

STUDII ȘI CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE IN CURENȚI DE INALTĂ FRECVENȚĂ A UNOR POLIMERI

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR
de către

Ing. Nicolaie Vărzaru

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea
Prof.univ.dr. ing. Ioan Vida-Simiti
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Solomon
Prof.univ.dr.ing. Victor Budău

Ziua susținerii tezei: 08.06.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2012

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației al Universității „Politehnica” din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Ion Mitelea pentru îndrumare științifică.

Timișoara, iunie 2012

Nicolaie Varzaru

Varzaru, Nicolaie

Studii și cercetări asupra procesului de sudare în curenți de înaltă frecvență a unor polimeri

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. 27, Editura Politehnica, 2012, 138 pagini, 162 figuri, 25 tabele.

ISSN:1842-7855

ISBN:978-606-554-494-9

Cuvinte cheie: Sudare, CIF, validare, statistică.

Rezumat,

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- Aprofundarea mecanismului de realizare a sudurilor fără defecte de continuitate a materialului și cu proprietăți reproductibile.
- Definirea unei metodologii de calcul pentru procesul de sudare CIF.
- Abordarea statistică a validării procesului de sudare.
- Influența caracteristicilor materialelor (structura, grosime etc) asupra procesului de sudare.
- Stabilirea condițiilor de sudabilitate a polimerilor.

În introducere se prezintă necesitatea procesului de sudare cu curenți de înaltă frecvență în industria constructoare de autoturisme, modul și condițiile de realizare al acestuia.

Din aceste experimente se observă că temperatura la care este adus materialul în vederea sudării, timpul de sudare și presiunea de sudare sunt parametri care influențează major caracteristicile îmbinării sudate.

Calculul încălzirii dielectrice redă modul de calcul al capacității ansamblului de sudare și variația în diferite faze ale acesteia, considerând electrozii ca armături ale condensatorului, iar foliile de PVC ce se sudează dielectricul. Se determină prin calcul și monograme caracteristicile optime ale electrodului (dimensiunea, temperatura, toletanța etc) și ale mașinii de sudare CIF.

Procedura experimentală determină statistic variația gradientului termic pe secțiune în funcție de grosimea materialului și varianta de sudare.

Validarea procesului de sudare prezintă echipamentul utilizat în experimente, prezentarea fluxului tehnologic și redă metodologia validării procesului prin interpretări statistice.

Controlul calității îmbinărilor sudate prezintă defecte posibile și modalități de soluționare întâlnite de-a lungul experimentelor.

În finalul lucrării sunt prezentate concluziile și contribuțiile originale.

CUPRINS

Introducere.....	6
1. Mărimi fizice fundamentale ale procesului de sudare.....	8
1.1 Fundamente matematice și fizice.....	8
1.2 Câmpul electric și condensatorul.....	8
1.3 Liniile câmpului electric.....	11
1.4 Inducția (electrizarea prin influență).....	12
1.5 Polarizarea dielectrică.....	14
1.6 Condensatorul în circuit de curent continuu.....	15
1.7 Condensatorul în circuit de curent alternativ.....	16
1.8 Dependența frecvenței de rezistență în curent alternativ.....	18
2. Cerințe impuse polimerilor la sudarea cu curenți de înaltă frecvență.....	20
2.1 Caracterizarea materialelor folosite în experimente.....	20
2.2 Premize legate de material la încălzirea dielectrică.....	22
2.3 Premize legate de energie la încălzirea dielectrică.....	32
2.4 Efectul structurii asupra sudabilității CIF a polimerilor.....	36
2.5 Procedura experimentală.....	41
2.6 Concluzii parțiale.....	46
3. Calculul încălzirii dielectrice.....	47
3.1 Zona de încălzire, conductibilitatea termică și suprafața capacitivă.....	47
3.2 Efectul grosimii materialului asupra căldurii dezvoltate.....	51
3.3 Fenomene fizice legate de energia necesară obținerii sudurii CIF pentru diferite materiale.....	52
3.4 Algoritm de calcul pentru sudarea foliilor PVC.....	57
3.6 Concluzii parțiale.....	70
4. Variante ale procesului de sudare a termoplastelor.....	71
4.1 Sudarea simetrică.....	71
4.2 Sudarea asimetrică.....	72
4.3 Sudarea combinată.....	73
4.4 Conducerea experimentelor.....	74
4.5 Concluzii parțiale.....	85
5. Validarea procesului de sudare.....	86
5.1 Echipamentul folosit în experiment.....	86
5.2 Organizarea locului de muncă.....	92
5.3 Utilizarea statisticii la validarea procesului CIF.....	96
5.4 Incercări experimentale.....	98
5.5 Concluzii parțiale.....	111
6. Controlul calității îmbinărilor sudate.....	112
6.1 Influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor de rezistență mecanică ale sudurii omogene.....	112
6.2 Criterii de apreciere a calității îmbinărilor sudate.....	115
6.3 Defecte posibile și modalități de soluționare.....	116
6.4 Concluzii parțiale.....	128
7. Concluzii și contribuții originale.....	129
Lista lucrărilor științifice elaborate și publicate.....	131
Bibliografie.....	132

INTRODUCERE

Industria procesării materialelor plastice a avut o creștere importantă în ultimii 50 de ani, în care dezvoltarea noilor tehnologii de sudare a jucat un rol determinant.

Aceasta dezvoltare a survenit ca urmare a noilor componente cerute în faza de design în sectoare inovative precum domeniul medical, industria constructoare de autoturisme și industria de împachetare.

În aceasta direcție, sudarea materialelor termoplastice folosind curenții de înaltă frecvență CIF este un domeniu de mare interes în producție.

În aceasta lucrare se va prezenta aptitudinea la sudare CIF a unor polimeri în industria automotive. Un polimer este o substanță compusă din molecule cu masă moleculară mare, formată dintr-un număr mare de molecule mici identice, numite monomeri, legate prin legături covalente.

Industria construcțiilor de mașini și autovehicule a înregistrat un ritm înalt de asimilare a materialelor plastice: în medie, pe plan mondial, 44% anual. Principalele tipuri de polimeri folosiți sunt policlorura de vinil, poliolefinele și polimerii stirenici. Direcțiile de utilizare a materialelor plastice în construcția de mașini se diversifică și se multiplică continuu.

Dezvoltarea construcției de autoturisme, coroborată cu obținerea unor componente de înaltă calitate la prețuri minime pentru această industrie, a condus la apariția unor materiale cu performanțe îmbunătățite care să poată fi îmbinate prin sudare în curenți de înaltă frecvență (CIF).

Implementarea industrială a unor asemenea tehnologii de mare productivitate pretinde, din cauza riscurilor de defecte precum și a cerințelor de siguranță impuse în acest domeniu, avize corespunzătoare de calitate pentru o prelucrare ireproșabilă fără diminuarea proprietăților de întrebuințare.

Evoluția spre un management al calității constă în tranziția de la un aviz al lipsei de defecte pe produs la evitarea apariției acestora prin măsuri preventive pe întreaga desfășurare a producției, începând de la design până la montajul final.

Un pas important s-a realizat când controlul a fost inclus în succesiunea operațiilor din cadrul procesului de producție ceea ce presupune verificarea și măsurarea parametrilor de proces, a reperelor, a subsansamblelor și a produsului finit [1].

Pentru produsul aflat în fabricație asigurarea calității depinde de modul în care este stapânit procesul, prin aceasta înțelegând ansamblul de factori, personal, mașini, aparate și metode care concură la realizarea lui.

Monitorizarea și măsurarea parametrilor de proces în industria auto este cerința ISO TS 16494 (MANUAL DE MANAGEMENT AL CALITĂȚII referențial SR EN ISO 9001:2001) [7].

Sudarea CIF se realizează sub acțiunea unui câmp electric de înaltă frecvență, unde moleculele materialului plastic sunt aduse în mișcare cu o viteză de cca. 27 mil. ori /sec și prin frecarea moleculelor se produce o căldură ce va topi superficial materialul, iar prin aplicarea unei presiuni un interval de timp, se

realizează cusatura sudată. Câmpul electric va fi transferat materialului prin intermediul unei matrițe din material metalic (electrodul).

Procesul tehnologic și reglarea energiei la sudarea CIF se face considerând mașina de sudat în curenți de înaltă frecvență - Generator și Presă ca Emițător și Receptor.

Când un electrod nou, o matriță de sudare nouă sau un nou material sunt utilizate, puterea generatorului și presiunea trebuie succesiv alese, astfel încât aplicația GENERATOR- PRESĂ- MATRIȚA DE SUDARE să fie optimă.

Alegerea greșită a componentelor mașinii de sudare CIF (generator, presă, matriță de sudare) poate conduce la un proces de sudare nesatisfăcător, necontrolat sau chiar la imposibilitatea transmiterii energiei în materialul ce urmează a fi sudat și deci la nerealizarea îmbinării sudate.

Pentru înțelegerea procesului de sudare CIF vom face o analogie cu emițătorul radio și receptorul radio. Când receptorul radio și canalele sunt setate la aceeași frecvență, muzica transmisă de emițător, va fi foarte bine redată de receptor către mediul înconjurător.

Dacă emițătorul- receptorul nu sunt setate exact la aceeași frecvență muzica redată va avea o calitate slabă, cu zgomote și bruiaje, iar dacă sunt setate la frecvențe diferite muzica nu este receptată. Prin analogie, dacă generatorul CIF este emițătorul, iar matrița de sudare este receptorul, este logic ca cele două unități să aibă aceeași frecvență pentru a funcționa. În contrast cu aplicația radio, aici avem un generator CIF și o presă- matriță de sudare care nu au potențiomtru pentru controlul volumului. Ajustarea caracteristicilor îmbinării sudate este realizată prin reglarea frecvenței generatorului și anume în cazul reducerii frecvenței generate rezistența la rupere a îmbinării sudate va fi mai slabă.

Pentru a contracara acest efect, mașina de sudare conține un condensator reglabil care conduce la diminuarea variațiilor transmiterii energiei de la generatorul CIF către matrița de sudare [9].

În procesul de sudare CIF, condițiile de realizare a unei îmbinări sudate sunt:

- Materialele ce urmează a fi sudate trebuie să fie încălzite în zona de contact, până la topire pentru a se realiza unirea la nivel molecular;
- Îmbinarea sudată se realizează printr-o presiune de valoare specificată, într-un timp specificat;
- După realizarea topirii materialelor în timpul de sudare, acestea trebuie răcite sub presiune într-un timp de răcire specificat.

Rezultatul este o îmbinare sudată apropiată ca rezistență mecanică de cea a materialului original.

Polimerii care se sudează prin CIF sunt materiale bipolare care se încălzesc prin frecarea moleculelor cauzată de schimbarea polarității (27 milioane ori / secundă) prin aplicarea unui curent de înaltă frecvență. Întrucât polimerii sunt materiale slab conducătoare electric, cu o înaltă constantă dielectrică, ei acționează ca un dielectric între electrozii matriței de sudare, se încălzesc și sub presiunea exercitată de electrozi, după timpul de răcire se realizează îmbinarea sudată [9,6].

În capitolele următoare vom trata mărimile fizice fundamentale ale procesului de sudare, cerințe impuse polimerilor la sudarea CIF, calculul încălzirii dielectrice, variante ale proceselor de sudare a polimerilor termoplastici, caracteristicile mecanice și structurale ale îmbinării sudate și vom încheia cu prezentarea concluziilor și contribuțiilor originale.

1. Mărimi fizice fundamentale ale procesului de sudare

1.1. Fundamente matematice și fizice

Multiplii decimali și litere grecești folosite ca simbol sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1. Multiplii decimali și litere grecești

Numar	Magnitudine	Simbol	
1 Trilion	10^{18}	Exa	E
1 Biliard	10^{15}	Peta	P
1 Bilion	10^{12}	Tera	T
1 Miliard	10^9	Giga	G
1 Milion	10^6	Mega	M
1 Mie	10^3	Kilo	k
1 Sută	10^2	Hecto	h
1 Zece	10^1	Deca	da
1 Unu	10^0		
1 Zecime	10^{-1}	Deci	d
1 Sutime	10^{-2}	Centi	c
1 miime	10^{-3}	Mili	m
1 Milionime	10^{-6}	Micro	μ
1 Miliardime	10^{-9}	Nano	η
1 Bilionime	10^{-12}	Pico	p
1 Biliardime	10^{-15}	Femto	f
1 Trilionime	10^{-18}	Ato	a

O parte din mărimile prezentate în tabel se vor regăsi în lucrare.

1.2. Câmpul electric și condensatorul

În următorul experiment se descriu fenomenele fizice care apar într-un condensator, aplicând o tensiune directă de 6000V la cele două plăci metalice (armături), acestea vor fi polarizate conform figurii 1. Între plăci se suspendă o bilă cu un fir textil (neconducător electric) și observăm o oscilație a acesteia între cele două plăci încărcate electric.

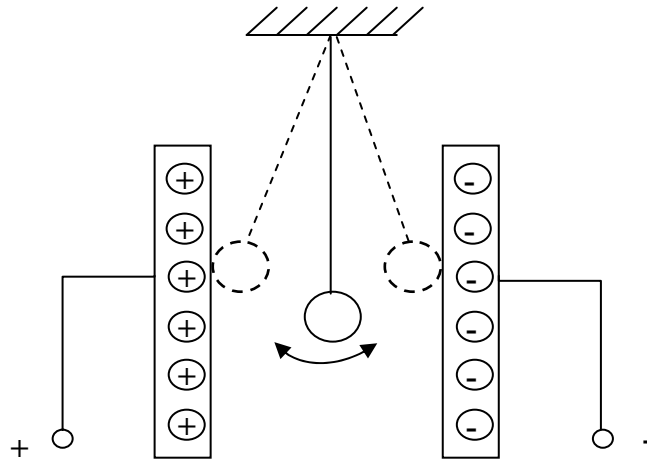


Fig.1. Reprezentarea prezenței câmpului electric

Efectul de pendul obținut se bazează pe următoarea procedură : bila este încărcată la placa pozitivă în timp până devine egală din punct de vedere al încărcării electrice și este atrasă de către placa 2 încărcată electric negativ. Bila va rămâne în contact cu placa 2 până devine egală din punct de vedere al încărcării electrice cu aceasta, moment în care bila este atrasă de placa 1. Acest proces se repetă atât timp cât puterea aplicată compensează încărcările. În spațiul dintre plăcile încărcate electric poate fi detectat efectul de forță, acest spațiu fiind numit câmp electric (fig. 1).

Acest fenomen se regăsește în procesul de sudare CIF în materialele ce se sudează la nivel molecular între electrozii matriței.

Definiții ale mărimilor electrice

Tensiunea electrică reprezintă diferența de ocupare a electrozilor între două puncte.
 $U =$ tensiunea electrică [V].

$$U = I \cdot R \quad (1)$$

Curentul electric reprezintă fluxul purtătorilor de sarcină într-o direcție definită.

$I =$ intensitatea curentului electric [A].

$$I = U/R \quad (2)$$

Curentul de înaltă frecvență reprezintă cantitatea de electricitate pe unitate de timp.

Electricitatea poate circula doar într-un circuit conductor închis.

Curentul continuu circulă tot timpul în aceeași direcție cu o forță constantă.

Curentul alternativ își schimbă direcția și forța periodic.

Curentul întotdeauna încălzește plăcile prin care trece. În jurul conductoarelor parcurse de curent electric este generat un câmp magnetic.

$R =$ rezistența conductorului [Ω].

$$R = U / I \quad (3)$$

Fluxul purtătorilor de sarcină din interiorul conductorului într-o direcție dată este oprită de ciocnirea constantă a lor cu ionii atomici ai materialului conductor.

Rezistența electrică este o mărime fizică care exprimă proprietatea unui conductor electric de a se opune trecerii prin el a curentului electric.

Pentru un conductor omogen, valoarea rezistenței este:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (4), \text{ unde:}$$

ρ = rezistivitatea materialului din care este făcut conductorul [Ωm];

l = lungimea conductorului [m];

S = secțiunea transversală a conductorului [m^2].

Rezistivitatea materialului diferă în funcție de tipul materialului.

Reciproca rezistenței materialului (R) este conductanța electrică care exprimă capacitatea unui conductor sau circuit dat de a conduce curentul electric.

Conductanța se notează cu G și se măsoară în siemens [S].

Energia electrică se notează cu W [Ws] și se calculează conform formulei 5 sau 6.

$$W = Q \cdot U \quad (5)$$

Q = sarcina câmpului electric [As].

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (6)$$

t = timpul [sec].

Sub influența tensiunii electrice U , încărcătura electrică va fi mutată cu mărimea sarcinii electrice Q și se obține energia electrică denumită și electricitate.

P = puterea electrică în W [watt] ($736 \text{ W} = 1 \text{ CP}$).

$$P = U \cdot I \quad (7)$$

$$P = W / t \quad (8)$$

$$P = I^2 \cdot R \quad (9)$$

$$P = U^2 / R \quad (10)$$

E = câmpul electric [V/m].

$$E = U / L \quad (11)$$

L = distanța dintre plăci [mm],

U = tensiunea electrică [V].

Un condensator este un dispozitiv electric pasiv ce înmagazinează energie sub forma unui câmp electric între două armături încărcate cu o sarcină electrică egală, dar de semn opus. Acesta mai este cunoscut și sub denumirea de capacitor. Unitatea de măsură, în sistemul internațional, pentru capacitatea electrică este faradul [F] și se calculează conform formulei 12.

$$C = Q / U \quad (12)$$

Capacitatea C este dependentă de constanta relativă a dielectricului ϵ_r . Constanta relativă a dielectricului are valori între 2 și 5, dar excepțional poate atinge 6-7.

$$C = 0,0885 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

A = suprafața plăcilor [cm^2],

d = distanța dintre armăturile condensatorului [cm],

ϵ_0 = constanta dielectrică în vid.

$$\epsilon_0 = 0,0885 \cdot \epsilon_r$$

ϵ_r = constanta dielectrică relativă ce are valori diferite în funcție de material în conformitate cu tabelul 3.

$$\tan \delta = R / X_c \quad (13)$$

$\tan \delta$ = factor de pierdere.

X_c = reactanța capacitivă [Ω]

R = rezistența ohmică [Ω]

În funcție de $\tan \delta$ și de mărimea condensatorului, condensatorul are pierderi diferite.

În funcție de factorul de pierdere se dimensionează matrița de sudare (considerată capacitor) în curenți de înaltă frecvență (CIF) în conformitate cu tabelul 2.

Tabelul 2. Dependența dintre factorul de pierdere și sudabilitate

Nr. crt.	Factorul de pierdere $\tan \delta$	Sudabilitate
1	0,1	Buna
2	0,01	Adecvată
3	0,001	Nu este posibilă.

În cazul în care capacitatea C crește, reactanța capacitivă X_c scade și de asemenea în cazul în care frecvența f este mai mare, reactanța capacitivă X_c este mai mică, fapt confirmat de formula următoare.

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

f = frecvența [Hz],

X_c = reactanța capacitivă [Ω],

C = capacitatea [F],

DK = constanta dielectrică relativă.

Permitivitatea relativă și constanta dielectrică (DK) relativă sunt congruente, DK în cazul polimerilor are valori între 2 - 5, dar excepțional poate atinge 6-7.

Permitivitatea relativă ϵ_r ca mărime este totdeauna mai mare sau egală cu 1, în funcție de material și temperatură conform tabelului 3.

Tabelul 3. Permitivitatea relativă în funcție de material

Nr. crt.	Tip material	ϵ_r
1	Vacuum	1
2	Hârtie	1,8 - 2,6
3	Mică	4 - 8
4	PVC	3 - 6
5	Sticla	5 - 7
6	Apă distilată	80

ϵ_r reprezintă raportul dintre capacitatea condensatorului cu dielectric și capacitatea condensatorului cu aer.

$$\epsilon_r = \frac{\text{Capacitatea condensatorului cu dielectric}}{\text{Capacitatea condensatorului cu aer}} \quad (14)$$

În procesul de sudare cu CIF alegerea și calculul echipamentelor se face tratând matrița de sudare ca pe un condensator, iar materialele ce urmează a fi sudate ca dielectric. Algoritmii de calcul este prezentat în capitolul 3.

1.3. Liniile câmpului electric

Câmpul electric este reprezentat prin linii de câmp. Câmpul din jurul unui corp încărcat electric poate fi vizualizat cu ajutorul unor particule fine de plastic.

Liniile de câmp electric provin și sfârșesc în încărcări electrice, chiar dacă devin linii închise.

Linii de câmp electric încep de la sarcini pozitive și se încheie la sarcinile negative.

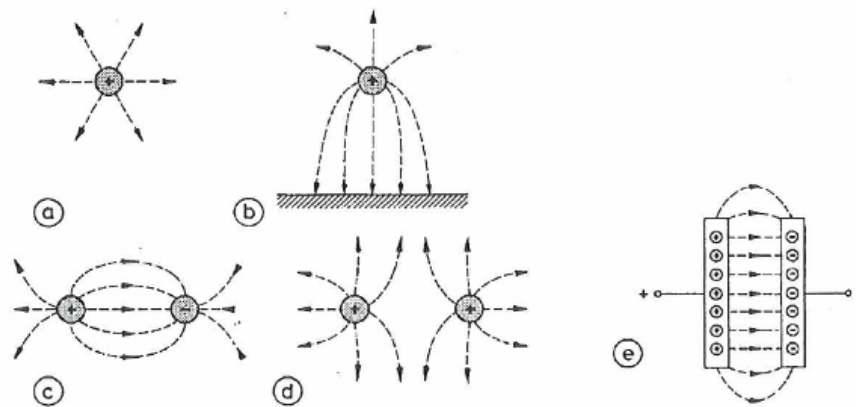


Fig.2. Reprezentarea liniilor de câmp electric

În figura 2 sunt reprezentate liniile de câmp electric pentru [34]:

- a) corp încărcat pozitiv (conducător),
- b) corp încărcat pozitiv (conducător) față de pământ,
- c) corpuri încărcate electric omogen,
- d) corpuri încărcate electric neomogen,
- e) plăci de condensator (câmp omogen).

Efectele forței în câmp electric sunt aplicate la vopsirea în câmp electrostatic, unde particulele de vopsea sunt încărcate electric. O aplicație a devierii electronilor (jetului de electroni) în câmp electric este osciloscopul.

Situația e) din figura 2 este validă în cazul procesului de sudare cu CIF.

1.4. Inducția (electrizarea prin inducție)

În următorul experiment, se consideră două plăci sub tensiune între care se introduce un corp metalic compus din două plăci metalice în contact, conform cu figura 3 și explică fenomenul numit inducție.

Cele 2 plăci sunt conectate la un voltmetru care este izolat electrostatic și sunt introduse în domeniul plăcilor sub tensiune și apoi eliberate (fig. 3).

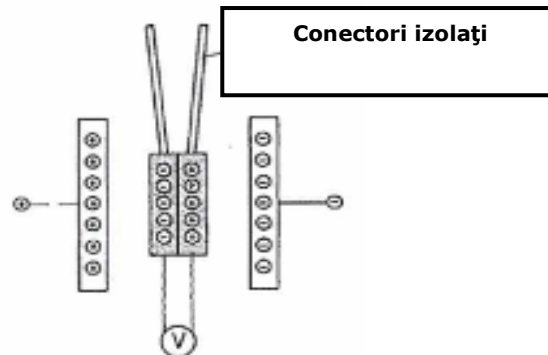


Fig.3. Reprezentarea separării purtătorilor de sarcină în câmp electric

Sub influența câmpului electric, în corpul compus din două plăci metalice apare o cădere de tensiune detectată de voltmetru. Acest fenomen poartă numele de inducție.

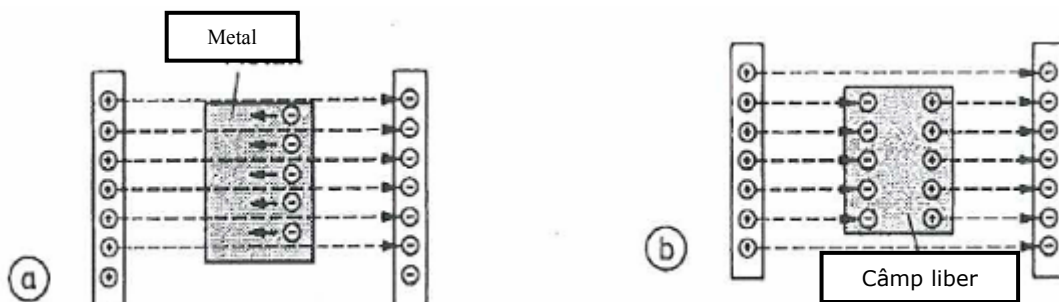


Fig.4. a) Procesul de separare a sarcinilor influențat de câmpul electric
b) Condiția după separarea purtătorilor de sarcină

Între plăcile încărcate pozitiv și respectiv negativ se crează un câmp electric (fig. 4).

Sub influența acestui câmp, purtătorii de sarcini electrice ai corpului metalic migrează atrași de placa pozitivă și respinși de placa negativă.

Acest rezultat de separare a sarcinilor în interiorul corpului metalic este reflectat în căderea de tensiune apărută.

Câmpul electric în exteriorul plăcilor și separarea purtătorilor de sarcină în corpul metalic produc tot timpul în corpul metalic o lipsă a câmpului.

În practică, echipamentele sunt proiectate astfel încât să fie protejate împotriva câmpului electric.

În figura 5 sunt explicate fazele acestui fenomen, astfel:

- În prima fază, în zona câmpului electric, deci în raza diferenței de potențial, este introdus un corp metalic, care apoi este extras și devine echilibrat electric de polaritatea câmpului electric.
- În următoarea fază, vom introduce cablurile care transportă purtătorii de sarcină într-o carcasă metalică și vom obține o separare a purtătorilor de sarcină.
- Pentru a evita încărcarea cu purtători de sarcină a carcasei, aceasta trebuie să fie conectată la pământ, așa încât la introducerea purtătorilor încărcăți

negativ sau pozitiv prin compensarea acestora să fie direcționați spre pământ și ca urmare câmpul electric dintre carcasă și pământ dispăre.

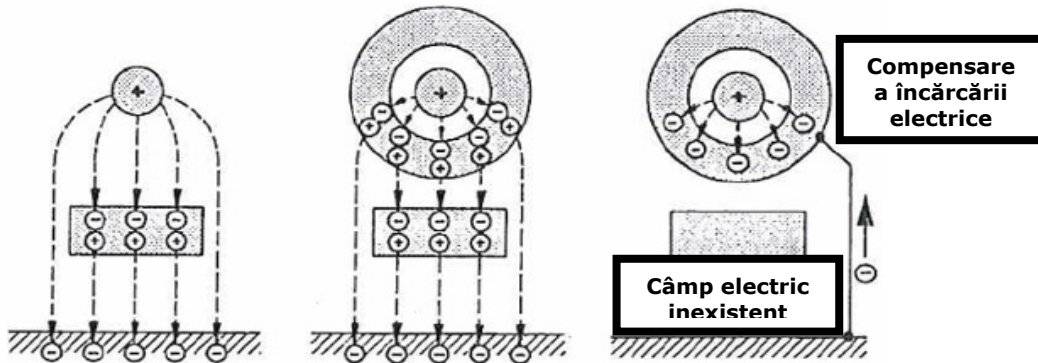


Fig.5. Procesul de protecție al carcasei metalice împotriva câmpului electric

Protecția împotriva câmpului electric (exemplu : plăci, carcase metalice, camere sau ecrane metalice) facilitează poziționarea echipamentelor și dispozitivelor electronice foarte apropiat, fără a fi afectate unele de altele.

În figura 6 reprezentăm condiția de protecție a câmpului electric generat de carcasa echipamentului, fenomen numit cușca lui Faraday.

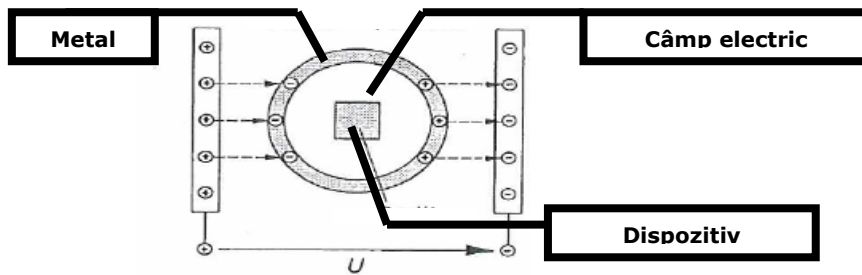


Fig.6. Reprezentarea protecției împotriva câmpului electric generat de carcasă (cușca lui Faraday)

1.5. Polarizarea dielectrică

Efectele inducției apar chiar și în materiale neconducătoare. Electronii atomilor sau moleculelor sunt legați și sub influența unui câmp electric încep să curgă. Sub influența câmpului electric apare în interiorul moleculelor o schimbare a încărcării electrice. Moleculele sunt dipoli cu încărcare pozitivă și negativă la capete. Aceasta schimbare repetată descrisă mai sus poartă numele de polarizare dielectrică și este reprezentată în figura 7.

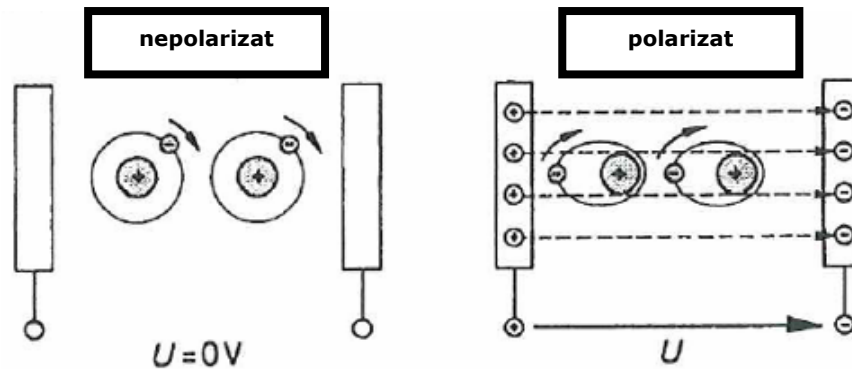


Fig.7. Reprezentarea polarizării dielectrice

În această privință există substanțe care sunt inerent dipolare. Acești dipoli, care nu au direcții preferate, sunt aliniați sub influența câmpului electric în linii paralele. Acest efect se numește polarizare paraelectrică și este reprezentat în fig. 8.

