă de sudare

Debitul de gaz D_g depinde de tipul gazului de protecție utilizat, curentul de sudare, forma îmbinării, etc. În general la sudarea cu arc în scurtcircuit sunt suficiente debite de gaze de: D_g=8-10 l/min.

O variantă a procedeului MIG/MAG recomandată la sudarea tablelor subțiri este sudarea în curent pulsat.

2.3. Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG

Forma de rost utilizată la sudarea tablelor subţiri, s≤3mm este rost neprelucrat în I, la îmbinările cap la cap, cu deschiderea rostului zero la sudarea fără material de adaos (fig.2.4.a), respectiv deschidere de 0-0,5 mm la sudarea cu material de adaos (fig.2.4.b).

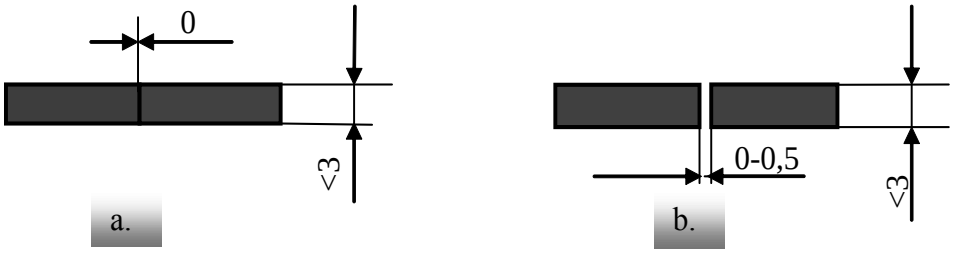


Fig.2.4. Forme de rosturi la sudarea WIG a tablelor subţiri
a.sudură cap la cap în I cu rost 0; b.sudură cap la cap în I cu rost

Parametrii tehnologici recomandaţi la sudarea oţelurilor sunt daţi în tabelul 2.2. [87].

Tabel 2.2. Parametrii de sudare orientativi pentru sudarea WIG a tablelor subţiri

s, mm	d_e,mm	d_W, mm	I, A	D, mm	Dg, l/min
1	1	1	30-60	6	6
1,5	1,5	1-1,6	50-100	8	8
2	1,5-2	1-1,6	60-100	8	8
3	2-3	1,6-2	90-150	8-10	8-10

Valorile curenţilor de sudare la sudare în poziţia PC, PD, PE, conform SR ISO 6947/1994 se vor diminua cu 10-20%.

Tipul curentului de sudare recomandat la sudarea tablelor subţiri este curent continuu polaritate inversă.

Debitul de gaz, în l/min, se alege numeric egal cu diametrul duzei arzătorului D. Gazul de protecţie cel mai des utilizat este argonul.

Materialul de adaos, dacă sudarea WIG se efectuează cu material de adaos, este sub formă de vergea metalică, cu compoziţie chimică similară materialului de bază, care se introduce în baia topită.

Tehnica operatorie la sudarea WIG cu material de adaos este sudarea spre stânga. Vârful electrodului faţă de piesă este la o distanţă de 3-6 mm.

O variantă a sudării WIG aplicate în special la sudarea tablelor subţiri şi la sudarea în poziţie este sudarea WIG în curent pulsat.

Procedeul prezintă avantajul că prin ajustarea nivelurilor parametrilor specifici: curent de puls I_p, curent de bază I_b, timp de puls t_p şi timp de bază t_b este posibilă o dozare foarte precisă a energiei introduse în zona de sudare. Topirea materialului şi formarea băii lichide au loc în perioada de puls, iar în perioada timpului de bază se menţine arderea stabilă a arcului electric, realizându-se o răcire

cu solidificare parțială a băii topite. Astfel, la acelaşi curent mediu de sudare, pătrunderea sudurii este mai mare la sudarea în curent pulsat, iar energia introdusă la sudare este mai redusă, caracteristicile materialului fiind mai puțin afectate prin procesul de sudare. Totodată tensiunile şi deformațiile produse prin sudare au valori mai mici.

Curentul de puls are valori de cca. 1,5-2 ori mai mare decât curentul utilizat la sudarea clasică. Curentul de bază este cca. 25% din curentul de puls, timpul de puls fiind de cca.0,02-1s.

Trebuie avut în vedere ca pistoletul de sudare să fie deplasat în timpul de bază şi este menținut pe loc în timpul pulsului, iar materialul de adaos se introduce în baie în timpul pulsului de curent.

Sudarea WIG în curent pulsat se utilizează, de obicei, în varianta mecanizată a procesului de sudare, iar operatorul sudor trebuie să aibă nivel de pregătire mai ridicat.

2.4. Sudarea prin presiune în linie

La sudarea prin presiune în linie a tablelor subțiri, metoda practicată este sudarea cap la cap cu material de adaos sub formă de platbandă (fig.2.5.). Platbanda poate fi pe o parte sau pe ambele părți a tablelor.

Între rolele de contact 2 şi table 1 se introduce o platbandă 3 de grosime 0,2…0,5 mm şi lățime 4,0 mm. Tablele sunt strânse cu forța F_1 respectiv F_2.

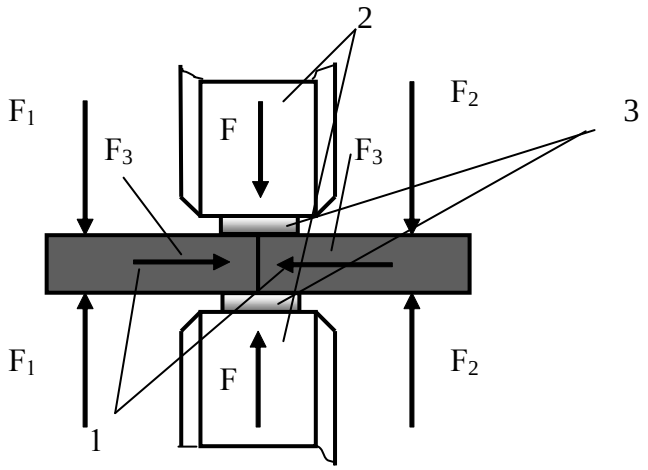


Fig. 2.5. Sudare prin presiune în linie cu platbandă
1-piese de sudat; 2-role de presare; 3-platbandă

Această forță de strângere se realizează prin poziționarea tablelor pe o masă magnetică. Curentul de sudare care trece prin rolele de contact topeşte marginile tablelor de sudat. Datorită forței de presare F_3 care se formează în urma dilatării împiedicate a componentelor se formează îmbinarea sudată. Sub acțiunea forței F

platbenzile se presează în materialul de bază, astfel îmbinarea este puțin mai groasă decât tablele care se sudează.

Îmbinările astfel realizate au caracteristici mecanice bune. Rezistența la rupere a îmbinării depăşeşte pe cea a materialului de bază, doar limita la oboseală este mai mică cu cca. 10%.

Metoda poate fi utilizată la sudarea oțelurilor nealiate, slab aliate şi aliate Cr-Ni, respectiv la oțeluri feritice cu crom.

Sudarea prin presiune în linie pretinde pregătirea riguroasă a componentelor. La montarea cap la cap a celor două componente este necesară asigurarea unui rost mai mic de 0,4 mm între componente, altfel sudura este compromisă. Tablele trebuie curățate de unsoare, ulei, vopseaua de marcare a tablelor, stratul de oxid şi alte impurități.

Parametrii care determină desfăşurarea procesului de sudare prin presiune în linie sunt: valoarea curentului de sudare şi variația în timp a acestuia, viteza de sudare, forma rolelor de contact, valoarea forței de presiune, iar în cazul sudării în impulsuri timpul de curent şi timpul de pauză dintre impulsuri.

Este indicat ca valoarea diametrului rolelor de contact să se aleagă D_r=50…300mm, luând în considerare accesul la locul sudării. Materiale pentru rolele de contact pot fi: CuCr1; CuCr1Zr; CuCo2,5Be; CuCo2Si. Rolele sunt tratate termic pentru a obține o duritate cuprinsă între 180-230 HB.

Parametrii de sudare orientativi la sudarea prin presiune în linie pentru oțeluri nealiate şi slab aliate cu curent de sudare constant şi curent de sudare în impulsuri sunt dați în tabelul 2.3. [35].

Tabel 2.3. Parametrii de sudare orientativi pentru sudarea prin presiune în linie la sudarea oțelurilor nealiate şi slab aliate

Grosime tablă, s, mm	Forță de presare F, kN			Viteza de sudare v_s, m/min			Curent de sudare, I, kA			Timp de sudare, t, perioade
	continuu		cu impul-suri	continuu		cu impul-suri	continuu		cu impul-suri	
	min	max		min	max		min	max		
0,25	1,5	1,8	-	12	6,1	-	10	8	-	-
0,5	2,0	2,4	2,4	11	5,3	2,0	12	9	10	2
0,75	2,3	2,9	3,2	10	4,7	2,0	13	10	12	2
1,0	2,7	4,0	4,0	8	3,7	1,75	14	11	14	3
1,25	3,1	4,5	4,8	7	3,1	1,75	17	12	16	4
1,5	3,4	5,3	5,0	5	2,2	1,5	17	14	17	4
2,0	4,0	6,0	6,0	3	1,5	1,5	17	15	19	6
2,5	-	-	7,0	-	-	1,5	-	-	20	7
3,0	-	-	8,0	-	-	1,1	-	-	22	10

3. DEFORMAȚII ŞI TENSIUNI APĂRUTE LA SUDAREA TABLELOR SUBȚIRI

3.1. Deformații

3.1.1. Modelul structural al apariției deformațiilor

În timpul procesului de sudare datorită încălzirii locale sudura şi materialul de bază adiacent se dilată, iar în urma răcirii acestea se contractă. Acest fenomen conduce la producerea deformațiilor la sudare.

Producerea acestor deformații se exemplifică la sudarea cap la cap a două platbenzi libere, respectiv rigidizate (fig.3.1.).

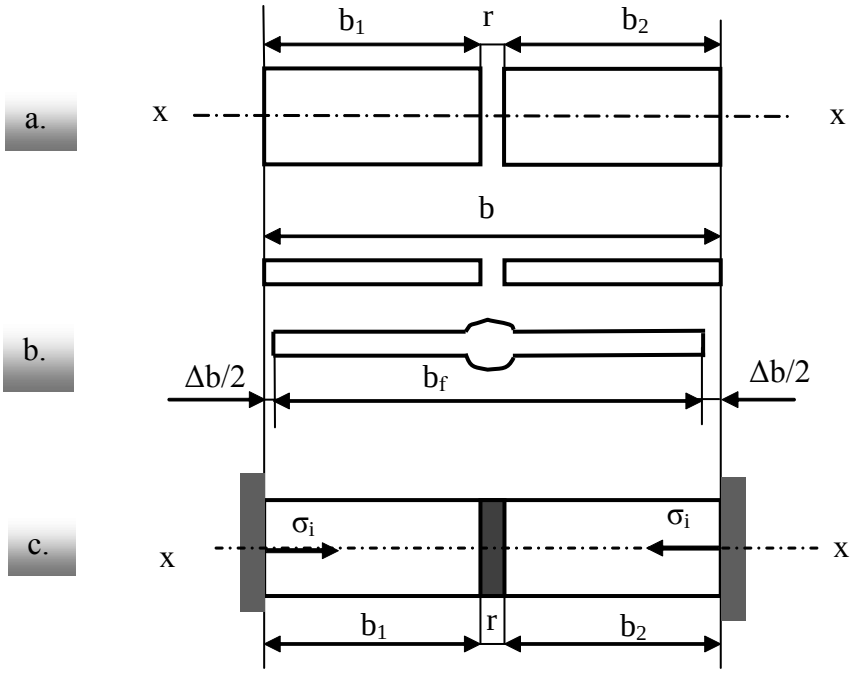


Fig.3.1. Modelul de formare a deformațiilor exterioare şi interioare
a. înainte de sudare; b. sudare în stare liberă; c. sudarea în stare rigidizată

În figura 3.1.b. deformația exterioară se manifestă prin contracția transversală. Lățimea piesei după răcire este:

$$b_f=b_1+b_2+r-\Delta b \qquad (3.1.)$$

unde:

- Δb- reprezintă deformația exterioară sau contracția transversală;
- r- deschiderea rostului;
- b_1, b_2 - lățimea componentelor;
- σ_i – tensiuni interne.

În acest caz deformația specifică transversală interioară este egală cu zero.

ε_x=di/dx=0, neglijând deformația longitudinală şi cea pe grosimea platbenzii, di fiind deplasarea interioară a liniilor elementare de-a lungul axei „x”.

În cazul din figura 3.2.c pot să apară numai deformații interioare, care se exprimă cu relația (3.2.):

$$\varepsilon_x = \frac{di}{dx} = f(b, r, \Delta b) \qquad (3.2.)$$

Mărimea deformației interne depinde de rigiditatea benzilor, de lățimea inițială a componentelor, de deschiderea rostului de sudare şi de contracția transversală.

3.1.2. Tipuri de deformații

Clasificarea deformațiilor cauzate de procesul de sudare este foarte dificilă, deoarece condițiile de apariție şi natura lor sunt diferite. La sudarea unor elemente simple apar deformații după mai multe direcții cauzate de mai multe efecte.

Se deosebesc două categorii mari de deformații:

- deformații exterioare, care se manifestă prin schimbarea formei geometrice sau a dimensiunii structurii sudate;
- deformații interioare, care iau naştere în unele părți elementare sau în jurul acestora.

Figura 3.2. prezintă clasificarea deformațiilor [26].

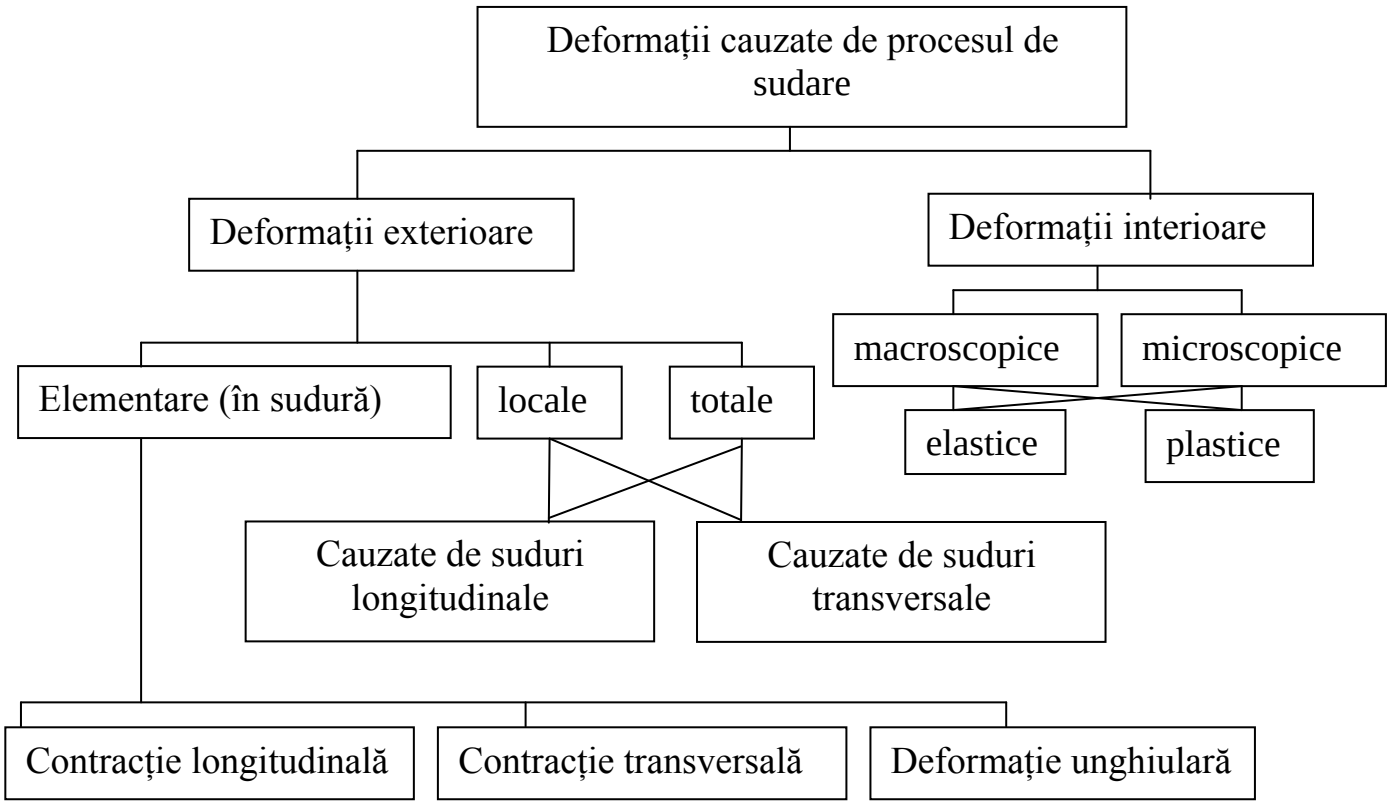


Fig.3.2. Tipuri de deformații apărute la sudare

Prin deformația elementară sau deformația formei sudurii, se înțelege deformarea sudurii în toate direcțiile. Sunt deformații remanente şi se manifestă prin scurtarea celor 3 dimensiuni ale sudurii. Se deosebesc:

- contracția longitudinală: $\Delta l = l_i - l_f$ (3.3.)
- contracția transversală: $\Delta b = b_i - b_f$ (3.4.)
- deformația unghiulară: $\Delta\varphi = \varphi_f - \varphi_i$ (3.5.)

unde:

- l_i-lungimea inițială;
- l_f- lungimea finală;
- b_i- lățimea inițială;
- bf- lățimea finală;
- φ_f- unghiul dintre componente şi orizontală după sudare;
- φ_i- unghiul dintre componente şi orizontală înaintea sudării.

Contracția longitudinală este scurtarea sudurii în direcția axei longitudinale, axa x.

Contracția transversală este contracția sudurii pe direcția perpendiculară axei longitudinale, axa y sau z.

Deformația unghiulară este rotirea sudurii în jurul axei longitudinale cu un unghi φ. Apare mai ales la suduri nesimetrice, de ex. rost V, U, sudură în colț.

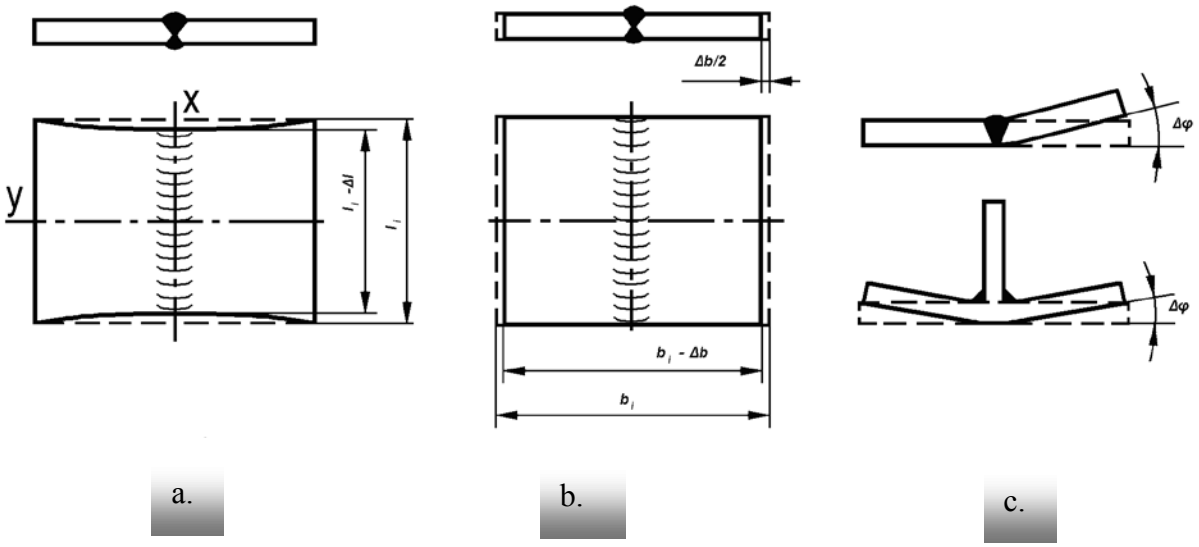
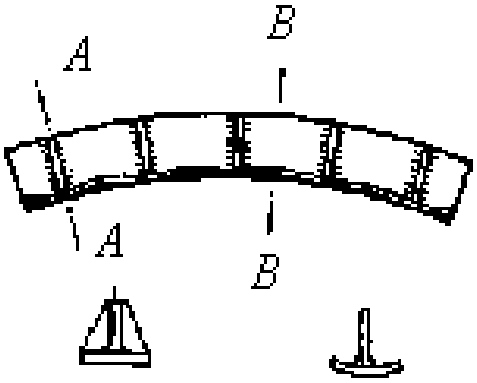


Fig.3.3. Deformațiile elementare ale sudurilor
a.contracția longitudinală; b.contracția transversală; c.deformația unghiulară la îmbinări cap la cap şi în colț

Prin deformație locală se înțelege deformarea locală a secțiunii în unele locuri ale structurii sudate. De obicei nu influențează conturul construcției sudate. Deformații locale pot fi cauzate atât de suduri longitudinale cât şi de suduri transversale.

În figura 3.4. este prezentată o deformație locală în secțiunea B, apărută datorită sudurii longitudinale. Talpa structurii s-a îndoit între plăcile de rigidizare.



secţiunea A *secţiunea B*

Fig.3.4. Deformaţia locală apărută la sudare

Deformaţiile locale pot fi ondulări de table, mai ales la sudarea tablelor subţiri.

Prin deformaţie totală se înţelege acea deformare care modifică forma geometrică sau dimensională a structurii sudate. Exemple de astfel de deformaţii sunt prezentate în figura 3.5.

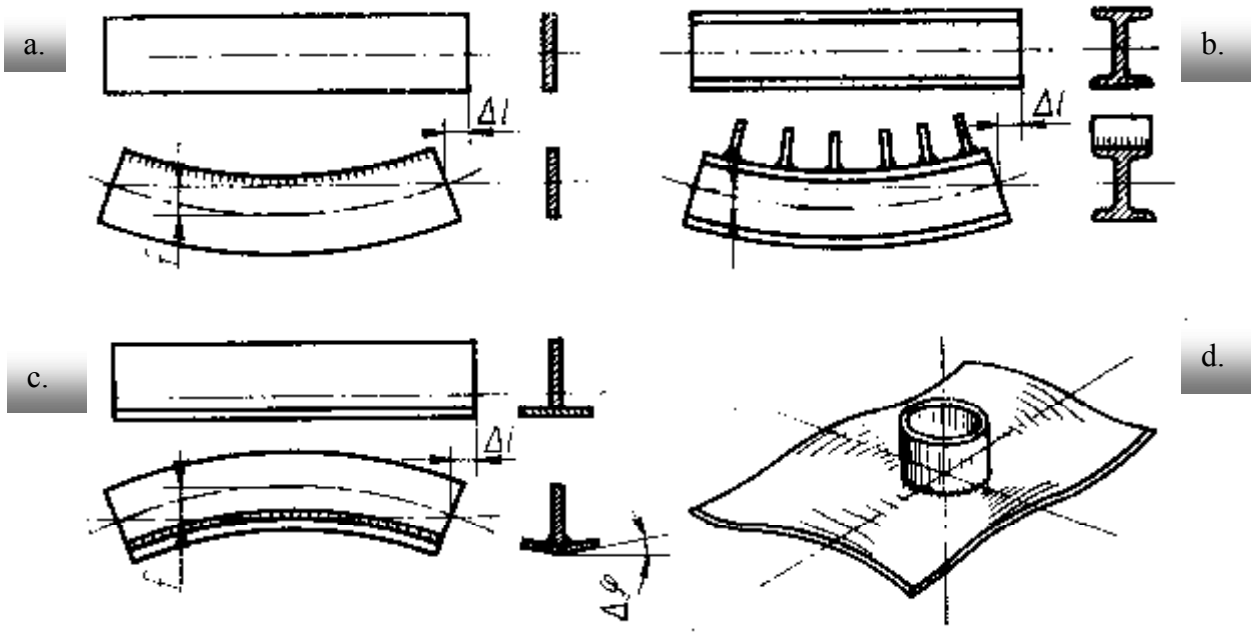


Fig.3.5.Exemple de deformaţii totale
a. contracţie longitudinală şi deformaţie negativă la placă sudată dintr-o parte;
b. curbare şi scurtare datorită sudurilor transversale;
c. curbare şi scurtare datorită sudurilor longitudinale şi deformaţie unghiulară;
d. deformaţie complexă în spaţiu cu ondulare , ca efect de deformaţie locală.

Prin deformaţie macroscopică se înţelege deformarea mărimilor macroscopice care sunt în corelaţie cu apariţia tensiunilor şi pot fi elastice sau plastice.

Prin deformaţii microscopice se înţelege deplasarea reţelelor cristaline în timpul efectuării sudurilor. Sunt deformaţii de ordinul micronilor. Astfel de deformaţii sunt îndoirea planelor de alunecare ale cristalelor.

Deformaţiile pot fi temporare (fig.3.6.), care apar în timpul încălzirii neuniforme, deci există în timpul procesului de sudare şi remanente, care se produc după răcirea structurii şi rămân prezente şi după răcire (fig. 3.3., 3.4., 3.5.).

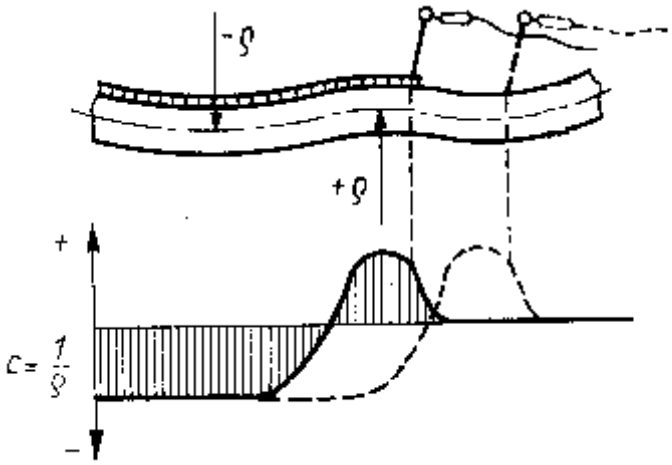


Fig.3.6. Deformaţia unei platbenzi în timpul depunerii unui rând de sudură pe muchie
ρ-deformaţia platbenzii; c-curbura remanentă a axei neutre

Deformaţiile remanente au totdeauna semn opus/negativ celor temporare corespunzătoare/pozitiv (fig.3.6.).

Deformaţiile produse la sudare depind de foarte mulţi factori tehnologici şi constructivi.

Din cele prezentate rezultă că trebuie proiectată o astfel de structură şi să se aplice o astfel de tehnologie, încât după îmbinare şi sudare deformaţiile să fie minime. Deoarece foarte mulţi factori variabili neliniari: timp, temperatură, conductibilitate termică, variaţia caracteristicilor mecanice şi fizice ale materialului cu temperatura, compoziţie chimică, tratamentul termic aplicat, etc. influenţează deformaţiile cauzate de sudare, calculul lor teoretic este dificil, determinarea lor făcându-se experimental. Okerblom [76] a stabilit relaţii de calcul statistice care satisfac suficient cerinţele şi precizia necesităţilor practice.

3.1.2.1. Contracția longitudinală

În timpul sudării încălzirea/răcirea neuniformă a pieselor produce deformații plastice. Aceste deformații plastice se produc continuu de la temperatura băii până la temperaturile de 100-200°C, iar după răcirea structurii sudate acestea vor apare sub formă de contracție longitudinală sau transversală. Contracția longitudinală depinde de procedeul de sudare, de modul de umplere a rostului de sudare şi de rezistența materialului sudat. Mărimea contracției longitudinale este determinată de tensiunile interne din piesele sudate, de grosimea şi lățimea componentelor, iar la îmbinările în colț depinde de secțiunea transversală a componentelor .

Valori orientative ale contracției longitudinale sunt date în tabelul 3.1.

Tabel 3.1. Valori ortientative ale contracției longitudinale

S_p/S_s	≥ 150	80	50
Δl, mm/m	0,1	0,3	1

unde:

- S_p – secțiunea piesei;
- S_s – secțiunea sudurii.

Din cele prezentate anterior rezultă că, în practică contracțiile longitudinale nu au o importanță deosebită, deoarece contracția longitudinală a structurii sudate se încadrează în toleranța admisă. Efectul sudurilor longitudinale sunt foarte importante la apariția tensiunilor, cele longitudinale şi la dezvoltarea deformațiilor exterioare totale. Tensiunile interne longitudinale sunt cu atât mai mari cu cât rigiditatea structurii împiedică mai mult dezvoltarea deformațiilor.

Valoarea contracției longitudinale se poate determina cu ajutorul relației statistice (3.6.):

$$\Delta l = 0{,}335.\frac{\alpha}{c.\gamma}.\frac{E_l.l}{A} \qquad (3.6.)$$

unde:

- α – coeficient de dilatare termică liniară, 1/K;
- c- căldura specifică, J/g.K;
- γ – densitatea materialului de bază, g/mm^3;
- E_l – energia liniară, J/cm;
- l- lungimea piesei;
- A – aria secțiunii elementului, mm^2.

3.1.2.2. Contracția transversală

Contracția transversală apărută este diferită în funcție de tipul îmbinării cap la cap sau în colț, şi de gradul de libertate a pieselor. Piesele lăsate liber se vor

deforma conform figurii 3.7. În acest caz la sudarea pieselor lungi nu se poate vorbi despre o contracție constantă.

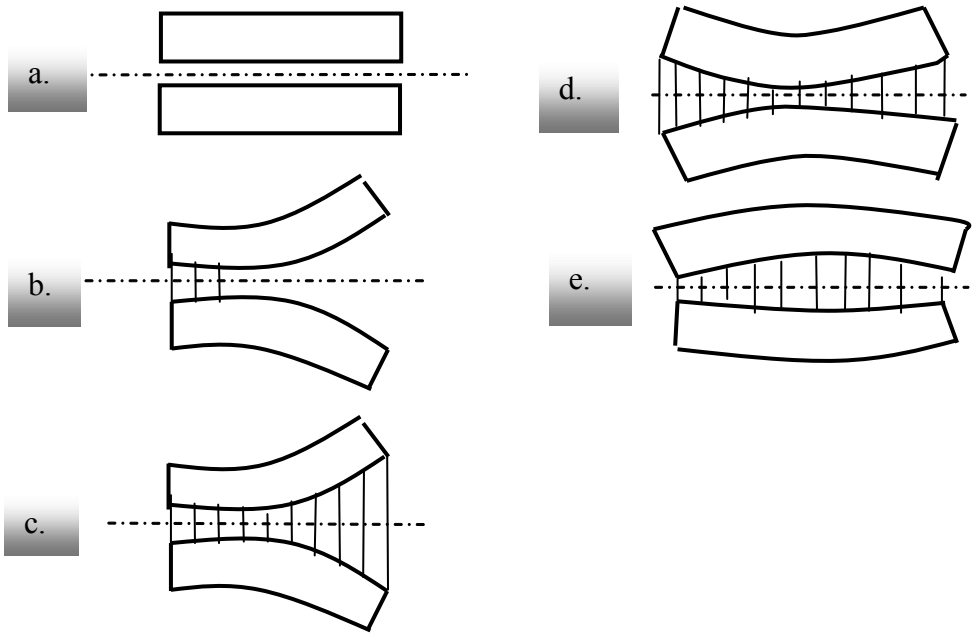


Fig.3.7. Procesul de formare a deformațiilor la îmbinări cap la cap
a. înainte de sudare; b. în timpul sudării; c. după sudare; d. după răcire; e. tendința de deformare datorită contracției longitudinale

În cazul sudării pieselor prinse provizoriu cu sudură contracția transversală este influențată de deformația totală dar depinde şi de prinderile provizorii aplicate respectiv de fixarea structurii.

Contracția transversală este o consecință a deformațiilor exterioare temporare: îndoirea, rotirea piesei în timpul aplicării căldurii şi a efectului reciproc al contracțiilor longitudinale şi transversale.

Contracția transversală este scurtarea piesei perpendicular pe axa longitudinală a sa.

Din practică se cunoaşte că, contracția transversală la îmbinări cap la cap este de 0,6-3,3mm, depinzând de procedeul de sudare, de lățimea şi grosimea sudurii, de tipul rostului.

Cele mai adecvate calcule pentru determinarea contracției transversale iau în considerare tehnologia de sudare. Formulele de calcul elaborate de Okerblom [68] ține cont de parametrii de sudare, prin energia liniară introdusă.

În cazul sudurilor lungi şi cu lățime mare a structurii sudate/a tablelor, contracția transversală la o trecere, conform [76], se determină cu :

$$\Delta b = 3{,}5.10^{-6}.\frac{E_l}{s} \qquad (3.7.)$$

unde:

- s - grosimea componentelor;
- E_l - energia liniară.

În cazul în care condițiile sunt favorabile pentru apariția contracției transversale, aceasta poate ajunge la :

$$\Delta b = 13.10^{-6}.\frac{E_l}{s} \qquad (3.8.)$$

În cazul sudării în mai multe straturi, sudura se contractă treptat după fiecare rând depus, crescând contracția totală. În acest caz se va utiliza în calcule valoarea medie a energiei liniare. Formula de calcul este:

$$\Delta b = k.\frac{E_{lmed}}{s}.n^{0,9} \qquad (3.9.)$$

unde :

- k =(15-20).10^{-6} pentru îmbinări cap la cap;
- k =(3,5-5).10^{-6} pentru îmbinări în colț;
- n - numărul de treceri.

Contracția transversală se poate determina şi cu ajutorul relației:

$$\Delta b = \frac{\alpha}{c.\gamma}.\frac{E_l}{s} \qquad (3.10.)$$

unde:

- α – coeficient de dilatare termică liniară, 1/K;
- c- căldura specifică, J/g.K;
- γ – densitatea materialului de bază, g/mm^3;

3.1.2.3. Deformația unghiulară

Deformația unghiulară, din punct de vedere al cauzelor de apariție, este un tip al contracției transversale. Aceasta apare din cauza încălzirii neuniforme de-a lungul grosimii materialului, care duce la deformații locale plastice. Deformația unghiulară se produce în jurul axei longitudinale.

Producerea deformațiilor unghiulare se pot împiedica doar în unele cazuri la sudarea îmbinărilor cap la cap: la sudare profil I, la îmbinări simetrice, la rost X. Mărimea deformației unghiulare poate fi redusă într-o oarecare măsură prin alegerea corespunzătoare a procedeului de sudare, umplerea corespunzătoare a rostului de sudare .

Deformația unghiulară creşte cu creşterea lungimii sudurii.

3.1.3. Efectele deformaţiilor asupra structurii sudate

Contracţia longitudinală produce două tipuri de deformaţii, atât la îmbinările cap la cap cât şi la cele în colţ :

- ondularea structurilor sudate, la suprafeţe mari de table;
- curbarea, la piese cu lăţime mai mică.

Ondularea tablei se datorează contracţiei longitudinale în cazul sudării tablei pe două direcţii (fig.3.8.).

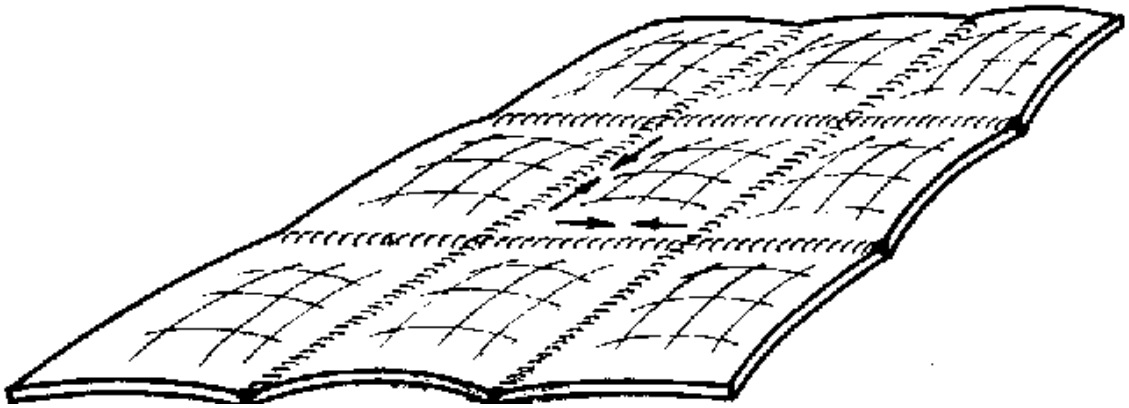


Fig.3.8. Ondularea tablei datorită contracţiei longitudinale a îmbinării cap la cap

3.2. Tensiuni

3.2.1. Modelul structural al apariţiei tensiunilor

Se consideră cazul sudării cap la cap a două platbenzi (fig.3.1.a). În cazul în care platbanda nu se poate dilata şi contracta liber, în urma procesului de încălzire-răcire, iau naştere tensiuni interne în structură (fig.3.1.c.).

În timpul sudării prin topire se produce o încălzire locală a materialului, materialul de bază învecinat creând o constrângere în faţa dilatării sudurii. Ca urmare în material se produc tensiuni interne.

Analizând fenomenele din figura 3.1., se constată că, în cazul deformaţiilor libere tensiunile interne vor fi mici. În cazul deformaţiilor împiedicate deformaţiile sunt neglijabile, în schimb se introduc tensiuni mari în structură. De aceea este important să se cunoască deformaţiile care vor apare, respectiv mărimea, sensul şi distribuţia tensiunilor la sudare.

3.2.2. Tipuri de tensiuni

Tensiunile proprii pot fi clasificate în funcţie de cauzele formării lor, de volumul în care se echilibrează şi de orientarea lor în spaţiu (fig.3.9.).

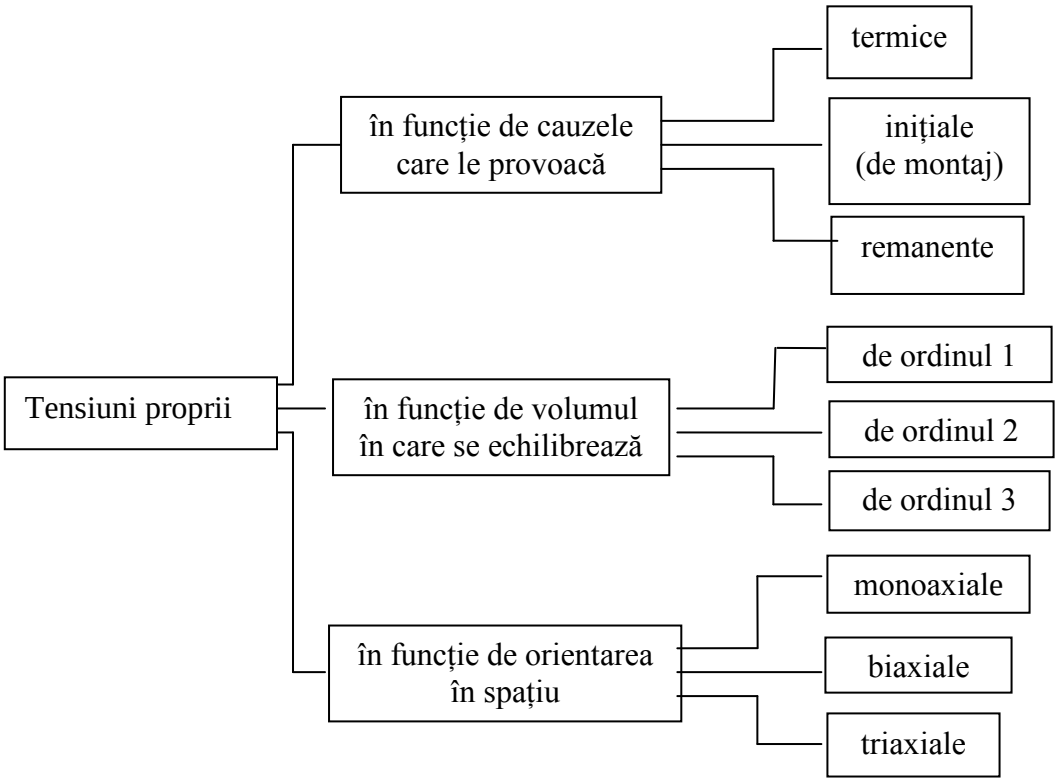


Fig.3.9. Clasificarea tensiunilor

Tensiunile proprii termice se formează în corpuri datorită încălzirii lor neuniforme. Ele sunt temporare şi dispar odată cu cauza care le-a provocat.

Tensiunile proprii iniţiale/de montaj se formează în construcţii şi în organe de maşini, la executarea de îmbinări în stare elasto-plastică. Aceste tensiuni dispar după eliminarea cauzelor care le provoacă.

Tensiunile proprii remanente apar din diferite cauze. În primul rând, tensiunile proprii remanente apar datorită deformaţiilor plastice neuniforme. Deformaţiile plastice neuniforme apar la solicitarea elementelor încovoiate, răsucite, la prelucrarea la rece prin presare etc. În procesul de încărcare deformaţiile depăşesc, în unele zone ale corpului limitele deformaţiilor elastice. Din această cauză, după descărcare, în corp rămân deformaţii şi tensiuni remanente.

În al doilea rând, tensiunile proprii remanente apar datorită deformaţiilor termoplastice. Distribuţia neuniformă a temperaturilor în corp provoacă, în interiorul lui, deformaţii plastice şi elasto-plastice. Acestea din urmă duc la formarea de deformaţii şi tensiuni remanente.

În al treilea rând, tensiunile proprii remanente apar datorită transformărilor structurale şi de fază care se petrec în metale, la sudarea oțelurilor, şi în special a oțelurilor aliate. Acest lucru este însoțit de modificări locale de densitate şi volum care dau naştere deformațiilor şi tensiunilor remanente.

La sudare, formarea tensiunilor proprii remanente, este provocată în unele cazuri, simultan de mai multe cauze. În cazul sudării oțelurilor aliate, tensiunile remanente apar din cauza deformațiilor termoplastice, care se petrec în perioada de încălzire şi de răcire neuniformă a piesei. În afară de aceasta, la sudarea acestor oțeluri se petrec transformări structurale. Astfel tensiunile remanente sunt, în acest caz, provocate de două surse: deformațiile termoplastice şi transformările structurale.

Tensiunile proprii se clasifică în funcție de volumul corpului în limitele căruia ele se echilibrează reciproc.

Tensiunile de ordinul 1 sau tensiunile macroscopice se echilibrează în volume relativ mari de acelaşi ordin de mărime ca şi piesa. Aceste tensiuni au o anumită orientare, în funcție de forma piesei. Ele se determină pe cale teoretică cu ajutorul metodelor din rezistența materialelor, din teoria elasticității şi plasticității, precum şi pe cale experimentală.

Tensiunile proprii de ordinul 2 sau tensiunile microscopice se echilibrează în volume microscopice din corp, între limitele unuia sau mai multor grăunți cristalini. Ele au o orientare determinată şi nu depind de forma pieselor. Metodele cunoscute din teoria rezistenței materialelor şi din teoria elasticității şi plasticității sunt insuficiente pentru determinarea tensiunilor proprii de ordinul 2. Ele se pot determina pe cale experimentală, prin difractometrie.

Tensiunile proprii de ordinul 3 sau tensiunile submicroscopice sunt cele care se echilibrează în volume ultramicroscopice, între limitele rețelei atomice. Aceste tensiuni sunt tot neorientate în spațiu şi se pot determina pe cale experimentală, prin difractometrie.

În construcții de maşini şi construcții metalice se pot determina, prin calcule tehnice, doar tensiunile de ordinul 1. Tensiunile de ordinul 2 se determină cu ajutorul analizei röntgenostructurale. Cercetările röntgenostructurale au arătat că în îmbinările sudate apar tensiuni remanente de ordinul 2, care ajung până la 30MPa. Cercetările efectuate asupra unor îmbinări sudate cap la cap cu marginile prelucrate în V şi X au arătat că tensiunile remanente apar la suprafața sudurilor şi valoarea lor scade repede pe grosimea sudării, ajungând la o valoare minimă, 10MPa, la mijlocul grosimii sudurii. Cercetările efectuate au arătat că tensiunile remanente de ordinul 2 apar atât la sudarea oțelurilor cu conținut ridicat de carbon sau aliate, cât şi la sudarea oțelurilor obişnuite şi au valori destul de mari.

Tensiunile proprii remanente din construcțiile sudate pot fi clasificate şi după orientarea în spațiu. În funcție de forma şi mărimea pieselor care se sudează, pot fi:

- tensiuni proprii monoaxiale orientate pe o singură direcție;
- tensiuni biaxiale, plane când acționează în diferite direcții în plan;

- tensiuni triaxiale, spaţiale când acţionează în toate direcţiile din spaţiu.

La piesele sudate tensiunile proprii sunt totdeauna spaţiale, iar dacă una sau două din componentele tensiunilor proprii sunt foarte mici, se consideră convenţional că aceste tensiuni sunt mono sau biaxiale. Tensiunile de ordin superior sunt tridimensionale.

3.2.3. Efectele tensiunilor asupra structurii sudate

Tensiunile remanente sunt orientate pe 3 direcţii. Important este doar efectul celor longitudinale şi transversale, deoarece cele pe direcţia grosimii materialului sunt de obicei nesemnificative.

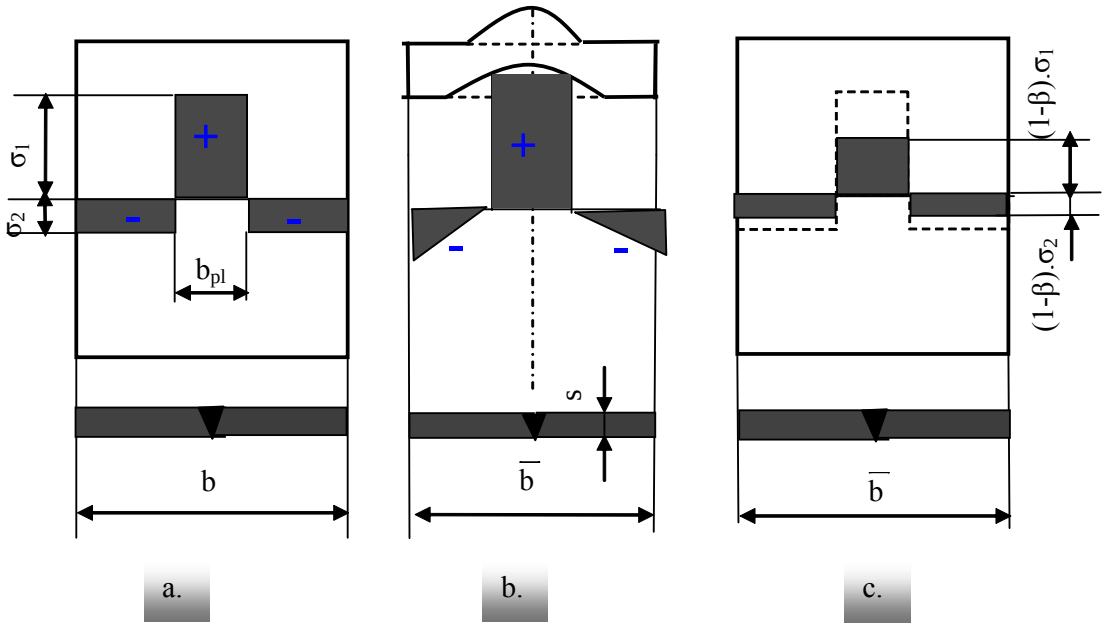


Fig.3.10. Tensiunile remanente în placă cu sudură simetrică şi modificarea stării de tensiune la aplicarea unei sarcini exterioare
a. placă cu sudură; b. placă cu sudură încărcată cu o sarcină exterioară; c. placa după îndepărtarea sarcinii exterioare
s-grosime placă; b_{pl}-lăţimea zonei în care iau naştere tensiuni de tracţiune, zona care se deformează plastic; $_1$-tensiuni de tracţiune; $_2$-tensiuni de compresiune; b-lăţimea plăcii
$\sigma = \beta.R_p$; R_p-limita la curgere; β – coeficient.

Apariţia tensiunilor remanente de sudare este provocată prin deformaţii termo-plastice care s-au produs în zona vecină sudurii, în procesul de încălzire şi răcire neuniformă. Tensiunile remanente de sudare sunt repartizate astfel încât în zona vecină sudurii acţionează tensiuni de tracţiune, în general egale cu limita de curgere. Aceste tensiuni determină şi valoarea tensiunilor în celelalte părţi ale elementului sudat, tensiuni care în cazul poziţiei centrale a sudurii sunt tensiuni de compresiune (fig.3.10.a.) simultan cu apariţia în zona vecină sudurii a tensiunilor maxime de tracţiune, metalul acestei zone dobândeşte o limită de curgere majorată

şi într-o măsură mai mică o limită de rupere majorată (fig.3.10.b). Atingerea de către tensiunile de sudare a limitei de curgere în zona vecină sudurii face ca la aplicarea unei sarcini exterioare de tracțiune în zona vecină sudurii se produce numai creşterea deformațiilor plastice. La îndepărtarea sarcinii exterioare, tensiunile de tracțiune din zona vecină sudurii se micşorează şi în acelaşi raport se reduc tensiunile remanente (fig.3.10.c).

Din analiza prezentată rezultă că la evaluarea influenței tensiunilor de sudare asupra rezistenței structurilor sudate, acestea nu pot fi considerate separat de tensiunile provocate de forțele exterioare şi fără să se țină seama de modificările proprietăților materialului în locul de acțiune a diferitelor tensiuni de sudare. Este necesar să fie luată în considerare complexitatea tuturor factorilor introduşi de procesul de sudare.

3.3. Metode de reducere a tensiunilor şi deformațiilor

3.3.1. Considerații generale

La execuția structurilor sudate pot să apară o serie de dificultăți datorită abaterilor geometrice ale semifabricatelor folosite: laminate, matrițate, tăiate oxi-gaz etc., precum şi datorită deformațiilor ce apar ca urmare a procesului de sudare.

Prezența tensiunilor remanente în structurile sudate, tensiuni care de multe ori au valori ridicate, micşorează capacitatea portantă a structurii.

Existența unei tensiuni într-o structură sudată complexă poate conduce la ruperea fragilă a acesteia sau la reducerea substanțială a rezistenței la oboseală.

Influența negativă a tensiunilor şi deformațiilor remanente la sudare poate fi redusă atât în faza de proiectare, cât şi în faza de execuție a structurilor dacă se iau anumite măsuri constructive şi tehnologice pentru reducerea lor.

3.3.1.1. Măsurile constructive

Poziția îmbinărilor sudate într-un ansamblu trebuie astfel aleasă, încât momentele forțelor de contracție care apar în zonele cu deformări plastice să se echilibreze în raport cu axa geometrică. Proiectarea mărimii şi poziției îmbinărilor sudate trebuie deci astfel efectuate încât suma momentelor statice a volumelor sudurilor în raport cu axa geometrică a ansamblului să fie minimă sau zero.

În general elementele lungi cu suduri nesimetrice se deformează mult, iar elementele cu suduri simetrice vor avea deformații foarte mici şi care se datorează numai factorilor tehnologici.

Mărimea/grosimea sudurii trebuie executată la dimensiunile din proiect, corect calculate. Îngroşările nejustificate ale sudurilor nu sporesc rezistența acestora, ci dimpotrivă pe de o parte conduc la creşterea tensiunilor şi deformațiilor

remanente, iar pe de altă parte reduc substanțial rezistența la oboseală a construcțiilor sau structurilor sudate.

3.3.1.2. Măsurile tehnologice

Principalele măsuri tehnologice de reducere a tensiunilor sunt:

- ordinea de sudare, astfel aleasă încât efectele deformațiilor să se anuleze reciproc cel puțin parțial;
- aplicarea deformațiilor mecanice inverse: preîndoiri, pretensionări etc.;
- sudarea în dispozitive;
- regimul de sudare folosit;
- preîncălzirea;
- aplicarea detensionării locale, parțiale sau totale ale structurii.

3.3.2. Ordinea de sudare

3.3.2.1. Ordinea prinderilor provizorii

Rolul prinderilor provizorii este de a fixa componentele care urmează a fi îmbinate în poziția de sudare, de realizare a rostului, respectiv direcționarea şi reducerea deformațiilor apărute la sudare. Operația de prindere provizorie introduce şi ea tensiuni interne, de aceea se iau în considerare toți factorii care influențează mărimea tensiunilor şi deformațiilor. Efectul unor prinderi provizorii se poate însuma, ceea ce face ca ordinea prinderilor provizorii să nu fie indiferentă.

Prinderea provizorie a tablelor poate diferi.

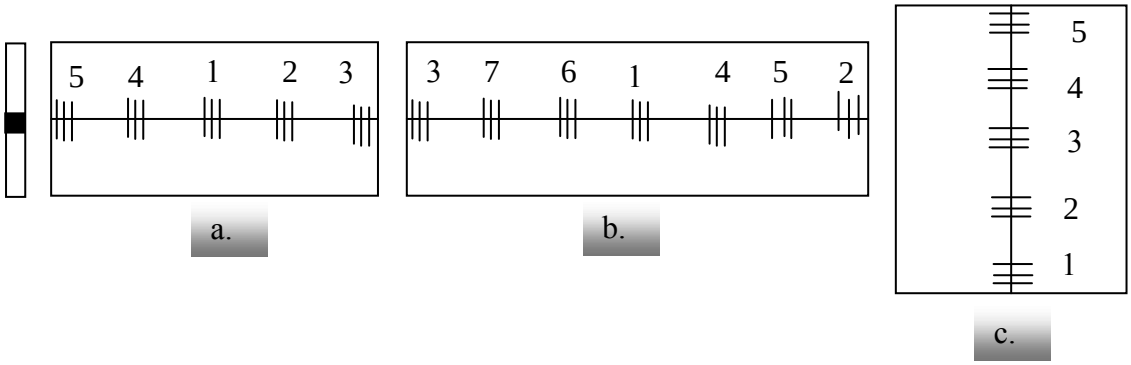


Fig.3.11. Ordinea prinderii provizorii cap la cap a tablelor
a.,b. – prindere provizorie în poziție orizontală; c.- prindere provizorie în poziție verticală

În cazul prezentat în figura 3.11.a. se sudează de la mijloc spre capete, dar prima prindere se face acolo unde deschiderea rostului este cea mai mică. De aici pornind se înaintează spre un capăt al tablei, până când deschiderea rostului devine

minimă sau se ajunge la închiderea rostului datorită prinderii provizorii. Închiderea mare a deschiderii rostului se împiedică prin introducerea în rost a unor pene/distanțatoare. În partea opusă prinderii provizorii muchiile tablelor se îndepărtează mărind deschiderea rostului. În caz că muchiile tablelor se îndepărtează la distanța mai mare de r+1 (r fiind deschiderea rostului) atunci prinderile provizorii se continuă în această porțiune.

Altă posibilitate de prindere provizorie este cea prezentată în figura 3.11.b., când se începe cu prinderea în mijlocul tablei, apoi cele două capete, după care se prind părțile rămase.

Prinderea tablelor în poziție verticală se realizează de jos în sus, figura 3.11.c.

În cazul îmbinărilor în colț, prinderea în poziție orizontală se realizează dacă se poate din mijloc spre capete dar pe ambele părți simultan, figura 3.12.a. În poziție verticală se realizează de jos în sus, figura 3.12.b.

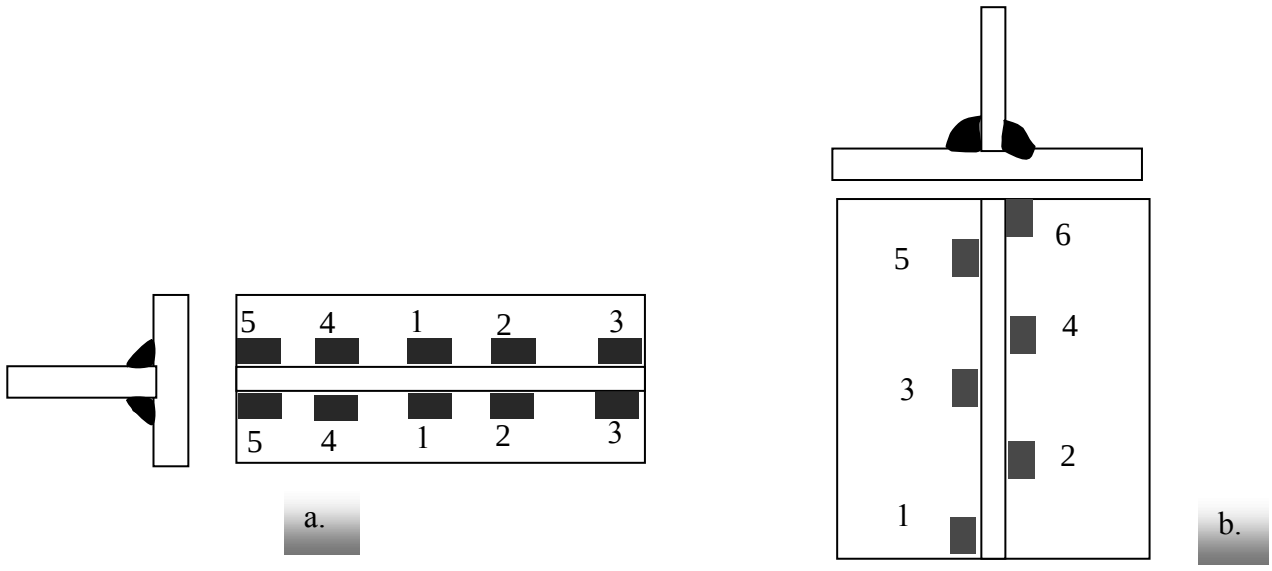


Fig.3.12. Ordinea prinderilor provizorii a îmbinărilor în colț
a. -sudarea în poziție orizontală; b.- sudarea în poziție verticală

În cazul structurii care se sudează doar dintr-o parte se preferă prinderea pe partea opusă sudurii.

3.3.2.2. Ordinea de sudare propriu zisă

Ordinea de sudare prescrie succesiunea realizării îmbinărilor, direcția de sudare a lor, sau la suduri lungi sudarea pe porțiuni a acestora.

Folosind ordine corectă de sudare în cele mai multe cazuri cu metode simple şi ieftine se pot reduce deformațiile structurilor sudate. Trebuie respectate câteva criterii:

- sudurile ce urmează a fi realizate trebuie să fie uşor accesibile. Doar astfel se poate pretinde de la sudor o calitate bună a sudurii respectiv o rezistență bună a sudurii. Astfel la o structură sudată se vor suda mai întâi părțile componente, apoi se îmbină între ele componentele/subansamblele deja îndreptate. În practică de multe ori acest lucru nu se poate respecta;
- ordinea de montare şi sudare a componentelor trebuie să asigure îndreptarea elementelor respectiv a întregii structuri, şi cheltuieli minime a îndreptării. Pentru aceasta structura se împarte pe subansamble astfel ca din punct de vedere a locului sudurilor să existe axe de simetrie. Acestea în urma sudării nu se deformează sau se deformează într-un singur plan, deformație care se îndreaptă uşor. În unele cazuri structura este atât de complicată încât nu se poate împărți pe subansamble fabricabile uşor. În acest caz singura metodă este ca după montarea tuturor părților componente să se sudeze în ordine corespunzătoare sudurile şi cu o introducere minimă de energie;
- ordinea de asamblare şi sudare să fie astfel realizată, ca să rezulte tensiuni interne cât mai mici.

Ordinea de sudare este corectă, dacă:

- în urma sudării elementele componente se pot deforma liber, nu se formează tensiuni şi deformații mari;
- efectul de deformare apărut în urma realizării sudurilor nu se adună;
- momentele apărute în urma forțelor provocate de sudarea îmbinărilor provoacă cea mai mică deformare;
- unele suduri măresc rigiditatea structurii, dar nu împiedică deformarea/contracția liberă a rândurilor următoare.

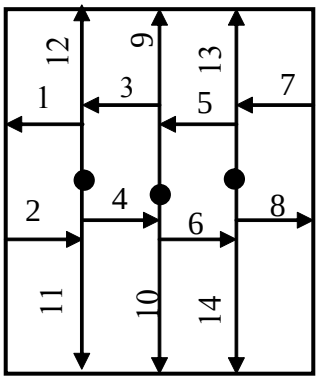


Fig.3.13. Ordinea de sudare a structurilor plane

În cazul sudării tablelor plane după realizarea prinderilor provizorii se sudează sudurile transversale. Direcția de sudare a sudurilor succesive este opusă, figura 3.13., astfel se împiedică curbarea tablelor.

În cazul sudării a două îmbinări paralele cu distanță nu prea mare între ele, se preferă sudarea simultană cu doi sudori a celor două îmbinări.

În cazul sudării tablelor subțiri numărul de rânduri depuse este 1. Acest rând conduce la apariția deformațiilor cele mai mari. De aceea la sudarea tablelor subțiri se va lucra cu cele mai bune metode de reducere a tensiunilor. Se poate recomanda sudarea în trepte inverse, figura 3.14., la îmbinări cap la cap cu lungime mai mare de 1200 mm. În acest caz deformațiile se repartizează uniform pe întreaga lungime a piesei, reducându-se deformația generală a acesteia. Întreaga sudură se împarte în segmente cu lungime egală cu cea a stratului depus de un electrod. Îmbinările cu lungimea de până la 300-400mm se execută printr-o sudare continuă, de la un capăt la celălalt. Cele cu lungime cuprinsă între 400 şi 1200mm se sudează de la mijloc spre capete.

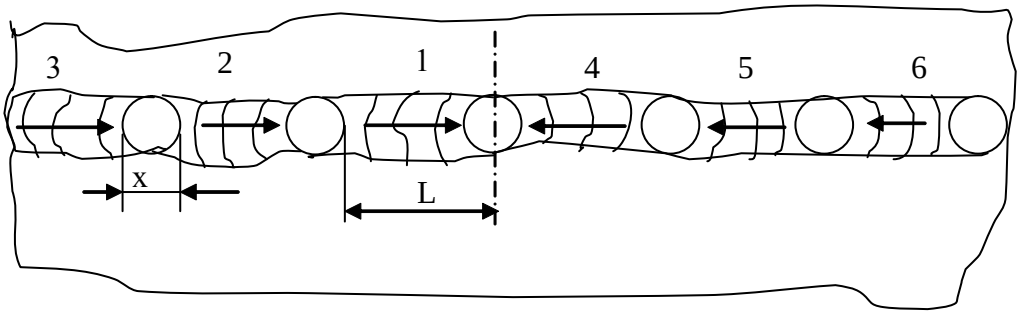


Fig.3.14. Sudarea în trepte inverse
x- crater final; L-lungimea depusă cu un electrod

Tensiunile şi deformațiile longitudinale sunt cu atât mai mari cu cât îmbinarea este mai lungă.

Pentru îmbinările în colț lungi se utilizează metodele indicate şi pentru îmbinările cap la cap (fig.3.15.).

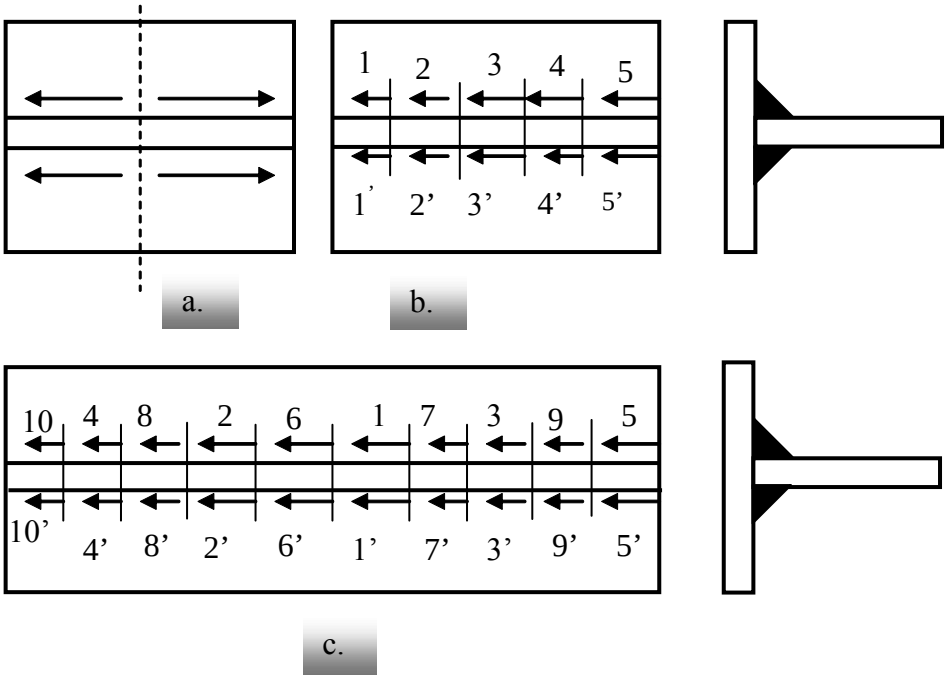


Fig. 3.15. Ordinea de sudarea a îmbinărilor în colț lungi
a-de la centru spre capete; b-în trepte inverse; c-în salturi

Sudarea unui cadru se realizează conform figurii 3.16. Dacă se respectă ordinea de sudare 1,2,3,4 atunci ultimul colț 4 în timpul sudării nu are posibilitatea de contracție. Datorită împiedicării contracției în locurile de sudare 2 şi 3, şi apariției tensiunilor, apare pericolul fisurării.

În fabricație contracția, respectiv tensiunile apărute se pot controla mai bine

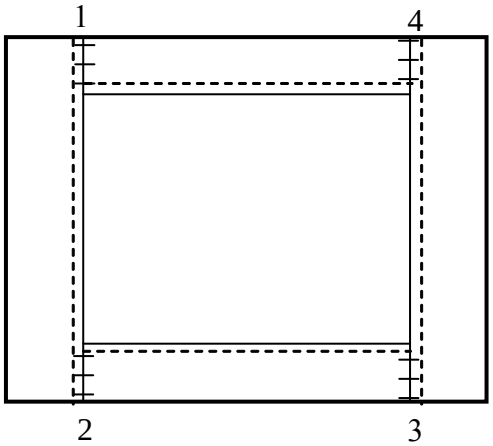


Fig.3.16. Ordinea de sudare a unui cadru

în cazul în care după sudarea colțurilor 1 şi 2, colțurile 3 şi 4 se sudează simultan de doi sudori, sau un sudor sudează alternativ cele două colțuri.

3.3.3. Pretensionarea

Pretensionarea este o metodă des folosită pentru micşorarea deformațiilor apărute în urma sudării. Metoda este avantajoasă în cazul structurilor simetrice pe o axă şi care au o secțiune transversală nu prea mare, care se poate îndoi cu dispozitive simple. Pretensionarea se poate efectua în stare elastică sau plastică. Pretensionarea în domeniul elastic se realizează cu ajutorul dispozitivelor, în domeniul plastic prin deformare sau încălziri locale.

Structura montată şi prinsă provizoriu este curbată invers față de deformația care va apare după sudare şi este fixată printr-un element de strângere de o structură rigidă, de ex. masă de poziționare. Piesa răcită în poziția fixată, după scoaterea din dispozitivul de fixare se va curba/scurta, la fel ca şi în poziție liberă, dar mărimea curbării în acest caz este suficientă doar pentru ca piesa să revină în poziția inițială (fig.3.17.).

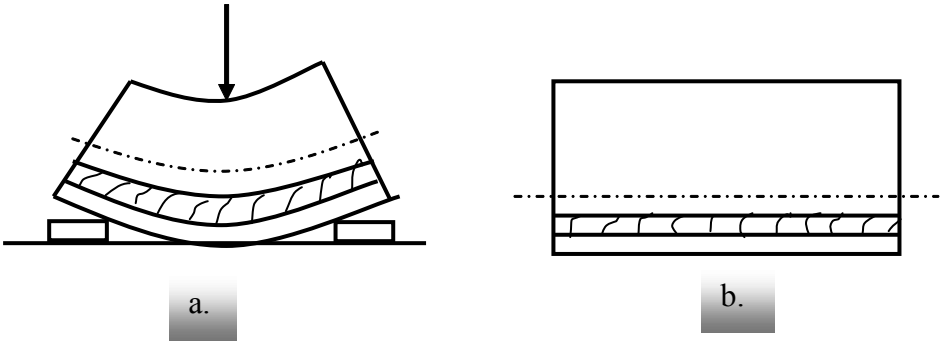


Fig.3.17. Pretensionarea
a-înainte de sudare; b-după sudare

Sunt avantajoase dispozitivele auxiliare de strângere rotative, pentru că sudurile se realizează în poziții de sudare optime.

Mărimea pretensionării depinde de rigiditatea structurii. În cazul sudării structurilor „moi”, elastice se va utiliza o valoare dublă a pretensionării, iar în cazul structurilor rigide se va utiliza o pretensionare cu valoare egală cu cea a deformației posibil a apare fără pretensionare.

3.3.4. Preîndoirea

Preîndoirea este o operație prin care în structură se introduce o deformație remanentă, de aceeaşi mărime, dar de sens opus cu deformația produsă de sudura realizabilă. Deci, materialul este solicitat peste limita la curgere. De aceea, uzual preîndoirea este mai costisitoare ca pretensionarea, dar în unele cazuri dă rezultate mai bune ca pretensionarea sau îndreptarea după sudare.

Moduri de realizare a preîndoirii sunt: presarea, laminarea, ciocănirea, încălzirea cu flacără.

3.3.4.1.Ciocănirea

Ciocănirea se foloseşte la predeformarea inimilor mai subțiri, pentru evitarea curbării cauzate de contracția longitudinală. Ciocănirea se face în apropierea locului sudării înainte de prinderea cu talpa. Astfel materialul din acea zonă se întinde în măsura în care se va contracta sudura. Dacă s-a lucrat corect, după sudare structura va fi fără deformații (fig.3.18.).

3.3.4.2.Încălzirea cu flacără

Încălzirea cu flacără se foloseşte la structuri mai mari, la inimi mai înalte. Aici contrar ciocănirii, încălzirea şi contracția se face pe muchia opusă sudării. Curbura astfel realizată este anihilată de contracția dată de sudare. Se recomandă această metodă doar dacă nu se pot aplica alte metode de îndreptare după sudare, deoarece este o operație complicată (fig.3.18.).

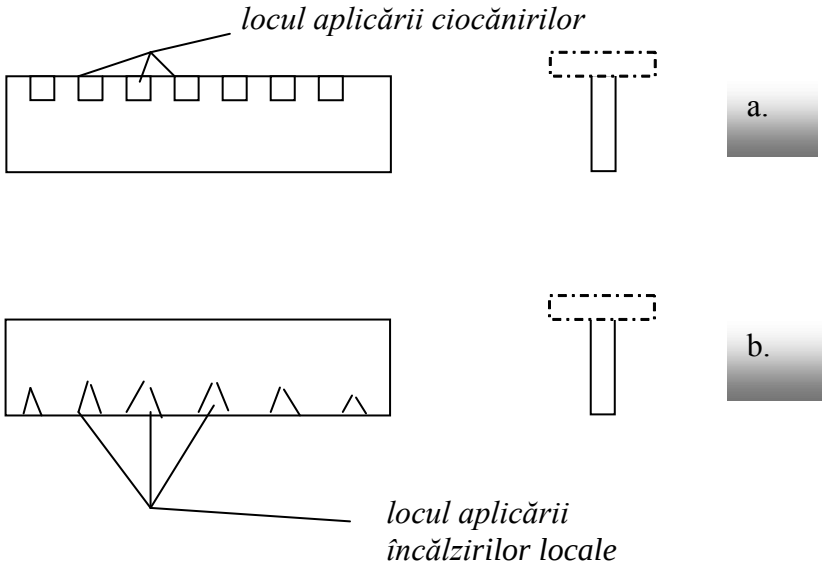


Fig.3.18. Preîndoirea inimii
a-prin ciocănire; b-prin încălzire cu flacără

3.3.5. Sudarea în dispozitive

Utilizarea dispozitivelor de sudare, a instalaţiilor semimecanizate şi mecanizate, a roboţilor de sudare conduce la creşterea productivităţii, uşurarea muncii sudorului, măresc precizia de execuţie şi îmbunătăţesc calitatea structurilor sudate. O cerinţă esenţială impusă dispozitivelor de sudare este aceea de a diminua sau elimina deformaţiile diferitelor subansamble ca urmare a acţiunii câmpului termic la sudare.

Dispozitivele de prindere provizorie cu sudură şi dispozitivele de sudare specifice utilizate la sudarea tablelor subţiri se tratează în funcţie de felul îmbinării şi de dimensiunile componentelor.

Pentru îmbinarea cap la cap a tablelor sunt utilizate mese pe care sunt aşezate componentele. În dreptul rostului masa va fi prevăzută cu un pat de cupru. Rostul patului de cupru este să conducă căldura, respectiv dacă este prelucrată pe partea superioară a sa contribuie la formarea rădăcinii sudurii.

Aceeaşi principii se utilizează în cazul când tablele nu sunt plate, ci de exemplu sunt sub formă de virolă, virola făcând parte dintr-un rezervor. În acest caz masa are o formă curbă care este la fel prevăzută cu un pat de cupru cu diferite canale pentru realizarea uniformă a rădăcinii sudurii.

Aceste dispozitive permit utilizarea tuturor procedeelor de sudare.

La prinderea provizorie distanţele dintre prinderile provizorii cu sudură sunt în funcţie de grosimea materialului/tablei. Această distanţă creşte odată cu creşterea grosimii tablelor, lucru demonstrat şi de experimentările efectuate cu această ocazie.

Pentru îmbinările în colţ se concep dispozitive de prindere provizorie cu sudură care nu au elemente specifice pentru table subţiri, doar că elementele de strângere nu trebuie să asigure forţe mari.

Dispozitivele de sudare a profilelor T, I sau cheson reclamă conceperea, executarea şi utilizarea dispozitivelor de orientare, poziţionare. Cu aceste dispozitive se realizează poziţia optimă de sudare adică poziţia orizontală sau jgheab pentru fiecare sudură în colţ. În funcţie de gradul lor de utilizare acestea pot fi antrenate/acţionate manual sau mecanizat.

În cazul sudării tablelor învelitoare pe schelet cel mai eficient procedeu este sudarea MAG. Din cercetările efectuate în cadrul elaborării tezei s-a tras concluzia că productivitate mai ridicată şi deformaţii mai mici se obţin prin introducere de energie liniară mai mică. De aici rezultă ideea de a suda tabla învelitoare pe schelet prin presiune în puncte, pentru care se recomandă dispozitivul din figura 3.19.

Pe o masă de lucru (1) placată cu platbenzi de cupru (9) în dreptul realizării punctelor sudate se va întinde tabla învelitoare. Tabla se fixează la un capăt cu dispozitive de strângere (4), iar partea opusă longitudinal se va întinde cu hidromotoare liniare (5). Peste tabla întinsă se aşează scheletul peretelui lateral modulat (3). Fixarea modulelor se realizează cu ajutorul unei capre (6) care este prevăzută cu elemente de strângere (7) şi electrozi (8) pentru sudare prin rezistenţă

în puncte dintr-o parte. Această variantă ar reduce simţitor deformaţiile şi ar reduce manopera atât la sudare cât şi la îndreptare, dar necesită o investiţie mai mare.

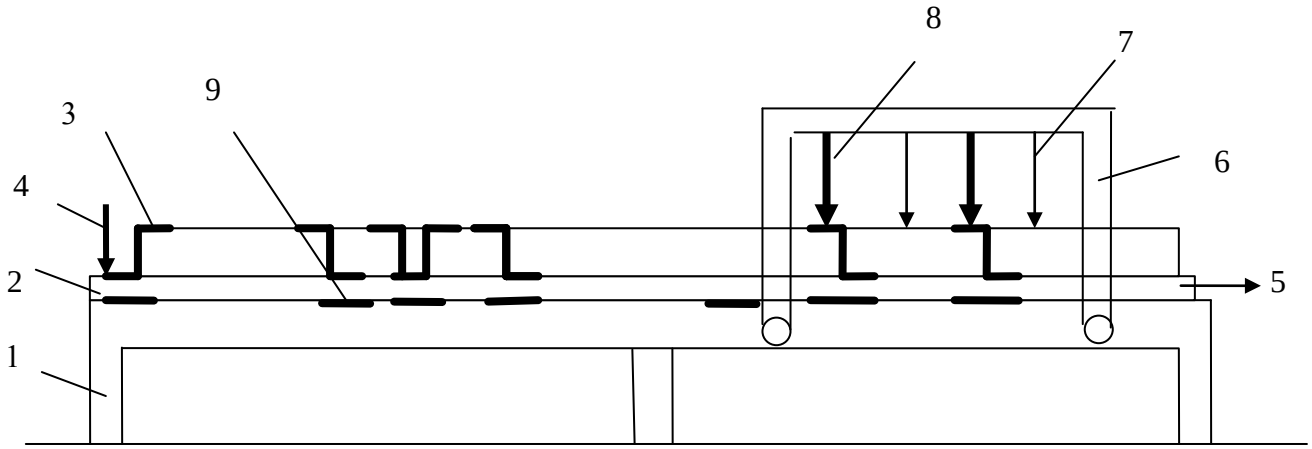


Fig.3.19. Dispozitiv de sudat schelet pe tablă
1-masă de lucru; 2-tabla învelitoare; 3-schelet modulat; 4-element de strângere; 5-hidromotor liniar; 6-capră; 7-element de strângere; 8-electrozi; 9-platbandă de cupru

3.3.6. Preîncălzirea

Preîncălzirea este operaţia tehnologică prin care se obţin următoarele rezultate favorabile:

- se reduce viteza de răcire şi se evită prin aceasta apariţia unor constituenţi cu grad de plasticitate redus;
- se reduc tensiunile remanente care apar în procesul de sudare.

Temperatura de preîncălzire se stabileşte în funcţie de procedeul de sudare, de compoziţia chimică a materialului de sudat, de rigiditatea construcţiei, precum şi de tipul îmbinării. Preîncălzirea poate fi locală sau generală.

3.3.7. Detensionarea

Detensionarea are ca scop diminuarea tensiunilor interne care apar, se dezvoltă şi parţial rămân în produsele metalice în urma sudării.

În principiu, eliminarea tensiunilor remanente se bazează pe transformarea deformaţiilor elastice care le însoţesc în deformaţii plastice.

Detensionarea se realizează prin trei mecanisme care se completează unul pe altul:

- scăderea modulului de elasticitate;

- scăderea limitei de curgere;
- relaxarea prin fluaj.

Fiecare dintre mecanismele menționate intră în acțiune la o anumită temperatură caracteristică.

Parametrii tehnologici ai detensionării sunt:

- temperatura de încălzire;
- durata de menținere;
- viteza de răcire.

Ciclograma tratamentului termic de detensionare este redată în figura 3.20.

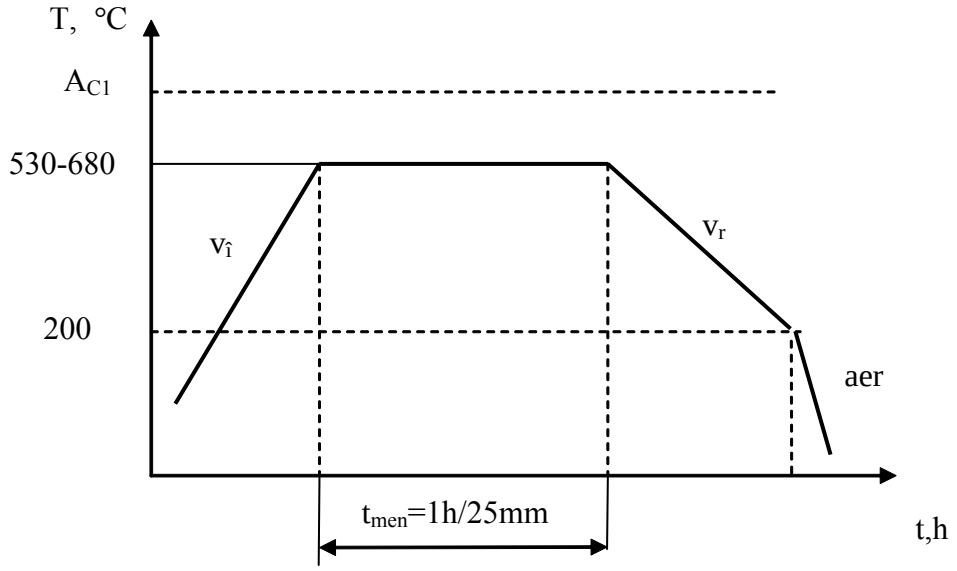


Fig.3.20. Ciclograma tratamentului termic de detensionare
$v_î$=40-80 °C/h- viteza de încălzire; v_r= 40-80 °C/h- viteza de răcire

Încălzirea se face lent, pe de o parte pentru evitarea apariției unor tensiuni termice ridicate care s-ar putea suprapune peste cele remanente şi ar conduce la deformarea sau fisurarea produsului, iar pe de altă parte pentru că în cursul acestei faze are loc deja un proces de detensionare dinamică astfel că o bună parte din tensiuni se elimină în această etapă.

Durata de menținere se calculează cu (3.11.):

$t_{men}=s_{max}/25$, (h) (3.11.)

unde:

- s_{max}= grosimea maximă a produsului, în mm.

Viteza de răcire este scăzută tocmai pentru a nu se induce tensiuni termice în produsul care se tratează termic.

4. METODE DE ÎNDREPTARE A TABLELOR SUBȚIRI

4.1. Considerații generale

În general tablele subțiri în structurile sudate sunt utilizate ca elemente învelitoare pe scheletele structurilor sudate. Deformarea lor poate avea cauze mecanice, ca loviturile, sau cauze termice, ca încălzirile.

În cele ce urmează se prezintă principiul structural al apariției deformațiilor la table subțiri [60].

Se consideră o tablă de formă pătrată plană (fig.4.1.).

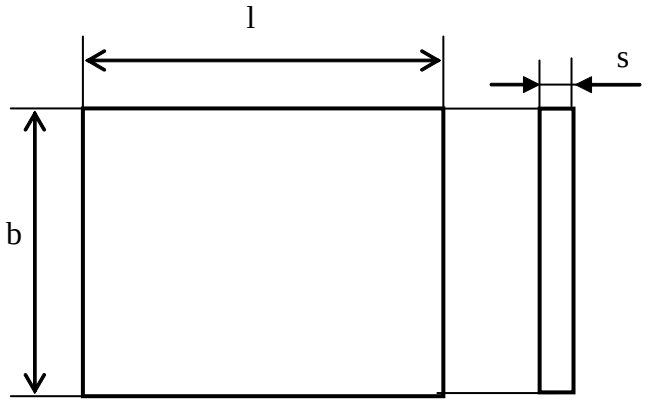


Fig.4.1. Dimensiunile unei table plane

unde:

- l-lungimea tablei;
- b-lățimea tablei;
- s-grosimea tablei.

Suprafața tablei de *lxb* este generată de o infinitate de segmente paralele longitudinale şi transversale de lungime „l” egale între ele (4.1.) şi (4.2.):

$$l_{l1} = l_{l2} = l_{l3} = ... = l_{ln} \quad (4.1.)$$

$$l_{t1} = l_{t2} = l_{t3} = ... = l_{tn} \quad (4.2.)$$

unde:

- l_{l1} – primul segment longitudinal;
- l_{ln} – ultimul segment longitudinal;
- l_{t1} – primul segment transversal;
- l_{tn} – ultimul segment transversal.

Dacă acestei table i se aplică o lovitură mecanică, ea se va deforma la mijloc, conform figurii 4.2. Presupunem că tabla s-a deformat după o calotă sferică.

Dacă se studiază tabla deformată doar din punct de vedere a segmentelor elementelor longitudinale, se constată următoarele:

- segmentele elementare longitudinale înainte de deformare erau egale, conform (4.1.) şi (4.2.);
- după deformare egalitatea s-a transformat în inegalitate (4.3. - 4.5.);

$$l_{l1} \langle l_{l2} \langle ... \langle l_{ln} \quad (4.3.)$$

$$l_{l2} = l_{l1} + \Delta l_2 \quad (4.4.)$$

$$l_{ln} = l_{l1} + \Delta l_n \quad (4.5.)$$

- segmentul cu lungimea l_{l2} corespunde cercului aflat la înălțimea „h_2”;
- segmentul cu lungimea l_{l3} corespunde cercului aflat la înălțimea „h_3”;
- segmentul cu lungimea l_{ln} corespunde punctului aflat la înălțimea „h_n”;

Modificarea lungimii segmentelor elementare l_{l1}, l_{l2},…,l_{ln} sunt cauzate de alungirea, deformarea lor plastică în urma aplicării forței mecanice.

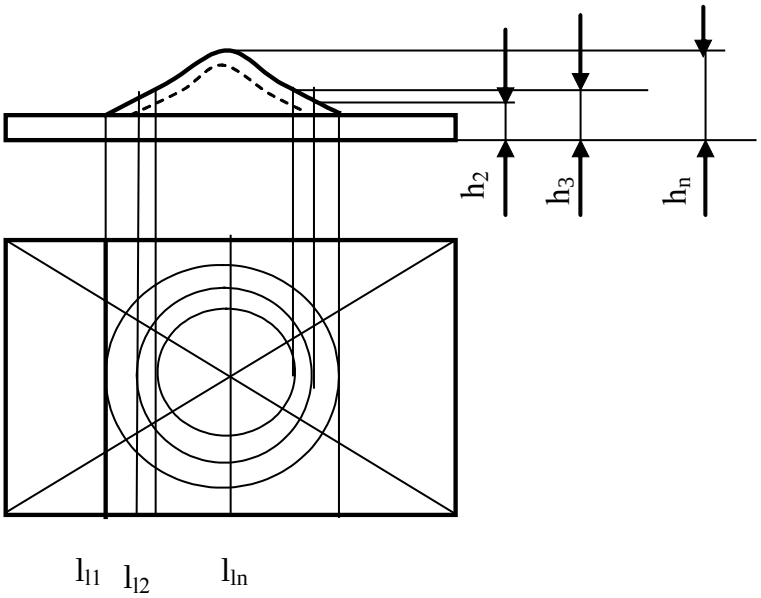


Fig.4.2. Reprezentarea segmentelor elementare la o tablă deformată

Acelaşi raționament este valabil şi în cazul segmentelor transversale.

O deformație aproape la fel se obține dacă tabla reprezentată în figura 4.1. este montată şi sudată pe un schelet, ea fiind o tablă acoperitoare într-o structură. Dacă se presupune că tabla se sudează jur împrejur de schelet cu o sudură în colț, din cauza contracției longitudinale lungimea segmentelor în apropierea sudurii se vor scurta iar lungimea segmentelor elementare în mijlocul tablei vor rămâne la valoarea inițială. Astfel tabla va primi o deformație aproximativă celei prezentate în figura 4.2.

Din cele prezentate mai sus rezultă, că îndreptarea tablei trebuie să urmărească readucerea segmentelor elementare la starea inițială. O egalitate perfectă a lungimilor, readucerea lor la valoarea inițială este imposibil de realizat.

Se cunosc două metode de îndreptare:

- mecanică;
- cu încălziri locale.

Metoda de îndreptare mecanică se bazează pe întinderea segmentelor elementare (l_{l1}-l_{ln-1}) la nivelul segmentului celui mai lung (l_{ln}), adică (4.6.):

$$
\begin{aligned}
& l_{l1} \rightarrow l_{\ln} \\
& l_{l2} \rightarrow l_{\ln} \\
& \ldots\ldots \\
& l_{n-1} \rightarrow l_{l}
\end{aligned}
\qquad (4.6.)
$$

În figura 4.3.a se prezintă direcţiile de aplicare a loviturilor de ciocan în vederea întinderii segmentelor elementare scurte în vederea îndeplinirii condiţiilor din (4.1.) şi (4.2.).

Metoda de îndreptare cu încălziri locale urmăreşte scurtarea segmentelor elementare iniţiale la valoarea scurtată rezultată în urma contracţiei cauzate de operaţia de sudare. În figura 4.3.b se prezintă locurile de aplicare ale încălzirilor locale.

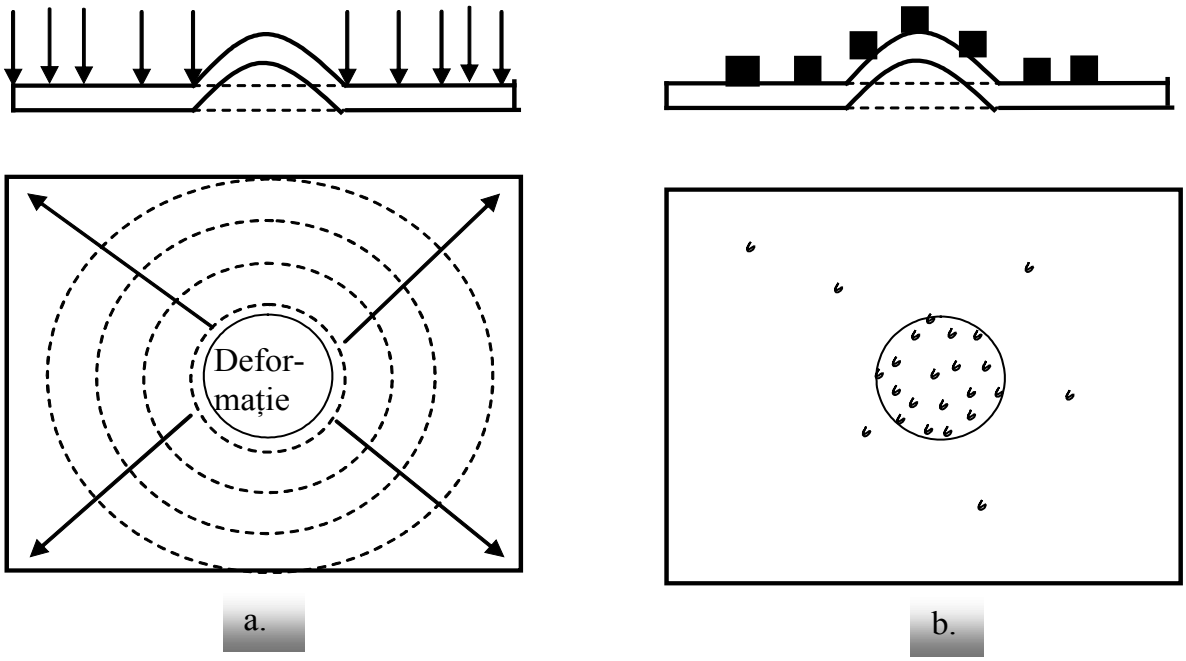


Fig. 4.3. Metode de îndreptare
a- cu ciocanul; b-cu încălziri locale

4.2. Clasificarea metodelor de îndreptare

Cele mai cunoscute metode de îndreptare sunt prezentate în figura 4.4. :

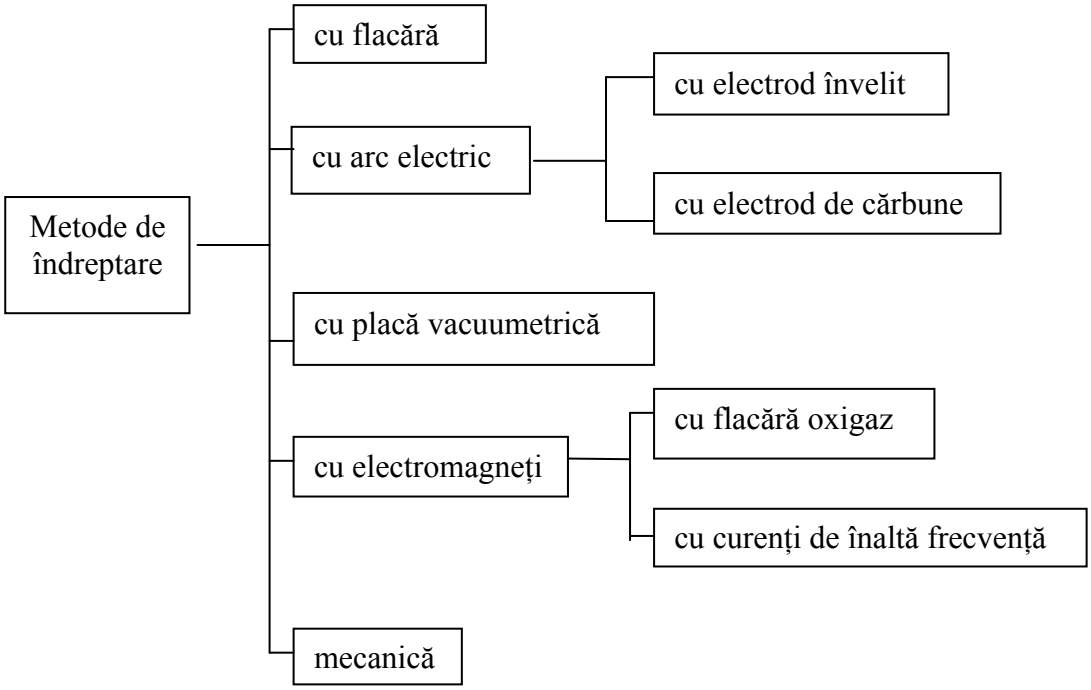


Fig. 4.4. Clasificarea metodelor de îndreptare

O clasificare a metodelor de îndreptare după temperatura de lucru este prezentată în figura 4.5. [58].

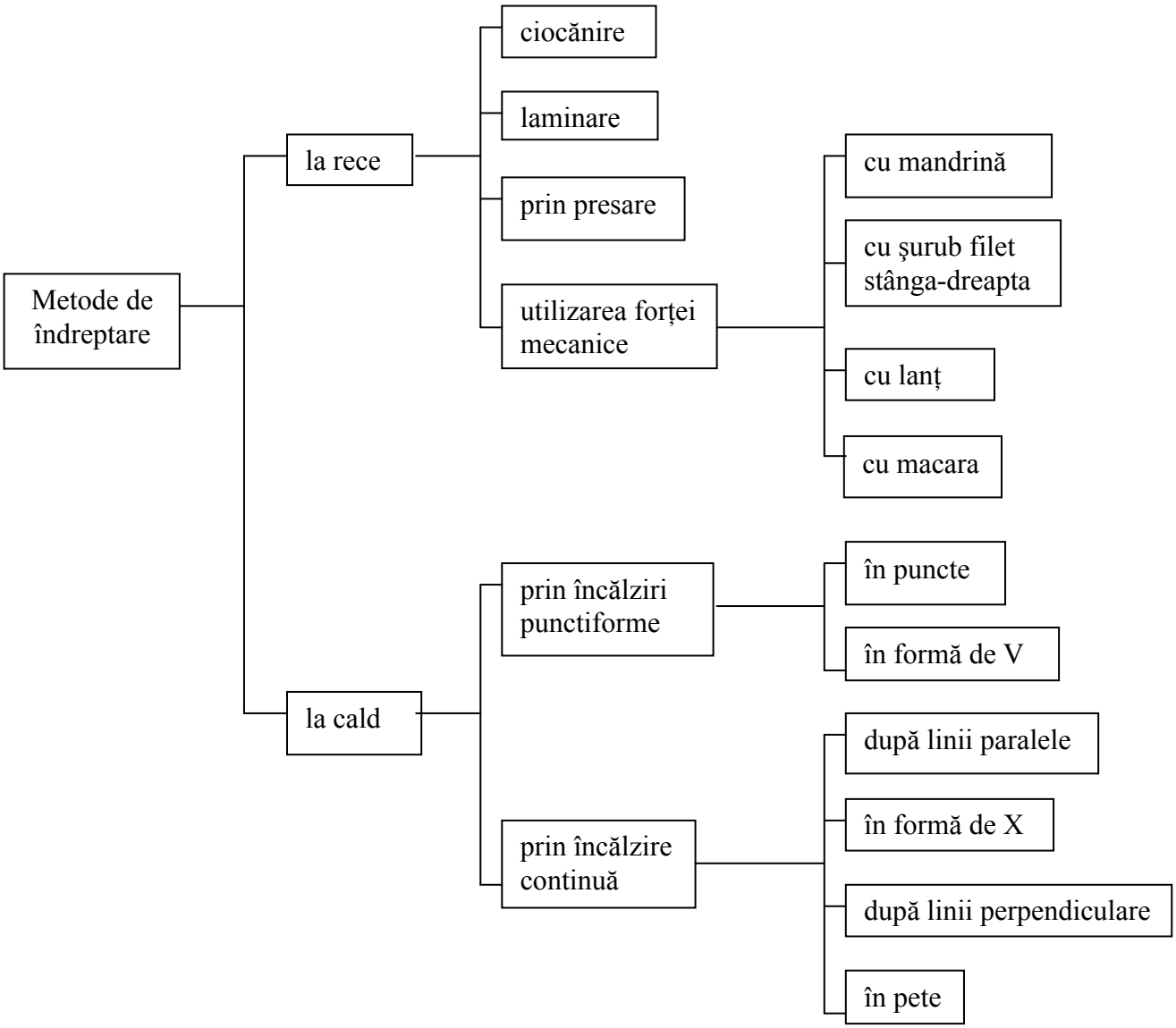


Fig. 4.5. Clasificarea metodelor de îndreptare după temperatura de lucru

4.2.1. Îndreptarea cu flacără oxigaz

În zonele cu curburi tabla se încălzeşte cu flacără oxigaz, de obicei oxiacetilenică, punctiform din interior şi exterior, după care se răceşte cu un jet de apă. Punctele încălzite înainte de răcirea cu apă, în funcție de partea pe care se deformează din cauza căldurii, se îndreaptă cu ciocanul de lemn. Acest procedeu nu este productiv deoarece sunt necesari cel puțin doi muncitori plasați de ambele părți ale tablei. Muncitorul care încălzeşte trebuie să fie cu experiență, deoarece o încălzire imprecisă poate deforma tabla şi mai rău. Apa cu care se răceşte ulterior conduce la un proces de oxidare rapidă. În locurile încălzite vor apărea deformații punctiforme de diferite diametre între 6-10mm ce nu se pot elimina. Din această cauză aspectul exterior al carcaselor nu este cel dorit, chiar şi după chituirea şi vopsirea lor.

4.2.2. Îndreptarea cu arc electric cu electrod învelit

Această metodă este asemănătoare cu cea care foloseşte încălzirea oxigaz, cu deosebirea, că flacăra arzătorului este înlocuită cu arcul electric produs între un electrod învelit şi tabla carcasei. Încălzirile se repartizează punctiform, în linie dreaptă sau sinusoidală. În momentul încălzirii, locurile încălzite care conţin tensiuni interne sunt împinse spre exterior, lucru evidenţiat în figura 4.6. Se lucrează cu arc electric cât se poate de lung.

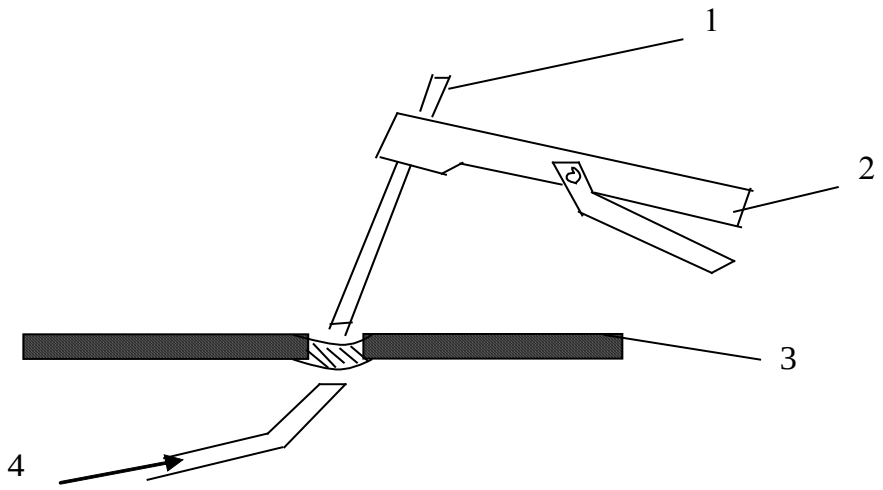


Fig.4.6. Îndreptarea cu arc electric cu electrod învelit
1-electrod învelit; 2-portelectrod; 3-tabla deformată; 4-răcire cu apă

Locurile încălzite se deformează local, aceste curburi având valori de 0,5-1,0mm şi nu pot fi înlăturate, dând un aspect neplăcut suprafeţei îndreptate după vopsire. În afară de acest dezavantaj, din cauza folosirii arcului electric din interior, pe alocuri tabla se subţiază sau se îngroaşă prin depunere de metal topit de pe vârful electrodului şi apar focare intense de coroziune.

4.2.3. Îndreptarea cu arc electric cu electrozi de cărbune

Deosebirea faţă de îndreptarea cu arc electric cu electrod învelit este că în locul electrozilor înveliţi sunt utilizaţi electrozi de cărbune cu diametru de 6-12mm. Îndreptarea cu arc electric cu electrod de cărbune este superioară calitativ, deoarece nu are loc depunere de material pe locurile unde se produc încălzirile locale în interiorul carcasei pe tablele deformate după sudare, dar subţierea tablei prin arc electric există, ceea ce conduce la reducerea grosimii tablelor învelitoare apărând şi în acest caz focare de coroziune.

4.2.4. Îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale

Această metodă constă în aşezarea unei plăci cu dimensiuni 1000x1000mm din exterior pe tabla învelitoare a carcaselor, placa fiind prevăzută pe margini cu garnituri de cauciuc 3 pentru etanşare. Cu o pompă de vid 2 se crează o depresiune între placă şi tablă. Tabla astfel se va îndrepta prin întindere pe o porţiune cuprinsă între cadrele formate din stâlpi şi întărituri. Din momentul începerii creării vidului, placa 1 se ţine presată pe carcasă, asigurându-se etanşarea pe contur. Surplusul relativ de material apare prin ridicături de diferite mărimi şi înălţimi (fig.4.7.). Încălzirile locale vor conduce la eliminarea lor. Aceste încălziri se vor aplica în jurul poalelor dealurilor născute în urma realizării depresiunii, cu încălziri punctiforme locale, cu flacără oxigaz. După încălzirile aplicate pe conturul 1 (fig.4.8.), dreptele elementare longitudinale şi transversale se vor scurta şi mărimea deformaţiei „dealului" se va reduce formând polul său după curba închisă 2. Operaţiile se repetă până la eliminarea completă a deformaţiei sau deformaţiilor (fig.4.8.). Se obţine o calitate net superioară metodelor precedente, însă necesită operatori bine pregătiţi.

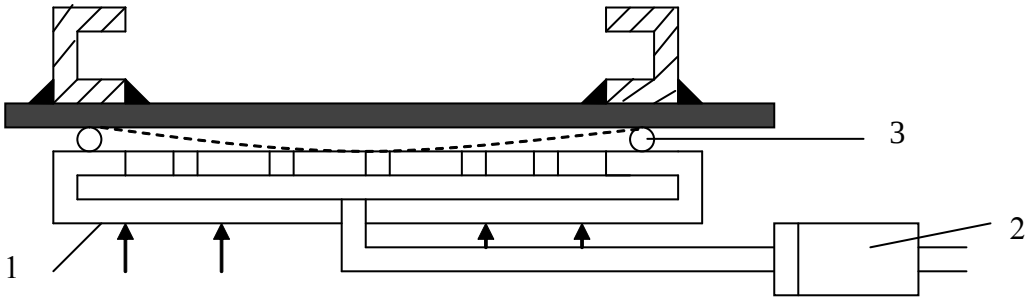


Fig.4.7. Îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale
1-placă; 2-pompă de vid; 3-garnituri de cauciuc

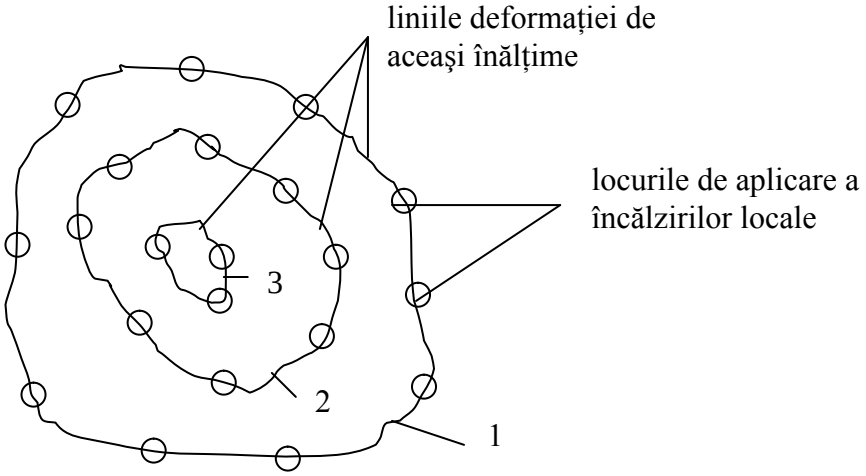


Fig.4.8. Ordinea de aplicare a încălzirilor
1,2,3-liniile deformaţiilor de aceaşi nivel

4.2.5. Îndreptarea prin metode mecanice

Îndreptarea prin metode mecanice este necesară în primul rând pentru aducerea elementelor ansamblului carcasei la parametrii geometrici prevăzuți în documentație.

Toate metodele de îndreptare prezentate anterior necesită îndreptare mecanică. Această metodă are la bază lovirea, ciocănirea locală a tablelor cu un ciocan de 0,5 kg. Tablele învelitoare se retuşează prin lovituri repetate aplicate de către 2 operatori, primul din interior, al doilea din exterior ajungând la o deformație maximă de 0,5 – 1,0 mm, deformație măsurată cu un liniar de 1 m lungime.

4.3. Îndreptarea la rece

Îndreptarea la rece este mai rapidă şi mai ieftină, de obicei, ca şi îndreptarea la cald. De aceea, dacă este posibil, se alege îndreptarea la rece. Cele mai utilizate metode de îndreptare la rece sunt: ciocănirea, laminarea şi presarea [101].

Îndreptarea la rece se face utilizând forțe de tracțiune (fig.4.9.a,b,c) sau de încovoiere (fig.4.9.d). Forță de tracțiune se aplică în cazul sudurilor longitudinale ale stâlpilor. Încovoiere se aplică în cazul în care se doreşte scurtarea unei părți respectiv lungirea celeilalte părți a piesei.

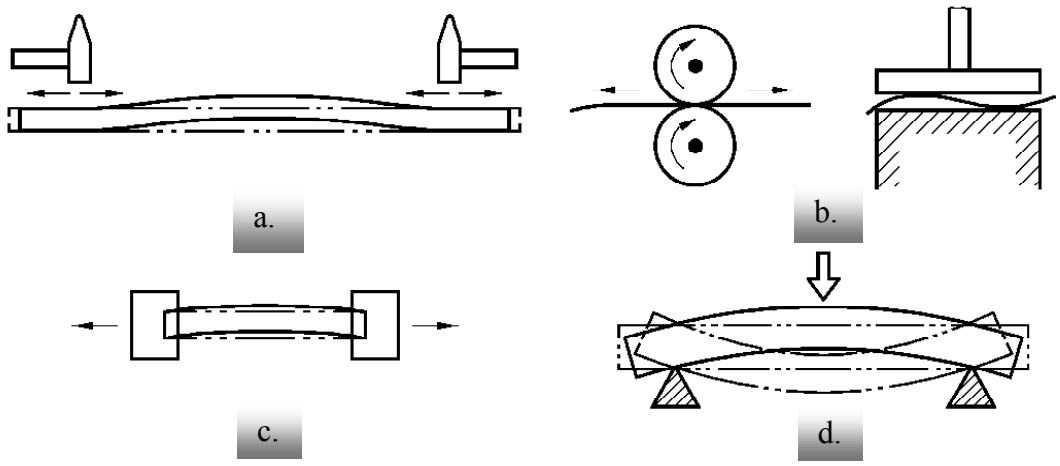


Fig. 4.9. Îndreptarea la rece
a,b-întindere; c-întindere cu tracțiune; d-încovoiere

4.3.1. Ciocănirea

Ciocănirea se face cu ajutorul unor ciocane de 0,5-1,5 kg greutate şi pe o masă suficient de rigidă. Condiția cea mai importantă este ca materialul să se deformeze plastic. Pentru aceasta piesa de îndreptat se sprijină pe o masă care are o greutate mult mai mare ca cea a ciocanului. Se utilizează o placă de oțel cu suprafață mare, de câțiva m^2, şi grosime de 200-300 mm. Dacă acest lucru nu se poate realiza, se utilizează un contra ciocan cu greutate mult mai mare ca a ciocanului. Utilizarea contra ciocanului nu are eficiența utilizării mesei.

Prin ciocănire se îndreaptă foarte bine tablele mai mici şi mai subțiri înainte de montare, respectiv platbenzile şi profilele. Curbarea profilelor şi platbenzilor se elimină prin ciocănirea muchiei mai scurte a lor.

Ciocănirea tablelor subțiri – cu toate că ele pot fi laminate cu role cu diametru mic- se face cu un ciocan cu suprafață perfect plană sau sub formă de calotă sferică şi fără defecte de suprafață. Acest procedeu necesită experiență mare a operatorului. Tabla se alungeşte, de aceea se lovesc poalele „dealurilor” şi nu „vârfurile”.

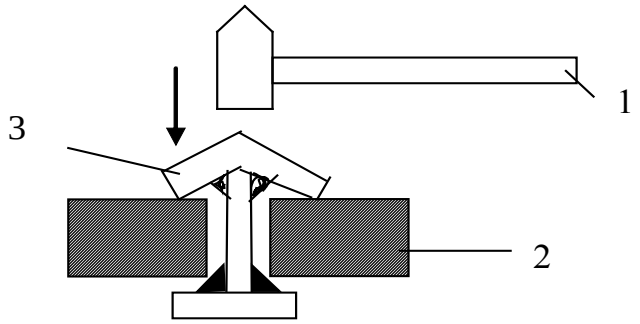


Fig.4.10. Ciocănirea tălpii profilului I
1-ciocan; 2- masă suport; 3-talpă profil I

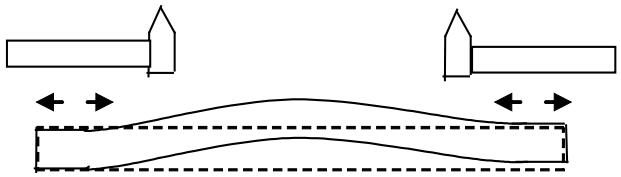


Fig.4.11. Îndreptarea tablei ondulate prin ciocănire

Asemănător se procedează la îndreptarea tablelor sudate cap la cap. Se ciocăneşte sudura şi zona înconjurătoare sudurii pentru a o întinde. Acestea sunt valabile doar pentru table plate (fig.4.11.).

4.3.2. Laminarea

Procedeul cel mai economic de îndreptare este laminarea tablelor plane şi late. Laminarea se face înainte de montare şi după sudare. Se poate elimina curbarea tablelor dacă pe partea mai scurtă, concavă a elementului se pune o platbandă îngustă iar acestea se introduc împreună în laminor întinzându-se acea parte. Este o metodă mai rapidă ca ciocănirea. Tot laminarea se utilizează la tabelele îmbinate cap la cap, cu toate că în acest caz trebuie îndepărtată supraînălţarea sudurii (fig.4.12.).

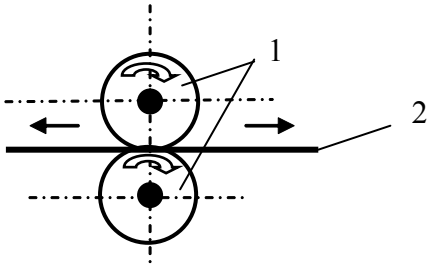


Fig.4.12. Îndreptarea prin laminare
1-role laminor; 2- tabla deformată

Laminarea zonei sudurii cu role cilindrice cu lăţime mică (20-25mm) creează o alungire a materialului prin micşorarea grosimii locale uniform (supraînălţarea sudurii). Alungirea metalului în direcţia longitudinală şi a zonei adiacente în zona laminării conduce la micşorarea tensiunilor proprii respectiv a deformaţiilor datorită sudării.

Se laminează rândul de sudură şi zona adiacentă rândului pe ambele părţi. Alegerea regimului de laminare se face pe cale experimentală, însă se poate determina şi analitic după relaţia convenţională (4.7) cu verificarea ulterioară pe piesa de îndreptat prin laminare [26].

$$\frac{P}{b} = 3{,}3.\sqrt{\frac{d.s.R_p}{E}} \qquad (4.7)$$

unde:

- P- presiune necesară la laminarea rândului pentru îndreptare;
- b-lăţimea rolei în cm;
- d-diametrul rolei în cm;
- s- grosimea materialului în zona de laminare;
- R_P- limita de curgere a materialului care se laminează;
- E- modul de elasticitate longitudinal.

Repetând laminarea în unul şi acelaşi loc, la presiune constantă se obţine o deformare suplimentară, reprezentând 10-15% din deformaţia primei treceri. Metoda asigură o calitate şi o productivitate ridicată, însă aplicarea ei este limitată de lăţimea tablelor şi de dimensiunile laminorului.

4.4. Îndreptarea la cald

În cazul îndreptării la cald există două variante:

- prima metodă se bazează pe faptul că limita de curgere a oțelului la temperatura aproximativă de 550 °C scade la zero, oțelul devenind foarte plastic şi uşor deformabil. De aceea toată secțiunea structurii care se îndreaptă se încălzeşte la aproximativ 600 °C, după care cu o forță exterioară prin ciocănire, presare etc. se va aduce piesa la forma dorită, respectiv se vor elimina deformațiile structurii. Dacă se încălzeşte structura la 900 °C, aceasta îşi va modifica forma şi sub propria greutate;
- a doua metodă se bazează pe dilatarea termică a materialelor. Se încălzeşte doar o parte a secțiunii care ajunge la aproximativ 600 °C, această parte urmând să se dilate, dilatare care este împiedicată de materialul rece înconjurător. De aceea materialul încălzit se refulează. În timpul răcirii partea refulată de material se contractă şi va avea dimensiuni mai mici ca cele inițiale, astfel întinde materialul rece din jurul lui. În timpul încălzirii introducând căldură la locurile potrivite şi astfel provocând contracție se pot elimina deformațiile cauzate de sudare.

Cerințele privind aplicarea variantei sunt:

- dacă se face îndreptare utilizând introducere de căldură fără acționare cu forță exterioară se încălzeşte doar o parte a structurii. Dacă se încălzeşte toată secțiunea, aceasta se dilată iar după răcire revine la dimensiunile inițiale, la forma inițială;
- introducerea de căldură se face rapid şi concentrat, în caz contrar se încălzeşte o lățime prea mare de material astfel reducându-se efectele de refulare, contracție, îndreptare;
- întotdeauna se va încălzi o porțiune corespunzătoare grosimii de material, dacă se încălzeşte o porțiune mai lată, aceasta în loc de refulare se bombează şi la răcire doar ondularea acestei părți va scade, dar forma întregii structuri nu va fi afectată;
- temperatura de încălzire nu trebuie să depăşească 600-650°C, existând pericolul călirii şi fisurării oțelurilor în special a celor cu conținut ridicat de carbon şi carbon echivalent. Cu această metodă se pot îndrepta oțelurile care se sudează fără preîncălzire pentru că este mai mică probabilitatea de apariție a călirii lor. Oțelurile care se sudează cu preîncălzire, dacă este posibil, nu se îndreaptă cu această metodă sau se aplică un tratament termic ulterior. În timpul îndreptării pentru accentuarea contracțiilor, în special la oțeluri cu puțin carbon, acestea se răcesc cu apă. Se răceşte partea vecină celei încălzite;
- cel mai des, ca sursă termică se utilizează flacăra oxiacetilenică. Rapiditatea încălzirii se realizează prin alegerea corespunzătoare a duzei arzătorului;
- prin ciocănirea materialului încălzit se accentuează efectul îndreptării rezultând contracții mai mari ale piesei. În acest caz se încălzeşte o lățime mai mare de material;

➢ căldura se va introduce în locul în care există surplusul de material. Se îndreaptă de obicei structurile asimetrice, unde simetria contracţiilor este dată de introducerea căldurii la îndreptare.

Metodele de îndreptare la cald sunt:

➢ îndreptare prin încălziri punctiforme;
➢ îndreptare prin încălzire continuă.

4.4.1. Îndreptare prin încălziri punctiforme

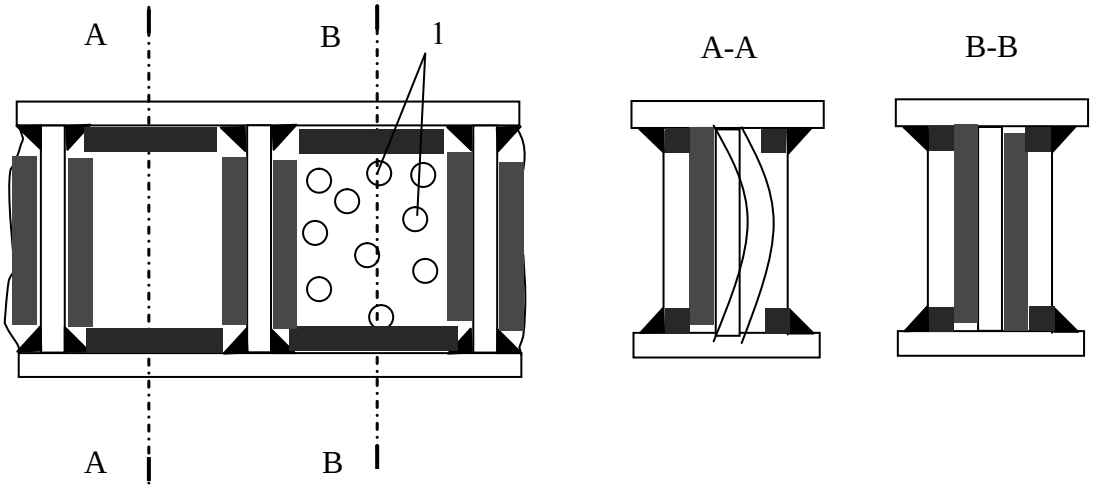


Fig.4.13. Îndreptarea prin încălziri punctiforme a inimii profilului I
1-încălziri punctiforme; A-A – secţiune după sudare; B-B – secţiune după îndreptare

Diametrul punctelor încălzite la roşu trebuie să fie de 10-30mm, în cazuri extreme de 50mm, în funcţie de grosimea materialului. Distanţa dintre puncte depinde de deformaţia tablei, mărimea deformaţiei, dar nu trebuie să fie mai mică de 4x diametrul punctului. Este indicat, ca încălzirea să se înceapă de la extremităţi. Încălzirea se continuă doar în locurile complet răcite. În figura 4.13. sudurile în colţ contractă marginile componentelor astfel va apare o curbare a inimii care trebuie eliminată.

Curbarea oţelurilor plane şi late se elimină prin încălziri locale aplicate în formă de V (fig.4.14.a). Lăţimea zonei încălzite, depinzând de grosimea şi lăţimea tablei, este de 10-70mm, adâncimea de 20-150mm. Distanţa dintre ele depinde de mărimea deformaţiei, dar nu trebuie să fie mai mică decât de 2x lăţimea componentei. Îndreptarea se face dinspre mijloc spre capete.

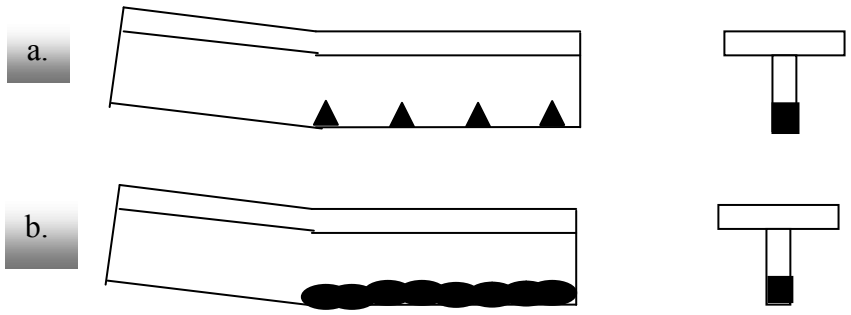


Fig. 4.14. Îndreptarea profilului T curbat
a-încălziri în formă de V; b-încălzire continuă

4.4.2. Îndreptare prin încălzire continuă

În figura 4.14.b. este prezentată metoda de îndreptare cu încălzire continuă. Teoretic această metodă este mai corectă, pentru că asigură planeitatea pronunțată, fiind opusă sudurii în colț, în timp ce utilizând metoda *a* (fig.4.14.a.) curbura se întrerupe în mai multe locuri. În practică metoda *b* (fig.4.14.b.) se utilizează mai rar, pentru că este greu de ales lățimea corectă a zonei încălzite. Dacă această lățime este mai mică îndreptarea se poate relua de la început. Dacă zona încălzită este prea lată structura este supraîndreptată. Utilizând metoda cu încălziri locale în formă de V după fiecare încălzire se controlează forma piesei, iar încălzirea se continuă doar dacă mai este necesar.

Îndreptarea structurilor complexe este o muncă foarte pretențioasă. În figura 4.15. sunt prezentate variante ale îndreptării la cald [30].

- îndreptarea după linii (fig.4.15.a.) se execută prin încălzire cu flacără după linii paralele. Se utilizează mai ales la îndreptarea contracțiilor unghiulare rezultate la sudarea îmbinărilor în colț ale structurilor rigidizate, din construcția navelor maritime. Viteza de îndreptare este un factor important care funcție de grosimea componentelor influențează deformațiile;

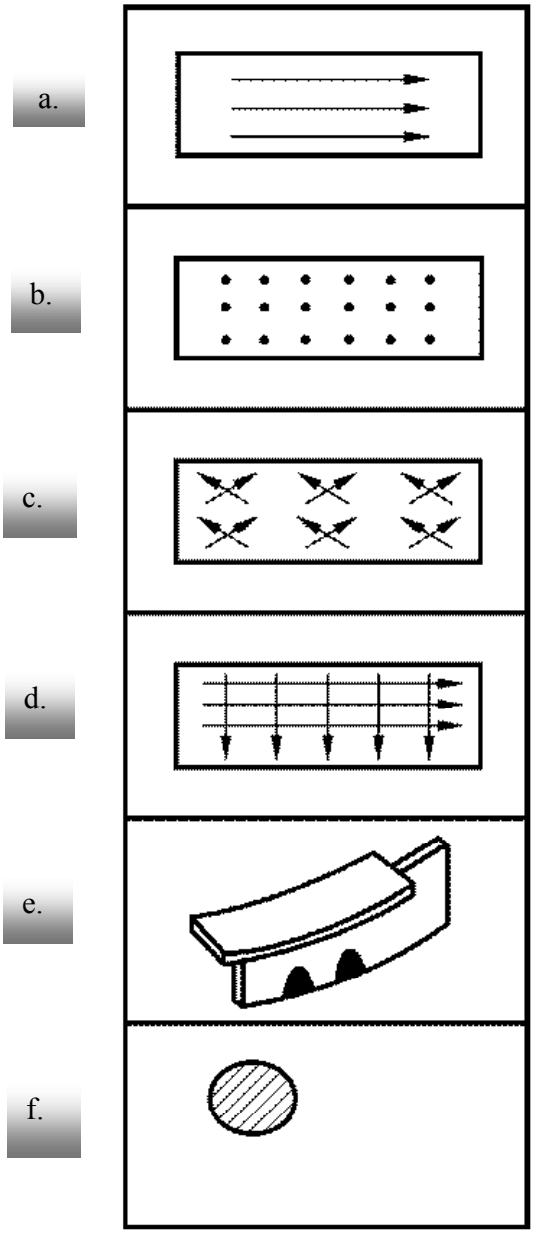


Fig.4.15. Îndreptarea la cald
a- după linii paralele; b-punctiformă; c-în formă de X; d- pe direcţii perpendiculare; e-în formă de V; f-în formă de pete

➢ îndreptarea punctiformă se utilizează în special la îndreptarea tablelor subţiri (fig.4.15.b.) în construcţia de vagoane de marfă şi mai ales de călători;

➢ încălzirea în formă de X se realizează prin încrucişarea a două linii (fig.4.15.c.). Este o metodă intermediară între cea cu încălzire după linii şi cea punctiformă. Rezultate bune se obţin utilizând această metodă la structurile deformate şi cu contracţie unghiulară după două direcţii;

➢ îndreptarea după linii perpendiculare (fig.4.15.d.) este utilizată la piesele deformate puternic, dar trebuie lucrat foarte atent pentru evitarea supraîncălzirii materialului;

➢ îndreptarea în formă de V (fig.4.15.e.) este utilizată în special la componentele ondulate respectiv la rame deformate. Se utilizează la îndreptarea grinzilor de secțiune I şi T;

➢ îndreptarea prin încălzire la roşu cireşiu în pete (fig.4.15.f.) combinată cu ciocănire este utilă când deformația este concentrată pe o suprafață mică. Trebuie ținut cont şi de faptul că prin aceste încălziri se pot produce transformări structurale.

În cazul îndreptării la cald căldura se introduce în material în locul în care există surplusul de material. Răcirea se începe de la margini.

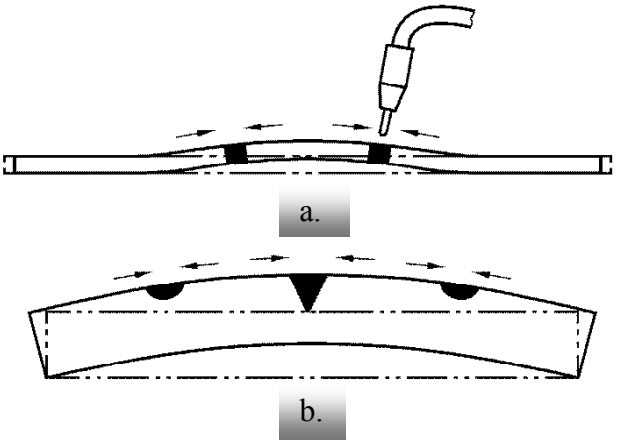


Fig.4.16. Scurtarea tablei ondulate prin încălziri
a-încălzire în pete; b- încălzire în formă de V;
săgețile arată direcția scurtării

4.5. Îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale

În cazul sudării pereților laterali pe scheletul cutiei vagonului, acestea fiind structuri din table subțiri, va apare ondularea tablei învelitoare în urma sudării. Aceste abateri de la planeitate vor apare din cauza contracțiilor sudurilor. Fibrele vecine sudurii nu sunt influențate de fenomenul de contracție, deci ele vor avea lungimi mai mari față de fibrele contractate (fig.4.17.).

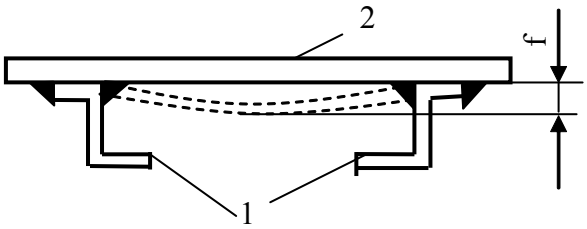


Fig.4.17. Ondularea peretelui lateral
1- schelet perete lateral; 2-tabla învelitoare; f-săgeata

Săgeata apărută poate ajunge la valori de f=6-12 mm, ceea ce dă un aspect necorespunzător carcaselor vagoanelor. Prevederile documentațiilor constructive respectiv fişele de măsurători ce se întocmesc pentru carcasele de vagoane prevăd o abatere de maximum 0,5 mm/metru liniar. Această valoare este foarte greu de obținut chiar şi atunci când se respectă cu strictețe tehnologia de pregătire şi execuție a acestor structuri sudate.

Există două posibilități de îndreptare a curburilor şi ondulărilor rezultate în urma operațiilor de sudare, şi anume:

- alungirea sudurii prin laminare, neadecvată în acest caz;
- contractarea suprafeței tablei în zona ondulării.

Utilizarea electromagnetului pentru îndreptarea carcaselor de vagon după sudare face parte din grupa metodelor ce acționează asupra contracției suprafeței tablei în zona ondulării acesteia.

Principiul metodei (fig.4.18.) constă în presarea tablei învelitoare între un electromagnet şi o placă găurită. Se aplică din exterior pe tabla învelitoare, care se doreşte a se îndrepta, un electromagnet de dimensiunile 1060 x 890 mm, iar din interior o placă cu găuri. După conectarea electromagnetului la sursă, acesta atrage placa găurită, călcând în acelaşi timp tabla învelitoare. Deformațiile, voalările mari, cauzate de îmbinările sudate între schelet şi tabla învelitoare, se transformă în multe deformații mici, care ies prin găurile plăcii cu găuri. Se începe încălzirea locală punctiformă în găuri cu flacără oxigaz, după care se lasă să se răcească zona încălzită, care se va contracta, astfel dispar dealurile mici punctiforme.

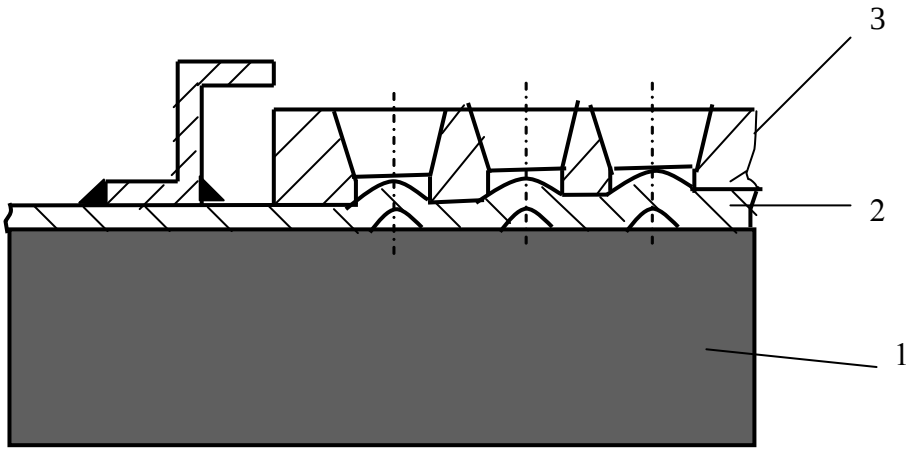


Fig.4.18. Principiul îndreptării cu electromagnet şi încălziri locale
1-electromagnet; 2-tabla peretelui lateral; 3-placă găurită

În figura 4.19. este prezentată acțiunea de contracție la punctele de încălzire.

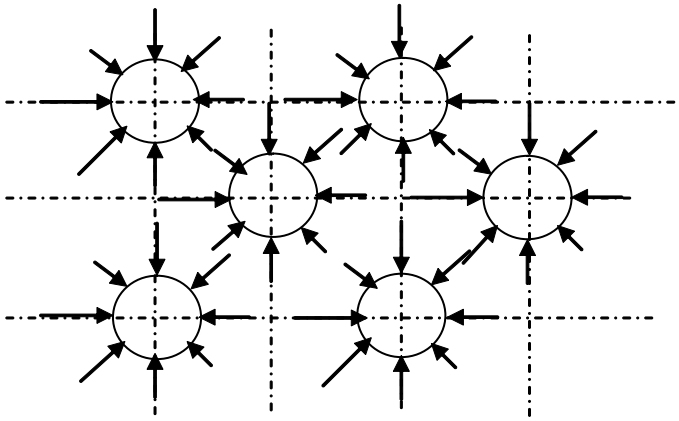


Fig.4.19. Contracția după răcire a punctelor încălzite

Alte avantaje ale utilizării metodei de îndreptare cu ajutorul electromagnetului sunt:

- se elimină răcirea tablei cu apă, ceea ce reduce efectul de coroziune al tablei şi economiseşte energie;
- elimină depunerile de sudură şi economiseşte oțel sub formă de electrozi înveliți;
- elimină denivelările cauzate de încălzirile cu arc electric;
- elimină deformațiile rezultate de la loviturile de ciocan;
- sunt reduse în mod substanțial operațiile de chituire şi şlefuire după îndreptare;
- condițiile de lucru sunt mult îmbunătățite prin eliminarea zgomotului produs de loviturile de ciocan.

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DETERMINAREA DEFORMAŢIILOR TABLELOR SUBŢIRI

Capitolul cuprinde cercetările experimentale referitoare la îmbinarea subansamblelor cutiei vagoanelor călători. Rezultatele acestor cercetări permit concluzii privind alegerea procedeului de sudare a subansamblelor respectiv privind deformaţiile şi tensiunile apărute la sudare. Într-o primă estimare a deformaţiilor s-a plecat de la varianta sudării în poziţie liberă, ca element de referinţă la tensiunile şi deformaţiile care apar la sudarea rigidizată (cap.6.).

5.1. Cercetări privind sudarea manuală cu electrozi înveliţi

Încercările experimentale s-au efectuat pe probe din oţel FeP03, conform SR EN 10130/1991, oţel plat laminat la rece cu conţinut scăzut de carbon pentru ambutisare sau îndoire la rece.

Compoziţia chimică este dată în tabelul 5.1., iar caracteristicile mecanice în tabelul 5.2.

Tabel 5.1. Compoziţia chimică a oţelului FeP03 Bm conform SR EN 10130/1991

Marca oţelului	Clasa de calitate	Compoziţia chimică, pe oţel lichid, % (max.)				Mod de dezoxidare
		C	Mn	P	S	
FeP03 Bm	3	0,10	0,45	0,035	0,035	Complet calmat

Tabel 5.2. Caracteristicile mecanice ale oţelului FeP03 Bm conform SR EN 10130/1991

Marca oţelului	R_p N/mm^2	R_m N/mm^2	A_{80} %min	r_{90} min
FeP03 Bm	140-240	270-370	34	1,3

Observaţie: r-este coeficient de anizotropie plastică

Se garantează buna comportare la sudare prin procedee de sudare industriale.

Încercările experimentale s-au executat cu diferite tipuri de electrozi: Superbaz/E 42 4 B 42 H10, Supertit fin/E 38 0 RR 12, Universal Rutilic/E 43 22 RR 8, Superblu/E 42 0 R 1 conform SR EN ISO 2560:2006, producător DUCTIL BUZĂU SA, cu diametrul electrodului de 1,6; 2,0; 2,5 mm, pe probe sudate cu şi fără deschidere de rost. Parametrii de sudare: I_s-curentul de sudare; U_a-tensiunea arcului; v_s- viteza de sudare; E_l-energia liniară au variat în jurul valorii recomandate de producător (tab.1.1., 1.2., 1.3., anexa 1). Sursa de sudare utilizată a fost: EWM-HIGH-TECH PRECISION MIG 450 PULS.

Dimensiunea probelor a fost de 200x100x(1,5-3,0) mm. Poziția de sudare în fiecare caz a fost orizontală, respectiv PA conform SR ISO 6947. S-au realizat probe sudate cap la cap cu grosimea: 1,5-2,5mm şi în colț suprapuse: 1,5+3, 2+3 şi 2,5+3mm. După realizarea îmbinărilor sudate s-a analizat aspectul îmbinării prin control vizual. S-a constatat că unele din probele realizate au fost corespunzătoare din punct de vedere estetic/al controlului vizual.

În urma rezultatelor controlului vizual al probelor sudate cu diferite tipuri de electrozi înveliți se recomandă:

- utilizarea electrozilor cu înveliş bazic sau rutilic;
- sudarea cu electrozi cu diametru de 1,6 sau 2 mm la grosimi de table de 1,5mm, diametru de 2mm, la grosimi de table de 2,0mm şi diametru de 2,0 sau 2,5mm la table cu grosimi de 2,5mm;
- curenți de sudare: 25-40A pentru s=1,5mm, 40-60A pentru s=2,0mm şi 50-90A pentru s=2,5mm;
- tensiunea arcului: 18-22V;
- energie liniară: 1500 - 2500 J/cm;
- sudarea cap la cap fără deschidere de rost la grosimi de table de 1,5mm respectiv sudarea cu deschidere de rost la grosimi de table de 2,0 şi 2,5mm;
- prinderi provizorii ale tablelor subțiri, numărul prinderilor la lungimea tablei de 200mm fiind de 5, 4 respectiv 3 pentru grosimi de tablă de 1,5, 2 respectiv 2,5mm;
- sudurile în colț prin suprapunere 1,5+3, 2+3 respectiv 2,5+3mm se vor suda cu electrozi bazici sau rutilici, cu diametru 1,6-2,5mm şi energie liniară 2000-3000J/cm.

5.1.1.Determinarea deformațiilor

Pe probele sudate realizate s-au măsurat contracțiile transversale şi longitudinale apărute în urma sudării, rezultatele fiind înserate în tabelele 1.8., 1.9. şi 1.10. (anexa 1). Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele determinate

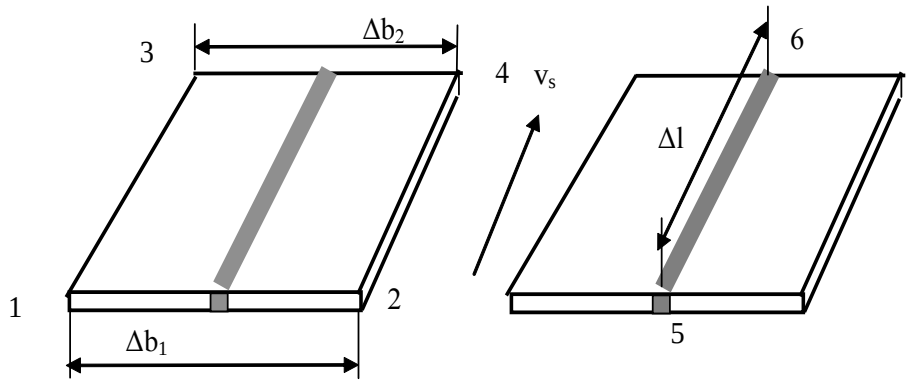


Fig.5.1. Metodologia de măsurare a contracțiilor transversale şi longitudinale
1,2-puncte între care se măsoară contracția transversală la începutul îmbinării, Δb_1;
3,4-puncte între care se măsoară contracția transversală la sfârşitul îmbinării, Δb_2;
5,6-puncte între care se măsoară contracția longitudinală Δl;

analitic cu ajutorul relaţiilor (3.10.) şi (3.6.), (fig.5.2. şi 5.3.).

Metodologia de măsurare a deformaţiilor este ilustrată în figura 5.1. Instrumentul de măsură utilizat a fost un şubler digital de 300 mm.

Figurile 5.2. şi 5.3. prezintă modul de variaţie ale contracţiilor transversale respectiv longitudinale în funcţie de energia liniară introdusă, pentru diferitele probe şi grosimi de material de s=1,5; 2,0; 2,5mm, valori obţinute experimental respectiv calculate analitic.

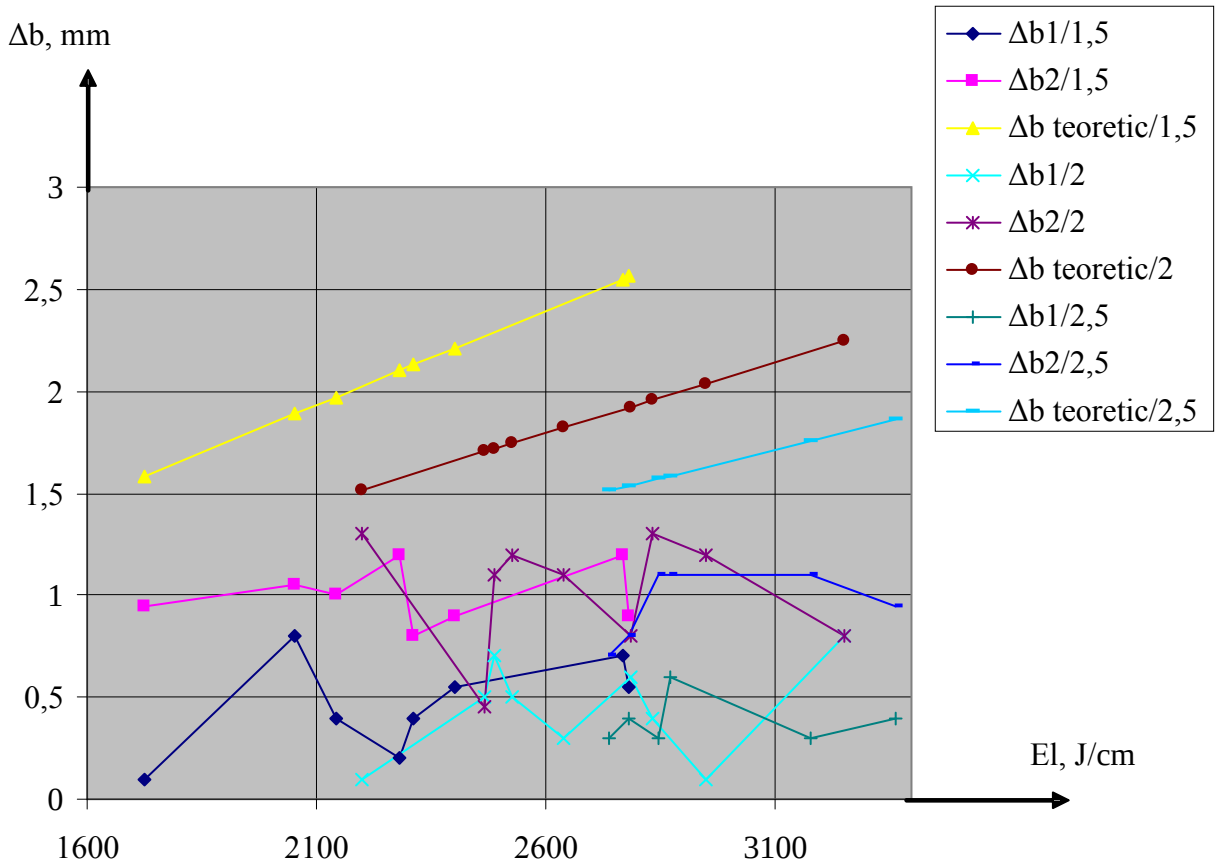


Fig.5.2. Contracţia transversală la sudarea manuală cu electrozi înveliţi a tablelor cu grosimea de 1,5; 2,0; 2,5 mm

Unde:

- Δb1/1,5 – contracţia transversală la începutul sudurii, grosime probă 1,5mm;
- Δb2/1,5 – contracţia transversală la sfârşitul sudurii, grosime probă 1,5mm;
- $\Delta b_{teoretic}/1,5$ – contracţia transversală determinată analitic, grosime probă 1,5mm;
- Δb1/2 – contracţia transversală la începutul sudurii, grosime probă 2,0mm;
- Δb2/2 – contracţia transversală la sfârşitul sudurii, grosime probă 2,0mm;
- $\Delta b_{teoretic}/2$ – contracţia transversală determinată analitic, grosime probă 2,0mm;
- Δb1/2,5 – contracţia transversală la începutul sudurii, grosime probă 2,5mm;
- Δb2/2,5 – contracţia transversală la sfârşitul sudurii, grosime probă 2,5mm;

- $\Delta b_{teoretic}/2,5$ – contracţia transversală determinată analitic, grosime probă 2,5mm;

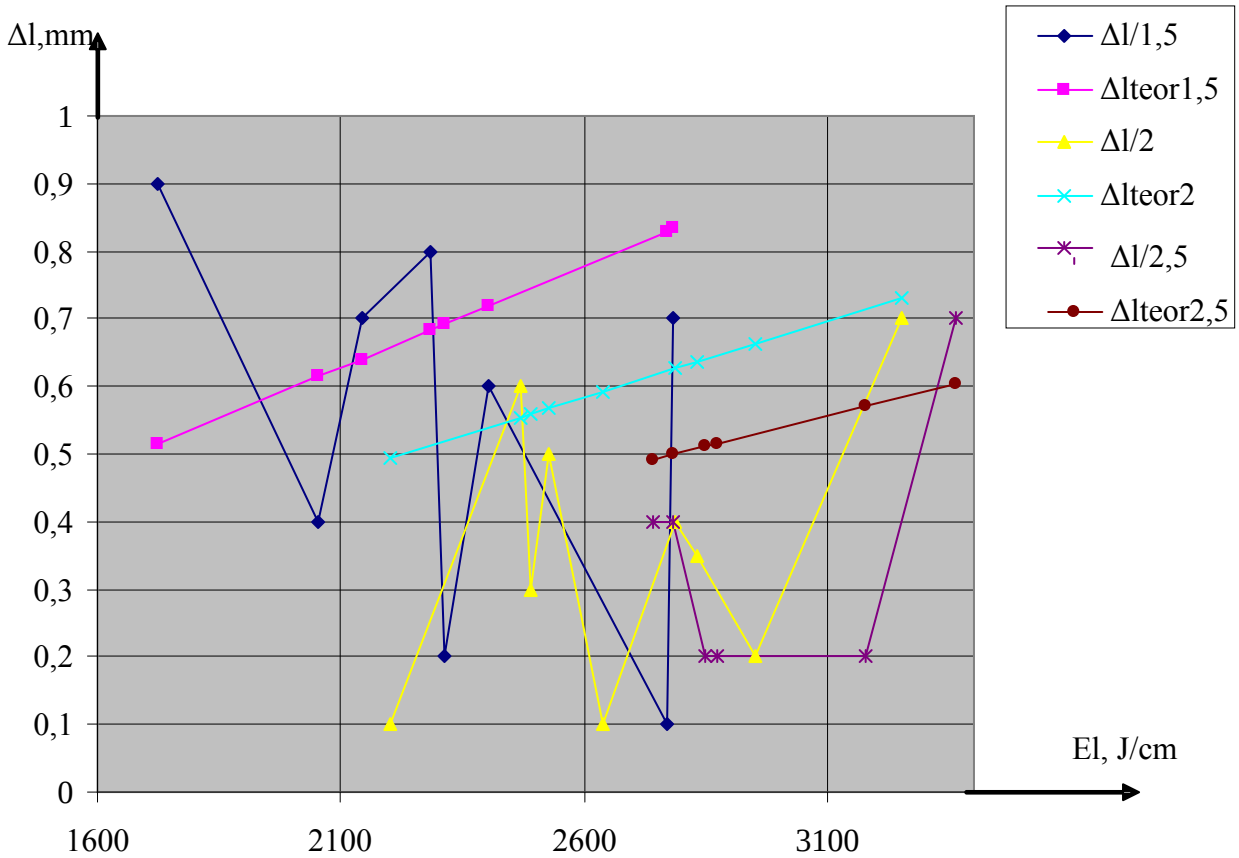


Fig.5.3. Contracţia longitudinală la sudarea tablei cu grosime de1,5; 2,0; 2,5mm

Unde:

- Δl/1,5 – contracţia longitudinală, grosime probă 1,5mm;
- $\Delta l_{teor}1,5$ – contracţia longitudinală determinată analitic, grosime probă 1,5mm;
- Δl/2 – contracţia longitudinală, grosime probă 2,0mm;
- $\Delta l_{teor}2$ – contracţia longitudinală determinată analitic, grosime probă 2,0mm;
- Δl/2,5 – contracţia longitudinală, grosime probă 2,5mm;
- $\Delta l_{teor}2,5$ – contracţia longitudinală determinată analitic, grosime probă 2,5mm;

Pentru a determina deformaţiile pieselor s-a măsurat săgeata apărută în urma sudării respectiv deformaţiile unghiulare, (tab. 1.11.; 1.12.; 1.13., anexa 1). Metodologia de măsurare a deformaţiilor/săgeţii este ilustrată în figura 5.4. Instrumentele de măsurare utilizate au fost: comparator, şubler digital de adâncime şi şubler digital de 300mm.