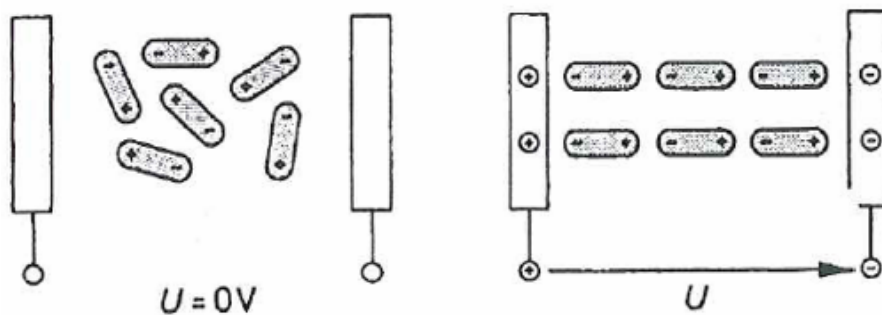


Fig.8. Reprezentarea polarizării paraelectrice

Rezultatul este același în ambele cazuri prezentate (fig. 7, 8), în interiorul izolatorului, efectul anulează fiecare corp încărcat electric continuu și este format un strat încărcat electric la suprafață. Materialul care este polarizat reprezintă dielectricul. Dacă conectăm două plăci la curent electric alternativ, atunci starea polarizării materialului izolator dintre plăci va fi permanent încărcată.

Acest rezultat duce la frecarea moleculelor materialului izolator și încălzirea acestuia. Pierderea de căldură poartă numele de pierdere dielectrică.

Când un condensator polarizat electric duce la topirea dielectricului, se poate folosi acest efect cu aplicabilitate la cuptoarele cu microunde, sudarea materialelor plastice dipolare în CIF etc.

1.6. Condensatorul în circuit de c.c.

Un condensator este un dispozitiv electric pasiv ce înmagazinează energie sub forma unui câmp electric între două armături încărcate cu o sarcină electrică egală, dar de semn opus. Acesta mai este cunoscut și sub denumirea de capacitor.

Unitatea de măsură, în sistemul internațional, pentru capacitatea electrică este faradul [F]. În continuare se va prezenta fenomenul de încărcare și descărcare a condensatorului.

Condensatorul este conectat la curent continuu (cc) prin intermediul unui circuit care conține un comutator cu două poziții și un ampermetru legat în serie cu condensatorul conform fig. 9.

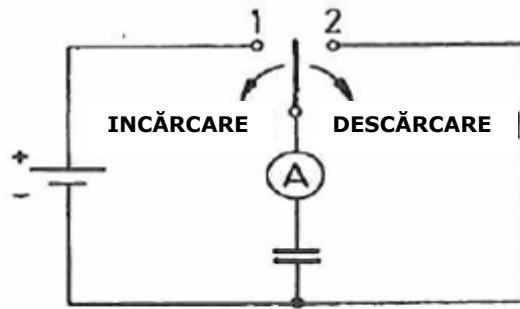


Fig.9. Reprezentarea circuitului încărcare/ descărcare a condensatorului în cc.

Pentru reprezentarea comportamentului condensatorului într-un circuit de curent continuu (cc), sunt descrise fazele:

1) Condensatorul este conectat la un curent continuu prin comutarea circuitului pe poziția 1. Se observă că acul ampermetrului arată o mișcare scurtă după care revine la zero.

2) Condensatorul este scurtcircuitat prin poziționarea comutatorului pe poziția 2, care conduce la crearea unei scurgeri de curent în direcția opusă.

Sursa de tensiune este absorbită de una din plăcile capacitorului, iar electronii sunt poziționați pe cealaltă placă, fenomen ce reprezintă încărcarea condensatorului. Schimbarea încărcării electronilor duce la schimbarea sensului curentului electric. Încărcarea condensatorului este completă când acesta atinge același nivel voltmetric ca și generatorul de energie la care este conectat, moment în care fluxul de electroni nu va mai fi încărcat deoarece tensiunea electrică pe condensator este opusă tensiunii aplicate (se echilibrează). După aceasta fază, curentul electric continuu va fi blocat. Încărcarea condensatorului rămâne validă și după decuplarea de la sursa de energie.

Condensatorul încărcat este capabil să dezvolte o descărcare în direcția opusă prin întreg circuitul, până când încărcarea energetică a plăcilor condensatorului este balansată.

Aceste fenomene duc la concluzia că, un condensator poate înmagazina energie electrică și poate închide circuite de cc.

1.7. Condensatorul în circuit de c.a.

Pentru a analiza fenomenele condensatorului în curent alternativ (c.a.) conectăm un condensator de $10 \mu\text{F}$ la un generator de curent continuu de 220 V și un condensator similar la un generator de curent alternativ de 220V conform fig.10. Așa cum am menționat la capitolul 1.5, condensatorul blochează curentul continuu (excepție fiind încărcarea rapidă a șocului de curent).

Rezistența condensatorului în curent continuu este infinită. În circuit alternativ, condensatorul nu este energetic întrerupt și este urmărit aparent de o putere care acționează ca un rezistor (rezistență). Condensatorul în curent alternativ se comportă ca un rezistor, care va avea ca referință reactanța capacitivă X_c [Ω].

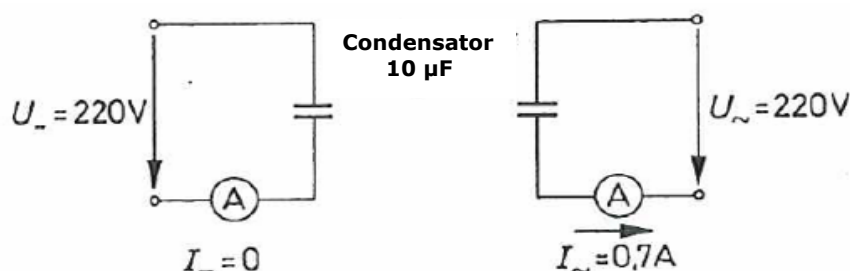


Fig. 10. Reprezentarea circuitelor în c.c. și c.a. pentru determinarea comportamentului condensatorului.

Tensiunea alternativă a condensatorului este transferată încărcând și descărcând fiecare pol electric. Circuitul așadar oscilează continuu prin încărcare și descărcare. Chiar dacă rezistența este numită reactanță capacitivă deoarece condensatorul absoarbe energia încărcată (reactivă) sintetizată în câmp electric, în timpul descărcării în circuitul electric obținem o energie « oarbă », adică fără efect vizibil. Variația sinusoidală a curentului și tensiunii circuitului de c.a. a reactanței capacitivă este vizibilă doar folosind osciloscopul și este redată în figura 11.

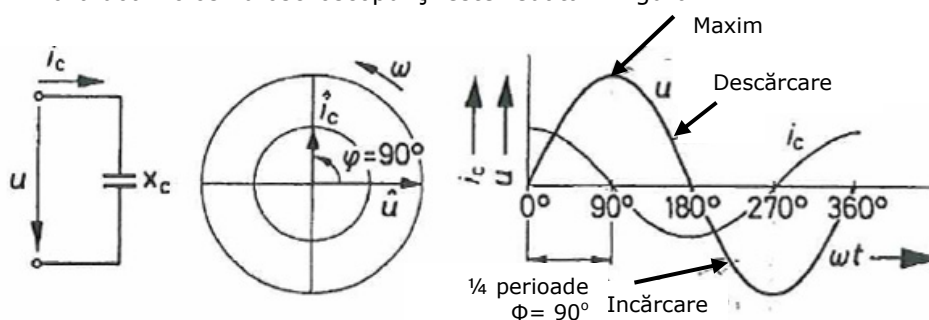


Fig. 11. Reprezentarea circuitului de c.a. cu rezistența pur capacitivă
Schimbarea fazei $\varphi=90^\circ$ (1/4 perioade).

Un condensator în circuit de c.a. se comportă defazat față de o bobină cu 90° . Dacă aplicăm o tensiune de c.c. pe condensator, aceasta crează o scurgere scurtă de curent. Prin schimbarea tensiunii, putem cauza o încărcare a condensatorului cu efect scurt, tensiunea se scurge în sens opus descărcării și putem concluziona că, în principiu, un curent apare în circuit când este aplicată o tensiune electrică. Trecând la tensiunea în c.a. o caracteristică a acestuia este că se schimbă perpetuu. În timp ce tensiunea crește, încărcarea cu curent scade, deoarece apare o descărcare a acestuia. Electricitatea atinge valoarea maximă când tensiunea trece prin valoarea maximă și curentul prin zero.

Deci, conform interpretărilor și în același timp, conform graficului din fig. 11:

- $U = 0$ și $I = \hat{I}$, unde \hat{I} este valoarea maximă a curentului,
- $U = \hat{U}$ și $I = 0$, unde \hat{U} este valoarea maximă a tensiunii.

Reactanța capacitivă se determină cu legea lui Ohm utilizând valorile efective ale curentului și tensiunii aplicate (15):

$$X_c = \frac{U_c}{I_c} \quad (15)$$

Analiza rezultatelor măsurate arată că reactanța capacitivă descrește cu creșterea frecvenței și capacității și acest lucru este reflectat în formula 16.

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (16)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (17), \text{ unde:}$$

X_c = reactanța capacitivă [Ω],

f = frecvența [Hz],

ω = frecvența unghiulară [1/s],

C = capacitatea [F].

1.8. Dependența frecvenței de rezistența în c.a.

1.8.1. Rezistența eficientă

Rezistența eficientă se obține la valori ale frecvenței constante de la 0 la 1000 Hz. Rezistența reflectă căldura care se obține în acest proces. Peste 1000 Hz rezistența crește din cauza fenomenului numit efect superficial (« skin effect »), unde curenții turbionali reduc secțiunea transversală a conductorului și acest fenomen duce la creșterea rezistenței.

Curenții turbionali, ca toți curenții, generează căldură și forțe electromagnetice. Căldura poate fi produsă de încălzirea inductivă. Forțele electromagnetice creează mișcare sau generează un efect puternic de frânare. Efectul curenților turbionali poate fi redus prin folosirea plăcilor de grosime redusă.

1.8.2. Reactanța inductivă

Reactanța inductivă este direct proporțională cu frecvența alternării tensiunii conform formulei 17.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (17), \text{ unde:}$$

L = inductanța proprie [Henri (H)]

Inductanța este o mărime care caracterizează producerea fenomenului de inducție electromagnetică într-un circuit electric, egală cu raportul dintre fluxul magnetic Φ ce străbate un circuit și intensitatea curentului electric ce produce acest flux. Dacă fluxul Φ este produs de curentul electric ce străbate circuitul considerat, inductanța L se numește inductanță proprie.

1.8.3. Reactanța capacitivă

Reactanța inductivă este invers proporțională cu frecvența alternării tensiunii conform formulei 18.

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (18)$$

Dependența între rezistență în c.a. și frecvență este reprezentată în fig.12.

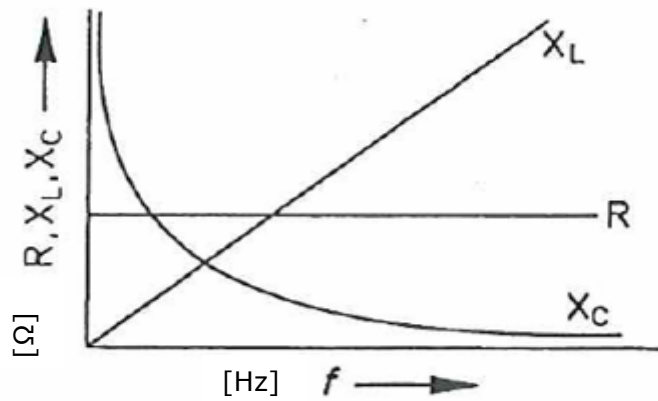


Fig. 12. Reprezentarea dependenței rezistenței c.a. de frecvență

X_L = reactanța inductivă [Ω],
 X_C = reactanța capacitivă [Ω],
 R = rezistența circuitului electric [Ω],
 f = frecvența [Hz].

2. CERINȚE IMPUSE POLIMERILOR LA SUDAREA CU CURENȚI DE ÎNALTĂ FRECVENȚĂ

2.1 Caracterizarea materialelor folosite în experimente

Policlorura de vinil notată PVC este o substanță din categoria materialelor termoplastice cu structură amorfă. Sunt două tipuri de PVC, „forma dură” și „forma moale” la care s-au adăugat stabilizatori. Forma moale este mai răspândită, fiind adecvată prelucrărilor tehnice. Ea este forma de PVC care se aplică pe dușumea, sau în construcții la conductele din material plastic și în industria automotive pentru diferite componente ale autoturismelor (parasolare, covorașe, etc).

Policlorura de vinil se obține prin polimerizarea monomerului numit clorură de vinil conform reacției (fig. 13):

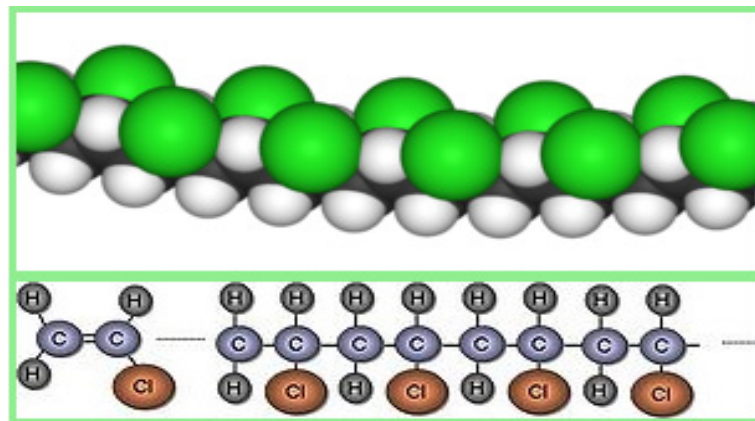
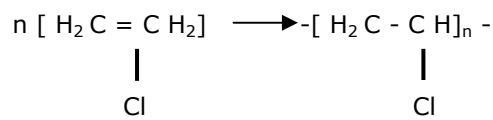


Fig. 13. Formula chimică și structura policlorurii de vinil

Reacția de polimerizare are loc la temperatură și presiune normală și în prezența peroxizilor sau la temperatură de 50 - 950°C și presiunea de 5-15 atm. În urma reacției de polimerizare se obțin particule de PVC cu diametrul cuprins între 100-180 μm insolubile în monomer. PVC-ul este un plastic dur care devine flexibil prin adăugarea plastifianților.

Modul în care sunt așezate moleculele duce la o formă ușor cristalină generând proprietăți mecanice ridicate mai ales rigiditate și vâscozitate când masa moleculară

este mică. Acestea se mențin și atunci când se adaugă aditivi pentru plastifiere. Structura este relativ instabilă în prezența căldurii și poate suferi reacția de dehidroclorificare. Acesta dă naștere multilateralității, astfel din PVC se pot obține numeroase materiale utilizate în construcții și în industria medicală.

În funcție de utilizare materialul PVC este caracterizat de doi parametri: masa moleculară (K) și vâscozitatea.

Pentru a defini un produs care conține policlorură de vinil, se va folosi următorul cod: S 65/170 (K=65 și o vâscozitate=170).

PVC-ul cu masa moleculară K= 66-68 se prezintă într-o stare de agregare solidă și este folosit la țevi, ramele geamurilor etc, cel cu K= 65-71 este mai flexibil și este utilizat la pardoseli, tuburi, cabluri, produse medicale, componente de autoturisme, iar cel cu K=55-60 în industria electrocasnică.

PVC se folosește întotdeauna în combinație cu alte materiale (lubrifianți, plastifianți, stabilizatori de temperatură). Starea de agregare a acestui polimer este solidă, aspectul este opalescent, translucid, este flexibil, are rezistență mecanică bună; are stabilitate chimică deosebită și este insolubil în apă și în alți solvenți.

Punctul de topire al PVC este cuprins între 100 - 150°C. Materialul PVC este un bun izolator electric.

Caracteristicile PVC pentru forma moale și dură sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4. Caracteristicile PVC pentru forma moale și dură

Caracteristici	PVC forma dură	PVC forma moale
Densitate [g/cm ³]	1,38-1,55	1,16-1,35
Rezistență la tracțiune [N/mm ²]	50-75	10-25
Rezistență la întindere [%]	10-50	170-400
Modul de elasticitate [N/mm ²]	1000-3500	1000-3500
Duritate [N/mm ²]	75-155	75-155
Rezistență la lovire [kj/m ²]	> 20	> 20
Rezistență la zgâriere [kj/m ²]	2-75	2-75
Rezistență la străpungere [Ω]	> 10 ¹⁵	> 10 ¹¹
Rezistivitate [Ω m]	10 ¹⁶	10 ¹² - 10 ¹⁵
Rezistență electrica superficiala[Ω]	10 ¹³ - 10 ¹⁴	10 ¹¹ - 10 ¹²

În afară de proprietățile excelente de izolator electric, PVC are proprietatea de a avea o mare pierdere dielectrică.

Datorită acestei proprietăți, sudarea CIF este posibilă, făcând procesul ușor de aplicat. În graficul următor (fig.14) este prezentată constanta dielectrică (care este corelată cu pierderea de dielectric conform formulei 13) a materialului PVC în comparație cu alte materiale plastice [15].

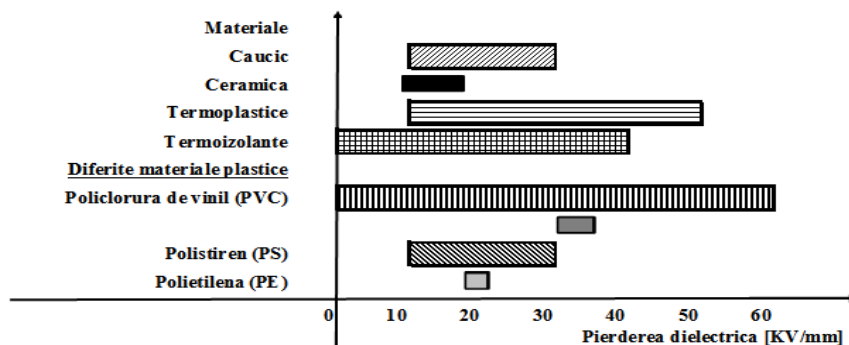


Fig. 14. Variația pierderii dielectrice în funcție de material.

Pentru studiul aptitudinii la sudare CIF al polimerilor am utilizat în timpul experimentelor 3 produse distincte:

1. Folie PVC cu inserție textilă 0,4 +/- 0,1 mm reprezentată în fig.32,
2. Folie PVC cu inserție textilă 0,6 +/- 0,1 mm reprezentată în fig.32,
3. Folie din material Malivat (PVC pe o singură parte a materialului textil) 0,6 +/- 0,1 mm reprezentată în fig.33.

Rezultatele experimentale sunt prezentate în capitolul 2.6.

Aplicațiile tehnice de succes în domeniul sudării CIF sunt bazate predominant pe descoperiri empirice.

2.2 Premize legate de material la încălzirea dielectrică

În figura 15.b sunt reprezentate curbele sinusoidale defazate ale intensității și tensiunii curentului electric. Procesul de încălzire a dielectricului unui condensator într-un circuit electric se realizează în prima jumătate a curbei sinusoidale a tensiunii aplicate conform figurii 15.b, acesta fiind important și indispensabil pentru sudarea polimerilor.

Pentru clarificarea întrebărilor legate de acest proces complex, ca fundament s-a pornit de la comportarea dielectricului condensatorului în câmp alternativ.

Este ideală analiza unui condensator cu pierdere dielectrică mică (condensator cu vacuum sau aer) într-un câmp electric, prin care trece un curent care este defazat cu 90° față de curba tensiunii conform fig. 15.

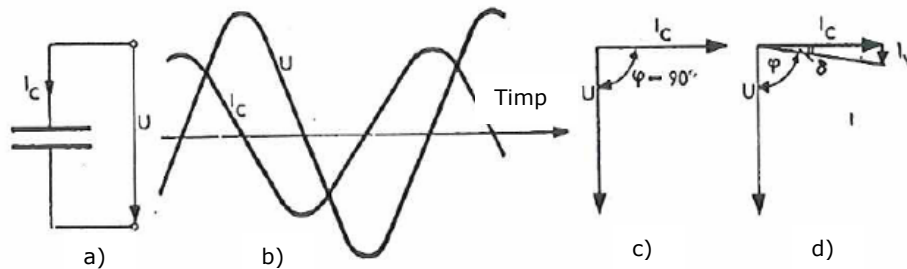


Fig. 15. a) Circuitul electric cu condensator;
b) Reprezentarea curbelor intensitate electrică și tensiune în timp;
c) Reprezentarea pierderii ideale;
d) Reprezentarea pierderii reale.

Pierdere ideală este obținută când curentul și tensiunea sunt defazate cu 90° (fig.15.c). În realitate, condensatorul nu este ideal și reduce intensitatea curentului cu diferența de unghi δ conform figurii 15.d (I = curentul reactiv, I_v = puterea activă pierdută).

Plasând între plăcile unui condensator (electrozii matriței de sudare CIF) un dielectric izolator cu conductanța neglijabilă, crescând cantitatea de purtători de sarcină Q (Coulomb), $Q = U \cdot C$, capacitatea crește proporțional cu creșterea posibilității de înmagazinare a purtătorilor de sarcină în matrița de sudare.

Analizând strict, acest efect este atribuit către două cauze:

- una *nucleară*, polarizarea deformată, efectul de împingere a electronului, în direcție opusă cu nucleul,
- deformarea similară în strânsă asociere cu orientarea dipolilor, numită orientare *polarizată*, care conform teoriei este corelată cu pierdere dielectricului.

Pierderile reale de sarcină și inerția acestora cauzate de polarizarea deformată, au ca rezultat o parte a constantei pierderii de dielectric ϵ'' . Orientarea sarcinilor realizată prin polarizare se ajustează lent și în timp prezintă o relaxare, care arată un comportament dependent de frecvență. Acest fenomen este reflectat în a doua componentă a constantei dielectrice ϵ'' .

Formula constantei dielectrice este:

$$\epsilon = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (19), \text{ unde:}$$

ϵ = constanta dielectrică,

ϵ' = prima componentă a constantei dielectrice,

ϵ'' = a doua componentă a constantei dielectrice,

j = radiația materialului dielectric.

Proprietățile dielectrice importante sunt:

- constanta dielectrică (ϵ')
- factorul de pierdere dielectric (ϵ'').

Constanta dielectrică măsoară capacitatea de stocare a energiei electrice.

Factorul de pierdere în dielectric măsoară capacitatea de a transforma energia electrică în căldură.

Constanta dielectrică și factorul de pierdere pot fi definiți în termenii permitivității complexe relative ϵ :

$$\epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' = |\epsilon| e^{-j \cdot \delta} \quad (20), \text{ unde:}$$

$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ este numită tangentă de pierdere sau factor de disipare.

Pierderea dielectrică a materialului izolator este influențată de dimensiunea armăturilor condensatorului.

Efectul creșterii capacitații de încărcare al câmpului dielectricului condensatorului este produs de defazarea în avans a tensiunii față de intensitatea curentului (fig. 15), cu un unghi de defazare mai mic de 90° .

Aceasta defazare este partea puterii aparent pierdute din puterea activă. Unghiul de defazare ϕ este cunoscut ca unghi de pierdere δ .

Comportamentul dielectricului este în principal determinat de structura atomică a moleculelor.

Decisiv pentru comportamentul dielectricului în câmp electric este și momentul dipol care are valori diferite în funcție de material după cum urmează în tabelul 5.

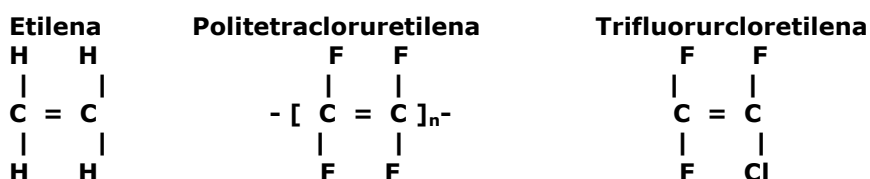
Tabelul 5. Valoarea pierderii de dielectric în funcție de material

MATERIAL		PIERDERE DE DIELECTRIC
C H ₄	Metan	0
C H ₃ Cl	Clorura de metil	1,87
C H ₂ Cl ₂	Diclorura de metilen	1,58
C H Cl ₃	Triclorometan	1,02
C Cl ₄	Tetraclorura de carbon	0

De la aceste rezultate se evidențiază particularitățile, și anume, monomerii de etilenă C₂H₄ nu sunt polari (nonpolari).

Datorita simetriei moleculare, polimerii se dezvoltă teoretic pe o direcție, exemplu fiind un lanț de parafină neramificat (petrolul).

La scară largă, polimerizarea este ramificată și nu poate fi evitată. Fenomenul este întâlnit mai des la polietilena (PE) de înaltă densitate, 1/30 – 1/50, decât la PE de joasă densitate, 1/500 – 1/1000. Impreună cu impuritățile (reziduurile catalizate în PE Ziegler) este obținut și un factor al pierderilor de dielectric [35, 38]. Acesta are o implicare extrem de mică (în cea mai mare parte neglijabilă) și se poate aplica substanțelor ca pierdere minimă virtuală. Un comportament similar arată și politetracloruretilena în care toate valențele sunt saturate cu clor.



În momentul în care atomul de fluor F este înlocuit cu atomul de clor Cl, molecula formată prezintă moment dipol ca urmare a pierderii simetriei moleculare.

Deși ambele elemente aparțin grupei halogenilor (VII), polimerul rezultat din trifluorcloretiena este polar ($C \text{ Cl} \text{ F}_3 = 0,46$) și lăsat în câmp electric alternativ oscilează.

De aici putem concluziona că desființarea simetriei în lanțul de molecule are ca rezultat oscilația dipolilor cu o pierdere de dielectric corespunzătoare deoarece clorul este mai puțin electronegativ decât fluorul.

Polipropilena are formula chimică:

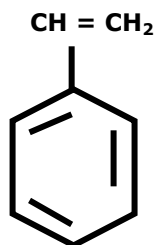


Ca și ceilalți polimeri vinilici, polipropilena nu este sintetizată printr-o polimerizare radicalică, materialul rezultat, denumit atactic, având grupele metil aranjate aleator. Lipsa oricărei ordonări moleculare scade gradul de cristalinitate conducând la un material amorf, cu puține aplicații practice.

PP comercială este obținută printr-o sinteză Ziegler-Natta care permite sinteza de polimeri orientați în spațiu, cu grad de cristalinitate controlat [35,38,40].

Valoarea pierderii dielectrice la polipropilena este ușor mai scăzută față de polietilena, deoarece este din grupa de hidrocarburi aparent nepolare care sunt influențate de compoziția și structura lor.

Vinil benzen = Stiren ($\text{CH}_2 = \text{CHC}_6\text{H}_5$) este reprezentat astfel:



Trebuie menționat faptul ca polistirenul este nepolar. Polimerii și produsele din polistiren sunt cunoscute cu proprietăți foarte mari izolatoare în câmp de înaltă

frecvență (pierderi reduse) la temperatura ambianată și doar la temperatura de tranziție vitrosă a substanței materialului sunt relativ mobili.

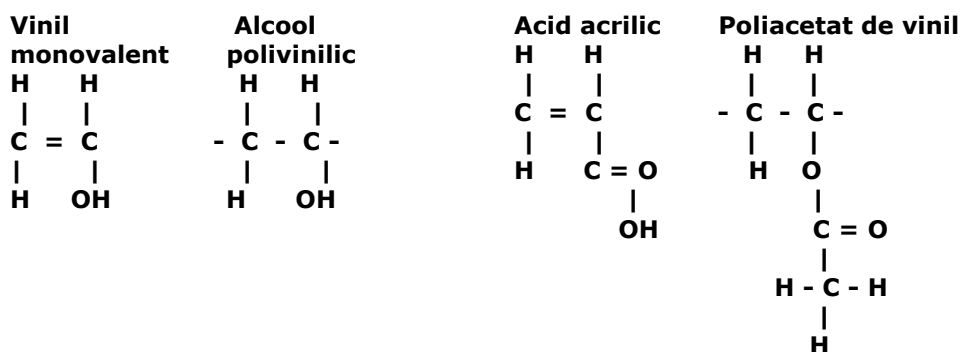
Creșterea temperaturii în material arată proprietăți dielectrice bune pentru polimerii ce conțin clor, cauzată de simetria aranjării clorului. Punctul de plecare pentru determinarea compușilor de vinil este monomerul de vinil care formează lanțuri chimice prin polimerizare.

Componenții și polimerii sunt determinați în conformitate cu:

- microstructura lor,
- momentul dipol,
- măsurătorile pierderii de dielectric.

Avantajele pentru producerea încălzirii dielectrice la fuziune sunt doar pentru momentul dipol (momentul electric), în special pentru un lanț chimic cu o lungime importantă, atunci când acesta este format de halogeni.