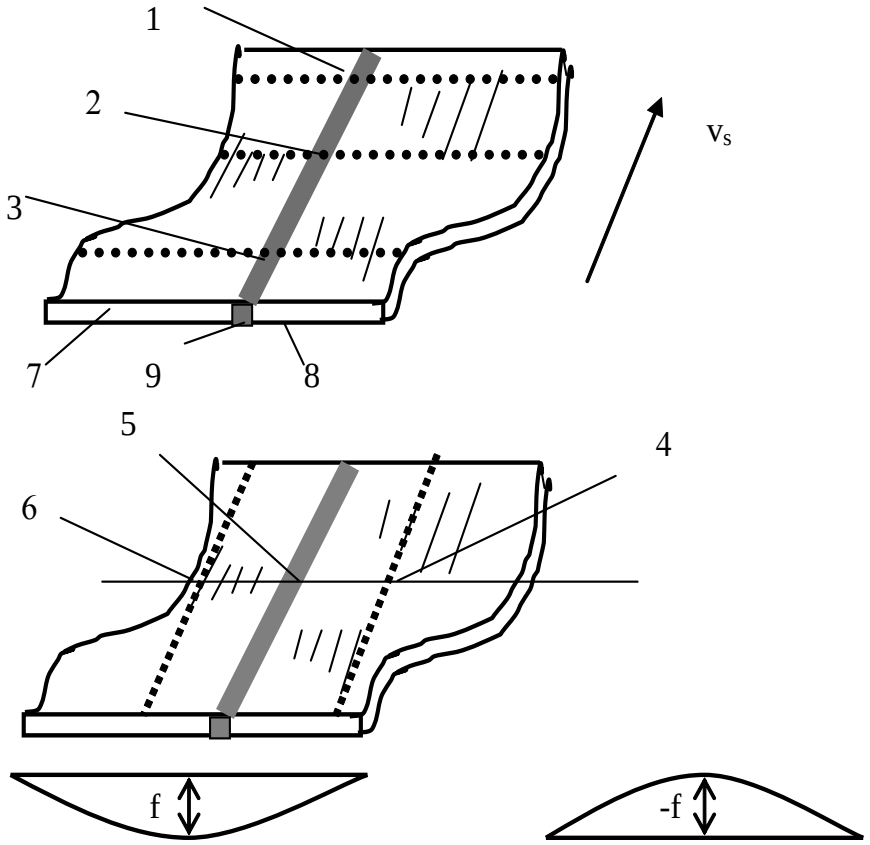


Fig.5.4. Metodologia de măsurare a săgeții
*1,2,3-puncte în care se măsoară săgeata **f** perpendicular pe sudură;*
*4,5,6-puncte în care se măsoară săgeata **f** de-a lungul sudurii;*
7,8-piese; 9-sudura

Figurile 5.5. şi 5.6. prezintă săgeata medie şi deformațiile unghiulare apărute la sudare cu diferiți electrozi (Universal Rutilic, Supertit Fin, Superblu, Superbaz) a tablei cu grosime de s=1,5mm. Tabelul 5.3. prezintă energiile liniare utilizate la sudarea tablei cu grosime de 1,5mm cu diferite tipuri de electrozi cu diametru de 2,5mm.

Tabel 5.3. Energia liniară corespunzătoare sudării cu diferite tipuri de electrozi de diametru 2,5mm a tablei cu grosime de 1,5mm

Tip electrod	Universal Rutilic	Supertit Fin	Superblu	Superbaz
El, J/cm	1724	2055	2142	2404

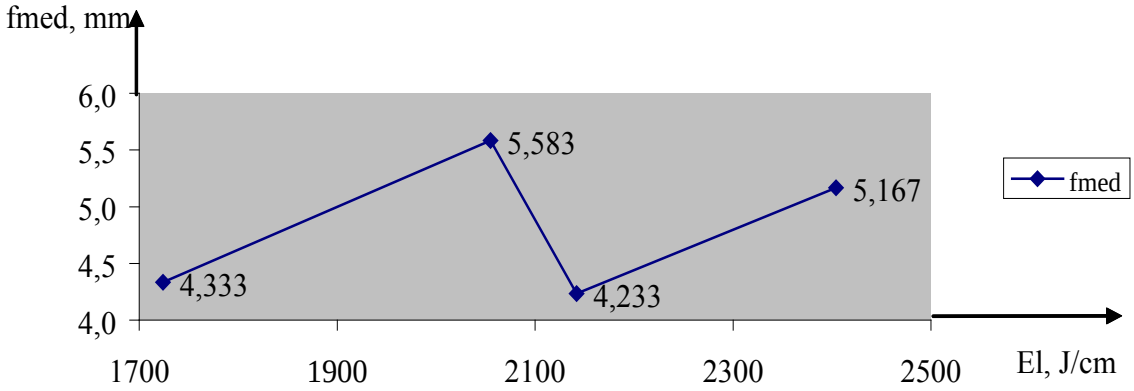


Fig.5.5. Săgeata medie la sudarea tablei cu grosime de 1,5mm electrozi diametru de 2,5mm

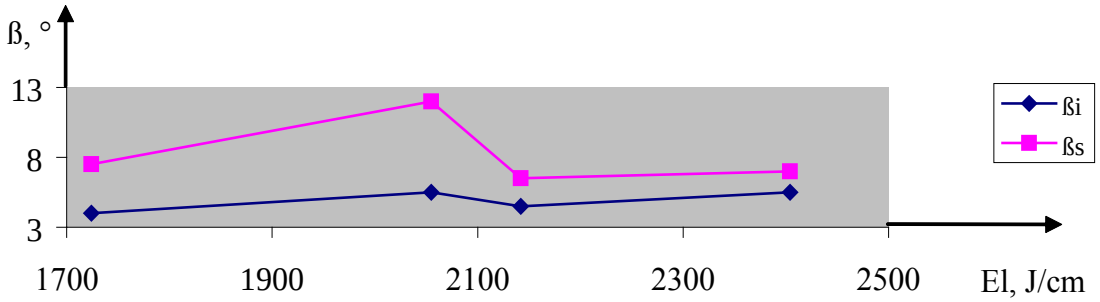


Fig.5.6. Deformaţia unghiulară rezultată după sudarea tablei cu grosime de 1,5 mm electrozi diametru de 2,5mm

Unde:

- $ß_i$ – deformaţia unghiulară la începutul sudurii;
- $ß_s$ – deformaţia unghiulară la sfârşitul sudurii;

În figurile 5.7. şi 5.8. se prezintă săgeata medie şi deformaţiile unghiulare apărute la sudare cu diferite tipuri de electrozi (Superbaz, Superblu, Supertit Fin) a tablei cu grosime de s=2,0mm cu deschidere de rost zero, diametru electrod d_e=2,5mm. Tabelul 5.4. prezintă energiile liniare utilizate la sudarea tablei cu grosime de 2,0mm cu diferite tipuri de electrozi cu diametru de 2,5mm.

Tabel 5.4. Energia liniară corespunzătoare sudării cu diferite tipuri de electrozi de diametru 2,5mm a tablei cu grosime de 2,0mm

Tip electrod	Superbaz	Superblu	Supertit Fin
El, J/cm	2468	2833	2951

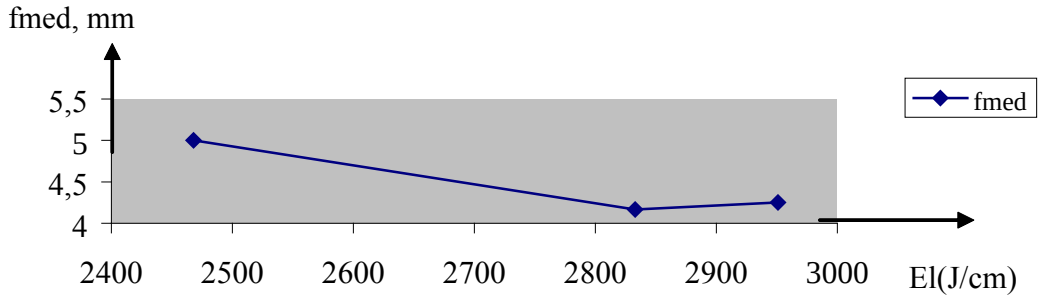


Fig.5.7. Săgeata medie măsurată în diferite puncte la sudarea probelor cu grosime de 2mm cu diferite tipuri de electrozi

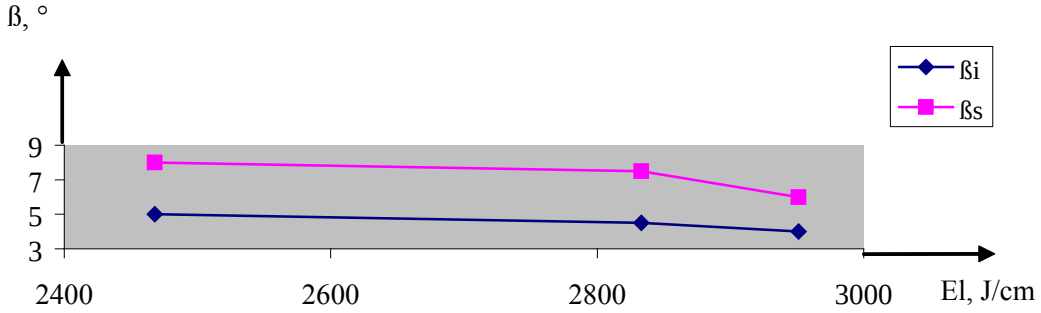


Fig.5.8. Deformația unghiulară rezultată după sudarea probelor cu grosime de 2mm cu diferite tipuri de electrozi

Săgeata medie şi deformațiile unghiulare apărute la sudare cu diferite tipuri de electrozi (Superbaz, Superblu, Supertit Fin, Universal Rutilic) a tablei cu grosime de s=2,5mm cu deschidere de rost b=1,5 mm şi diametru electrod d_e=2,5mm sunt prezentate în figurile 5.9. şi 5.10. Tabelul 5.5. prezintă energiile liniare utilizate la sudarea tablei cu grosime de 2,5mm cu diferite tipuri de electrozi cu diametru de 2,5mm.

Tabel 5.5. Energia liniară corespunzătoare sudării cu diferite tipuri de electrozi de diametru 2,5mm a tablei cu grosime de 2,5mm

Tip electrod	Superbaz	Superblu	Supertit Fin	Universal Rutilic
El, J/cm	2784	2849	3179	3364

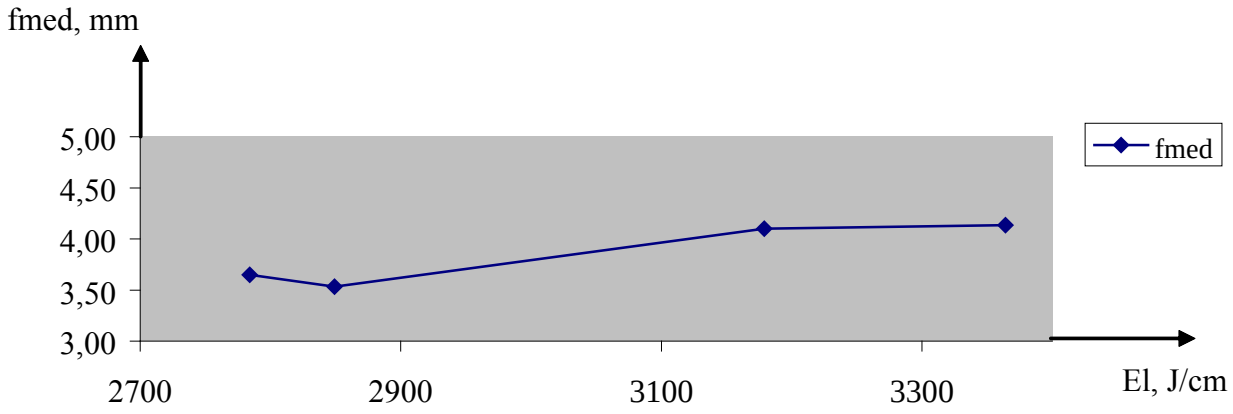


Fig.5.9. Săgeata medie la sudarea probelor cu grosime de 2,5mm cu diferite tipuri de electrozi

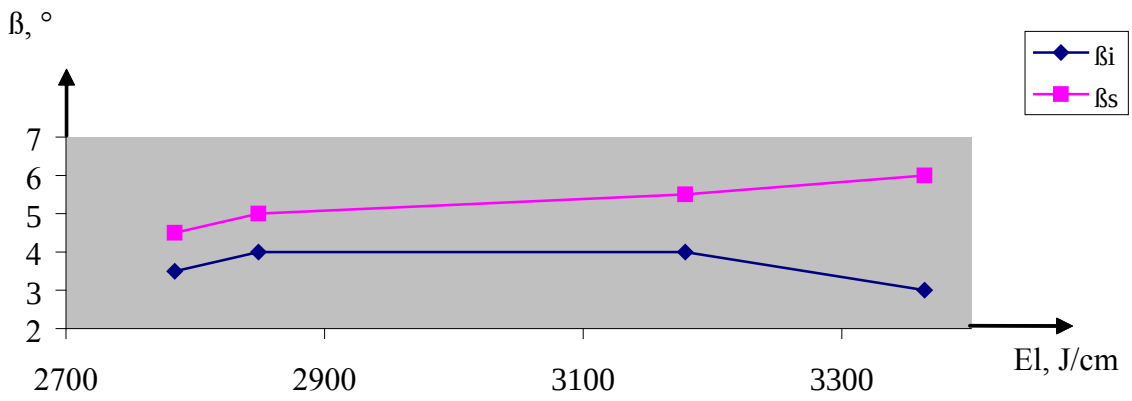


Fig.5.10. Deformația unghiulară rezultată după sudarea probelor cu grosime de 2,5mm cu diferite tipuri de electrozi

În tabelul 1.14., anexa 1, respectiv figurile 5.11. şi 5.12. se prezintă săgeata medie şi deformația unghiulară apărută la sudarea tablelor cu s=1,5 mm; s=2,0 mm şi s=2,5mm ca o medie a acestor valori pentru toate probele sudate cu electrozi înveliți.

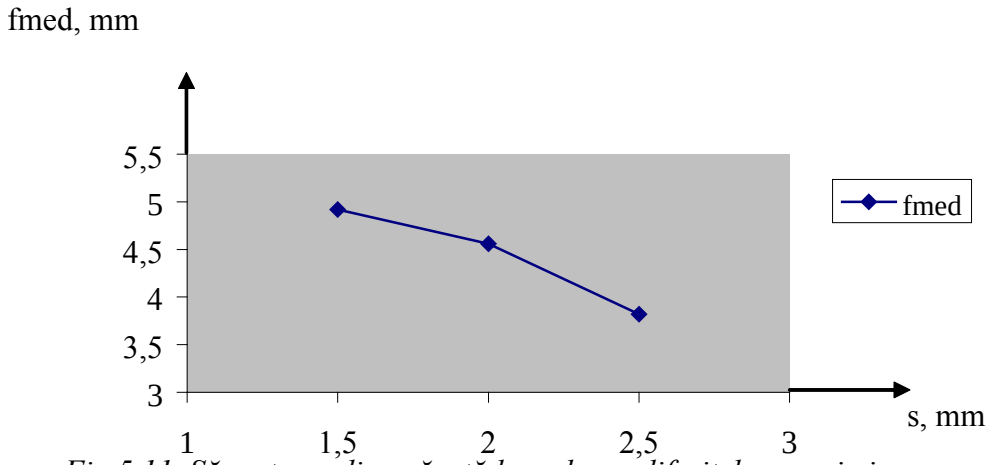


Fig.5.11. Săgeata medie apărută la sudarea diferitelor grosimi de table cu electrozi înveliţi

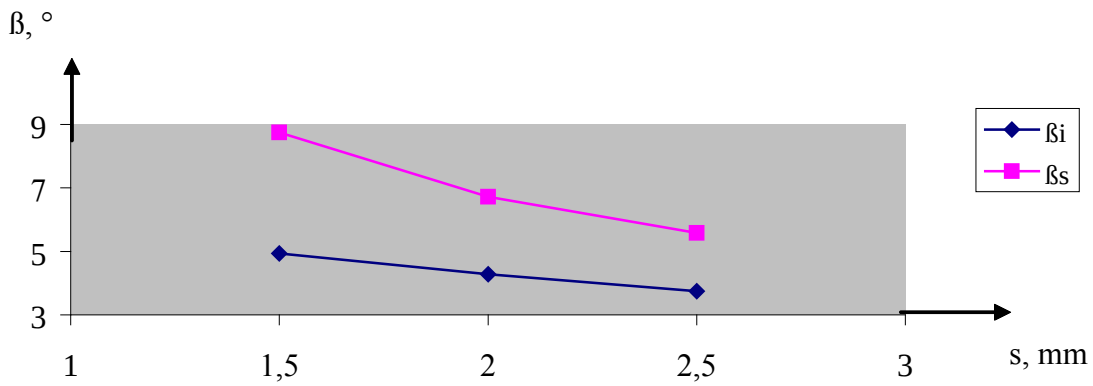


Fig.5.12. Deformaţia unghiulară rezultată la sudarea diferitelor grosimi de tablă cu electrozi înveliţi

5.1.2.Concluzii privind deformaţiile

Experimentările efectuate referitor la deformaţiile apărute în urma sudării diferitelor grosimi de tablă cu electrozi înveliţi permit următoarele concluzii:

- la sudarea tablelor cu grosime de 1,5; 2,0 şi 2,5mm contracţia transversală (fig.5.2.) este mai mică la începutul sudării probei. De asemenea se observă o contracţie transversală mai mică comparativ cu cea teoretică calculată analitic (3.10);
- contracţia transversală scade cu creşterea grosimii probelor (fig.5.2.);
- la sudarea tablelor cu grosime de 1,5; 2,0 şi 2,5mm contracţia longitudinală este mai mică ca şi cea transversală;
- contracţia longitudinală scade cu creşterea grosimii probelor;

- la sudarea îmbinărilor în colţ prin suprapunere, indiferent de grosimea componentelor utilizate, contracţiile transversale respectiv cele longitudinale sunt mai mici ca şi la sudarea îmbinărilor cap la cap, deoarece la îmbinările în colţ prin suprapunere calea de conducere a energiei termice este tridirecţională;
- la sudarea cu electrozi înveliţi, indiferent de regimul de sudare sau de tipul electrodului, în totdeauna deformaţia unghiulară este mai mică unde se începe sudarea, şi este mai mare în punctul unde se termină sudarea;
- mărimea deformaţiei unghiulare depinde de existenţa deschiderii rostului. Deformaţia unghiulară este mai mică în cazul utilizării unei deschideri de rost în I [59];
- mărimea deformaţiei unghiulare a tablelor subţiri depinde şi de tipul electrodului învelit (fig.5.6., 5.10.), ea fiind cea mai mare în cazul electrodului Supertit Fin [59];
- la sudarea aceleaşi grosimi de tablă deformaţia unghiulară este mai mare în cazul probei cu lipsă de pătrundere ;
- mărimea deformaţiei/ondulării tablei depinde de prezenţa deschiderii rostului. Săgeata este mai mică în cazul utilizării unei deschideri de rost în I ;
- mărimea ondulării/deformării tablelor subţiri depinde şi de tipul electrodului învelit, fiind cea mai mare în cazul electrodului Supertit Fin, deoarece energia liniară introdusă este mai mare în acest caz.

5.2. Cercetări privind sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MAG

5.2.1. Sudarea MAG

Cercetările experimentale utilizând procedeul MAG s-au efectuat pe probe din oţel FeP03, cu sârmă de sudare SG2, G2Si conform SR EN 440/1996, cu diametrul de 1,0 şi 1,2 mm, cu şi fără deschidere de rost. Ca şi gaz de protecţie s-a ales CORGON 18 respectiv M21 conform SR EN 439.

Parametrii de sudare utilizaţi au fost cei recomandaţi de producătorii echipamentului de sudare respectiv a materialelor de adaos, cu variaţii în jurul acestora [62] (tab.1.4., anexa 1). Sursele de sudare utilizate au fost: EWM-HIGH-TECH PRECISION MIG 450 PULS, respectiv FRONIUS VR 4000.

S-au efectuat îmbinări cap la cap pe grosimi 1,5 – 2,5 mm şi în colţ prin suprapunere pe aceleaşi grosimi, dimensiunile componentelor fiind de 200x100 mmxmm.

Poziţia de sudare a fost orizontală, respectiv PA conform SR ISO 6947.

Probele sudate au fost supuse controlului vizual. În urma controlului vizual a probelor sudate MAG pe table subţiri se recomandă:

- un curent de sudare de I_s =90-110A;
- sudarea cap la cap fără deschidere de rost la grosime de 1,5mm şi utilizarea unei sârme cu diametru de 0,8 sau 1,0mm;
- sudarea cu deschidere de rost la grosimi de 2,5mm;
- sudarea cu sau fără deschidere de rost la grosimi de 2,0mm cu diametru de sârmă de 1,0mm.

5.2.1.1.Determinarea deformaţiilor

Metodologia de măsurare a contracţiilor transversale şi longitudinale a fost similară celei de la sudarea cu electrozi înveliţi.

Contracţiile transversale şi longitudinale apărute în urma sudării sunt prezentate în tabelul 1.15., anexa 1.

Rezultatele experimentale (fig.5.13. şi 5.14.). au fost comparate cu cele determinate analitic cu ajutorul relaţiilor (3.10.) şi (3.6.).

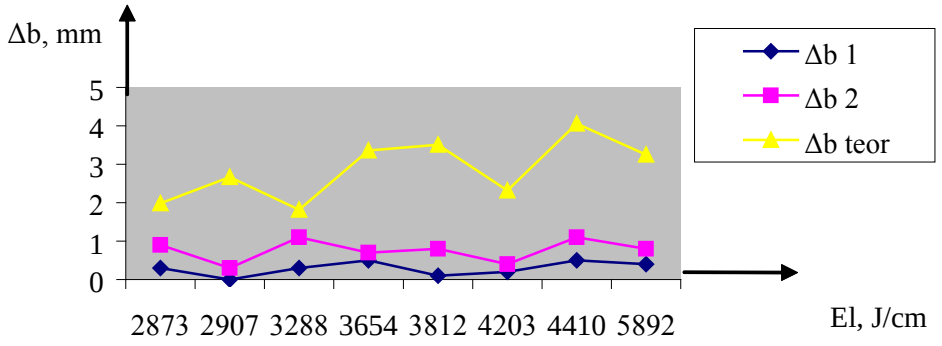


Fig.5.13. Contracţia transversală la sudarea MAG a tablelor subţiri

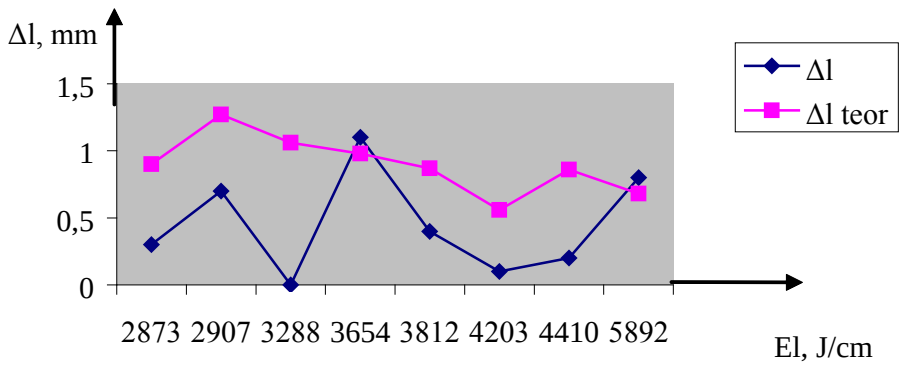


Fig.5.14. Contracţia longitudinală la sudarea MAG a tablelor subţiri

Metodologia de măsurare a deformaţiilor/săgeţii este similară celei de la sudarea cu electrozi înveliţi (fig.5.4.), doar că punctele de măsurare au fost 4. Valorile măsurate ale deformaţiilor sunt redate în tabelul 1.16., anexa 1.

Figurile 5.15.; 5.16. şi 5.17. prezintă săgeata, săgeata medie şi deformaţia unghiulară apărută la sudarea tablelor cu s=1,5 mm; s=2,0 mm şi s=2,5mm ca medie a acestor valori pentru toate probele sudate MAG.

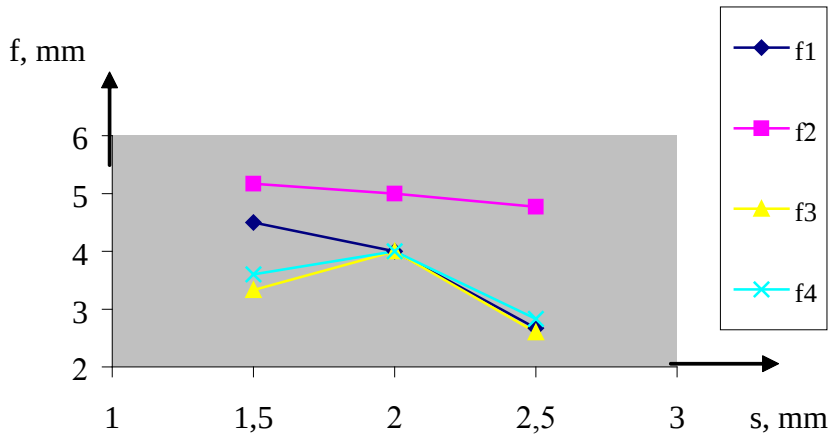


Fig.5.15. Săgeata apărută la sudarea MAG a diferitelor grosimi de tablă

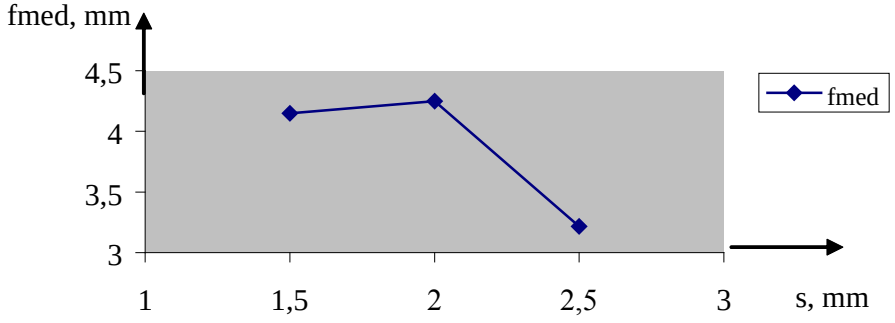


Fig.5.16. Săgeata medie apărută la sudarea MAG a diferitelor grosimi de tablă

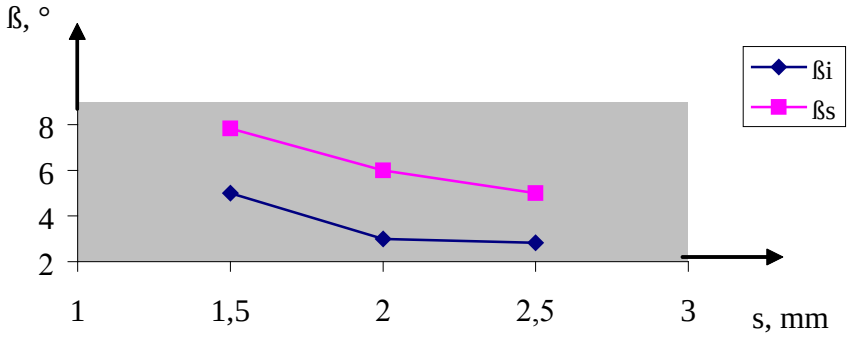


Fig.5.17. Deformaţia unghiulară rezultată la sudarea MAG a diferitelor grosimi de tablă

5.2.1.2.Concluzii privind deformaţiile

În cazul sudării MAG (fig.5.13. şi 5.14.) se observă variaţia contracţiei transversale în intervalul de 0-0,5 mm la începutul sudurii, şi între 0-1,1 mm la sfârşitul sudurii respectiv valorile contracţiilor transversale măsurate sunt mai mici ca şi cele teoretice. Valoarea contracţiei transversale la începutul îmbinării sudate, Δb_1, este mai mică ca cea de la sfârşitul îmbinării sudate, Δb_2. Contracţia longitudinală variază cu creşterea energiei liniare în intervalul 0-1,1 mm, fiind mai mică decât cea teoretică.

La aceaşi grosime de tablă săgeata şi deformaţia unghiulară creşte cu creşterea energiei liniare.

Luând în considerare probele sudate MAG se observă că, săgeata medie şi deformaţia unghiulară scade cu creşterea grosimii probelor (fig.5.16., 5.17.).

Deformaţia unghiulară şi săgeata probei sudate după metoda de sudare spre stânga a fost mai mică ca la proba sudată spre dreapta la grosimi identice ale pieselor.

În cazul îmbinărilor în colț prin suprapunere se observă o deformație unghiulară mai mare la proba mai subțire, dar această deformație este cu mult mai mică decât cea de la îmbinările cap la cap, datorită căilor de răcire, 3 mai multe la îmbinările în colț prin suprapunere, ca la cele cap la cap, 2.

În urma analizei deformațiilor apărute la sudarea probelor cu grosime de 1,5mm se recomandă sudarea MAG a tablei cu grosime de 1,5 mm cu sârmă de 1,0mm sau mai subțire, de 0,8mm fără deschidere de rost, pentru a obține o energie liniară cât mai mică care să producă deformații cât mai mici.

La sudarea probelor cu grosime de s=2,5mm se recomandă sudarea cu energie liniară cât mai mică pentru deformații cât mai mici, utilizarea sârmei cu diametru de 1,0 mm sau mai mic şi deschidere de rost r≠0.

Deformațiile şi contracțiile prezintă variații mai line la grosimi mai mari, de 2,5mm, materialul fiind mai omogen. La tablele mai subțiri apar de multe ori valori aleatoare contrare cu teoriile cunoscute, a căror cauză ar necesita cercetări suplimentare.

5.2.2. Sudarea MAG în curent pulsat

Încercările de sudare MAG în curent pulsat s-au efectuat pe probe şi cu materiale de adaos similare cu cele de la sudarea MAG.

Parametrii de sudare s-au sintetizat în tabelul 1.5., anexa 1

Poziția pistoletului față de direcția de sudare este prezentată în figura 5.18.

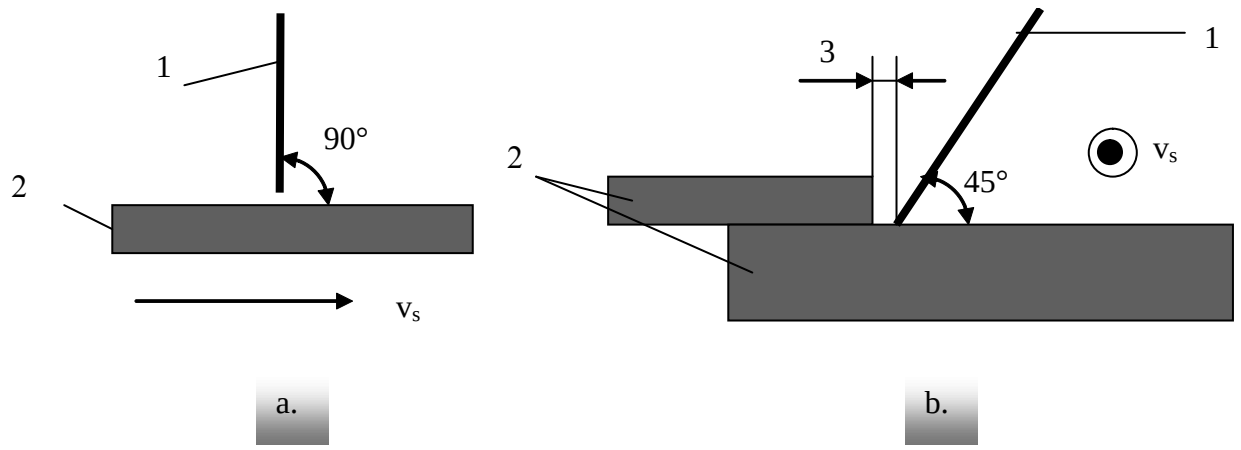


Fig.5.18. Poziția sârmei electrod la sudarea MAG în curent pulsat
1-sârma electrod; 2-componente; 3-distanța dintre vârful electrodului şi componenta mai subțire

Datorită faptului că se realizează o îmbinare în colț între o tablă mai groasă şi una mai subțire, arcul de sudare trebuie poziționat spre suprafața materialului mai gros.

Sursa de sudare utilizată a fost: EWM-HIGH-TECH PRECISION MIG 450 PULS.

S-au efectuat îmbinări cap la cap pe grosimi de: 1,5 – 2,5mm şi suprapuse 1,5+3,0 mm; 2,0+3,0 mm şi 2,5+3,0 mm, dimensiunile componentelor fiind de 200x100 mmxmm. Poziţia de sudare a fost orizontală, respectiv PA conform conform SR ISO 6947.

5.2.2.1.Determinarea deformaţiilor

Metodologia de măsurare a contracţiilor transversale şi longitudinale este similară cu cea de la sudarea cu electrozi înveliţi.

Contracţiile transversale şi longitudinale apărute în urma sudării sunt prezentate în tabelul 1.17., anexa 1.

Variaţia contracţiei transversale respectiv longitudinale funcţie de energia liniară introdusă este prezentată în figurile 5.19. şi 5.20.

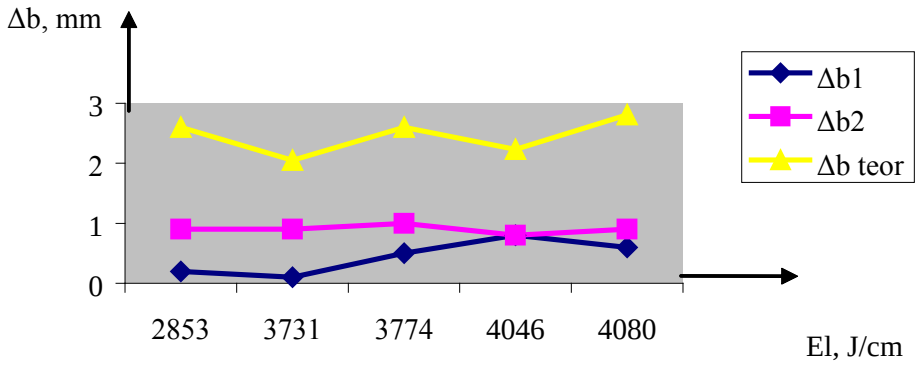


Fig.5.19. Contracţia transversală la sudarea MAG în curent pulsat a tablelor subţiri

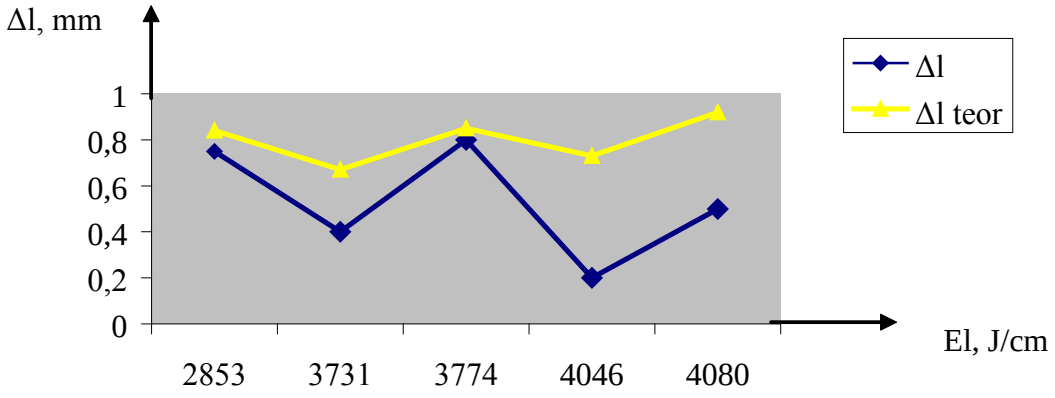


Fig.5.20. Contracţia longitudinală la sudarea MAG în curent pulsat a tablelor subţiri

Metodologia de măsurare a săgeţii este conform celei prezentate la sudarea cu electrozi înveliţi. Valorile măsurate ale deformaţiilor sunt redate în tabelul 1.18., anexa 1.

Figurile 5.21., 5.22. şi 5.23. prezintă săgeata, săgeata medie şi deformaţia unghiulară apărută la sudarea în curent pulsat a tablelor cu s=1,5 mm; s=2,0 mm şi s=2,5mm cu rost 0.

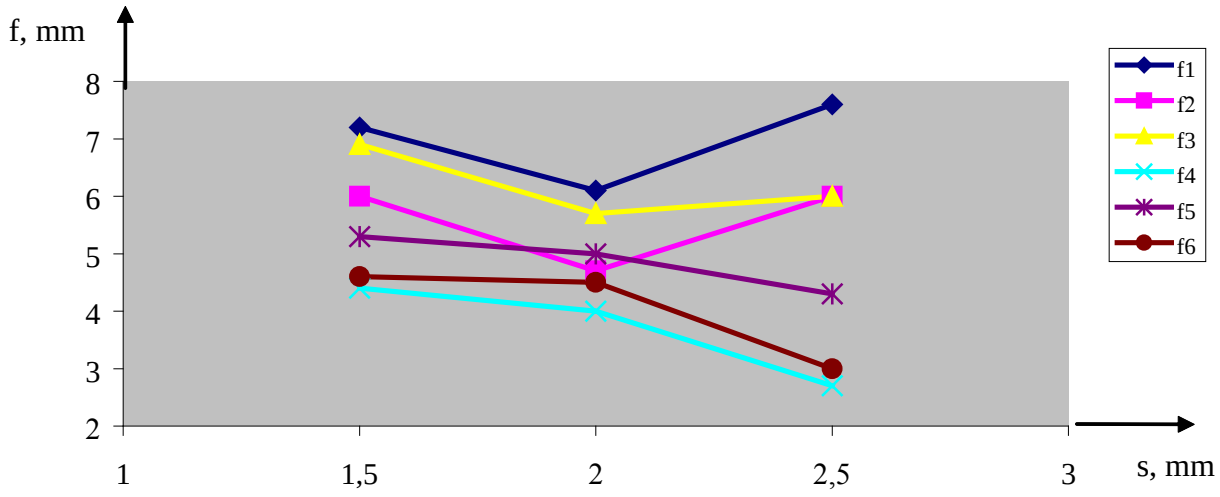


Fig.5.21. Săgeata rezultată în urma sudării în curent pulsat a tablelor cu grosimi diferite în diferite puncte de măsurare, r=0

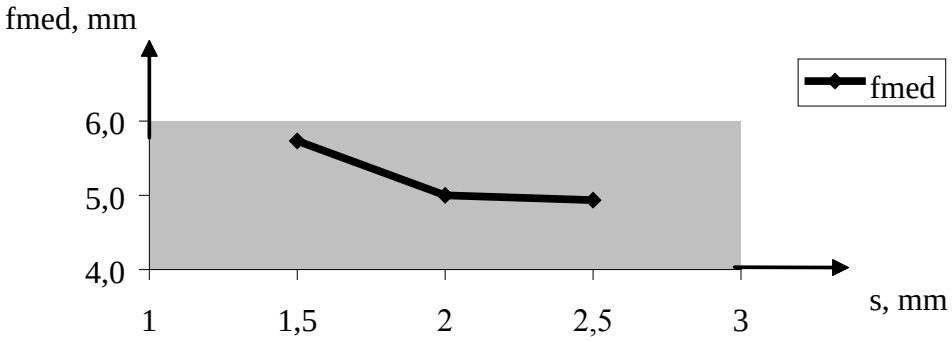


Fig.5.22. Săgeata medie rezultată în urma sudării în curent pulsat a diferitelor grosimi de tablă, r=0

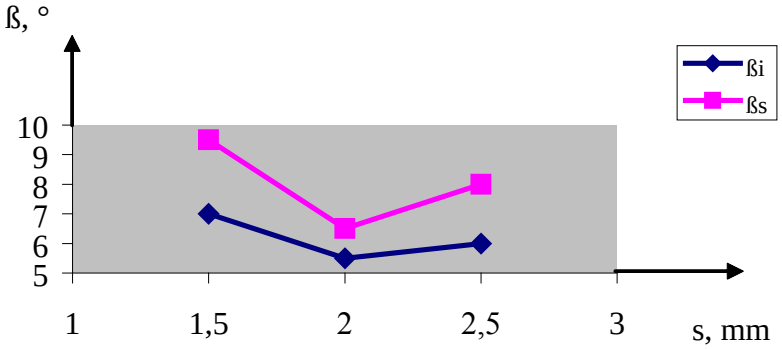


Fig.5.23. Deformaţia unghiulară apărută în urma sudării în curent pulsat a diferitelor grosimi de tablă, r=0

Figurile 5.24., 5.25. şi 5.26. prezintă săgeata, săgeata medie şi deformaţia unghiulară apărută la sudarea în curent pulsat a tablelor cu s=1,5 mm; s=2,0 mm şi s=2,5mm cu deschidere de rost de r=1,2mm.

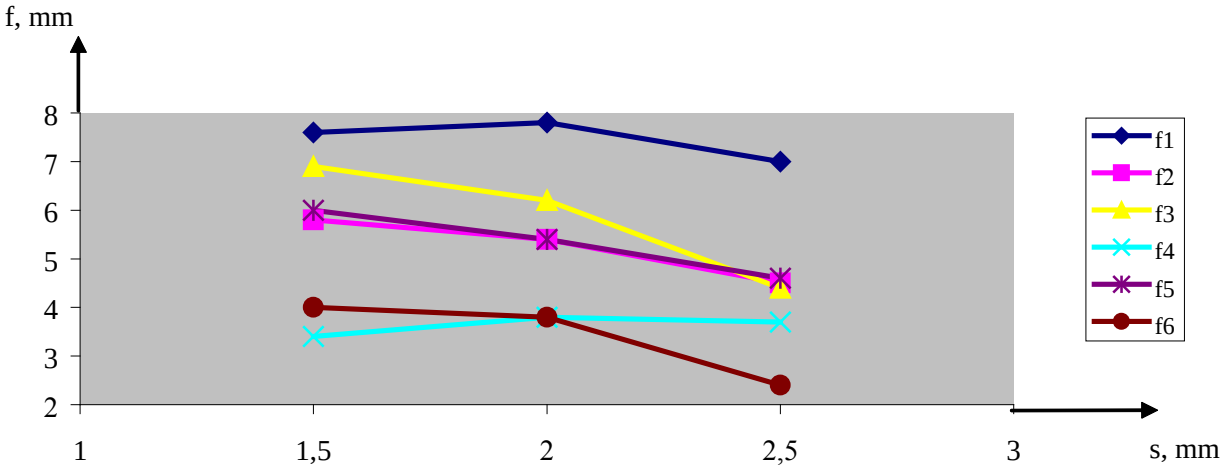


Fig.5.24. Săgeata rezultată în urma sudării în curent pulsat a tablelor cu grosimi diferite în diferite puncte de măsurare, r=1,2 mm

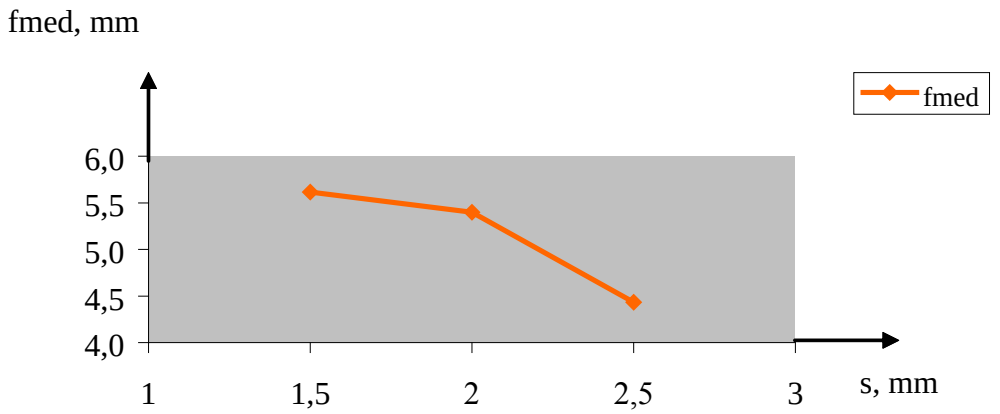


Fig.5.25. Săgeata medie rezultată în urma sudării în curent pulsat a diferitelor grosimi de tablă, r=1,2 mm

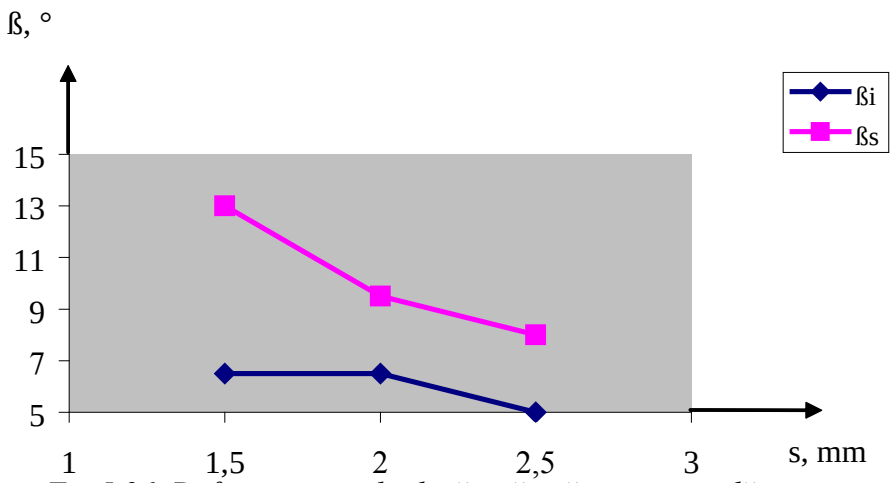


Fig.5.26. Deformația unghiulară apărută în urma sudării în curent pulsat a diferitelor grosimi de tablă, r=1,2mm

5.2.2.2.Concluzii privind deformațiile

La sudarea MAG în curent pulsat contracția transversală la începutul sudurii este mai mică ca la sfârşitul sudurii (fig.5.19. şi 5.20.), ambele valori fiind mai mici ca şi cele calculate teoretic. Contracția transversală la începutul sudării creşte cu creşterea energiei liniare, iar cea de la sfârşitul sudării rămâne aproximativ constantă la creşterea energiei liniare. Contracția longitudinală variază la creşterea energiei liniare, dar este sub valoarea determinată analitic.

Observând viteza de sudare cu care s-au realizat probele sudate se poate trage concluzia că nu doar valoarea energiei liniare influențează mărimea deformațiilor ci şi valoarea vitezei de sudare. Cu cât viteaza de sudare este mai mică cu atât cantitatea de căldură datorată sudării este aplicată un timp mai îndelungat pieselor şi acestea se deformează în măsură mai mare.

Deformația unghiulară a fost minimă la grosimea de s=2,0mm şi maximă la grosimea de s=1,5mm.

Deformaţiile/săgeata probelor scade cu creşterea grosimii componentelor, atât la probele sudate fără rost cât şi la cele cu rost (fig.5.22. şi 5.25.). Acelaşi lucru se observă şi la deformaţiile unghiulare (fig.5.26.).

Se observă că la energia liniară relativ egală la sudarea cap la cap a tablei de s=2,0 mm respectiv de 2,5 mm, săgeata medie este aproape cu 1 mm mai mică la tabla cu grosime de 2,5mm, iar deformaţia unghiulară este mai mică cu 1,5°. Deci tablele mai subţiri se deformează în mai mare măsură la sudarea cu aceeaşi energie liniară decât cele cu grosime mai mare.

Analizând deformaţiile unghiulare rezultate la sudarea îmbinărilor în colţ prin suprapunere (tabel 1.18., anexa 1) se observă că cel mai mult s-au deformat tablele cele mai subţiri cu s=1,5mm.

Comparând sudarea MAG cu sudarea MAG în curent pulsat, pentru toate grosimile de material atât săgeata cât şi deformaţiile unghiulare au fost mai mari la probele sudate în curent pulsat. Diferenţa la săgeţile măsurate a fost mai mare la tablele subţiri 1,5mm, mai mici la tablele de 2,0mm respectiv şi mai mici la tablele de 2,5mm grosime.

În majoritatea cazurilor contracţiile măsurate au fost mai mici decât cele determinate analitic.

5.3. Cercetări privind sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil WIG

S-au efectuat îmbinări cap la cap cu şi fără deschiderea rostului pe grosimi de 1,5; 2,0 şi 2,5 mm, şi îmbinări suprapuse 1,5+3,0mm; 2,0+3,0mm; 2,5+3,0mm, fără deschidere de rost, componentele având dimensiunile de 200x100 mmxmm.

S-a folosit curent continuu polaritate directă.

Sudarea s-a efectuat manual în poziţie orizontală, respectiv PA conform SR ISO 6947.

Parametrii de sudare s-au notat în tabelul 1.6., anexa 1.

După realizarea îmbinărilor sudate s-a analizat aspectul îmbinării prin control vizual. În urma controlului vizual s-a constatat necesitatea prinderii provizorii, numărul de prinderi provizorii şi lungimea lor fiind în funcţie de grosimea componentelor.

5.3.1.Determinarea deformaţiilor

Metodologia de măsurare a săgeţii este cea de la sudarea cu electrozi înveliţi, numărul punctelor de măsurare este 4. Valorile măsurate ale deformaţiilor sunt redate în tabelul 1.19., anexa 1.

Figurile 5.27. şi 5.28. prezintă săgeata, săgeata medie şi deformaţia unghiulară apărută la sudarea WIG a diferitelor grosimi de tablă cu material de adaos.

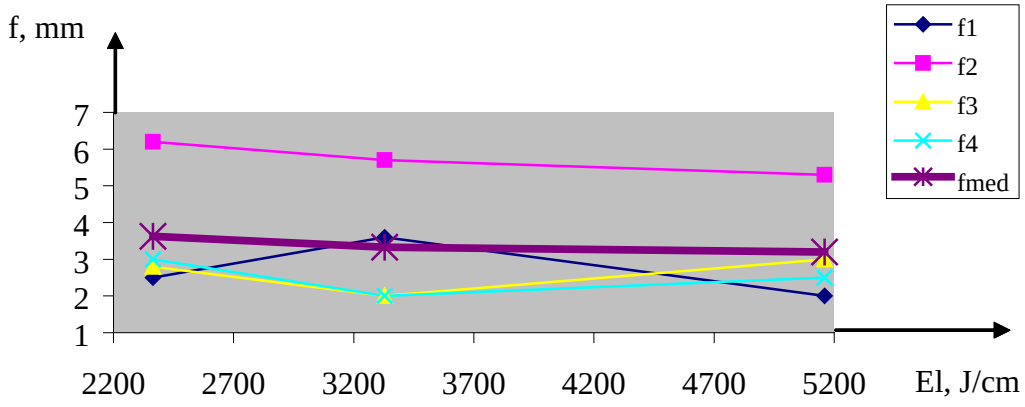


Fig.5.27. Săgeata la sudarea WIG a tablelor cu grosime diferită cu material de adaos

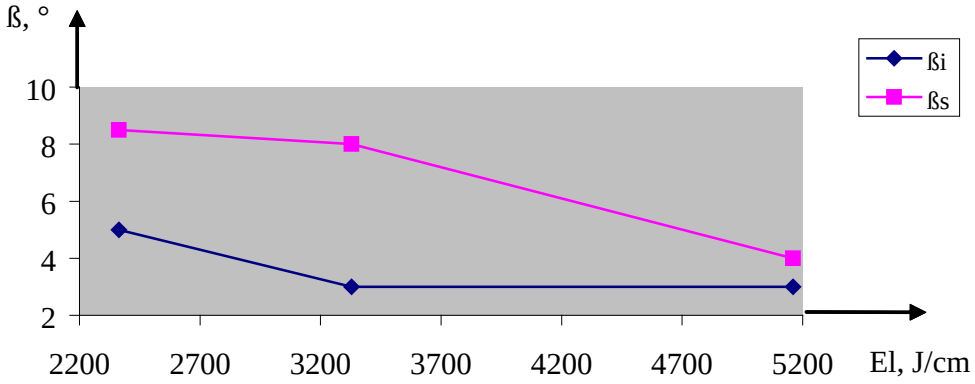


Fig.5.28. Deformația unghiulară apărută la sudarea WIG a tablelor cu grosime diferită cu material de adaos

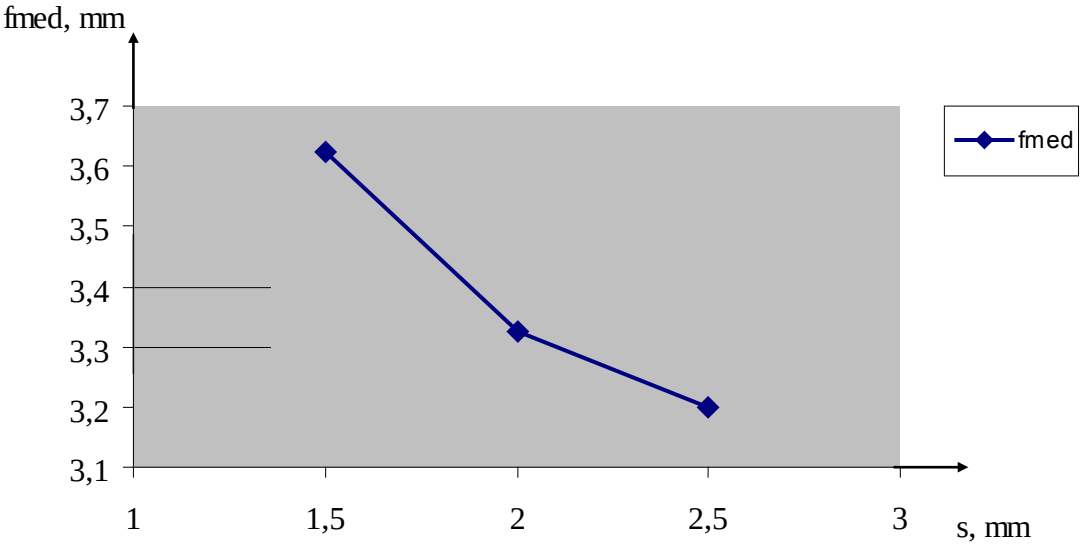


Fig.5.29. Săgeata medie la sudarea WIG a diferitelor grosimi de tablă

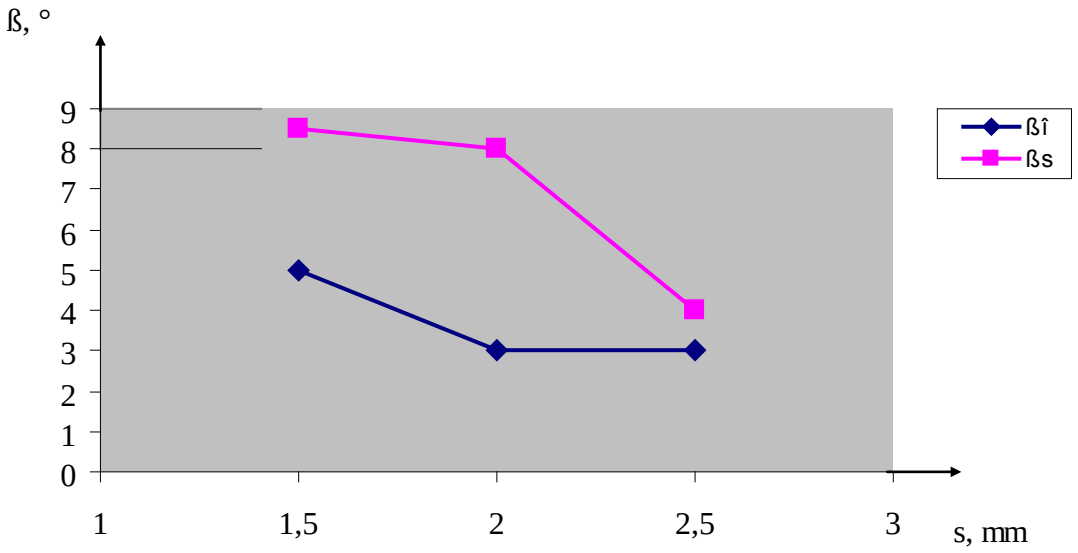


Fig.5.30. Deformaţia unghiulară apărută la sudarea WIG a diferitelor grosimi de tablă

5.3.2.Concluzii privind deformaţiile

La aceaşi grosime de tablă deformaţiile sunt mai mici în cazul sudării cu rost şi cu material de adaos.

Săgeata şi deformaţia unghiulară scad cu creşterea grosimii tablelor (fig.5.29., 5.30.).

La sudarea îmbinărilor în colţ prin suprapunere deformaţia unghiulară şi săgeata cea mai mare apare la combinaţia 3+2,5mm, la care s-a introdus energia liniară cea mai mare, dar s-a sudat cu material de adaos. Totodată viteza de sudare a fost mai mare ca la celelalte îmbinări în colţ prin suprapunere, care s-au efectuat fără material de adaos.

Dacă se compară probele sudate fără material de adaos se observă deformaţia şi săgeata mai mare apărută la grosimea 3+1,5 mm, deşi viteza de sudare este aceaşi iar energia liniară este mai mare la proba 36.

Deformaţia unghiulară este mai mare pentru fiecare îmbinare la sfârşitul sudării.

5.4. Cercetări privind sudarea prin presiune în linie

Realizarea probelor experimentale s-a făcut pe instalaţia de sudare prin presiune în linie PECO produsă de firma Messer Griesheim din Germania.

S-au efectuat îmbinări sudate cap la cap prin presiune în linie cu material de adaos, bandă cu lăţime de 4 mm şi grosime de 0,2 mm, pentru grosimi de material: 1,5+1,5 mm; 2+2 mm şi 2,5+2,5 mm. Parametrii de sudare utilizaţi sunt cei recomandaţi de producătorul de echipament (tab.1.7., anexa 1).

S-a analizat aspectul îmbinării prin control vizual, rezultatul fiind că s-au realizat probe sudate corespunzătoare din punct de vedere calitativ, fără defecte. Totodată se observă că pentru realizarea unor îmbinări de calitate, pe lângă respectarea parametrilor de sudare trebuie să se ţină cont şi de montarea corespunzătoare a tablelor, de calitatea rolei utilizate şi de pregătirea suprafaţelor.

5.4.1.Determinarea deformaţiilor

Determinarea deformaţiilor a constat în măsurarea săgeţii şi deformaţiei unghiulare apărută în urma sudării (tab. 1.20., anexa 1). Metodologia de măsurare a săgeţii este similară cu cea de la sudarea cu electrozi înveliţi. Figurile 5.31., 5.32. şi 5.33. prezintă săgeata, săgeata medie şi deformaţia unghiulară apărută la sudarea prin presiune în linie a diferitelor grosimi de tablă.

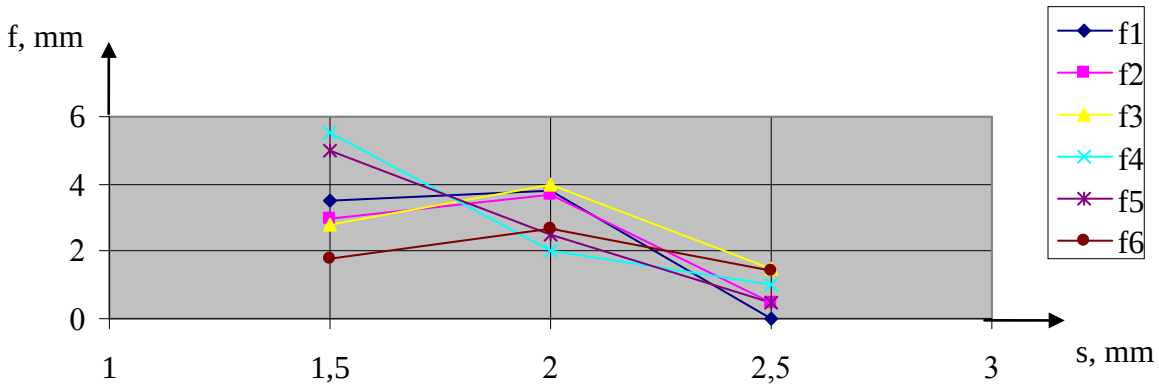


Fig.5.31. Săgeata apărută în urma sudării tablelor prin presiune în linie

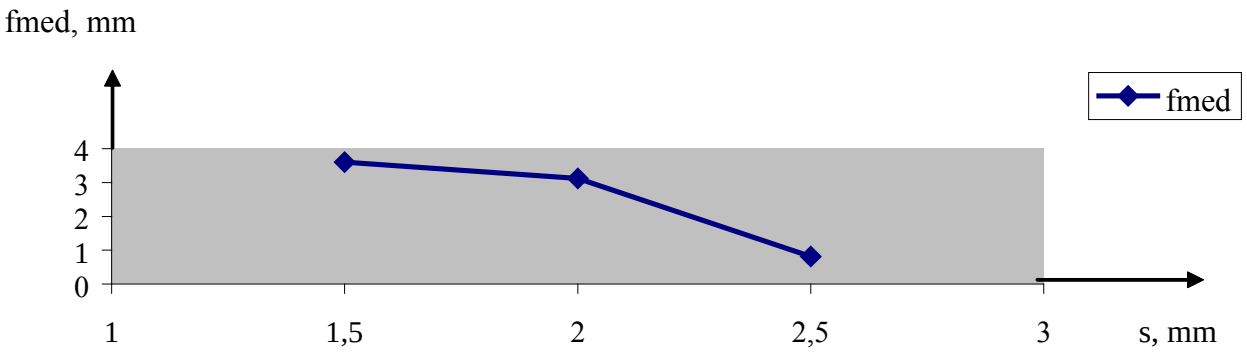


Fig.5.32. Săgeata medie la sudarea prin presiune în linie

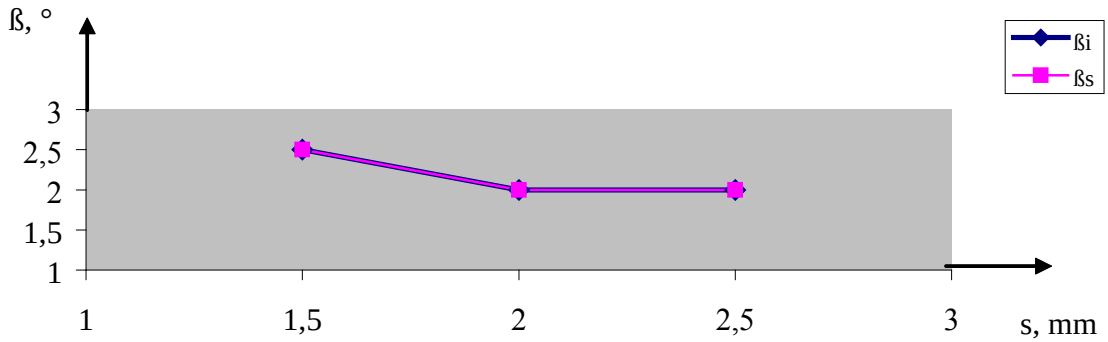


Fig.5.33. Deformația unghiulară la sudarea prin presiune în linie

5.4.2. Concluzii privind deformațiile

Analizând îmbinările sudate se observă, că deformația unghiulară cea mai mare a rezultat la sudarea tablei de 1,5 mm, la grosimile de 2,0 respectiv 2,5 mm deformația unghiulară a fost aceaşi (fig.5.33.).

Săgeata cea mai mare a rezultat în urma sudării tablei de 1,5 mm (fig.5.31. şi 5.32.). Săgeata scade cu creşterea grosimii componentelor.

La sudarea prin presiune în linie, fiind un procedeu complet automatizat, apariția defectelor respectiv deformațiilor mari pot apărea datorită debitării necorespunzătoare a tablelor respectiv montării cu eroare a tablelor.

5.5.Concluzii generale privind sudarea tablelor subţiri din construcţia vagoanelor de călători

Rezultatele cercetărilor efectuate şi prezentate în subcapitolele anterioare, permit o comparaţie între acestea. În tabelul 5.6. s-au prezentat săgeata şi deformaţia unghiulară rezultată la sudarea tablelor cu grosimi de s=1,5mm; s=2,0mm şi s=2,5mm cu procedeele de sudare adecvate. Metodologia de măsurare a săgeţii este aceaşi pentru toate epruvetele luate în considerare. S-au ales probele cu cele mai mici săgeţi şi deformaţii de la fiecare grosime de tablă.

Tabel 5.6. Săgeata formată la sudarea diferitelor grosimi de table cu diferite procedee

Nr. probă	s, mm	Săgeata f,mm				Deformaţia unghiulară β, °		Obs. Procedeu de sudare
		1	2	3	4	β_i	β_s	
6	1,5+1,5	3	4,5	2,5	4	4	7	MAG
32	1,5+1,5	2,5	6,2	2,8	3	5	8,5	WIG
1.4.	1,5+1,5	4,5	5	6,5	-4,5	5	8,5	SE
50	1,5+1,5	6,9	7,2	4,6	4,4	7	9,5	MAG puls
1	1,5+1,5	3	3,5	5,5	1,8	2,5	2,5	SPL
2.1.	2,0+2,0	4	5	4	4	3	6	MAG
29	2,0+2,0	-5	-6,8	-3	-1,5	5,5	6,5	WIG
2.9.	2,0+2,0	-3,5	-4	-5	3	-4	-6	SE
52	2,0+2,0	5,7	6,1	4,5	4,0	5,5	6,5	MAG puls
2	2,0+2,0	3,7	3,8	2	2,7	2	2	SPL
3.7.	2,5+2,5	-3	-4,8	3,3	3,5	3	5	MAG
33	2,5+2,5	4,2	5,3	-1,5	-1,5	4	5,5	WIG
3.3.	2,5+2,5	-3,2	-3	-4	3	-5	-4	SE
55	2,5+2,5	4,4	7	2,4	3,7	5	8	MAG puls
3	2,5+2,5	0,5	0	1	1,4	2	2	SPL

Figurile 5.34. şi 5.35. prezintă săgeata medie şi deformaţia unghiulară rezultată în urma sudării grosimilor de s=1,5mm; s=2,0mm şi s=2,5mm cu diferite procedee de sudare.

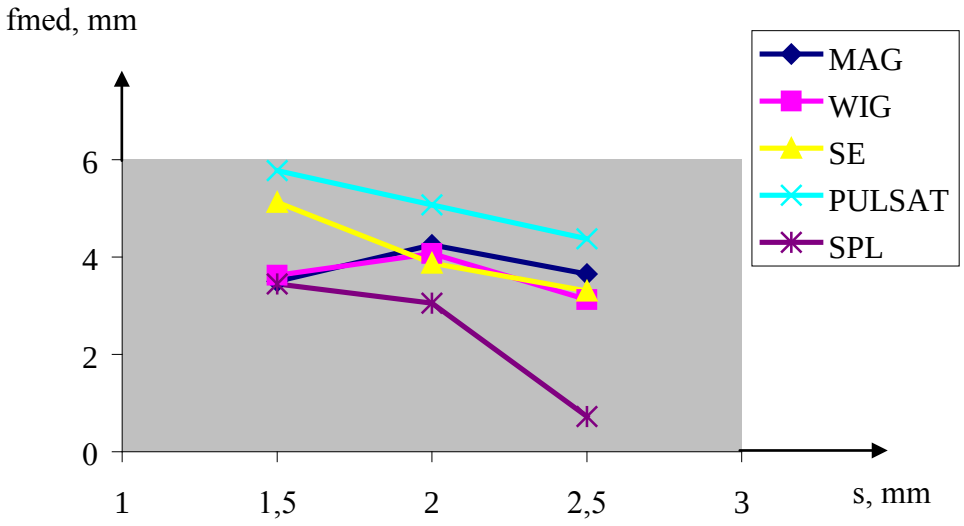


Fig.5.34. Săgeata medie la sudarea tablelor subţiri cu diferite procedee

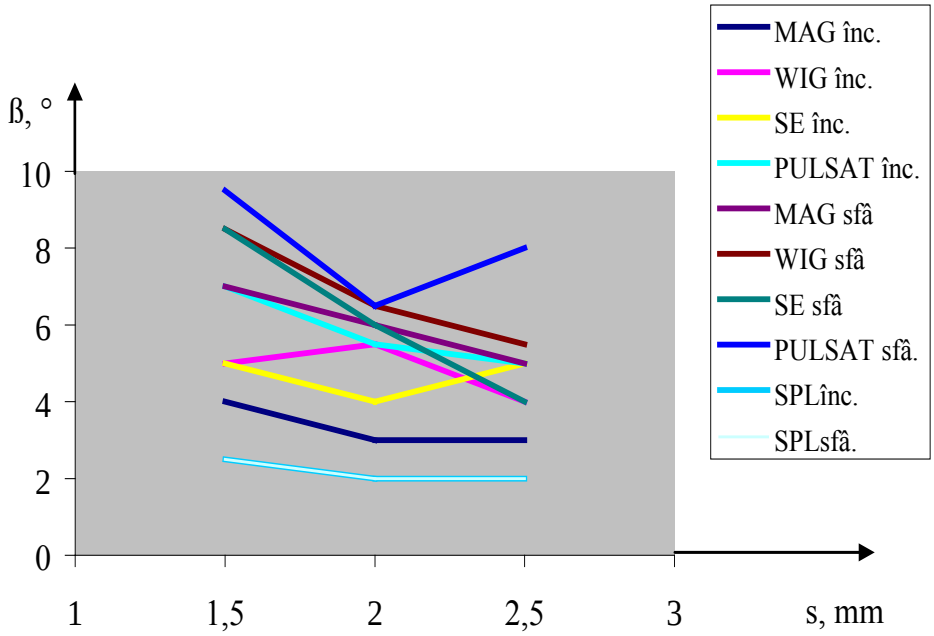


Fig.5.35. Deformaţiile unghiulare apărute la sudarea tablelor subţiri cu diferite procedee

Făcând o comparaţie între probele sudate cu diferite procedee de sudare se observă că săgeata medie (fig.5.34.) maximă a rezultat în urma sudării cu procedeul MAG în curent pulsat, săgeţi mai mari la procedeele WIG, SE, MAG iar săgeata minimă a rezultat în urma sudării prin presiune în linie cu material de adaos. Săgeata medie a scăzut cu creşterea grosimii componentelor. În ceea ce priveşte deformaţiile unghiulare şi în acest caz cele mai mici au fost la probele sudate prin presiune în linie respectiv mai mari la sudarea MAG în curent pulsat (fig.5.35.). Diagramele s-au realizat pe baza probelor cele mai bune din punct de vedere calitativ.