Ca exemple de varietăți de sinteză, exemplificăm:

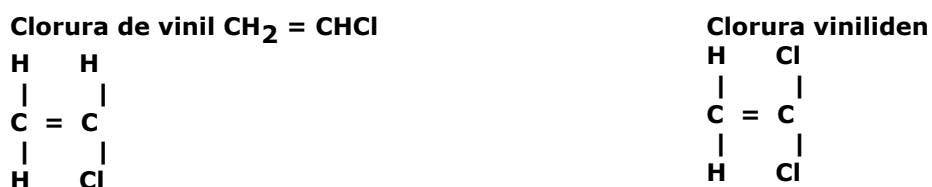


În tabelul 6 următor prezentăm diferențele pierderii de dielectric în funcție de material:

Tabelul 6. Pierdere de dielectric în funcție de material

MATERIAL		PIERDERE DE DIELECTRIC
C H ₃ F	Fluorura de metil	1,81
C H ₃ Cl	Clorura de metil	1,87
C H ₃ Br	Bromura de metil	1,80
C H ₃ I	Iodura de metil	1,64

Clorura de vinil (Cl > C) este printre monomerii care după polimerizare formează o masă plastică cu pierdere dielectrică ridicată.



Momentul dipol al poliacrilonitrilului (3,4 μ în unități Debye – unitate de măsură pentru momentul electric) este superior ca mărime în comparație cu momentul dipol al celorlalți polimeri. În același timp, este deosebit de frapantă în această sinteză, relația dintre polaritatea aparentă și temperatura „de îngheț” a dispersiei dielectrice.

După cum reiese din înregistrările momentelor dipol enumerate mai sus, cea mai redusă valoare este pentru clorura de vinil ($H_2C=CCl_2$).

Aranjamentul orizontal al atomilor de carbon și clor, $H_2C=CCl_2$ în comparație cu $H_2C=CHCl$, determină o ușoară orientare a câmpului (torsione). Aceasta arată că pierderea de dielectric depinde în primul rând de polaritate. Adicional, structura dintr-un polimer cu referire specială la mobilitatea lanțului chimic influențează major pierderea de dielectric. În mod evident, viteza de mișcare a particulelor în materialele stabile termic are de asemenea o influență importantă (exemplu: rășini fenolice). Factorul de pierdere înalt al rășinii fenolice, trebuie să le diferențieze de termoplastice și termorigide prin prisma mișcării browniene.

După comportarea la încălzire materialele plastice se împart în:

1. produse termoplastice, sunt acele produse care supuse la încălzire se înmoaie și pot fi prelucrate prin diferite procedee: presare, vâlțuire etc. După răcire se solidifică, dar printr-o nouă încălzire devin din nou plastice, procesul putând fi repetat. Ex.: polietenă, policlorura de vinil, polistirenul, materiale plastice de polimerizare;
2. produse termoreactive (rigide) sunt acele produse care se înmoaie prin încălzire putând fi prelucrate, de asemenea prin presare, vâlțuire etc, iar apoi se întăresc ireversibil (devin rigide). Ex: rășinile fenol-formaldehidice, materiale plastice obținute prin policondensare.

În cazul rășinii fenolice, pierderea dielectrică maximă $tg \delta$ se datorează în principal grupurilor libere de OH la aproximativ 10^7 Hz.

În figura 16 prezentăm câteva exemple de molecule polare:

- a) HCl,
- b) clorbenzen,
- c) n-Cloratilbenzol (dipol relativ mobil la legătura de benzen),
- d) dipol parțial al punții de sulf între lanțurile din cuciuc vulcanizat.

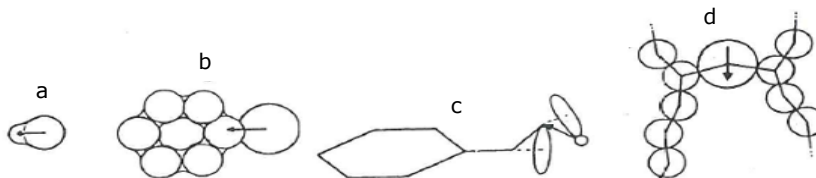


Fig. 16. Molecule polare: a) HCl, b) clorbenzene, c) n-Cloratilbenzol, d) dipol parțial a punții de sulf între lanțurile din cuciuc vulcanizat.

Este de interes mai ales comportamentul policlorurii de vinil, deoarece procesarea foliilor de PVC se face la scară largă prin sudare CIF.

În etapa monomer, clorura de vinil (monocloracetilenă) este în stare gazoasă. Polimerizarea are loc prin ruperea legăturii duble $C=C$. Odata cu creșterea lungimii lanțului de molecule, polimerul trece în stare lichidă și în cele din urmă, solidă. Armonizarea maselor atomice este reprezentată prin sfere care sunt marcate corespunzător (fig. 17). Prin condensare și solidificare distanța dintre electrozi se reduce până la atingerea unor valori de echilibru care depind de natura atomului și structura nivelelor energetice a electronilor de valență.

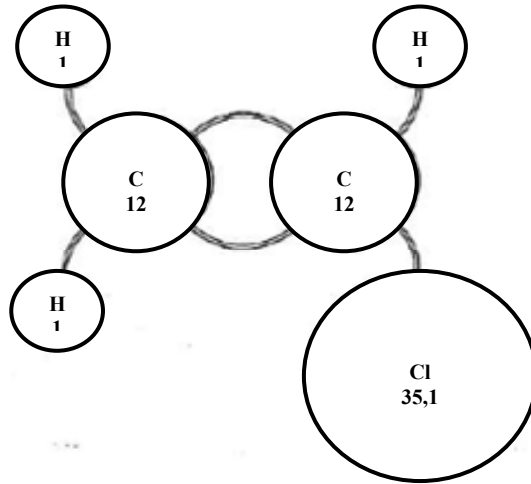
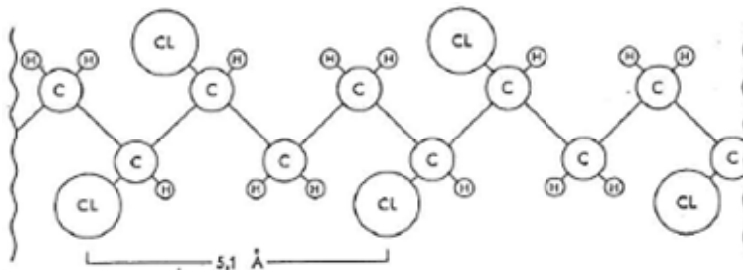


Fig. 17. Reprezentarea clorurii de vinil

In figura 18 este reprezentată secțiunea unui polimer clorvinilic.

Structuri posibile ale PVC:

Poziție PARA



Poziție ORTO

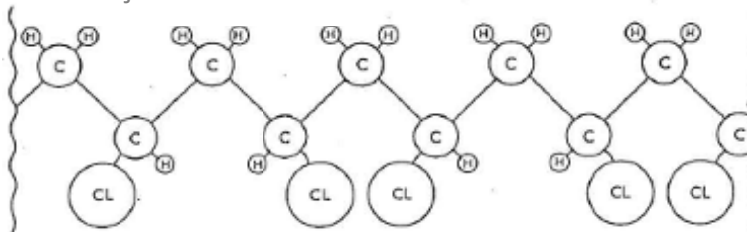


Fig. 18. Reprezentarea secțiunii structurii policlorurii de vinil

Pe structura există interpretări diferite, în conformitate cu teoriile lui Fuller [19], 1; 2;5 - poziția de atomi de clor în alternanță cu atomii de C și 1; 3 - poziția de atomi de clor alternativ cu atomii de C.

Monomerul clorură de vinil, un gaz cu un punct de fierbere la aproximativ 13 - 14 ° C, este lichefiat sub presiune și polimerizat în prezența unor inițiatori adecvați, cum ar fi compușii peroxid.

Cele trei metode de polimerizare sunt:

- polimerizare emulsie,
- polimerizare în soluție,
- polimerizare în masă sau în bloc.

Foliile transparente dure sunt obținute din polimeri solubili S.

Din polimerul emulsionat E sărac în emulgatori rezultă folii relativ transparente, iar în funcție de concentrația emulgatorilor foliile pot fi translucide.

Pentru folii moi obținute prin calandrare sunt utilizați preferențial polimerii solubili S, dar de obicei în amestec cu polimeri emulsionați E.

Tendința de a absorbi apa, în funcție de tipul și cantitatea de emulgator, îmbunătățește procesul de calandrare.

Din punct de vedere al costurilor, cea mai favorabilă este polimerizarea în masă care a câștigat teren în ultimii ani în defavoarea celorlalte polimerizări. Materia primă pentru producția de folie PVC utilizează polimeri de clorură de vinil cu greutate moleculară medie de aproximativ 30.000 la 60.000 cu $(u=1,660538782(83) \cdot 10^{-27} \text{ kg})$ și reprezintă prin definiție a 1/ 12 parte din masa izotopului ^{12}C , exprimat în kg).

Gradul mediu de polimerizare, din lungimi de lanț mai mult sau mai puțin diferite, se determină ca medie aritmetică.

Determinarea se face prin măsurarea vâscozității, rezultat exprimat prin valoarea K a polimerilor (constanta ce depinde de tipul de polimer, solvent și temperatură), prin ecuația Mark-Houwink-Sakurada [41]:

$$[\eta] = K \cdot M^a \quad (21), \text{ unde:}$$

$[\eta]$ = vâscozitatea intrinsecă,

K și a = constante ce depind de tipul de polimer, solvent și temperatură.

Relația între vâscozitatea intrinsecă, valoarea K și greutatea moleculară aproximativă M pentru poli (clorură de vinil) este prezentată în tabelul 7.

Tabelul 7. Relația între η , K și masa moleculară aproximativă M

Vâscozitatea intrinsecă $[\eta]$	Valoarea K	Masa moleculară vâscozometrică M_η	Gravimetria M_w
0.52	50	20000	40000
0.67	57	27500	55000
0.92	67	41000	82000
1.08	72	50000	101000
1.3	79	62500	123500
1.6	87	81000	168000

Valorile K în manufacturarea foliilor de PVC sunt între 55 și 80. Fluxul tehnologic și metoda de producere a foliilor PVC sunt descrise în figura 19, conform cu H. Thomass.

În figura 19 este prezentat procesul de fabricare al policlorurii de vinil, prin sinteza clasică. De asemenea, sunt prezentate procedeele cele mai întâlnite de prelucrare ale PVC:

- laminare,
- presare,
- calandrare.

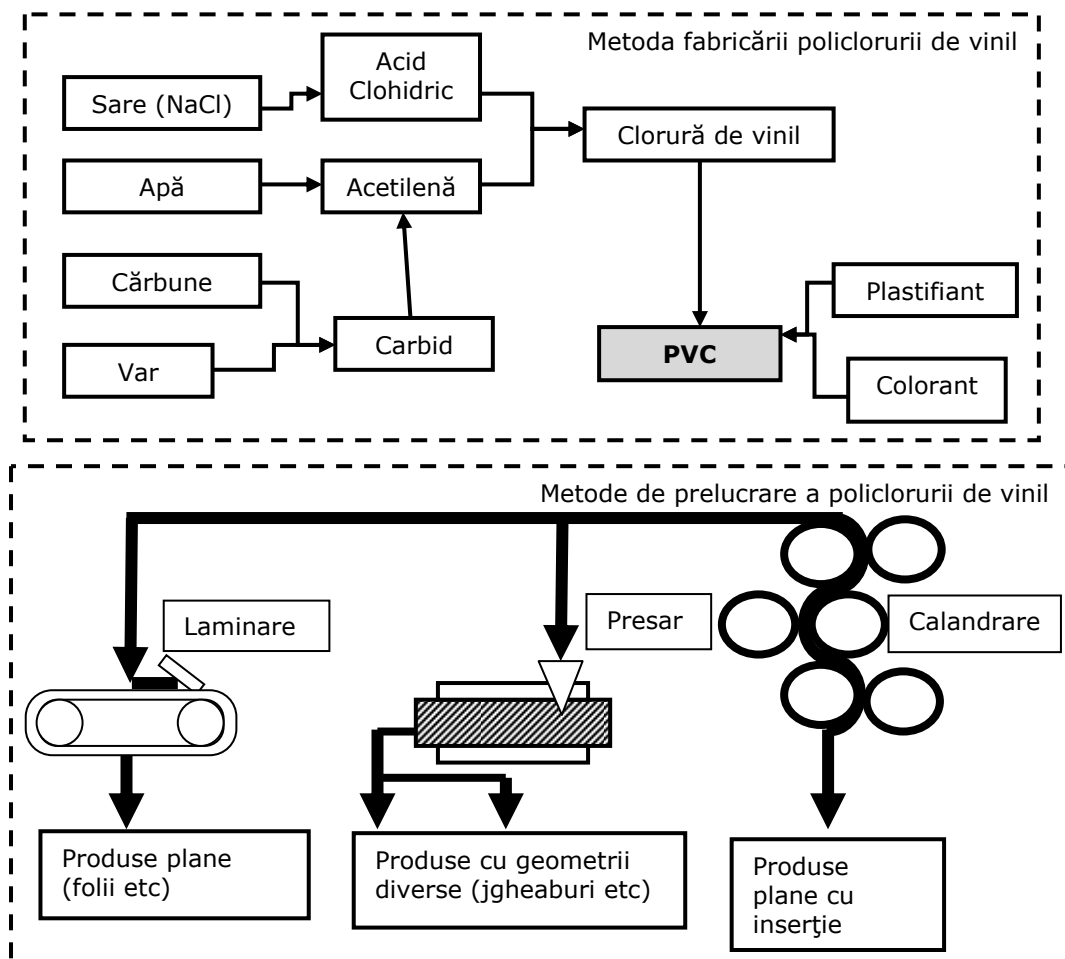


Fig. 19. Fabricarea de policlorură de vinil prin sinteza clasică și metode de prelucrare a acesteia

Mărima factorului de pierdere menționat în corelare cu valoarea K (tab. 7) are o influență semnificativă pentru sudarea CIF, practic este atins cel mai mare punct de topire, când aplicăm cel mai înalt vârf de putere.

Emulsia PVC are proprietatea de a avea o pierdere dielectrică ridicată, iar în cazul sudării CIF este utilizată ca suspensie de polimer (material de adaos).

Dependența dintre emulgatori și absorbția umezelii influențează rezultatul de fabricație al foliilor rigide în două variante: folii rigide din PVC de la polimeri E, în contrast cu foliile PVC - S obținute prin calandrare. Creșterea rezistenței materialului, a conductivității termice și creșterea pierderii dielectrice asigură sudabilitatea materialelor.

Valoarea înălțimii oscilației nu este direct proporțională cu comportamentul polar al monomerilor, ci mai degrabă cu configurația polimerilor și structura asociată, în particular cu locul moleculelor, dar este decisivă și distanța dintre ele.

Interesul inițial în acest context, este să răspundem la întrebarea dacă monomerii individuali ai unui lanț vibrează independent sau dacă macromolecula ca un întreg urmează oscilațiile câmpului electric alternativ. Rezultatele cercetărilor relevante arată oscilații de segment, cu diferențe mari pentru substanțe diferite, câteva fiind detectate ca efect al atomilor de C.

Într-un material amorf, cum ar fi PVC, isotactica (diverse greutateți moleculare pentru diferite domenii de aplicare) este puțin probabilă, dar este o mare probabilitate pentru secvența atactică (secvență aleatoare asumată de aranjamente stereochemice ale grupurilor pe atomi de carbon în lanț).

Pentru o secvență isotactică, pe parcursul a mai mult de 12 monomeri dintr-un lanț al polimerilor, nu a putut fi detectată o structură repetitivă în diagramele de analiză Röntgen publicate până acum [21].

Distribuția greutateții moleculare și greutatea moleculară mică a componentelor de polimerizare depind de structura unui polimer. O reducere a fragilității și o creștere a unghiului pierdere de dielectric are ca feedback creșterea stabilității structurii moleculare (nu avem mișcare a particulelor). Diferența termică liniară aplicată lanțului, întrunește de obicei de trei ori distanța moleculară a legăturii C - C (valența principală > valența secundară) [22].

Plastifierea policlorurii de vinil poate fi:

- externă (cu plastifianți),
- internă (prin copolimerizare cu acetat de vinil).

Plastifierea internă a materialelor PVC apare prin copolimerizarea de acetat de vinil. Copolimerii Acrilonitril-Butadien-Stiren acționează similar prin copolimerizarea cu etilena [24, 25, 26, 27, 28].

Monomerii și polimerii sunt îmbunătățiți cu plastifianți externi cu până la 15% în raportul de amestecare.

Reprezentarea asociației de macromolecule amorfe cu structură liniară de molecule fără lanțuri laterale (ramificații) este redată în figura 20. PVC rigidă (dură) prezintă aceste structuri inflexibile conform figurii 20.

În figurile 20, 21, 22 sunt reprezentate grafic fazele structurale ale polimerilor în timpul procesului de sudare CIF (la aplicarea unui câmp electric alternativ).

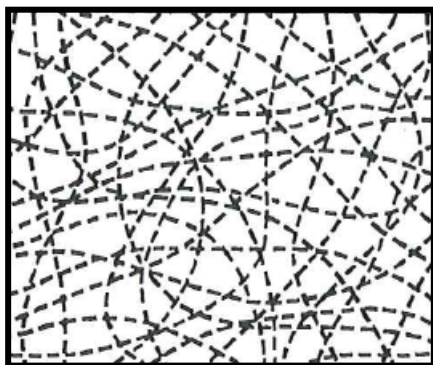


Fig. 20. Reprezentarea polimerilor amorfi cu structura inflexibilă (PVC rigid)

Prin copolimerizarea monomerilor se realizează "plastifierea internă" și se obține o structură conform figurii 21.

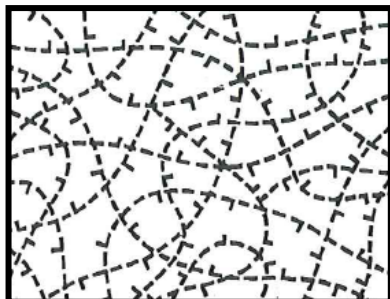


Fig. 21. Structura polimerilor amorfi în faza de plastifiere internă

Mărimea moleculei de polimerizare (de obicei, monomerică) determină distanța de amestecare mecanică a plastifianților. În cazul în care nu există nici o legătură chimică între polimerul vinilclorură și componentul de plastifiere, procesul este numit plastifiere externă și structura este reprezentată în figura 22.

Foliile flexibile din PVC sunt realizate, în principiu prin plastifiere externă.

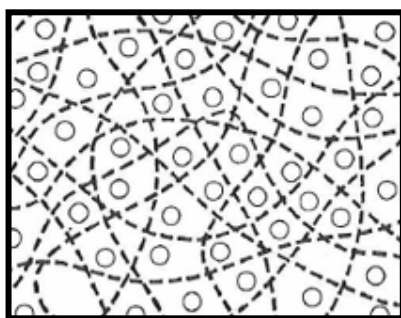


Fig. 22. Structura polimerilor amorfi în faza de amestecare moleculară – plastifiere externă

Pierderile dielectrice ale componentei de plastifiere au avut inițial o importanță secundară. Chiar și cu un plastifiant mai puțin polar, factorul de pierdere al foliei la 20 ° C crește întotdeauna cu cantitatea de plastifiant.

Observațiile restricționează utilizarea de amestec PVC- plastifiant la maxim 50 % participare a plastifiantului. Factorul de pierdere crește odată cu creșterea temperaturii. Forțele valențelor secundare ale aditivilor de plastifiere se relaxează conform fig.23. Cu creșterea temperaturii și a valorii pierderii dielectrice, pe care o putem descrie în proces ca opoziție a mișcării moleculelor, cresc vibrațiile în material datorită mișcării relative moleculare. Pentru învingerea forțelor moleculare este necesar să se aplice suplimentar un câmp electric alternativ.

În figura 23, rezistența moleculară este reprezentată printr-o coardă elastică. În stare dură este dificilă o mișcare moleculară și conversia de putere este nesemnificativă. Cu creșterea elasticității, obținem o mișcare care învinge forța de rezistență a coardei elastice, cu o energie eliberată în principal sub formă de căldură, deci căldura și puterea sunt reconversate.

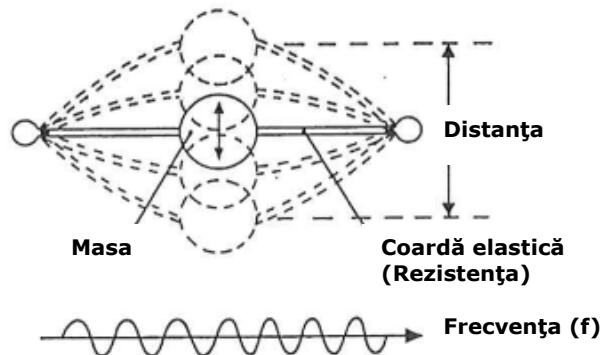


Fig. 23. Reprezentarea materialului în câmp electric alternativ de încălzire

Frecvența corespunde cu abundența vibrațiilor. Comportamentul dielectricului în câmpul de forță și de vibrație al masei (valoarea dipol) și proprietatea coardei elastice (abundența vibrațiilor) determină de fapt corespondența mișcării dipolului (torsiunea vibrațiilor) (fig. 23).

Acest comportament este arătat și de materialul PVC în funcție de temperatură. Unghiul de pierdere crește până la limita intervalului de topire (dependent de frecvență) urmând să scadă la încă o creștere de temperatură.

Deci, comportamentul dielectric al unei substanțe este dependent de:

1. structura sa și momentul dipol,
2. mobilitatea în interiorul structurii moleculare, dependentă de:
 - a. condițiile de prelucrare în timpul procesului de fabricație
 - b. mobilitatea internă și externă a plastifiantilor,
 - c. temperatura de plastifiere a materialului,
 - d. frecvența câmpului alternativ aplicat,
 - e. tensiunea aplicată, dar într-o măsură mai mică,
 - f. conductivitatea materialului (dependentă de temperatură).

Rezumând condițiile pe care trebuie să le îndeplinească materialele pentru o exploatare economică prin încălzire în câmp alternativ, acestea sunt:

1. un caracter dipol al moleculei (sau segmentului),
2. mișcarea (vibrația) activă a acestei grupe polare.

2.3. Premize legate de energie la încălzirea dielectrică

Când apare o pierdere de dielectric în circuit echivalent RC paralel (rezistența în paralel cu condensatorul)(fig. 24), aceasta este reprezentată de unghiul de pierdere:

$$\delta = \arctg \frac{1}{\omega * R * C} \quad (22)$$

Acest lucru duce la o rezistență eficientă:

$$R_w = \frac{1}{\omega * C * \text{tg } \delta} \quad (23)$$

În practică, se folosește tangenta unghiului de pierdere δ care este denumită factor de pierdere dielectrică $\text{tg } \delta$ și este cunoscut ca o constantă de material.

Dependența materialului de frecvență, tensiune și temperatură este mult mai mare decât cea ce am relatat în secțiunile anterioare și se materializează prin constanta dielectrică relativă ϵ_r .

Incepând de la 20 ° C valorile $\operatorname{tg} \delta$ în comparație cu constanta dielectrică relativă ϵ_r sunt de cele mai multe ori mai mari, valorile variind în funcție de material. Numarul DK (dielectricul condensatorului) pentru majoritatea materialelor plastice are valori cuprinse între 2 și 5, dar există și cazuri excepționale când atinge valori de la 6 la 7, mutând factorul de pierdere $\operatorname{tg} \delta$ cu câteva ordine de mărime. Valoarea $\operatorname{tg} \delta$ este cuprinsă între 0,0001 și 0,05 și de aceea rareori se ia în considerare.

Pierderile dielectrice la încălzire (la sudare) pot fi bine reprezentate de un circuit paralel dintre un condensator ideal și o rezistență reală (fig.24).

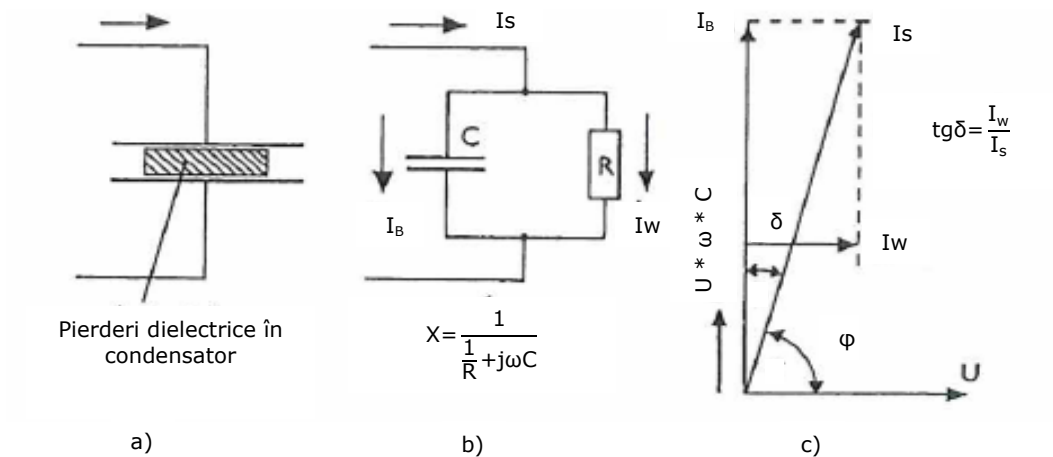


Fig. 24. Reprezentarea pierderilor dielectrice la încălzire (la sudare) reprezentate de un circuit paralel dintre un condensator ideal și o rezistență reală.

Din diagrama vector a marimilor 24.c, se pot vedea componentele curent reactiv și activ.

Figura 25 reprezintă dependența tensiunii de sudare în funcție de frecvență, considerând puterea de inițializare a procesului de 125 W/ cm²; $\epsilon_r = 3$; $\operatorname{tg} \delta = 0,05$.

Intensitatea câmpului ($E = U / 1 \text{ mm}$) reprezintă tensiunea U aplicată unui dielectric de 1 mm, unde $\Delta \epsilon_r$, $\Delta \operatorname{tg} \delta$, Δf nu sunt luate în considerare.

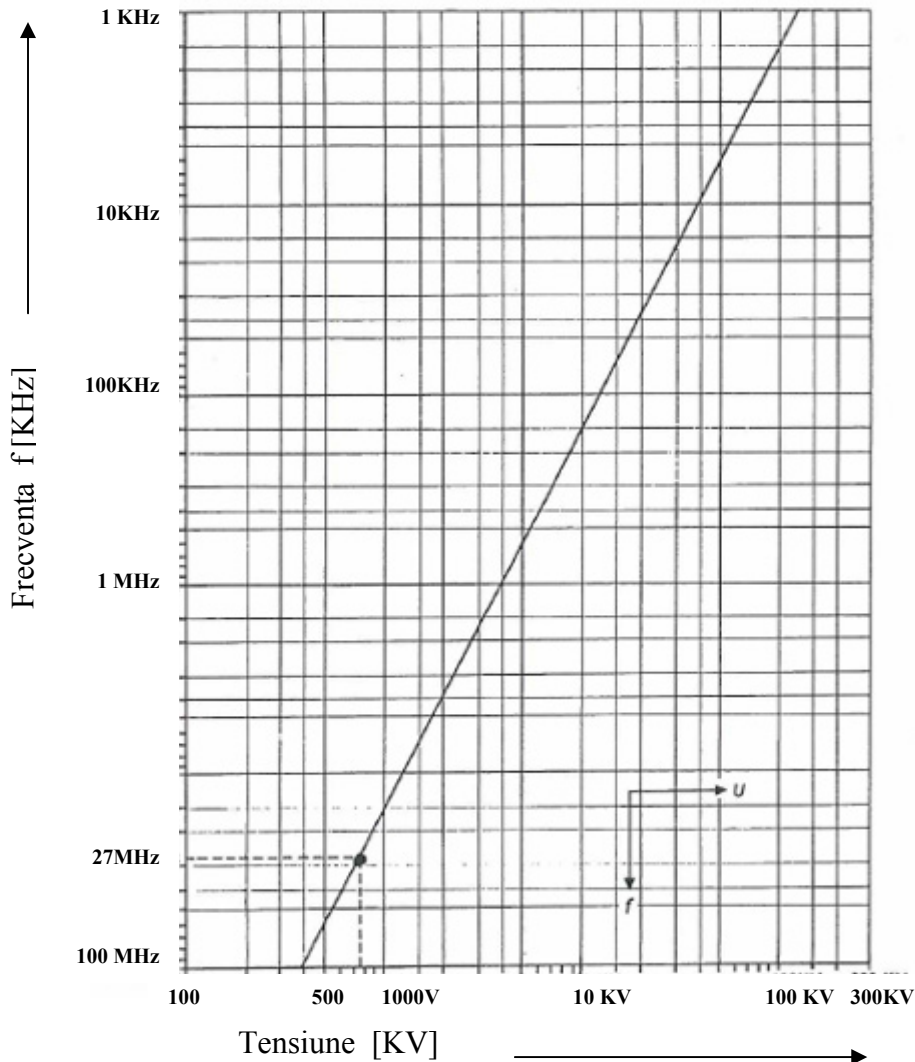


Fig. 25. Dependența dintre frecvență și câmpul electric [50, 63]

Conductanța din materialul plastic la temperatura ambiantă este, de obicei, mai puțin de 10% din susceptanța capacitiv eficace.

Puterea este convertită la temperatura camerei în căldura cu mărimea $\text{tg } \delta$ sau $\cos \varphi$ și este dependentă de tensiune, curent și cosinusul unghiului de fază.