Rezultatele cercetărilor efectuate se vor aplica tipurilor de subansamble existente în cadrul realizării cutiei vagoanelor clasă.

5.5.1. Schelet perete lateral

Scheletul peretelui lateral al vagoanelor călători este o construcţie complexă, fiind compusă din numeroase stâlpi, legături dintre stâlpi şi întărituri. Îmbinările nedemontabile dintre aceştia se realizează prin suduri scurte, cap la cap şi în colţ. Aceste îmbinări sunt amplasate pe o suprafaţă mare, un perete lateral al unui vagon de călători putând avea o suprafaţă de 2.000x20.000 mmxmm. Suprafaţa exterioară a îmbinărilor trebuie polizată la nivelul scheletului, ca să se realizeze un contact intim între schelet şi tabla învelitoare.

Din cele prezentate anterior rezultă că îmbinările prin sudare se pot realiza prin procedeele SE, MAG, şi WIG. SE şi WIG sunt procedee manuale cu productivitate scăzută respectiv consum de material de adaos mai mare faţă de procedeul MAG. La procedeul SE peste aceste dezavantaje se mai adaugă şi necesitatea curăţirii sudurilor de zgură. Procedeul WIG are un alt mare dezavantaj şi anume pachetul de cabluri de la sursă la pistolet este scurt neexistând soluţii tehnice de prelungire. Este greu de conceput un sistem astfel încât acesta să acopere spaţiul de lucru a acestor pistolete din suprafaţa scheletului peretelui lateral.

Rezultatele experimentărilor efectuate şi prezentate anterior au arătat că cele mai mari deformaţii au rezultat la procedeul SE, WIG, MAG în curent pulsat şi cele mai mici la MAG.

Comparând aceste avantaje şi dezavantaje rezultă clar că atât din punct de vedere tehnic şi mai ales economic procedeul recomandat pentru aceste îmbinări este procedeul MAG. Pentru respectarea parametrilor de sudare utilizaţi şi în vederea asigurării unei calităţi superioare a structurilor sudate, există instalaţii de sudare la care se pot programa regimurile de sudare, acestea nu depind de operator, respectiv se poate urmări respectarea parametrilor utilizaţi, echipamentele sunt dotate cu calculator care înregistrează parametri reali în timpul operaţiei de sudare. Singura problemă care se ridică este amplasarea surselor sau a dispozitivului de avans sârmă în aşa fel ca pistoletul cu cablurile aferente să acopere întreaga suprafaţă a scheletului, perete lateral, frontal sau acoperiş.

5.5.2. Tabla învelitoare

Pereţii laterali ai vagoanelor călători au dimensiuni mari, confecţionarea tablei învelitoare necesitând utilizarea a mai multor panouri de tablă. Îmbinarea acestora se realizează cu suduri cap la cap. Supraînălţarea sudurilor pe partea tablei învelitoare care vine montată pe schelet, se polizează la nivelul tablei, pentru a nu rămâne spaţiu între schelet şi tabla învelitoare.

Aceste îmbinări pot fi realizate prin procedee SE, WIG, MAG sau prin presiune în linie cu platbandă SPL. Energia liniară introdusă în îmbinarea sudată are efect preponderent la deformarea tablei. Din acest punct de vedere energia liniară minimă este asigurată de procedeul de sudare prin presiune în linie cu material de adaos, care în plus nu realizează o supraînălţare a sudurilor, eliminând operaţia de polizare a supraînălţării sudurii. La realizarea ZIT-ului minim mai contribuie şi masa de fixare/dispozitivul de fixare a tablelor care este o masă magnetică răcită cu apă care conduce foarte bine căldura din zona de îmbinare.

Acest procedeu coroborat cu un dispozitiv special de înfăşurare a tablei învelitoare a pereţilor şi a acoperişurilor face posibilă ca toate sudurile să fie executate cu acest procedeu. Astfel deformaţiile sunt minime, neglijabile atât în timpul confecţionării cât şi în timpul transportului.

5.5.3. Perete lateral-acoperiş

Îmbinările sunt în colţ prin suprapunere, îmbinări ce pot fi executate cu procedeele de sudare SE, WIG, MAG şi prin presiune în puncte.

Avantajele şi dezavantajele acestor procedee au fost prezentate în capitolele anterioare.

Dintre procedeele experimentate rezultatele cele mai bune s-au obţinut cu procedeul MAG atât din punct de vedere tehnic cât şi economic, procedeul fiind semimecanizat, suficient de flexibil. Ar fi posibilă aplicarea variantei robotizate dar spaţiul de lucru al robotului industrial este limitat, nu acoperă nici peretele lateral şi nici acoperişul. Din acest motiv robotul ar trebui montat pe un modul de translaţie lung mărind astfel substanţial spaţiul de lucru al robotului industrial, lucru care ar mări mult cheltuielile de investiţie.

Soluţia optimă este un studiu pentru necesitatea elaborării unei tehnologii de grup. Această tehnologie de grup reclamă executarea unei celule flexibile de sudare, care ţine cont atât de executarea îmbinărilor sudate cu o productivitate ridicată cât şi de reducerea tensiunilor şi deformaţiilor remanente, mai ales a deformaţiilor care trebuie din punct de vedere al aspectului să nu formeze ondulaţii, voalări etc., fapt ce ar mări rezistenţa de frânare a vehiculului.

Celula de fabricaţie flexibilă trebuie să aibă la bază o masă de aşezare a tablei acoperitoare a peretelui lateral. Această masă trebuie prevăzută cu un dispozitiv de întindere permanentă ce realizează o forţă bine stabilită. Astfel, tabla va fi întinsă în timpul operaţiei de sudare. Peste această tablă se montează şi se prinde provizoriu cu sudură scheletul peretelui. Sudarea se va executa cu o instalaţie de sudare prin rezistenţă prin puncte care introduce energia liniară minimă în îmbinări.

Atât dispozitivul de fixare şi întindere cât şi instalaţia de sudare prin rezistenţă cu puncte multiple trebuie astfel proiectate şi executate ca să se poată executa cu ele o gamă mare de produse cu foarte mici modificări constructive.

5.6. Concluzii privind contracţia transversală şi longitudinală cu diferite procedee de sudare

Figurile 5.36. şi 5.37. prezintă contracţia transversală medie respectiv contracţia longitudinală medie rezultată în urma sudării tablelor cu grosimi de 1,5; 2,0 şi 2,5mm cu diferite procedee de sudare. Figurile 5.36. şi 5.37. au fost realizate utilizând valorile medii prezentate în tabelele 5.7.-5.9.

Tabel 5.7. Contracţia transversală medie şi longitudinală medie apărută în urma sudării manuale cu electrozi înveliţi

s mm	$\Delta b_{1\ med}$ mm	$\Delta b_{2\ med}$ mm	$\Delta l_{\ med}$ mm
1,5	0,4625	1	0,55
2	0,42	0,975	0,345
2,5	0,383	0,958	0,35

Tabel 5.8. Contracţia transversală medie şi longitudinală medie apărută în urma sudării MAG

s mm	$\Delta b_{1\ med}$ mm	$\Delta b_{2\ med}$ mm	$\Delta l_{\ med}$ mm
1,5	0,275	0,725	0,6
2	0,3	0,9	0,3
2,5	0,3	0,77	0,3

Tabel 5.9. Contracţia transversală medie şi longitudinală medie apărută în urma sudării MAG în curent pulsat

s mm	$\Delta b_{1\ med}$ mm	$\Delta b_{2\ med}$ mm	$\Delta l_{\ med}$ mm
1,5	0,2	0,9	0,75
2	0,55	0,95	0,65
2,5	0,45	0,85	0,3

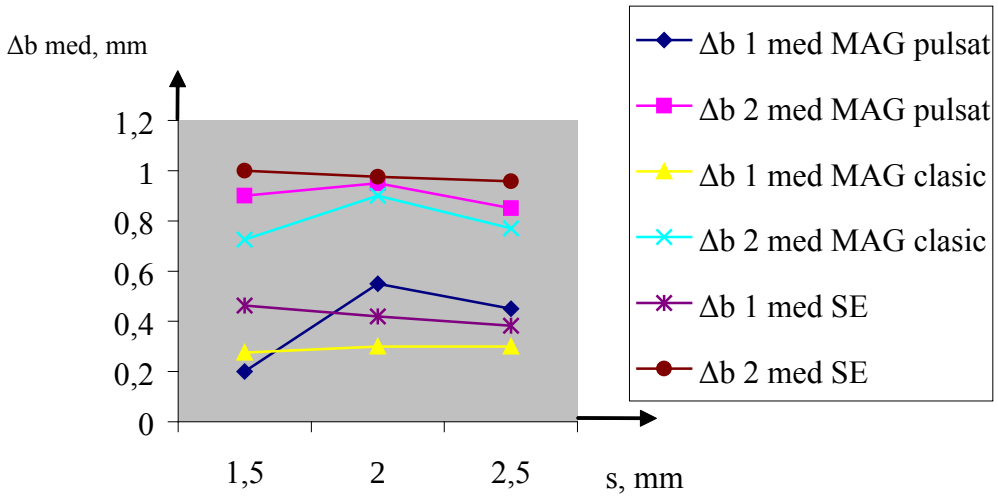


Fig.5.36. Contracţia transversală medie la sudarea tablelor subţiri

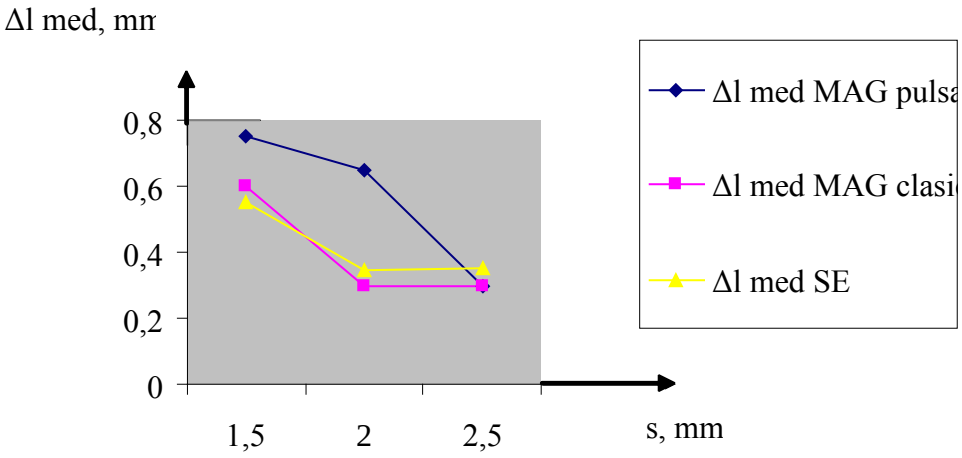


Fig.5.37. Contracţia longitudinală medie la sudarea tablelor subţiri

Contracţia transversală medie la sudarea tablelor cu grosimi de s=1,5;2,0 şi 2,5mm cu diferite procedee de sudare este mai mică la începutul sudurii la fiecare procedeu comparativ cu sfârşitul sudurii (fig.5.36.). La procedeul SE contracţia transversală scade cu creşterea grosimii componentelor. La procedeele de sudare în medii de gaz protector MAG convenţional, respectiv în curent pulsat contracţia transversală are un maxim la sudarea grosimii de s=2,0mm, după care scade. Procedeul care conduce la obţinerea celor mai mici contracţii transversale este sudarea în mediu de gaz protector MAG.

Contracţia longitudinală medie (fig.5.37.) la sudarea tablelor cu grosimi de s=1,5; 2,0 şi 2,5mm cu diferite procedee de sudare scade cu creşterea grosimii de tablă şi ea este cea mai mică în cazul sudării cu procedeul de sudare în mediu de gaz protector MAG.

5.7. Măsuri de reducere a deformaţiilor la sudarea pereţilor vagoanelor de călători utilizând diferite procedee de sudare

În cazul sudării pereţilor laterali ai vagoanelor călători se realizează îmbinări cap la cap respectiv în colţ prin suprapunere. Aceste suduri se pot realiza aplicând diferite procedee de sudare.

La sudarea îmbinărilor cap la cap se utilizează procedeele: sudarea prin presiune în linie cu material de adaos bandă, MAG şi SE, primul ducând la cele mai mici deformaţii, contracţii şi ondulări de table. Indiferent de procedeul de sudare utilizat este benefică folosirea dispozitivelor de sudare.

Îmbinările în colţ prin suprapunere apar la sudarea tablelor învelitoare pe diferite schelete, cum ar fi structura vagoanelor, locomotivelor, avioanelor, metroului, tramvaielor etc.

În aceste cazuri însăşi scheletele metalice sunt în general profile îndoite sau trase din table subţiri cu grosime maximă de 2,5-3,0 mm, peste care se montează tablele învelitoare cu grosime de 1,5-2,5 mm, îmbinările putând fi în colţ realizate prin sudare prin topire cu arc electric sau îmbinări în colţ prin suprapunere sudate prin presiune în puncte.

Problema cea mai mare care apare, datorită faptului că sudurile sunt total asimetrice, sunt deformaţiile foarte mari prin ondulare a tablelor învelitoare. Aceste ondulaţii pot ajunge la 10-12 mm, care pe de o parte nu corespund din punct de vedere estetic, pe de altă parte cu creşterea vitezei de circulaţie măresc forţele de frânare reducând viteza de deplasare a vehiculului. Din acest motiv se recomandă utilizarea sudării prin presiune în puncte, procedeu care introduce cele mai mici deformaţii, utilizând un dispozitiv de montat-sudat schelet pe tablă.

Un rol important îl au dispozitivele pentru sudare în cazul reducerii deformaţiilor care apar în urma transportului tablelor. Sudarea prin presiune în linie cu material de adaos bandă la care deformaţiile remanente sunt cele mai mici, utilizând un dispozitiv special de înfăşurare, face posibilă realizarea unor suprafeţe mari de table prin sudare cap la cap, tabla învelitoare pentru acoperiş sau perete lateral vagon sau locomotivă cu dimensiuni de 3000x20000 mmxmm, cu deformaţii minime.

Analizând metodele de reducere a tensiunilor şi deformaţiilor prezentate în capitolul 3.3., se ajunge la concluzia că, încă din faza proiectării structurii sudate trebuiesc luate măsuri constructive şi tehnologice pentru a reduce tensiunile remanente şi deformaţiile structurilor sudate.

La sudarea tablelor subţiri, unde apar deformaţii unghiulare mari respectiv ondulări şi răsuciri a tablelor, se recomandă utilizarea procedeelor de sudare care introduc în componente energie liniară mică, precum: sudarea prin presiune în puncte, sudarea prin presiune în linie cu material de adaos bandă sau sudarea MIG/MAG.

Referitor la parametrii regimului de sudare, la sudarea prin topire cu arc electric se va suda cu curent de sudare mic şi viteză de sudare mare, diametrul sârmei mic şi fără pendularea arcului electric.

Se va evita supraîncălzirea componentelor.

Alegerea corectă a ordinii de prindere provizorie respectiv de sudare este o măsură obligatorie.

Se va studia utilitatea efectuării pretensionării respectiv preîndoirii.

Dispozitivele specifice sudării tablelor subţiri sunt recomandate în astfel de aplicaţii.

6. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎNDREPTAREA TABLELOR SUBŢIRI

6.1.Stabilirea programului de experimentări

Corectarea deformaţiilor şi a tensiunilor remanente la cutia vagoanelor călători este dificil de realizat din următoarele motive:

- pentru a obţine rezultate concludente sunt necesare multe experimente;
- pentru a executa măsurători de deformaţii sunt necesare dotări de dispozitive, verificatoare, instrumente de măsură complicate şi costisitoare;
- executarea de măsurători în domeniul contracţiilor este practic imposibil de realizat din punct de vedere a construcţiei cutiei vagonului călători;
- costul unui vagon ajunge la sute de mii de euro.

Cercetările s-au axat pe apariţia deformaţiilor şi tensiunilor pe epruvete mici relevante, apărute în urma sudării, respectiv s-au studiat efectele încălzirii punctiforme cu flacără a epruvetelor. În urma acestor experimentări s-au tras concluzii privind diminuarea deformaţiilor şi tensiunilor rezultate la realizarea cutiei vagoanelor, alegerea procedeului optim de îndreptare, stabilirea parametrilor regimului de îndreptare. Rezolvarea problemei se face pornind de la faza de producere a deformaţiilor şi tensiunilor apărute în urma sudării şi studiul efectelor încălzirii locale cu flacără. Probele s-au sudat liber respectiv rigidizat, cele libere cu procedeul de sudare MAG mecanizat iar cele rigidizate MAG semimecanizat. În cazul cercetărilor privind încălzirea punctiformă a probelor temperatura de încălzire nu a depăşit 700^0 C.

Dimensiunile probelor au fost 200x200mm, cu grosimi de tablă de 1,5; 2,0 şi 2,5mm, calitatea tablelor fiind FeP03, SREN 101300/1991. Grosimile de tablă şi natura materialului epruvetelor corespunde cu cele utilizate la construcţia vagoanelor călători, locomotivelor electrice, tramvaielor sau metroului [103].

S-au urmărit:

- dilataţia şi contracţia tablei cauzate de aplicarea unor rânduri de sudură pe epruvete libere. În vederea menţinerii constante a parametrilor de sudare, mai ales a vitezei de sudare s-a utilizat procedeul mecanizat de sudare MAG;
- dilataţia şi contracţia tablei cauzate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără oxi-acetilenică similar celei aplicate la metoda de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale. S-a măsurat temperatura de încălzire cu un termometru infra ProScan urmărind ca temperatura de încălzire să se încadreze între 600-700^0 C;
- determinarea valorii forţelor care apar în epruvete rigidizate cauzate de aplicarea unor rânduri de sudură. Construcţia dispozitivului nu a permis aplicarea procedeului de sudare mecanizată MAG ci doar varianta semimecanizată;
- determinarea valorii forţei care apare în epruvete rigidizate cauzate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără oxi-acetilenică asemănător cu cea aplicată la metoda de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale. Cu un termometru

infra ProScan s-a urmărit ca temperatura de încălzire să se încadreze între 600-700^0 C, în vederea menţinerii constante a parametrilor de încălzire;

- compararea valorii contracţiilor transversale măsurate cu cele calculate.

6.2.Determinarea experimentală a dilataţei şi contracţiei cauzată de aplicarea unor rânduri de sudură

6.2.1.Instalaţia de măsurare

Instalaţia este compusă dintr-un dispozitiv de aşezare-orientare a epruvetelor, şi un traductor inductiv de deplasare de tip **W200.**

Dispozitivul este compus dintr-o placă de bază rigidă şi accesorii pentru poziţionare şi fixare (fig.6.1. şi 6.2.).

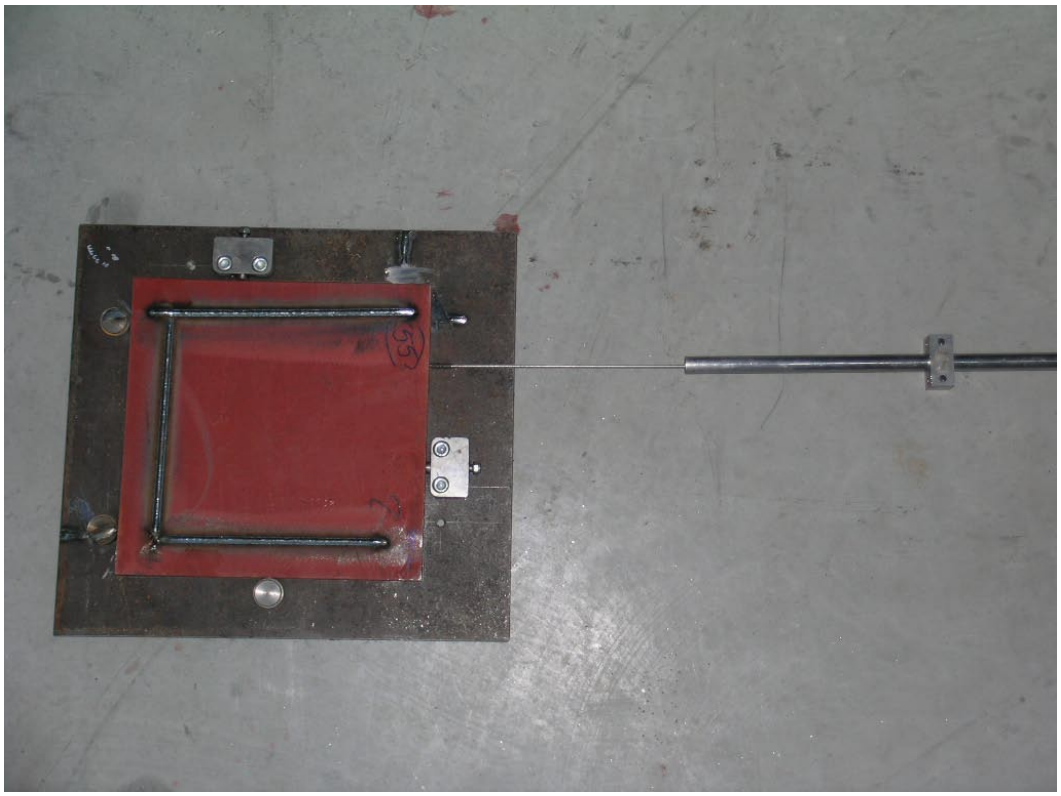


Fig.6.1. Dispozitiv de aşezare – orientare epruvete

Poziţionarea plăcii de încercat se face cu ajutorul a trei cepuri de ghidare, unul pe o latură şi două pe cealaltă latură, laturile fiind la 90° între ele, iar fixarea se realizează cu ajutorul a două dispozitive cu element elastic care ţin placa de încercat în contact permanent cu cepurile de ghidare.

Trasarea curbei de variaţie a dilataţiei/contracţiei liniare în timpul încălzirii epruvetelor de încercat s-a realizat cu ajutorul unui traductor inductiv de deplasare de tip **W200** producţie Hottinger Baldwin Messtechnik-Germania.

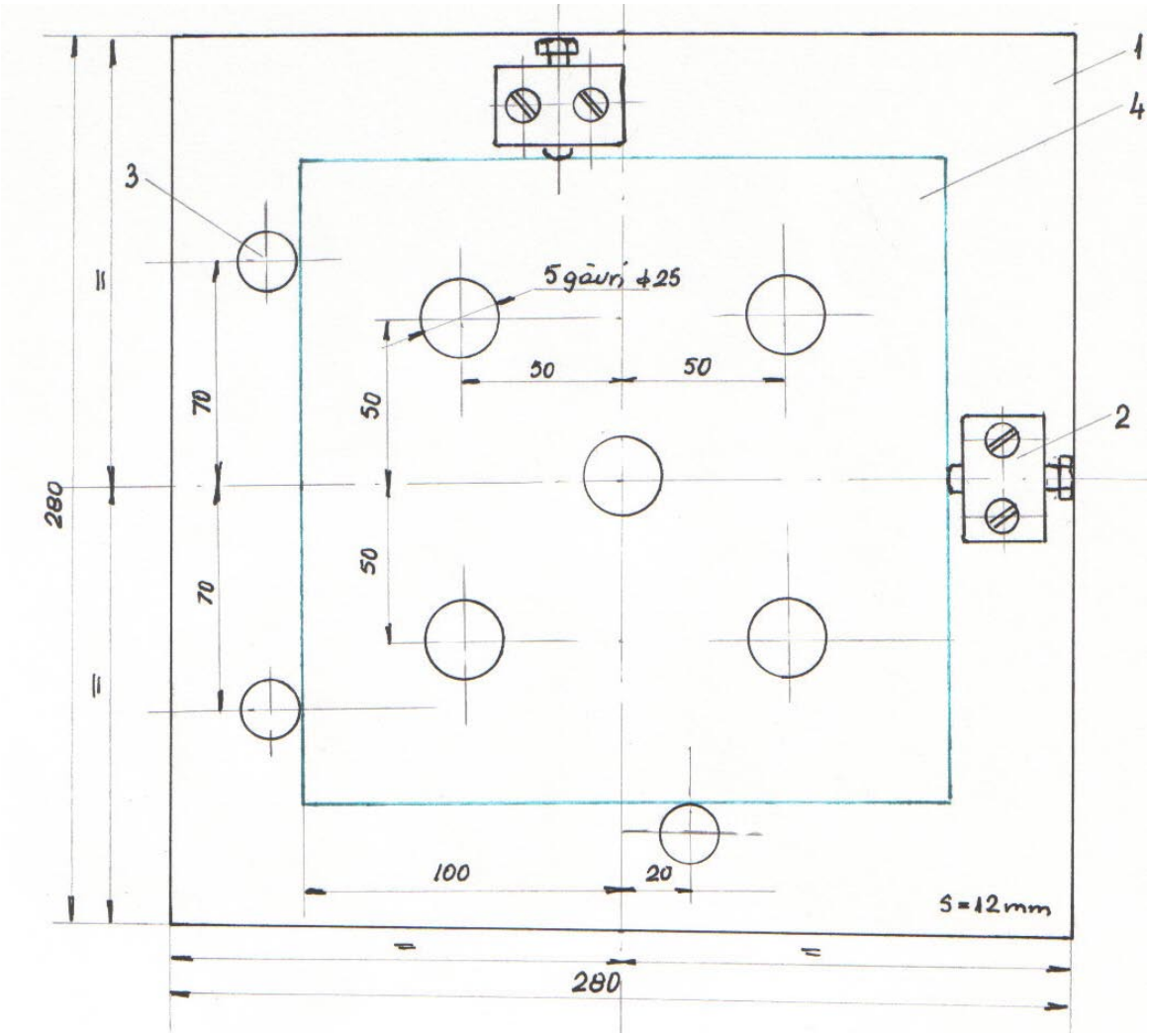


Fig.6.2. Dispozitivul de măsurare a contracţiilor
1. placă de bază rigidă; 2. dispozitivul de poziţionare cu element elastic; 3. cep de ghidare; 4. placa de încercat deformată termic

Montajul cu dispozitivul de fixare a plăcii şi cu traductorul de deplasare pentru măsurarea deformaţiilor este prezentat în figurile 6.1. şi 6.2.

În vederea înregisrării datelor măsurate, s-a folosit un aparat de achiziţie.

Pentru etalonarea şi măsurarea forţelor şi deformaţiilor s-a utilizat sistemul de achiziţie Spider 8, fabricat de Hottinger Baldwin Messtechnik-Germania, figura 6.3. şi un calculator portabil fabricat de Hewlett-Packard.

Fig.6.3. Sistem de achiziţie date Spider 8

6.2.2.Măsurători şi rezultate

Sudarea probelor s-a executat mecanizat prin utilizarea unui tractor de sudare (fig.6.5.). Sudurile depuse şi ordinea de sudare sunt prezentate în figura 6.4, iar parametrii de sudare în tabelul 6.1.

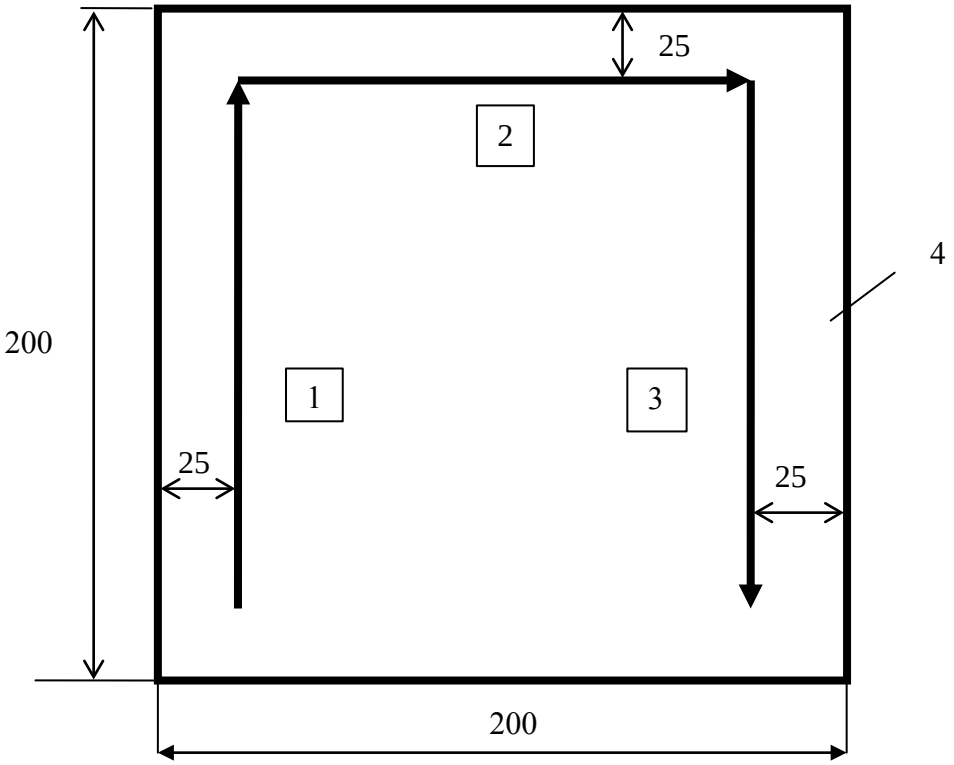


Fig.6.4. Ordinea de sudare în dispozitivul 1
1,2,3, –ordinea de sudare; 4 - placă

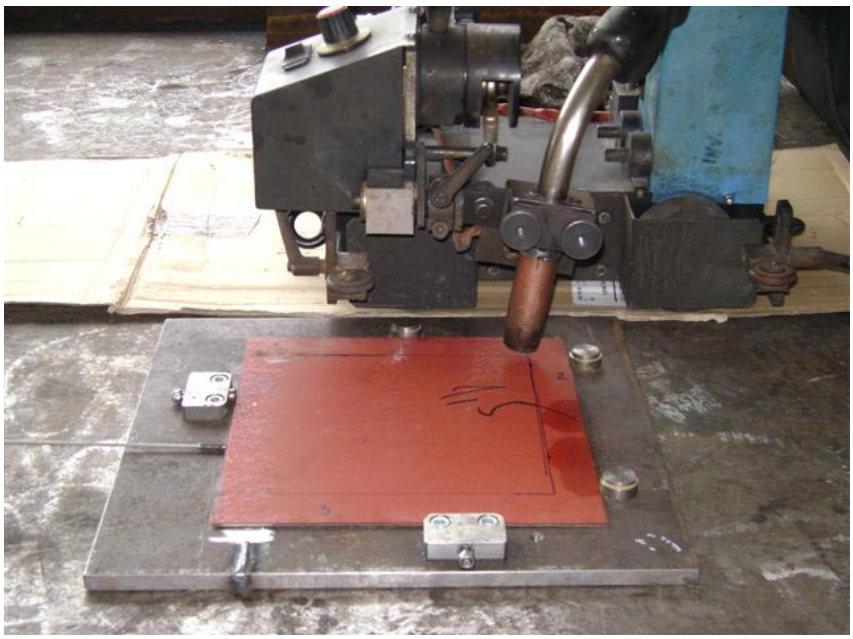


Fig.6.5. Executarea probelor în dispozitivul 1

Tabel.6.1. Regimurile de sudare utilizate, tablă liberă, dispozitiv 1, MAG mecanizat

Nr. epruvetă	s, mm	I_s, A	U_a, V	v_{ae}, m/min	L_s, mm	v_s, cm/s	D_g, l/min	E_l, J/cm
50	1,5	120	19,3	4	400	1,33	14	1480,15
51	1,5	121	19,2	4	450	1,33	14	1484,752
53	1,5	120	19,3	4	460	1,587	14	1240,454
54	1,5	120	19,3	4	430	1,33	14	1480,15
55	2	120	19,3	4	475	1,33	14	1480,15
56	2	114	19,5	4	445	1,587	14	1190,643
57	2,5	118	19,3	4	445	1,33	14	1455,481
58	2,5	115	19,5	4	435	1,587	14	1201,087

S-a ales varianta de sudare MAG mecanizată a probelor din următoarele considerente:

- asigurarea vitezei de sudare constante;
- asigurarea constantă a distanţei duză de conducere a gazului –piesă;
- lungimea liberă a sârmei constantă;
- suduri rectilinii;
- eliminarea subiectivismului operatorului sudor prin eliminarea abaterilor la sudare provocate de el;
- păstrarea unui regim de sudare constant urmat de o interpretare mai precisă a rezultatelor.

Rezultatele măsurătorilor contracţiei la probele sudate sunt prezentate în figurile 6.6., respectiv 2.32.-2.37 din anexa 2.

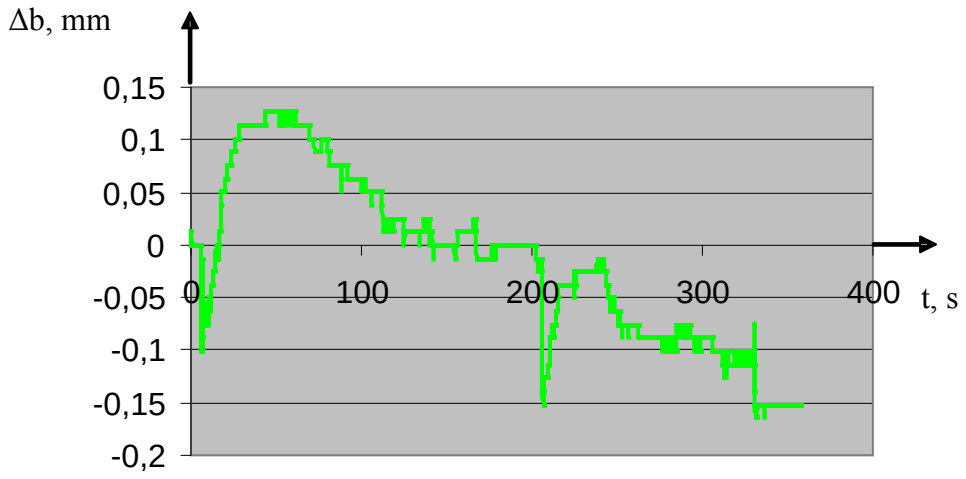


Fig.6.6. Contracţia epruvetei 51

Tabelul 6.2. centralizează rezultatele limită ale contracţiilor obţinute.

Tabel 6.2. Valorile extreme ale dilatațiilor – contracțiilor probelor sudate

Nr. epruvetă	t, s	Δb, mm	Nr. epruvetă	t, s	Δb, mm
50	18	-0,1392	56	19	-0,037
	102	0		34	0,0506
	200	-0,2278		258	-0,3
	390	-0,518		268	-0,2658
	530	0,088/ e	57	17	-0,139
51	7	-0,101		171	-0,278
	51	1,1265		234	-0,54
	207	-0,1518		440	-0,4936
	242	-0,012	58	8,9	-0,037
	331	-0,1645		75	-0,088
53	10	-0,0759		99	0,0379
	21	0,0253		166	-0,1898
	208	-0,506			
	419	-0,898			
	430	-0,8481			
55	11	-0,0379			
	27	0,0126			
	91	-0,0759			
	194	-0,29			

unde:

- t – timpul de înregistrare a contracțiilor în s;
- Δb – contracția tablelor în mm;
- e – eroare de măsurare.

Se poate trage concluzia că la energie liniară de valoare mică corespunde contracție mai mică la tabla de 2,5 mm grosime, la tabla de 2 mm contracția este aproximativ egală, iar la tabla de 1,5 mm rezultatul este invers. Acest lucru se poate explica prin faptul că după realizarea rândului nr.1 fenomenul de contracție s-a desfăşurat şi în timpul repoziționării tractoraşului de sudare pentru efectuarea rândului următor, epruveta s-a răcit la temperatura mediului ambiant având un volum de cca. 2 ori mai mic decât epruveta de 2,5 mm.

Determinarea analitică a contracțiilor conform (3.10.) conduce la rezultatele din tabelul 6.3.

Tabel.6.3. Contracţia transversală analitică şi măsurată a tablelor

Nr. epruvetă	s (mm)	E_l (J/cm)	Δb(mm) valoare teoretică	Δb (mm) valoare măsurată
50	1,5	1480,15	0,359084481	0,518
51	1,5	1484,752	0,360200806	0,3985
53	1,5	1240,454	0,300934064	0,42081
55	2	1480,15	0,269313361	0,29
56	2	1190,643	0,216637443	0,2658
57	2,5	1455,481	0,211859844	0,2936
58	2,5	1201,087	0,174830217	0,1898

S-au utilizat pentru constantele termofizice următoarele valori numerice:

$\alpha = 12.10^{-6}$ 1/°C (6.1.)

$\gamma = 7{,}85$ kg/dm^3 (6.2.)

c = 420 J/kg. °C (6.3.)

Comparând rezultatele experimentale cu cele analitice se pot trage următoarele concluzii:

- în toate cazurile se poate stabili o lege generală: la amorsarea arcului se produce o contracţie mică urmată de o dilataţie foarte mică şi pe măsura răcirii tablei se produce contracţia finală;
- în general contracţiile măsurate (tab.6.3.) sunt mai mari ca cele determinate analitic pe baza relaţiilor statistice (3.10.). În urma acestor diferenţe se propune corectarea relaţiei (3.10.) cu coeficientul: g=1,2486 (6.5.), unde *g* este media aritmetică a raporturilor contracţiilor transversale măsurate şi contracţiilor transversale calculate (6.4.):

$$g = \frac{1}{n}.\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta b\exp}{\Delta bteor} \qquad (6.4.)$$

$$\Delta b = g.\frac{\alpha}{c.\gamma}.\frac{E_l}{s} \qquad (6.5.)$$

Măsurarea ondulării probelor s-a efectuat în 16 puncte trasate şi marcate conform figurii 6.7. cu ajutorul unui comparator aşezat pe un suport (fig.6.8.).

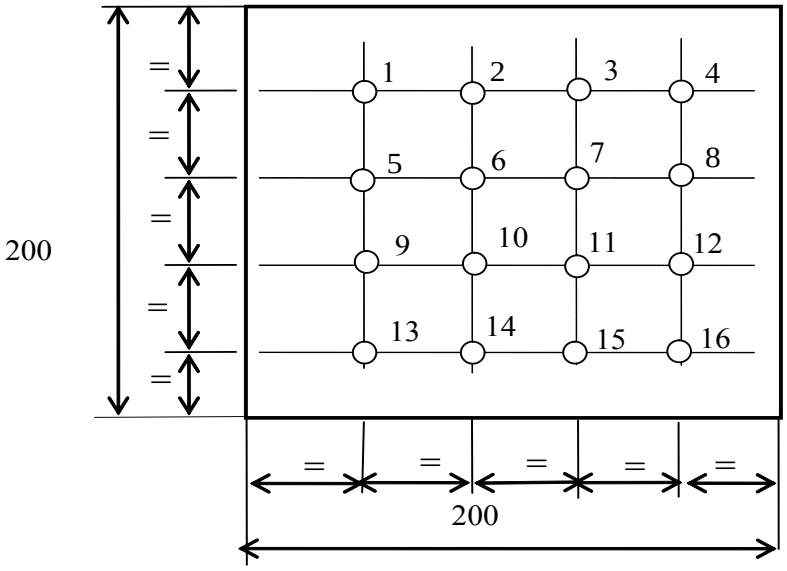


Fig.6.7. Metodologia de măsurare a ondulării tablei
1,2, ... , 15, 16 - puncte în care se măsoară ondularea

Fig.6.8. Metodologia de măsurare a ondulării tablei

Rezultatele măsurătorilor sunt centralizate în tabelul 6.4.

Tabel.6.4. Ondularea tablelor sudate MAG mecanizat, în mm, tablă liberă

Nr. Epruvetă	f, (mm)															
	Punct măsurare															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	1,35	1,66	2,36	3,3	0,35	0,57	1,28	2,47	0	0,29	0,86	1,94	0,22	0,77	1,19	1,67
51	0	0,53	0,53	-0,08	1,21	2,03	2,31	1,03	1,23	2,63	3	1,74	0,47	2,54	2,9	1,57
53	0	0,59	0,53	0,05	1,25	1,79	1,8	1,14	1,44	2,1	2,15	1,56	0,64	1,29	1,5	1,14
54	0	0,42	0,51	0,1	1,04	1,82	2,05	1,6	1,3	2,24	2,69	2,46	0,79	1,86	2,2	2,18
55	0	0,68	1,28	0,9	0,72	1,55	2,19	1,87	0,69	1,7	2,47	2,3	0,4	1,47	2,18	2,12
56	0,51	0,88	0,96	0,72	0,7	1,18	1,29	1,06	0,51	1,1	1,18	1,02	0	0,64	0,83	0,65
57	0,84	0,45	0,41	0,7	0,38	0,03	0	0,43	0,39	0,05	0,03	0,45	0,58	0,41	0,47	0,88
58	-0,22	-0,2	0,22	1,92	0,51	0,45	0,84	1,66	0,59	0,53	0,9	1,65	0	0,08	0,35	1,96

În figura 2.1. (anexa 2). sunt prezentate săgeţile măsurate în cele 16 puncte a tablelor cu grosimi diferite, deformate în urma sudării. Se observă că în cazul grosimii tablelor de 1,5mm, în general, probele au aceeaşi alură a deformaţiilor. În figura 6.9. sunt prezentate săgeţile medii pentru cele trei grosimi de tablă.

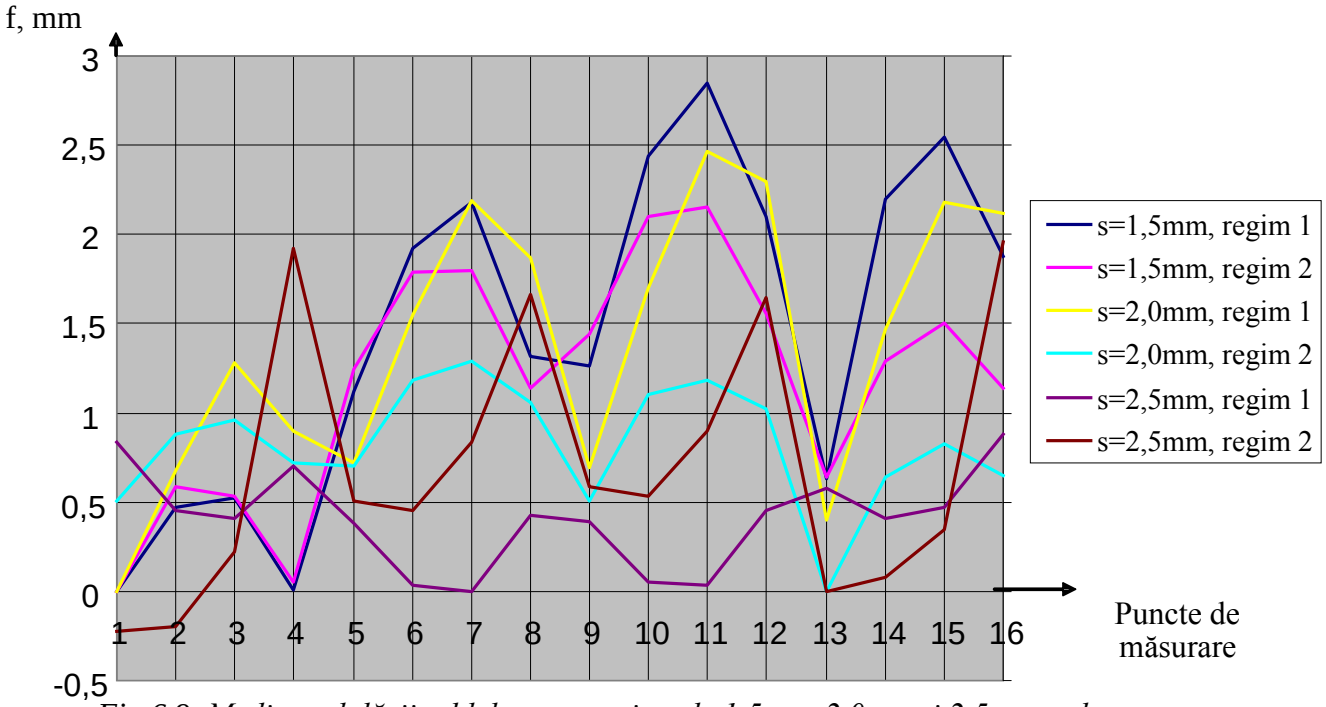


Fig.6.9. Media ondulării tablelor cu grosime de 1,5mm, 2,0mm şi 2,5mm sudate cu regimuri diferite

Din figura 6.9. se observă că în cazul grosimilor de tablă de 1,5mm respectiv 2,0mm deformaţia mai mare apare la tabla sudată cu viteză de sudare mai mică, deci cu energie liniară mai mare, iar în cazul grosimii de tablă de 2,5mm deformaţia mai mare apare la sudarea cu viteză de sudare mai mare şi energie liniară mai mică.

La acelaşi regim de sudare în totdeauna tabla mai subţire se va deforma mai mult, iar cea cu grosime mai mare mai puţin (fig. 6.9.).

Analizând diagramele de ondulare a tablelor deformate în urma sudării mecanizate MAG a trei rânduri, putem trage următoarea concluzie:

- la grosimile de tablă de 1,5 mm şi 2 mm ondularea este mai pronunţată la tablele sudate cu energie liniară mai mare, la tabla cu grosime mai mare, acest lucru este invers.

Deformaţia/ondularea tablelor după sudare este prezentată în figurile 6.10 şi 6.11. respectiv 2.5.- 2.10., anexa 2. Prelucrarea datelor s-a realizat cu programul MATLAB R2007b. Suprafaţa tablelor s-a creat utilizând cele 16 valori măsurate şi făcând o interpolare pentru restul valorilor suprafeţei. Deformaţia mai mică este observată în zonele cu nuanţă albastru închis, iar cea mai mare la nuanţă roşu aprins.

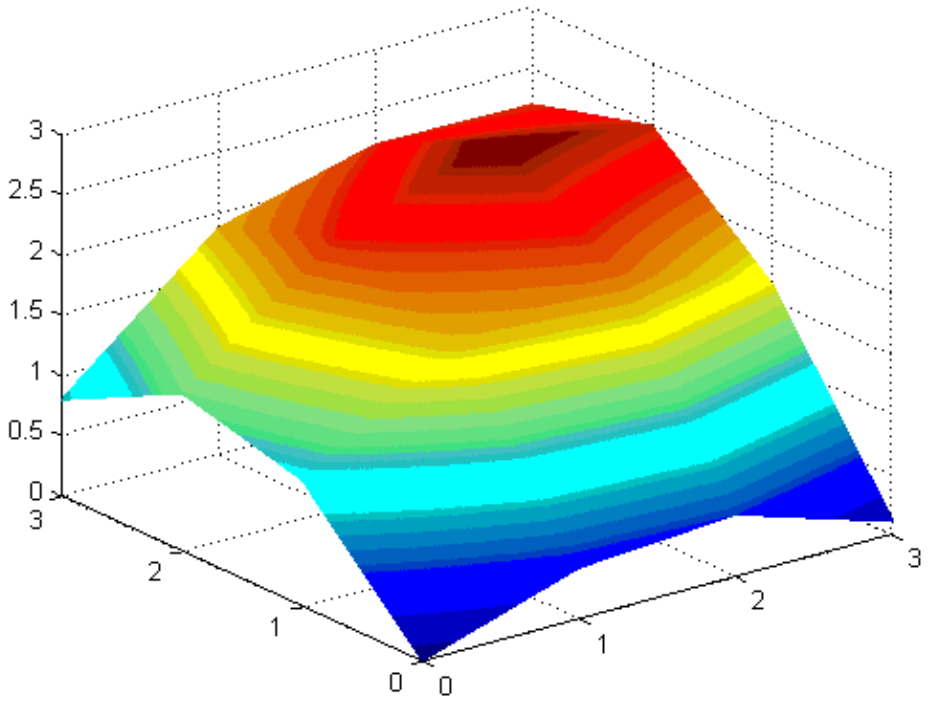


Fig.6.10. Ondularea tablei cu grosimea s=1,5mm

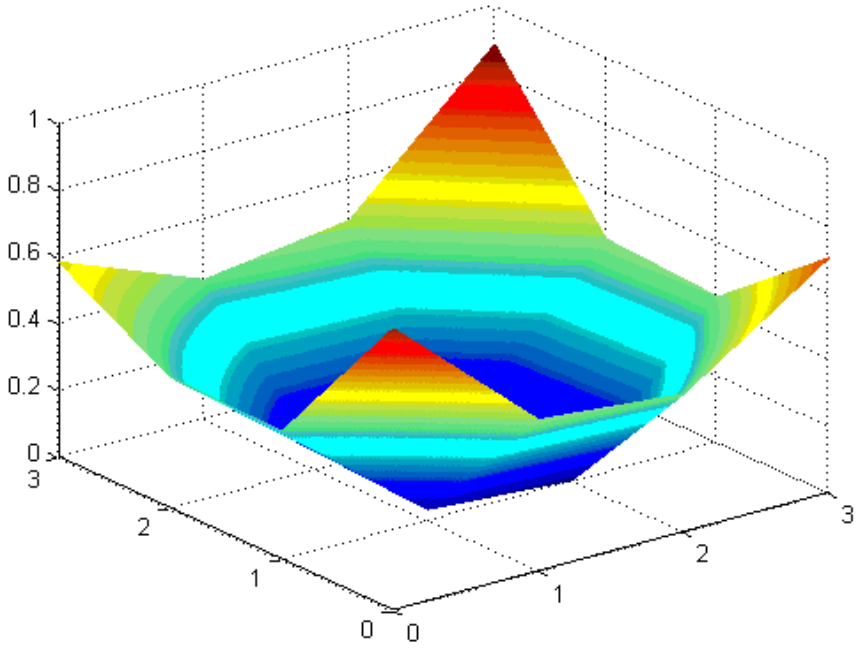


Fig.6.11. Ondularea tablei cu grosimea s=2,5mm

Din figurile 6.10. şi 6.11. se observă că modul de ondulare a tablelor este aleatorie, de aceea nu se poate stabili o lege privind locul şi mărimea deformaţiilor, dar în majoritatea cazurilor punctele interioare s-au deformat mai mult. Explicaţia acestui fenomen constă în existenţa unui număr mare de defecte sau imperfecţiuni de reţea în cristalele reale [70] care influenţează proprietăţile materialelor şi totodată întreaga comportare a acestora. Defectele punctiforme: vacanţe şi atomi interstiţiali, defectele liniare: dislocaţii, şi defectele de suprafaţă perturbă reţeaua cristalină. Dislocaţiile apar în orice material metalic şi ele sunt create fie prin procesul de cristalizare fie în timpul prelucrărilor prin deformare plastică. Rezultă că privind deformarea/ondularea tablelor subţiri în urma încălzirii sau sudării lor, dislocaţiile au un rol hotărâtor. Deoarece locul de apariţie a acestor imperfecţiuni în material este aleatoriu, nu se poate determina precis o lege de apariţie a ondulării tablelor subţiri.

6.3. Determinarea experimentală a dilataţei şi contracţiei cauzate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără oxi-acetilenică

În cadrul acestor experimentări s-au urmărit efectele încălzirii locale cu flacără oxi-gaz a epruvetelor de dimensiuni reduse 200x200mm respectiv dilataţia/contracţia epruvetelor în urma încălzirii lor într-un punct respectiv cinci puncte, şi ondularea tablelor. Aceste măsurători nu se pot realiza pe tabla învelitoare a cutiei vagonului.

6.3.1. Instalația de măsurare

Instalația de măsurare este identică cu cea folosită la determinarea experimentală a dilatației şi contracției cauzată de aplicarea unor rânduri de sudură (cap. 6.2.1).

Pentru măsurarea temperaturii punctului încălzit cu flacără oxiacetilenică s-a utilizat termograful ProScan 520 (fig.6.12.), care este un instrument de măsurare laser fără contact direct termometru piesă.

Instrumentul de măsurare a temperaturii (fig.6.13.) este conectat printr-un cablu USB la un calculator personal, iar prin programul IRConnect 1.3.2. acesta înregistrează temperatura măsurată în timp.

Fig.6.12. Instrument de măsurare temperatură ProScan 520

Fig.6.13. Termometru infra profesional cu laser

6.3.2.Măsurători şi rezultate

Epruvetele au fost aşezate în dispozitivul pentru măsurarea deformațiilor liniare (fig.6.2.). Dispozitivul a fost prevăzut cu cinci găuri de Ø25 mm, amplasate după configurația plăcilor cu găuri folosite la îndreptarea tablei învelitoare a

carcasei vagoanelor de călători cu metoda de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale. Încălzirea probelor s-a realizat cu flacără oxiacetilenică, într-un punct respectiv cinci puncte. Ordinea punctelor de încălzire este prezentată în figura 6.14.

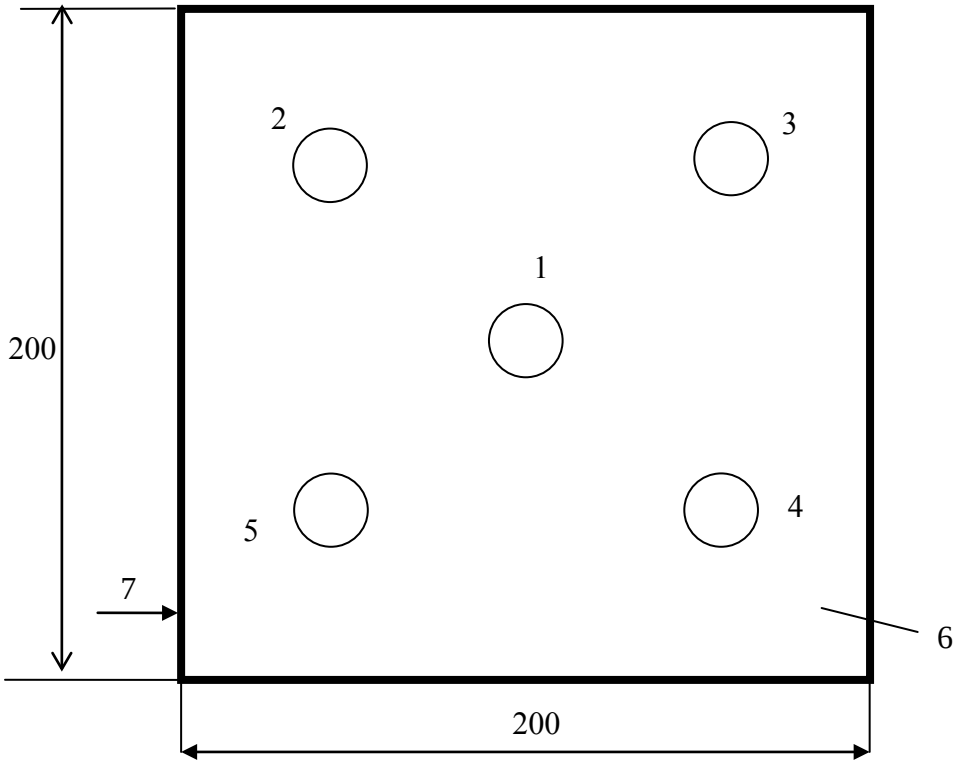


Fig.6.14. Ordinea de încălzire
1,2,3,4,5 – ordinea de încălzire; 6 – placă; 7 – loc de măsurare contracţia/forţa

Pentru a uniformiza căldura introdusă la fiecare punct, epruvetele s-au încălzit pe partea inferioară a dispozitivului, iar pe partea superioară cu termograful s-a măsurat temperatura punctelor limitând încălzirea la 700^0C. Datorită inerţiei termice şi a lipsei unor instalaţii automate nu s-au realizat temperaturi identice. Diagramele de încălzire/ciclurile termice sunt prezentate în figurile 2.44.-2.50 din anexa 2.

La fiecare diagramă se constată cinci vârfuri reprezentând temperatura maximă obţinută în punctul respectiv.

Analizând măsurătorile rezultă că la proba cu grosime de 2,5mm încălzită în 5 puncte temperatura de încălzire se încadrează între 611-704^0C. La punctele 4 şi 5 încălzirea nu a fost uniformă, distanţa dintre arzător şi tablă a variat în timpul încălzirii. Din aceste diagrame se pot observa: viteza de încălzire, temperatura maximă în fiecare punct de încălzire, modul de încălzire etc.

Două table cu grosime de 2,5mm respectiv 1,5mm au fost încălzite doar în mijloc, într-un punct.

Din tabelul centralizator a reieşit că la tablele cu grosime mare s-a realizat o încălzire constantă a celor 5 puncte şi abatere maximă s-a realizat la probele cu grosime mică.

Valorile temperaturii în punctele măsurate în dispozitivul 1 sunt centralizate în tabelul 6.5.

Tabel.6.5. Temperatura măsurată în punctele din dispozitivul 1

Nr. Probă	s, mm	T_1, °C	T_2, °C	T_3, °C	T_4, °C	T_5, °C	Diferenţă de temp., ΔT, °C
20a	2,5	649	611,5	629,9	643,4	704,4	93
21	2,5	639,4	632	641,8	578	605,4	63
22	2,5	657,1	-	-	-	-	-
23	1,5	771	-	-	-	-	-
24	1,5	591,2	581,9	641,8	465,1	525,8	176
25	1,5	537,9	695,5	568,9	593,7	594,4	158
26	2,0	563,7	648,7	719,6	622,2	732,5	69

În urma încălzirii, epruvetele supuse ciclurilor termice anterioare s-au contractat conform diagramelor din figurile 6.15., respectiv 2.38.-2.43. din anexa 2. Din aceste diagrame se poate urmări:

- modul de dilatare a probelor la începutul procesului de încălzire;
- momentul începerii contracţiei;
- valoarea dilatării liniare funcţie de timp şi temperatură;
- valoarea contracţiei liniare funcţie de timp şi temperatură.

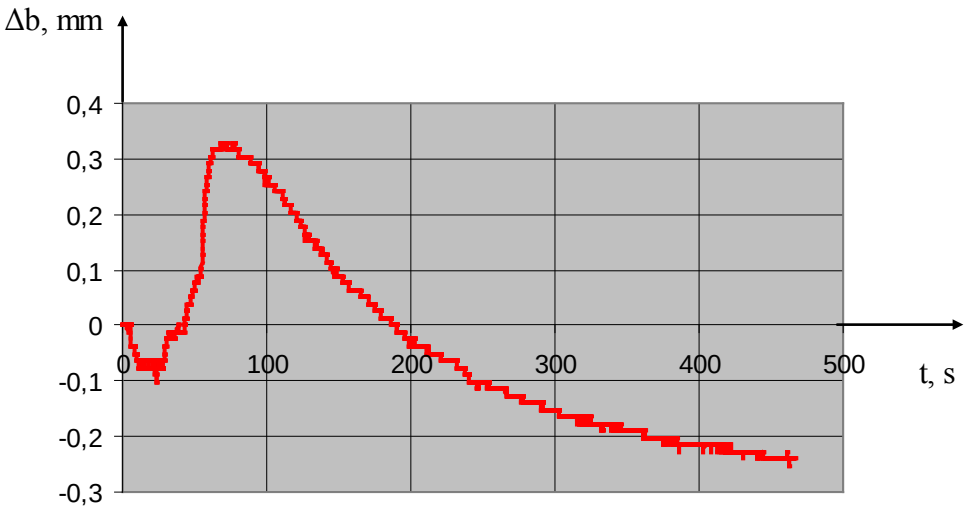


Fig.6.15. Contracţia tablei cu grosime s=2,5mm

Valorile extreme ale dilatațiilor – contracțiilor probelor încălzite cu flacără oxiacetilenică sunt centralizate în tabelul 6.6.

Tabel 6.6. Valorile extreme ale dilatațiilor – contracțiilor probelor încălzite cu flacără

Nr. epruvetă	s, mm	t, s	Δb, mm
20a	2,5	23	-0,1012
		76	0,3291
		460	-0,24
21	2,5	10	0,0506
		32	-0,759
		63	0,1392
		355	-0,199
22	2,5	29	0,0126
		33	-0,025
		74	0,0379
		350	-0,045
23	1,5	28	-0,0127
		82	0,0506
		200	-0,0126
		322	-0,0506
24	1,5	24	-0,0759
		65	0,2405
		400	-0,3374
25	1,5	37	0,0126
		51	-0,063
		88	0,0506
		345	-0,0759
26	2	16	-0,0126
		76	0,3164
		385	-0,1519

Tabel.6.7. Ondularea tablelor încălzite cu flacără oxiacetilenică, în mm, tablă liberă

Nr. Epru-vetă	f, mm															
	Punct măsurare															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20a	2,7	1,16	0,42	0,35	2,6	2,4	2,1	1,88	0,31	1,9	2,39	2,97	0	0,48	1,46	3
21	1,3	1,26	1,02	0,66	1,11	0,68	0,36	0,05	1,3	0,78	0,26	-0,05	1,61	0,99	0,39	0
22 un punct	-0,1	0,11	0,2	0,1	0,33	0,87	0,94	0,51	0,27	0,89	0,96	0,67	0	0,34	0,47	0,4
23 un punct	-0,25	-0,36	-0,35	-0,2	0,45	0,57	0,39	0,27	0,45	0,43	0,33	0,4	0	-0,4	-0,3	0
24	2,47	1,28	0,68	0,92	2,35	2,7	2,39	2,29	1,59	2,36	2,98	3,28	0	0,64	1,86	3,36
25	-0,2	0,67	0,6	0	-0,6	-0,24	-0,16	-0,5	-0,68	-0,32	-0,21	-0,52	0	0,58	0,62	0

Deformația/ondularea tablelor după sudare este prezentată în tabelul 6.7. respectiv în figurile 6.16. şi 6.17 respectiv figurile 2.11.-2.15. din anexa 2.

Prezentarea s-a făcut utilizând programul MATLABR2007b. Suprafața tablelor s-a creat utilizând cele 16 valori măsurate şi făcând o interpolare pentru restul valorilor. Deformația mai mică este observată în zonele cu nuanță albastru închis, iar cea mai mare la nuanță roşu aprins.

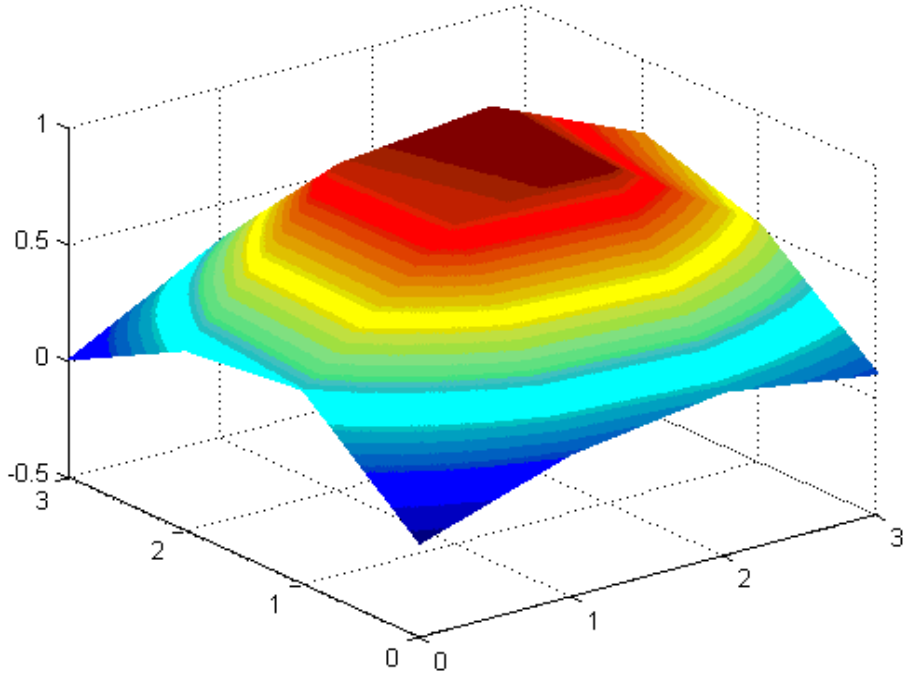


Fig.6.16. Ondularea epruvetei cu grosime s=2,5mm

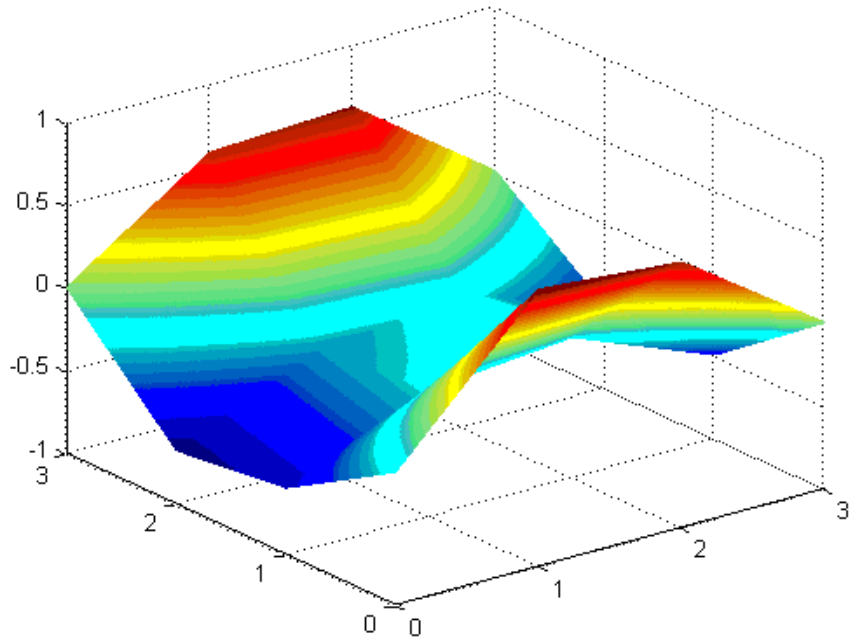


Fig.6.17. Ondularea epruvetei cu grosime s=1,5mm

Analizând diagramele se pot trage următoarele concluzii:

- contracţia apărută la 5 puncte încălzite este direct proporţională cu contracţia apărută la încălzirea unui punct, contracţia apărută în urma încălzirii a 5 puncte este de 5 ori mai mare ca cea apărută la încălzirea unui punct;
- contracţia este mai mare în cazul în care aceaşi grosime de tablă, cu acelaşi număr de puncte este încălzită la o temperatură mai mare;
- în urma experimentărilor se poate afirma că o încălzire locală punctiformă la cca. 700°C produce o contracţie de 0,05 mm.

Din figura 2.2., anexa 2, se observă că tabla cea mai puţin deformată este cu grosime de 1,5 mm (epruveta 25), încălzită într-un punct, iar proba cea mai deformată este cu grosime de 1,5 mm (epruveta 24), încălzită în 5 puncte.

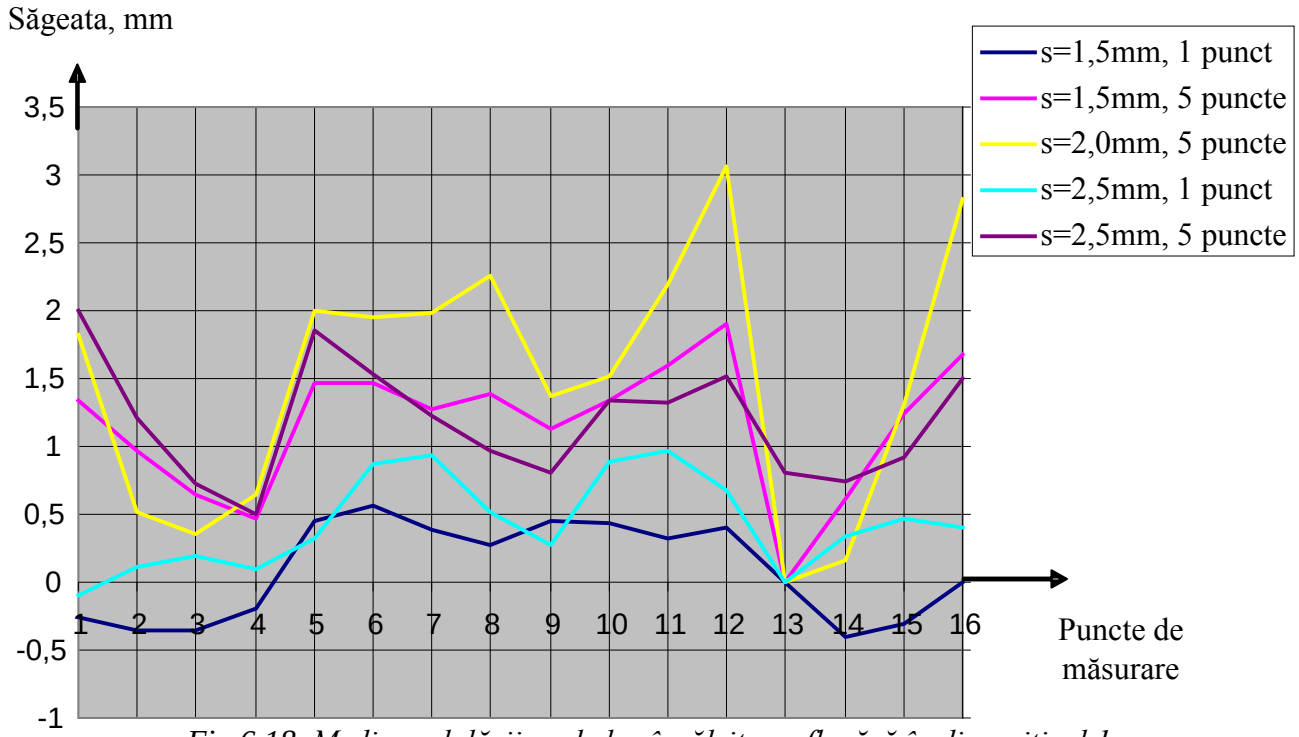


Fig.6.18. Media ondulării probelor încălzite cu flacără în dispozitivul 1

Figura 6.18. arată că indiferent de grosimea tablelor, deformaţia mai mare apare în cazul tablelor încălzite în 5 puncte, deci la introducere de cantitate mai mare de căldură în componente.

Deformaţia maximă este produsă la tabla cu grosime de 2 mm, iar tabla cu grosime de 1,5 mm este deformată în aceaşi măsură ca cea cu grosime de 2,5 mm (fig.6.18.).