Prin urmare, folosind formula $N = U^2 / R$ și formula 23, putem calcula performanța energetică cu formula 24.

$$N = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg } \delta \quad (24)$$

Întrucât, în această formulă, atât eficiența cât și capacitatea de putere depind de dimensiunile pieselor care sunt definite în faza de proiectare, pentru calcule generale, este preferată formula echivalentă 25:

$$N/cm^2 = U^2 \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg } \delta \quad (25)$$

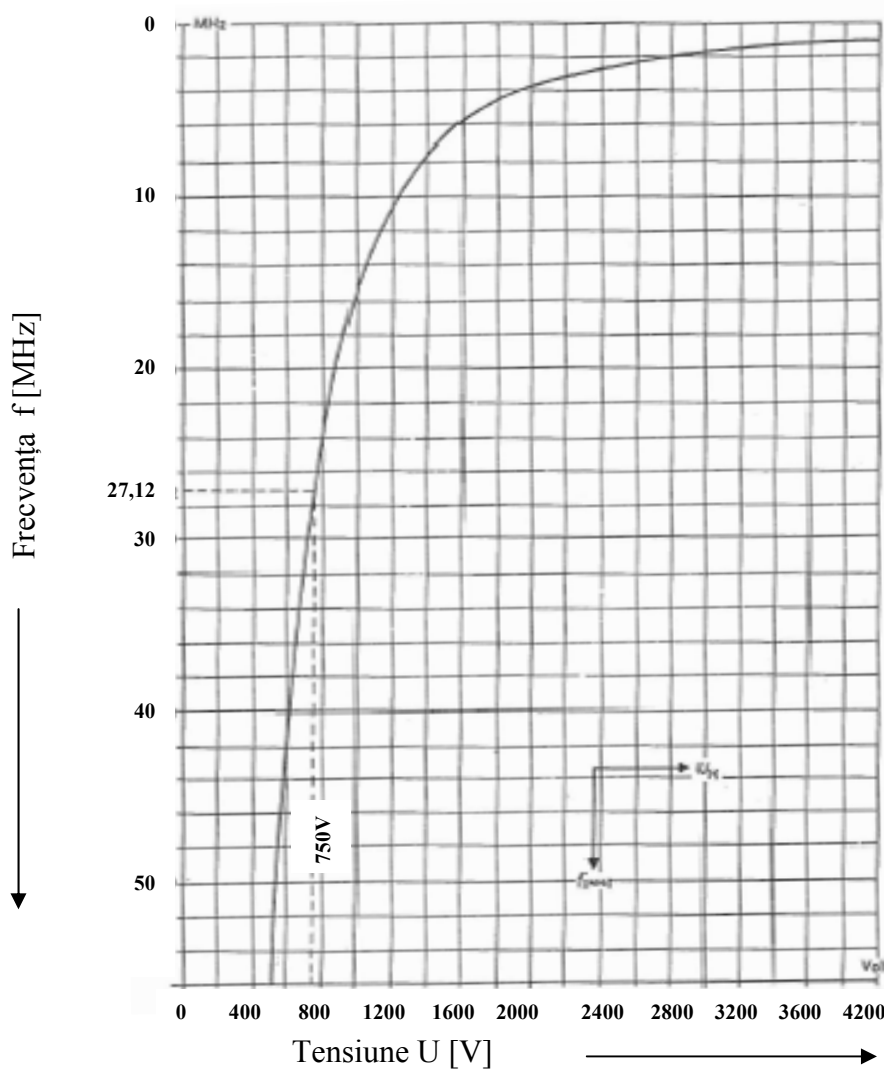


Fig. 26. Înregistrarea dependenței frecvență / tensiune [50, 63]

Figura 26 reprezintă dependența frecvență - tensiune. La valori ale frecvenței de 10 - 15 MHz observăm că avem nevoie de tensiuni foarte mari ce nu pot fi utilizate în practică, pentru a obține o performanță energetică bună.

În ecuația 26, ϵ este produsul dintre $DK\epsilon_r$ și $DK\epsilon_0$ ($DK\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-14}$).

$$\epsilon = DK\epsilon_0 \cdot DK\epsilon_r \quad (26)$$

În cazul în care pentru 1N/cm^2 considerăm o putere de pornire (start up) de 125 de wați și valorile asumate $\epsilon_r = 3$ și $\text{tg } \delta = 0,05$, utilizând formula 27 care este obținută din formula 25, se va calcula produsul $E^2 \cdot f$.

$$E^2 \cdot f = \frac{N/\text{cm}^2}{2 \cdot n \cdot \epsilon_r \cdot DK\epsilon_0 \cdot \text{tg } \delta} \quad (27)$$

$$E^2 \cdot f = \frac{125}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,84 \cdot 10^{-14} \cdot 0,05} \cong 15 \cdot 10^{14} \quad (28)$$

Teoretic, conform cu algoritmul prezentat, câmpul electric și frecvența sunt invers proporționale cu valoarea calculată $15 \cdot 10^{14}$ (Fig. 26).

Dacă considerăm ca lucrăm cu o frecvență de 1 kHz, conform formulei 28 obținem valoarea energiei:

$$E = \sqrt{\frac{15 \cdot 10^{14}}{10^3}} = 1,25 \cdot 10^6 = 1250 \text{ kV}$$

În practică astfel de tensiuni nu se pot aplica.

Dacă în mod arbitrar considerăm o intensitate a câmpului de înaltă frecvență E de 1 kV/cm^2 , pornind de la formula 28 obținem:

$$f = 15 \cdot 10^{14} / E^2 = 15 \cdot 10^{14} / 10^6 = 15 \cdot 10^8 = 1500 \text{ MHz}$$

Din motive legate de costuri și soluții constructive viabile, la sudarea cu curenți de înaltă frecvență, nu sunt folosite frecvențe așa ridicate (în industrie se folosesc mașini de sudare CIF cu un generator de 27,12MHz).

Gama posibilă de lucru este evidențiată în graficul prezentat în fig.26.

În acest grafic putem de asemenea să observăm că pentru a genera curent alternativ de înaltă frecvență, în stadiul actual al tehnologiei, un singur generator este potrivit. Următoarea sarcină este de a limita posibilitățile de aplicare a tensiunii de înaltă frecvență și posibilitatea de a investiga frecvența de funcționare, pentru a demonstra zonele de frontieră din punct de vedere al posibilității sudării CIF.

2.4 Efectul structurii asupra sudabilității CIF a polimerilor

Examinarea posibilităților de îmbinare prin sudare a unor polimeri în câmp alternativ de înaltă frecvență, doar prin prisma comportării dielectrice a acestora, ar fi incompletă. Pentru o asemenea analiză este fundamentală cunoașterea sudabilității materialului, proprietate tehnologică dependentă, în principal de structura moleculară (fig. 27) [3, 5].

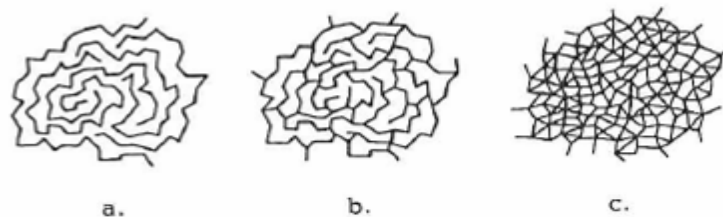


Fig. 27. Structura moleculară a polimerilor:

a- termoplaste; b- elaste; c- duroplaste

De exemplu, rășinile de tipul fenolilor, deși pot fi încălzite într-un câmp de înaltă frecvență, sunt improprie pentru realizarea unei îmbinări sudate întrucât ele

sunt materiale duroplaste, care nu prezintă un domeniu de înmuiere și nici un domeniu de curgere (fig. 24c). Există însă și materiale termoplaste la care capacitatea de topire a unuiia în altul (confundare moleculară) lipsește.

Aici se exemplifică plexiglasul, la care succesiunea de stări condiționate termic și care sunt specifice termoplastelor nu se respectă:

1. Domeniul neelastic;
2. Domeniul de "îngheț";
3. Domeniul termoelastic;
4. Domeniul termoplastic;
5. Domeniul de curgere;
6. Domeniul de descompunere.

Un alt exemplu îl constituie politetrafluoretilena, care intră în categoria termoplastelor doar pe baza structurii sale, ea putând fi îmbinată prin sudare numai cu precauții speciale. O comportare asemănătoare o are poliuretanul a cărui aptitudine la sudare scade odată cu creșterea ramificării lanțului molecular [2, 3]. Așadar, sudabilitatea presupune existența unui material termoplast cu structura liniară având un domeniu de temperaturi de topire respectiv de curgere (fig.28).

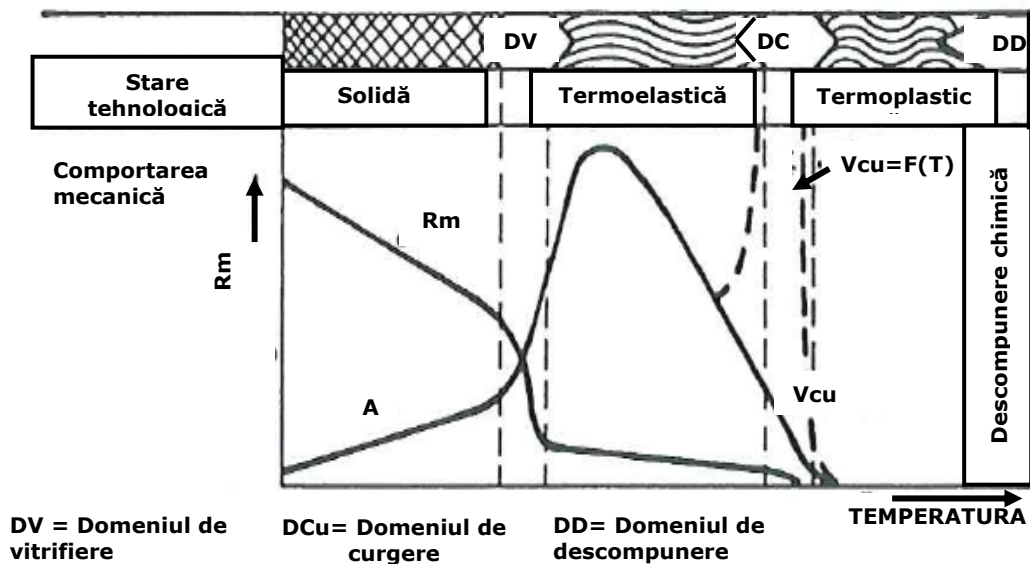


Fig. 28. Reprezentarea schematică a formelor de stare pentru polimerii amorfi [42]

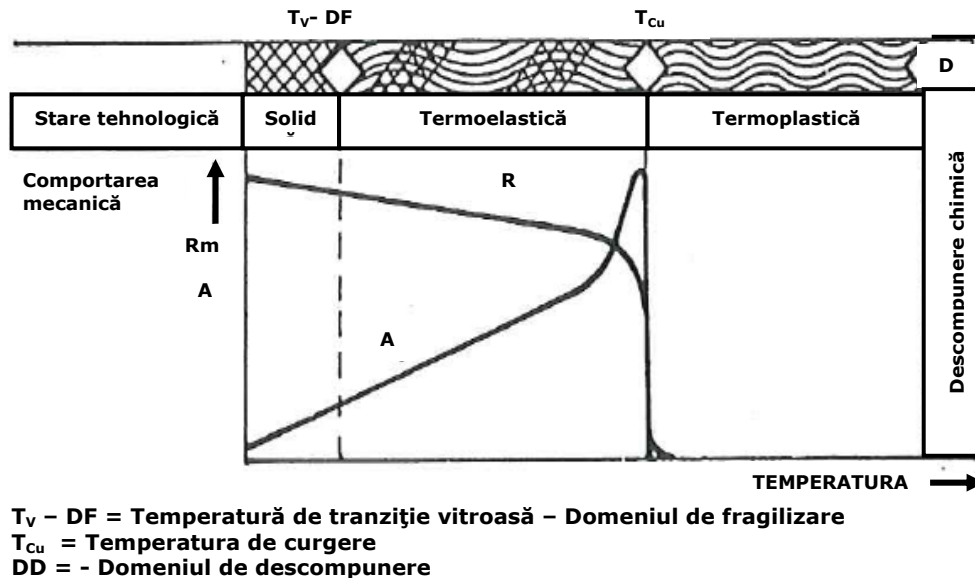


Fig. 29. Reprezentarea schematică a formelor de stare pentru polimerii parțiali cristalini [42]

În figurile 28; 29 se întâlnesc următoarele caracteristici mecanice:

- R_m = rezistența la rupere,
- V_{cu} = viteza de curgere,
- A = Alungire la rupere.

Dacă la termoplastele cu structură amorfă apar trei domenii distincte de stare, cu două domenii mai înguste de tranziție, la polimerii parțiali cristalini domeniul termoelastic va fi aproape complet suprimat în funcție de gradul de cristalizare. În afară de aceasta, la materialele cu structură parțial cristalină, ca urmare a structurii lor morfologice domeniile de tranziție sunt limitate la câteva grade, astfel că mai corect s-ar putea vorbi de un punct de transformare. Un asemenea comportament se manifestă dezavantajos îndeosebi la sudarea în curenți de înaltă frecvență. Mai problematică este sudarea termoplastelor la care domeniul de curgere și de descompunere se află într-o succesiune directă sau inversă. La numeroase materiale, ca de exemplu poliamidele, apare o trecere bruscă de la domeniul termoelastic la cel termoplastic; această formă de stare abia este considerată ca un domeniu și s-ar putea discuta mai degrabă de un punct de curgere.

În această stare termoplastul este foarte puțin vâscos (aproape lichid) fapt care afectează cusătura sudată și zona de tranziție.

Un domeniu mai extins al băii topite, în care materialul se comportă asemănător "mierii" constituie un avantaj deoarece apare o trecere treptată către domeniul termoplastic. La foliile din policlorură de vinil (PVC) această premiză este în general îndeplinită.

În cercul de specialiști nu există un punct de vedere unitar legat de existența unui domeniu efectiv de curgere la PVC; decisivă este capacitatea de topire moleculară sub acțiunea căldurii. Cu toate că la acest polimer este posibilă

obținerea unei îmbinări sudate prin topire sub acțiunea presiunii, datorită diversității tipurilor sub care se produce apare o comportare reologică foarte diferită. Din aceste motive, la aprecierea sudabilității, se impune luarea în considerare atât a vâscozității materialului topit cât și comportarea dielectrică a polimerului.

În funcție de tipurile de PVC avem comportamente tehnologice diferite, capacitate de sudare diferită, dispersie a materialului diferită în cusătura sudată etc. Independent de acestea sunt diferențele între vâscozitatea materialului topit și comportarea electrică a dielectricului, care se referă la comportarea tehnică a curgerii fibrei derivată parțial din structura moleculară definită inițial, dar în cazurile în care sunt dubii se reconfirmă empiric prin validarea procesului.

Într-o expertiză primară, tratarea procesului de încălzire independent de sudabilitatea termoplastelor este dificilă deoarece rezultatul sudării se poate evalua doar prin rezistența cusăturii sudate care se poate măsura și evalua.

Pentru examinări comparative ale sudurii se folosește o cupă care încălzește cu un gradient de temperatură o folie de aluminiu, 2 probe (folii PVC) și un electrod care este acționat cu o presiune de 5 kg conform figurii 30. Temperatura de topire este dată de „planul înclinat” reprezentat. Dispozitivul reglat experimental permite nu numai identificarea temperaturii de sudare (care poate fi diferită de temperatura de topire), ci și dobândirea de cunoștințe despre comportarea la sudare în funcție de diferiți parametrii timp – presiune, rezistența realizată sau teste distructive incipiente rezultate din probele realizate. Despre aceste probe, diferențele de textură conduc la influențe ale îmbinării sudate.

Dezavantajul este că încălzirea probelor pe termen lung duce la descompunerea materialului în zona sudată, care are ca efect, pe suprafețe restrânse lipsa de material și nerealizarea cusăturii sudate (fenomen întâlnit și la sudarea CIF a materialelor plastice).

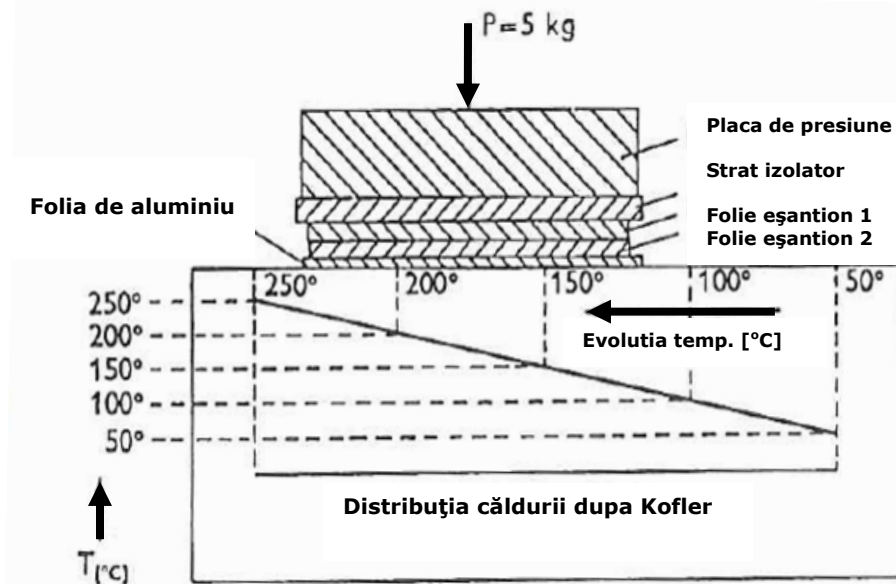


Fig. 30. Metoda pentru investigarea sudabilității [42]

Mai jos este descrisă metoda pentru investigarea sudabilității (fig. 30).

Două probe din folie de plastic cu dimensiuni de 100 mm lungime și 5 mm lățime sunt plasate pe o placă încălzită.

O folie foarte subțire de aluminiu este poziționată între foliile de plastic și electrod, astfel că protejază suprafața foliilor împotriva adevizității plasticului pe electrod. Efectul de încălzire este dependent de grosimea filmului și de timpul de aplicare.

După încălzirea uniformă se prelevează mostrele de la stânga la dreapta și sunt etichetate conform pentru experiment. Zona temperaturii la care mostra prelevată se rupe pe îmbinarea sudată definește punctul de sudare. Temperatura de sudare minimă se determină cu o precizie de 2%.

În funcție de îndeplinirea condițiilor cerute pentru realizarea îmbinării sudate, discutăm despre comportamentul la sudare al materialului dielectric.

Sunt o serie de materiale termoplaste care sunt preferate din punct de vedere al proprietăților fizice, dar care nu pot fi sudate CIF, deoarece unghiul de pierdere al dielectricului este scăzut, astfel încât nu este asigurată încălzirea materialului, deci topirea acestuia, chiar dacă frecvența de sudare și tensiunea sunt optime.

Termoplastele se utilizează ca materiale structurale în tehnică datorită caracteristicilor mecanice de rezistență relativ bune și caracteristicilor de tenacitate care sunt foarte bune, ceea ce face ca piesele realizate să fie rezistente la șocuri. Proprietatea lor de a putea suferi reîncălziri în domeniul de curgere de un număr nelimitat de ori în vederea prelucrării contribuie, de asemenea, la extinderea utilizării lor. Principalele dezavantaje sunt legate de temperaturile relativ scăzute până la care pot fi utilizate. La alegerea temperaturii de sudare trebuie să se țină cont de domeniile de stare ale materialelor termoplaste conform figurii 31 [44,45]:

- poliesterii (PET, PBT),
- poliamidele (PA),
- policarbonații (PC),
- acetalii (POM),
- poliolefinele (PE, PP),
- polimerii vinilici (PVC, PS),
- polimerii acrilici (PAN, PMMA) și fluoroplastele (PTFE);
- poliesterii (PET, PBT),
- poliamidele (PA),
- policarbonații (PC),
- acetalii (POM).

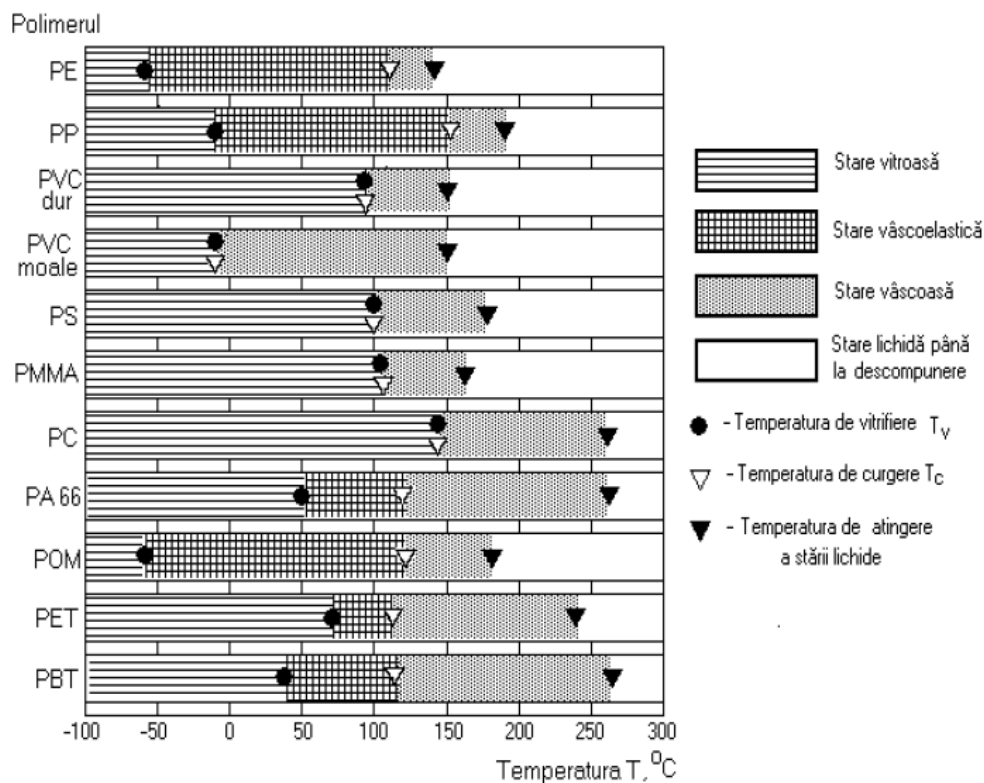


Fig. 31. Domeniile de stare ale unor materiale termoplaste

2.5 Procedura experimentală

Prin introducerea în câmp electric a unui material dielectric o parte din energia câmpului se disipă în substanță, în majoritatea cazurilor transformându-se în căldură. Energia disipată în unitatea de timp în material, sub influența și pe seama câmpului electric, constituie pierderile în dielectric (materialul ce urmează a fi sudat).

Materialele termoplaste care prezintă o bună sudabilitate prin CIF, sunt [3, 6]:

- Policlorura de vinil (PVC) moale și dură;
- Poliamida (PA);
- Poliesterul (PES);
- Poliuretanul termoplastic (TPU);
- Câteva tipuri de materiale compozite (TPO).

Materialele utilizate în experiment sunt folii de PVC cu inserție textilă cu structuri descrise în figurile 32 și 33:

- PVC cu inserție textilă cu grosimea $d = 0,4 \pm 0,1$ mm (fig. 32)



Fig. 32. Structura PVC cu inserție textilă

- PVC cu inserție textilă cu grosimea $d = 0,6 \pm 0,1$ mm (fig.32)
- Malivat cu grosimea $d = 0,6 \pm 0,1$ mm (structura conform fig.33)



Fig. 33. Structura material MALIVAT material textil cu PVC

Mai jos este descrisă metoda experimentală pentru investigarea sudabilității și a temperaturii de sudare.

Se prelevează două probe din folie de PVC cu inserție textilă cu grosimea $d = 0,4 \pm 0,1$ mm (fig. 32) având dimensiunile de 100 mm lungime și 5 mm lățime și se plasează între două plăci încălzite care sunt presate controlat conform schiței din figura 34. Foliile de PVC sunt protejate cu folii de aluminiu împotriva deteriorării.

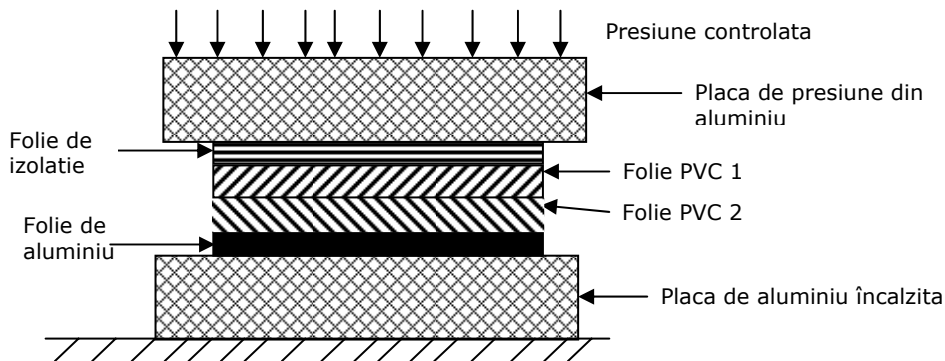


Fig. 34. Reprezentarea metodei pentru investigarea sudabilității

Pentru a determina sudabilitatea materialului și temperatura de sudare se încălzește progresiv placa de aluminiu pornind de la 50°C până la 150°C , care este temperatura apropiată de temperatura de descompunere a policlorurii de vinil.

Se introduc mostrele într-o presă care are control automat a presiunii constante $P=50$ bari, temperaturii și timpului de presare. Temperatura se monitorizează suplimentar cu o termocuplă conform figurii 35.

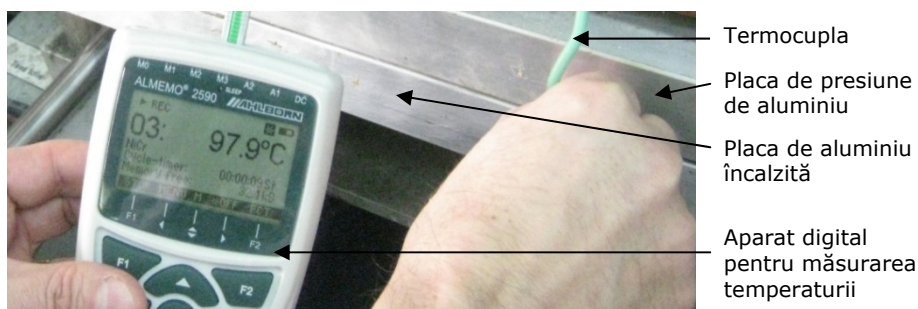


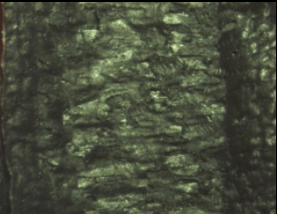


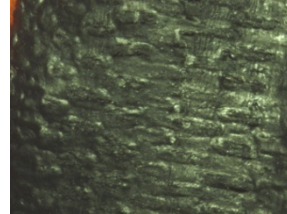



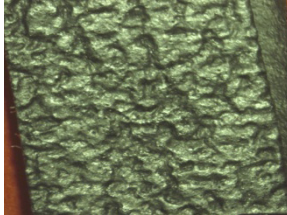
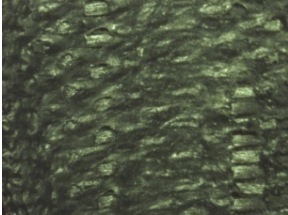



Fig. 35. Reprezentarea aparaturii pentru investigarea sudabilității

În tabelul 8 este prezentat comportamentul foliilor PVC în funcție de timp și temperatură pentru experimentul prezentat în fig. 34.

Tabelul 8. Aspectul structurii foliilor PVC în funcție de timp și temperatură

Parametrii	T = 50°C	T = 100°C	T = 150°C
t = 5 sec			
	Fig. 36. Foliile PVC nu prezintă deteriorări la nivel macrostructural, iar cele două folii nu sunt topite pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare.	Fig. 37. Foliile PVC nu prezintă deteriorări la nivel macrostructural, cele două folii prezintă urme de material topit pe suprafața de contact, dar fără a fi lipite. Calitatea îmbinărilor sudate nu este corespunzătoare.	Fig. 38. Foliile PVC prezintă deteriorări ușoare la nivel macrostructural, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinărilor sudate este corespunzătoare.
t = 15 sec			
	Fig. 39. Foliile PVC nu prezintă deteriorări la nivel macrostructural, iar cele două folii nu sunt topite pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare.	Fig. 40. Foliile PVC prezintă deteriorări ușoare la nivel macrostructural (structură aplatizată), iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact și calitatea îmbinarilor sudate este corespunzătoare.	Fig. 41. Foliile PVC prezintă deteriorări la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate este corespunzătoare.

Parametrii	T = 50°C	T = 100°C	T = 150°C
t = 30 sec	 <p>Fig. 42. Foliile PVC nu prezintă deteriorări la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare.</p>	 <p>Fig. 43. Foliile PVC prezintă deteriorări la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate este corespunzătoare.</p>	 <p>Fig. 44. Foliile PVC prezintă deteriorări majore la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare, materialul PVC fiind major afectat.</p>
t = 60 sec	 <p>Fig. 45. Foliile PVC nu prezintă deteriorări la nivel macrostructural, iar cele două folii nu sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare.</p>	 <p>Fig. 46. Foliile PVC prezintă deteriorări la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare.</p>	 <p>Fig. 47. Foliile PVC prezintă deteriorări majore la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, materialul PVC fiind expulzat. Calitatea îmbinarilor sudate nu este corespunzătoare, materialul PVC fiind major afectat.</p>

Matricea parametrilor prezentată în tab.8 are la bază analiza prin metoda Design of Experiment (DOE), metodă care abordează eficient și eficace relația cauză – efect dintre variabilele procesului și performanța acestuia.

Se observă ca la temperaturi de $T = 50^{\circ}\text{C}$, temperatură sub temperatura de topire a materialului PVC, indiferent de timpul de presare aplicat nu se realizează sudarea celor două folii.

La temperaturi $T = 100^{\circ}\text{C}$, temperatura la care materialul PVC conform figurii 31, trece în stare vâscoasă, stare care permite lipirea foliilor de PVC dacă se aplică o presiune de 50 bari asupra lor pentru un interval de timp.

La un timp de sudare de peste 15 secunde calitatea îmbinarilor sudate a foliilor PVC este corespunzătoare.