În cazul aceluiaşi regim de încălzire cu flacără oxiacetilenică: 1 punct sau 5 puncte încălzite, aceaşi temperatură de încălzire, acelaşi timp de menţinere a flăcării, tabla cu deformaţiile mai mari va fi cea cu grosime mai mică (fig.6.18.)

În anexa 3 se prezintă un exemplu de calcul pentru eliminarea unei ondulări aplicând încălziri locale cu flacără oxiacetilenică utilizând metoda cu electromagnet.

Urmând acest exemplu de calcul se poate determina numărul de puncte necesare pentru îndreptarea unei suprafețe cu orice dimensiune. Pe baza acestor măsurători se pot determina volumul de energie şi manoperă necesară îndreptării tablelor învelitoare a carcaselor vagoanelor călători.

6.4.Determinarea experimentală a forțelor respectiv ondulării tablelor apărute în epruvete rigidizate la aplicarea unor rânduri de sudură

6.4.1.Instalația de măsurare

Plăcile pe care se fac încercările au practicate câte o gaură în fiecare colț şi sunt fixate, prin intermediul acestor găuri, pe un dispozitiv compus dintr-o placă de bază rigidă şi patru bolțuri pentru poziționare şi fixare (fig.6.19. şi 6.20.). Partea superioară a bolțurilor este prevăzută cu o zonă tronconică pentru a compensa eventualele abateri apărute după operația de găurire.

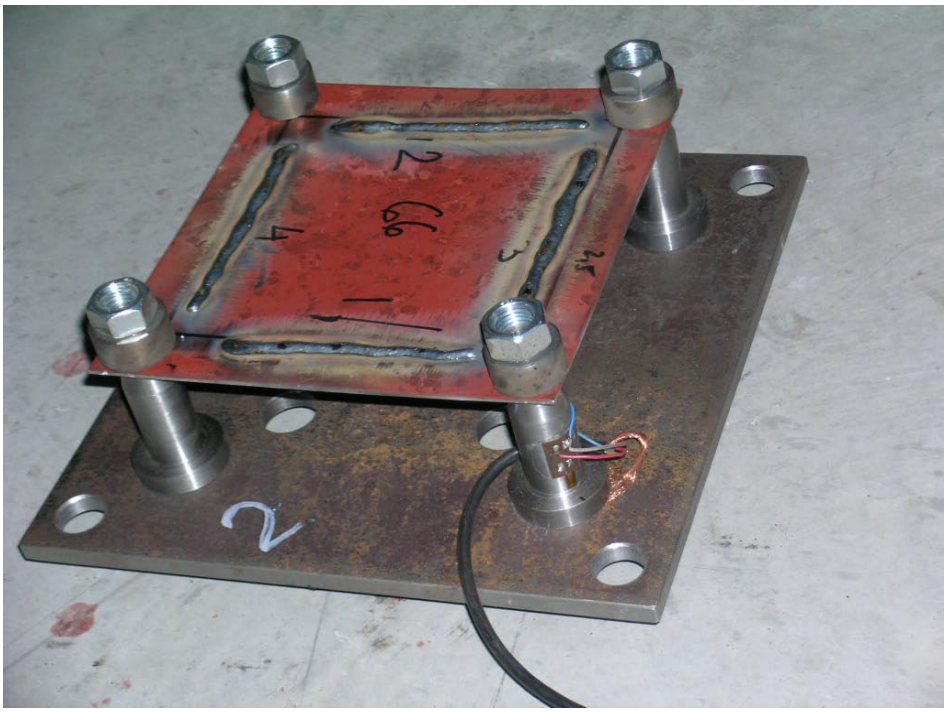


Fig. 6.19. Dispozitivul 2 pentru măsurarea forței apărută în tablă

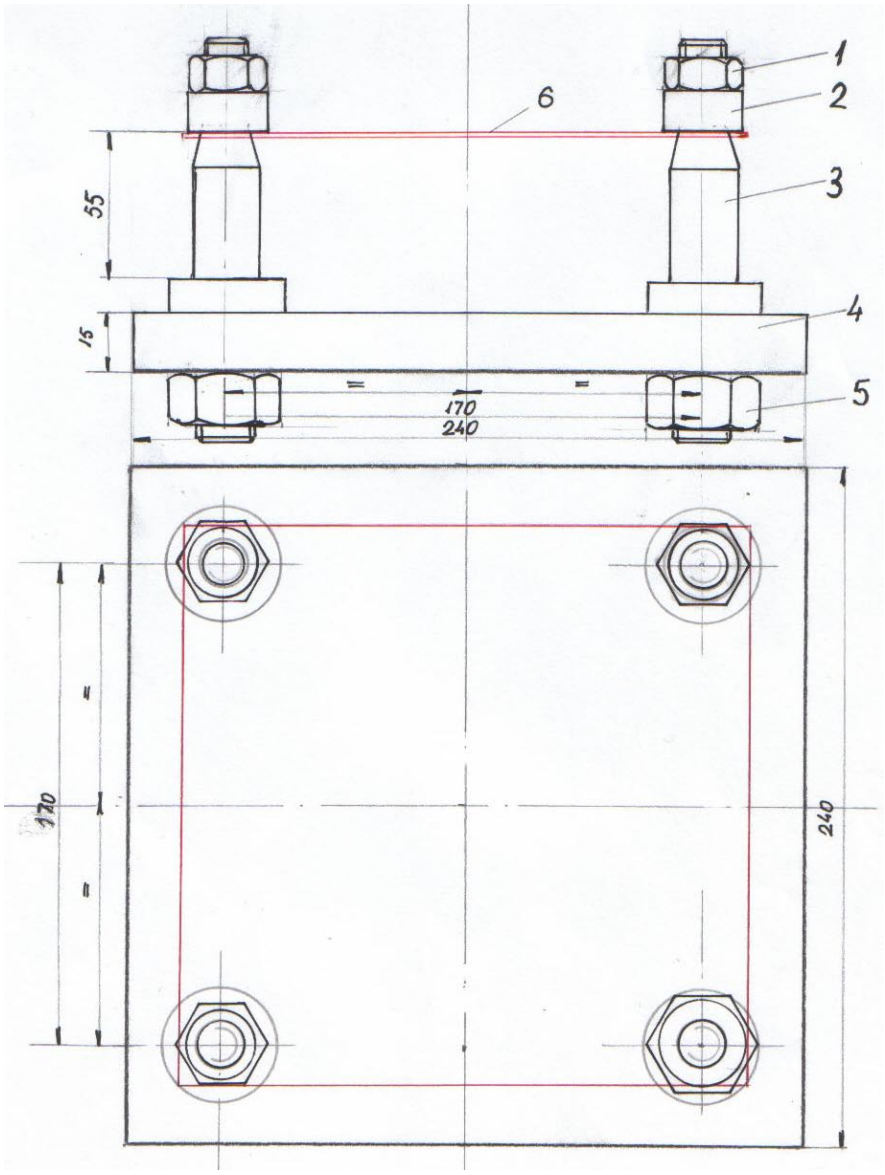


Fig.6.20. Dispozitiv de măsurare a forței
1.piuliță; 2. şaibă specială; 3. bolț de poziționare şi fixare; 4. placă de bază rigidă; 5. piuliță; 6. placa de încercat

Unul dintre bolțuri s-a amenajat tensometric în scopul măsurării forțelor apărute în urma încălzirii-răcirii tablei.

Bolțul-traductor (fig.6.21.) permite încastrarea unui capăt al bolțului pe placa de bază si fixarea eşantionului de încercat la celălalt capăt.

Bolțul este amenajat tensometric cu patru traductori tensometrici rezistivi, legați în punte Wheatstone.

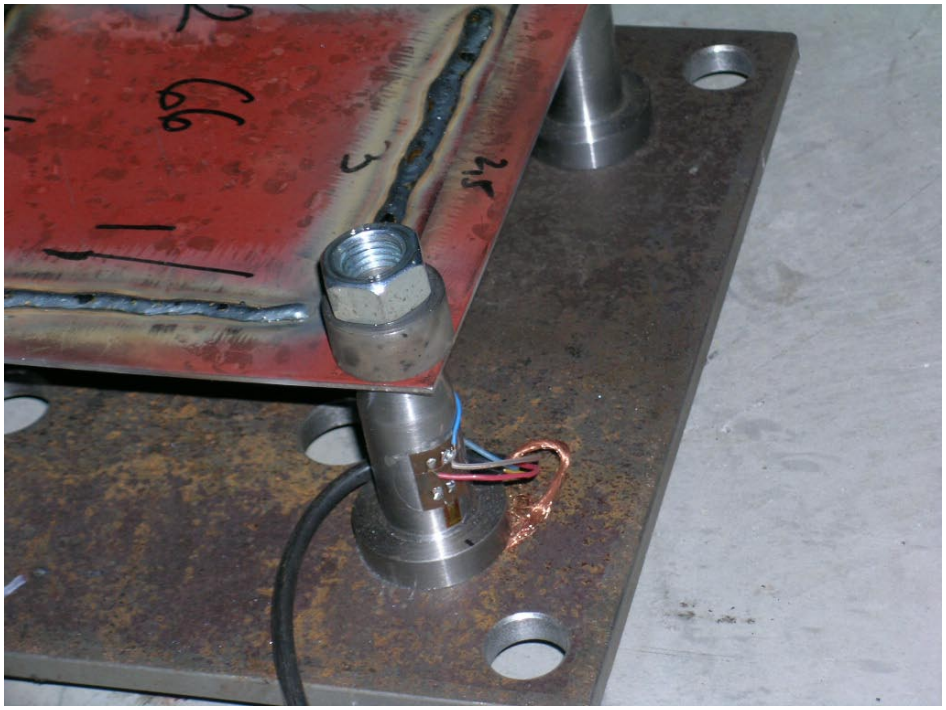


Fig. 6.21. Bolţul - traductor

Timbrele tensometrice preiau deformarea la încovoiere a elementului elastic la aplicarea unei forţe transversale pe bolţ.

Prin modul de amplasare a timbrelor tensometrice pe bolţ şi în punte şi prin modul de poziţionare a bolţului-traductor pe placă, acesta dă semnale electrice proporţionale cu forţa de pe direcţia diagonală a plăcii de încercat.

Etalonarea în unităţi de forţă a semnalului electric obţinut de la bolţul-traductor s-a realizat cu ajutorul unei celule de sarcină etalon (fig.6.22.), fabricată de Hottinger Baldwin Messtechnik-Germania.

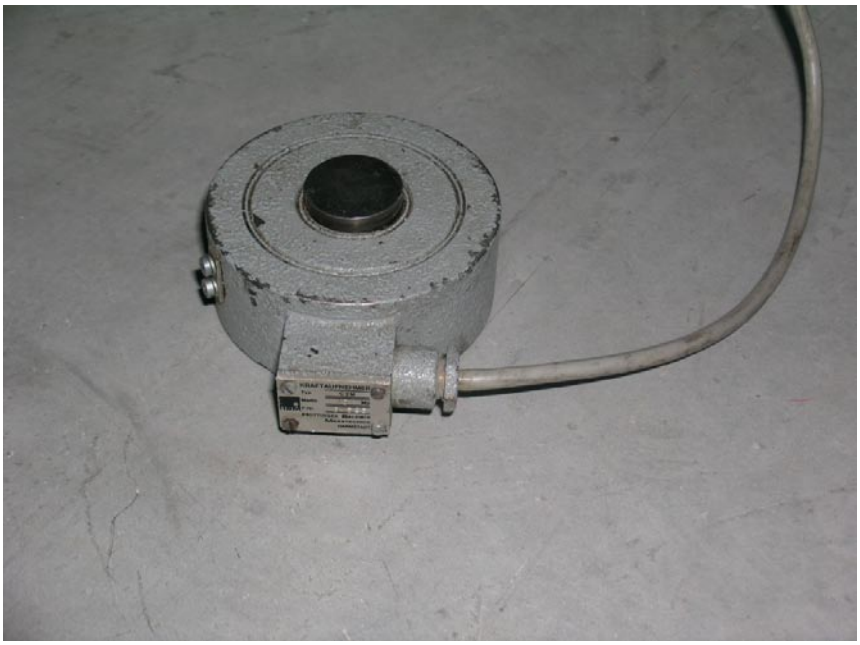


Fig.6.22. Celulă de sarcină etalon

Pentru etalonarea şi măsurarea forțelor şi deformațiilor s-a utilizat sistemul de achiziție Spider 8, fabricat de Hottinger Baldwin Messtechnik-Germania şi un calculator portabil fabricat de Hewlett-Packard, prezentat la paragraful 6.2.1.

6.4.2. Măsurători şi rezultate

Placa epruvetă a fost introdusă în dispozitiv şi rigidizată cu cele 4 piulițe. Au fost executate 4 rânduri de sudură prin procedeul de sudare MAG semimecanizat (conform fig.6.23.).

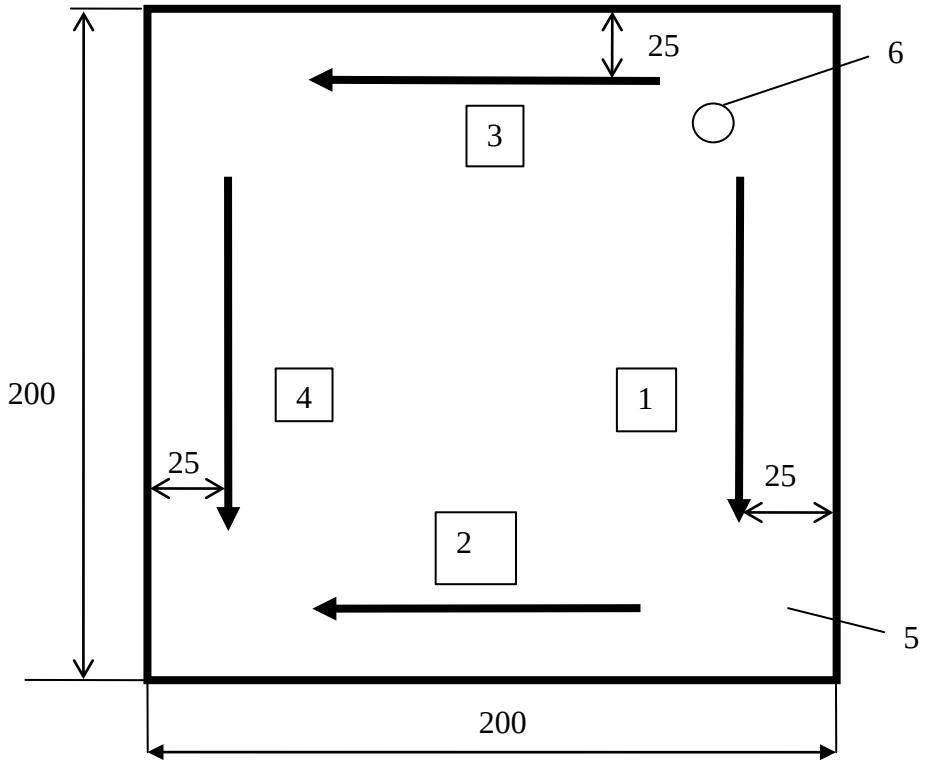


Fig.6.23. Ordinea de sudare în dispozitivul 2
1,2,3,4 – ordinea de sudare; 5 – placă; 6 – loc timbru tensometric

Regimurile de sudare utilizate sunt centralizate în tabelul 6.8.

Tabel.6.8. Regimurile de sudare utilizate, tablă rigidizată, dispozitiv 2

Nr. probă	s, mm	I_s, A	U_a, V	v_{ae}, m/min	L_s, mm	t_s, s	v_s, cm/s	E_l, J/cm	D_g, l/min
40	2,5	120	18,2	2,2	420	54	0,77778	2386,8	14
61	1,5	116	19,3	4	445	42	1,059524	1796,07	14
62	2	120	19,3	4	471	67	0,702985	2800,34	14
63	2,5	120	19,3	4	452	67	0,674627	2918,06	14
64	2	120	19,3	4	448	64	0,7	2812,29	14
65	1,5	120	19,3	4	439	37	1,186486	1659,18	14
66	2,5	118	19,4	4	460	75	0,61333	3172,53	14
64a	2	119	19,3	4	456	60	0,76	2568,68	14

Variaţia forţelor în timpul efectuării rândurilor de sudură este redată în diagramele ridicate cu instalaţia concepută şi executată pentru experimentare (fig.6.24. respectiv 2.61.-2.63. din anexa 2).

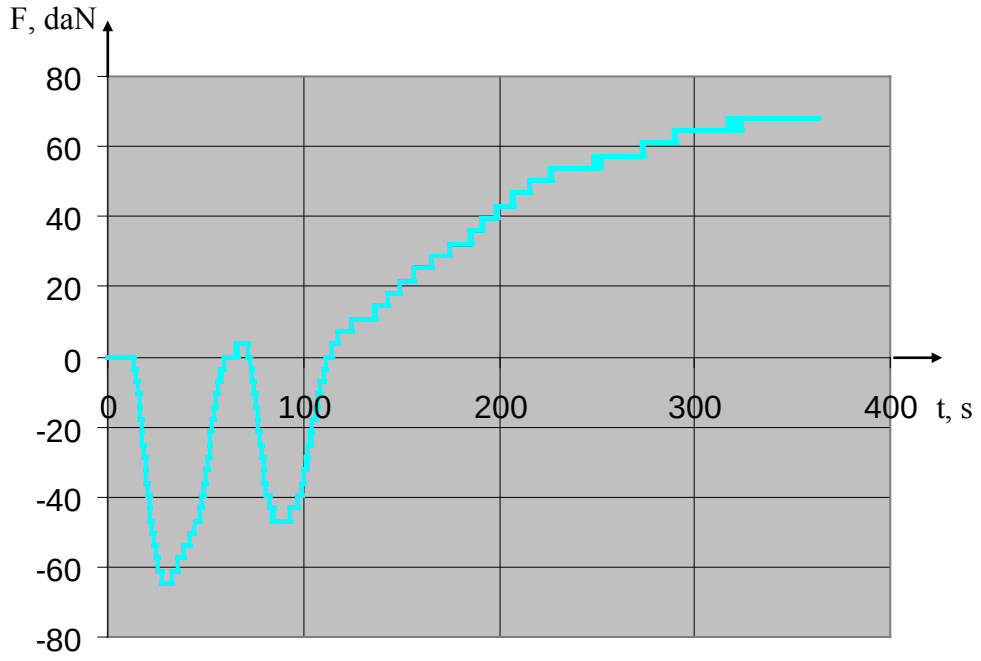


Fig.6.24. Forţa apărută în epruveta cu grosime s=1,5mm

Valorile minime şi maxime ale forţelor apărute în urma sudării tablelor sunt prezentate centralizat în tabelul 6.9.

Tabel 6.9. Valorile maxime şi minime ale forţelor din tablele sudate

Nr. probă	s, mm	F, daN		t, s	
		min	max	min	max
61	1,5	-64,6875	68,2812	27,34	320,9
64a	2	-82,6562	111,406	57,8	640,4
65	1,5	-79,0625	100,625	18,5	502,7
66	2,5	-111,406	86,25	74,8	693,1

unde:

- s – grosimea tablelor, mm;
- F- forţa, daN;
- t- timpul de înregistrare a forţelor, s.

Valorile negative (–) reprezintă forţe de compresiune, iar cele pozitive (+) sunt forţe de întindere.

Alura curbelor de variaţie a forţei în placă este foarte asemănătoare, deci fenomenele sunt identice, diferenţele se datorează grosimii tablelor respectiv diferenţei regimurilor de sudare.

Scopul măsurării acestor forţe este de a determina tensiunile remanente plane în aceste plăci. Tensiunile se pot determina prin calcul sau prin măsurare

utilizând un dispozitiv asemănător la care pe unul din bolţuri se montează un dispozitiv de întindere cu ajutorul căruia se realizează forţa determinată iar cu ajutorul unui timbru tensometric aplicat la mijlocul plăcii se pot determina tensiunile interne în plan.

Probele au fost supuse măsurării ondulării lor, ondulare cauzată de rândurile de sudură depuse pe probele rigidizate. Rezultatele măsurătorilor sunt centralizate în tabelul 6.10.

Tabel 6.10. Ondularea tablelor sudate MAG semimecanizat, în mm, tablă rigidizată

nr. probă	f, mm															
	Puncte de măsurare															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
40	0,54	0,39	0,5	1,05	0,36	0	0,11	0,94	0,57	0,3	0,44	1,2	1,29	1,23	1,33	1,75
61	0	1,43	1,99	1,13	1,52	2,98	3,13	1,97	1,03	2,53	2,76	1,7	-0,3	0,91	1,1	0,59
62	0	0,28	0,68	0,62	0,77	1,25	1,58	1,46	0,95	1,4	1,8	1,73	0,35	0,97	1,37	1,27
64	0,1	1,25	1,52	0,82	0,96	2,5	3	1,96	0,8	2,35	2,64	1,7	0	0,82	1,02	0,79
64a	1,76	1,12	1,36	1,55	0,74	0	0,32	0,64	0,52	-0,21	0,04	0,4	0,94	0,12	0,31	0,7
65	2,54	1,68	2,15	4,23	1,22	0	0,56	2,69	1,05	-0,1	0,38	2,41	2,51	1,02	1,63	3,3
66	0	0,76	1,12	0,74	0,53	1,37	1,59	1,18	0,33	1,26	1,45	1,08	-0,3	0,62	0,78	0,05

Deformaţia/ondularea tablelor după sudare este prezentată în figurile 2.16. – 2.21, anexa 2. Prezentarea s-a făcut utilizând programul MATLABR2007b. Suprafaţa deformată a tablelor s-a creat utilizând cele 16 valori măsurate şi făcând o interpolare pentru restul valorilor. Deformaţia mai mică este observată în zonele cu nuanţă albastru închis, iar cea mai mare la nuanţă roşu aprins.

Valoarea deformaţiei/ondulării probelor este prezentată în figura 2.3., anexa 2. În figura 6.25. se prezintă media deformaţiilor obţinute la sudarea rigidizată a celor 3 grosimi de tablă.

Se observă că deformaţia/ondularea cea mai mare apare la sudarea tablei celei mai subţiri. Cu creşterea grosimii tablei scade deformaţia apărută în urma sudării. Cu creşterea grosimii tablelor această deformaţie scade în mai mică măsură, mai puţin vizibil.

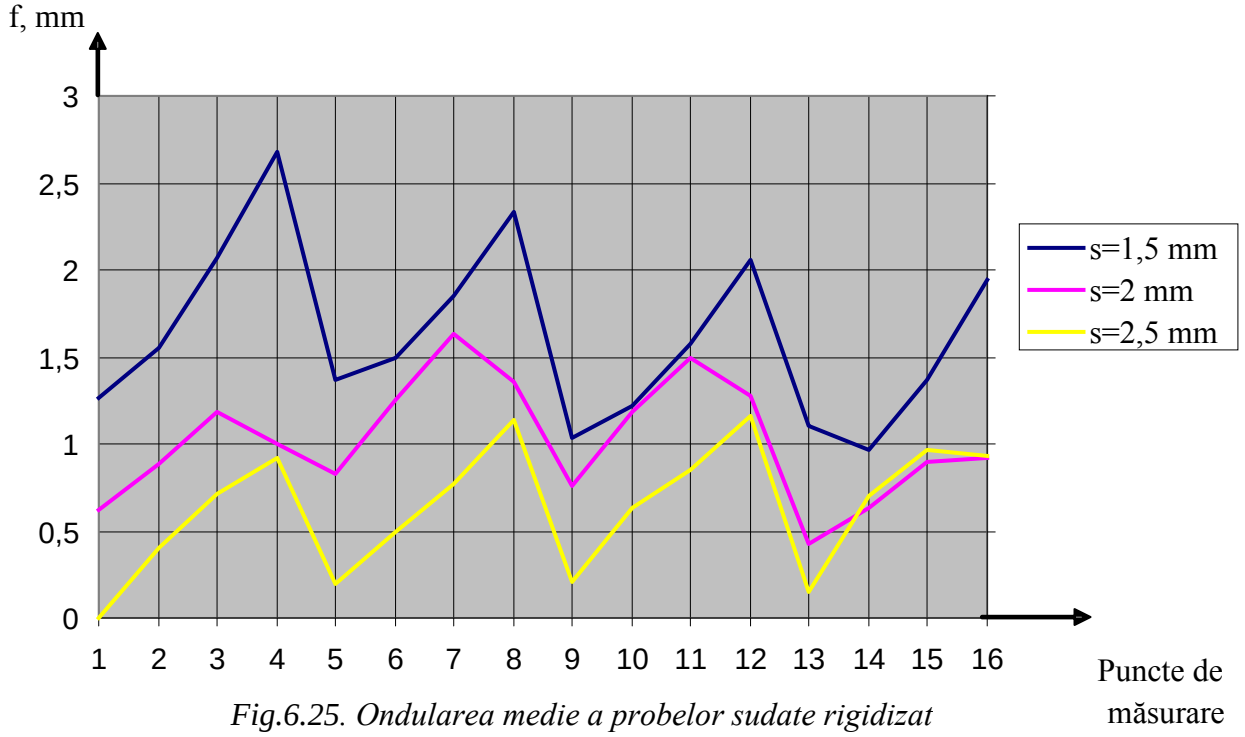


Fig.6.25. Ondularea medie a probelor sudate rigidizat

Pentru a compara deformațiile tablelor de aceaşi grosime dar sudate liber şi rigidizat, se prezintă diagramele din figurile 6.26. – 6.28.

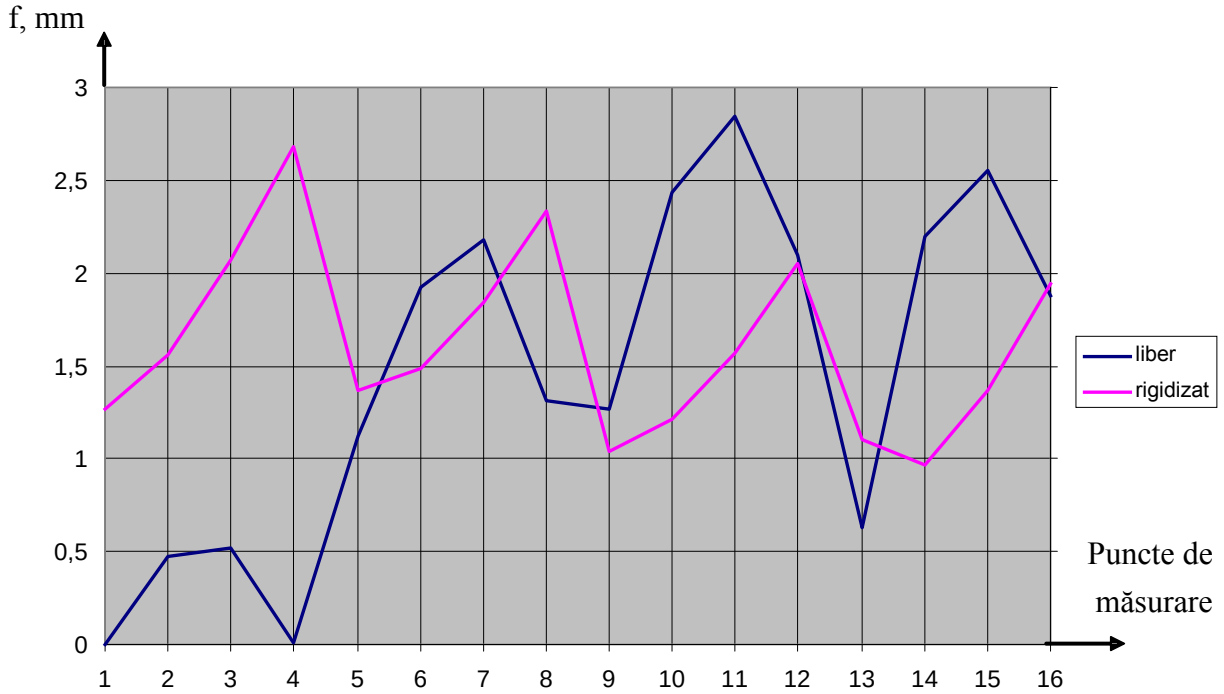


Fig.6.26. Ondularea tablelor sudate liber şi rigidizat cu grosime de 1,5 mm

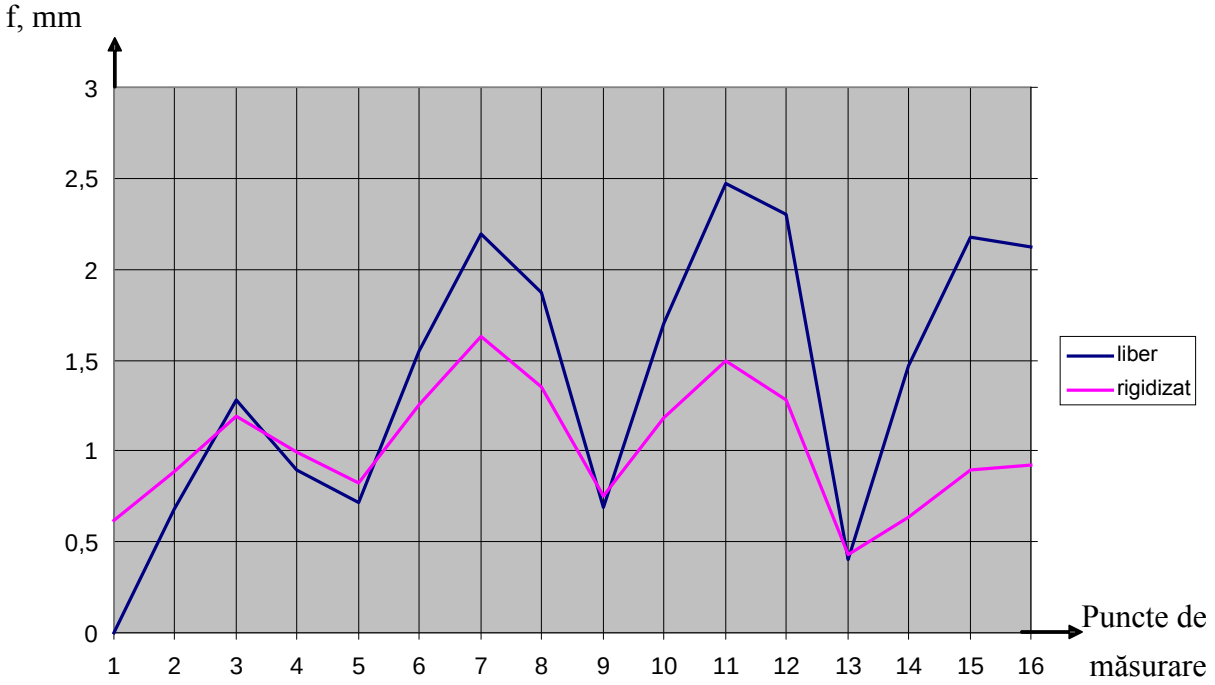


Fig.6.27. Ondularea tablelor sudate liber şi rigidizat cu grosime de 2 mm

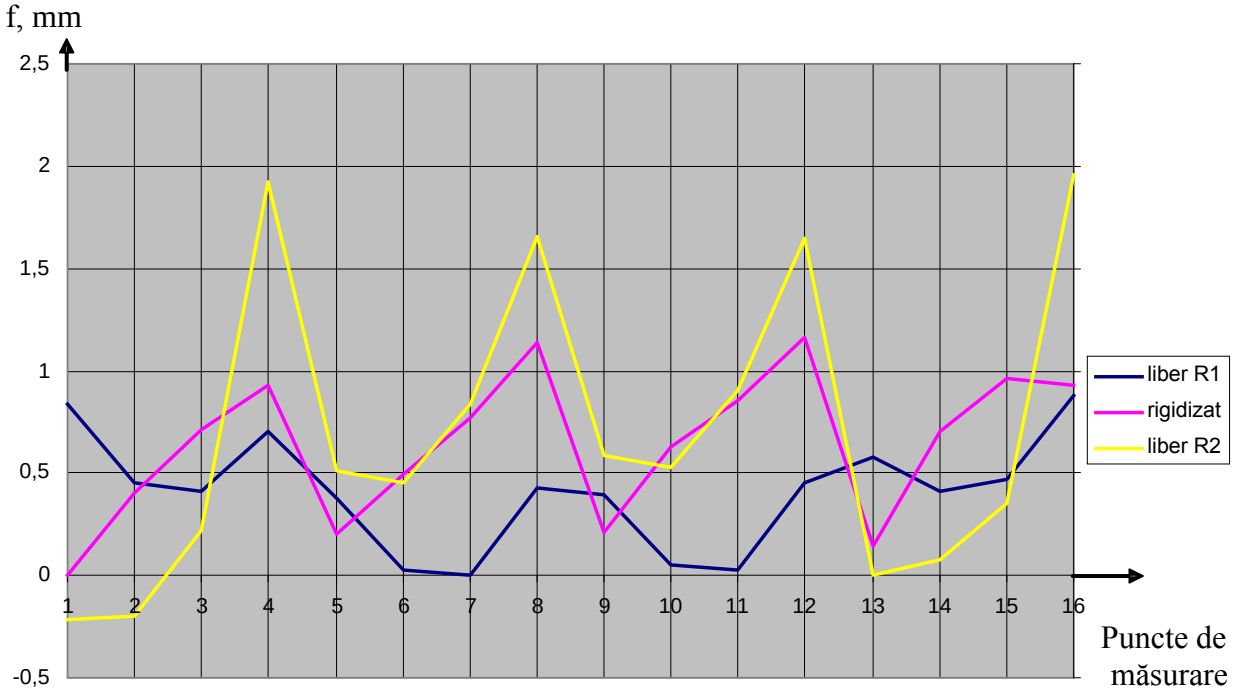


Fig.6.28. Ondularea tablelor sudate liber şi rigidizat cu grosime de 2,5 mm

În cazul grosimii tablelor de 1,5 mm respectiv 2 mm tabla cu deformaţii maxime este cea sudată în poziţie liberă. În cazul grosimii de 2,5 mm deformaţia depinde şi de regimul de sudare utilizat. Tabla cu deformaţia mai mare este cea sudată liber cu viteză de sudare mare, energie liniară mică, iar cea mai puţin

deformată este epruveta sudată cu viteză de sudare mică, energie liniară mare. În cazul sudării tablelor în poziţie rigidizată variaţia ondulaţiei este mai mică ca şi în cazul tablelor sudate liber. De exemplu la table de grosime 1,5 mm diferenţa de săgeată este de aprox. 1 mm la table sudate rigidizat şi este de aprox. 2,8 mm la cele sudate liber.

În urma experimentelor efectuate referitor la determinarea experimentală a dilataţiei şi contracţiei respectiv a forţelor şi ondulării tablelor apărute la aplicarea unor rânduri de sudură, rezultă următoarele concluzii :

- contracţiile măsurate sunt mai mari ca cele calculate analitic;
- în toate cazurile se poate stabili o lege generală: la amorsarea arcului se produce o contracţie mică urmată de o dilataţie foarte mică iar pe măsura răcirii tablei se produce contracţia finală;
- contracţiile şi deformaţiile sunt direct proporţionale cu energia liniară introdusă;
- contracţiile şi deformaţiile sunt mai mici la piese rigidizate faţă de cele sudate liber;
- pe baza metodei de calcul şi experimentări se poate determina volumul de energie şi manoperă necesară îndreptării tablelor învelitoare a carcaselor vagoanelor călători;
- forţele determinate pot sta la baza determinării precise pe cale experimentală a tensiunilor plane;
- din experimentări şi calcule rezultă tensiuni interne de valoare redusă care nu reduc capacitatea portantă a structurii.

6.5. Determinarea experimentală a forţelor respectiv ondularea tablelor rigidizate ocazionate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără

Pentru determinarea experimentală a forţelor respectiv ondularea tablelor rigidizate ocazionate de aplicarea unor încălziri locale cu flacără s-a urmărit înregistrarea forţelor în timpul şi după încălzirea epruvetelor respectiv s-au măsurat ondulările cauzate de încălzirile locale.

6.5.1. Instalaţia de măsurare

Instalaţiile de experimentare şi măsurare sunt cele prezentate la determinarea experimentală a forţelor respectiv ondulării tablelor apărute în epruvete rigidizate la aplicarea unor rânduri de sudură.

6.5.2. Măsurători şi rezultate

Placa epruvetă a fost introdusă în dispozitiv şi rigidizată cu cele 4 piulițe. S-au executat încălziri locale cu flacără.

Dimensiunile epruvetelor, utilizate la determinarea forțelor produse de rândurile de sudură respectiv încălziri locale, au fost 200x200 mm în care au fost aplicate 4 găuri cu Φ16 mm echidistante la 170 mm (fig.6.29.). După una din diagonale s-a măsurat forța "F" .

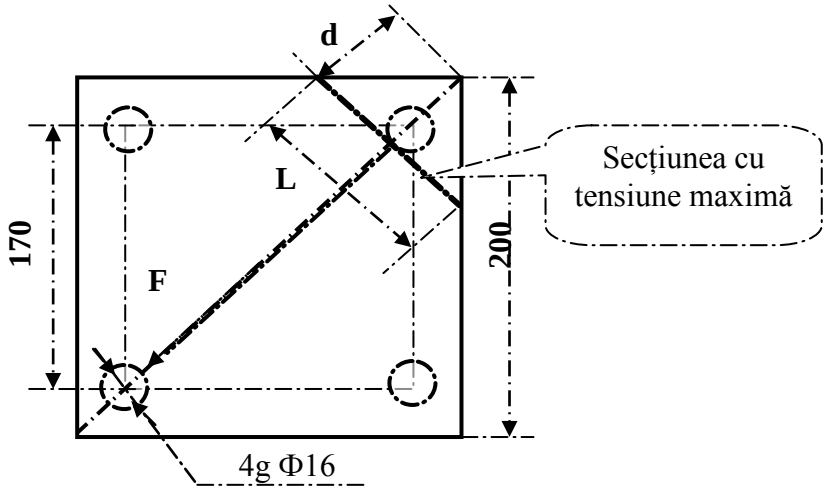


Fig.6.29. Măsurarea forței apărute în urma încălzirii probelor

Din diagrama ciclurilor termice înregistrate (fig.2.51.-2.60., anexa 2) a rezultat că temperatura a variat între 300-700°C.

Variația forțelor în probe este prezentată în diagramele din figura 6.30. respectiv figurile 2.64. - 2.72., anexa 2.

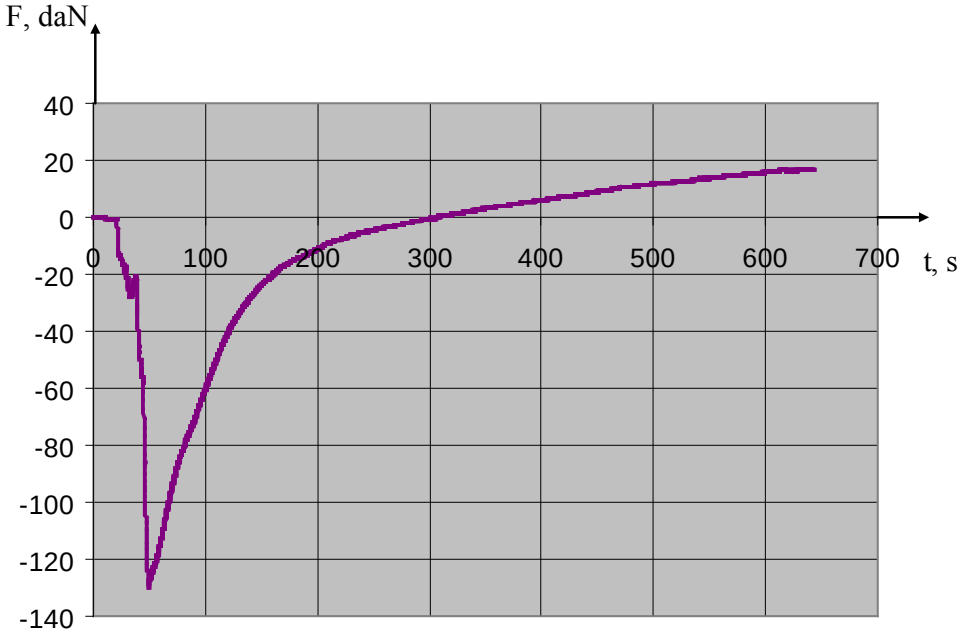


Fig.6.30. Variația forței apărută în epruveta cu grosime s=1,5mm

Forța acționează în diagonală, secțiunea minimă fiind notată cu "A".

Tensiunea de tracțiune se calculează cu relația:

$$\sigma_i = \frac{F}{A} = \frac{F}{L.s} = \frac{F}{2d.s} \quad \text{MPa} \qquad (6.6.)$$

unde:

- σ_i - tensiunea de tracțiune în diagonală, MPa;
- F - forța măsurată în diagonală, daN;
- A - secțiunea în care acționează forța, mm^2;
- s - grosimea eşantionului, mm;
- i - număr probă

Tabel 6.11. Valoare forțelor şi tensiunilor care acționează în epruvete

Număr probă	F, daN	A, mm^2	σ, MPa
61	68,2	87,6	0,78
64a	111,4	116,8	0,95
65	100,6	87,6	1,15
66	86,25	146	0,59
30	34	146	0,23
31	34,5	146	0,24
32	39,5	146	0,27
33	31	146	0,21
34	33,12	116,8	0,28
35	64,17	116,8	0,55
36	53,82	116,8	0,46
37	47,61	87,6	0,54
38	63,14	87,6	0,72
39	16,9	87,6	0,19

Din analiza forțelor rezultate (tab.6.11.) în epruvetele rigidizate sudate sau încălzite cu încălziri locale se trage concluzia că forțele de tracțiune sunt de 2- 3 ori mai mari în cazul probelor sudate decât în cazul eşantioanelor încălzite cu încălziri locale, explicația fiind dată de cantitatea mai mare de energie introdusă în table în cazul sudării. În cazul forțelor de compresiune balanța se înclină spre cele încălzite cu încălziri locale. Aceste forțe sau tensiuni (tab.6.11.) nu sunt mari, deci nu reduc mult capacitatea portantă a structurilor.

Probele au fost supuse la măsurarea ondulării lor cauzate de încălzirile locale cu flacără pe probe rigidizate. Rezultatele măsurătorilor sunt centralizate în tabelul 6.12.

Tabel 6.12. Ondularea tablelor încălzite cu flacără oxiacetilenică, în mm, tablă rigidizată

Nr.probă / pcte măs.	f, (mm)															
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**
30	0,1	0,13	-0,2	-0,66	-0,5	-0,8	-1,09	-0,93	-0,55	-0,79	-1,02	-0,9	0	0,29	0	-0,5
31	2,2	1,11	0,37	0	2,7	1,37	0,54	0,19	2,78	1,43	0,47	0,1	2,72	1,57	0,42	-0,1
32	1,1	1,4	1,03	0,27	0,33	1,26	1,26	0,31	0,06	1,07	1,13	0,53	0	0,81	1,15	0,9
33	0,09	-0,16	0,23	1,27	0,46	-0,05	0,24	1,4	0,34	0	0,45	1,7	0	-0,1	0,4	1,42
34	-0,2	-0,5	0,1	1,2	0,46	0,92	1,43	1,93	0,39	0,64	1,25	2	0	-0,88	-0,54	0,55
35	1,68	1,03	1,8	3,8	1,84	0,9	1,66	2,8	1,15	0,53	1,06	2,75	0,14	0	0,35	1,48
36	0	-0,2	0,3	1,88	1,82	2,51	2,78	3,26	2	2,42	2,51	2,99	0,4	-0,14	0	2,2
37	0	0,2	0,24	0,8	0,55	1,11	1,16	1,38	0,68	0,94	0,93	1,21	0,48	-0,05	0	1,9
38	2,75	1,05	0,53	1,02	1,8	2,52	2,32	1,7	0,93	1,96	2,66	2,65	0	0,28	1,38	2,73
39	1,08	0,41	0,97	1,72	2,6	2,86	2,79	2,06	3,35	2,97	1,87	1,4	2,3	1,04	0	0,39

Deformaţia/ondularea tablelor după sudare este prezentată în figurile 2.22. – 2.31. respectiv în figura 2.4., anexa 2. Se observă că proba încălzită doar într-un punct, proba notată 30, se deformează cel mai puţin după încălzire cu flacără.

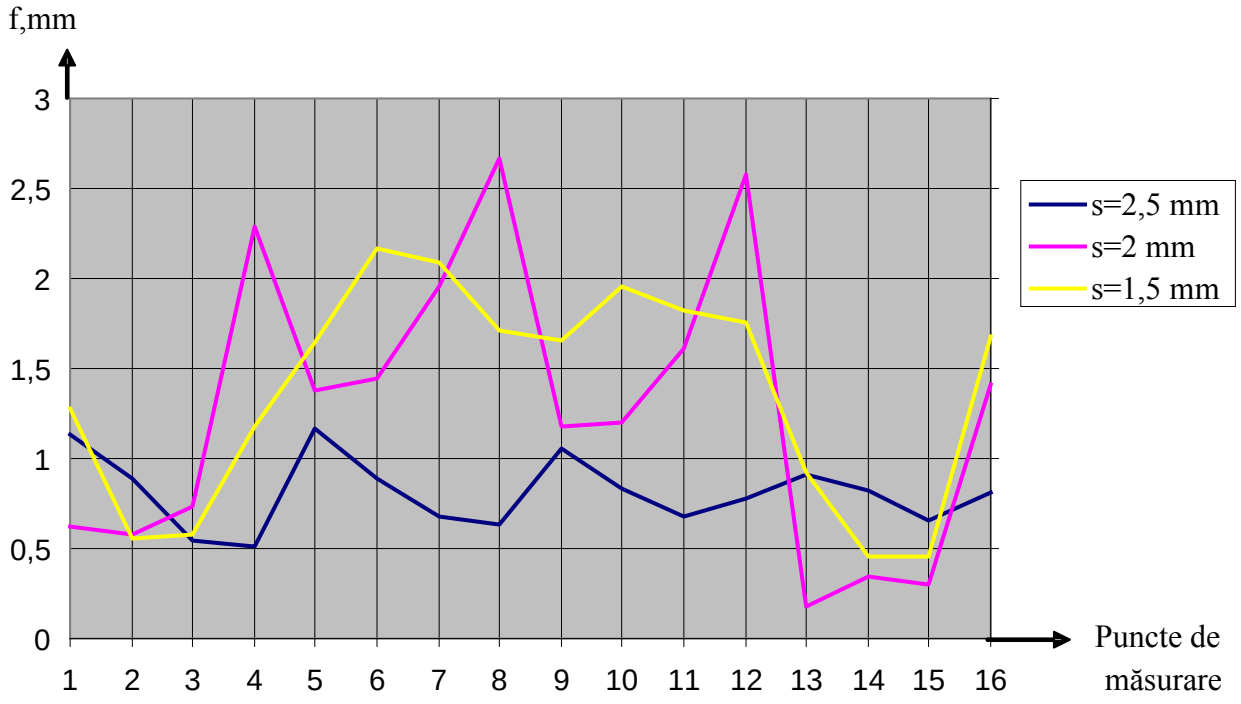


Fig.6.31. Media deformării/ondulării probelor încălzite cu flacără

Din figura 6.31. se observă, că deformaţia minimă rezultă în cazul încălzirii probei cu grosimea de 2,5 mm, iar cea maximă la proba cu grosimea de 1,5mm.

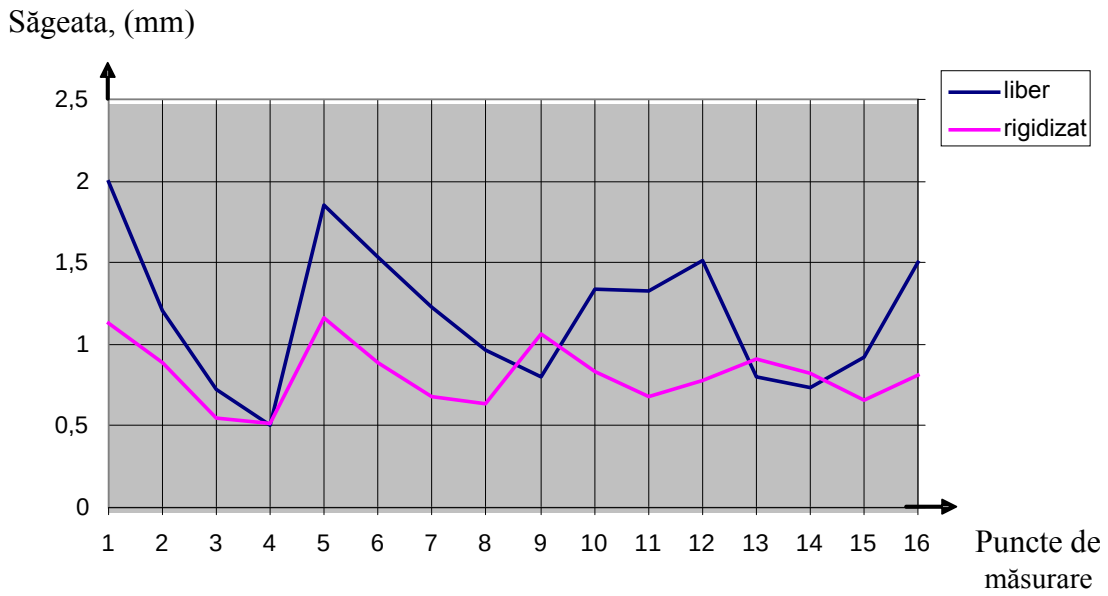


Fig.6.32. Deformarea/ondularea probelor încălzite liber şi rigidizat cu grosime de2,5mm

Pentru a compara deformaţiile apărute în urma încălzirii tablelor subţiri liber respectiv rigidizat, s-au construit diagramele din figurile 6.32.-6.34.

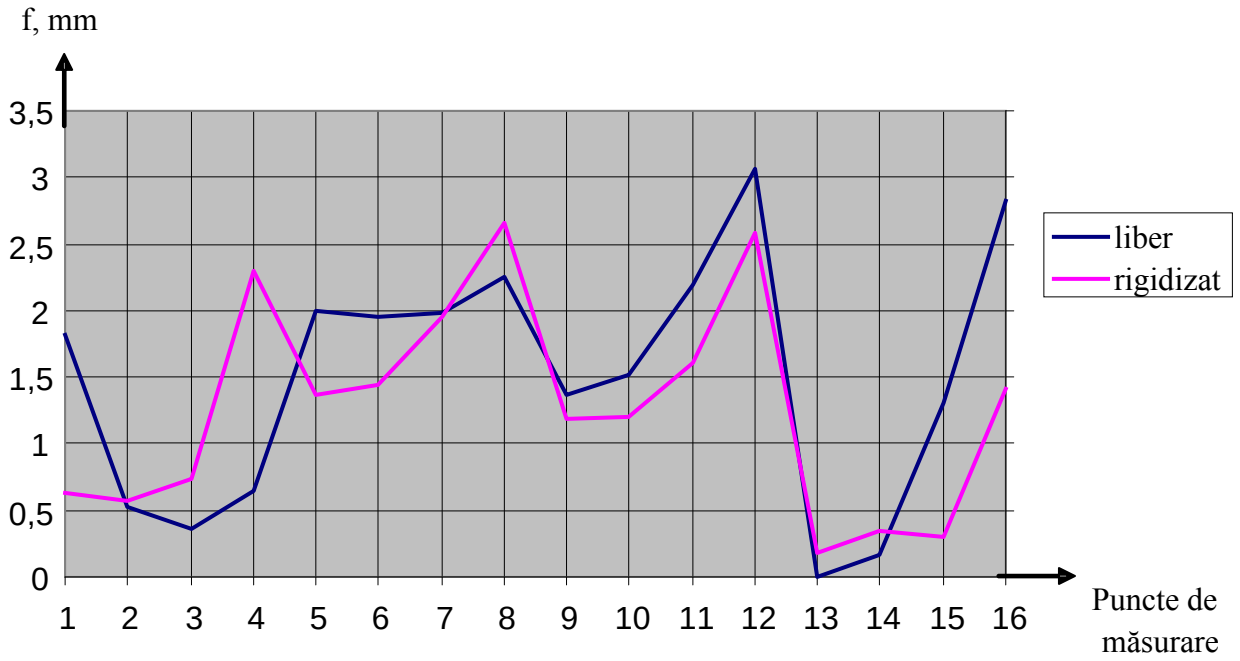


Fig.6.33. Deformarea/ondularea tablelor încălzite liber şi rigidizat cu grosime de 2 mm

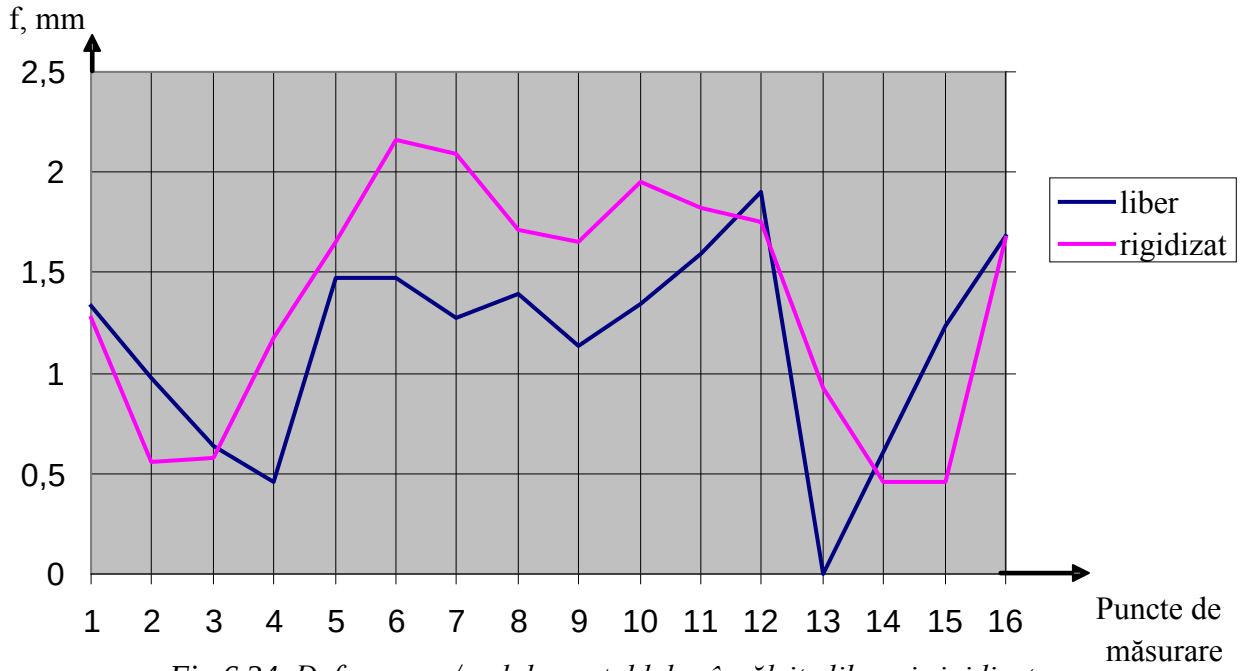


Fig.6.34. Deformarea/ondularea tablelor încălzite liber şi rigidizat cu grosime de 1,5mm

Din figurile 6.32. – 6.34. reiese că deformațiile mai mari apar la tablele încălzite liber comparativ cu cele încălzite rigidizat.

7. OPTIMIZAREA ÎNDREPTĂRII TABLELOR SUBŢIRI

7.1. Optimizarea îndreptării peretelui lateral

O problemă importantă la realizarea cutiei vagoanelor călători este planeitatea tablei învelitoare atât la pereţii laterali, frontali cât şi la acoperiş.

Tablele acoperitoare, care sunt confecţionate din table subţiri, grosime de 2,5mm la peretele lateral, 3 mm la peretele frontal şi 1,5 mm la acoperiş sunt montate şi prinse cu sudură pe scheletele confecţionate din diferite profile laminate sau îndoite. Aceste profile laminate şi îndoite la rândul lor au pereţi subţiri, s=3-4mm respectiv sunt îndoite din table subţiri cu s=3 mm.

Itinerariul tehnologic de realizare a peretelui lateral este:

- pregătirea stâlpilor, cadrului superior, profilului cornier şi a profilelor Ω mic şi Ω mare (fig.7.1.);

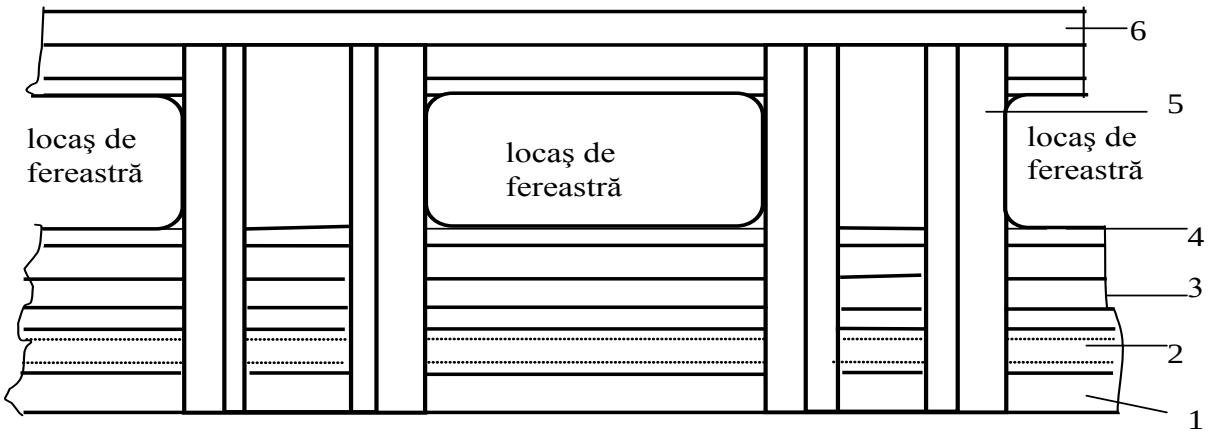


Fig.7.1. Segment de perete lateral al unui vagon de călători suburban
1.tabla învelitoare; 2. profil Ω mare; 3. profil Ω mic; 4.profil cornier;
5.stâlp profil Z; 6. cadru superior.

- montarea elementelor scheletului în dispozitivul de montat schelet-perete lateral, respectiv prinderea provizorie cu sudură;
- sudarea poziţiei 1 în dispozitiv;
- sudarea celorlalte poziţii;
- polizarea supraînălţării sudurilor care vor fi aşezate pe tabla învelitoare;
- pregătirea tablei învelitoare a peretelui lateral;
- aşezarea tablei învelitoare în dispozitivul de montat;
- fixarea pe o parte şi întinderea tablei în dispozitivul de montat perete lateral;
- aşezarea şi fixarea scheletului pe tabla învelitoare cu ajutorul unui călăreţi care este prevăzut cu pneumo-motoare liniare care elimină spaţiul dintre tablă şi schelet;
- sudarea scheletului pe tablă cu suduri în colţ întrerupte.

Asemănător se realizează peretele frontal şi acoperişul.

Datorită acestor suduri tablele învelitoare se deformează [106], apărând contracții unghiulare, transversale şi longitudinale care conduc la voalarea tablei învelitoare. Denivelarea ajunge în multe cazuri peste 15 mm. Denivelarea admisă este 0,5 mm/ metru liniar.

Îndreptarea acestor subansamble nu se execută. După montarea şi sudarea cutiei vagonului se trece la îndreptarea scheletului cutiei. Această operație se execută cu prese mecanice acționate cu şuruburi, cu ciocan de 5 daN respectiv cu încălziri locale.

După ce scheletul cutiei a fost îndreptat şi adus la dimensiunile prevăzute în desenele de execuție urmează îndreptarea tablelor învelitoare.

Optimizarea operațiilor de îndreptare se referă la un panou de 1.000 x 400 mmxmm din tabla învelitoare (fig.7.1.) pentru care se elaborează tehnologia de îndreptare cu toate procedeele posibile.

Pentru optimizarea îndreptării peretelui lateral se calculează costurile îndreptării pentru procedeele posibile de utilizat, iar în final se compară rezultatele obținute [54].

Costul îndreptării este dată de (7.1.):

$$C_{î}=C_{MA}+C_{MO}+C_{W}+C_{RE} \qquad (7.1.)$$

unde:

- $C_{î}$- costul îndreptării, lei;
- C_{MA} –costul materialului de adaos, lei;
- C_{MO} – costul manoperei, lei;
- C_{W} – costul energiei electrice, lei;
- C_{RE} – costul regiei, lei.

Costul îndreptării pentru fiecare procedeu de îndreptare se va nota cu indice de la *a-e* în ordinea tratării lor.

7.1.1. Îndreptarea cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă

Îndreptarea cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă constă în aplicarea unor încălziri locale cu flacără de gaze. Diametrul unui punct încălzit este d_c=25-30mm. Aceste încălziri se aplică în funcție de denivelări. Harta încălzirilor locale este prezentată în figura 7.2., se aplică circa 70 de puncte. Pentru încălzirea unui punct este nevoie de cca 10 secunde. Trecerea de la un punct la altul necesită încă 2 secunde. Concomitent cu încălzirea tablei învelitoare din interior, un alt muncitor răceşte din exterior punctele încălzite cu un jet de apă. După răcirea tablei învelitoare urmează îndreptarea propriu zisă a tablei cu doi operatori, unul fiind în interiorul vagonului celălalt lucrează pe o schelă din exteriorul vagonului. Tabla se îndreaptă cu ajutorul ciocanului de 5 daN. Ca verificator se utilizează un liniar de 1 sau 2m.

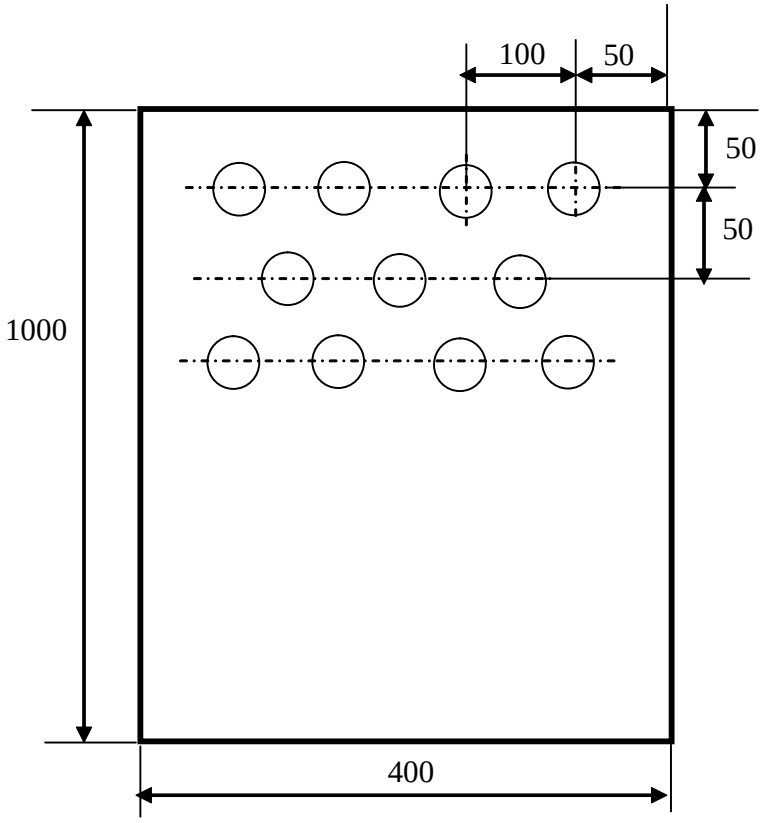


Fig.7.2. Harta aplicării încălzirilor locale

Costul îndreptării în cazul utilizării îndreptării cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă este:

$$C_{îa}=C_{MAa}+C_{MOa}+C_{Wa}+C_{REa} \quad (7.2.)$$

Costul materialelor de adaos: oxigenul, acetilena şi apa, este dată de (7.3.):

$$C_{MAa}=G_{O2}.P_{O2}+G_{C2H2}.P_{C2H2}+G_{H2O}.P_{H2O} = 5{,}236 \text{ lei/panou} \quad (7.3.)$$

unde:

- G_{O2}- consumul de oxigen, l;
- P_{O2}-preț oxigen, lei/l;
- G_{C2H2}-consumul de acetilenă, l;
- P_{C2H2}-preț acetilenă, lei/l;
- G_{H2O}- consumul de apă, l;
- P_{H2O}-preț apă, lei/l.

$$G_{O2}=Q_{O2}.t_{înc} \quad (7.4.)$$

$$G_{C2H2}=Q_{C2H2}.t_{înc} \quad (7.5.)$$

$$G_{H2O}=Q_{H2O}.t_{răc} \quad (7.6.)$$

unde:

- Q_{O2}-debitul de oxigen, l/min;
- Q_{C2H2}-debitul de acetilenă, l/min;
- Q_{H2O}-debitul de apă, l/min;
- $t_{înc}$-timp de încălzire, s;
- $t_{răc}$-timp de răcire, s.

În timpul încălzirii cu flacără se utilizează arzător numărul 3, valoarea debitului de gaz este prezentată în tabelul 7.1. Debitul apei de răcire s-a determinat experimental (tab.4.2., anexa 4).

$t_{înc}$=nr. puncte x t+ (nr. puncte-1) x $t_{trecere}$ (7.7.)

unde:

- t= timpul necesar încălzirii unui punct;
- $t_{trecere}$-timpul de trecere de la un punct la altul.

Tabel 7.1. Tabel centralizator privind consumul materialelor de adaos şi al timpilor de lucru

Q_{O2} l	Q_{C2H2} l	Q_{H2O} l/min	G_{O2} l	G_{C2H2} l	G_{H2O} l	$t_{înc}$ s	nr. pcte	t s	$t_{trecere}$ s	$t_{răc}$ s
5	5	14	70	70	210	840	70	10	2	900

Costul manoperei pentru un panou îndreptat se determină cu ajutorul (7.8.):

$C_{MOa}=T_1.P_{MO}$=3,008 lei /panou (7.8.)

unde:

- T_1 - timpul necesar pentru îndreptarea unui panou, h/panou;
- P_{MO} - preț manoperă, lei/h.

Timpul T_1 se poate calcula cu ajutorul factorului operator sau cu ajutorul normei de timp. Factorul operator dă un calcul aproximativ şi e teoretic. Norma de timp dă un calcul exact.

Calculul cu ajutorul factorului operator este prezentat în (7.9.):

$$T_1 = \frac{t_{inc}}{60.FO} + \frac{t_{răc}}{60} = 0{,}64h/\,panou \qquad (7.9.)$$

unde:

- FO=60%, factor operator, în %, care ține cont de operațiile suplimentare necesare efectuării îndreptării, ca schimbarea buteliilor, reglarea flăcării, controlul îndreptării etc.

Calculul costului energiei electrice se face cu ajutorul (7.10.):

$C_{Wa}=W_1.P_W$=0 lei/panou (7.10.)

unde:

- W_1-consum de energie pentru 1 panou îndreptat, kW;
- P_W-preț de cost energie electrică, lei/kW;

Costul regiei

Regia reprezintă partea de cheltuieli auxiliare pentru realizarea produsului, ca de exemplu:

- plata salariilor personalului TESA;
- cheltuieli de reparare, întreținere a instalațiilor;
- amortizare;
- cheltuieli curente ale secției: curent, lumină, apă, căldură, ventilație;
- cheltuieli cu echipamentul sudorului.

Regia diferă de la unitate productivă la unitate productivă, şi chiar de la secție la secție, având o influență mare asupra costului produsului. Orice unitate productivă este interesată în reducerea costului regiei.

$C_{REa}=R_{Ea}.T_1= 6,016$ lei/panou (7.11.)

unde:

- $R_{Ea}=(1\ldots2).P_{MO}$, lei/panou (7.12.)

S-a considerat: $C_{REa}=2.P_{MO}.T_1$

Costul total al îndreptării este:

$C_{îa}=14,26$ lei/panou (7.13.)

Îndreptarea cu ciocanul cu 2 operatori durează aproximativ, conform cercetărilor experimentale, $t_{icioc}=20$ minute/operator/panou. Tabla este în stare plastică după încălzirile aplicate şi se deformează uşor după loviturile de ciocan.

Costul îndreptării ulterioare prin lovituri de ciocan este:

C_{icioca}=nr. operatori. $t_{icicoc}.P_{MO}=3,13$ lei/panou (7.14.)

Costul total al îndreptării unui panou al peretelui lateral este:

$C_{îndra}= C_{îa}+ C_{icioca}= 17,39$ lei (7.15.)

Tabel 7.2. Costurile componente ale costului total al îndreptării

C_{MOa} lei	C_{MAa} lei	C_{Wa} lei	C_{REa} lei	$C_{îa}$ lei	C_{icioca} lei	$C_{îndra}$ lei
3,008	5,236	0	6,016	14,26	3,13	17,39

Prețurile utilizate sunt prezentate centralizat în tabelul 4.1, anexa 4.

Consumul de manoperă, material şi energie este înregistrat în tabelul centralizator 4.2, anexa 4.

7.1.2.Îndreptare cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliți şi răcire cu apă

Îndreptarea cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliți şi răcire cu apă constă din aplicarea unor încălziri locale, energia calorică obținându-se de la un arc electric amorsat între un electrod învelit şi tabla de îndreptat. Acest arc se amorsează în interiorul vagonului, iar din exterior locurile încălzite se răcesc brusc cu un jet de apă. Harta încălzirilor locale poate fi cea prezentată în figura 7.2. respectiv sub formă de linii sinusoidale, prezentat în figura 7.3. Diferența dintre îndreptarea sub formă de puncte şi de linii sinusoidale este nesemnificativă.

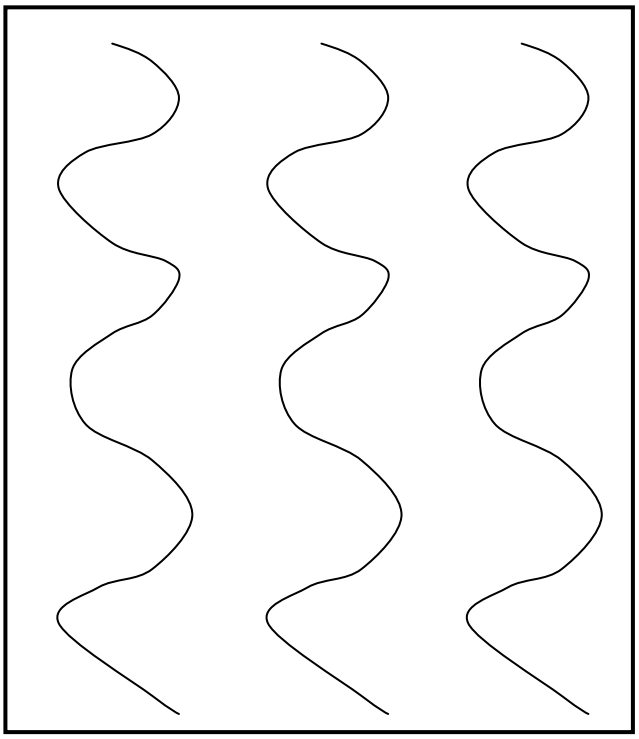


Fig.7.3. Încălziri locale sinusoidale

În vederea protejării tablei, aceasta se încălzeşte cu un arc electric lung pe cât posibil, fără întreruperea acestuia. Totuşi se va depune material topit pe interiorul suprafețelor de îndreptat, respectiv se vor crea şi cratere subțiind tabla învelitoare. Ambele aspecte conduc la coroziunea prematură a tablei învelitoare respectiv la creşterea tarei vagonului.

Aceste încălziri locale contractă, scurtează liniile elementare a tablei, unele ajungând la valoarea liniilor elementare în dreptul rândurilor de sudură, altele nu. Pentru ca tabla să se încadreze la planeitatea de 0,5mm/metru liniar, este necesar să se aplice şi în acest caz metoda de îndreptare mecanică descrisă la subcapitolul 7.1.1. respectiv prin lovirea cu ciocanul de 5daN, doi operatori elimină denivelările. Aceste încălziri locale măresc plasticitatea tablei, astfel loviturile de ciocan au efecte dorite.

Costul îndreptării în cazul utilizării îndreptării cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliți şi răcire cu apă este conform (7.16.):

$$C_{îb}=C_{MAb}+C_{MOb}+C_{Wb}+C_{REb} \qquad (7.16.)$$

Costul materialelor de adaos, care în acest caz sunt electrozii înveliți şi apa, este dată de (7.17.):

$$C_{MAb}=M_A.P_{el}+G_{H2O}.P_{H2O}=2{,}174 \text{ lei/panou} \qquad (7.17.)$$

unde:

- M_A- metalul de adaos necesar depunerii lui M_D;
- P_{el}- preț de cost electrozi înveliți.

Încălzirea se va face cu electrozi înveliți tip Supertit Fin, cu diametrul electrodului de d_e=4,0 mm, utilizând curent de sudare I_s=160 A, tensiunea arcului fiind de U_a=25 V, înălțimea depunerii este de h=0,5 mm. Sursa utilizată este un redresor sau convertizor de sudare. Viteza de sudare/încălzire este mare, scopul fiind acela de încălzire nu şi realizarea unei pătrunderi sau depuneri, v_s=65 cm/min. Se utilizează curent continuu polaritate directă.

$M_A=M_D/G_{MA}$=0,254kg (7.18.)

unde:

- M_D – masa de metal depusă;

G_{MA}=65% , gradul de utilizare al materialului de adaos pentru procedeul SE (7.19.)

$M_D=A_{depusă}.h.\ \rho\ .\ n_{pcte}$0,165kg (7.20.)

unde:

- $A_{depusă}$- aria depusă;
- h- înălțimea depunerii;

ρ=7,85 kg/dm^3, densitatea oțelului; (7.21.)

- n_{pcte}= 70; este numărul de puncte încălzite.

$$A_{depusa} = \frac{\pi.d^2{}_{cercmediu}}{4} = \frac{\pi.27{,}5^2}{4} = 600mm^2 \quad (7.22.)$$

Timpul de încălzire al unui punct se determină cu (7.23.), iar timpul total de încălzire cu ajutorul (7.24.):

$t_{inc/punct}=l/v_{inc}$=0,246 min/punct încălzit (7.23.)

$t_{inc}=70.t_{inc/punct}$=17,23min=0,29 h (7.24.)

Timpul de trecere de la un punct încălzit la următorul este de 2 secunde. Timpul total de trecere se ia $t_{trecere}$=69.2≈140 sec=2,33 min=0,0388h.

Timpul de răcire cu apă este:

$t_{rac}=1{,}1.\ (t_{inc}+t_{trecere})$=1.300 s=21,667min=0,361 h (7.25.)

Consumul de apă este conform (7.26.):

$G_{H2O}=Q_{H2O}.t_{rac}$=303,34 l (7.26.)

Costul manoperei se determină pentru un panou îndreptat cu ajutorul (7.27.):

$C_{MOb}=T_b.P_{MO}$ =7,3273 lei /panou (7.27.)

unde:

- T_b-timpul necesar pentru îndreptarea unui panou, h/panou

Timpul de îndreptare T_2 este format din timpul de încălzire, de trecere la alt punct şi din timpul de răcire.

Timpul T_b este conform (7.28.):

$$T_b = \frac{t_{inc}}{FO} + t_{rac} + t_{trecere} = 1{,}559h/\ panou \quad (7.28.)$$

FO=25% (7.29.)

Calculul costului energiei electrice se face cu ajutorul (7.30.):

$C_{Wb}=W_b.P_W$ =0,504 lei/panou (7.30.)

unde:

- W_b-consum de energie pentru 1 panou îndreptat, kW

Consumul de energie electrică se determină cu ajutorul (7.31.):

$$W_b = \frac{1}{\eta}.\frac{I_S.U_a.t_{inc}}{60000} = 1{,}44kW/panou \qquad (7.31.)$$

Costul regiei:

$C_{REb}=R_{Eb}.T_b$ = 14,6546 lei/panou (7.32.)

unde:

- $R_{Eb}=(1\ldots2).P_{MO,}$ lei/panou (7.33.)

Costul total al îndreptării este:

$C_{îb}$=24,66 lei/panou (7.34.)

Costul îndreptării ulterioare prin lovituri de ciocan este identică cu cea de la punctul 7.1.1:

C_{iciocb}=3,13 lei/panou (7.35.)

Costul total al îndreptării unui panou al peretelui lateral este:

$C_{îndrb}= C_{îb}+ C_{iciocb}$=27,79 lei (7.36.)

Consumurile de manoperă, material şi energie sunt prezentate în tabelul 4.3, anexa 4.

7.1.3. Îndreptarea cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi de cărbune şi răcire cu apă

Metoda este identică cu cea descrisă la subcapitolul 7.1.2., singura diferență este că în loc de electrozi înveliți se utilizează electrozi de cărbune cu diametru de d_e=6 mm. Astfel se evită depunerea de metal topit pe suprafața interioară a tablei învelitoare, tara vagonului nu va creşte, dar craterele mici nici în acest caz nu pot fi evitate din cauza operatorului care nu poate să mențină constant lungimea arcului electric. Față de metoda descrisă la punctul 7.1.2. în acest caz se reduce manopera de încălzire şi se reduce consumul de material .

Costul îndreptării în cazul utilizării îndreptării cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi de cărbune şi răcire cu apă este:

$C_{îc}=C_{MAc}+C_{MOc}+C_{Wc}+C_{REc}$ (7.37.)

Costul materialelor de adaos, care în acest caz sunt electrozii de cărbune şi apa, este dată de relația 7.38.:

$C_{MAc}=n_{el.carb}.P_{el.carb} +G_{H2O}.P_{H2O}$=2,9688 lei/panou (7.38.)

unde:

- $n_{el.carb}$=2, numărul electrozilor de cărbune, determinat experimental;
- P_{el}- preț de cost electrod de cărbune.

Încălzirea se va face cu electrozi de cărbune, cu diametrul electrodului de d_e=6,0mm, utilizând curent de sudare I_s=270 A, tensiunea arcului fiind de U_a=26V. Sursa utilizată este un redresor sau convertizor de sudare. Viteza de sudare/încălzire este mare, dublu ca la îndreptarea cu electrozi înveliți, scopul fiind

acela de încălzire nu şi realizarea unei pătrunderi, v_s=130 cm/min. Timpul de încălzire astfel va fi jumătate din timpul de încălzire cu electrozi înveliți:

$t_{incc}=0,5.t_{incEI}=0,144$ h (7.39.)

Timpul de trecere între găuri este identic cu cel de la punctul 7.1.2.

Timpul de răcire este:

$t_{racc}=1,1.(t_{incc}+t_{trecerec})=12$ min=0,2h (7.40.)

Timpul de îndreptare T_c este format din timpul de încălzire, de trecere la alt punct şi din timpul de răcire.

Timpul de răcire cu apă este:

Consumul de apă este conform (7.41.):

$G_{H2O}=Q_{H2O}.t_{rac}=168$ l (7.41.)

Costul manoperei se determină pentru un panou îndreptat cu ajutorul (7.42.):

$C_{MOc}=T_c.P_{MO}=1,9646$ lei /panou (7.42.)

unde:

- T_c-timpul necesar pentru îndreptarea unui panou, şi se determină cu (7.43.):

$$T_c=\frac{t_{inc}}{FO}+t_{rac}+t_{trecere}=0,418h/panou \quad (7.43.)$$

FO=80% (7.44.)

Calculul costului energiei electrice se face cu (7.45.):

$C_{Wc}=W_c.P_W=0,3528$ lei/panou (7.45.)

unde:

- W_c-consum de energie pentru 1 panou îndreptat, kW.

Consumul de energie electrică se determină cu (7.46.):

$$W_c=\frac{1}{\eta}.\frac{I_S.U_a.t_{inc}}{60000}=1,008kW/panou \quad (7.46.)$$

Costul regiei:

$C_{REc}=R_{Ec}.T_c=3,9292$ lei/panou (7.47.)

Costul total al îndreptării este:

$C_{îc}=9,2154$ lei/panou (7.48.)

Costul îndreptării ulterioare prin lovituri de ciocan este identică cu cea de la punctul 7.1.1.:

$C_{iciocc}=3,13$ lei/panou (7.49.)

Costul total al îndreptării unui panou al peretelui lateral este:

$C_{îndrc}=C_{îc}+C_{iciocc}=12,3454$ lei (7.50.)

Consumurile de manoperă, material şi energie sunt prezentate în tabelul 4.4, anexa 4.

7.1.4. Îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale

Principiul metodei a fost descrisă în subcapitolul 4.5. Avantajele acestei metode față de procedeele prezentate la punctele 7.1.1., 7.1.2. şi 7.1.3. sunt:

- eliminarea răcirii cu apă;
- operatorul nu trebuie să aibă experiență;
- se elimină consumul de electrozi înveliți respectiv cel de electrozi de cărbune;
- nu rezultă cratere în tablele îndreptate;
- se reduce mult manopera de îndreptare;
- numai în cazuri foarte rare este necesară retuşarea prin ciocănire;
- nu există depuneri de metal , nu creşte tara vagonului.

Costul îndreptării în cazul utilizării îndreptării cu electromagnet şi încălziri locale este:

$C_{îd}=C_{MAd}+C_{MOd}+C_{Wd}+C_{REd}$ (7.51.)

Costul materialelor de adaos: oxigenul şi acetilena este dată de (7.52.):

$C_{MAd}=G_{O2}.P_{O2}+G_{C2H2}.P_{C2H2}=1,225$ lei/panou (7.52.)

Debitul de gaz este:

$Q_{O2}=5l/min$ (7.53.)

$Q_{C2H2}=5l/min$ (7.54.)

$t_{încd}$=nr. puncte x t+ (nr. puncte-1) x $t_{trecere}$ =3,483min (7.55.)

Costul manoperei se determină pentru un panou îndreptat cu (7.56.):

$C_{MO4}=T_4.P_{MO}=0,5452$ lei /panou (7.56.)

unde:

- T_4-timpul necesar pentru îndreptarea unui panou se determină cu (7.57.):

$$T_d=\frac{t_{incd}}{60.FO}=0,116h/panou \quad (7.57.)$$

FO=50% (7.58.)

Factorul operator FO ține cont de aşezarea plăcii găurite respectiv de cuplarea electromagnetului.

Calculul costului energiei electrice se face cu (7.59.):

$C_{Wd}=t_{inc}.W_d.P_W=0,041$ lei/panou (7.59.)

unde:

- W_d=2kW/h, consumul de energie electrică a electromagnetului (7.60.)

Costul regiei:

$C_{REd}=R_{Ed}.T_d=1,0904$ lei/panou (7.61.)

Costul total al îndreptării este:

$C_{îd}=2,9016$ lei/panou (7.62.)

Îndreptarea de retuşare necesită aproximativ, conform cercetărilor experimentale, t_{retus}=2 minute/operator/panou.

Costul retuşării ulterioare este:

C_{retusd}=nr. operatori. $t_{retus}.P_{MO}=0,3102$ lei/panou (7.63.)

Costul total al îndreptării unui panou al peretelui lateral este:

$C_{îndrd}= C_{îd}+ C_{retusd}=3,2118$ lei (7.64.)

Consumurile de manoperă, material şi energie sunt prezentate în tabelul 4.5., anexa 4.

7.1.5. Îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale

Din principiul metodei, prezentată la capitolul 4.2.4., rezultă o serie de avantaje față de metodele de îndreptare cu flacără oxigaz şi răcire cu apă, cu arc electric cu electrozi înveliți, cu arc electric cu electrozi de cărbune. Dar apare şi un dezavantaj față de metoda de îndreptare cu electromagnet, şi anume îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale necesită un operator cu o experiență vastă, care trebuie să sesizeze locurile unde vor aplica încălzirile locale punctiforme. În caz contrar, dacă se greşeşte locul de încălzire, tabla învelitoare nu se mai poate îndrepta prin aplicarea a nici unei metode. Pentru ca produsul să nu fie compromis, se îndepărtează panoul de tablă şi se înlocuieşte cu altul. Această operație de înlocuire însă, reclamă consum mare de material şi manoperă. Procedeul necesită foarte rar îndreptare de retuşare.

Costul îndreptării în cazul utilizării îndreptării cu electromagnet şi încălziri locale este:

$C_{îe}=C_{MAe}+C_{MOe}+C_{We}+C_{REe}$ (7.65.)

Costul materialelor de adaos, oxigenul şi acetilena este dată de relația 7.66.:

$C_{MAe}=G_{O2}.P_{O2}+G_{C2H2}.P_{C2H2}=1,6331$ lei/panou (7.66.)

unde:

$G_{O2}=Q_{O2}.t_{înce}$ (7.67.)

$G_{C2H2}=Q_{C2H2}.t_{înce}$ (7.68.)

Debitul de gaz este:

$Q_{O2}=5$l/min (7.69.)

$Q_{C2H2}=5$l/min (7.70.)

$t_{înc5e}$=nr. puncte x t =4,667min (7.71.)

unde:

- nr. puncte=70, este aproximativ identic cu numărul de puncte de la celelalte metode (7.72.)
- t=4 s, timpul necesar încălzirii unui punct (7.73.)

Costul manoperei se determină pentru un panou îndreptat cu (7.74.):

$C_{MOe}=T_e.P_{MO}=1,4617$ lei /panou (7.74.)

Timpul necesar pentru îndreptarea unui panou T_e este:

$$T_e = \frac{t_{ince}}{60.0,25} = 0,311h/panou \quad (7.75.)$$

FO=25% (7.76.)

Factorul operator FO ține cont de timpul de stabilire a punctelor de încălzire.

Calculul costului energiei electrice se face cu (7.77.):

$C_{We}=1,3.C_{wd}=0,0533$ lei/panou (7.77.)

Consumul mai mare apare din cauza consumului motorului care acționează pompa de vid, care este mai mare ca şi consumul de la electromagnet aproximativ cu 30%.

Costul regiei:

$C_{REe}=R_{Ee}.Te=2,9234$ (lei/panou) (7.78.)

Costul total al îndreptării este:

$C_{îe}=6,0715$ lei/panou (7.79.)

Îndreptarea de retuşare necesită aproximativ, conform cercetărilor experimentale, $t_{retus}=2$ minute/operator/panou.

Costul retuşării ulterioare este:

C_{retuse}=nr. operatori. $t_{retus}.P_{MO}= 0,3102$ lei/panou (7.80.)

Costul total al îndreptării unui panou al peretelui lateral este:

$C_{îndre}= C_{îe}+ C_{retuse}=6,3817$ lei (7.81.)

Consumurile de manoperă, material şi energie sunt prezentate în tabelul 4.6., anexa 4.

7.2. Concluzii privind optimizarea îndreptării tablelor subțiri

7.2.1.Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri din punct de vedere al costurilor

Funcția obiectiv adoptată pentru optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri din punct de vedere al costurilor este costul îndreptării. Această funcție trebuie minimizată. Funcția obiectiv se defineşte ca fiind suma costurilor factorilor care intervin la îndreptare (7.82).

$Z=C_{MA}+C_{MO}+C_W+C_{RE}+C_{retuşare}$, lei (7.82)

unde:

- C_{MA} – costul materialelor de adaos, lei
- C_{MO} – costul manoperei, lei
- C_W – costul energiei electrice, lei
- C_{RE} – costul regiei, lei
- $C_{retuşare}$ – costul retuşării, lei

Alternativele funcției obiectiv sunt date de cele 5 procedee de îndreptare (a÷e). Dintre aceste alternative se va alege soluția optimă SO.

În acest capitol se notează metodele de îndreptare cu:

- a-îndreptare cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă;
- b-îndreptare cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliți şi răcire cu apă;
- c-îndreptare cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi de cărbune şi răcire cu apă;
- d-îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale;

- e-îndreptare cu placă vacumetrică şi încălziri locale.

Pentru a trage concluzii se prezintă diagramele costurilor.

Costurile îndreptării unui panou al peretelui lateral sunt prezentate centralizat în tabelul 4.7, anexa 4.

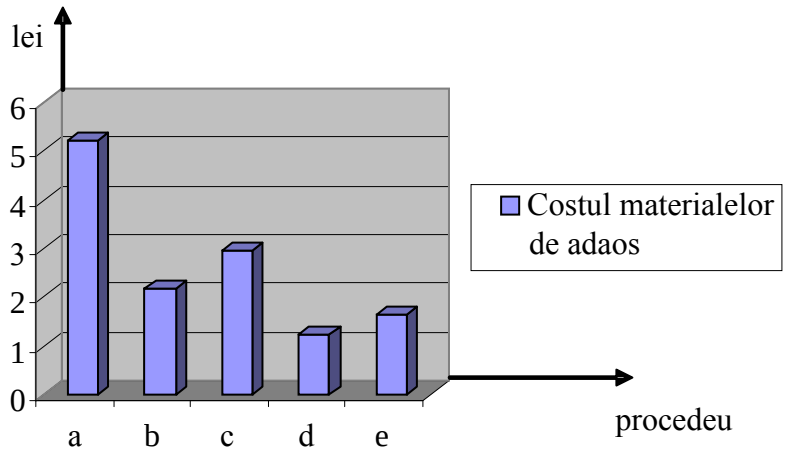


Fig.7.4. Costul materialelor de adaos pe diferite procedee de îndreptare

Din diagrama costurilor materialelor de adaos (fig.7.4.) se observă că procedeul optim este îndreptarea cu electromagnet.

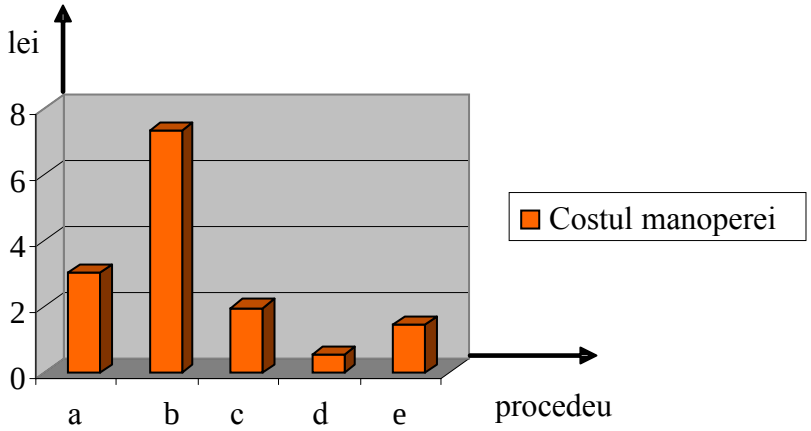


Fig.7.5. Costul manoperei pe diferite procedee de îndreptare

Analizând diagrama costurilor manoperei (fig.7.5.) se observă că procedeul optim este îndreptarea cu electromagnet.

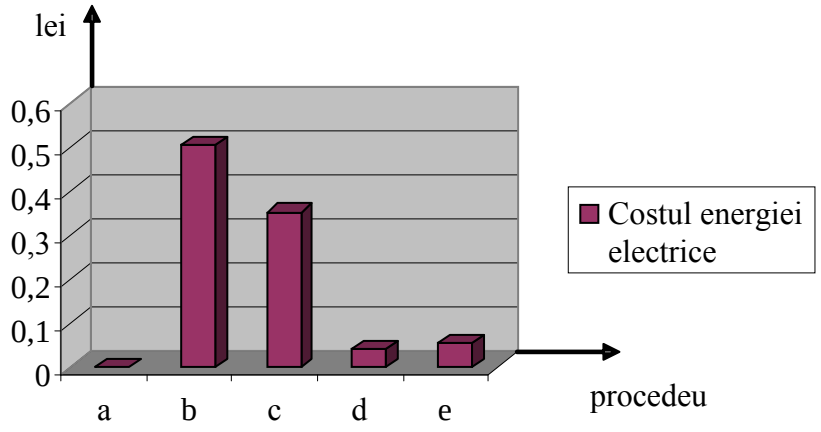


Fig.7.6. Costul energiei electrice pe diferite procedee de îndreptare

Costurile cu energia electrică (fig.7.6.) relevă că procedeul optim este îndreptarea cu flacără, procedeu care nu necesită consum de energie electrică.

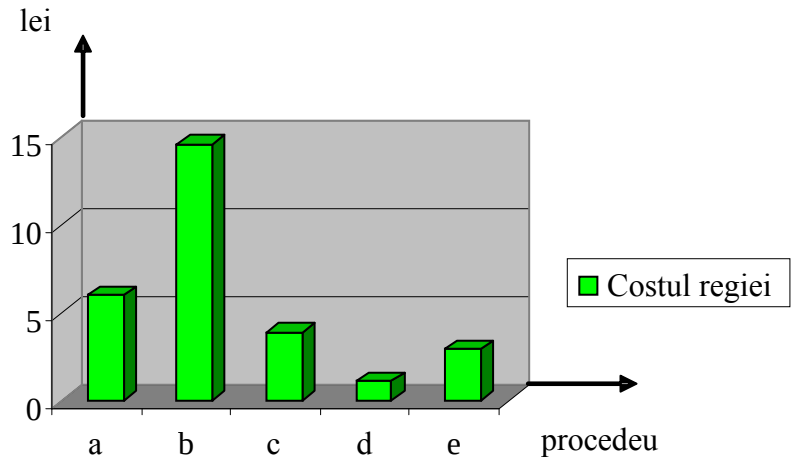


Fig.7.7. Costul regiei pe diferite procedee de îndreptare

Din diagrama costurilor regiei (fig.7.7.), se observă că procedeul optim este îndreptarea cu electromagnet.

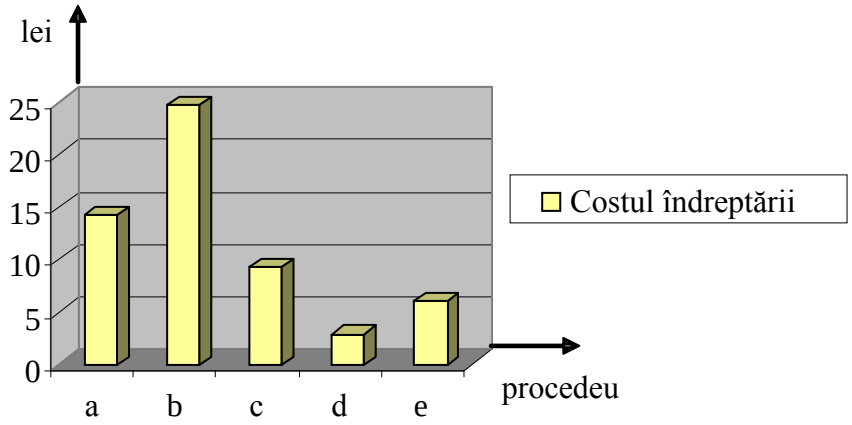


Fig.7.8. Costul îndreptării pe diferite procedee de îndreptare

Diagrama costurilor îndreptării (fig.7.8.), relevă că procedeul optim este îndreptarea cu electromagnet.

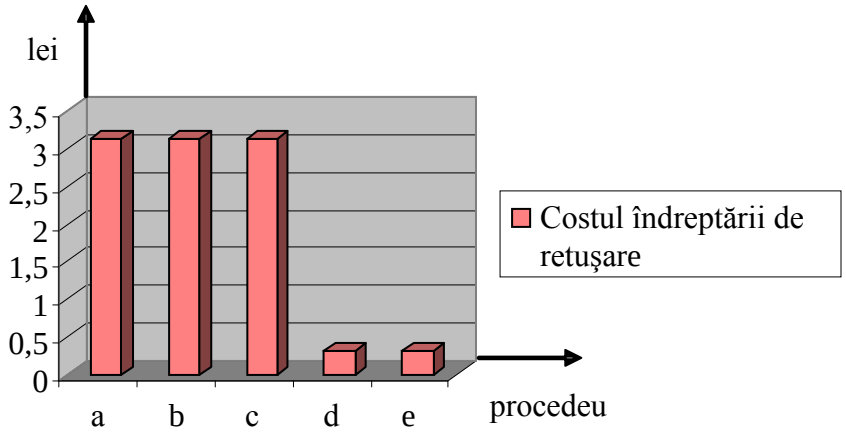


Fig.7.9. Costul îndreptării de retuşare

Analizând diagrama costurilor îndreptării de retuşare (fig.7.9.), se observă că procedeele optime sunt îndreptarea cu electromagnet şi cu placă vacumetrică şi încălziri locale.

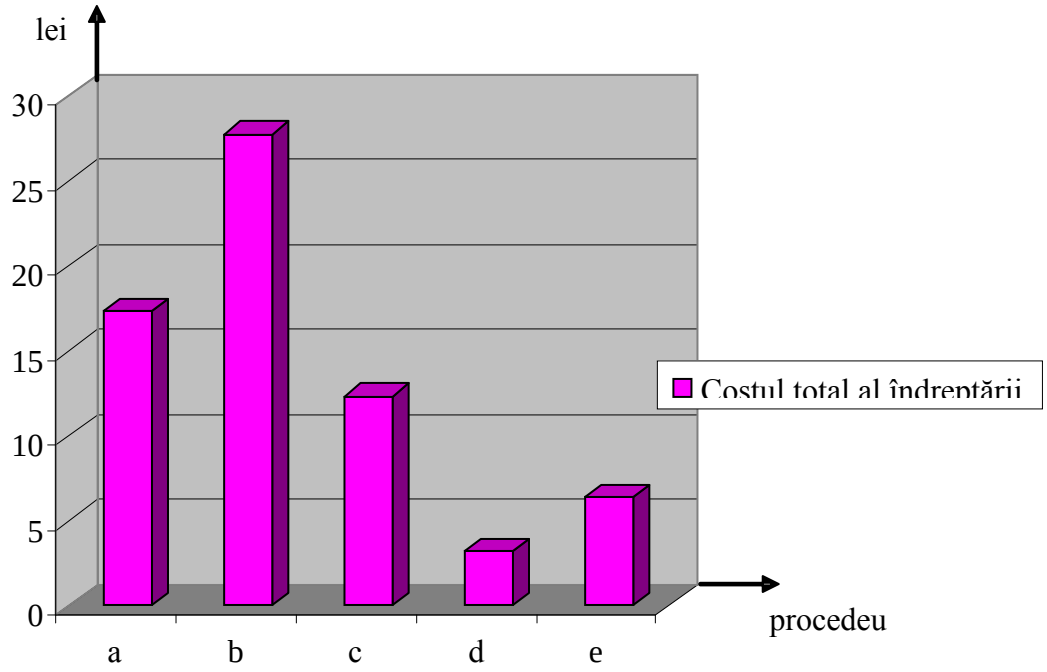


Fig.7.10. Costul total al îndreptării unui panou al peretelui later pe diferite procedee de îndreptare

Din diagrama costurilor totale ale îndreptării (fig.7.10.), valoarea funcţiei obiectiv pentru cele 5 procedee de îndreptare, se observă că procedeul optim este îndreptarea cu electromagnet, soluţia optimă.

Z(SO)=OPT.Z =3,2118 lei (7.83.)

7.2.2. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subţiri din punct de vedere al timpului de lucru

Funcţia obiectiv pentru optimizarea îndreptării tablelor subţiri din punct de vedere al timpului de lucru este timpul total necesar îndreptării unui panou al peretelui lateral. Această funcţie trebuie minimizată. Funcţia obiectiv se defineşte ca fiind suma timpilor operaţiilor care intervin la îndreptare (7.84.).

$Z=T_n+T_{retuşare}$, h (7.84.)

unde:

- T_n- timpul necesar pentru îndreptarea unui panou, h;
- n – procedee de îndreptare;
- n=a...e;
- $T_{retuşare}$ - timp de retuşare, h.

Alternativele funcţiei obiectiv sunt date de cele 5 procedee de îndreptare (a÷e). Dintre aceste alternative se va alege soluţia optimă SO.

Conform calculelor de la subcapitolul 7.1. timpii necesari pentru îndreptarea unui panou sunt prezentate centralizat în tabelul 4.8, anexa 4.

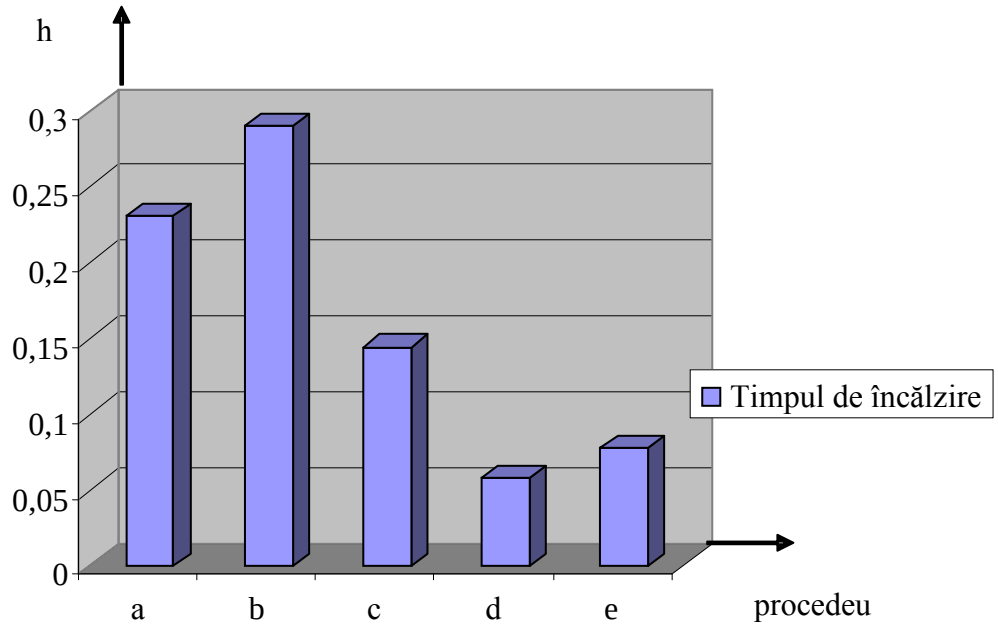


Fig.7.11. Timpul de încălzire pe diferite procedee de îndreptare

Analizând diagrama timpilor de încălzire (fig.7.11) se observă că cel mai scurt timp necesar încălzirii este asigurat de procedeul de îndreptare cu electromagnet.

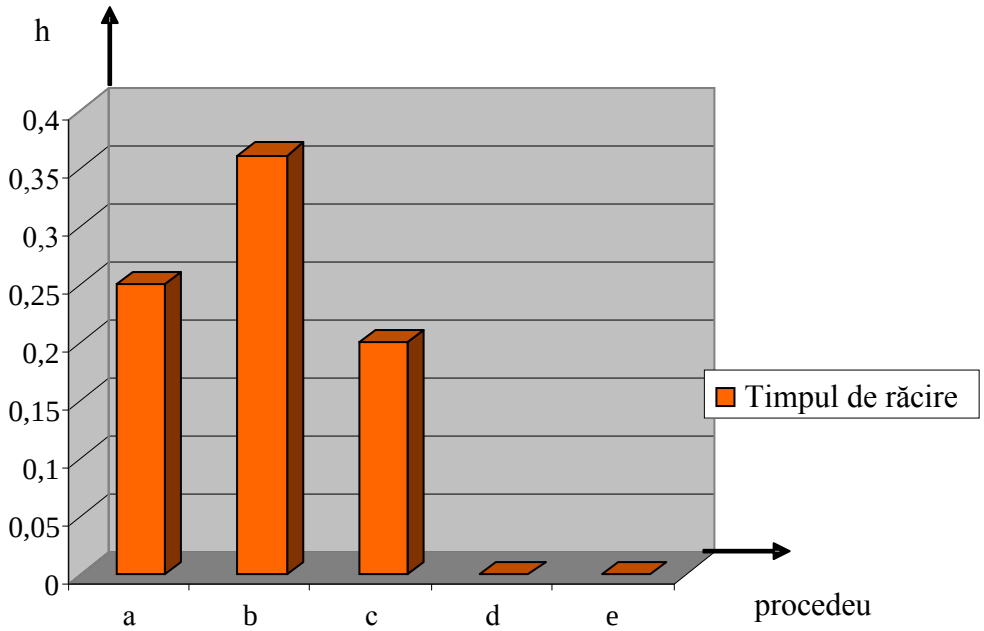


Fig. 7.12. Timpul de răcire pe diferite procedee de îndreptare

Din diagrama timpilor de răcire (fig.7.12.) se observă că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale respectiv îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale, procedee care nu necesită răcire.

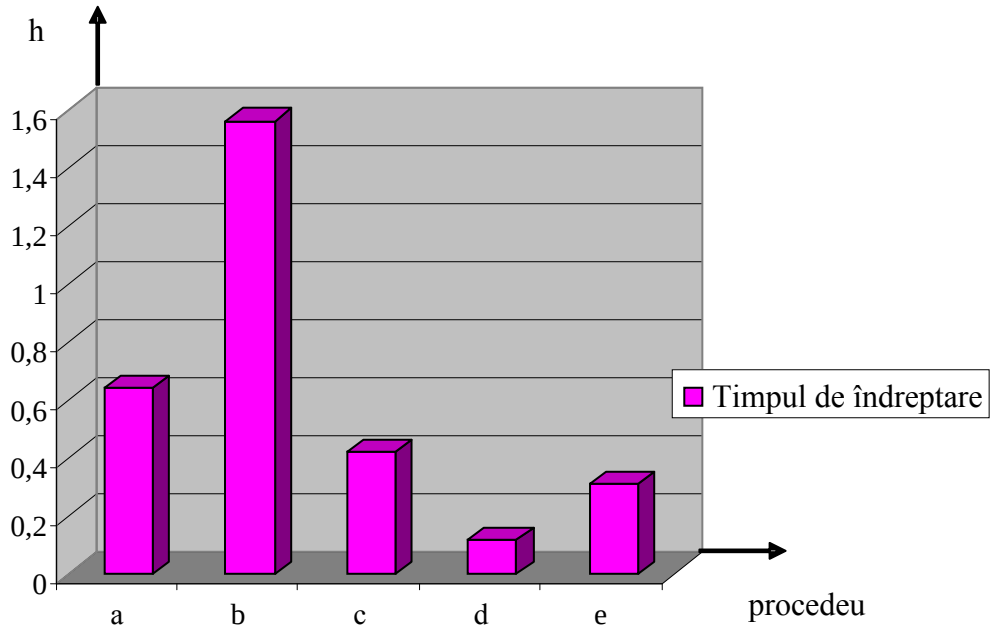


Fig.7.13. Timpul de îndreptare pe diferite procedee de îndreptare

Timpii de îndreptare (fig.7.13.) relevă că procedeul optim de îndreptare, din acest punct de vedere, este îndreptarea cu electromagnet.

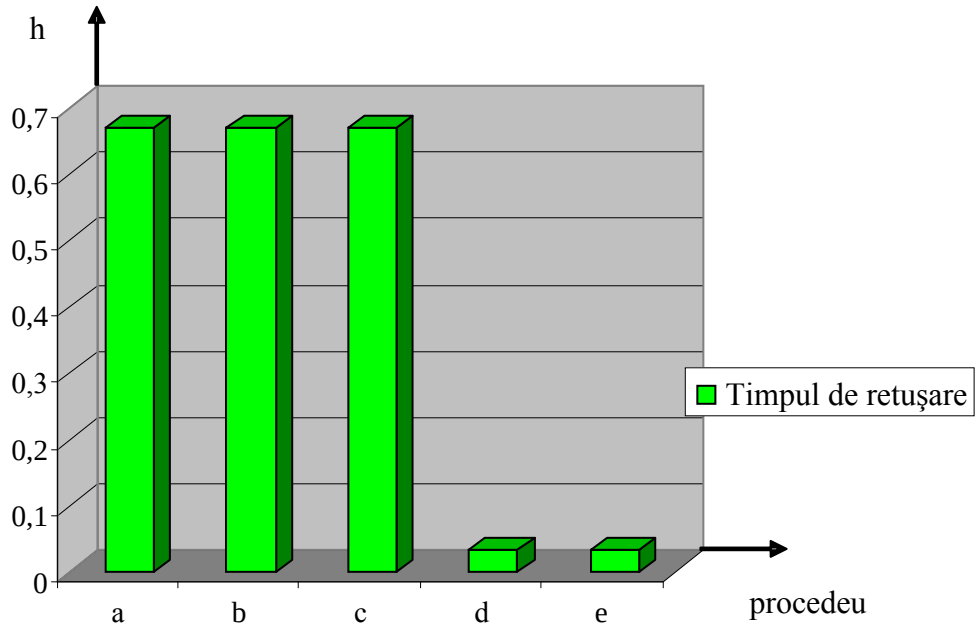


Fig.7.14. Timpul de retuşare pe diferite procedee de îndreptare

Din diagrama timpilor de retuşare (fig. 7.14.), se observă că procedeul optim de îndreptare, din acest punct de vedere, este îndreptarea cu electromagnet respectiv îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale.

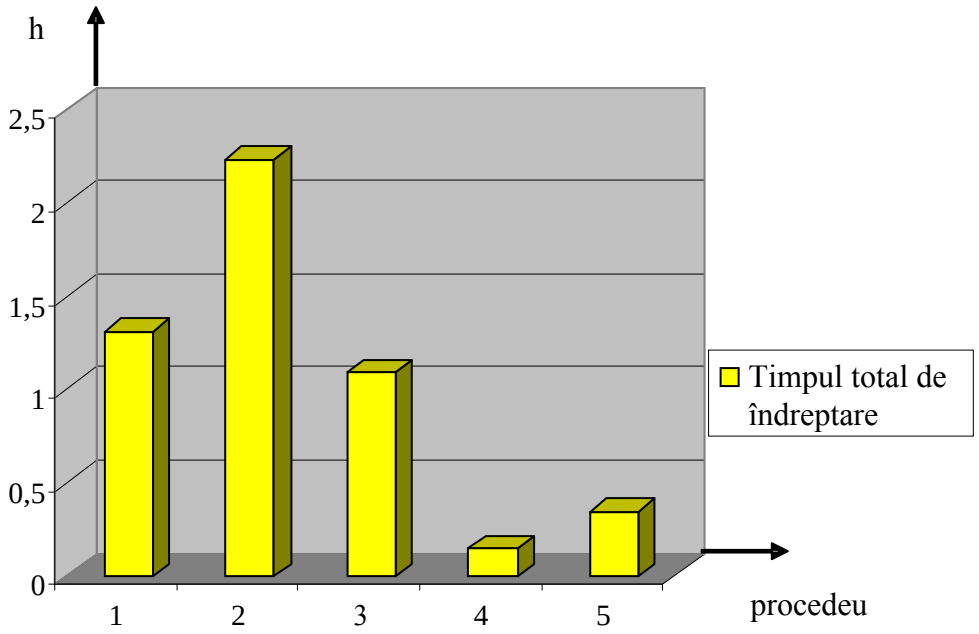


Fig.7.15. Timpul total de îndreptare pe diferite procedee de îndreptare

Timpul total de îndreptare (fig.7.15.), valoarea funcţiei obiectiv pentru cele 5 procedee de îndreptare, relevă că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu electromagnet, soluţia optimă.

Z(SO)=OPT.Z = 0,149 h (7.85.)

7.2.3. Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subţiri din punct de vedere al eficienţei procedeului de îndreptare

Scopul îndreptării tablelor subţiri după sudare este de a reduce săgeata apărută la sudare la o valoare admisă de prevederile documentaţiei respectiv a fişelor de măsurători. Cu cât aceste abateri de la planeitate sunt mai mici cu atât eficienţa metodei de îndreptare este mai bună. Ca să se poată face o comparaţie se va cuantifica funcţia obiectiv.

Funcţia obiectiv va fi chiar săgeata rămasă în urma îndreptării unui panou al peretelui lateral cu diferite metode de îndreptare. Soluţia optimă va fi dată de funcţia cu valoarea minimă.

Z=f, mm (7.86.)

unde:

- f=săgeata.

Figura 7.16. prezintă diagrama săgeţilor rezultate după îndreptare cu cele 5 metode. Conform măsurătorilor experimentale efectuate pentru diferite metode de îndreptare, săgeata panoului peretelui lateral este prezentată centralizat în tabelul 4.9, anexa 4.

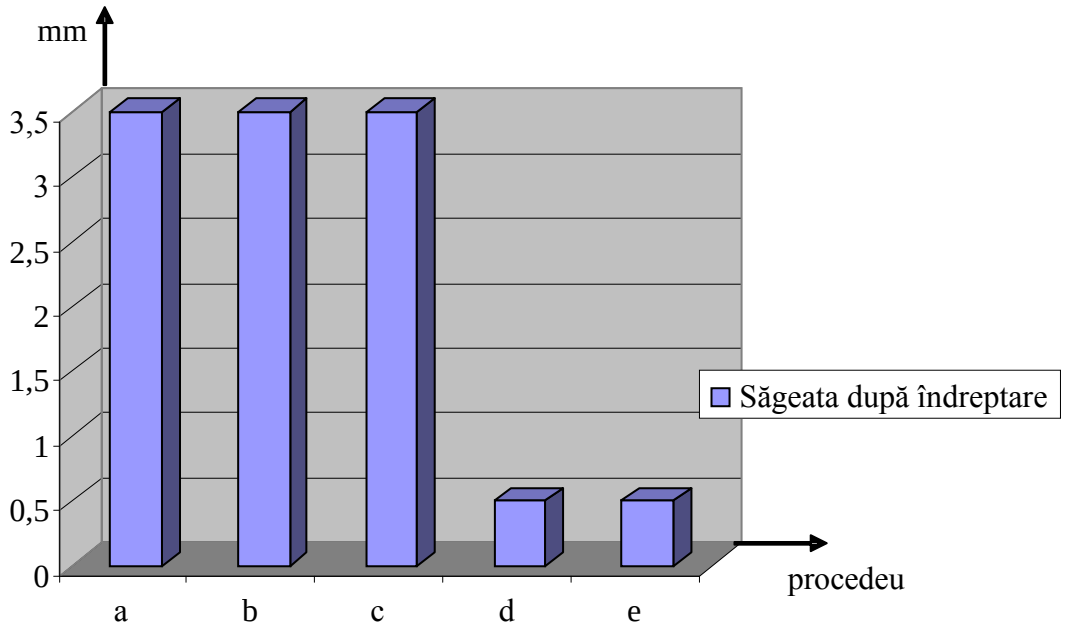


Fig.7.16. Săgeata medie apărută după îndreptare cu diferite procedee

Relativ la săgeata rezultată după îndreptare, valoarea funcţiei obiectiv pentru cele 5 procedee de îndreptare (fig.7.16.), relevă că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu electromagnet şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale, soluţia optimă conducând la:

$$Z(SO)=OPT.Z = 0,5 \text{ mm} \qquad (7.87.)$$

7.2.4.Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subţiri din punct de vedere a calităţii tablelor îndreptate

Abaterea acceptabilă în raport cu normele de calitate aspectuală la pereţii vagoanelor este de 0,5mm/1m liniar. La metodele de îndreptare a, b şi c, această abatere se obţine prin încălzirea tablelor, răcirea cu apă, după care urmează o îndreptare mecanică: ciocănirea tablelor. Metodele d şi e de îndreptare nu necesită răcire cu apă şi nici ciocănire ulterioară. Operaţia de ciocănire scade nivelul calitativ al peretelui, deoarece pe perete rămân urme de ciocan, iar răcirea cu apă respectiv surplusul de material apărut la îndreptarea cu electrod învelit sunt focare de coroziune ca şi subţierea tablei în punctele încălzite cu electrodul de cărbune.

Ca să se poată face o comparaţie se va cuantifica funcţia obiectiv. Se vor codifica cu 1 răspunsurile afirmative şi cu 0 răspunsurile negative (tab.4.10, anexa 4). Soluţia optimă va fi dată de funcţia cu valoarea minimă.

$$Z=\min(Z) \qquad (7.88.)$$

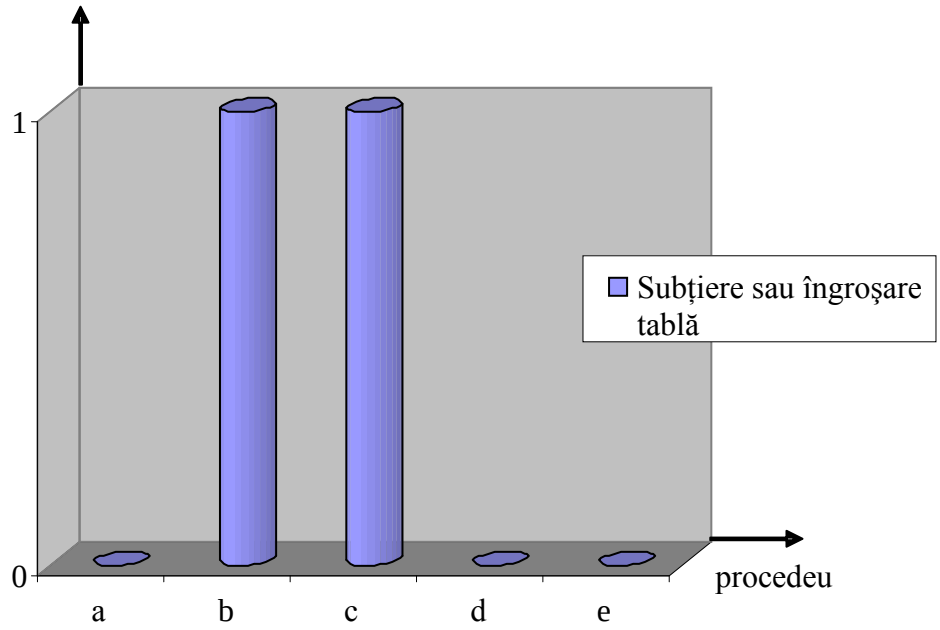


Fig.7.17. Subțiere sau îngroşare tablă

Diagrama din figura 7.17., se referă la subțierea şi îngroşarea tablei la îndreptare, valoarea funcției obiectiv pentru cele 5 procedee de îndreptare, arată că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă, cea cu electromagnet şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale, soluția optimă fiind:

$$Z(SO)=OPT.Z = 0 \qquad (7.89.)$$

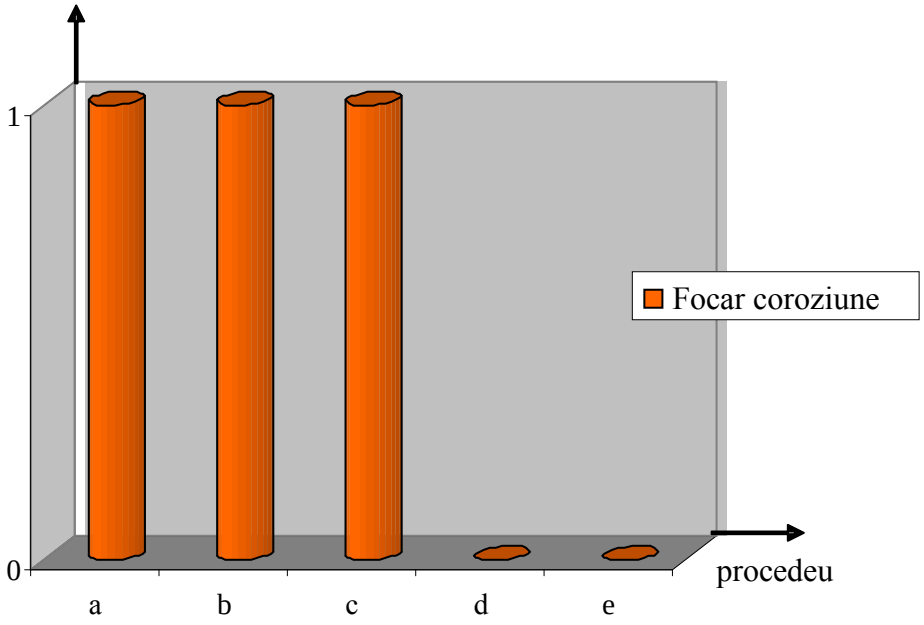


Fig.7.18. Focar coroziune

Relativ la posibilitatea apariției unui focar de coroziune după îndreptare, referitor la valoarea funcției obiectiv pentru cele 5 procedee de îndreptare, figura 7.18. relevă că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu electromagnet şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale.

Z(SO)=OPT.Z = 0

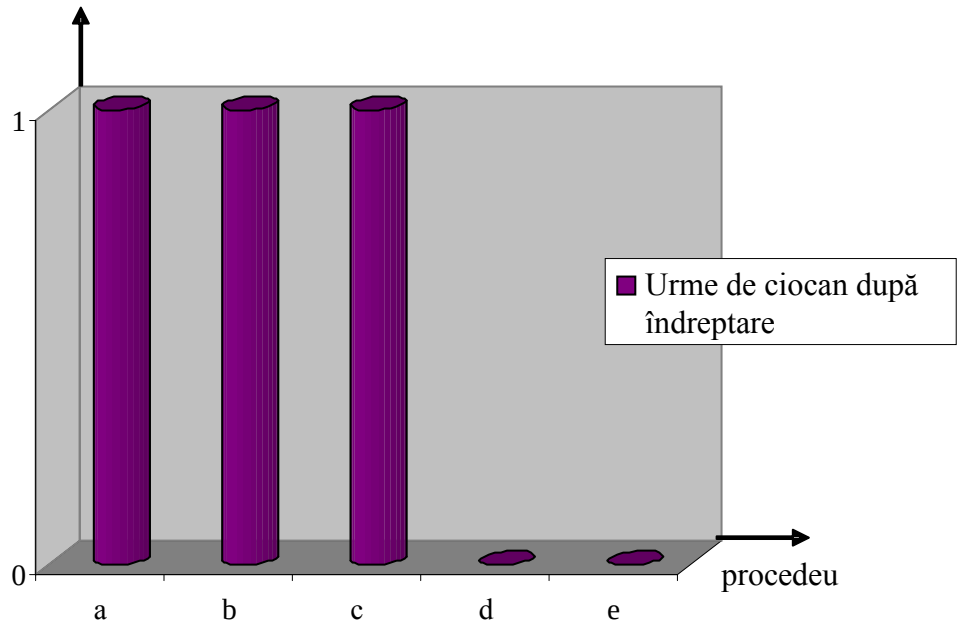


Fig.7.19. Urme de ciocan după îndreptare

Din diagrama din figura 7.19., privind prezența urmelor de ciocan pe peretele lateral, se observă că procedeul optim de îndreptare este îndreptarea cu electromagnet şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale, soluția optimă, caz în care nu există urme de ciocan.

Z(SO)=OPT.Z = 0 (7.90.)

Însumând efectele negative (fig.7.20.) care conduc la diminuarea calității, se observă că soluția optimă privind calitatea peretelui lateral după îndreptare este utilizarea metodelor de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale.

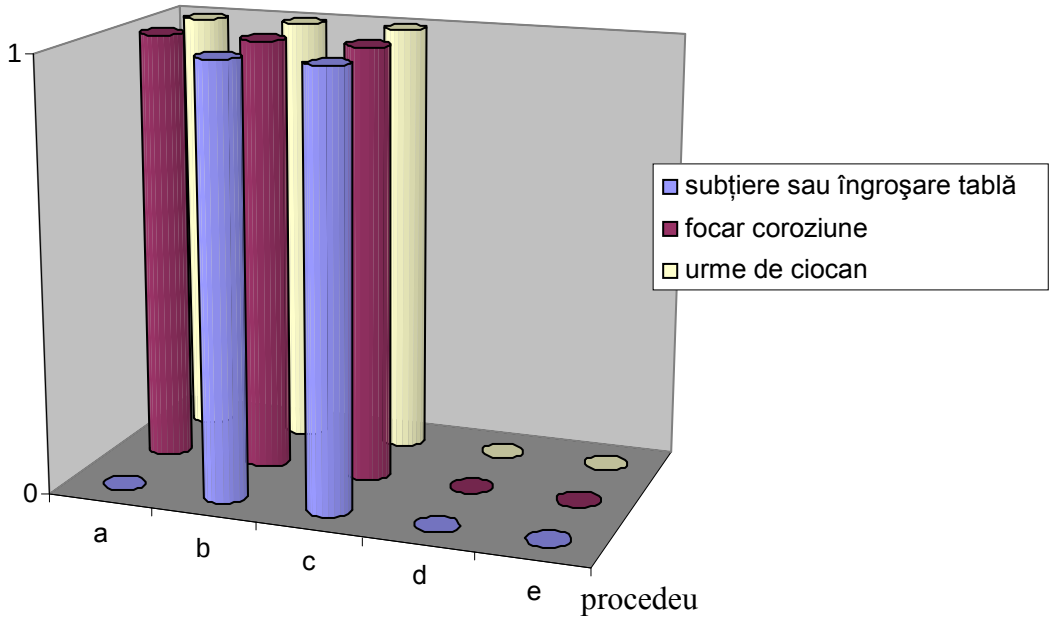


Fig.7.20. Calitatea metodei de îndreptare

7.2.5. Alegerea procedeului de îndreptare optim a tablelor subțiri din construcția vagoanelor

În construcția de vagoane în urma sudării scheletului pe tabla învelitoare se produce voalarea tablei. Singura posibilitate de a elimina aceste denivălări este aplicarea unei metode de contractare a tablei, eliminând surplusul de material. Cele 5 metode de îndreptare se bazează pe acest principiu.

Pe baza rezultatelor capitolelor 7.2.1. - 7.2.4. se poate alege procedeul de îndreptare optim a tablelor subțiri din construcția de vagoane. Soluția optimă, metoda de îndreptare optimă, va fi minimul funcției Z. Funcția Z se compune din costul total al îndreptării, timpul total al îndreptării, eficiența procedeului de îndreptare şi calitatea oferită de procedeul de îndreptare.

$$Z(SO) = OPT.Z = \min(Z) \qquad (7.91.)$$

Ca să se poată face o însumare a rezultatelor din capitolele 7.2.1. – 7.2.4. se vor cuantifica funcțiile obiectiv. Se vor codifica cu 0 valorile optime şi cu 1 valorile maxime (tab.7.3.). Soluția optimă va fi dată de funcția cu valoarea minimă.

Tabel 7.3. Codificarea componentelor funcției obiectiv

Procedeu de îndreptare / Funcția obiectiv	a	b	c	d	e
Cost total procedeu	0,58	1	0,37	0	0,13
Timp de lucru	0,56	1	0,45	0	0,09
Eficiență procedeu	1	1	1	0	0
Calitate	0,67	1	1	0	0
Z	2,81	4	2,82	0	0,22

În figura 7.21. se prezintă componentele funcției obiectiv, iar însumarea lor este prezentată în figura 7.22.

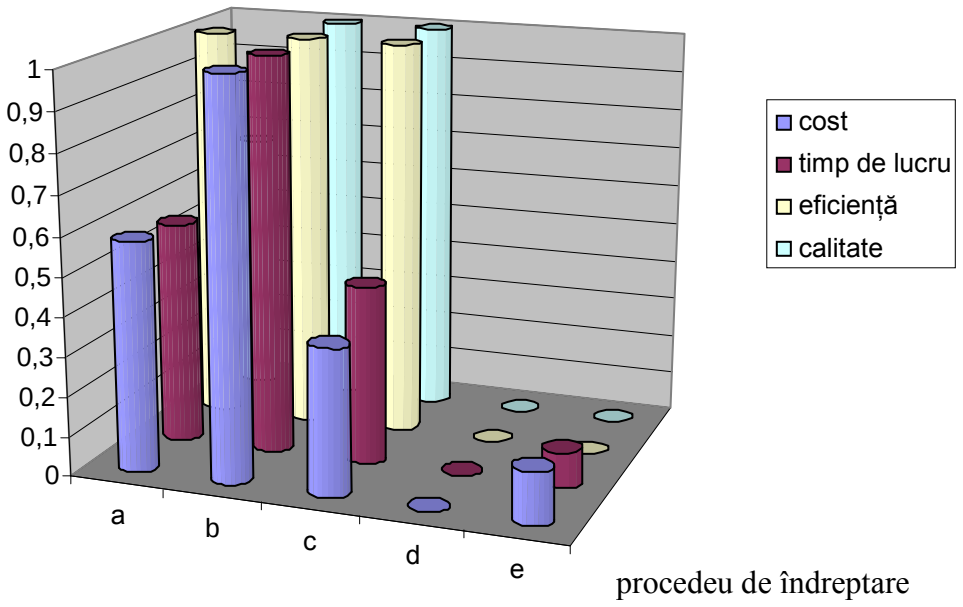


Fig.7.21. Componentele funcției obiectiv pentru alegerea procedeului optim de îndreptarea a tablelor subțiri

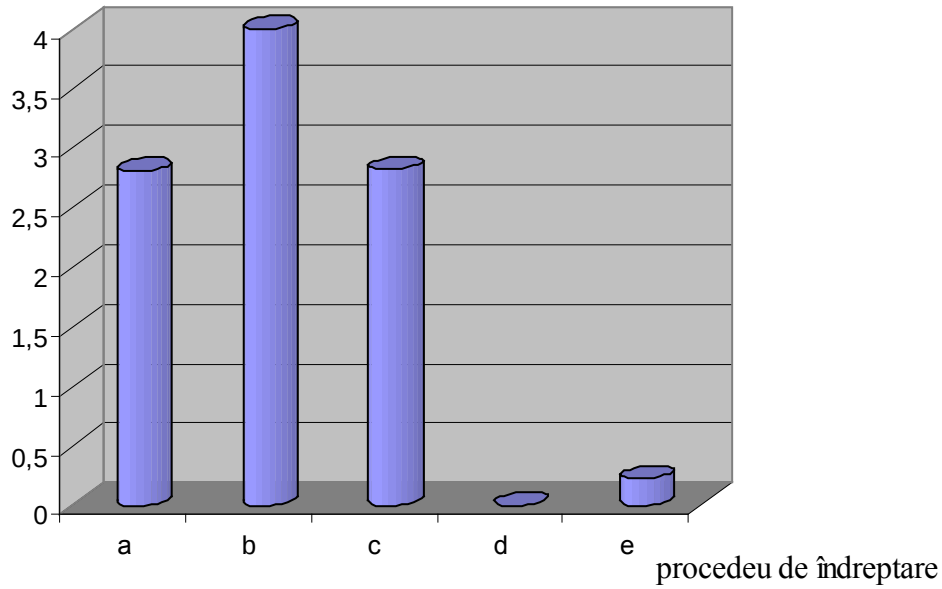


Fig.7.22. Soluția optimă de îndreptare a tablelor subțiri

Analizând diagrama din figura 7.22. şi valoarea funcției obiectiv pentru diferitele procedee de îndreptare (tab.7.3.) se constată că procedeul de îndreptare optim în cazul îndreptării tablelor subțiri utilizate în construcția de vagoane este îndreptarea cu electromagnet şi încălziri locale ca soluție optimă.

$$Z(SO)=OPT.Z = 0 \qquad (7.92.)$$

În urma experimentărilor respectiv a studiului celor 5 metode de îndreptare se pot trage următoarele concluzii:

- aplicarea metodei de îndreptare cu flacără şi răcire cu jet de apă este rentabilă pe suprafețe mici şi nu neaparat plane. Metoda are rentabilitatea maximă la aplicații de tinichigerie auto;
- calitatea cea mai bună a suprafețelor îndreptate rezultă în cazul utilizării metodelor cu electromagnet şi cea cu placă vacumetrică şi încălziri locale.
- în cazul îndreptării cu electromagnet, pe baza experimentărilor s-a realizat optimizarea formei plăcilor cu găuri: grosimea plăcii, amplasarea găurilor, unghiul zencului, numărul de găuri.
- rezultatele sunt aplicate în construcția de vagoane călători.

8. CONCLUZII ŞI CONTRIBUŢII PERSONALE

Tema abordată în cadrul tezei de doctorat prin cercetările experimentale efectuate pe table subţiri cu grosimi de 1,5; 2,0 şi 2,5 mm şi dimensiuni de mărimi reduse a urmărit selectarea şi implementarea de metode pentru reducerea deformaţiilor şi tensiunilor la sudarea tablelor subţiri utilizate în construcţia vagoanelor prin:

- selectarea procedeului de sudare optim pentru realizarea îmbinării diferitelor părţi componente din structura vagonului călători;
- aprecierea metodei optime de îndreptare a peretelui lateral al vagonului călători;
- determinarea experimentală a forţelor care apar în epruvetele utilizate în cadrul cercetărilor;
- determinarea experimentală a mărimii contracţiei rezultate în urma încălzirii unui punct sau mai multe puncte cu flacără oxiacetilenică.

Prin cercetările efectuate s-a dovedit că deformaţiile produse de sudare depind de:

- grosimea componentelor, deformaţiile apărute la sudare cresc cu scăderea grosimii componentelor;
- energia liniară introdusă în componente, deformaţiile apărute la sudare fiind în corelaţie directă cu valoarea energiei liniare introduse;
- viteza de sudare aplicată, deformaţiile apărute la sudare cresc cu scăderea vitezei de sudare;
- locul începerii sudării, deformaţiile sunt minime în punctul de începere a sudurii şi maxime la capătul rândului sudat;
- diametrul electrodului de sudare, deformaţiile cresc cu creşterea diametrului de electrod;
- sensul sudării, deformaţiile crescând la sudarea spre dreapta;
- rigidizarea piesei, deformaţiile maxime aparând la sudarea liberă a tablelor.

Referitor la deformaţia/săgeata în cazul sudării cap la cap a tablelor subţiri cercetările experimentale au permis următoarele concluzii:

- deformaţia minimă se produce la utilizarea procedeului de sudare prin presiune în linie;
- deformaţia minimă apare la grosime mai mare de tablă;
- în cazul sudării grosimi diferite de tablă cu aceaşi energie liniară, cea care se va deforma în măsură mai mare va fi tabla mai subţire;
- în cazul sudării cu electrozi înveliţi deformaţia tablei depinde şi de tipul electrodului utilizat;
- deformaţia minimă apare în cazul sudării cu diametru de electrod mai mic;

Cât priveşte deformaţia unghiulară în cazul sudării cap la cap a tablelor subţiri cercetările experimentale au permis concluziile:

- deformaţiile unghiulare scad la micşorarea energiei liniare;

➢ în cazul sudării MAG, la aceeaşi grosime a tablelor, deformaţia unghiulară mai mică se obţine la sudare spre stânga.

Cu privire la contracţia transversală şi longitudinală în cazul sudării cap la cap a tablelor subţiri cercetările experimentale au permis următoarele concluzii:

➢ procedeul de sudare care produce cele mai mici contracţii transversale este sudarea în mediu de gaz protector MAG;

➢ procedeul de sudare în mediu de gaz protector MAG produce contracţiile longitudinale minime;

➢ la procedeul de sudare în mediu de gaz protector MAG respectiv MAG în curent pulsat, contracţia transversală are un maxim la sudarea grosimii de 2,0 mm, după care descreşte pe măsura creşterii grosimii tablei;

Referitor la optimizarea metodelor de îndreptare s-a stabilit că, procedeul de îndreptare optim este cel cu electromagnet şi încălziri locale, atât din punct de vedere al costurilor îndreptării cât şi a calităţii, a eficienţei respectiv al timpului de realizare a îndreptării. S-au stabilit experimental parametrii regimului de îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale, realizând optimizarea formei plăcilor cu găuri: grosimea plăcii, amplasarea găurilor şi distanţa dintre ele, unghiul zencului, numărul de găuri.

Încercările efectuate pentru a simula apariţia deformaţiilor, dilataţiilor şi contracţiilor în urma sudării peretelui lateral pe schelet, atât în stare liberă cât şi rigidizată au permis concluziile:

➢ în cazul grosimii tablelor de 1,5 mm respectiv 2 mm tabla cu deformaţii mari este cea sudată în poziţie liberă. În cazul grosimii de 2,5 mm deformaţia depinde şi de regimul de sudare utilizat. Tabla cu deformaţia maximă este cea sudată liber, cu energie liniară mai mică, după care tabla sudată în poziţie rigidizată, iar cea mai puţin deformată este cea sudată liber cu energie liniară mai mare;

➢ în cazul sudării tablelor în poziţie rigidizată variaţia ondulaţiei este mai mică ca şi în cazul tablelor sudate liber. De exemplu la table de grosime 1,5 mm diferenţa de săgeată este de aprox. 1 mm la table sudate rigidizat şi este de aprox. 2,8 mm la cele sudate liber.

Aceste concluzii pot fi luate în considerare în cazul proiectării unor structuri sudate cu grosime mică, pentru ca deformaţiile rezultate în urma realizării structurii să fie minime.

Cu privire la deformaţia în cazul încălzirii cu flacără a tablelor subţiri liber şi rigidizat s-a constatat că:

➢ există o lege de dilatare şi contracţie în timpul aplicării încălzirilor locale;

➢ contracţia apărută în urma a 5 puncte încălzite este direct proporţională cu contracţia apărută la încălzirea unui punct;

➢ contracţia este mai mare în cazul în care aceeaşi grosime de tablă, cu acelaşi număr de puncte este încălzită la o temperatură mai mare, dar nu mai mare de 700°C;

➢ în urma experimentărilor se poate afirma că o încălzire locală punctiformă la cca. 700°C produce o contracţie de 0,05 mm;

➢ indiferent de grosimea tablelor, deformaţia mai mare apare în cazul tablelor încălzite în 5 puncte, deci la introducere de cantitate mai mare de căldură în componente;

➢ în cazul utilizării aceluiaşi regim s-au deformat mai mult tablele încălzite liber decât cele încălzite rigidizat.

Referitor la modul de deformare a tablelor subţiri prezentarea spaţială a tablelor deformate/ondulate după sudare sau după încălzire cu flacără oxiacetilenică, cu ajutorul programului MatLab, a permis concluzia că, modul de ondulare a tablelor este aleatorie, nu se poate stabili o regulă privind locul şi mărimea deformaţiilor. Explicaţia acestui fenomen constă în existenţa unui număr mare de defecte sau imperfecţiuni de reţea în cristalele reale care influenţează proprietăţile materialelor şi totodată întreaga comportare a acestora. Defectele punctiforme: vacanţe şi atomi interstiţiali, defectele liniare: dislocaţii, şi defectele de suprafaţă perturbă reţeaua cristalină. Dislocaţiile apar în orice material metalic şi ele sunt create fie prin procesul de cristalizare fie în timpul prelucrărilor prin deformare plastică. Rezultă că privind deformarea/ondularea tablelor subţiri în urma încălzirii sau sudării lor, dislocaţiile au un rol hotărâtor. Deoarece locul de apariţie a acestor imperfecţiuni în material este aleatoriu, nu se poate determina precis o lege de apariţie a ondulării tablelor subţiri.

Se apreciază ca principale **contribuţii personale şi elemente de noutate** realizate în urma cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat următoarele:

➢ Stabilirea procedeelor optime de sudare la realizarea cutiei vagonului călători atât din punct de vedere a tehnologiei de sudare cât şi a obţinerii de deformaţii, contracţii şi ondulări a tablelor minime. Astfel procedeul de sudare optim pentru realizarea îmbinărilor scheletului peretelui lateral este procedeul MAG, procedeul de sudare optim pentru realizarea tablei învelitoare este procedeul de sudare prin presiune în linie cu platbandă, procedeul de sudare optim pentru realizarea îmbinărilor între peretele lateral şi acoperiş este procedeul MAG.

➢ Realizarea sintezei deformaţiilor şi tensiunilor apărute la sudarea tablelor subţiri, sinteză care a stat la baza proiectării dispozitivelor utilizate la sudarea peretelui lateral al vagoanelor călători respectiv la stabilirea ordinii de sudare.

➢ Determinarea deformaţiilor, contracţiilor, ondulării tablelor subţiri apărute în urma sudării sau încălzirii locale cu flacără. În general contracţiile măsurate (tab.6.3.) sunt mai mari ca cele determinate analitic pe baza relaţiilor statistice (3.10.). În urma acestor diferenţe se propune corectarea relaţiei (3.10.) cu coeficientul: g=1,2486 (6.4.), unde *g* este media aritmetică a raporturilor contracţiilor transversale măsurate şi contracţiilor transversale calculate (6.3.):

➢ Evaluarea forţelor care iau naştere în tablele subţiri sudate sau încălzite cu flacără oxiacetilenică în stare rigidizată. Alura curbelor de variaţie a forţelor în placă este asemănătoare, deci fenomenele sunt identice, diferenţele se datorează grosimii tablelor respectiv diferenţei regimurilor de sudare. Din analiza forţelor rezultate care au luat naştere în epruvetele rigidizate sudate sau încălzite cu încălziri locale putem trage concluzia că forţele de tracţiune sunt de 2-3 ori mai

mari în cazul probelor sudate decât în cazul epruvetelor încălzite cu încălziri locale, explicația fiind cantitatea mai mare de energie introdusă în table în cazul sudării. În cazul forțelor de compresiune balanța se înclină spre cele încălzite cu încălziri locale. Aceste forțe sau tensiuni nu sunt mari, deci nu reduc mult capacitatea portantă a structurilor.

- În baza studiilor şi cercetărilor experimentale efectuate respectiv a experienței autorului prezentei teze s-a întocmit o cartă a metodelor de îndreptare a tablelor subțiri.
- Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri. S-au stabilit relații de calcul pentru determinarea costurilor îndreptării cu cele 5 metode studiate: îndreptare cu încălziri locale cu flacără oxigaz şi răcire cu apă, îndreptare cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi înveliți şi răcire cu apă, îndreptare cu încălziri locale cu arc electric cu electrozi de cărbune şi răcire cu apă, îndreptare cu electromagnet şi încălziri locale, îndreptare cu placă vacumetrică şi încălziri locale, relații care se pot utiliza şi la îndreptarea altor structuri metalice deformate.
- Rezultatele încercărilor experimentale de încălzire cu flacără oxiacetilenică, atât pe table libere cât şi rigidizate, au permis elaborarea unui model de calcul privind stabilirea numărului de puncte necesare a fi încălzite pentru a elimina prin contracție deformația tablei. Urmând acest model se poate determina numărul de puncte necesare a se încălzi pentru îndreptarea unei suprafețe cu orice dimensiune. Respectiv, se poate determina analitic manopera necesară îndreptării pereților.

BIBLIOGRAFIE

[1] Aichele, G. - 116 reguli de sudare în mediu de gaz protector. Ed. Sudura, Timişoara, 1999.

[2] Audoly,B., Roman, B., Pocheau, A. - Secondary buckling patterns of a thin plate under in-plane compression. The European Physical Journal B 27. 7-10, 2002.

[3] Baum,L Fichter,V. - Der Schutzgasschweiβer teil II MIG/MAG –Schweiβen DVS verlag Gmbh Düsseldorf 1999.

[4] Bădescu, P. – Metode practice pentru reducerea deformațiilor remanente la sudarea construcțiilor metalice. Ed.Sudura, Timişoara, 2000.

[5] Béres L., Komocsin, M. - Acélok, öntöttvasak javító-és felrakóhegesztése. O pont Kiadó, Budapest, 1995.

[6] Béres, L., Gáti, J., Gremsperger, G., Komócsin, M. - Hegesztési zsebkönyv, Cokom Kft, 2003.

[7] Beyer,M., Machnenko,V. - Schweiβdeformationen Kastenförmiger Träger, ZIS-Mitt, Halle 28, 1986.

[8] Blackwell, P., L., Griffiths, M., D., Ward, T., Gardiner, S. - A Computer Modeling Capability for Shot Peen Forming. Metal Finishing News, in Vol. 5 - March Issue - Year 2004. www.mfn.li/article.php?id=214

[9] Bohlen, Ch. - Ausbildung im Flammpunctrichten. Praktiker 22, 1970.

[10] Bohlen, Ch. - Das Flammrichten von Sonderwerkstoffen. Praktiker 22, 1970.

[11] Bohlen, Ch. - Fehlermöglichkeiten beim Flammrichten. Praktiker 22, 1970.

[12] Burcă, M., Negoițescu, S. - Sudarea MIG/MAG. Ed. Sudura, Timişoara, 2002.

[13] Burcă, M., Țunea, D. - Tehnologia sudării prin topire - lucrări de laborator. Lito U.P. Timişoara, 1993.