La temperaturi $T = 150^{\circ}\text{C}$ temperatura la care materialul PVC conform figurii 31, trece în stare lichidă până la descompunere. La timpi mici de expunere materialul PVC prezintă deteriorări ușoare la nivel macrostructural, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact conform figurii 38.

La un timp de 15 secunde și la temperatura de 150°C foliile PVC prezintă deteriorări la nivel macrostructural, fiind vizibilă inserția materialului, iar cele două folii sunt sudate pe suprafața de contact conform figurii 41.

Calitatea îmbinarilor sudate este corespunzătoare, dar se observă o curgere a materialului PVC.

La timpi de expunere de peste 30 secunde se observă o deteriorare a foliilor PVC presate la 150°C conform figurilor 44 și 47, deci din cauza expulzării materialului PVC calitatea îmbinarilor sudate nu este realizată. Se observă că din cauza faptului că energia termică este aplicată din exterior prin intermediul plăcii de încălzire (fig. 35) în timpul sudării foliilor de PVC se produce o distrugere a structurii foliei care este în contact cu aceasta (fig.40, 41, 43, 44, 46,47).

Din acest experiment se observă că temperatura la care este adus materialul în vederea sudării, timpul de sudare și presiunea de sudare sunt parametri care influențează major caracteristicile îmbinării sudate (tab. 8).

Acest lucru a dus la dezvoltarea sudării CIF a foliilor de PVC, deoarece prin intermediul câmpului indus de un curent alternativ se dezvoltă energia necesară sudării în zona de contact dintre folii, evitând descompunerea policlorurei de vinil la contactul cu electrozii.

O matrită de sudare CIF poate folosi maxim 2 straturi de material cu grosimi cuprinse între 0,2 – 5 mm.

Feroelectricitatea este proprietatea fizică a materialelor prin care expunerea la o polarizare electrică spontană face ca direcția fiecărui bipolar să fie schimbată prin aplicarea unui câmp electric extern. Evidența experimentală pentru acest câmp oscilant este bucla de histereză (fig. 48). În piesele de prelucrat feromagnetice, ca și la materialele plastice cu inserție de particule ceramice sau textile, încălzirea este cauzată de histereză (fig. 48) ca și componentă magnetică a câmpului electromagnetic care intervine repetativ în structura cristalină a materialului feromagnetic. Ca urmare a polarizării spontane rezultă o schimbare energetică la nivelul suprafeței de contact, care poate cauza un flux de curenți în cazul condensatorului feroelectric (matrită de sudare) chiar și fără o tensiune externă aplicată condensatorului. Stimulii care schimbă cadrul dimensional al materialului sunt forța și temperatura [3].

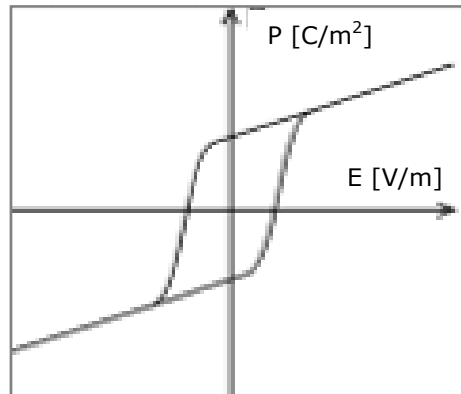


Fig. 48. Polarizarea feromagnetica

E = intensitatea câmpului electric [V/m]
 P = polarizarea dielectrica [C/m^2]

2.6. Concluzii parțiale

Termoplastele se utilizează ca materiale structurale în tehnică datorită caracteristicilor mecanice de rezistență relativ bune și caracteristicilor de tenacitate care în unele cazuri sunt foarte bune, ceea ce face ca piesele realizate să fie rezistente la șocuri. Proprietatea lor de a putea suferi reîncălziri în domeniul de curgere de un număr nelimitat de ori în vederea prelucrării contribuie, de asemenea, la extinderea utilizării lor.

La alegerea temperaturii de sudare trebuie să se țină cont de domeniile de stare ale materialelor termoplaste. Sudarea foliilor PVC prin electrozi încălziiți nu asigură o calitate corespunzătoare a suprafeței acestora, motiv pentru care acestea se sudează prin procedeul cu CIF.

Condiția predefinită pentru ca materialele plastice să se încălzească într-un câmp electric de curenți de înaltă frecvență este ca să utilizăm materiale plastice cu caracteristici polare (bipolare). Materialele trebuie să aibe pierderea de dielectric $\tan \delta > 0,1$ pentru o buna sudabilitate CIF.

Materialele cu sudabilitate CIF, respectiv materialele care se încălzesc sub influența CIF sunt din familia policlorurii de vinil (PVC) forma moale și forma dura, poliamida (PA), poliester (PES), câteva tipuri de poliolefine termoplastice TPO și materiale compozite cu suficient procentaj de agenți activi CIF.

3 Calculul încălzirii dielectrice

3.1 Zona de încălzire, conductibilitatea termică și suprafața capacitivă

Pentru a cunoaște proprietățile fizice ale materialelor se studiază energia, capacitatea și tensiunea de înaltă frecvență necesare în timpul procesului de sudare. Punerea în aplicare a procesului de sudare CIF este axat pe studiul procesului la nivelul punții de sudare (zonei de topire).

Compușii plani, cum ar fi produsele laminate, nu se pretează sudării prin procedeul de sudare CIF.

Abordarea procesului de sudare CIF, concentrat pe puntea de sudare, este insuficientă ca bază de calcul, deoarece zona de încălzire datorată energiei CIF, este dispersată pe orizontală depășind suprafața de contact a electrodului.

În figurile 49.a și 49.b este reprezentată secțiunea transversală a încălzirii reale:

- pentru electrozii de sudare cu punte simetrică, lățimea medie de încălzire este $B + a$;
- pentru electrozii de sudare cu punte asimetrică este $B + 2a$.

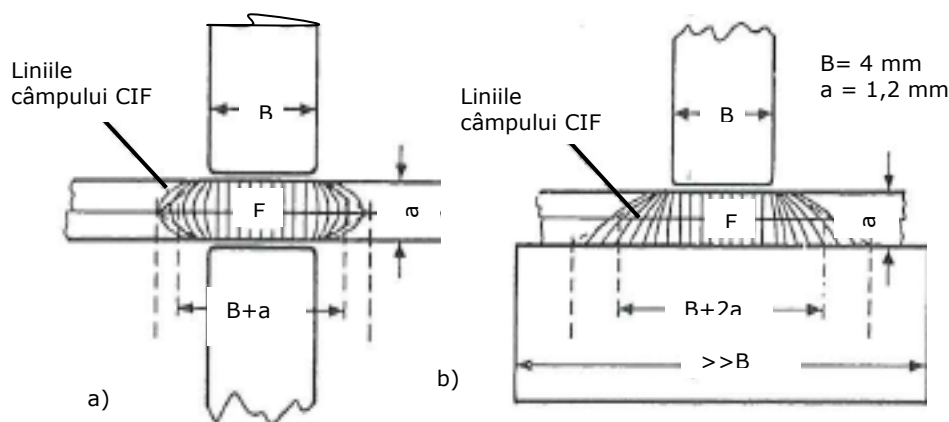


Fig. 49. Secțiunea transversală a încălzirii reale:
a) electrod pe un electrod simetric opus,
b) sudarea pe o placă electrod.

Calculul zonei de încălzire și zonei de sudare efectiv capacitivă a lățimii de sudare pentru secțiunea izolării termice varianta a) s-a calculat cu formula 29.

$$F_a = B \cdot a + a \cdot a = (B + a) \cdot a \quad (29)$$

$$F_a = (B + a) \cdot a$$

$$F_a = (4 + 1,2) \cdot 1,2 = 5,8 \text{ mm}^2$$

Secțiunea de-a lungul izolării termice varianta b) s-a calculat cu formula 29:

$$F_a = B \cdot a + 2a \cdot a = (B + 2a) \cdot a \quad (30)$$

$$F_a = (B + 2a) \cdot a$$

$$F_a = (4 + 2 \cdot 1,2) \cdot 1,2 = 7,7 \text{ mm}^2$$

Pentru calculul puterii de încălzire se utilizează investigațiile făcute pe sudarea produselor plate.

În capitolul 4 s-a tratat sudarea simetrică a foliilor din PVC cu grosimi diferite. În figura 50 este reprezentată secțiunea unei îmbinări sudate a foliilor PVC cu grosime de 0,6 mm, sudate simetric cu electrozi având lățimea de 4 mm, vizualizată la microscop tip Carl Zeiss, imagine mărită de 50 de ori. Din imagine se poate observa că zona încălzită a materialului este mai mare decât lățimea electrozilor, fenomen vizualizat în figura 50.

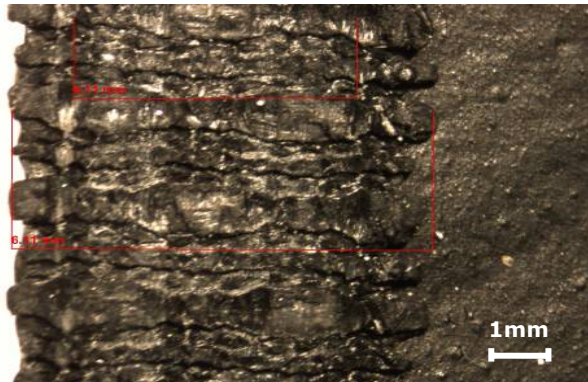


Fig. 50. Reprezentarea încălzirii îmbinării sudate a foliilor PVC cu grosime de 0,6mm, x50

Puterea totală este pierdută într-o proporție însemnată prin disiparea căldurii în electrozii sau plăcile reci.

Pe partea de contact cu electrodul se realizează zona de descărcare electrică, care este direct proporțională cu lățimea punții de sudare.

Pe partea electrodului- placă, puntea de sudare se lățește. În general, aria de descărcare este încălzită, stabilind baza de calcul în zona superioară.

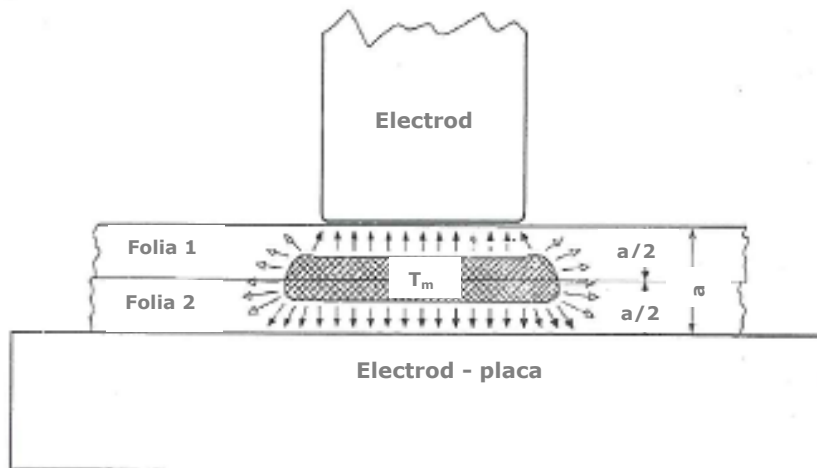


Fig. 51. Reprezentarea migrației termice la procesul de sudare CIF

Migrația termică are loc și este menținută în metalul rece al electrodului superior și electrodului de bază (plăcii de bază), a căror conductivitate termică este de 500 de ori mai mare în comparație cu cea a foliilor ce se sudează. Cu toate acestea, disipările de căldură orizontale sunt neglijabile. În calcule performanța reală a variației temperaturii nu este luată în considerație.

În funcție de viteza de încălzire rezultă curbele de temperatură, incluzând și valorile ipotetice extreme, reprezentate în fig.52.

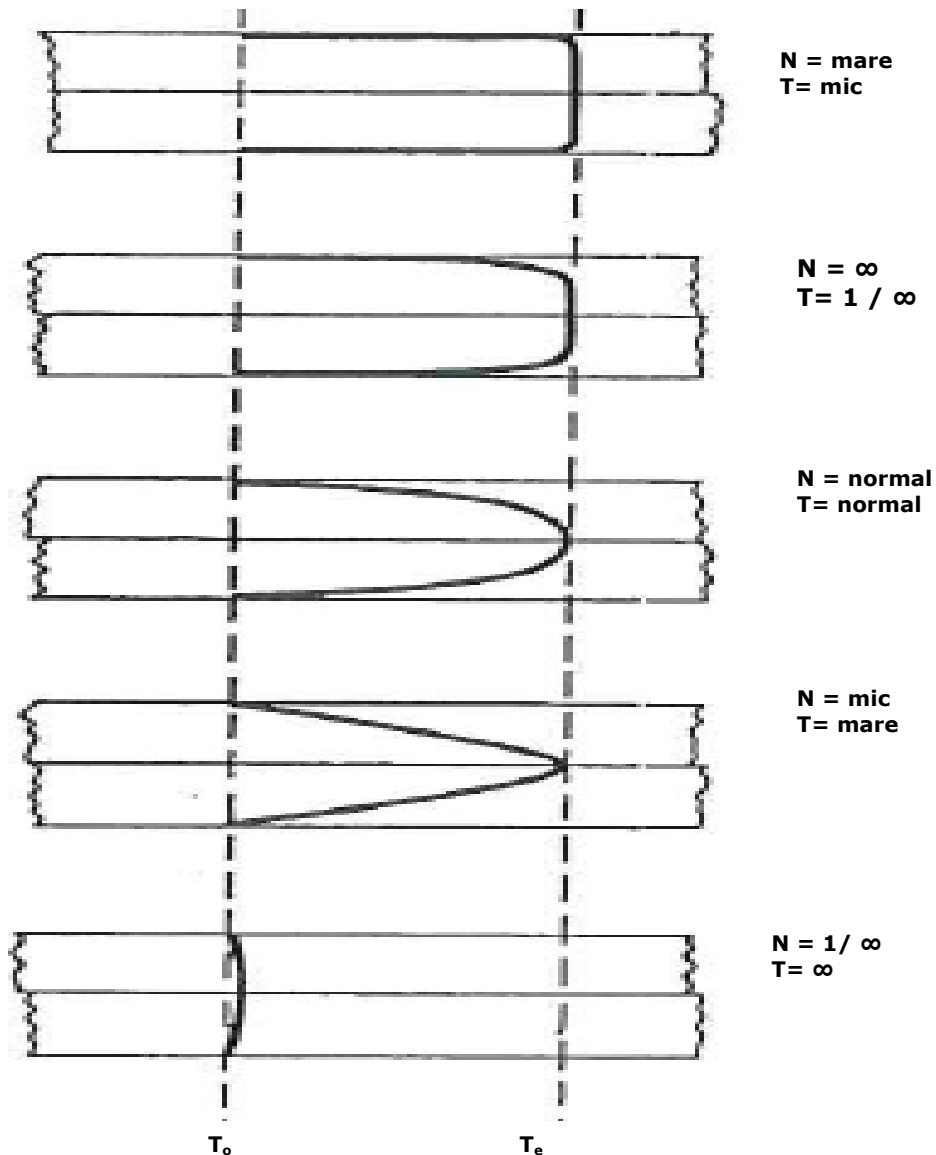


Fig. 52. Curbele ipotetice înregistrate ale gradientului de temperatură la diferite rații putere - timp (T = Temperatura; N = energia electrică)

Figura 53 conține ciclul temperaturii în funcție de timpul de sudare pe perioada ciclului de sudare conform calculelor lui S. Wintergerst [18].

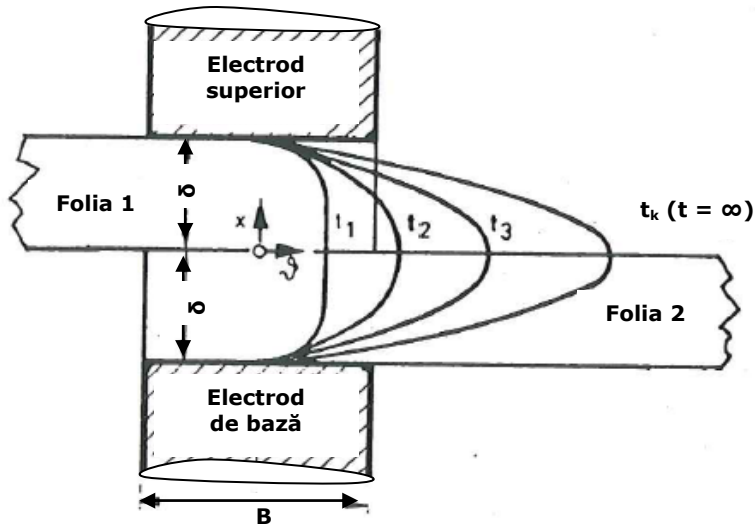


Fig. 53. Distribuția temperaturii calculate la putere constantă și creșterea timpului de sudare t_1, t_2, t_3, t_k reprezentând curbele teoretice până la cel mai lung timp de sudare (infinite) (dupa S. Wintergerst [18]).

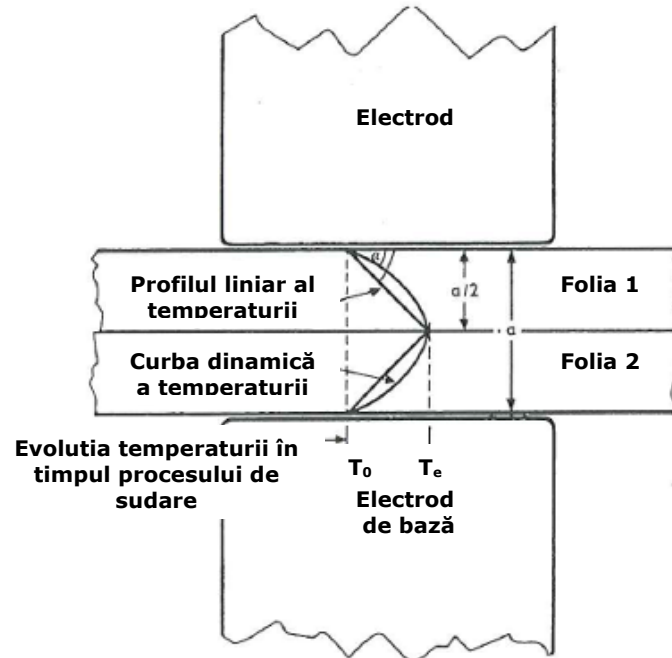


Fig. 54. Reprezentarea liniară a gradientului de temperatură

Pentru simplificarea calculelor în locul curbelor gradient de temperatură se va considera un profil liniar corectat cu un factor de pierdere al puterii $\cos \alpha$ pentru o acuratețe ridicată.

Dacă în domeniul temperaturii înregistrate $T_0 - T_e$, se va considera măsura reglată pentru $\alpha/2$, deci $T_0 - T_e = a/2$, atunci α , unghiul cursei liniare este de 45° și $\text{ctg } \alpha = 1$. La unghiuri în curbă mai mici de 45° , $\text{ctg } \alpha > 1$, crește puterea pierdută N_v și crește gradientul de temperatura multiplicat în concordanță cu $\text{ctg } \alpha$.

În următoarele calcule simplificate pentru determinarea căldurii disipate, s-a considerat gradientul de temperatură dintre centrul sudurii și suprafața rece a electrodului ca fiind liniar. Calculul pentru modelul curbiliniu poate fi determinat în concordanță cu rația puterii utile de alimentare și puterea pierdută printr-un algoritm matematic complex cu aplicare practică extrem de dificilă.

Conform figurii 53 la gradienti mici de temperatură și radiațiile termice corespondente sunt mici. În finalul procesului de sudare, dar și în timpul sudării, temperatura electrozilor în aria de contact crește temporar și căldura este disipată pe orizontal în îmbinarea sudată.

S-a demonstrat că în zona de contact a electrodului, aria de compensare considerată este $(B + a)$ la sudarea simetrică sau $(B + 2 \cdot a)$ la sudarea asimetrică și coincide cu evaluările practice.

Suprafața utilă capacitivă este obținută conform formulelor 31 și 32:

- sudare electrod cu un electrod simetric opus:

$$F = (L + a) \cdot (B + a) \quad (31)$$

- sudare electrod pe o placă electrod:

$$F = (L + 2a) \cdot (B + 2a) \quad (32)$$

Pentru lungimi ale electrodului $L > 5 \text{ cm}$ a doua componentă este considerată neglijabilă, astfel suprafața are ca rezultat $L \cdot (B + a)$ și respectiv $L \cdot (B + 2a)$ pentru sudarea simetrică respectiv asimetrică. Deoarece suprafața de contact se încălzește, disiparea căldurii și zona capacitivă eficientă au aceeași bază de calcul. În capitolul 3.4 se aplică formulele prezentate pentru studiul de caz dat.

3.2 Efectul grosimii materialului asupra căldurii dezvoltate

Cantitatea de căldură necesară este influențată de puterea utilă și pierderea de putere.

Seturile de folii PVC pentru sudarea CIF, au nevoie de încălzire provenită din energie, care este dată de puterea utilă și pierderea de putere.

Rezultatele utile sunt oferite de ecuația 33:

$$A = G \cdot c \cdot \Delta T = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (33) \text{ unde:}$$

A = sarcină activă utilă [Ws],

G = greutate/ masa [kg],

c = căldura specifică [$\text{cal} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$],

ΔT = gradientul de temperatură [Ws / cal],

V = volum [cm^3],

ρ = densitate material [g / cm^3].

În cazul studiului de caz prezentat în capitolul 3.4 și anume, pentru sudarea foliilor PVC de 0,4 mm grosime, pentru o lungime a îmbinării sudate de 150 cm și o lățime de 0,4 cm, sarcina activă utilă necesară în conformitate cu formula 33 trebuie să fie de 334 Ws.

$$A = (150 \cdot 0,4) \cdot 2 \cdot 0,04 \cdot 1,29 \cdot 0,373 \cdot 145 = 334 \text{ Ws.}$$

3.3 Fenomene fizice legate de energia necesară obținerii sudurii CIF pentru diferite materiale

Materialele plastice cu capacitate redusă de absorbție a apei sunt caracterizate prin calitate înaltă a proprietății de izolare. Acest lucru este valabil și pentru foliile rigide din PVC pentru frecvențe tehnice în curent continuu și alternativ. Rezistența dielectrică a materialelor plastice la sudarea CIF este prezentată în tabelul 9.

Tabelul 9. Rezistența dielectrică a materialelor plastice

Material	Rezistența materialelor
PVC moale	20-30 kV / mm
PVC rigid (dur)	40-50 kV / mm
Copolimer de vinil	30-50 kV / mm
Diacetat	30 kV / mm
Poliamidă	25-40 kV / mm
Poliamidă uscată	50 kV / mm
Polimetacrilat	35-40 kV / mm
Polydthylen	50 -60 kV / mm
Hârtie cu lipici	30 kV / mm
Silicon	25-40 kV / mm
PTFE	40-80 kV / mm
Politeraftalat	160 kV / mm

Puterea rezultată scade odată cu creșterea conținutului de plastifiant și crește cu creșterea gradientului de temperatură. Excesul de material (bavurile), conținutul de pigmenti de culoare (exemplu carbonul C, etc) determină reducerea impactului rezistenței materialului în procesul de sudare.

Dupa H. Thomas [38] mărirea tensiunii CIF necesară începerii procesului de sudare CIF, trebuie să fie cu peste 25% peste valoarea rezistenței la 20°C; ca urmare pentru foliile din PVC rigid (dur) cu până la 15 kV/mm peste valoarea specifică materialului. La sudarea CIF este necesar un șoc inițial peste tensiunea de lucru în curent alternativ sau continuu (50 Hz).

În timp ce la sudarea CIF, distribuția tensiunii este reprezentată în straturi, rezistențele specifice relevante în dielectric prevăzute în domeniul de tensiune CIF, vor fi semnificativ influențate de tendința valorii temperaturii și constantei dielectrice relative ϵ_r (Fig. 55) [42].

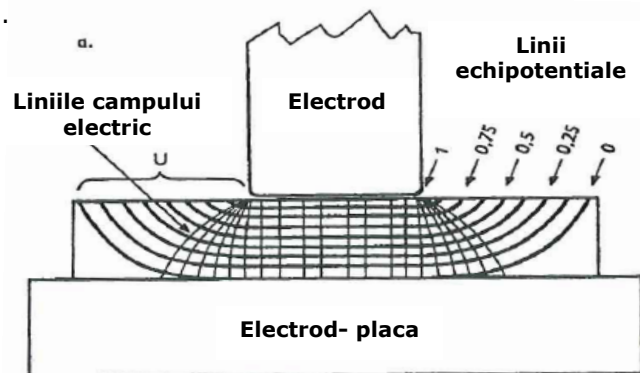


Fig. 55.a. Rezentarea liniilor echipotențiale valabile într-o sudură temperat omogenă.

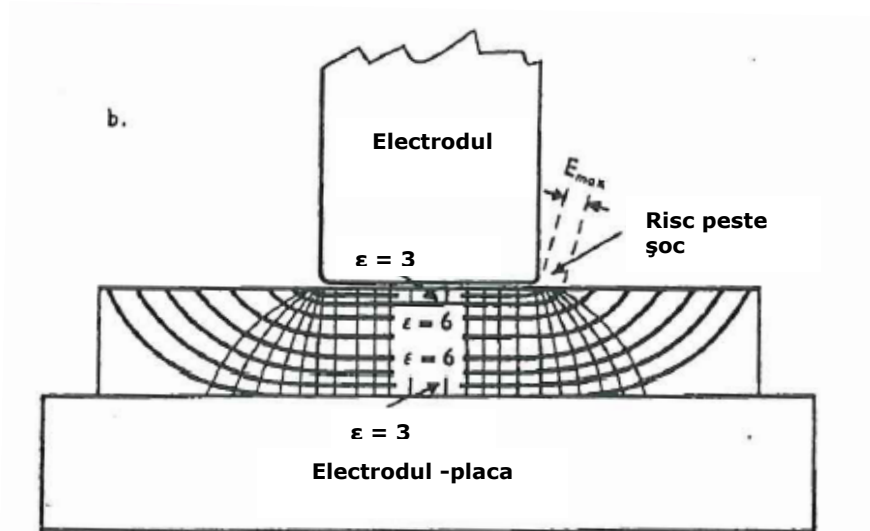


Fig. 55. b. Reprezentarea variației dielectricului în interiorul materialului

În interiorul materialului încălzit ce urmează să fie sudat CIF, dielectricul DK crește cu temperatura și deplasează liniile echipotentială în direcția straturilor exterioare răcite. Gradientul de tensiune scade (orizontal), cu pierderea conductibilității.

La aplicarea electrodului de sudare, linia de separare curge echipotential neregulat și se schimbă continuu pe parcursul procesului de sudare.

Pentru stratul de dielectric (foliile PVC) este întotdeauna determinantă intensitatea câmpului maxim.

Scăderea intensității câmpului electric cu creșterea frecvenței a fost determinată prin sudarea foliilor de PVC de 0,4 mm de către H. Suhr conform figurii 56.

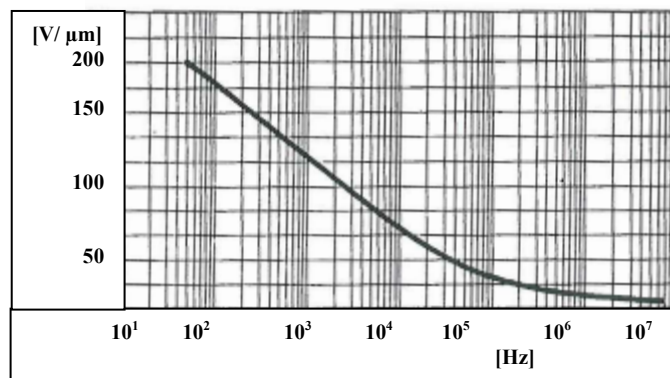


Fig.56. Rigiditatea dielectrică în funcție de frecvență a foliei polimer, 75 μm grosime [42]

La $f = 10$ MHz, tensiunea de străpungere a materialului U_d intersecționează valoarea de scurt circuit a tensiunii de debut U_{ge} conform figurii 57.

La frecvențe de 10^6 Hz, începe fenomenul de străpungere a foliei.

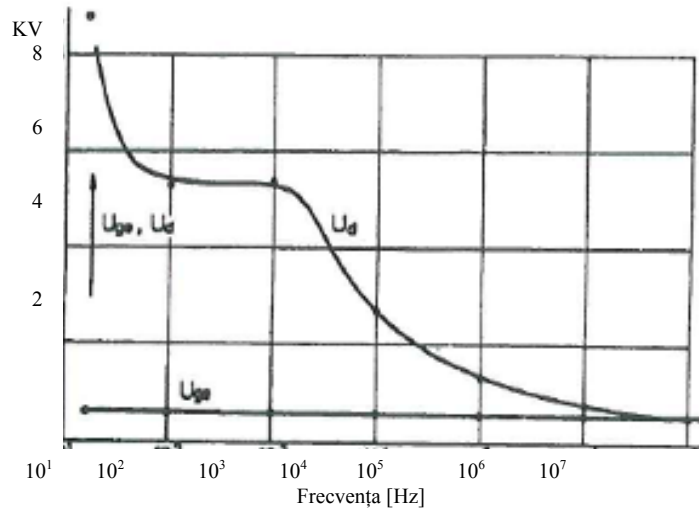


Fig.57. Reprezentarea variației tensiunii de debit U_{ge} , tensiunii de străpungere U_d în funcție de frecvență pentru acetatobutilat de celuloză de $40\mu\text{m}$ [42].