[14] Cicală, F. – Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale. Ed. Politehnica, Timişora, 1999.

[15] Conrardy, C. – Results of Empirical Evaluation of Techniques to Control Distortion in Thin Section Panels. – Phase 2 Task 7, EWI Report No. 40113GNF/R-12/96, December 11, 1996.

[16] Conrardy, C., Dull, R. – Control of Distortion in Thin Ship Panels. Journal of Ship Production, May, 1997 pg. 83-92.

[17] Conrardy, C., ş.a. - Practical Welding Techniques to Minimize Distortion in Lightweight Ship Structures. Paper No. 2005 – pag.27.

[18] Constantinescu, G., Constantinescu, A. - Îndrumar pentru alegerea oțelurilor în construcția de maşini. O.I.D.A.T.M.C.G.F.F. Bucureşti, 1986.

[19] Dalban, C. – Construcții metalice. Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1983.

[20] Dehelean, D. – Sudarea prin topire. Ed. Sudura, Timişoara, 1997.

[21] Deng, D., Murakawa, H. – FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures. Computational Material Science, vol.43, issue 4, pp. 591-607, 2008.
[22] Deng, D., Murakawa, H. – Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. Computational Material Science, vol.43, issue 2, pp. 353-365, 2008.
[23] Deng, D., Murakawa, H., Liang, W. – Numerical simulation of welding distortion in large structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.196, issues 45-48, pp. 4613-4627, 2007.
[24] Deng, D., Murakawa, H., Liang, W. – Prediction of welding distortion in a curved plate structure by means of elastic finite element method. Journal of Materials Processing Technology, vol.203, issues 1-3, pp. 252-266, 2008.
[25] Deng, D., Serizawa, H., Murakawa, H. – Prediction of Welding Distortion during the Assembly Process of Thin Plates Structures (2nd Report). Influence of Welding Sequence on Welding Distortion. Journal of Kansai Society of Naval Arhitects, Japan, pp. 97-104, 2004.
[26] Domanovszki, S., ş.a. – Hegesztési feszültségek és alakváltozások. Ed. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1969.
[27] Dumbravă, D., Şarlău, C. – Proiectarea maşinilor, utilajelor şi construcțiilor sudate, îndrumător de lucrări. Lito Timişoara, 1992.
[28] Farkas, J. - Hegesztés okozta feszültségek és alakváltozások. Miskolc, NME 1964.
[29] Farkas, J., Jármai, K. - Analysis and optimum design of metal structures. Balkema Publishers Rotterdam, 1997.
[30] Gáti, J., Béres, L. ş.a. - Hegesztési zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1996.
[31] Ghinea, M., Firețeanu, V. – Matlab – calcul numeric – grafică – aplicații. Ed. Teora, Bucureşti, 1997.
[32] Gliță, Gh., ş.a. – Proiectarea dispozitivelor pentru sudare. Ed. Lux Libris, Braşov, 1997.
[33] Gremsperger, G. - Fémszerkezetek gyártása III/A (Hegesztési feszültségek és deformációk). Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
[34] Gremsperger, G., Kristóf, Cs. - CO_2 védőgázas ívhegesztés. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1981.
[35] Gremsperger, G., ş.a. - Hegesztési kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1985.
[36] Grix, H. - Erfahrungen mit Flammricht. Lehrgängen Schw. Schneiden 13, 1961.
[37] Hänsch, H. - Schweiβeigenspannungen und Formänderungen an stabartigen Bauteilen - Berechnung und Bewertung. Fachbuchreiche Schweiβtetechnik Band-Verlag – Düsseldorf, 1984.
[38] Herden, G. - Hegesztési kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.

[39] Huang, T.,D., ş.a. – Fabrication and Engineering Technology for Lightweight Ship Structures. Part 1: Distorsions and Residual Stresse in Panel Fabrication, j. Ship Production, The Society of NavalArchitects and Marine Engineers, Volume 20, No. 1, February 2004, pp. 43-59.
[40] Huang, T.,D., ş.a. – Residual Stresses and Distorsions in Lightweight Ship Panel Strustures. Northrop Grumman Technology Review Journal, Vol. 11, No. 1, Spring/Summer 2003, pp. 1-26.
[41] Jarre, F., Stoer, J. - Optimierung. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
[42] Katsuhiko, J. – Thin plate welding 1st – Press Working, vol.43, no1, pag. 101-103, 2005.
[43] Kirk, Conrardy, Michaleris – Control of Residual Stresses and Distortion in Thin Panel Fabrication – Review of Phase 1 studies, January 1995, Navy Joining Center project report J8662.
[44] Leggatt, R.H., White, J.D. – Predicting shrinkage and distortion in welded plate. Residual stresses in welded constructions and their effects. Abington, Cambr: The Welding Institute, pp. 119-132, 1997.
[45] Lindgren, L.E. – Numerical modeling of welding. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 195, issues 48-49, pp. 6710-6736, 2006.
[46] Mahlke, B. - Termisches Richten von Trägern mit verbesserter Reproduzierbarkeit, Schweiβtechnik Berlin 36, 1986.
[47] Malisius, R. - Schrumpfungen und Risse beim Schweiβen, 4 Auflage. Fachbuchreiche schweiβtehnik Band 10 DSV - Verlag Düsseldorf, 1977.
[48] Masubuchi, K. - Analyse von Schweiβspanunngen. Verlag Pergamon Press, New York, 1980.
[49] Masubuki ,K. - Residual stresses and distorsion. ASM. Handbook vol .6., Miami, 1993.
[50] McGowan, D. – Understanding Distortion. Welding Journal , p.76, September 2004.
[51] McPherson, N.A – The management of thin plate distortion. Join 3 Conference, Lappeenrata, Finland, August 2007.
[52] McPherson, N.A – Thin plate distortion. The ongoing problem in shipbuilding. Journal of Ship Production, vol.23, no. 2, pp. 94-117, 2007.
[53] **Meszar, G.** - Metode de reducere a tensiunilor şi deformațiilor îmbinărilor sudate. Referat Nr. 2, 76 pag. 2004.
[54] **Meszar, G.** - Optimizarea metodelor de îndreptare a tablelor subțiri. Referat Nr.3, 58 pag. 2008.
[55] **Meszar, G.** - Tehnologii specializate de sudare a tablelor subțiri. Referat Nr. 1, 82 pag. 2004.
[56] **Meszar, G.** - Tehnologii specializate de sudare cap la cap a tablelor subțiri din componența cutiei vagoanelor clasă. Deformații apărute la sudare. Al VI-lea Simpozion Internațional „Tinerii şi cercetarea multidisciplinară”, Timişoara, 6-7 noiembrie 2003.

[57] **Meszar, G.,** Tusz, F. - Procedee de sudare în mediu de gaze protectoare. Îndrumător de laborator pentru uzul studenților, Ed. Universității „Aurel Vlaicu" Arad, 2005, ISBN 973-752-011-4.
[58] **Meszar, G.,** Tusz, F. - A synthesis of the metods of straightening the thin steel plates in the railroad wagons building. The hot straightening. Proceedings international conference VSU 2006, 22-23 may 2006, Sofia Bulgaria, 2006, vol I., ISBN-10. 954-331-009-2; ISBN-13: 978-954-331-009-8, pag. II 20-II 24.
[59] **Meszar, G.,** Tusz, F. - Studiul contracțiilor unghiulare apărute la sudarea tablelor subțiri. Analele Universității "AUREL VLAICU"Arad, 2004. ISBN 1582-3431 pag. 502-507.
[60] **Meszar, G**., Tusz, F., Muncut, E., Sima, Gh. - A Synthesis of the metods of Straithening the thin plates in the railway wagons building. The Principle of the aparition of the bendings, Scientific and Technical Bulletin, Series: Mechanical Engineering vol I. No. 1, 2005, "Aurel Vlaicu" of Arad, ISSN 1584-918 X, 50-54.
[61] **Meszar, G.,** Tusz, F., Muncut, S., Sima, Gh. - A Synthesis of the metods of Straithening the thin iron plates in the railroad wagons building. Tehnological methods, Scientific and Technical Bulletin, Series: Mechanical Engineering, vol I. No. 1, 2005, "Aurel Vlaicu" Univ. of Arad, ISSN 1584-918 X, 55-61.
[62] **Meszar,G.,** Tusz, F., Tanacs, Z. - Tehnologia sudării prin topire. Îndrumător de proiectare pentru uzul studenților. Ed. Univ. "Aurel Vlaicu" Arad, 2000, ISBN 973-9361-36-6.
[63] Michaleris, P., Dantzig, J., Tortorelli, D. – Minimazation of Welding Residual Stress and Distortion in Large Structures. Welding Journal, p.361-s, Nov. 1999.
[64] Michaleris, P., DeBiccari, A. – Prediction of welding distortion. Welding Journal 76(4): 172-s to 179-s. 1997.
[65] Mikami, I., Niwa, K. - Ultimate compressive strength of orthogonally stiffened steel plates. ASCE 122:6, 674-682., 1996.
[66] Miklosi,V. ş.a. - Bazele proceselor de sudare, EDP Bucureşti, 1984.
[67] Miloş, L. - Procese de sudare. Editura Politehnica, 2006.
[68] Miloş, L. - Tăierea termică. Ed. Sedona, Timişoara, 1996.
[69] Mitelea, I., Budău, V. - Materiale şi tratamente termice pentru structuri sudate. Ed. De Vest, Timişoara, 1992.
[70] Mitelea, I., Lugscheider, E., Tillman, W. - Ştiința materialelor în construcția de maşini. Ed. Sudura, Timişoara, 1999.
[71] Müller, R. - Einfluβ des Schweiβverfahrens auf die Schrumpfung von Stehlblechen Schweiβtechnik, Berlin 16, 1966.
[72] Muncuț, S., Sima,Gh., Tusz,F., **Meszar, G.** - Deformații comparative la sudarea în tandem şi monofilar. Analele Universității "AUREL VLAICU"Arad, 2004, ISBN 1582-3431, pag.508-515.

[73] Murakawa, H., Deng, D., Shibahara, M. – Prediction of welding distortion during the assembly process of thin plates structures (1st Report). Prediction of welding distortion considering gap and misaligment. Journal of Kansai Society of Naval Arhitects, Japan, no.238, pp. 163-172, 2002.
[74] Neumann A. - Schweisstechnisches Handbuch fürKonstrukteure teil I-III DSV-Verlag Düsseldorf, 1990.
[75] Neumann A., Kluge, D. - Fertigungsplanung in der Schweiβtechnik DVS Verlag Düsseldorf, 1992.
[76] Okerblom, N. O. – Razcet deformacii metalokonstrukcii pri svarke, Moskva-Leningrad, 1955.
[77] Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Kim, B. J. - Large deflection orthotropic plate approach to develop ultimate strength formulations for stiffened panels under combined biaxial compression/tension and lateral pressure. Thin -Walled Structures 39, 215-246., 2001.
[78] Park, J.U., Lee, H.W. – Effects of initial condition of steel plate on welding deformation and residual stress due to welding. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 21, no.3, pp.426-435, 2007.
[79] Pfeiffer, R. - Das flammrichten von Blech und Blechkostruktionen, Blech 10, 1963.
[80] Pfeiffer, R. - Flammrichten im Maschinenbau – Beispiele aus der Praxis. Praktiker 36, 1984.
[81] Pfeiffer, R. - Flammrichten. Fachbuchreihe Schweiβtechnik Bd. 20 Schweiβtechnik Düsseldorf, 1960.
[82] Pfeiffer, R. – Handbuch der Flammrichttechik, Düsseldorf, 1996.
[83] Pfeiffer, R. – Schrumpfung, Spannung und Verwerfung ifre Verminderung oder behebung Bd, 36 der Fachbuchreihe – Schweißtehnik S 165-70 Deutscher Verlag für Schweißtehnik GmbH Düsseldorf, 1964.
[84] Pfeiffer,R. - Rrichten und Umformen mit der Flamme. Schweiβtechn. Praxis band 10 DVS - Verlag, Düsseldorf, 1989.
[85] Popp, M. - Richten mit Kohlenelektrode im Schienenfahrzeugbau. Deutsche. Eisenbautechnik 9, 1961.
[86] Radaj, D. – Heat effects of welding. Springer – Verlag, Berlin, 1992.
[87] Radu, D., Dietrich, M. - Tehnologia sudării electrice. Lito Timişoara, 1980.
[88] Sahnel – Veit, - Grundlagen der gestaltung geschweisster Stahlkonstruktionen. Düsseldorf, DVS-Verlag, 1989.
[89] Sălăgean, T. – Optimizarea proceselor de sudare –pentru uzul studenților. I.P.T.V. Timişoara, 1984.
[90] Sălăgean, T. - Tehnologia procedeelor de sudare cu arc. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1985.
[91] Sălăgean, T., ş.a. - Optimizarea sudării cu arcul electric. Ed.Tehnică, Bucureşti, 1988.
[92] Schmidt, R. - Deformationsunterschungen an Schweiβteil Diss TH, Magdeburg, 1969.

[93] Schultz, E. - Theoretische und experimentelle Untersuchungen der thermoplastischen Deformation beim Stumpfschweiβen von Platten. Wielhelm-Pieck-Universität, Rostock, 1972.
[94] Schumacher, K. - Flammwärmen in der industriellen Praxis. Technica 39, 1990.
[95] Sima, Gh., Tusz, F. - Tehnologia sudării prin presiune. Ed. Universității „Aurel Vlaicu" Arad, 1999.
[96] Statnikov, R. B., Matusov, J. B. – Multicriteria Optimization and Engineering. Chapman & Hall, London, 1979.
[97] Tsai, C., L. Park, S.C., Cheng, W.T. – Welding Distorsion of a Thin-Plate Panel. Welding Research Supplement, 156-s-165-s, May 1999.
[98] Tusz, F. – Îndreptarea carcaselor metalice după sudare cu ajutorul electromagneților, Construcția de maşini, p.631-636, Bucureşti, 1988.
[99] Tusz, F. – Tratat de sudură. Ed. Sudura, Timişoara, 2003.
[100] Tusz, F. - Utilajul şi tehnologia sudării. Lito Arad, 1996.
[101] Tusz, F., **Meszar, G.** - A synthesis of the metods of straightening the thin steel plates in the railroad wagons building. The cold straightening. Proceedings international conference VSU 2006, 22-23 may 2006, Sofia Bulgaria, 2006, vol I., ISBN-10. 954-331-009-2; ISBN-13: 978-954-331-009-8, pag. II14-II19.
[102] Tusz, F., **Meszar, G**., Muncuț, S. - Tehnologia de remaniere a şasiului autovehiculului auto-şa. Sudura, an XIII, nr.3., 2003. Timişoara, ISSN 1453-0384, pag. 26-28.
[103] Tusz, F., **Meszar,G.,** Rada, G. - Determinarea experimentală a deformațiilor longitudinale, transversale şi unghiulare. Sudura perspective pentru noul mileniu - Conferința anuală ASR, Cluj Napoca 26-28 septembrie 2001.
[104] Tusz, F., Miklos, L., Durgheu, N. - Reducerea deformațiilor remanente din stâlpii vagoanelor platformă. Conferință jubiliară 60 de ani de cooperare ştiințifică în domeniul sudurii. ASR Romania, Timişoara, 2000.
[105] Tusz, F., Muncuț, E., **Meszar, G**. - Proiectarea şi încercarea structurilor sudate. Îndrumător de laborator pentru uzul studenților, Ed. Universității „Aurel Vlaicu" Arad, 2005, ISBN 973-752-010-6, 64 pag.
[106] Tusz, F., **Tusz, G**. - A munkadarab deformácioja a hegesztés során. Hegesztéstechnika, An VIII, Nr.1,1997, Budapest, pag. 29-30.
[107] Tusz, F., **Tusz., G.,** Sima, Gh. - Utilajul şi tehnologia sudurii. Îndrumător pentru lucrări de laborator pentru studenți, Ed. Univ. "Aurel Vlaicu" Arad, 1996.
[108] Ueda, Y., Yuan, M.G. – Prediction of residual stressed in butt welded plates using inherent strains. Journal of Engineering Materials and Technology, vol.115, no.10, p. 417s-423s, 1993.
[109] Uelze, A. - Schweiβverformungen beim Bau von Reisezugwagen Schw.-Schn. 43, 1994.
[110] Vízkelety, K. - Ívhegesztés. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1983.

[111] Vinokurov, V.A. - Welding stresses and distortion. Wetherby: British Library 1977.
[112] Yamaoka, T., Seto, K., Murakawa, H. – Buckling deformation of thin plates under butt welding. Yosetzu Kozo Shinpoyiumn Kien Ronbunsku, p. 297-303, 1997.
[113] Yu, Ch., Schafer, B. W. – Distortional buckling of C and Z members in bending. Progress Report to AISI. The Johns Hopkins University. 2004.
[114] *** - Colecția de standarde comentate în domeniul sudării şi tehnicilor conexe, Ed. Sudura, Timişoara, vol.I şi vol.IV, 2001.
[115] ***-Merkblatt DVS 1002 teil 1: Schweiβeigenspannungen. Eiteilung, benennung, Erklärunge (12.83).
[116] *** – Control of distorsion in welded fabrications. The Welding Institute, Abington Cambridge, 1966.
[117] www.ansys.com/events/proceedings/2002/PAPERS/57.pdf

Anexa 1 – Paramaterii de sudare şi valorile deformațiilor la sudarea cu diferite procedee de sudare

Tabel 1.1. Sudarea SE a tablelor de grosime s=1,5 mm; poziție de sudare orizontală; deschidere rost r=0.

Nr. probă	Tip îmbi-nare	Tip electrod	d_e, mm	I_s, A /felul curentului	U_a, V	v_s, cm/s	E_l, J/cm
1.1.	Cap la cap	Universal Rutilic	1,6	40/cc+	18	0,38	1643
1.2.		Universal Rutilic	2,0	48/cc+	18	0,45	1665
1.3.		Superbaz	2,0	58/cc+	18	0,46	1916
1.4.		Supertit fin	2,5	46/cc-	19	0,32	2300
1.5.		Supertit fin	2,5	56/cc-	19	0,44	2055
1.6.		Universal Rutilic	2,5	56/cc-	18	0,497	1724
1.7.		Superbaz	2,5	60/cc+	21	0,594	1803
1.8.		Superblu	2,5	60/cc+	21	0,5	2142
1.9.	În colț prin supra-punere	Universal Rutilic	1,6	44/cc-	22	0,379	2171
1.10.		Universal Rutilic	2,0	46/cc-	19	0,302	2460

Tabel 1.2. Sudarea SE a tablelor de grosime s=2,0 mm; poziție de sudare orizontală

Nr. probă	Tip îmbi-nare	Tip electrod	r, mm	d_e, mm	I_s, A / felul curentu-lui	U_a, V	v_s, cm/s	E_l, J/cm
2.2.	Cap la cap	Universal Rutilic	0	2,0	54/cc-	18	0,4	2065
2.3.		Supertit fin	0	2,5	56/cc-	18	0,371	2310
2.4.		Superbaz	0	2,0	60/cc+	19	0,476	2035
2.5.		Superbaz	0	2,5	66/cc+	22	0,5	2468
2.6.		Superblu	0	2,5	74/cc-	20	0,444	2833
2.7.		Supertit fin	1,5	3,25	110/cc-	18	-	-
2.8.		Supertit fin	1,5	2,5	60/cc-	18	0,369	2488
2.9.		Superblu	1,0	2,5	60/cc-	22	0,444	2527
2.10		Universal Rutilic	1,4	2,0	44/cc-	21,8	0,374	2200
2.11		Supertit fin	0	3,25	110/cc-	19	0,69	2575
2.12	În colț prin supra-punere	Universal Rutilic	-	2,5	60/cc-	20	0,323	3158
2.13		Universal Rutilic	-	2,0	44/cc-	20	0,277	2700

Tabel 1.3. Sudarea SE a tablelor de grosime s=2,5 mm; poziție de sudare orizontală

Nr. probă	Tip îmbi-nare	Tip electrod	r, mm	d_e, mm	I_s, A / felul curentu-lui	U_a, V	v_s, cm/s	E_l, J/cm
3.1	Cap la cap	Superbaz	1,4	2,5	60/cc+	22	0,513	2187
3.2.		Universal Rutilic	1,5	2,0	56/cc-	19	0,417	2170
3.3.		Superblu	1,5	2,5	68/cc-	21	0,426	2849
3.4.		Supertit fin	1,5	2,5	68/cc-	22	0,4	3179
3.5.		Uni Rutilic	1,6	2,5	68/cc-	22	0,378	3364
3.6.		Supertit fin	1,5	3,25	92/cc-	18	0,49	2873
3.8.	În colț prin supra-punere	Supertit fin	-	3,25	92/cc-	21	0,571	2876
3.9.		Supertit fin	-	2,5	76/cc-	20	0,408	3166
3.10		Superblu	-	2,5	76/cc-	20	0,426	3033

Tabel 1.4. Parametrii de sudare utilizați la sudarea MAG, gaz de protecție Corgon 18, sârmă SG2, poziție de sudare orizontală PA

Nr. probă	Tip îmbinare	s mm	d_s mm	r mm	I_s A	U_a V	v_s cm/s	E_l J/cm	v_{ae} m/min	D_g l/min
1.11.	Cap la cap	1,5+1,5	1,2	0	106	16	0,33	4252	2,2	15
2.1.	Cap la cap	2,0+2,0	1,2	0	96	16,2	0,33	4006	2,2	15
3.11.	În colț prin suprapunere	2,5+3,0	1,2	0	104	16,2	0,39	3654	2,2	15
3.7.	Cap la cap	2,5+2,5	1,2	1,5	104	16,6	0,38	3812	2,2	15
1.	În colț prin suprapunere	2,0+3,0	1,0	0	96	16,7	0,30	4410	3,1	13
2.	În colț prin suprapunere	2,5+3,0	1,0	0	92	17,2	0,32	4203	3,2	13
3.	Cap la cap	1,5+1,5	1,0	1,2	88	17,1	0,38	3288	3,1	13
6.	Cap la cap	1,5+1,5	1,0	0	90	17,1	0,45	2907	3,1	13
P	Cap la cap	1,5+1,5	1,0	1,2	71	17	0,35	2873	2,5	13
11	Cap la cap	2,5+2,5	1,0	0	85	17	0,39	3125	3,1	13
12	Cap la cap	2,5+2,5	1,0	1,2	90	17,1	0,22	5892	3,1	13

Tabel 1.5. Parametrii de sudare utilizați la sudarea MAG în curent pulsat, gaz de protecție Corgon 18, sârmă SG2, poziție de sudare orizontală, d_s=0,8 mm

Nr probă	Tip îmb.	s mm	r mm	I_s A	U_a V	v_s cm/s	E_l J/cm	v_{ae} m/min	D_g l/min	Observații
50	Cap la cap	1,5+1,5	0	40	19,8	0,236	2853	2,8	15	Pe suport de cupru
51	Cap la cap	1,5+1,5	1,2	54 40 30	21 20 19,2	0,170 0,129 0,178	5670 5271 2751	4 3,2 2,1	15	Pe suport ceramic
52	Cap la cap	2,0+2,0	0	68	21,6	0,306	4080	5,0	15	Pe suport ceramic
53	Cap la cap	2,0+2,0	1,2	40	20,2	0,182	3774	2,8	15	Pe suport de cupru
54	Cap la cap	2,5+2,5	0	74	22	0,342	4046	5,5	15	Pe suport de cupru
55	Cap la cap	2,5+2,5	1,2	54	20,4	0,251	3731	3,5	15	Pe suport ceramic
56	În colț prin suprapunere	1,5+3,0	0	54	21,4	0,291	3375	4,0	15	
57	În colț prin suprapunere	2,0+3,0	0	54	21,8	0,289	3462	4,3	15	
58	În colț prin suprapunere	2,5+3,0	0	62	21,8	0,341	3369	4,6	15	

Tabel 1.6. Parametrii de sudare utilizați la sudareaWIG a probelor

Nr.probă	s mm	Tip îmbinare	r mm	d_w mm	d_e mm	I_s A	U_a V	v_s cm/s	E_l J/cm	D_g l/min
29 fără MA	2+2	Cap la cap	0	2,5	-	85	10	0,345	2094	10
30 cu MA	2+2	Cap la cap	1	2,5	2,0	85	10	0,217	3329	10
31 fără MA	1,5+1,5	Cap la cap	0	2,5	-	60	8	0,35	1166	10
32 cu MA	1,5+1,5	Cap la cap	1	2,5	2,0	72	9	0,233	2364	10
33 fără MA	2,5+2,5	Cap la cap	0	2,5	-	100	12	0,323	3158	10
34 cu MA	2,5+2,5	Cap la cap	1	2,5	2,0	106	13	0,227	5160	10
35 cu MA	3+2,5	În colț prin suprapunere	0	2,5	2,0	130	15	0,323	5132	10
36 fără MA	3+2	În colț prin suprapunere	0	2,5	-	107	13	0,235	5031	10
37 fără MA	3+1,5	În colț prin suprapunere	0	2,5	-	93	11	0,235	3700	10

Unde:
MA – material de adaos

Tabel 1.7. Parametrii de sudare utilizați la sudarea prin presiune în linie cu material de adaos bandă de 4 x 0,2 mmxmm

Nr. probă	s mm	I_{smax} kA	F_s kN	v_s m/min	D_r mm	b_r mm
1	1,5	20	4	1,1	280	16
2	2,0			0,9		
3	2,5			0,8		

Unde:

- D_r- diametrul rolelor; b_r- lățimea rolelor; v_s- viteza de sudare; F_s- forța de apăsare; I_{smax}- curentul de sudare maxim; s- grosime componente

Tabel 1.8. Contracțiile apărute la sudarea tablelor cu grosimea s=1,5 mm

Nr. probă	Contracții				
	Δb_1 (mm)	Δb_2 (mm)	Δb_{teor} (mm)	Δl (mm)	Δl_{teor} (mm)
1.1.	0,2	1,2	2,1	0,8	0,683
1.2.	0,4	0,8	2,13	0,2	0,692
1.3.	0,7	1,2	2,55	0,1	0,829
1.4.	0,55	0,9	2,56	0,7	0,834
1.5.	0,8	1,05	1,89	0,4	0,615
1.6.	0,1	0,95	1,59	0,9	0,516
1.7.	0,55	0,9	2,21	0,6	0,720
1.8.	0,4	1,0	1,97	0,7	0,640
1.9.	0	0	-	0,5	-
1.10.	0	0	-	0,9	-

Tabel 1.9. Contracțiile apărute la sudarea tablelor cu grosimea s=2,0 mm

Nr. probă	Contracții				
	Δb_1 (mm)	Δb_2 (mm)	Δb_{teor} (mm)	Δl (mm)	Δl_{teor} (mm)
2.2.	0,3	1,1	1,82	0,1	0,593
2.3.	0,1	1,2	2,03	0,2	0,663
2.4.	0,6	0,8	1,92	0,4	0,626
2.5.	0,5	0,45	1,70	0,6	0,554
2.6.	0,4	1,3	1,95	0,35	0,636
2.8.	0,7	1,1	1,72	0,3	0,559
2.9.	0,5	1,2	1,74	0,5	0,568
2.10.	0,1	1,3	1,518	0,1	0,494
2.11.	0,8	0,8	2,24	0,7	0,730
2.12.	0	0	-	0,2	-
2.13.	0	0	-	0,5	-

Tabel 1.10. Contracțiile apărute la sudarea tablelor cu grosimea s=2,5 mm

Nr. probă	Contracții				
	Δb_1 (mm)	Δb_2 (mm)	Δb_{teor} (mm)	Δl (mm)	Δl_{teor} (mm)
3.1.	0,4	0,8	1,54	0,4	0,50
3.2.	0,3	0,7	1,51	0,4	0,492
3.3.	0,3	1,1	1,57	0,2	0,512
3.4.	0,3	1,1	1,75	0,2	0,571
3.5.	0,4	0,95	1,86	0,7	0,604
3.6.	0,6	1,1	1,59	0,2	0,516
3.8.	0	0	-	0,8	-
3.9.	0	0	-	0,15	-
3.10.	0	0	-	0,6	-

Tabel 1.11. Valori măsurate ale deformației/săgeții la sudarea tablelor cu grosimea s=1,5mm

Nr. probă	f, mm						β, °	
	Puncte de măsurare							
	1	2	3	4	5	6	$\beta_î$	β_s
1.1.	-4,5	-4,2	-6,5	3,5	5	3,5	-6	-10,5
1.2.	4,3	5	5,5	-4,5	-5	-4	5	9
1.3.	4,5	5	9	-4	-6	-4,2	4	9
1.4.	4,5	5	6,5	-4,5	-5,5	-6	5	8,5
1.5.	-6,5	-5	-8,5	3,5	6	4	-5,5	-12
1.6.	4	4	5,5	-3,5	-4,5	-4,5	4	7,5
1.7.	5	4,5	6	-4,5	-6	-5	5,5	7
1.8.	4,5	4,4	5	-3	-4,5	-4	4,5	6,5
1.9.	-	-	-	-	-	-	1,5	7
1.10.	-	-	-	-	-	-	2	8

Tabel 1.12. Valori măsurate ale deformației/săgeții la sudarea tablelor cu grosimea s=2,0mm

Nr. probă	f, mm						β, °	
	Puncte de măsurare							
	1	2	3	4	5	6	$\beta_î$	β_s
2.2.	5	4	7	-4	-5,5	-4	4	9
2.3.	-4,5	-4	-5	3	5	4	-4	-6
2.4.	4	5	5,5	-2,5	-4,7	-4,5	4	7,5
2.5.	-5	-5,5	-6	3,5	5,5	4,5	-5	-8
2.6.	4	4	5	-3,5	-4,5	-4	4,5	7,5
2.8.	-4,4	-4,5	-5	4,5	7,5	5	-4	-5
2.9.	-3,5	-4	-5	3	4,7	3,7	-4	-6
2.10.	-5,1	-5,5	-6	4	5	4,5	-5	-6
2.11.	-4,5	-3,8	-5	3	4,5	4,2	-4	-5,5
2.12.	-	-	-	-	-	-	0	-2
2.13.	-	-	-	-	-	-	0	1

Tabel 1.13. Valori măsurate ale deformației/săgeții la sudarea tablelor cu grosimea s=2,5 mm

Nr. probă	f, mm						β, °	
	Puncte de măsurare							
	1	2	3	4	5	6	$\beta_{î}$	β_s
3.1.	-4	-3,4	-4	3	4,5	3	-3,5	-4,5
3.2.	-4	-3,5	-4	4	4	3,5	-4	-4,5
3.3.	-3,2	-3	-4	3	4,5	3,5	-4	-5
3.4.	-4	-4	-6,5	2,3	4,5	3,3	-4	-5,5
3.5.	-3,5	-3,5	-6	3,5	4,3	4	-3	-6
3.6.	-2,8	-3,5	-6	2,8	4	3	-4	-8
3.8.							0	0
3.9.							0	-0,5
3.10.							0	-0,5

Tabel 1.14. Valoarea medie ale săgeților la sudarea tablelor cu s=1,5 mm; s=2,0 mm; s=2,5 mm

s, mm	f, mm						fmed, mm	ß, °	
	f1, mm	f2, mm	f3, mm	f4, mm	f5, mm	f6, mm		$ß_i$, °	$ß_s$,°
1,5	4,73	4,64	6,56	3,88	5,31	4,4	4,92	4,94	8,75
2,0	4,44	4,48	5,5	3,44	5,21	4,27	4,56	4,28	6,72
2,5	3,58	3,48	5,08	3,1	4,3	3,38	3,82	3,75	5,58

Tabel 1.15. Contracțiile apărute la sudarea tablelor cu procedeul MAG

Nr. probă	s, mm	Contracții, mm				
		Δb1	Δb2	Δb_{teor}	Δl	Δl_{teor}
1.11.	1,5+1,5	0	0,3	2,67	0,7	1,27
2.1.	2,0+2,0	0,3	0,9	1,98	0,3	0,90
3.11.	2,5+3,0	0	0	0,78	0,8	-
3.7.	2,5+2,5	0,4	0,8	3,25	0,8	0,68
1	2,0+3,0	0,5	0,7	1,17	0,5	-
2	2,5+3,0	0	0,2	1,0	1,0	-
3	1,5+1,5	0,5	0,7	3,36	1,1	0,98
6	1,5+1,5	0,1	0,8	3,51	0,4	0,87
P	1,5+1,5	0,5	1,1	4,06	0,2	0,86
11	2,5+2,5	0,2	0,4	2,32	0,1	0,56
12	2,5+2,5	0,3	1,1	1,82	0	1,06

Tabel 1.16. Valori măsurate ale deformaţiei/ săgeţii la sudarea MAG a tablelor

Nr. probă	s, mm	f, mm				β, °		Obs.
		Puncte de măsurare						ZIT , mm
		1	2	3	4	β_i, °	β_s, °	
1.11.	1,5+1,5	4	5	4,5	4	4	7,5	6-10
2.1.	2,0+2,0	4	5	4	4	3	6	
3.11.	2,5+3,0	-	0	0,5	0,5	0	0,5	
3.7.	2,5+2,5	-3	-4,8	3,3	3,5	3	5	
1	2,0+3,0	-	-	-	-	0	1,5	12
2	2,5+3,0	-	-	-	-	0	0	12
3	1,5+1,5	4	6,5	3	2,5	4,5	11	Străpuns
6	1,5+1,5	3	4,5	2,5	4	4	7	5-10
P	1,5+1,5	6,5	6	3	2,8	7	9	Sudare spre stânga 6-15
11	2,5+2,5	1,5	3,5	1,5	1,5	2,5	3	Sudare spre stânga
12	2,5+2,5	3,5	6	3	3,5	3	7	5-13

Tabel 1.17. Contracţiile apărute la sudarea tablelor cu procedeulMAG în curent pulsat

Nr. probă	s, mm	Contracţii, mm				
		Δb_1	Δb_2	Δb_{teor}	Δl	Δl_{teor}
50	1,5+1,5	0,2	0,9	2,6	0,75	0,84
51	1,5+1,5	0,9	0,2	-	0,8	-
52	2,0+2,0	0,6	0,9	2,81	0,5	0,92
53	2,0+2,0	0,5	1	2,6	0,8	0,85
54	2,5+2,5	0,8	0,8	2,23	0,2	0,73
55	2,5+2,5	0,1	0,9	2,05	0,4	0,67
56	1,5+3,0	0,5	0,6	-	0,8	-
57	2,0+3,0	0,5	0,35	-	0,3	-
58	2,5+3,0	0,4	0,4	-	0,1	-

Tabel 1.18. Valori măsurate ale deformaţiei/săgeţii la sudarea MAG în curent pulsat a tablelor

Nr. probă	Săgeata f(mm)						Deformaţia unghiulară β(°)	
	Puncte de măsurare							
	1	2	3	4	5	6	β_i	β_s
50	-7,2	-6,0	-6,9	4,4	5,3	4,6	7	9,5
51	-7,6	-5,8	-6,9	3,4	6,0	4,0	6,5	13
52	-6,1	-4,7	-5,7	4,0	5,0	4,5	5,5	6,5
53	-7,8	-5,4	-6,2	3,8	5,4	3,8	6,5	9,5
54	-7,6	-6,0	-6,0	2,7	4,3	3,0	6	8
55	-7	-4,5	-4,4	3,7	4,6	2,4	5	8
56	-	-	-	0,8	0,5	0	1	1,5
57	-	-	-	1,6	1,0	0,4	1	1
58	-	-	-	0,9	0,9	0	0,5	0,5

Tabel 1.19. Valori măsurate ale deformației/săgeții la sudarea WIG a tablelor

Nr. probă	s, mm	f,mm				β, °		Obs.
		Puncte de măsurare						
		1	2	3	4	β_i, °	β_s, °	ZIT, mm
29	2+2	-5	-6,8	-3	-1,5	5,5	6,5	5-6
30	2+2	3,6	5,7	-2	-2	3	8	20-25
31	1,5+1,5	0	0	0	0	0	0	15-18 Piesă dezaxată
32	1,5+1,5	2,5	6,2	2,8	3	5	8,5	16-20
33	2,5+2,5	4,2	5,3	-1,5	-1,5	4	5,5	17
34	2,5+2,5	2	5,3	-3	-2,5	3	4	20-25
35	3+2,5			0	-2	3	3	7-9/15-18
36	3+2			0,4	1,2	1	1	5-12/14-20
37	3+1,5			-0,1	-3	1	1,5	15-20/6-8

Tabel 1.20. Săgeata şi deformația unghiulară apărută la sudarea tablelor prin presiune în linie

Nr. probă	s, mm	f, mm						β, °		Obs.
		Puncte de măsurare								
		1	2	3	4	5	6	β_i, °	β_s, °	ZIT, mm
1	1,5+1,5	3,5	3	2,8	5,5	5	1,8	2,5	2,5	8
2	2,0+2,0	3,8	3,7	4	2	2,5	2,7	2	2	8
3	2,5+2,5	0	0,5	1,5	1	0,5	1,4	2	2	8

Anexa 2 – Caracteristicile aparatelor de măsură, ondularea şi contracția epruvetelor, ciclul termic indus în probe şi variația forței apărute în probe

Principalele caracteristici ale traductorului inductiv de deplasare de tip W200 fabricat de Hottinger Baldwin Messtechnik-Germania sunt următoarele:

- tipul de traductor: semipunte inductivă;
- domeniul de măsură : ±200 mm;
- sensibilitatea : 80 mV/V;
- ecartul de liniaritate: <±0,2;
- clasa de protecție: IP67;
- domeniul de temperaturi: -20°...+80°C.

Principalele caracteristici tehnice ale sistemului de achiziție Spider 8 sunt:

- clasa de precizie: 0,1;
- rezoluția numerică [digit]: ± 25000;
- memoria tampon a valorilor măsurate [mas]: <20000;
- viteza de măsurare [1/s]: 1...9600;
- traductori ce se pot utiliza: punți întregi şi semipunți, rezistive sau inductive;
- tensiunea de alimentare a captorilor [V_{ef}]: 2,5;
- rezistența traductorilor [Ω]: 110....1100;
- lungimea maximă a cablurilor de alimentare [m]: 50;
- domeniile de măsură [mV/V]: ±3; ±12; ±125; ±500;
- plaja nominală de temperatură [°C]: -10....+50;
- plaja utilă de temperatură [°C]: -20....+60.

Caracteristicile tehnice ale termografului ProScan 520 :

- domeniu de măsurare a temperaturii: -32...760 °C;
- precizie: +/- 1% sau +/- 1°C;
- optică precizională pentru măsurarea precisă a temperaturii fără contact direct;
- caracteristică optică: 40:1;
- display LCD: 0,1 °C;
- timp de reacție: 300 ms;
- domeniul de lucru a instrumentului: 0... 50 °C;
- lumină laser care ajută la direcționarea mai precisă a termometrului;
- posibilitate de ataşare a unui senzor de temperatură de tip K;
- alarmă High/Low: acustică şi vizuală;
- laser: <1 mW Laser class Ila, narrow 9 mm Offset;
- greutate: 150 g, 190x38x45 mm;
- baterie: 9 V alkaline battery.

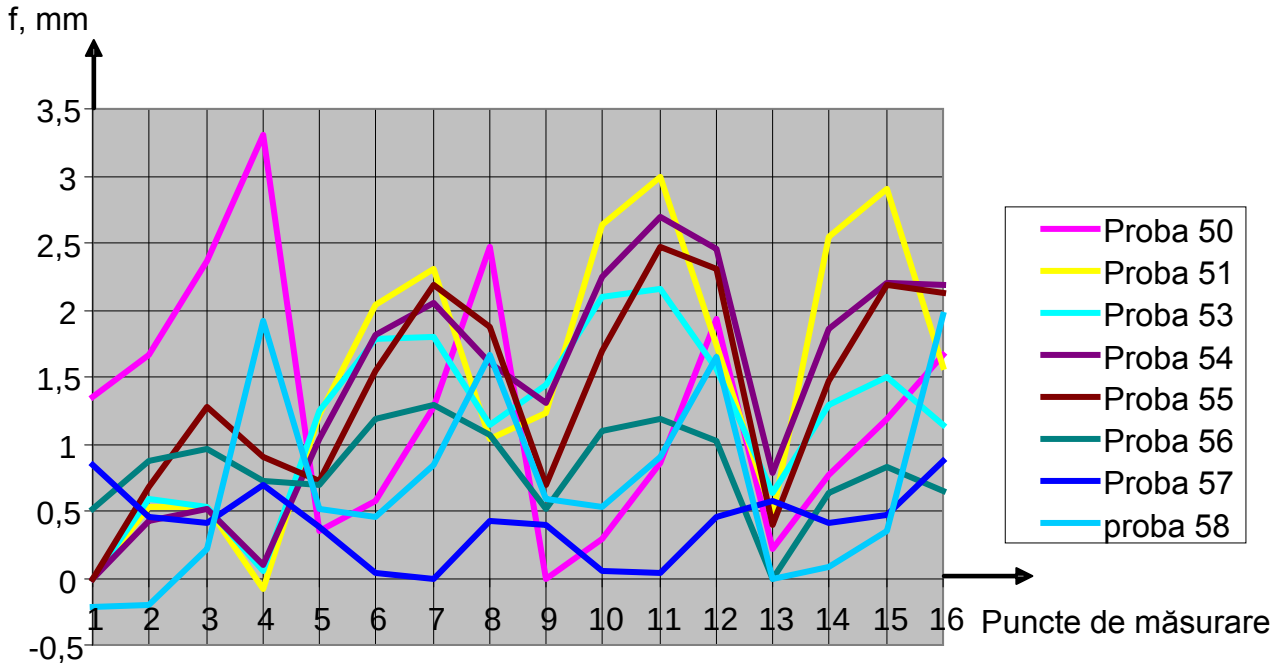


Fig.2.1. Deformarea/ondularea probelor sudate liber

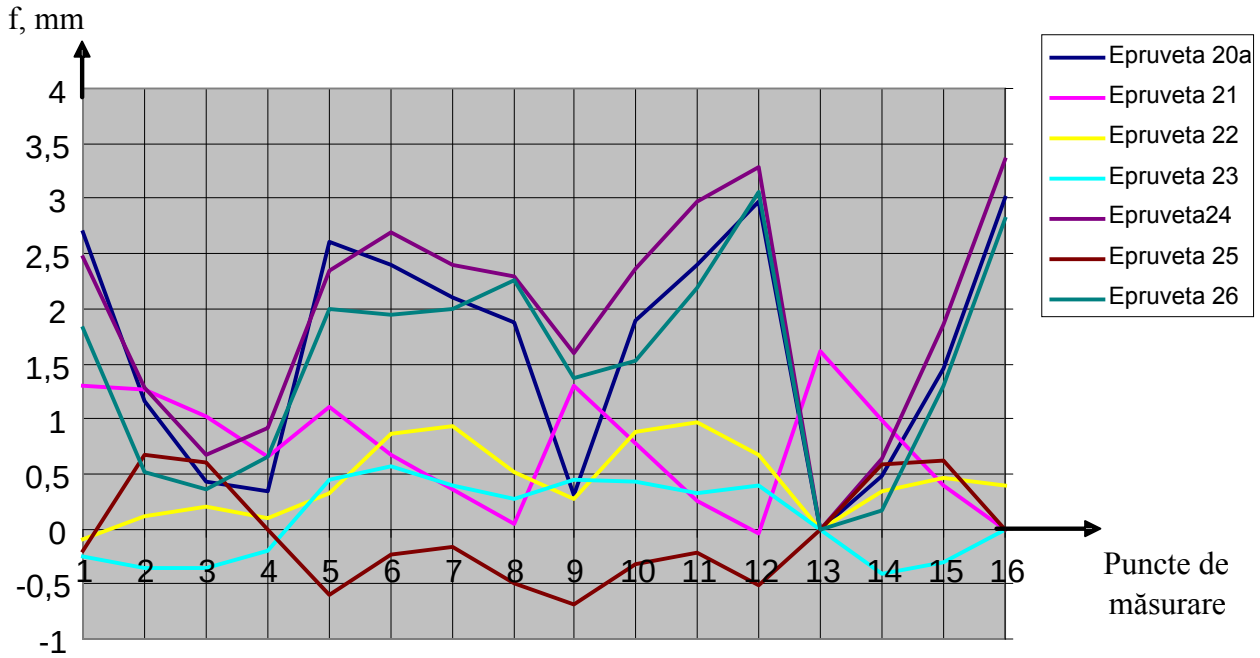


Fig.2.2. Deformarea/ondularea probelor încălzite cu flacără liber în dispozitivul 1