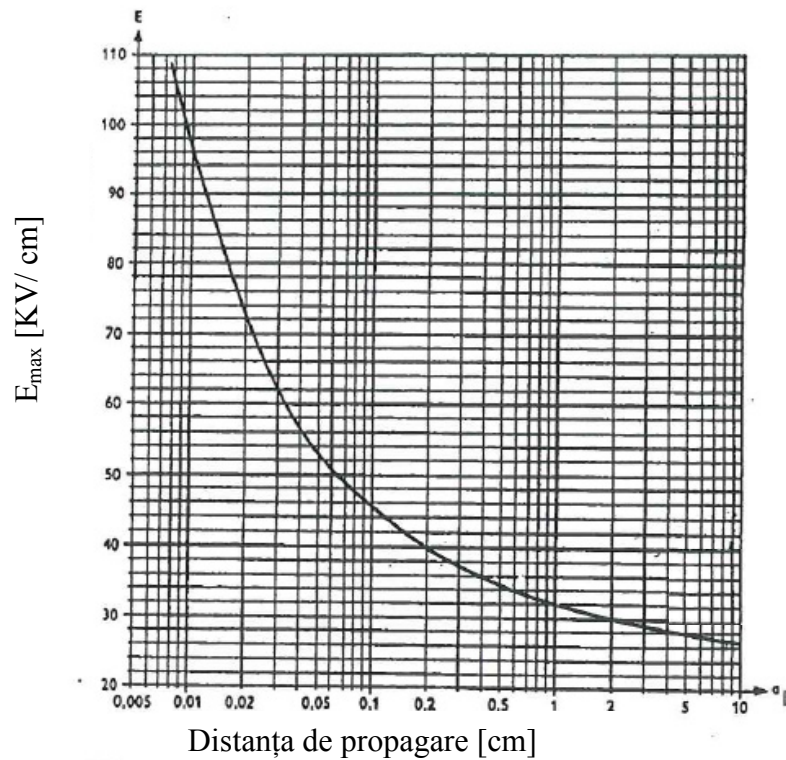


Fig. 58. Reprezentarea intensității câmpului aplicat exprimat în KV / cm, în funcție de distanța de propagare [42]

În figura 58 se observă că intensitatea câmpului de inițializare a procesului are valori maxime. În funcție de distanța de propagare, în condițiile în care dielectricul este aer, atmosfera este fără praf, la temperatura de 20 °C și presiunea atmosferică 760 Torri (Schumann), energia are valori de 96 kV / cm la 0,01 cm de electrod și 26 kV / cm la 10 cm, deci scade cu creșterea distanței de propagare [3]. Aceste valori nu țin cont de conturul electrozilor utilizați.

În figura 59 este reprezentată dependența dintre căderea de tensiune între diferite tipuri de electrozi și distanța de propagare în curent continuu și alternativ, la 50Hz, în aer cu presiunea barometrică 728 Torri și la temperatura de 20 °C:

- 1) Electrod cu electrod, curent alternativ la frecvența de 50 Hz,
- 2) Electrod cu electrod în curent continuu,
- 3) Electrod cu placa-electrod la $f = 50$ Hz,
- 4) Electrod cu placa-electrod în curent continuu,
- 5) Electrod cu placa-electrod în curent continuu, cu sarcină negativă la placă,
- 6) Electrozi bilă - bilă, cu diametre de 62,5 mm, la $f = 50$ Hz.

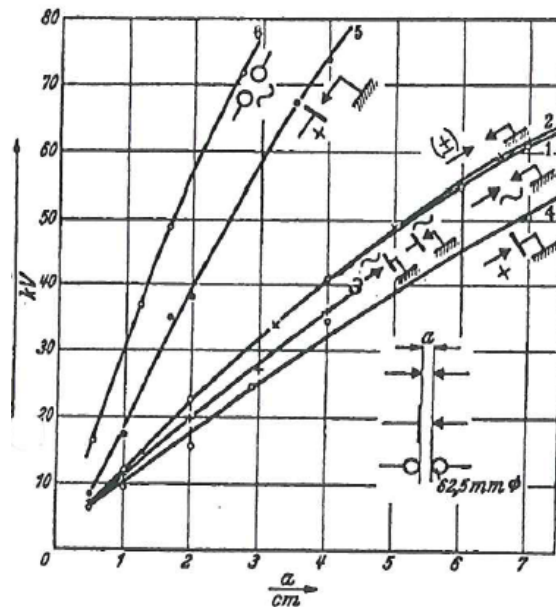


Fig.59. Reprezentarea dependenței dintre tensiunea aplicată și distanța de propagare pentru diferite tipuri de electrozi [3]

Electrozii matriței de sudare au deseori margini ascuțite, conform figurii 55, iar diferența de potențial în zona de racord a electrozilor atinge 12 KV pe distanțe de 1 cm.

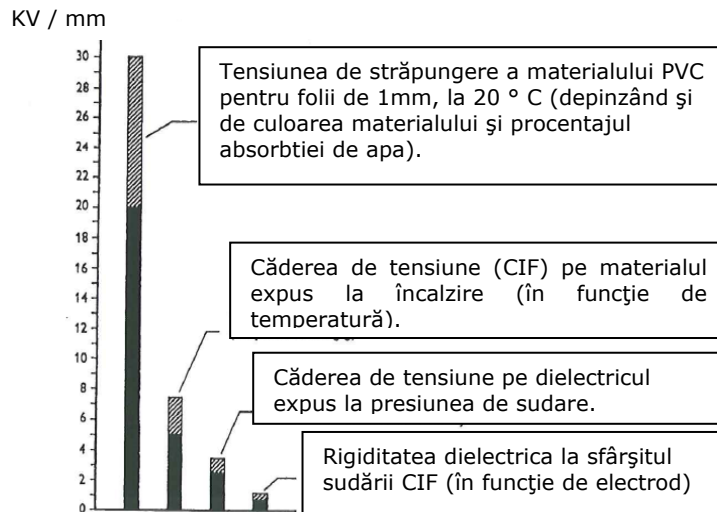


Fig. 60. Descreșterea rezistenței în dielectricul plastifiat de folie PVC, în timpul sudării CIF [15]

În figura 60 este redată variația rezistenței în dielectric (foliile ce se sudează) pe parcursul procesului de sudare [15].

Se observă o scădere a rezistenței în dielectric odată cu scăderea distanței dintre electrozi.

Pentru distante mari între electrozi, riscul de scurt circuit este mare și pentru reducerea acestuia sunt implementate perii de descărcare (din cupru) care sunt cunoscute sub denumirea de coroane de descărcare (fig.90).

La procesul de sudare CIF, liniile de transmisie și elementele de transport din cadrul ingineriei electrice de înaltă tensiune sunt îngrădite de dimensiunea matriței de sudare, deci practic se lucrează cu distanțe mici și curbe de descărcare ușoare. În cazul sudării CIF ca și descărcări de tensiune avem un șoc inițial, care corespunde tensiunii de debut U_{ge} , urmat de tensiunea de străpungere U_d .

Pericolul de scurtcircuit crește cu existența spațiilor în imediata apropiere a ariei de sudare prin favorizarea căderilor necontrolate de tensiune. Aceste spații cum ar fi distanța dintre straturile foliilor ce urmează a fi sudate, lipsa de compensare a electrozilor etc trebuie reduse sau eliminate.

Raportul dielectricilor dintre materialul care se sudează și aer pentru obținerea sudabilității trebuie să fie cuprins între 3 și 5 [22]:

$$\frac{\epsilon_{\text{sudabilitate bună}}}{\epsilon_{\text{aer}}} = 3...5.$$

Distribuția căderii de tensiune este invers proporțională cu intensitatea câmpului electromagnetic în aer, de aceea deseori apar scurtcircuite, chiar dacă tensiunea CIF are rol preponderent de rupere a particulelor dielectricilor.

Condiția de sudabilitate foarte instabilă și intensitatea de străpungere a dielectricilor (foliile ce urmează să fie sudate) care nu este precis determinată, conduce la un mecanism fizic al procesului de străpungere care nu pot fi obținut din calcule și este obținut prin observații statistice extinse.

Printr-o serie de experimente s-a constatat că în condiții de operare diferite, crescând tensiunea aplicată odată cu scăderea distanței dintre electrozi crește intensitatea câmpului electromagnetic obținând o sudabilitate îmbunătățită, până la limita de 10 kV.

3.4. Algoritm de calcul pentru sudarea foliilor PVC

3.4.1. Calculul intensității câmpului electromagnetic necesar obținerii cusăturii sudate prin CIF

Baza de calcul pentru capacitatea totală de căldură este:

$$N \left[\frac{W}{cm^2} \right] = \left(\frac{\gamma \cdot c}{t} + \frac{\lambda}{(0,5 \cdot a)^2} \right) \cdot \Delta T \cdot 4,146 \quad (34)$$

În figura 61 reprezentăm o secțiune prin matrița de sudare pentru a putea vizualiza elementele care intră în procesul de sudare CIF, unde:

B = lățimea electrodului;

a = distanța dintre electrozi;

d = grosimea pachetului sudat (grosimea totală a foliilor PVC);

r = raza de racord a electrozilor.

$$B = 0,4 \text{ cm}$$

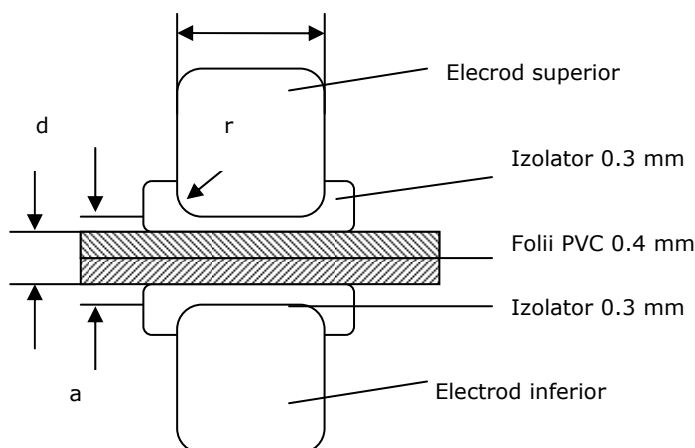


Fig.61. Secțiune prin matrița de sudare

Proprietățile fizice sunt ale foliilor PVC cu grosime de 0,4 mm sunt descrise în tabelul 10.

Tabelul 10. Proprietățile fizice ale foliei PVC

Folie flexibilă PVC SL40	La $f = 27 \cdot 10^6$ Hz
Factorul de pierdere dielectrică $\text{tg } \delta$ la 20 ⁰ C	0,05
Factorul de pierdere dielectrică $\text{tg } \delta$ la 140 ⁰ C	0,29
Constanta dielectrică ϵ_r la 20 ⁰ C	3
Constanta dielectrică ϵ_r la 140 ⁰ C	4,6
Temperatura de sudare [°C]	~ 175 ⁰ C
Căldura specifică c [kcal/ kg °C]	0,373
Greutatea specifică γ [kg/ m ³]	1288
Pierdere de căldură λ [kcal/ m h °C]	0,155
Pierdere de căldură λ [cal/ m s °C]	$0,43 \cdot 10^{-3}$

$$r = \frac{1}{8} \cdot B = 0,05 \text{ cm} \quad (35)$$

La proiectarea electrozilor, pentru evitarea scurtcircuitelor, se prescrie o raza de racord de 0.05 cm, determinată conform relației 35 și reprezentată în figura 61.

$$\Delta T = T_{\text{sudare}} - T_{\text{electrod}} = 175 - 30 = 145 \text{ }^\circ\text{C} \quad (36)$$

Timpul de sudare recomandat este:

$$t_s [\text{sec}] = (2 \dots 4) \cdot a [\text{mm}] = (2 \dots 4) \cdot 1,4 = (2,8 \dots 5,6) \text{ sec.} \quad (37)$$

În calcule vom utiliza 2,8 sec, conform formulei 37.

În conformitate cu relațiile 34; 37 și tabelul 12 obținem energia necesară sudării optime a foliilor PVC cu grosimea de 0,4 mm:

$$N = \left(\frac{\gamma \cdot c}{t} + \frac{\lambda}{(0,5 \cdot a)^2} \right) \cdot \Delta T \cdot 4,146 \approx 90,78 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Deci, putem spune că pentru sudarea unei folii PVC cu grosime de 0,1 mm avem nevoie de o energie de 22,7 W/ cm².

3.4.2. Calculul capacității matriței de sudare tratată ca și condensator

Suprafața calculată a electrodului reprezentat în figura 48 este obținută prin formula 38:

$$F = L \cdot B [\text{cm}^2] \quad (38)$$

$$F = 150 \cdot 0,4 = 60 \text{ cm}^2$$

Suprafața efectivă a cusăturii sudate este:

$F_{\text{ef}} = (L + a) \cdot (B + a)$, pentru electrozi în contrapartidă pentru sudare,

$F_{\text{ef}} = (L + 2a) \cdot (B + 2a)$, pentru sudare electrod pe placa de baza.

Pentru cusături de sudare cu lungime $L > 5$ cm, oțim dimensiunea distanța dintre electrozi a , pe care o considerăm neglijabilă față de aceasta și prin simplificare rezultă formula pentru:

- electrozi în contrapartidă pentru sudare (sudare simetrică)

$$F_{\text{ef}} = L \cdot (B + a) \quad (39)$$

- sudare electrod pe placa de bază (sudare asimetrică)

$$F_{\text{ef}} = L \cdot (B + 2a) \quad (40)$$

Toate dimensiunile au fost considerate în cm.

În cazul prezentat, conform formulei 39, $F_{\text{ef}} = 150 \cdot (0,4 + 0,14) = 81 \text{ cm}^2$.

Capacitatea în funcție de suprafața sudată are ca bază de calcul formula 41:

$$C [\text{pF}] = 8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{F [\text{cm}^2] \cdot \epsilon}{a [\text{cm}]} \quad (41)$$

În figura 61 observăm că avem 2 tipuri de dielectric, și anume 2 folii de material izolator cu grosimea totală de 0,6 mm și foliile din PVC moale ce urmează a fi sudate având grosimea totală de 0,8 mm.

Capacitatea totală se calculează ca și capacitate serie conform formulei 42.

$$C = \frac{C_{\text{PVC}} \cdot C_{\text{HP}}}{C_{\text{PVC}} + C_{\text{HP}}} \quad (42)$$

$$\epsilon_{\text{PVC}} \approx 3, \quad \epsilon_{\text{HP}} \approx 4,2$$

Pentru calculul capacității înainte de sudare folosim în calcule suprafața electrozilor:

$$C = \frac{(8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{60,3}{0,08}) \cdot (8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{60,4,2}{0,06})}{(8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{60,3}{0,08}) + (8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{60,4,2}{0,06})} \approx 129,5 \text{ pF}$$

Pentru calculul capacității după sudare folosim în calcule suprafața cusăturii sudate. În timpul sudării folia se comprimă cu aproximativ 33%.

$$C = \frac{(8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{81 \cdot 3}{0,08}) \cdot (8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{81 \cdot 4,2}{0,06})}{(8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{81 \cdot 3}{0,08}) + (8,84 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{81 \cdot 4,2}{0,06})} \cong 263 \text{ pF}$$

Capacitatea matriței de sudare crește în timpul procesului de sudare datorită creșterii suprafeței capacitive și a scăderii distanței dintre armături (electrozi).

3.4.3. Determinarea temperaturii electrodului și influența acestuia asupra procesului de sudare

În general, la procesul de sudare al foliilor de PVC cu electrod și contra-electrod, la care temperatura nu este influențată din exterior, temperatura inițială a electrozilor este de aproximativ 20 ° C. În graficul din figura 49 se prezintă variația temperaturii optime a electrodului T_e în funcție de grosimea peliculei d [mm].

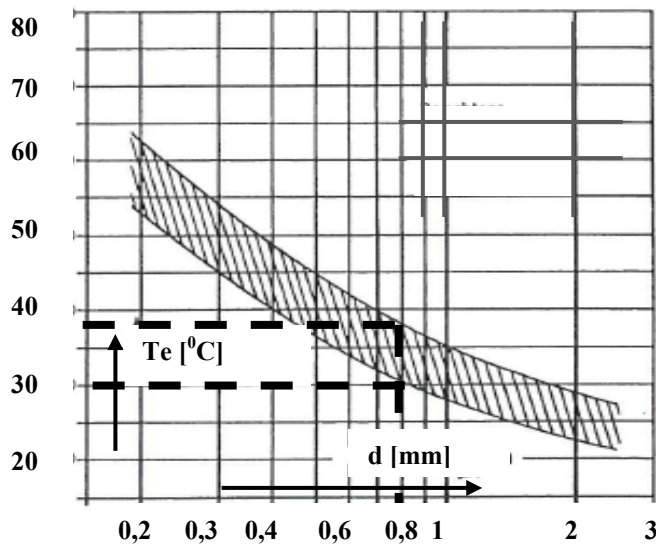


Fig. 62. Temperatura optimă a electrodului în funcție de grosimea peliculei [102]

Temperatura electrodului crește necontrolat după fiecare ciclu de sudare, ajustarea acesteia depinzând de secvența de sudare, energia termică, masa electrodului și combinații ale acestora. Evoluția temperaturii electrodului depinde major de contextul gamei tehnologice.

În cazul nostru $d = 2 \cdot 0,4 = 0,8$ mm, deci temperatura optimă a electrodului este între 30 – 37 °C conform nomogramei din figura 62. În formula (36) am considerat $T_{\text{electrod}} = 30$ °C. În următorul grafic prezentăm zona de sudare optimă considerând perechea de parametrii: putere specifică P_s [w/ cm²] – timp de sudare T_s [sec] la diferite grosimi de material d [mm].

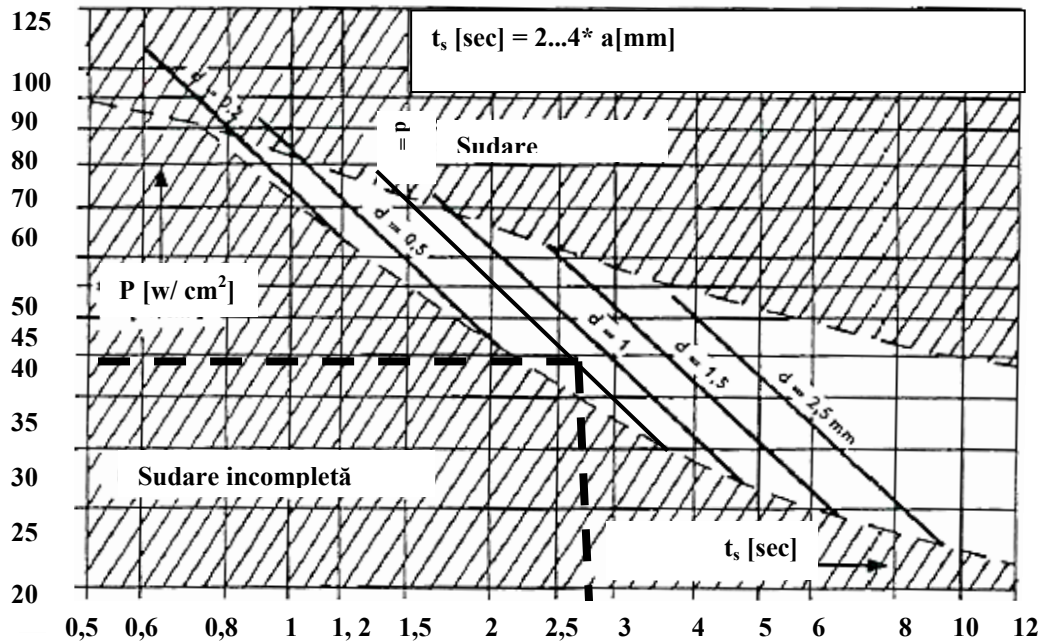


Fig. 63. Dependenta dintre putere specifica P_s [w/ cm²] și timpul de sudare t_s [sec] la diferite grosimi de material d [mm] [102]

În cazul prezentat pentru a obține o sudură optimă la îmbinarea foliilor de PVC cu grosime de 0,4 mm, din monograma redată în figura 63 pentru $d = 0,8$ mm și un timp de sudare de 2,8 secunde obținem o putere specifică necesară de aproximativ 35 W/ cm².

O altă mărime importantă în calitatea sudurii este timpul de răcire, care este determinat în funcție de grosimea materialului sudat.

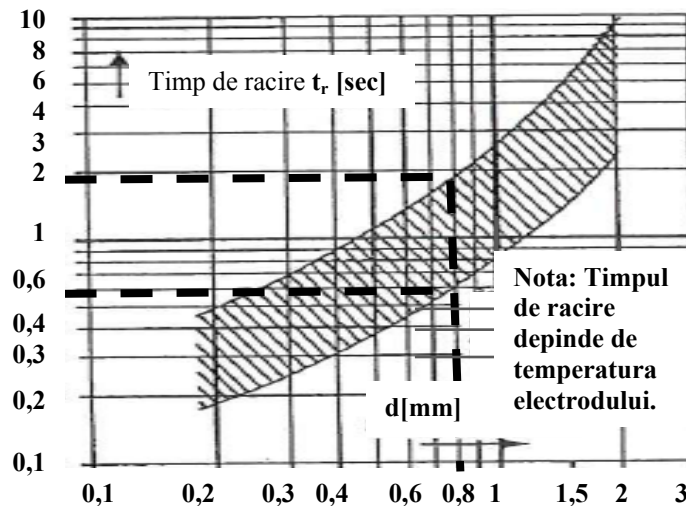


Fig. 64. Determinarea timpului de răcire în funcție de grosimea foliilor PVC [103]

Graficul din figura 64 a fost trasat după un interval de timp de la începerea procesului pentru a lua în considerare temperatura în sarcină a electrodului. În experiment pentru o grosime totală a foliilor de 0,8 mm este recomandat un timp de racire t_r între 0,6 – 2 secunde.

3.4.4. Materiale izolatoare - funcții, proprietăți și măsuri pentru menținerea temperaturii electrodului

Materiale electroizolate sunt utilizate în tehnica de sudare CIF, cu aplicații largi în construirea electrodului, unde au rol de izolare electrică și termică, minimizând sau limitând distanțele precum și temperatura electrodului în contactul cu foliile de sudare.

Fundamental, acestea au următoarele funcții:

1. Prevenția scurtcircuitelor în cusătura sudată,
2. Izolarea termică pentru protecția materialelor ce urmează a fi sudate (temperatura electrodului trebuie menținută sub temperatura de topire a materialului),
3. Izolarea termică pentru protecția materialelor în cazul sudării aditionale,
4. Separarea liniilor câmpului electric.

Materialele izolatoare trebuie să-și mențină stabile în timpul sudării următoarele caracteristici:

- a) rigiditatea dielectrică la $f = 27$ MHz pentru diferite temperaturi,
- b) rezistența electrică la creșterea temperaturii,
- c) valorile dielectricului ϵ_r și $\tan \delta$ la $f = 27$ MHz la diferite temperaturi,
- d) proprietățile mecanice la diferite temperaturi.

Cerințele de izolare în procesul de sudare CIF implică prezența materialelor izolante ca materiale auxiliare, cele mai des utilizate fiind:

1. Rășinile fenolice – rășină pe coli de celuloză (hârtie laminată),
2. Silicon – acoperit cu fibra de sticlă,
3. Diverse tipuri de cauciuc,
4. Cauciuc-țesătură-conexiuni,
5. Politetrafluoretilenă,
6. Acetați- ulei și materiale textile,
7. Silicon - PE - PP - Ulei - și hârtie,
8. Rășini epoxidice și alți polimeri termoreactivi, sticlă, azbest.

Materialele plate izolatoare sunt preferate în procesul de sudare CIF, cele mai folosite fiind rășinile fenolice laminate pe hârtie. Proprietățile acestor materiale sunt dorite în procesul de sudare deoarece sunt termoizolatoare și reduc temperatura de expunere de la nivelul materialului de la peste 150°C la 125°C , în conformitate cu Martens (DIN 53458). În figura 65 este prezentat modul de utilizare a diferitelor materiale izolatoare în procesul de sudare CIF.

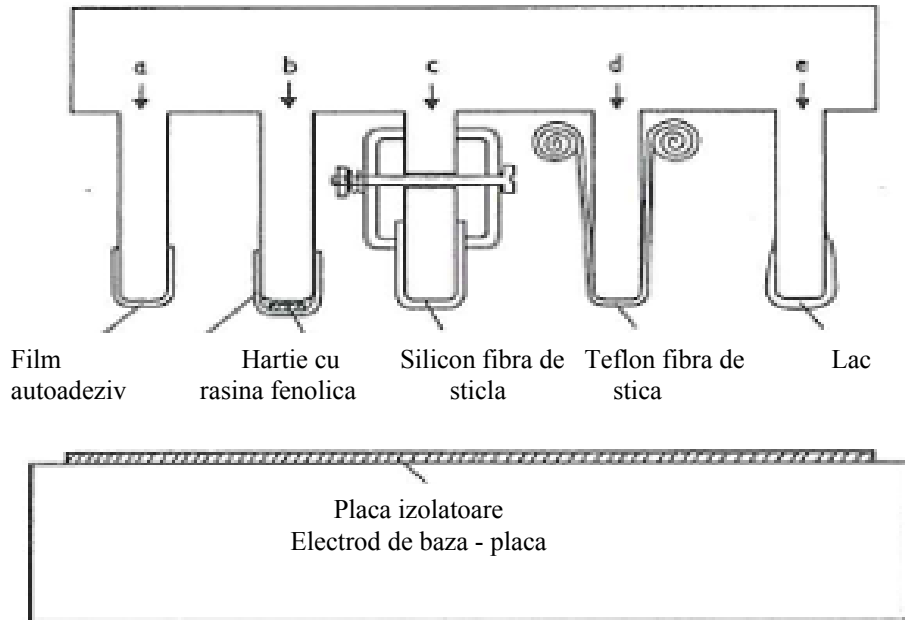


Fig. 65. Reprezentarea metodelor de fixare a diferitelor materiale izolatoare pe bara electrod

3.4.5. Determinarea dimensiunilor electrodului pentru sudarea simetrică a foliilor de PVC

În practică, diversitatea geometriei cusăturilor sudate, face imposibilă confecționarea unui electrod unitar, și obligă utilizarea electrozilor de dimensiuni mai mici care se îmbină conform cu desenul produsului sudat.

Din diagramele următoare vom determina dimensiunea optimă a electrodului pornind de la grosimea foliei PVC ce urmează să fie sudată [51].

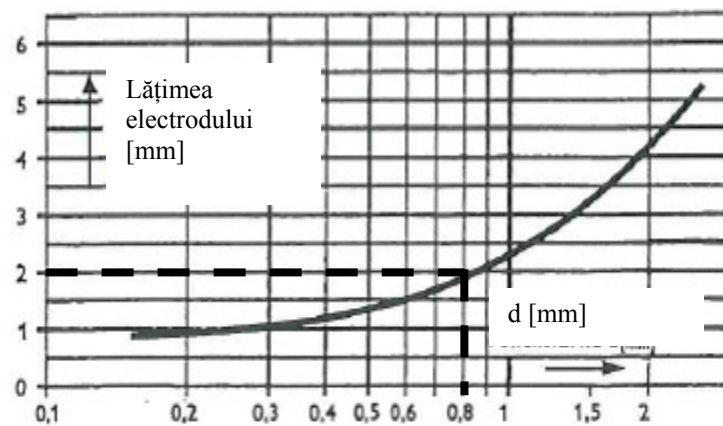


Fig. 66. Determinarea lățimii minime a electrodului în funcție de grosimea materialului [103]

Recomandarea literaturii de specialitate privind lățimea electrodului conform cu figura 66 pentru $d = 0,8$ mm, este de 2 mm.

Din motive constructive ale produsului sudat și anume lățimea cusăturii sudate, este condiționată alegerea lățimii electrodului la 4 mm.

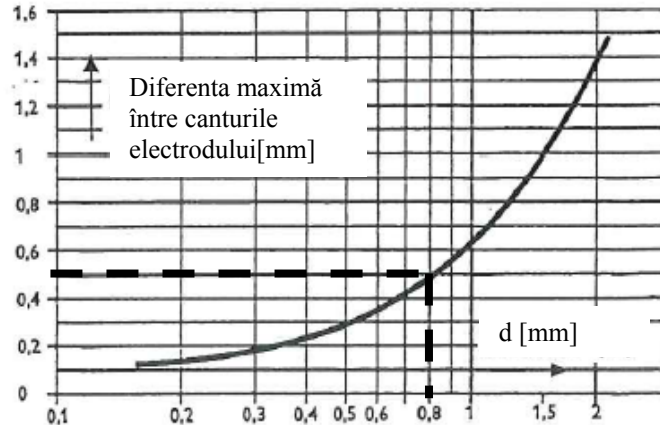


Fig. 67. Determinarea distanței maxime dintre canturile electrodului [103]

Pentru a evita scurtcircuitele, distanța dintre canturile electrodului trebuie să respecte recomandările nomogramei din figura 67; deci, pentru grosimi ale materialelor de sudare de $d = 0,8$ mm este recomandată o distanță maximă de 0,5 mm.

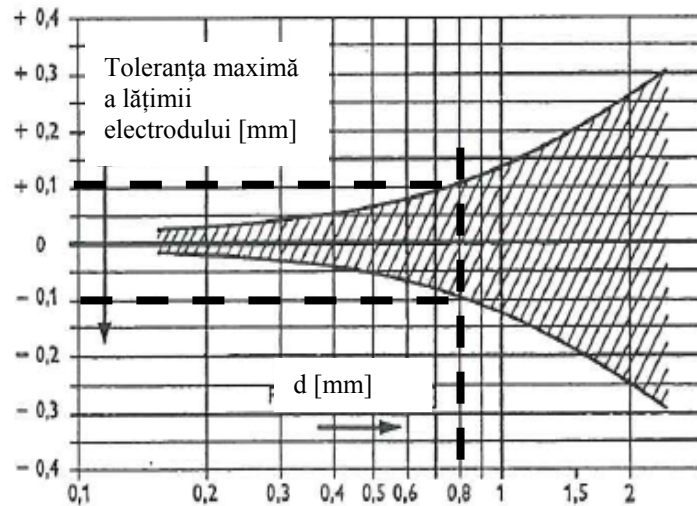


Fig. 68. Determinarea toleranțelor lățimii electrodului [103]

În funcție de grosimea materialului care se sudează se prescriu toleranțele maxime ale electrozilor. Pentru o grosime a foliilor $d = 0,8$ mm, în conformitate cu nomograma din fig. 68, obținem toleranțele lățimii electrodului de $\pm 0,1$ mm.

3.4.6. Soluții tehnice pentru fixarea materialelor în timpul sudării pentru o cusătură sudată optimă

Pentru a obține o îmbinare sudată a foliilor PVC în conformitate cu specificațiile, (desenul produsului sudat) este important să obținem o poziționare optimă a materialelor în timpul sudării. În fig. 69 se prezintă soluția constructivă a matriței de sudare cu un dispozitiv de fixare culisant cu arc care are rol de a menține poziția foliei în timpul sudării și de a dirija fluxul de material topit (partea dreapta). În partea stângă, unde nu avem dispozitiv de fixare se observă o deformare a foliei superioare și un flux necontrolat al materialului topit în timpul sudării.

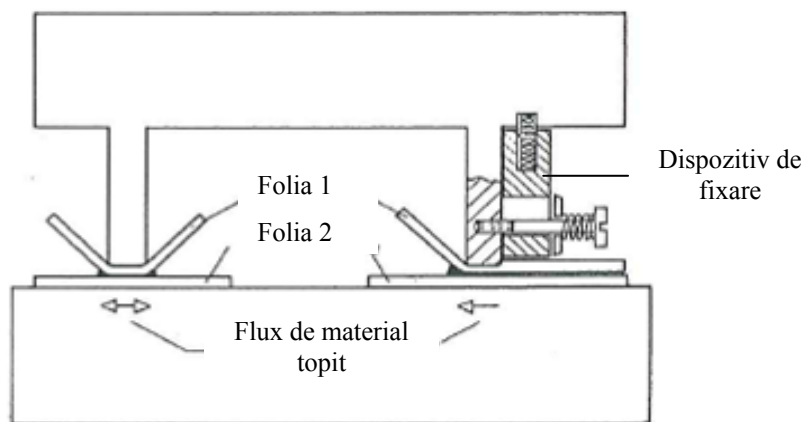


Fig. 69. Soluția constructivă a matriței de sudare cu dispozitiv de fixare culisant

În fig. 70 se prezintă soluția constructivă a matriței de sudare cu un opritor (partea dreapta) folosit pentru a controla poziția foliei superioare. Această metodă este folosită în special pentru foliile rigide.

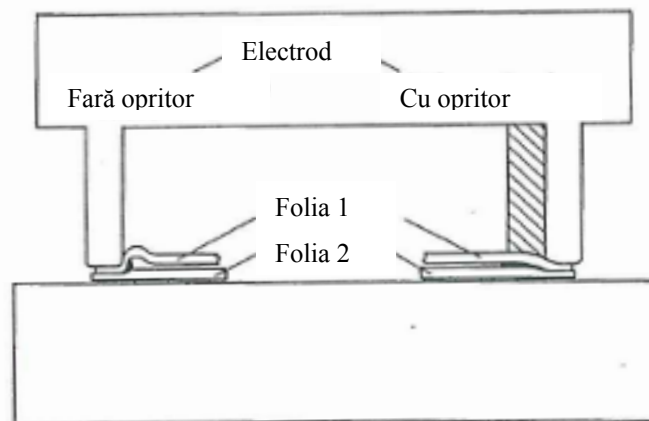


Fig. 70. Soluția constructivă a matriței de sudare cu un opritor

3.4.7. Determinarea presiunii grupului hidraulic al masinii CIF pentru o sudare optimă

Presiunea specifică P_s se determină în funcție de materialul de baza în conformitate cu nomograma din figura 71.

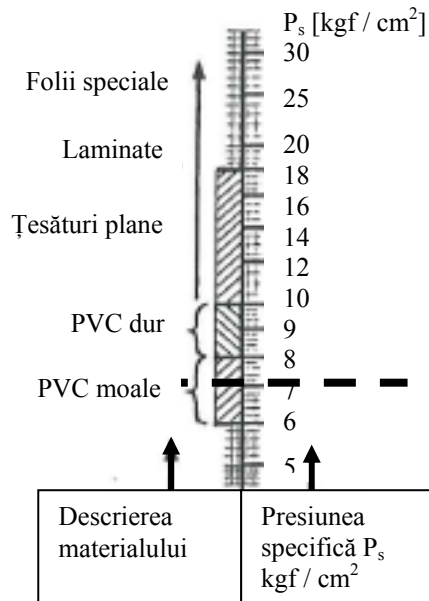


Fig. 71. Reprezentarea presiunii specifice ($1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.013 \text{ bar}$) [99]

Foliile folosite în experiment sunt confectionate din PVC moale, deci se va utiliza în urmatoarele determinări valoarea medie a presiunii specifice P_s de 7 Kgf / cm^2 conform fig. 71.

Presiunea grupului hidraulic necesară mașinii de sudare CIF se determină cu formula 43.

$$P = P_{sPVC} * F \quad (43)$$

Pentru sudarea CIF a foliilor din PVC la o suprafața a electrozilor de 60 cm^2 avem nevoie de un grup hidraulic al masinii care sa dezvolte presiunea de

$$P = 7 * 60 = 420 \text{ Kgf.}$$

Din nomograma redată în fig. 72 vom determina presiunea necesară în timpul procesului de sudare CIF, pentru a obține o cusătură optimă în funcție de material și suprafața de presare (suprafața electrozilor).

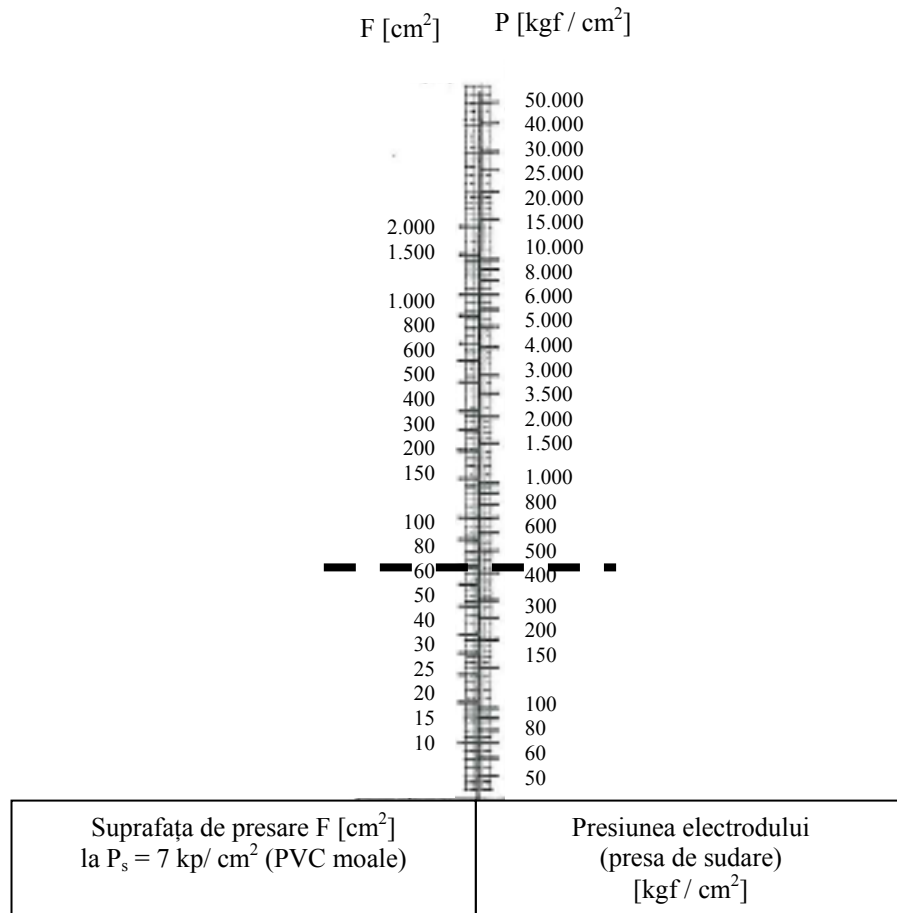


Fig. 72. Dependența dintre suprafața electrodului și presiunea electrodului [99]

Pentru o suprafață a electrodului $F = 60 \text{ cm}^2$, conform nomogramei din figura 72, se reconfirmă puterea grupului hidraulic al mașinii de $P = 7 * 60 = 420 \text{ Kgf}$.

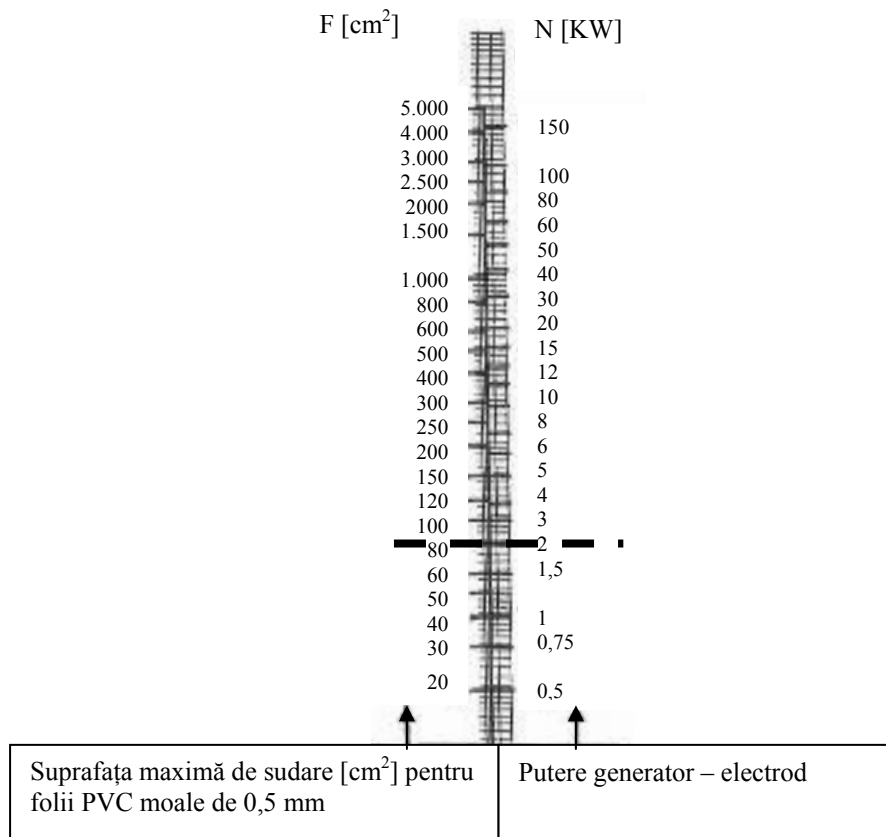
3.4.8. Determinarea puterii generatorului CIF

Fig. 73. Nomograma suprafață efectivă de sudare- putere generator- electrod [99]

Conform nomogramei din figura 73, pentru o suprafață de sudare efectivă calculată de 81 cm², puterea generator- electrod pentru o sudare optimă este de 2 kW. Puterea mașinii CIF folosită în experiment are 25 kW.

Dacă este posibil din punct de vedere dimensional se poate lucra simultan cu 2 matrițe de sudare pe masa mașinii, deoarece puterea acesteia permite acest lucru. Prin utilizarea simultană a două matrițe pe fiecare masă culisantă a mașinii se obține o creștere a productivității și a gradului de utilizare al mașinii și o reducere a consumului de energie electrică consumat.

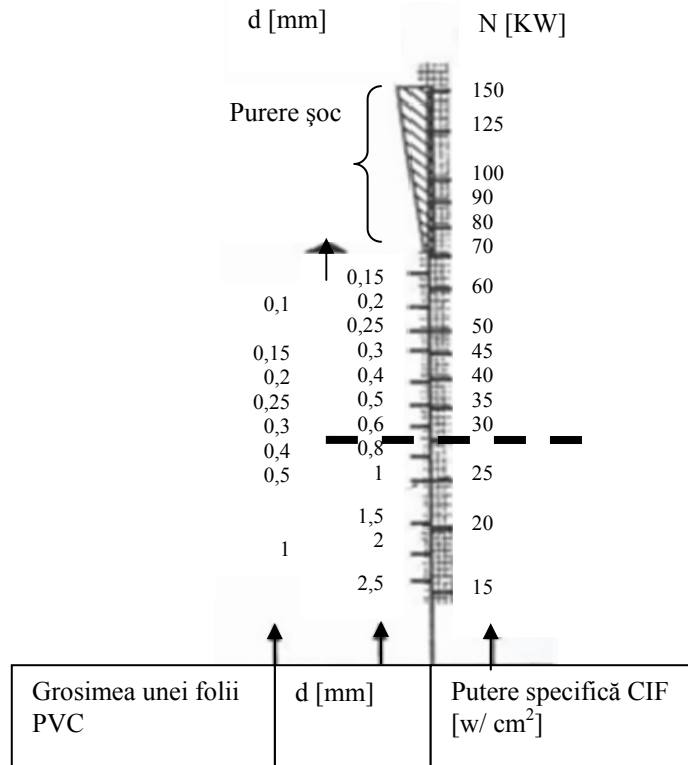


Fig. 74. Nomograma grosime dielectric – putere generator- electrod [99]

Conform nomogramei din fig. 74 pentru a obține o sudare optimă pentru $d = 0,8\text{mm}$, puterea specifică este de 27 W/ cm^2 .

Deci putem concluziona că aplicând o putere specifică de 1kW unor folii de PVC cu grosimea de 1 mm se obține o cusătură sudată optimă în limita suprafeței de sudare efective de $35 - 40\text{ cm}^2$ ($35 - 40\text{ cm}^2/\text{kW}$). Sumarizând valorile parametrilor determinați pentru sudarea CIF a foliilor PVC de $0,4\text{ mm}$ în tab. 11.

Tabelul 11. Valorile determinate pentru sudarea CIF a foliilor PVC de $0,4\text{mm}$

Descriere parametrii	Valori
Grosime totală material d [mm]	0,8
Lățime electrod [mm]	4
Toleranțe lățime electrod [mm]	$\pm 0,1$
Putere specifică CIF N [w/ cm ²]	27
Presiune specifică electrod P_s [bar]	410
Temperatura electrod T_e [°C]	30 - 40
Timp de sudare t_s [sec]	3,2
Timp de răcire t_r [sec]	0,6 - 2
Putere generator – electrod [kW]	2

Folosind matricea de sudare și parametri determinați, îmbinările realizate trebuie să aibe pașii de sudare vizibili (fig. 75) și forța de rupere să fie de minim 35N/50mm.

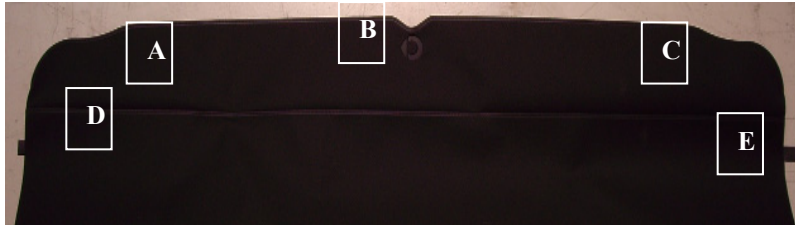


Fig. 75 Repartiția esantioanelor în piesa sudată

Facând măsuratori și înregistrări ale forței de rupere pe un număr de 25 esantioane, prelevate din 25 piese sudate, din 5 zone ale cusăturii sudate conform figurii 23, în urma prelucrării statistice utilizând software MINITAB pentru statistica proceselor, au fost obținute graficele din fig. 76.

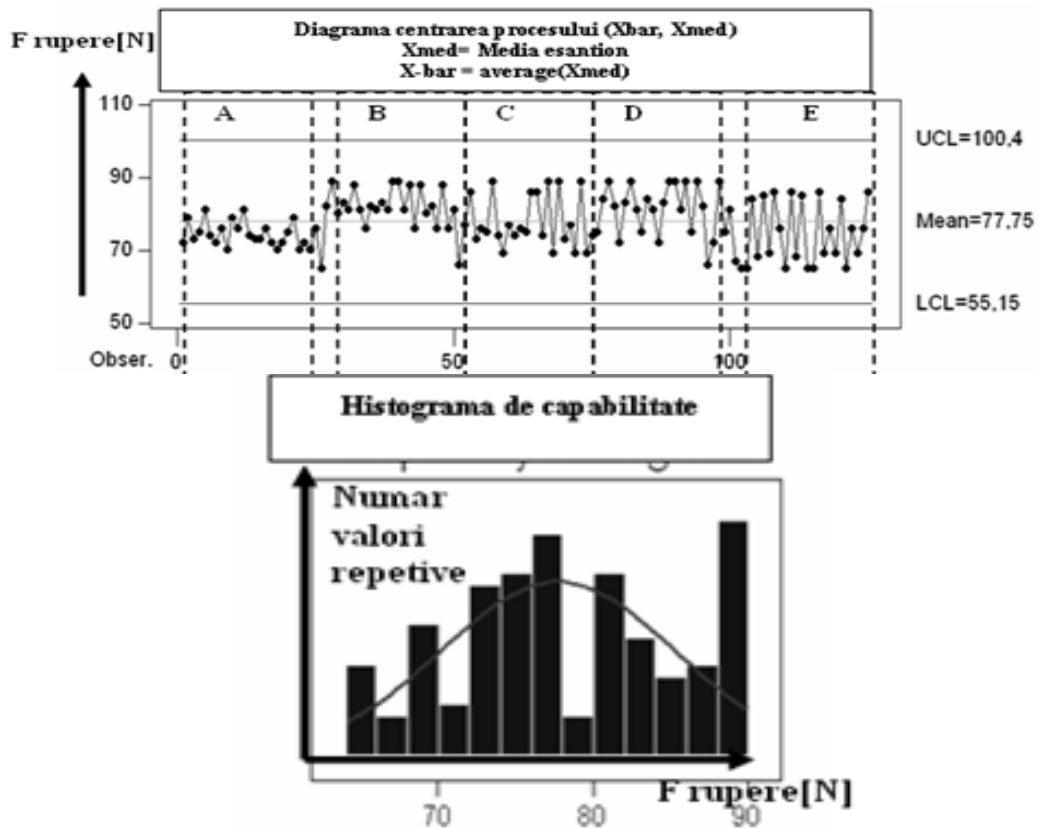


Fig. 76. Diagrama de stabilitate a procesului în timp și histograma de capabilitate

Din diagrama de centrare a procesului (\bar{X} , X_{med}) se poate vedea că procesul de sudare CIF este centrat și stabil ca reglaj, deci cu parametrii de sudare stabiliți pot fi îndeplinite cerințele impuse.

Histograma de capabilitate obținută indică o distribuție normală a valorilor forței măsurate, fără riscul de a coborî sub limita de 50N.

3.5. Concluzii parțiale

Parametrii tehnologici stabiliți prin calcul pentru procesul de sudare în curenți de înaltă frecvență a foliilor din policlorură de vinil cu grosime de 0,4 mm sumarizați în tabelul 11, pot fi folosiți ca punct de pornire în validarea procesului de sudare CIF.

Pentru controlul fluxului de material topit în timpul procesului de sudare este important să utilizăm soluții constructive adecvate, în funcție de designul produsului sudat.

La sudarea foliilor PVC este importantă menținerea temperaturii electrodului în limite optime, prin folosirea materialelor izolatoare.

Ansamblul generator sudare CIF- presă de sudare – matriță sudare trebuie atent selectate pentru asigurarea unei cusături sudate conformă cu specificațiile impuse.

4. Variante ale procesului de sudare al termoplastelor

4.1. Sudarea simetrică

Sudarea simetrică a fost prima aplicație a procesului de sudare CIF. Prin acest procedeu sunt sudate piese ca mantale de ploaie, pungi și alte produse care au ca materie primă foliile din plastic. După sudare, unele produse trebuie tăiate conform proiectului. Pentru reducerea costurilor de producție s-a inițiat ideea de a dezvolta o aplicație tehnologică care să realizeze sudarea foliilor din plastic și tăierea lor într-un singur pas. Deci, în locul electrozilor simpli de sudare prezentați în figura 77 se utilizează electrozi ascuțiți, echipați cu margini tăietoare prezentați în figura 78.

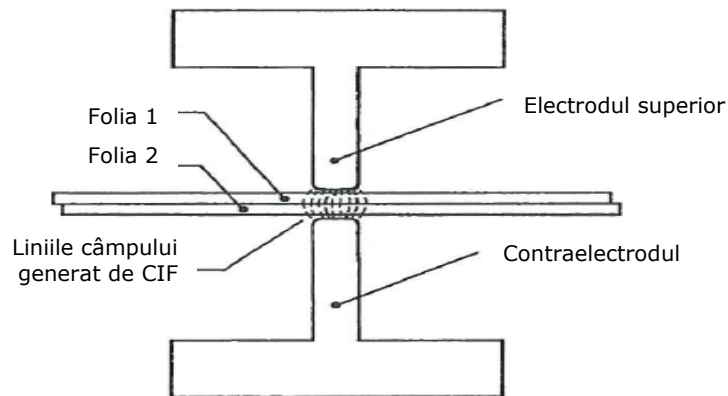


Fig. 77. Reprezentarea sudării simetrice CIF

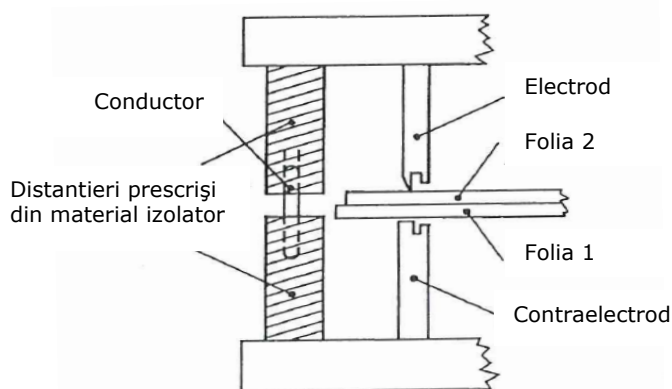


Fig. 78. Reprezentarea sudării simetrice CIF combinată cu tăierea conturului

Prezența contraelectrodului este vitală pentru sudarea cu CIF, deoarece reprezintă puntea pentru fluxul de curenți între cei doi poli. În figura 76 este descrisă metoda tehnologică de sudare-tăiere, dar cu referire la sudarea cu contraelectrod. În general, termenul de contraelectrod în sudarea cu CIF, este vederea în oglindă ca geometrie a electrodului sau cu ușoară deviație față de acesta. Diferența în cazul figurii 78 este marginea tăietoare aplicată doar la electrodul superior, în timp ce pe contraelectrod avem doar o fantă pentru un proces de tăiere facil. Din punct de vedere optic cusătura sudată cu contraelectrod conform schiței prezentate în fig. 77 are avantajul cusăturii în relief, care vizualizată la microscop are aspectul prezentat în fig.79.

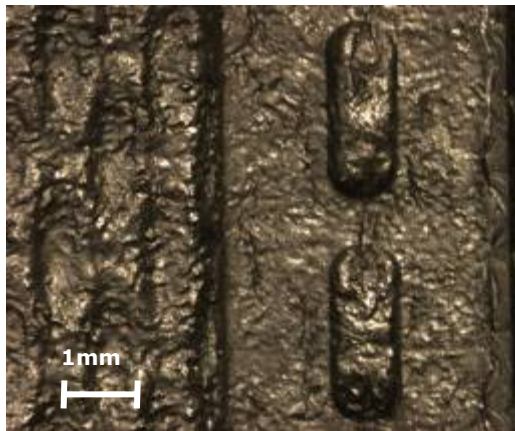


Fig. 79. Reprezentarea aspectului microscopic al cusăturii în relief, x50

4.2. Sudarea asimetrică

Sudarea asimetrică este considerată sudarea la care fluxul de energie se realizează prin intermediul unui electrod placă conform figurii 81.

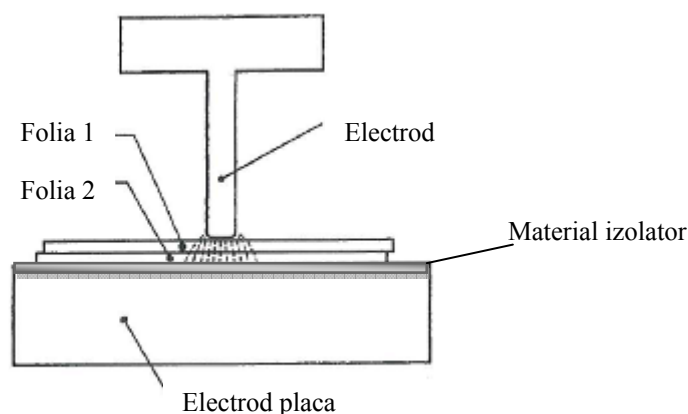


Fig. 81. Reprezentarea sudării CIF asimetrică

Utilizând placa de bază pe post de contaelectrod, la scurt timp după aplicarea CIF, simetria câmpului CIF generat se pierde din cauza diferenței de volum dintre electrozi.

Din momentul pornirii procesului în placa electrod se dezvoltă o cantitate mai mare de căldură decât în electrod, suprafețele încălzite devenind mult inegale.

Prin urmare, filmul plastifiat în timpul procesului de sudare poate fi deviat pe o singură parte (spre electrod), deci cusătura de sudare astfel formată va avea valori de rupere sub valorile sudării CIF simetrice. Pentru combaterea acestui fenomen se aplică pe electrodul placă un material izolator (fig. 81)

Acest strat izolator poate menține temperatura maximă la centru, dar nu poate restabili simetria gradientului de temperatură, fenomen prezentat în figura 81.

4.3. Sudarea combinată

4.3.1. Sudarea cu CIF combinată cu tăierea conturului materialelor

În cazul procesului combinat sudare-tăiere pentru a diminua efectul de câmp nesimetric și transfer al caldurii se folosesc folii izolatoare pe placa- electrod, conform figurii 83.

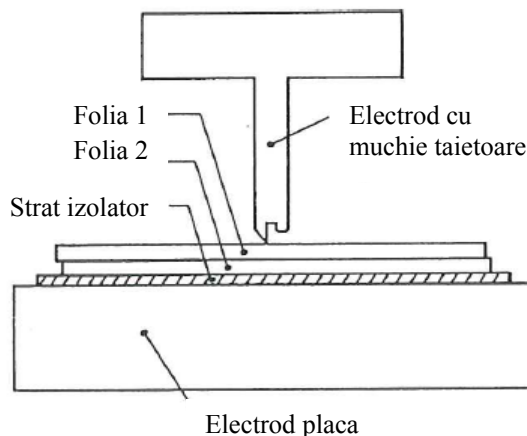


Fig. 83. Reprezentarea sudării cu CIF asimetrică combinată cu tăiere contur

Pentru sudarea combinată există constrângeri fizice reciproce, astfel că la decalaje mai mari dintre electrod și marginea tăietoare, intensitatea câmpului electric produce la nivelul cușitelor o încălzire puternică, care duce la schimbări structurale ale materialelor.

Creșterea puternică a temperaturii duce la diminuarea efectului de răcire după sudare, care are ca rezultat bavuri care rămân pe material.

La procesul combinat de sudare și tăiere a materialelor, empiric s-a stabilit că pentru respectarea cerințelor tehnice, adică fără bavuri de material, trebuie ca electrozii de sudare și marginile tăietoare să fie poziționate unul lângă celălalt sau la o distanță care de obicei este sub 30% din lățimea electrodului.

4.3.2 Sudarea cu CIF asimetrică suprapusă combinată

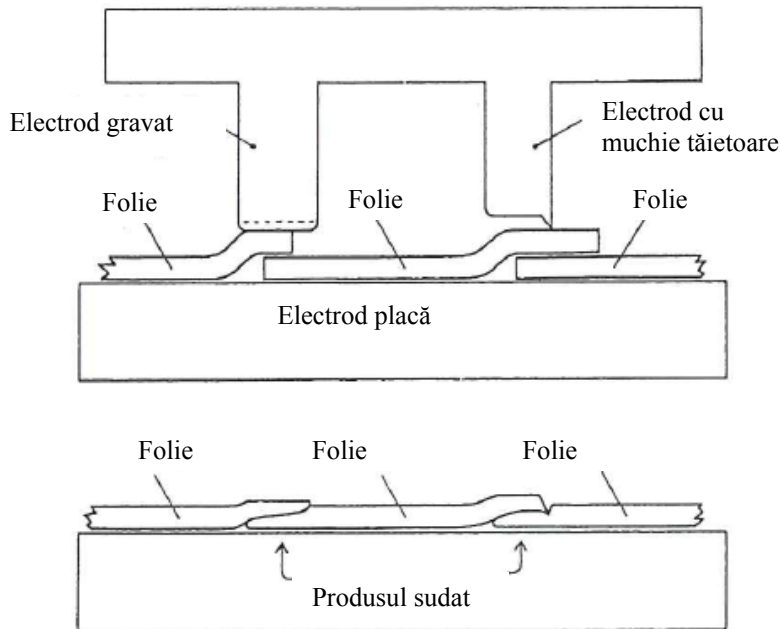


Fig. 84. Reprezentarea sudării cu CIF asimetrică suprapusă combinată

În fig. 84 partea stângă este reprezentată sudarea CIF prin suprapunere, electrodul superior fiind gravat, iar în partea dreaptă un electrod cu marginea tăietoare insuficientă pentru distrugerea foliei PVC.

Necesar, la acest tip de sudare cu mai mulți electrozi diferiți pe aceeași placă electrod care generează două sau mai multe câmpuri electrice, este folosirea bobinelor combinate. Electrocul din stânga al fig. 84 produce o îmbinare extrem de durabilă, iar electrocul din dreapta produce o îmbinare sudată și o tăiere a conturului în același timp.