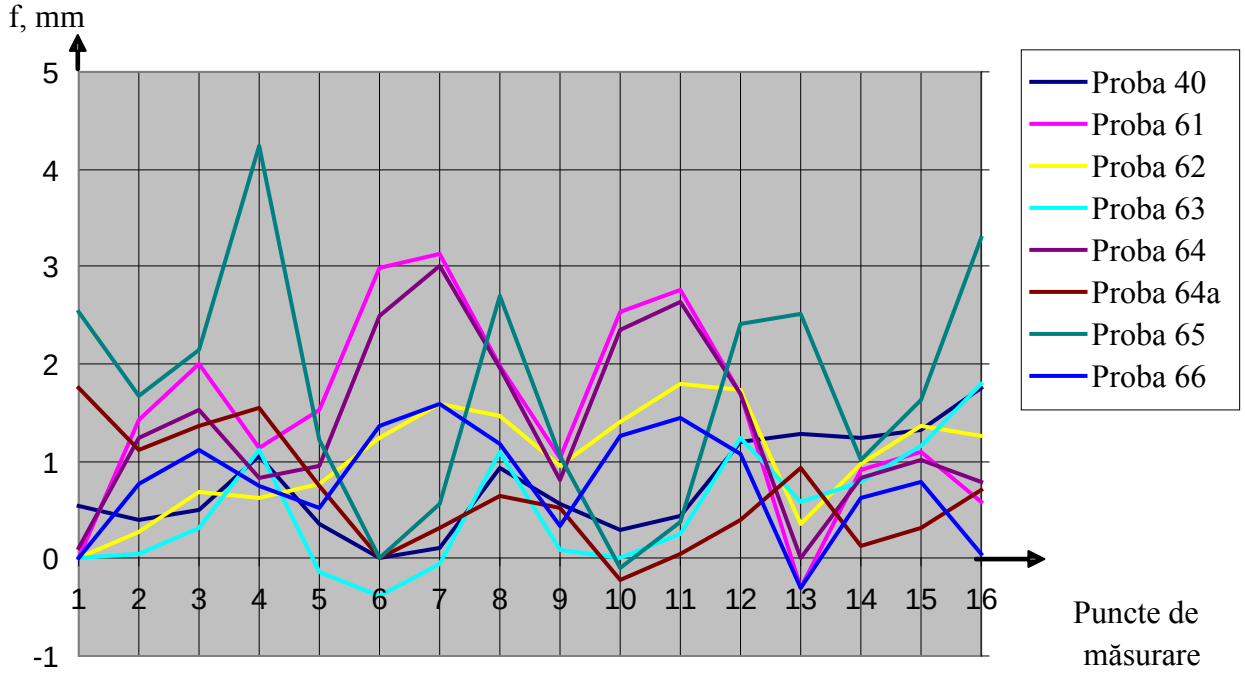


Fig.2.3. Deformarea/ondularea probelor sudate rigidizat în dispozitivul 2

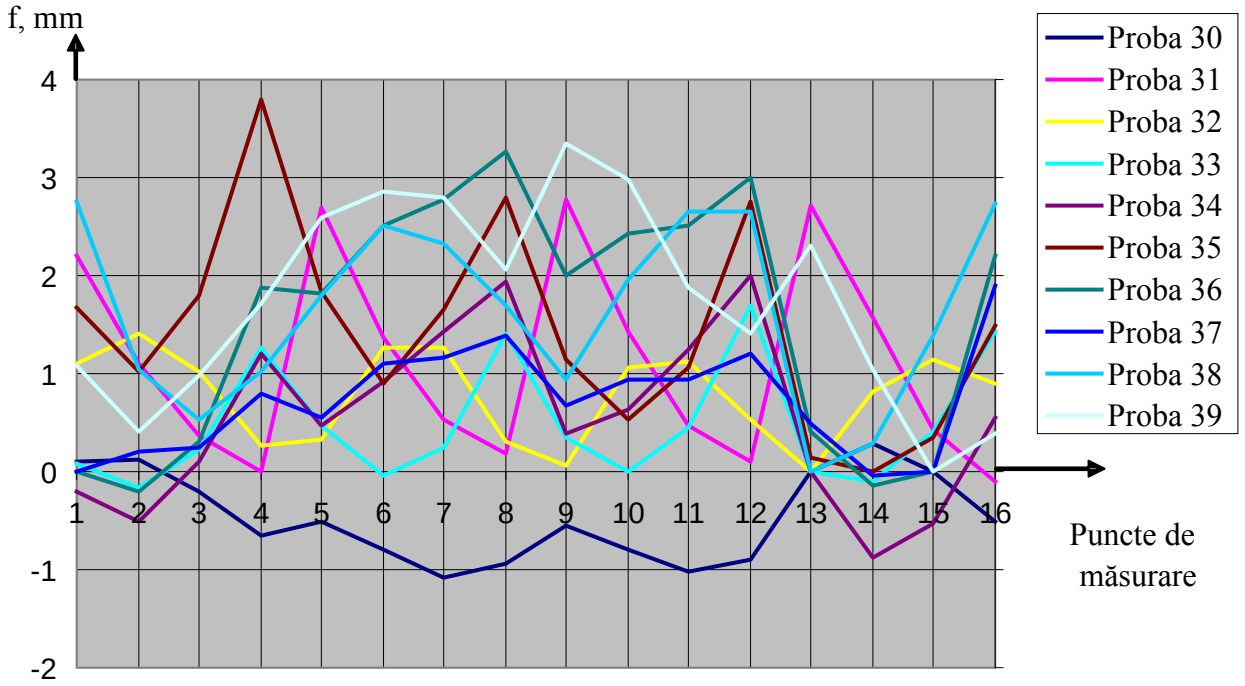


Fig.2.4. Deformarea/ondularea probelor încălzite rigidizat în dispozitivul 2

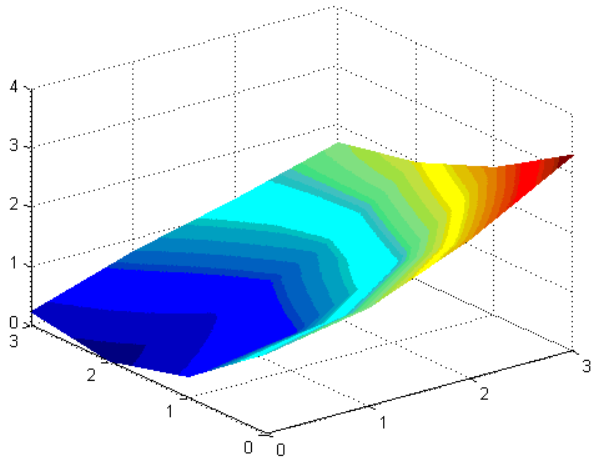


Fig.2.5. Ondularea epruvetei 50

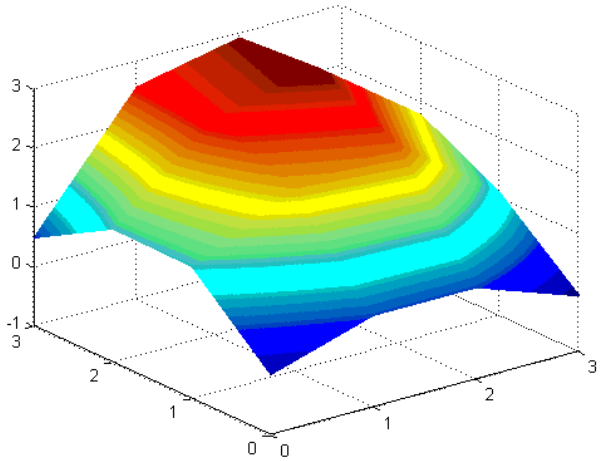


Fig.2.6. Ondularea epruvetei 51

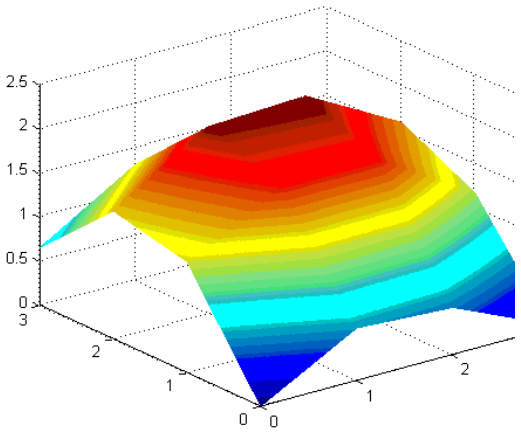


Fig.2.7. Ondularea epruvetei 53

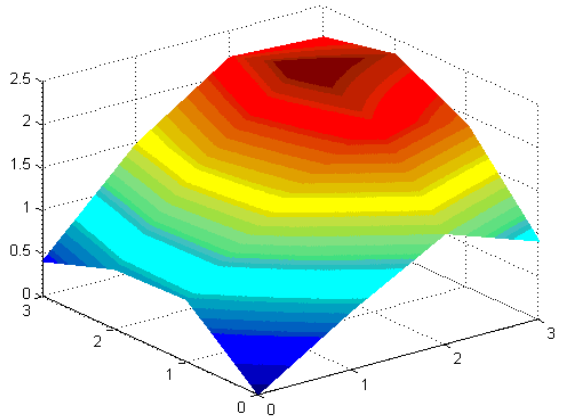


Fig.2.8. Ondularea epruvetei 55

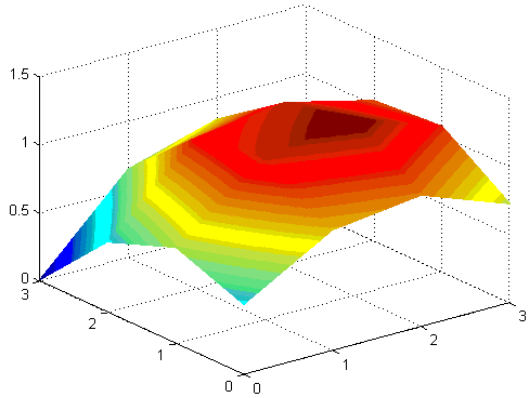


Fig.2.9. Ondularea epruvetei 56

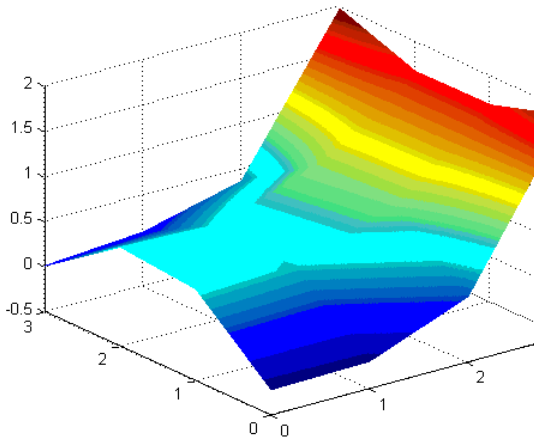


Fig.2.10. Ondularea epruvetei 58

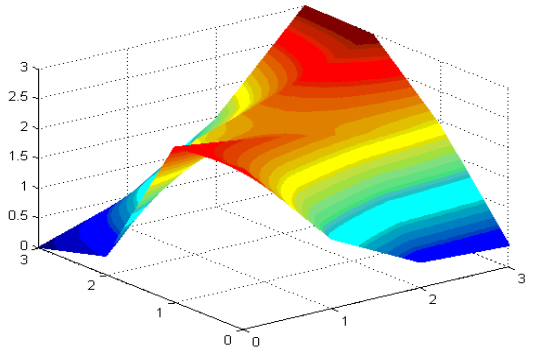


Fig.2.11. Ondularea epruvetei 20a

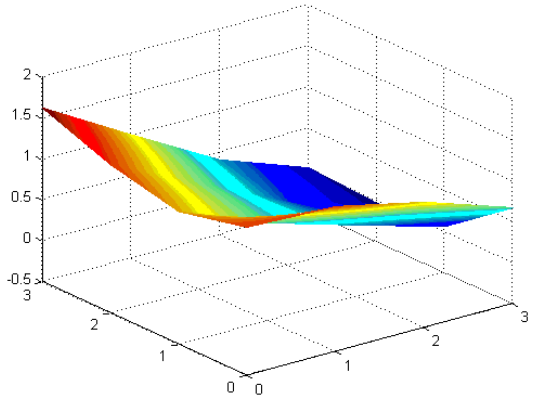


Fig.2.12. Ondularea epruvetei 21

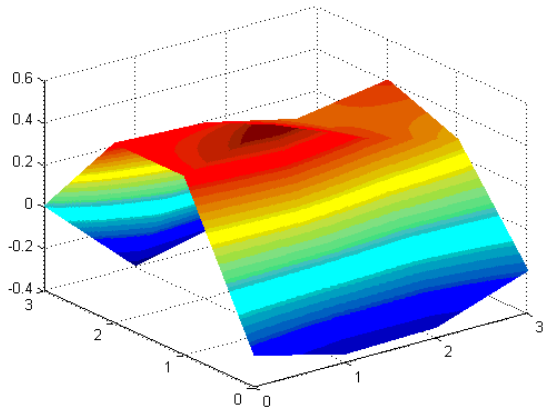


Fig.2.13. Ondularea epruvetei 23

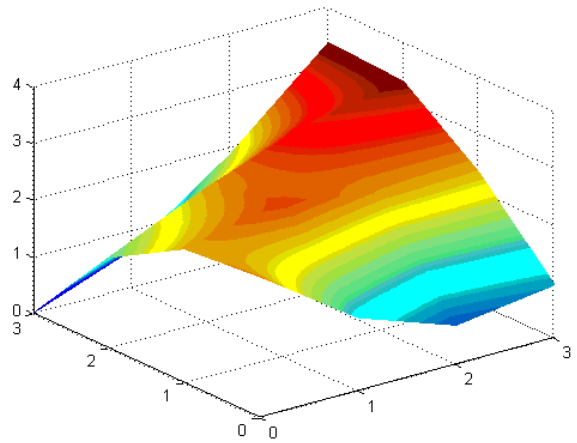


Fig.2.14. Ondularea epruvetei 24

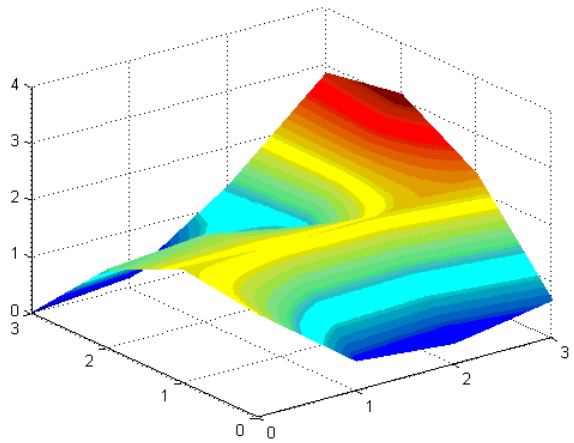


Fig.2.15. Ondularea epruvetei 26

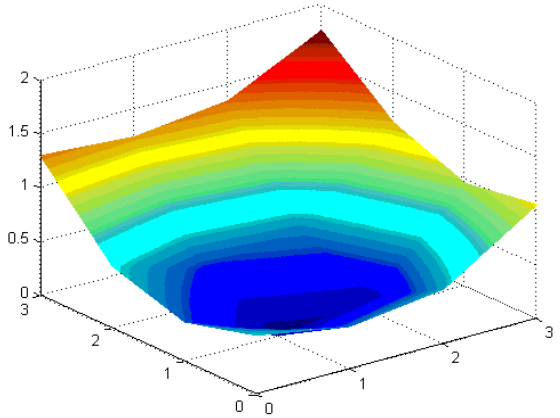


Fig.2.16. Ondularea probei 40

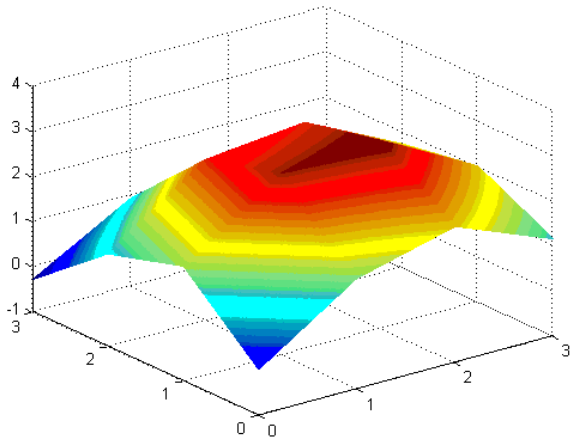


Fig.2.17. Ondularea probei 61

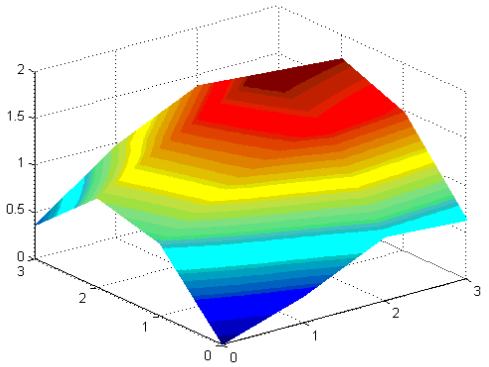


Fig.2.18. Ondularea probei 62

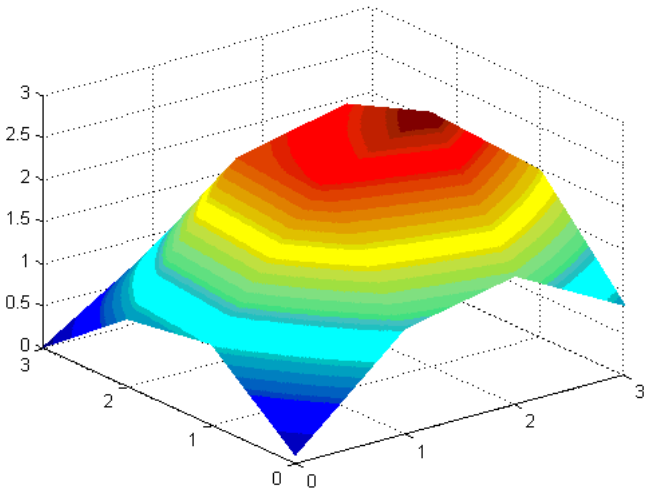


Fig.2.19. Ondularea probei 64

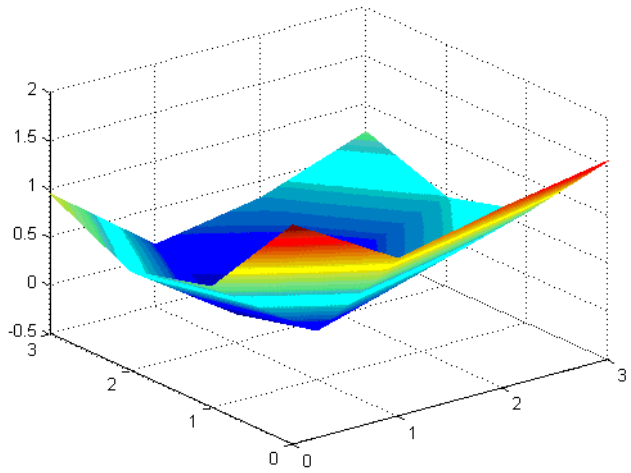


Fig.2.20. Ondularea probei 64a

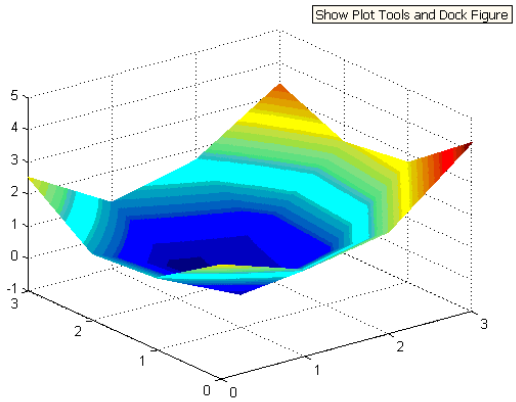


Fig.2.21. Ondularea probei 65

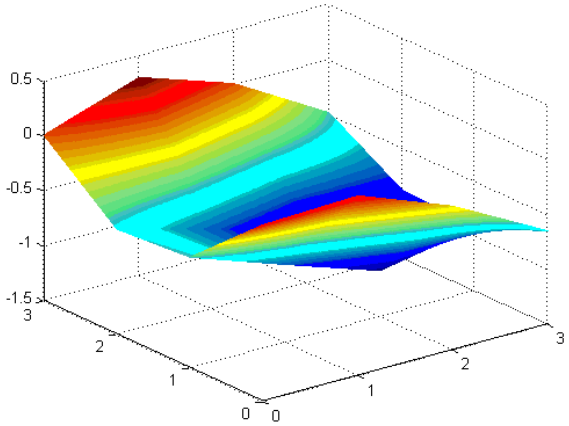


Fig.2.22. Ondularea probei 30

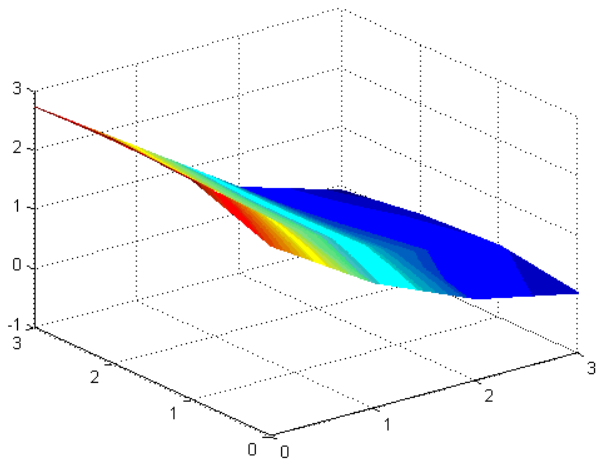


Fig.2.23. Ondularea probei 31

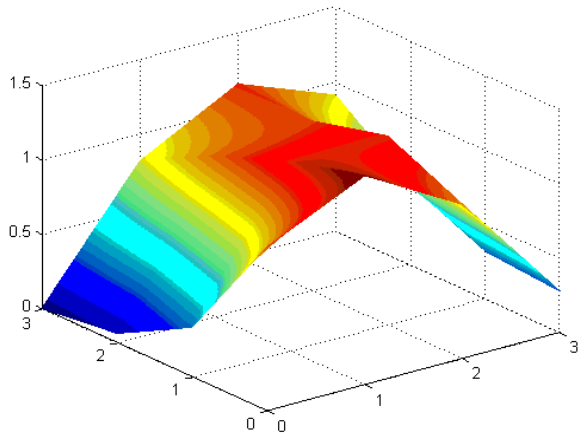


Fig.2.24. Ondularea probei 32

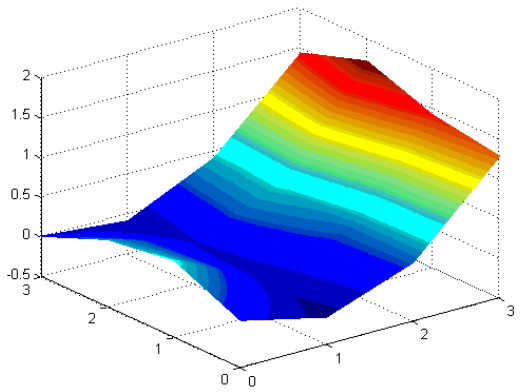


Fig.2.25. Ondularea probei 33

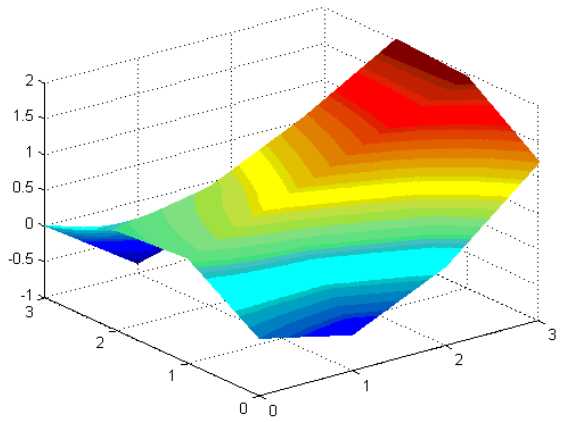


Fig.2.26. Ondularea probei 34

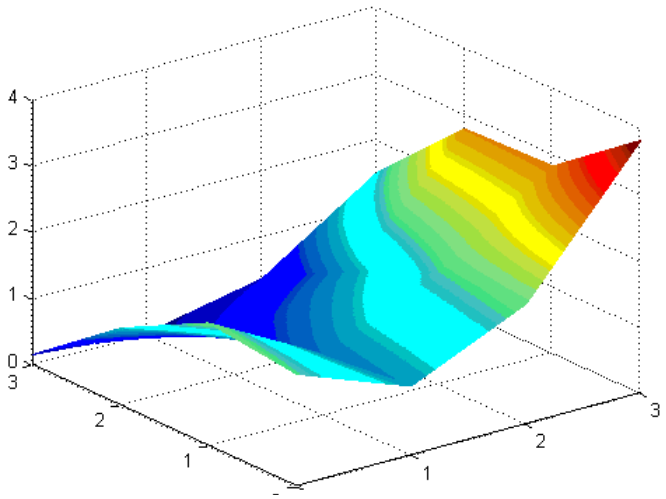


Fig.2.27. Ondularea probei 35

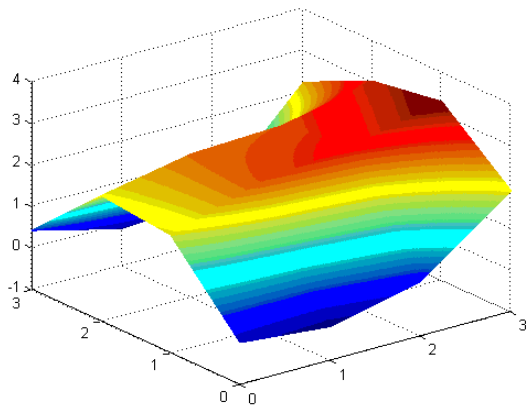


Fig.2.28. Ondularea probei 36

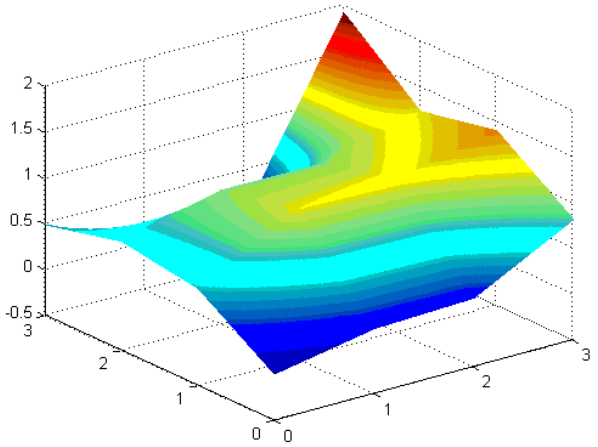


Fig.2.29. Ondularea probei 37

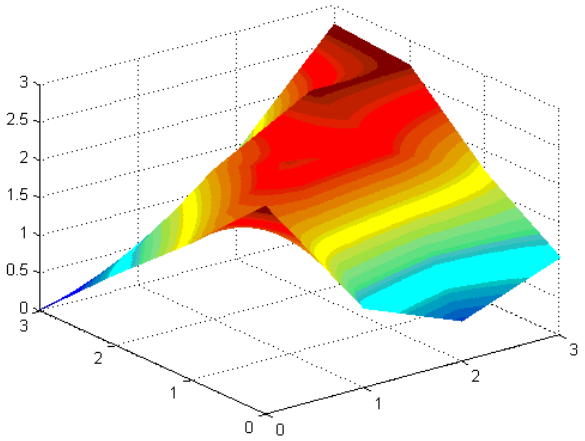


Fig.2.30. Ondularea probei 38

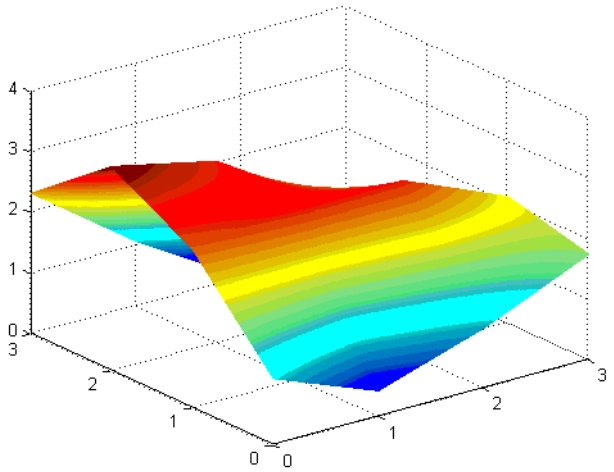


Fig.2.31. Ondularea probei 39

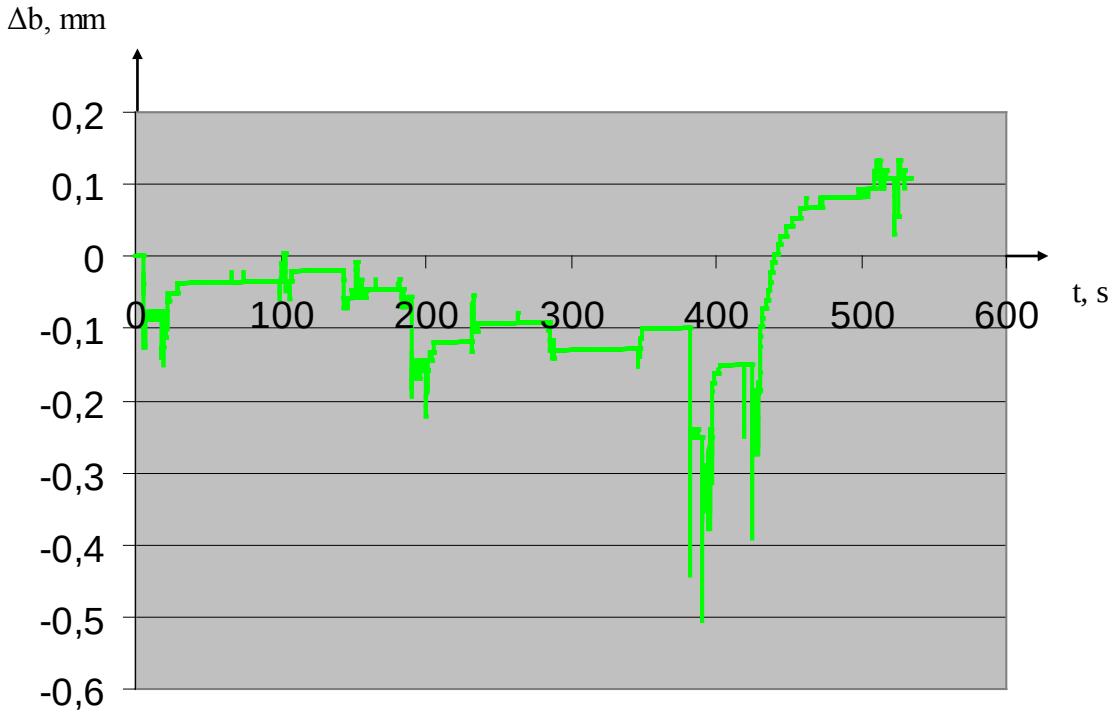


Fig.2.32. Contracţia epruvetei 50

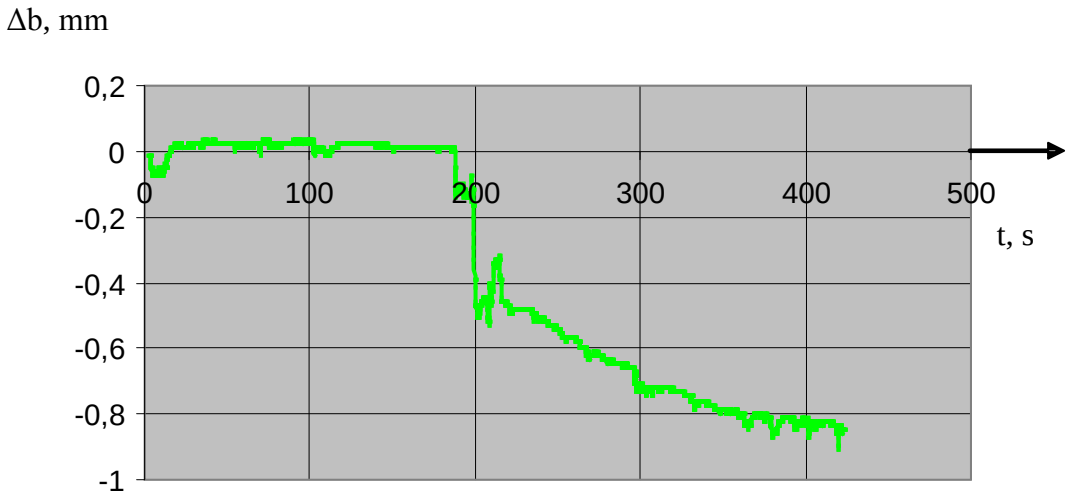


Fig.2.33. Contracţia epruvetei 53

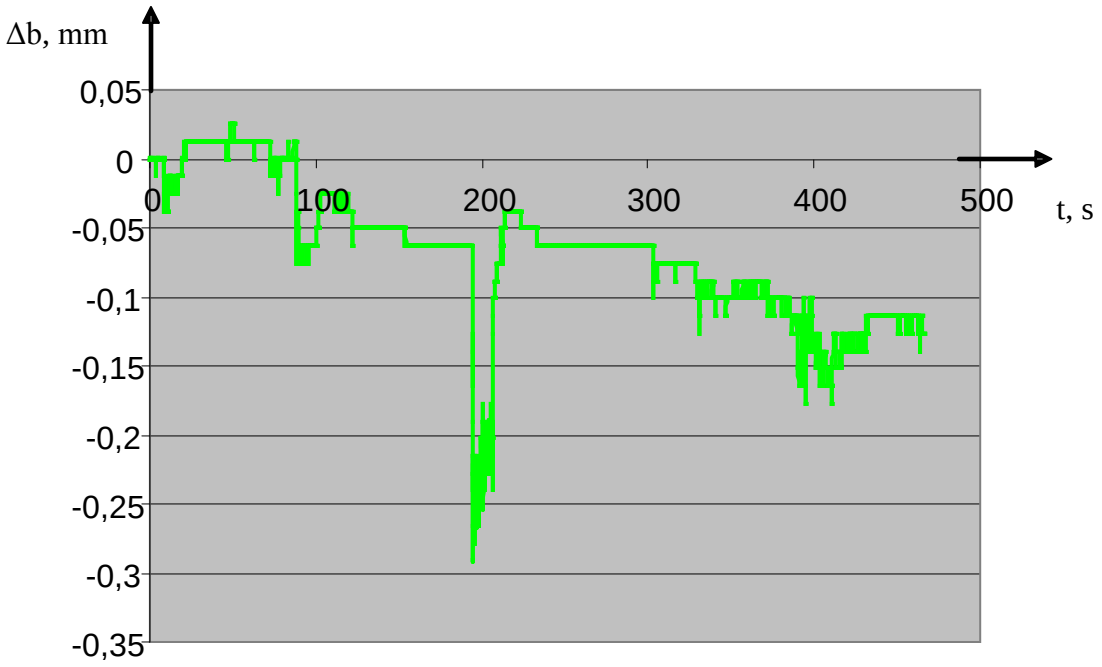


Fig.2.34. Contracția epruvetei 55

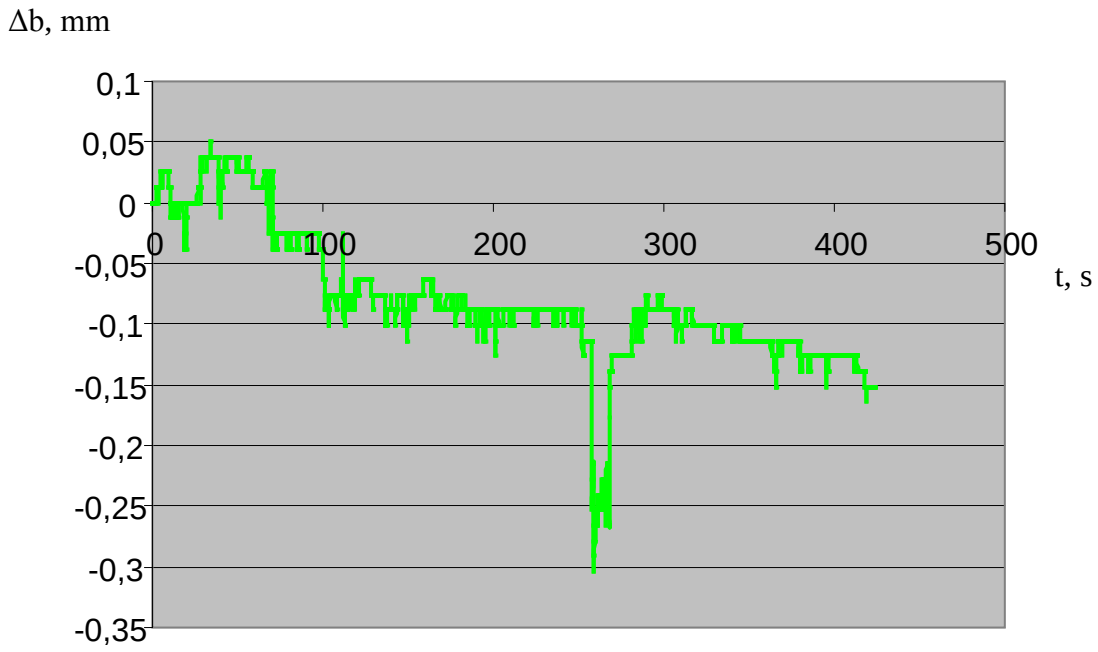


Fig.2.35. Contracția epruvetei 56

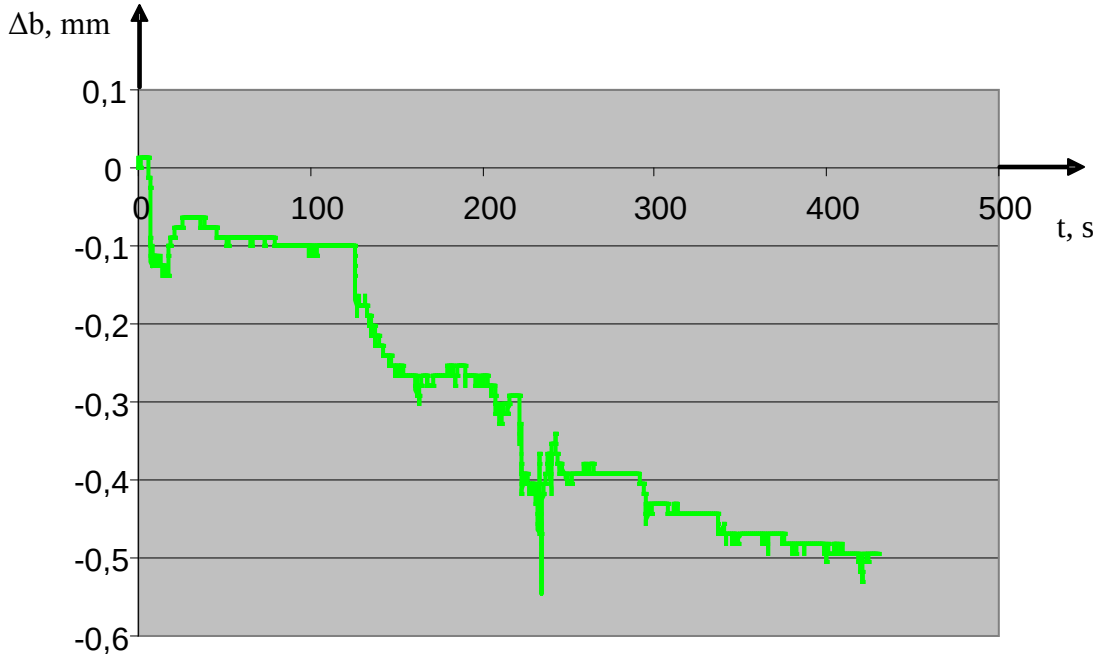


Fig.2.36. Contracția epruvetei 57

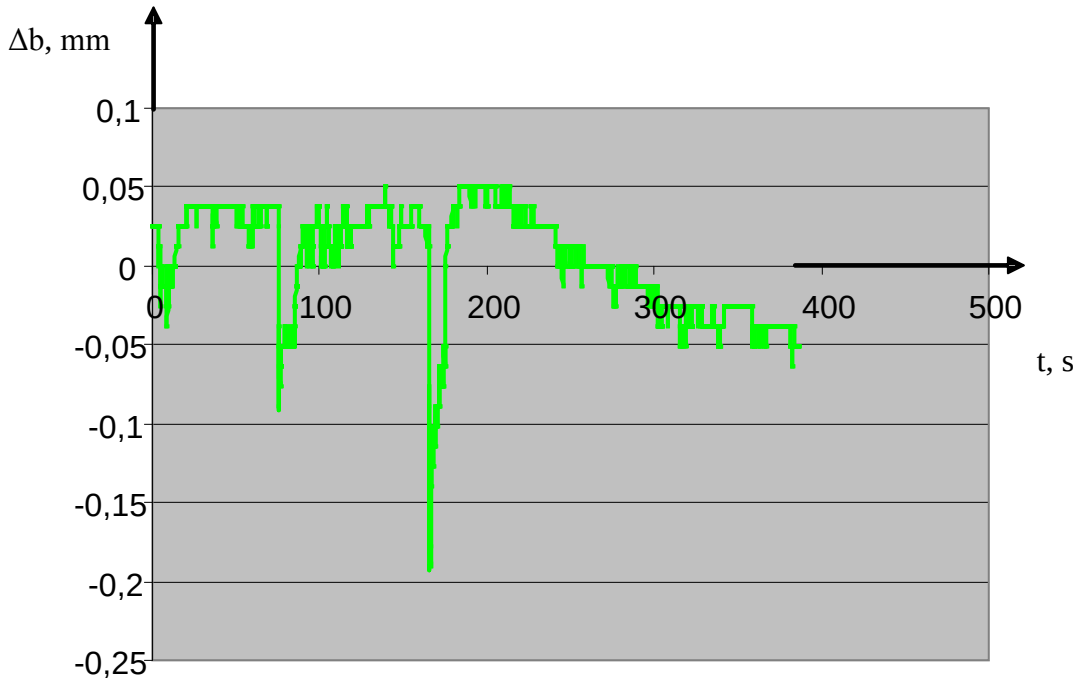


Fig.2.37. Contracția epruvetei 58

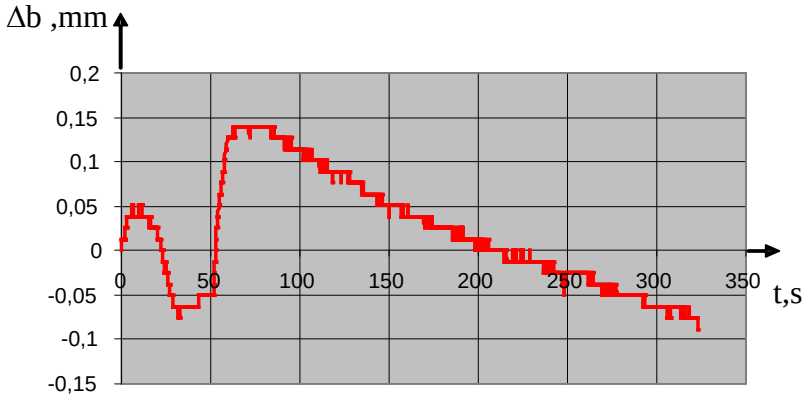


Fig.2.38. Contracția epruvetei 21

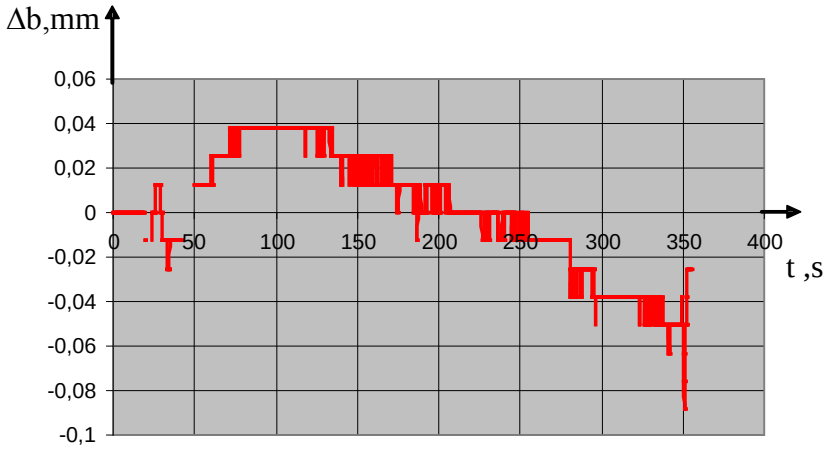


Fig.2.39. Contracția epruvetei 22

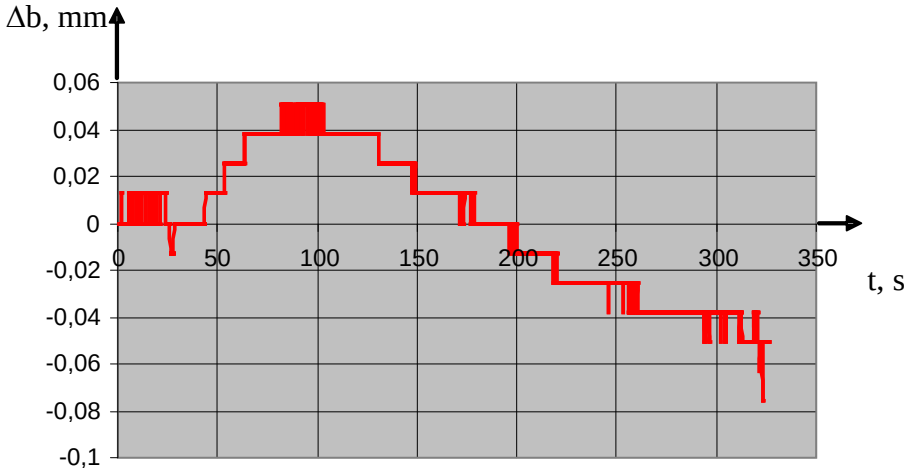


Fig.2.40. Contracția epruvetei 23

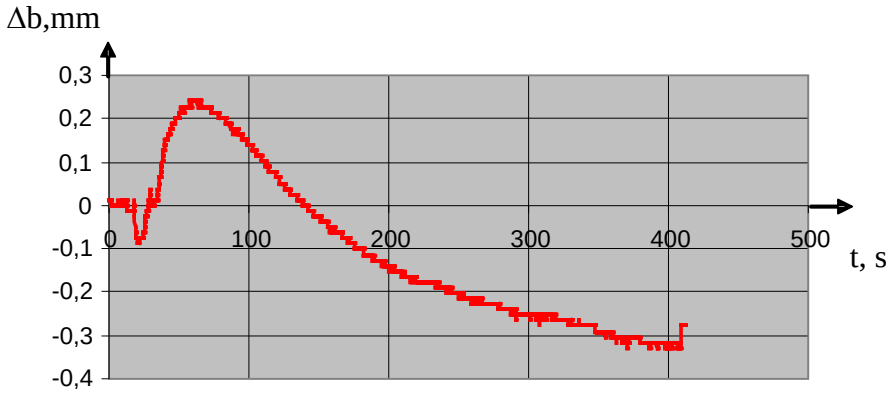


Fig.2.41. Contracția epruvetei 24

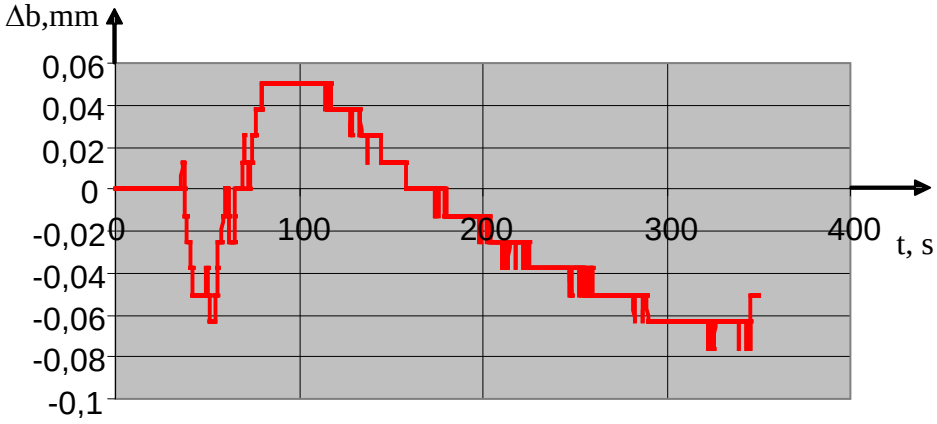


Fig.2.42. Contracția epruvetei 25

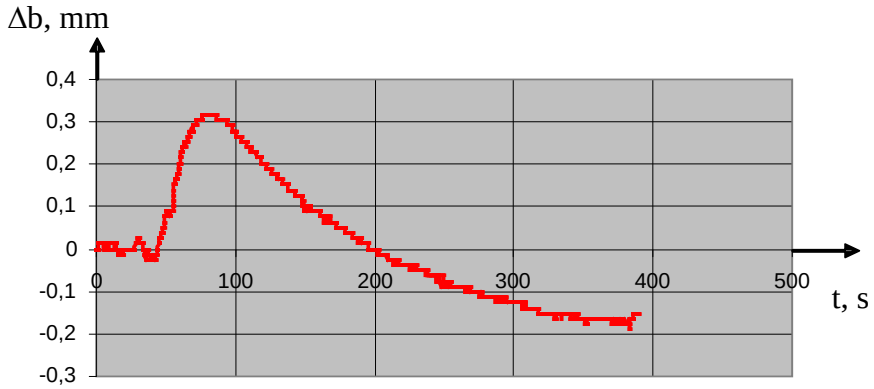


Fig.2.43. Contracția epruvetei 26

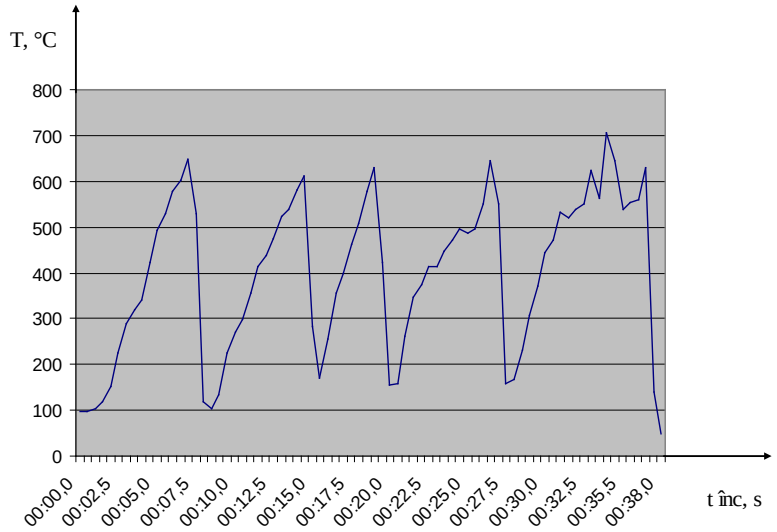


Fig.2.44. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 20a

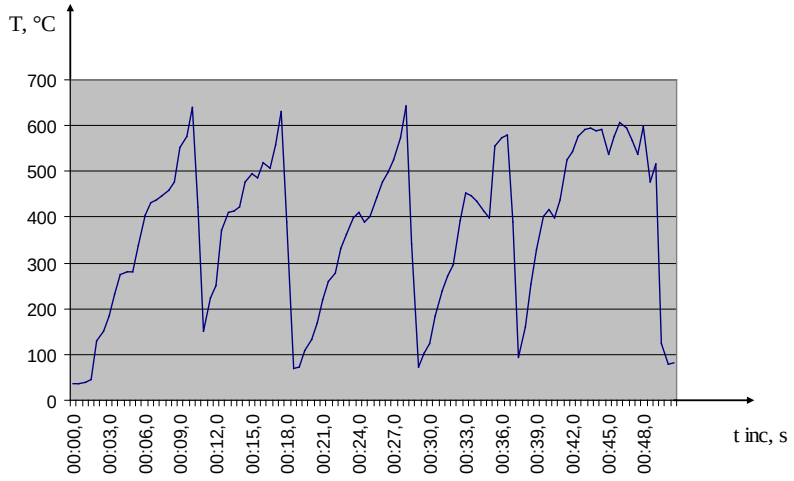


Fig.2.45. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 21

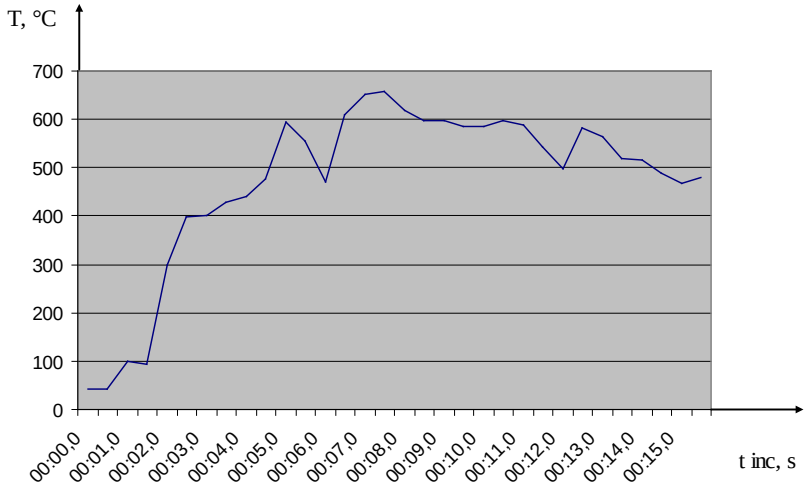


Fig.2.46. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 22

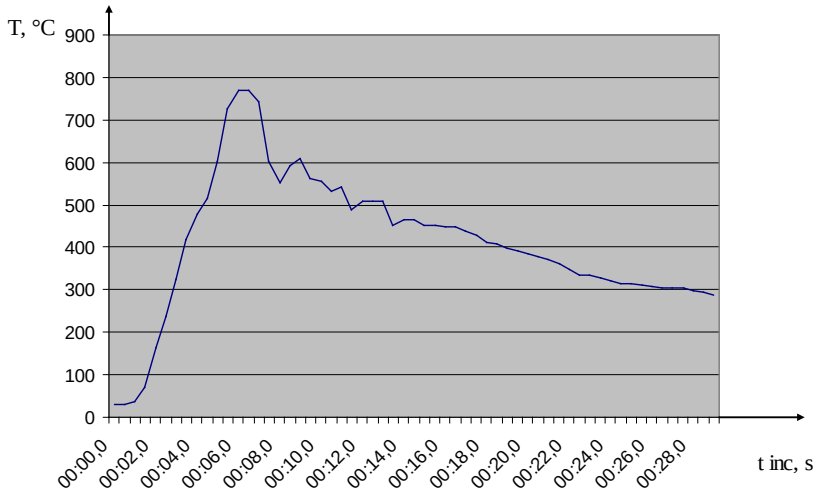


Fig.2.47. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 23

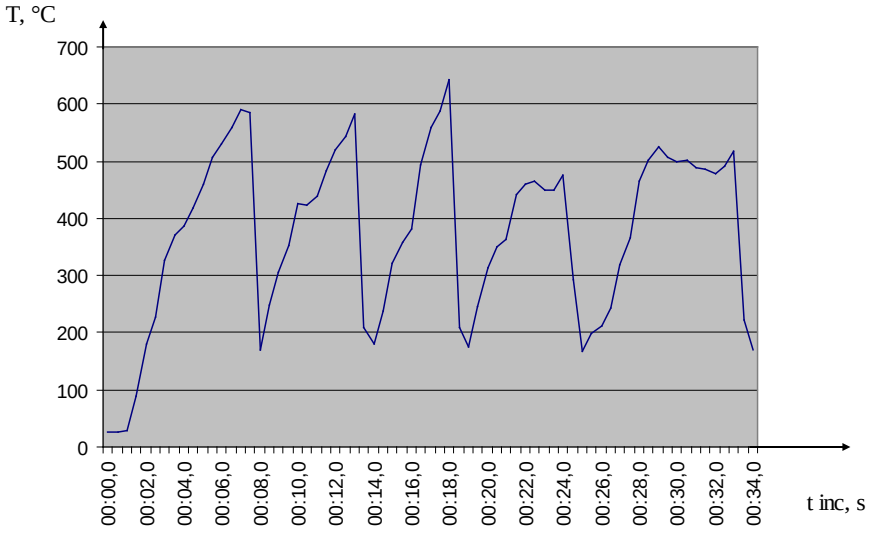


Fig.2.48. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 24

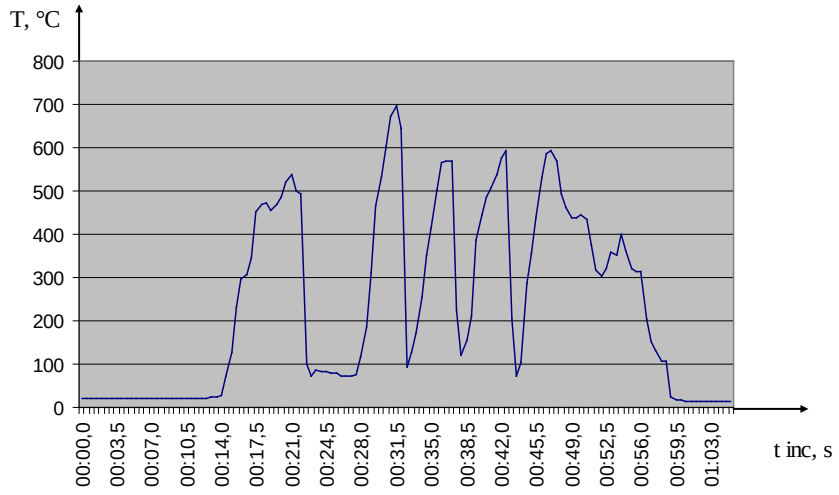


Fig.2.49. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 25

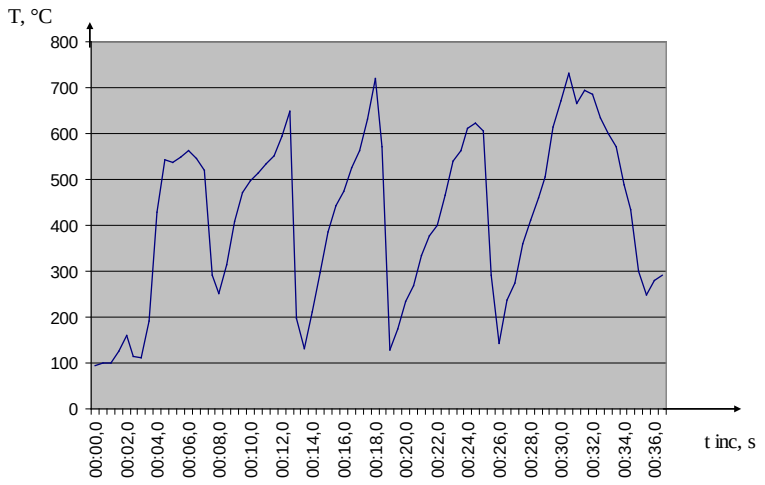


Fig.2.50. Ciclul termic la încălzirea epruvetei 26

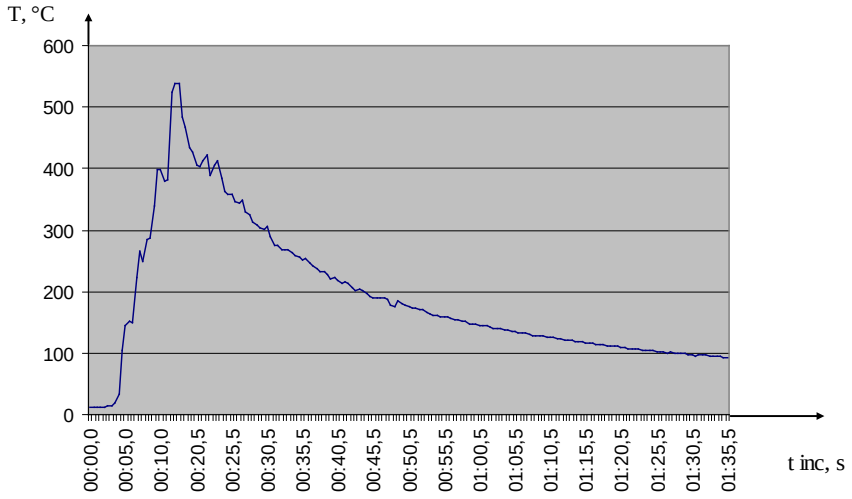


Fig.2.51. Ciclul termic indus în proba 30

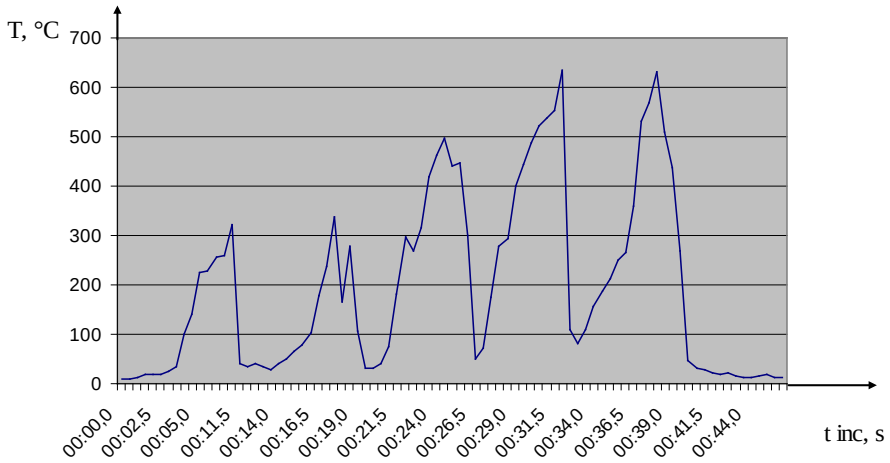


Fig.2.52. Ciclul termic indus în proba 31

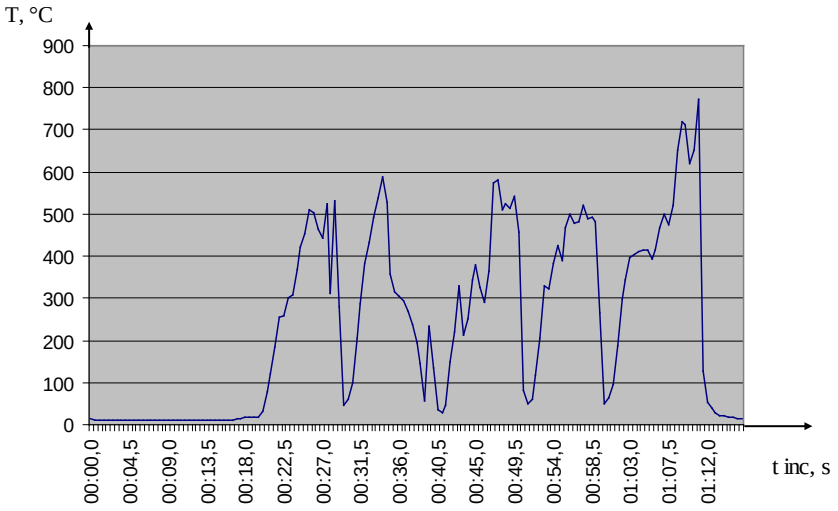


Fig.2.53. Ciclul termic indus în proba 32

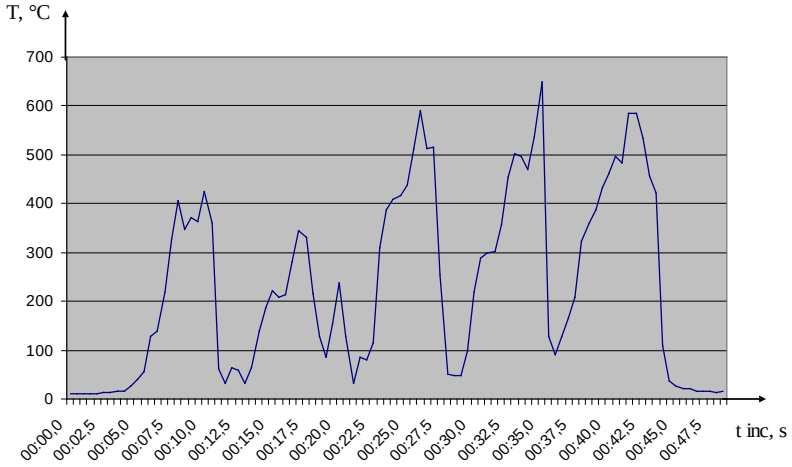


Fig.2.54. Ciclul termic indus în proba 33

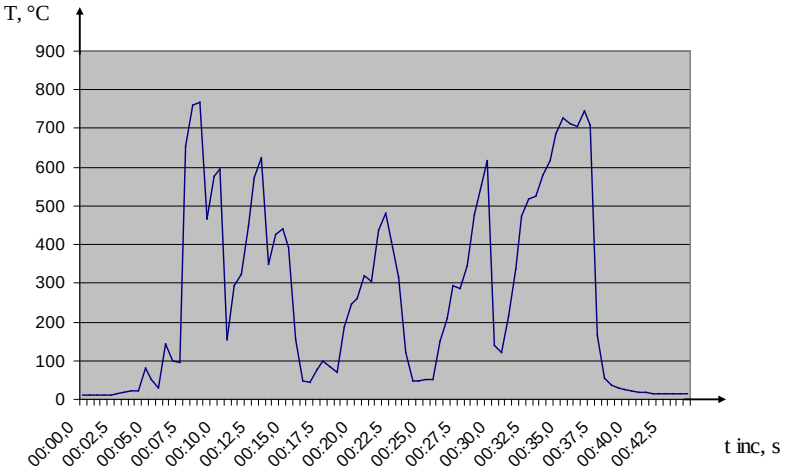


Fig.2.55. Ciclul termic indus în proba 34

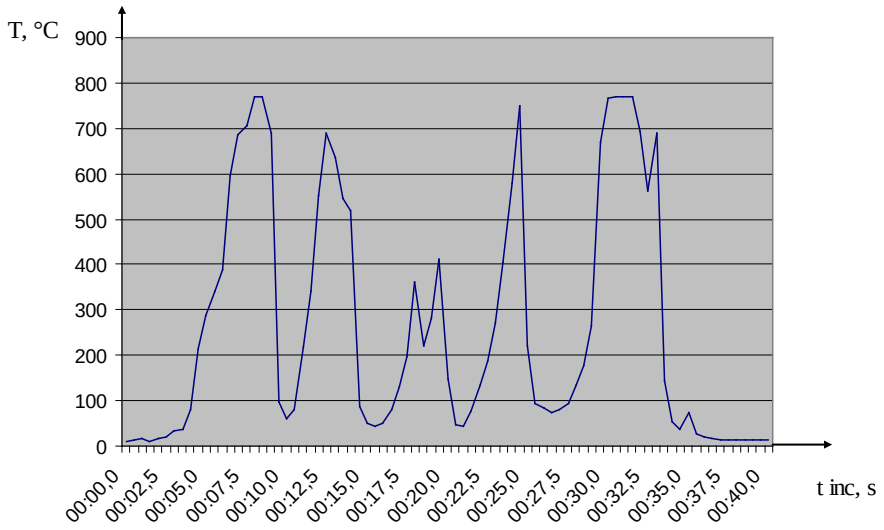


Fig.2.56. Ciclul termic indus în proba 35

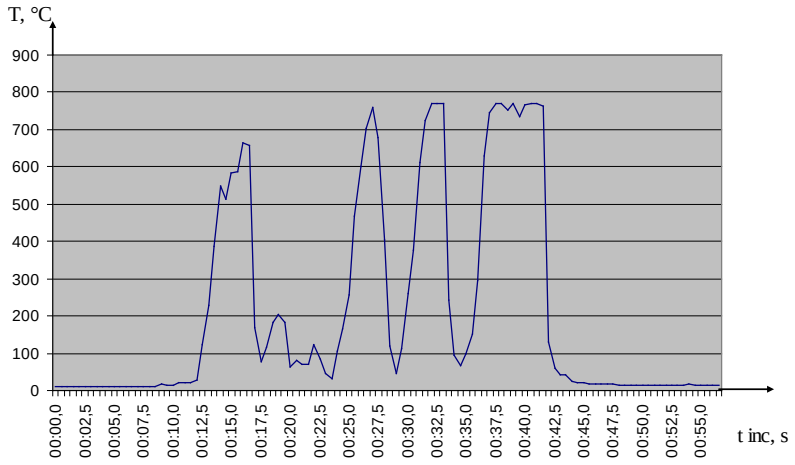


Fig.2.57. Ciclul termic indus în proba 36

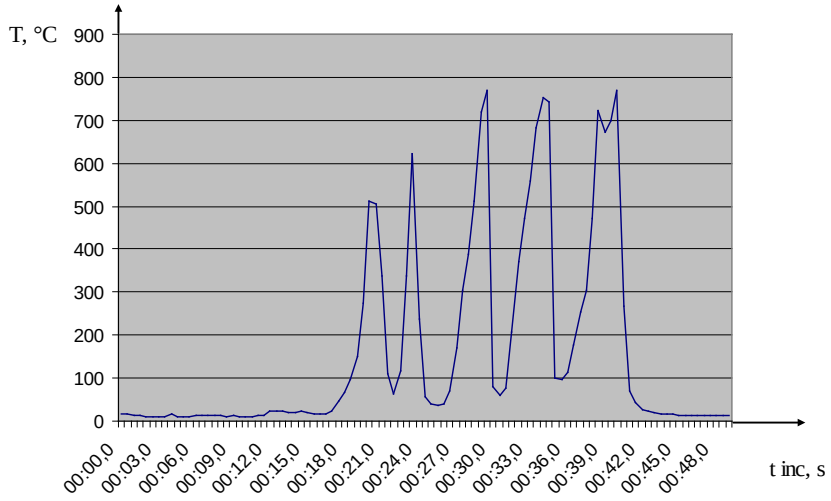


Fig.2.58. Ciclul termic indus în proba 37

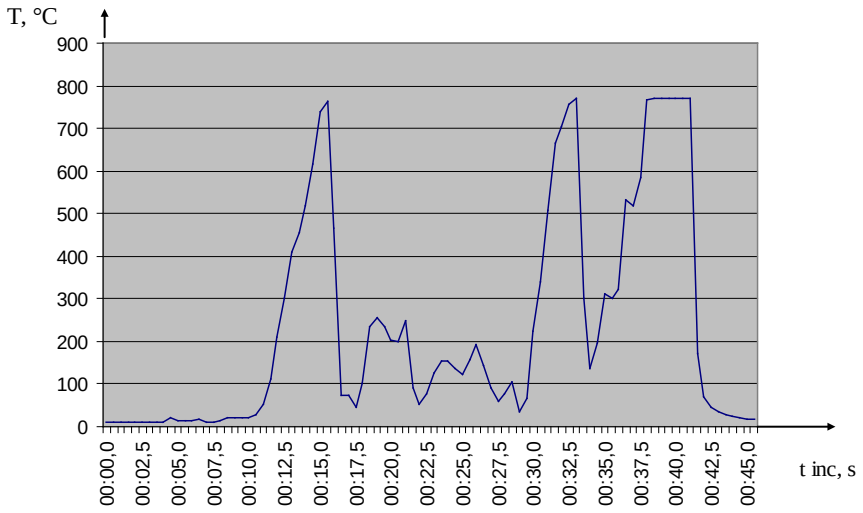


Fig.2.59. Ciclul termic indus în proba 38

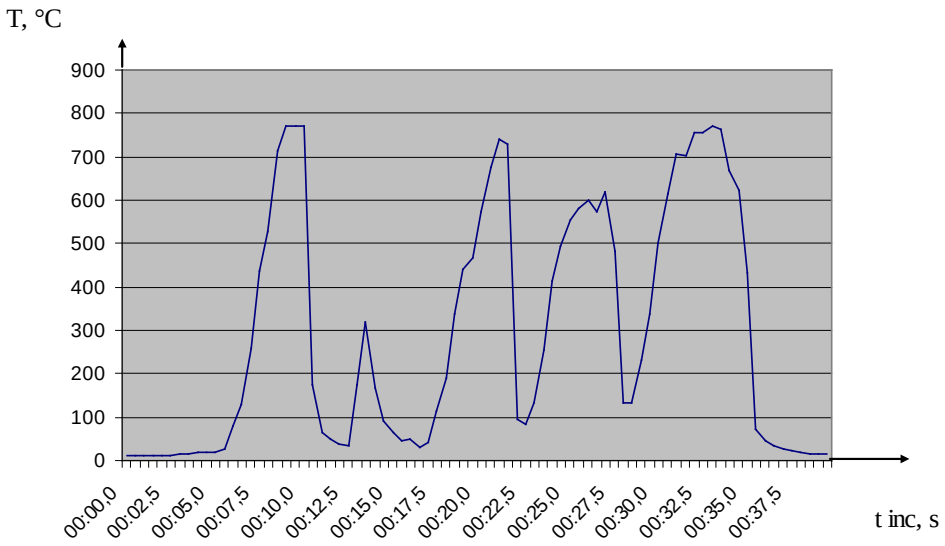


Fig.2.60. Ciclul termic indus în proba 39

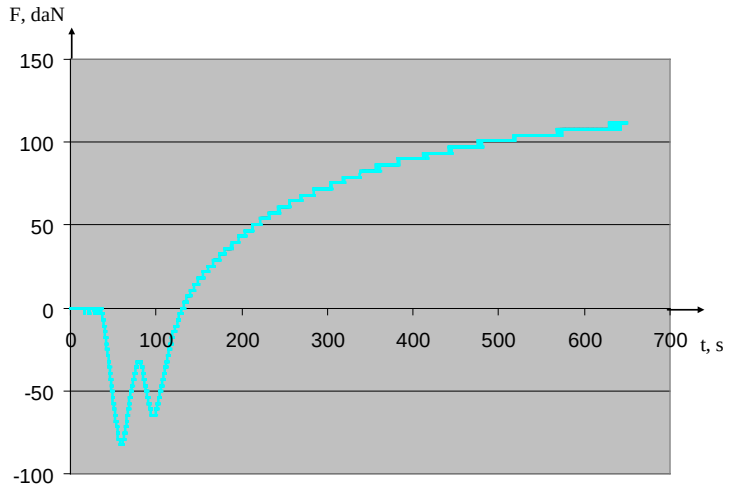


Fig.2.61. Forța apărută în proba 64a

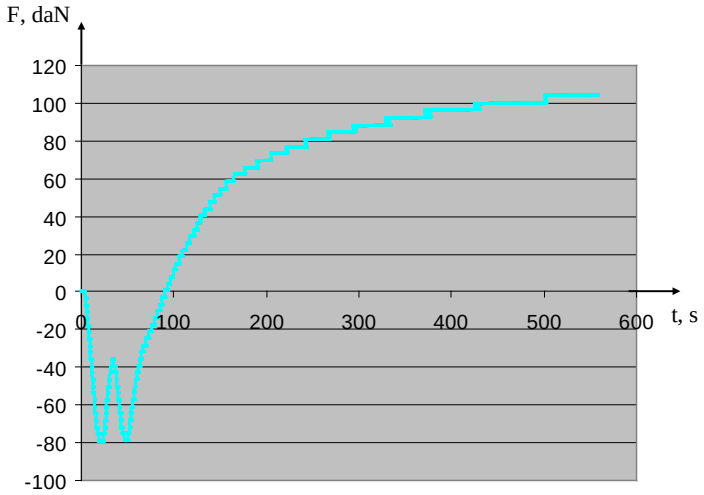


Fig.2.62. Forța apărută în proba 65

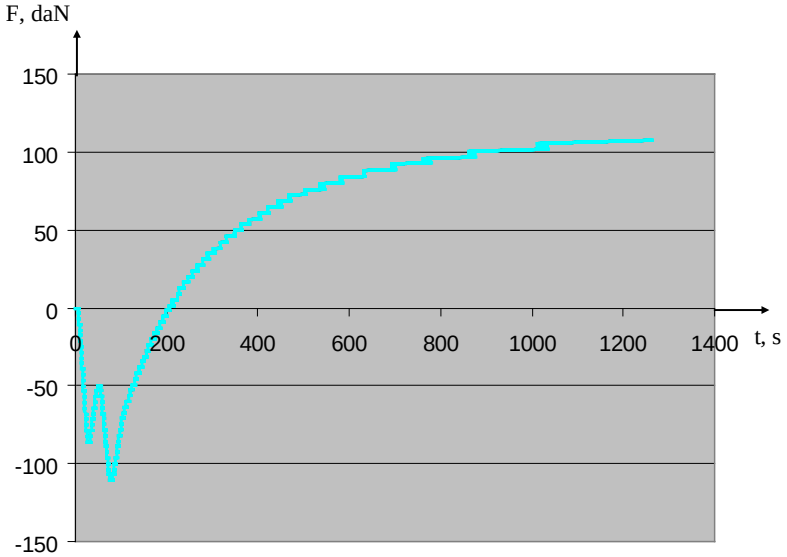


Fig.2.63. Forța apărută în proba 66

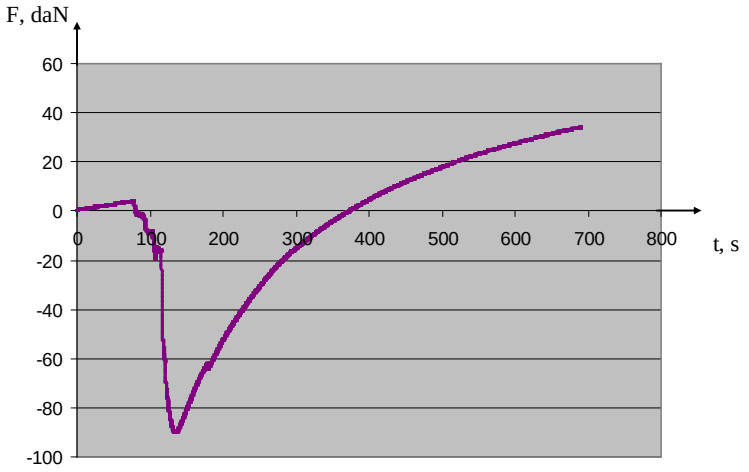


Fig.2.64. Variaţia forţei apărută în proba 30

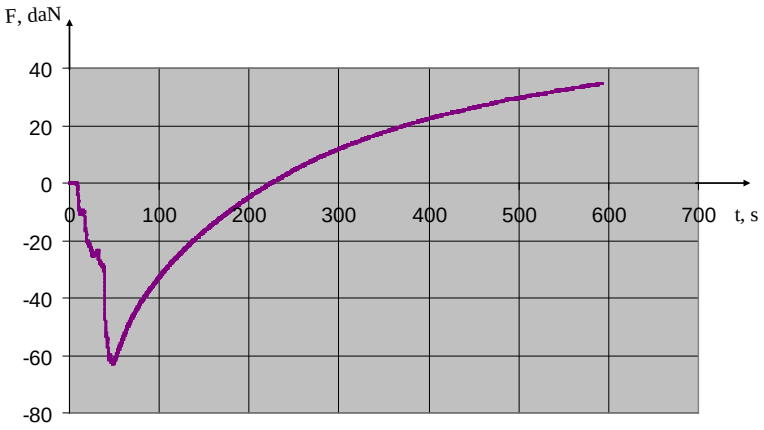


Fig.2.65. Variaţia forţei apărută în proba 31

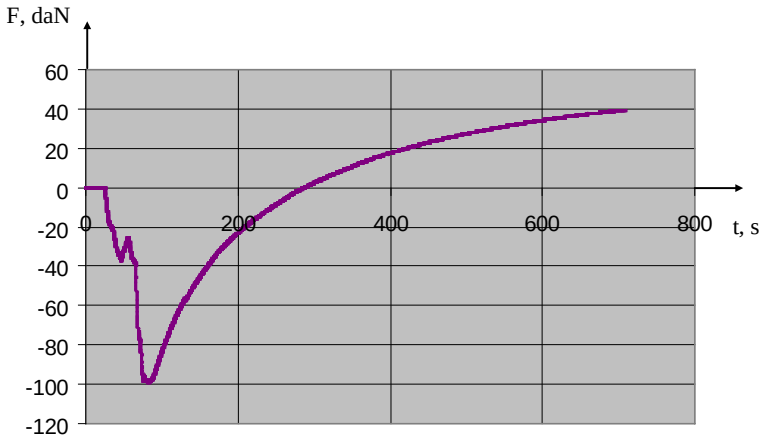


Fig.2.66. Variaţia forţei apărută în proba 32

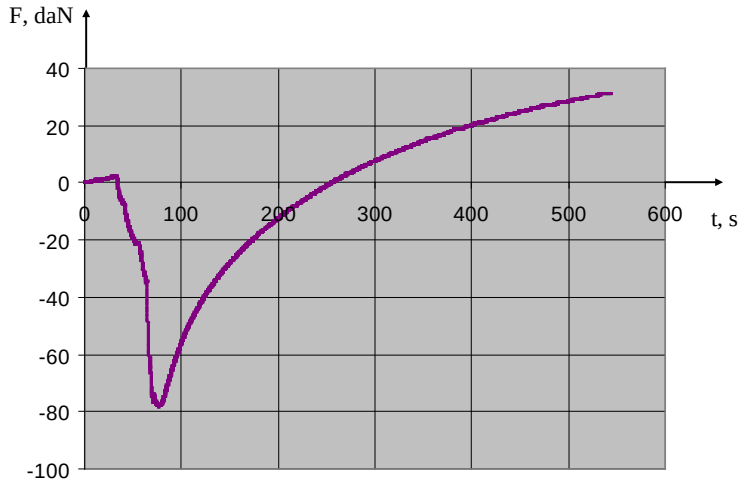


Fig.2.67. Variația forței apărută în proba 33

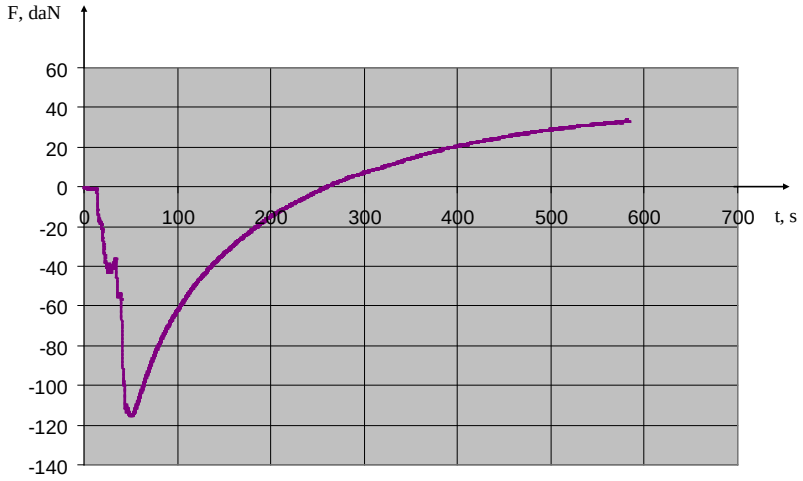


Fig.2.68. Variația forței apărută în proba 34

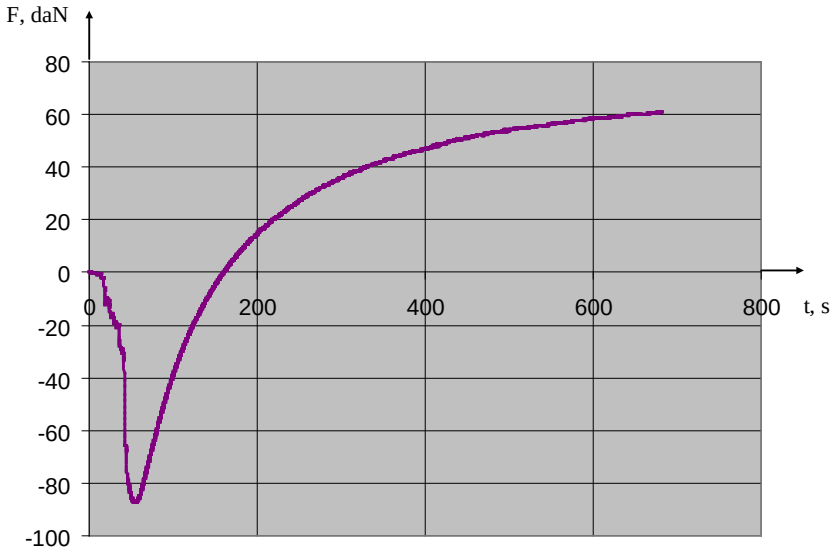


Fig.2.69. Variația forței apărută în proba 35

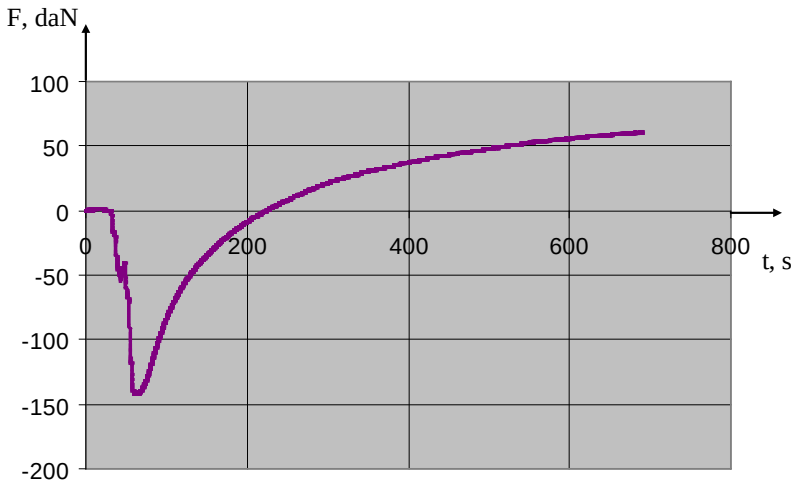


Fig.2.70. Variația forței apărută în proba 36

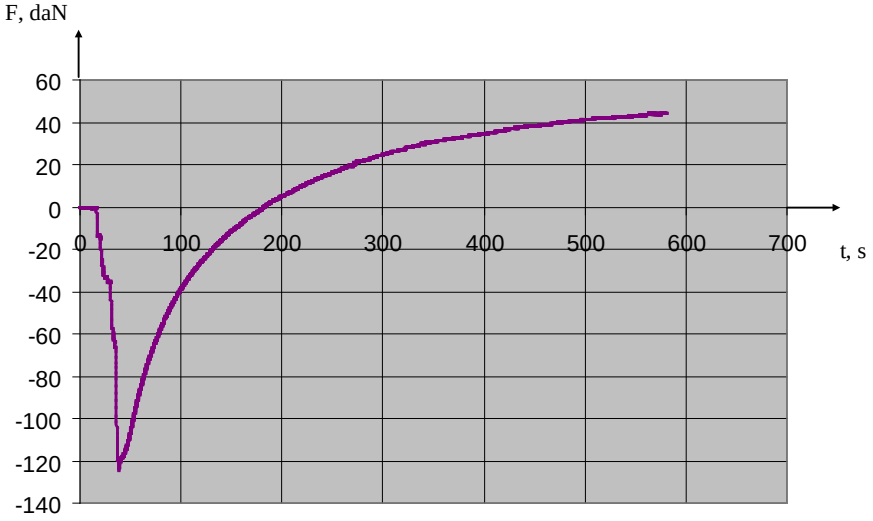


Fig.2.71. Variația forței apărută în proba 37

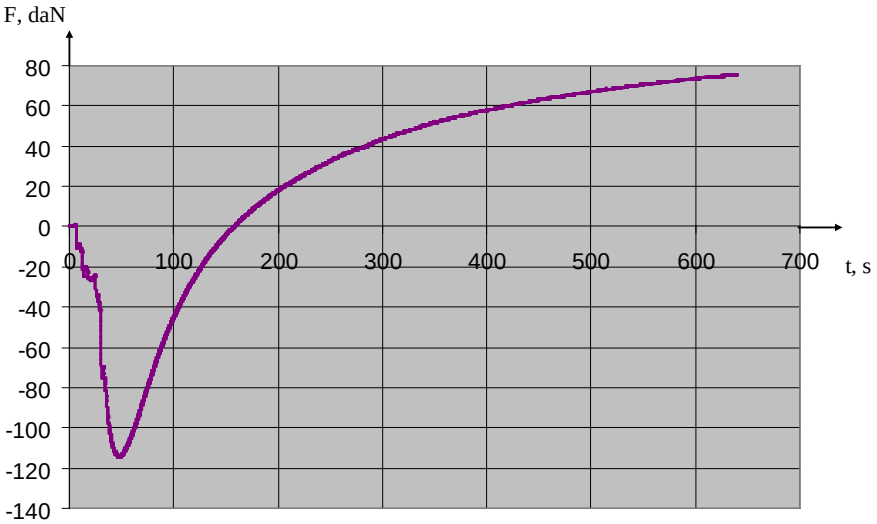


Fig.2.72. Variația forței apărută în proba 38

Anexa 3 - Exemplu de calcul pentru eliminarea unei ondulări aplicând încălziri locale cu flacără oxiacetilenică utilizând metoda cu electromagnet

Presupunem o deformație – ondulare de 10 mm pe o suprafață circulară de 400mm (fig.3.1.).

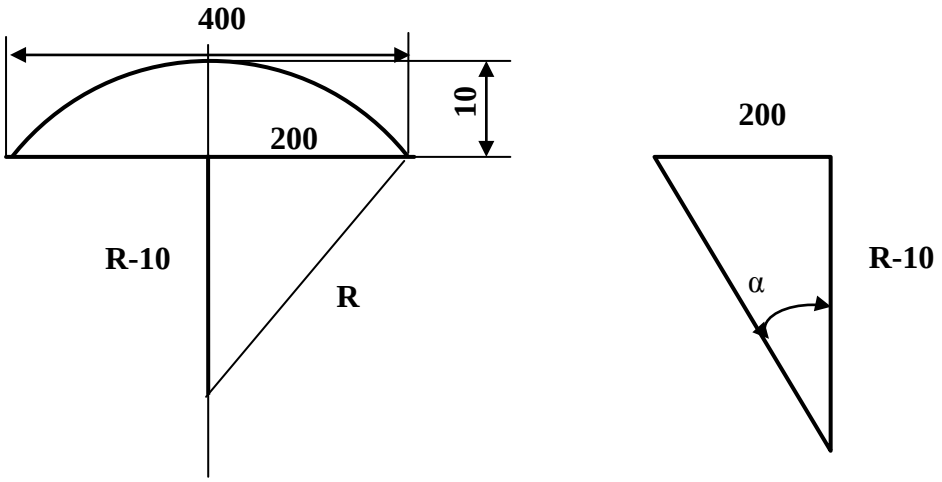


Fig.3.1. Forma şi dimensiunile deformației

Pentru determinarea diferenței dintre arcul de cerc, care de fapt reprezintă deformația/ondularea, şi linia dreaptă, se calculează raza cercului din triunghiul dreptunghic din figura 3.1.:

$$R^2 = (R-10)^2 + 200^2 \qquad \text{(mm)} \qquad (3.1.)$$

De unde rezultă:

$$R = \frac{200^2 + 10^2}{2.10} = \frac{40000+100}{20} = 2005 \qquad \text{mm}$$

Unghiul α se calculează din acelaşi triunghi:

$$\alpha = arctg\frac{200}{1995} = 5{,}72^0 \qquad (3.2.)$$

Lungimea cercului cu raza de 2005 mm este:

$$l_c = 2\pi.R = 2.\pi.2005 = 12598mm \qquad (3.3.)$$

Lungimea arcului de cerc cu aceeaşi rază dar corespunzătoare unghiului de $5{,}72^0$ este dată de relația :

$$l_{5,72} = \frac{12598.5{,}72}{360} = 200{,}17mm \qquad (3.4.)$$

Deci diferența dintre tablă şi deformație este de 0,34 mm adică această valoare trebuie să se îndepărteze prin metoda de îndreptare cu încălziri locale şi electromagnetul. Luând în considerare că pe spațiul de 400x400 mm se amplasează 7 linii şi şapte coloane de găuri şi pe prima linie avem 4 găuri (distanța dintre găuri

fiind 100 mm), iar pe a doua linie doar 3, asta înseamnă că pe o porțiune de 400x400 mm există 25 de găuri.

Pentru a elimina această abatere de 0,34 mm, luând în considerare valorile contracțiilor obținute prin aplicarea unei încălziri punctiforme din tabelul 6.6.: Δb=0,045 respectiv Δb=0,05, rezultă numărul de puncte necesare care trebuiesc încălzite în vederea eliminării acestor deformații.

$$nr.înc. = \frac{0,34}{0,045} = 7,55 \qquad \text{adică 8 puncte} \qquad (3.5.)$$

$$nr.înc. = \frac{0,34}{0,05} = 6,8 \qquad \text{adică 7 puncte} \qquad (3.6.)$$

În acest caz apare o diferență de 17 respectiv 18 găuri (între numărul de puncte care trebuiesc încălzite şi tabla cu găuri care se utilizează). Bine înțeles dacă deformația este mai mare aceste diferențe scad.

Se pune problema dacă utilizăm metoda de îndreptare cu electromagnetul, unde tabla deformată este strânsă între electromagnet şi placa găurită, unde/în care puncte se va efectua încălzirea, fiindcă nu se ştie unde/în care găuri s-a îndepărtat tabla de electromagnet.

Răspunsul este simplu: se va încălzi în toate găurile, dar în gaura unde tabla la atingerea flăcării imediat începe să-şi schimbe culoarea, acolo se va încălzi până la culoarea roşu vişiniu, iar în găurile unde nu începe să-şi schimbe tabla culoarea, se sistează imediat încălzirea locului respectiv şi se trece cu încălzirea în gaura următoare.

Anexa 4 – Elemente de bază pentru optimizarea metodelor de îndreptare

Tabel 4.1. Prețuri utilizate

Reper	Cost	lei/unitate de măsură
Oxigen	0,03	lei/l
Acetilenă	0,04	lei/l
Apă	0,0016	lei/l
Manoperă	4,7	lei/h
Electrod Supertit Fin d_e=4 mm	6,65	lei/kg
Electrod de cărbune d_e=6 mm	1,35	lei/buc
Energie electrică	0,35	lei/kW

Tabel 4.2. Consumul de manoperă, material şi energie la îndreptarea cu flacără de gaze şi răcire cu apă

Operația	Timp de execuție, h	Consum			
		C_2H_2, l	O_2, l	H_2O, l	Energie, kW/h
Încălzire	0,23	70	70	-	-
Răcire	0,25	-	-	210	-
Îndreptare 2 operatori	2x0,33	-	-	-	-

Tabel 4.3. Consumul de manoperă, material şi energie la îndreptarea cu arc electric cu electrod învelit şi răcire cu apă

Operația	Timp de execuție, h	Consum		
		Supertit Fin, Kg	H_2O, l	Energie, kW/h
Încălzire	0,29	0,254	-	1,44
Răcire	0,361	-	303,34	-
Îndreptare 2 operatori	2x0,33	-	-	-

Tabel 4.4. Consumul de manoperă, material şi energie la îndreptarea cu arc electric cu electrod de cărbune şi răcire cu apă

Operația	Timp de execuție, h	Consum		
		Consum electrozi de cărbune, Buc	Apă, l	Energie electrică, kW
Încălzire	0,144	2	-	1,008
Răcire	0,2	-	168	-
Îndreptare 2 operatori	2x0,33	-	-	-

Tabel 4.5. Consumul de manoperă, material şi energie la îndreptarea cu electromagnet

	Timp de execuție, h	Consum		
		C_2H_2, l	O_2, l	Energie electrică kW
Încălzire	0,058	17,5	17,5	0,116
Îndreptare de retușare	0,033	-	-	-

Tabel 4.6. Consumul de manoperă, material şi energie la îndreptarea cu placă vacumetrică şi încălziri locale

	Timp de execuție, h	Consum		
		C_2H_2, l	O_2, l	Energie electrică pentru pompa de vid kW
Încălzire	0,0778	23,33	23,33	0,152
Îndreptare de retuşare	0,033	-	-	-

Tabel 4.7. Costurile îndreptării unui panou al peretelui lateral

Procedeu de îndreptare	C_{MA} lei	C_{MO} lei	C_W lei	C_{RE} lei	$C_{îndreptare}$ lei	$C_{retuşare}$ lei	$C_{total\ îndreptare}$ lei
a	5,236	3,008	0	6,016	14,26	3,13	17,39
b	2,174	7,3273	0,5040	14,6546	24,66	3,13	27,79
c	2,9688	1,9646	0,3528	3,9292	9,2154	3,13	12,3454
d	1,225	0,5452	0,041	1,0904	2,9016	0,3102	3,2118
e	1,6331	1,4617	0,0533	2,9234	6,0715	0,3102	6,3817

Tabel 4.8. Timpii de îndreptare şi retuşare la un panou al peretelui lateral

Procedeu de îndreptare	T_{inc} h	T_{rac} h	T_n h	$T_{retuşare}$ h	T_{total} h
a	0,23	0,25	0,64	0,67	1,31
b	0,29	0,361	1,56	0,67	2,23
c	0,144	0,2	0,42	0,67	1,09
d	0,058	0	0,116	0,033	0,149
e	0,0778	0	0,311	0,033	0,344

Tabel 4.9. Săgeata rezultată după îndreptare la un panou al peretelui lateral

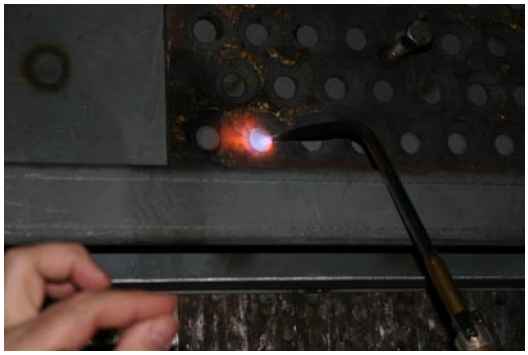
Procedeu de îndreptare	f, mm	f_{med}, mm
a	3,0-4,0	3,5
b	3,0-4,0	3,5
c	3,0-4,0	3,5
d	0,5	0,5
e	0,5	0,5

Tabel 4.10. Analiza calității peretelui lateral după îndreptare

Procedeu de îndreptare	Subțiere sau îngroşare tablă	Focar coroziune	Urme de ciocan după îndreptare
a	0	1	1
b	1	1	1
c	1	1	1
d	0	0	0
e	0	0	0

Anexa 5 – Prezentarea practică a îndreptării cu electromagnet şi încălziri locale

Foto 5.1. Instalația de îndreptare cu electromagnet



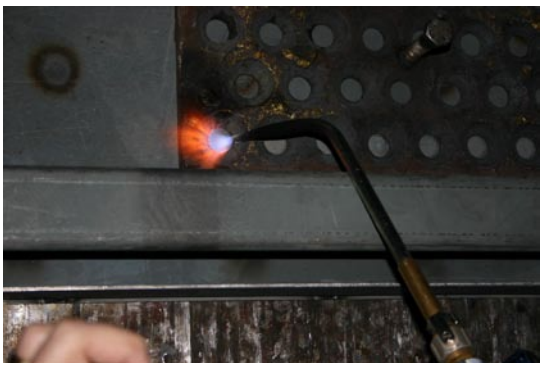


Foto 5.2. Încălziri punctiforme cu flacără oxigaz