Pentru o sudare combinată optimă este necesară o alegere atentă a energiei, timpului de sudare și presiunii de sudare.

4.4. Conducerea experimentelor

Experimentul are ca scop determinarea evoluției gradientului termic în material pe parcursul procesului de sudare CIF în funcție de varianta sudării și grosimea materialului.

În experiment se trasează graficul gradientului termic pentru foliile de PVC cu inserție textilă cu structura prezentată în figura 32, utilizând pentru colectarea datelor un dispozitiv care înregistrează temperatura prin intermediul a patru termocuple și înmagazinează datele într-un computer conform figurii 85.

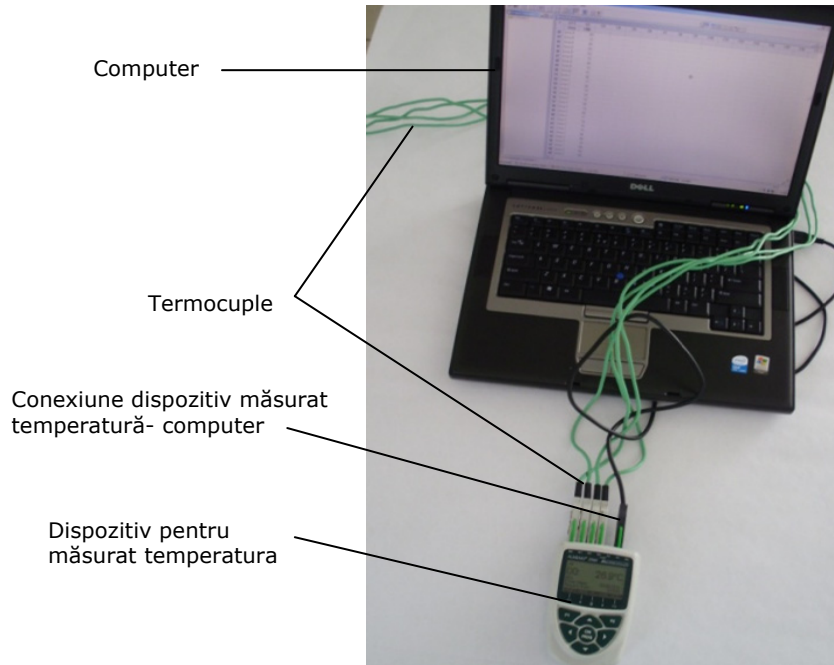


Fig. 85. Reprezentarea aparaturii de înregistrare a temperaturii

Termocuplele sunt fixate pe secțiunea transversală a ansamblului sudat, astfel:

- Termocupla 1 este amplasată între electrod și folia superioară,
- Termocupla 2 este plasată în mijlocul foliei 1,
- Termocupla 3 este plasată între cele două folii,
- Termocupla 4 este plasată în mijlocul foliei 2.

Fiecare termocuplă este modificată ca poziție pe axa electrozilor până se înregistrează punctul cu temperatura maximă în timpul ciclului de sudare. Termocuplele se plasează în punctele cu temperaturi maxime și se înregistrează datele pentru sudarea foliilor PVC.

Acestea sunt prelucrate statistic utilizând funcția regresie de gradul doi (pătratică) prin intermediul programului specializat Minitab și se obține graficul care redă gradientul de temperatură în materialul ce se sudează.

Acest experiment se va realiza atât pentru sudarea CIF simetrică cât și pentru cea asimetrică.

Pentru sudarea simetrică a foliilor PVC de 0,4 mm, datele înregistrate de termocuple plasate în ansamblul sudat conform figurii 87 sunt prelucrate statistic utilizând regresia de gradul doi obținându-se graficul din figura 86.

Variatia temperaturii in materialul sudat pentru $d = 0,4\text{mm}$

$$\log(T[\text{C}]) = 1,97211 + 1,65644 a[\text{mm}] - 2,89172 a[\text{mm}]^2$$

$$S = 0,0699724 \quad R\text{-Sq} = 78,9 \% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 57,9 \%$$

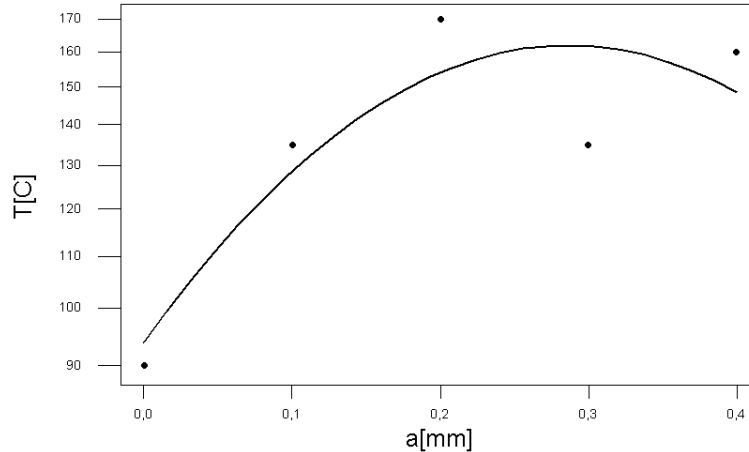


Fig. 86. Reprezentarea gradientului de temperatură

Ecuția pătratică a gradientului de temperatură în funcție de grosimea materialului este redată în formula 44.

$$\log T = 1,97211 + 1,65644 \cdot a - 2,89172 \cdot a^2 \quad (44) \text{ unde:}$$

T = temperatura [°C]

a = distanța în material [mm]

Gradientul de temperatură pentru sudarea foliilor PVC de de 0,2 mm în ansamblul sudat este prezentat în figura 87.

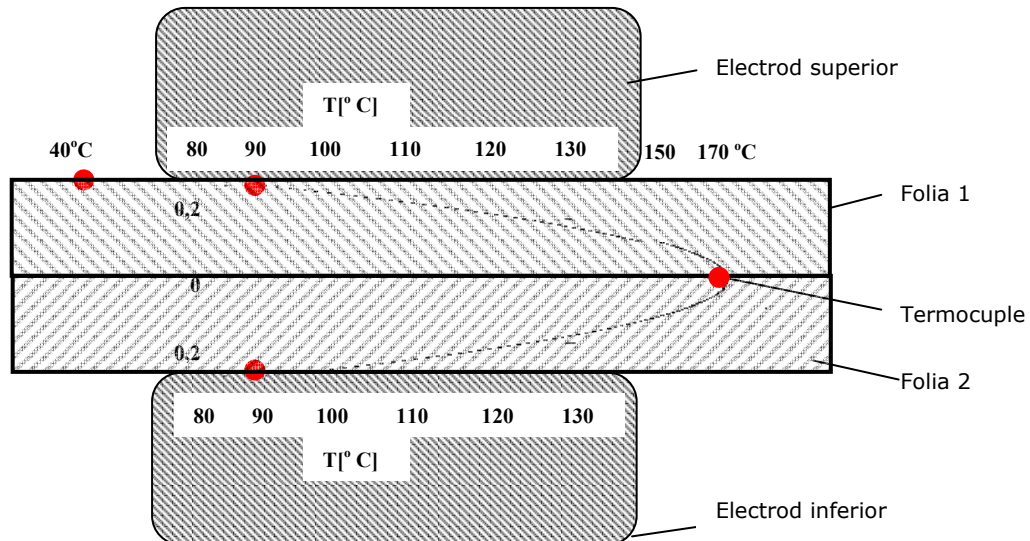


Fig. 87. Reprezentarea gradientului de temperatură

Pentru sudarea simetrică a foliilor PVC de 0,6 mm, datele înregistrate de termocuple plasate în ansamblul sudat conform figurii 88 sunt prelucrate statistic utilizând regresia de gradul doi obținându-se graficul din figura 89.

Variația temperaturii în materialul sudat pentru $d=0,8$ mm

$$\log(T[^\circ\text{C}]) = 1,57757 + 4,14014 a[\text{mm}] - 6,44261 a[\text{mm}]^2$$

$$S = 0,0705179 \quad R\text{-Sq} = 96,8 \% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 93,6 \%$$

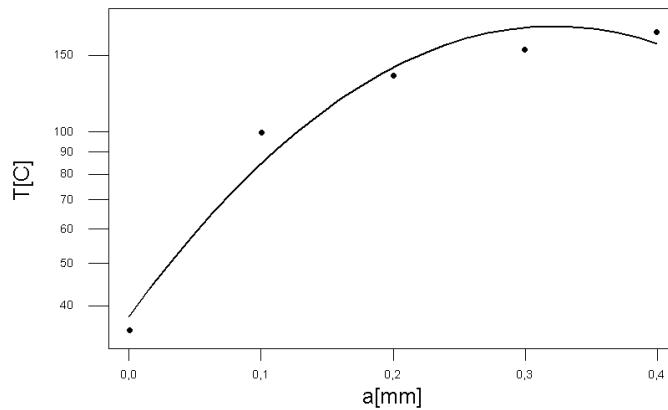


Fig. 88. Reprezentarea gradientului de temperatură

Ecuția pătratică a gradientului de temperatură în funcție de grosimea materialului este dată de formula 45.

$$\log T = 1,57757 + 4,14014 \cdot a - 6,44261 \cdot a^2 \quad (45)$$

Gradientul de temperatură pentru sudarea foliilor PVC de de 0,4 mm în ansamblul sudat este prezentat în figura 89.

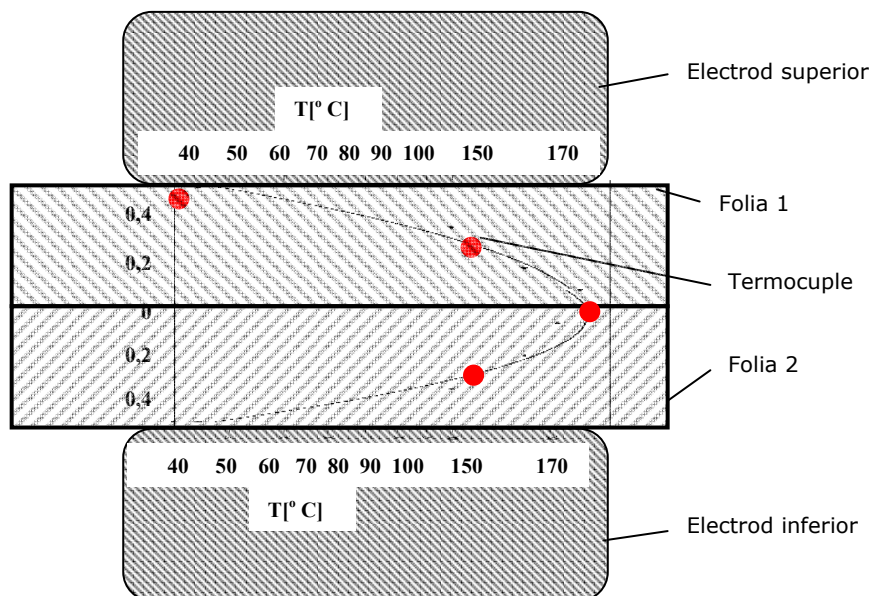


Fig. 89. Reprezentarea gradientului de temperatură

Datele înregistrate de termocuplele distribuite conform fig. 91 sunt prelucrate statistic pentru sudarea simetrică a foliilor PVC de 0,6 mm utilizând regresia de gradul doi obținem graficul din figura 90.

Variația temperaturii în materialul sudat pentru $d=1,2$ mm

$$\log(T[^\circ\text{C}]) = 1,48968 + 3,08460 a[\text{mm}] - 3,11672 a[\text{mm}]^2$$

$$S = 0,0390677 \quad R\text{-Sq} = 99,2 \% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 98,4 \%$$

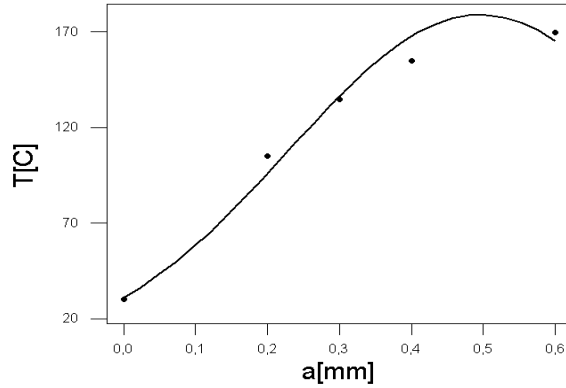


Fig. 90. Reprezentarea gradientului de temperatură

Ecuția pătratică a gradientului de temperatură în folia PVC este:

$$\log T = 1,48968 + 3,08460 \cdot a - 3,11672 \cdot a^2 \tag{46}$$

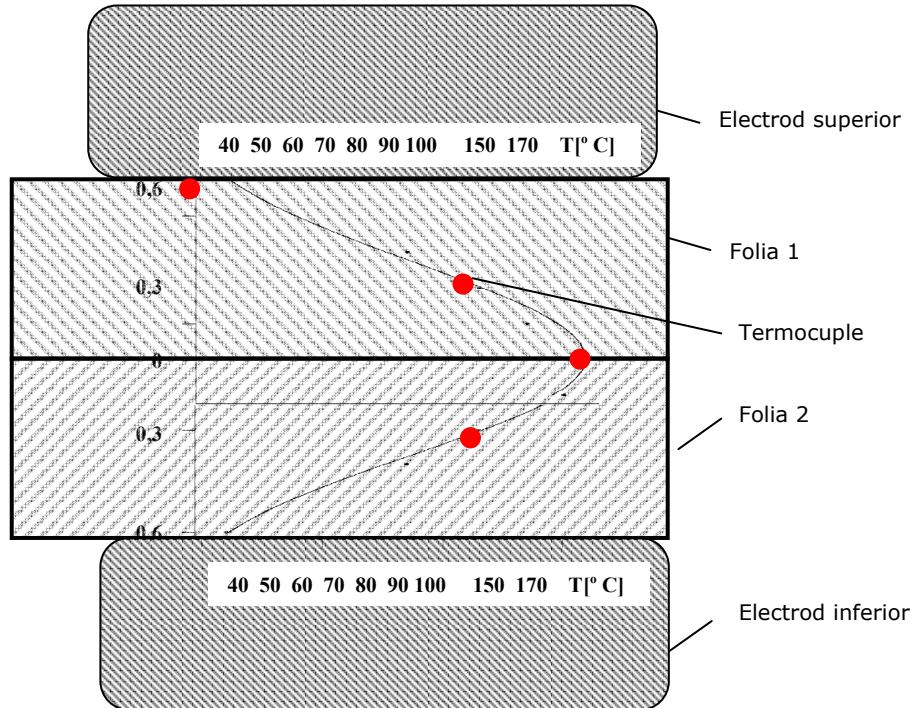


Fig. 91. Reprezentarea gradientului de temperatură

Distribuția gradientului de temperatură în cazul sudării CIF simetrice a foliilor PVC cu grosimea de 1mm este redată în fig. 92 și este obținută prin prelucrarea datelor preluate de către termocuplele distribuite conform fig.93.

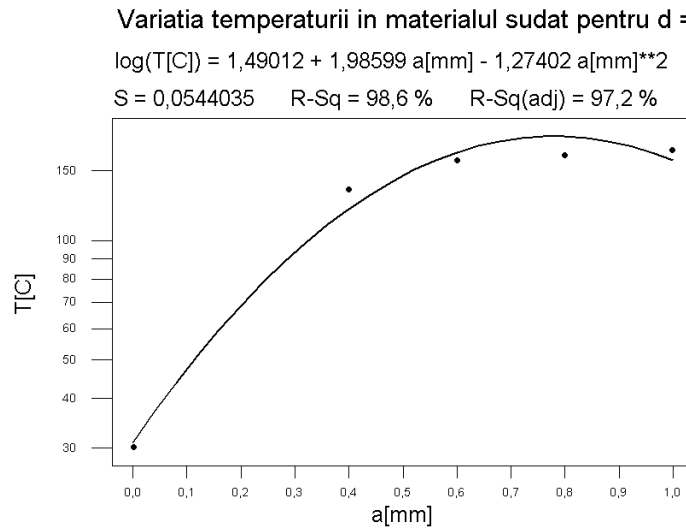


Fig. 92. Variația temperaturii în materialul plastic în timpul procesului de sudare

Ecuția dependenței gradientului termic de grosimea materialului este dată de formula 47.

$$\log T = 1,49012 + 1,98599 \cdot a - 1,27402 \cdot a^2 \quad (47)$$

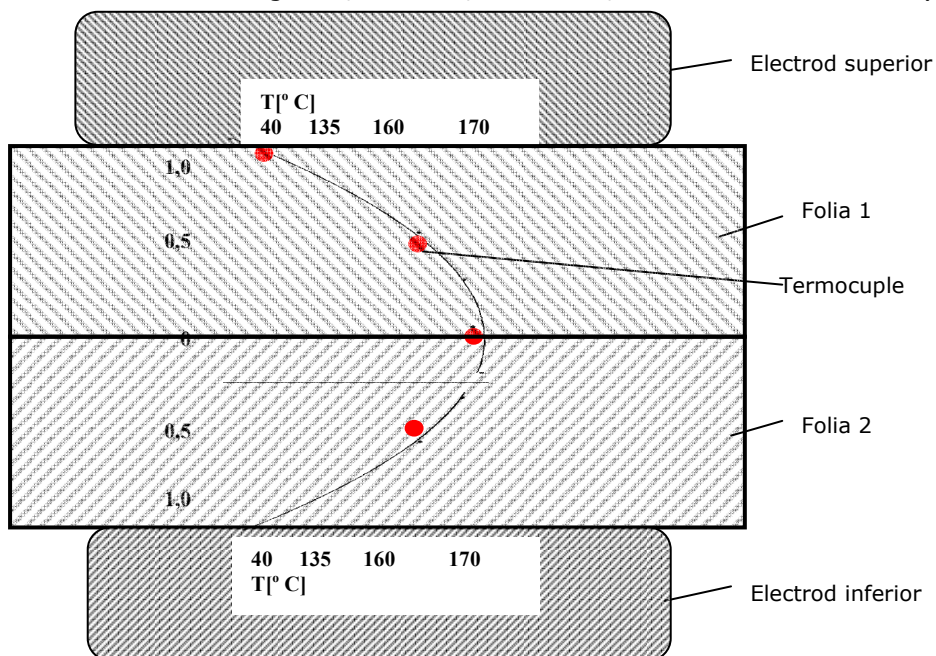


Fig. 93. Reprezentarea gradientului de temperatură în ansamblul sudat

În fig. 87 se observă că pentru foliile subțiri cu grosime de 0,2mm, gradientul de temperatură crește ca rezultat al pierderilor forțate de căldura și se impune cerința de a aplica un câmp CIF mai puternic.

În fig. 93 pentru folii cu grosime de 1 mm se observă că în secțiunea transversală a îmbinării sudate, distribuția încălzirii arată o valoare mai scăzută în zona electrozilor. Încalzirea datorată sudării nu este limitată la zona de contact dintre folii și se transmite pe o zonă destul de largă în material.

Căldura necesară fuzionării materialelor conduce la dezvoltarea unei temperaturi în zona de contact spre limita lor de curgere. Aplicarea unei presiuni minime poate conduce la infiltrarea insuficientă a materialelor de contact (fig. 93) care este exclusiv o problemă a materialelor cu conductibilitate termică mică, cum ar fi foliile poroase la sudarea cu CIF. Pierderile de căldură induse în electrod sunt, prin urmare, o necesitate absolută și reprezintă o caracteristică cheie pozitivă a procesului de sudare cu CIF. Trebuie precizat că pentru a realiza cusături sudate durabile a foliilor groase ($a / 2 > 1$ mm) sunt necesare măsuri speciale în procesul de sudare.

Rezultate tehnologice optime de sudare pot fi atinse pentru foliile cu grosimea în intervalul de 0,4 – 1 mm, distribuția temperaturii în material fiind redată în figurile 89 și 91.

Pentru procesul de sudare simetrică al foliilor cu grosime mică, de 0,2 mm, conform 87, este necesară o energie și o intensitate a câmpului mai ridicată, iar rezultatele obținute nu sunt stabile.

Efectul de încălzire pentru foliile subțiri $2 * 0,2$ mm reprezentat în fig. 87 arată o extindere în afara zonei de contact a electrozilor care duce la o răcire mai anevoioasă și deci la un timp de răcire mai mare.

Cu creșterea grosimii foliilor de PVC (fig. 89; 91) efectul de încălzire rămâne în zona de contact a electrozilor și procesul de sudare este stabil.

Utilizând același algoritm pentru sudarea asimetrică a foliilor PVC de 0,6 mm, poziționând terocuplele conform figurii 95 obținem graficul prezentat în figura 94.

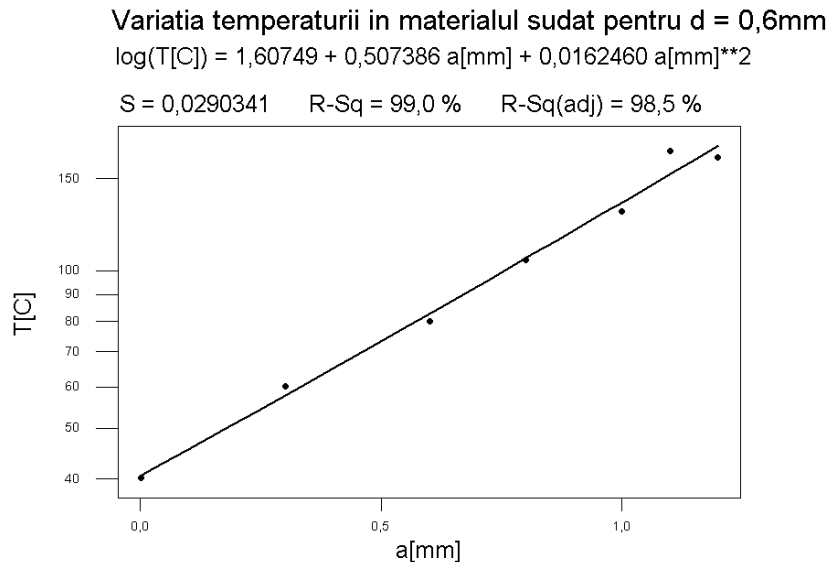


Fig. 94. Variația temperaturii în materialul PVC în timpul procesului de sudare

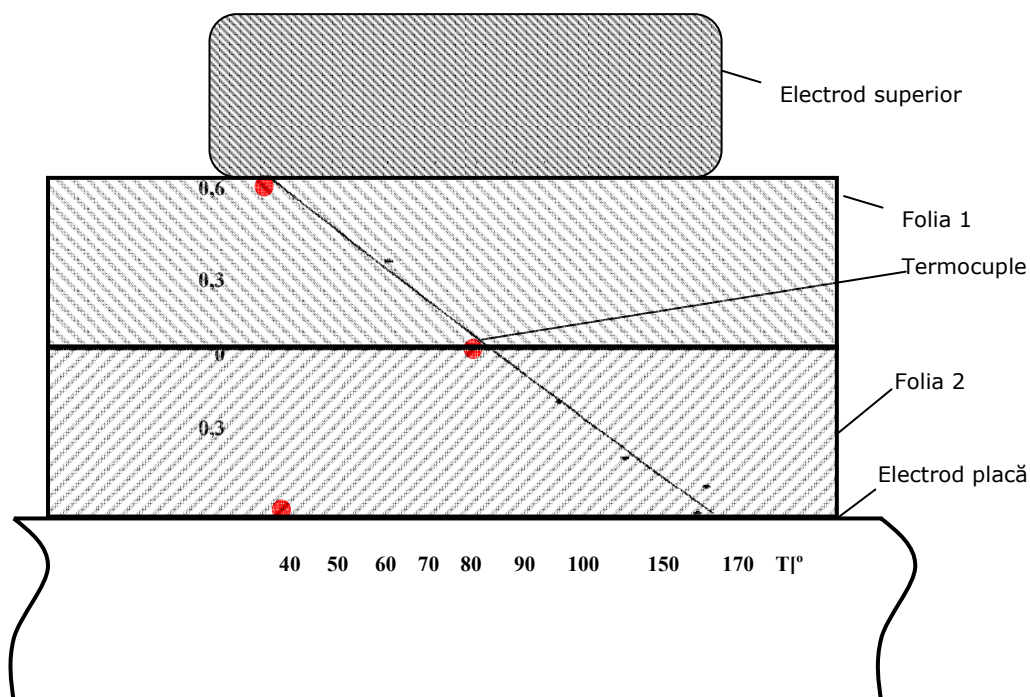


Fig. 95. Reprezentarea gradientului de temperatură în ansamblul sudat

Conform figurii 95, la sudarea asimetrică se observă un transfer major de energie de la electrodul superior către placa electrod astfel că la contactul dintre foliile PVC nu este asigurată temperatura de topire și deci îmbinarea sudată.

Acest fenomen se datorează valorii ridicate a $\tan \delta$ a materialului foliilor și totodată împrăstierii câmpului în placa inferioară, acesta nefiind simetric.

Pentru a contracara acest efect se folosește o folie din material izolator aplicată pe placa electrod.

În fig. 96 este reprezentată variația temperaturii în cazul sudării asimetrice a foliilor de PVC de 0,6 mm cu o folie de material plastic cu grosimea de 0,2 mm aplicată pe placa electrod. Dimensiunea totală a dielectricului în acest caz specific este de 1,4 mm.

Datele temperaturii sunt colectate prin intermediul termocuplelor care sunt montate în ansamblul sudat conform figurii 97.

Gradientul temperaturii pentru $d = 2 \times 0,6\text{mm}$ si izolatie $0,2\text{ mm}$

$$\log(T[\text{C}]) = 1,67234 + 1,71878 a[\text{mm}] - 1,41327 a[\text{mm}]^2$$

$$S = 0,0797835 \quad R\text{-Sq} = 95,3\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 93,5\%$$

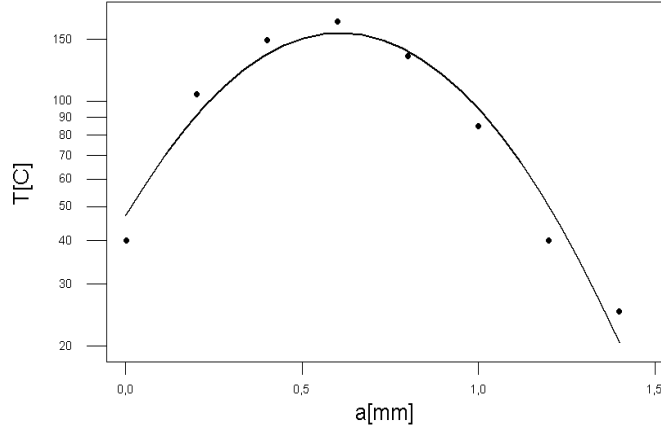


Fig. 96. Variația temperaturii în dielectric în timpul procesului de sudare

Ecuția dependenței gradientului termic de grosimea materialului este dată de formula 48.

$$\log T = 1,67234 + 1,71070 \cdot a - 1,41327 \cdot a^2 \quad (48)$$

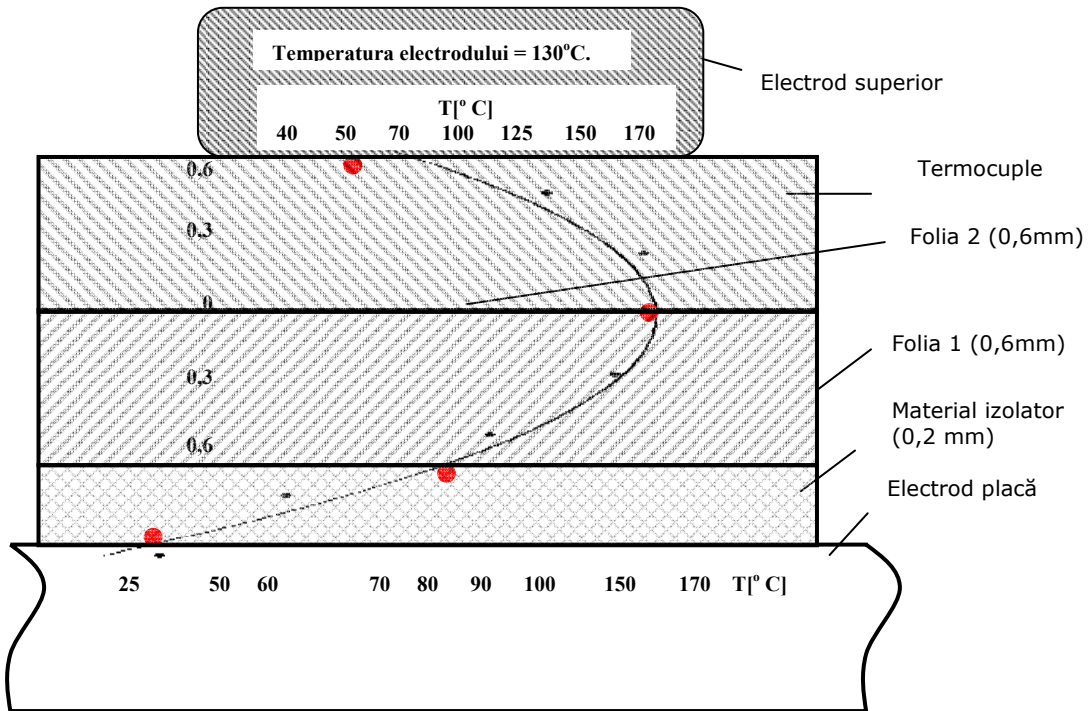


Fig. 97. Reprezentarea gradientului de temperatură în ansamblul sudat

În fig. 97 se observă că temperatura maximă este puțin sub linia de îmbinare a celor două folii PVC și este favorizată obținerea îmbinării sudate.

Deci, un material izolator cu grosimea reprezentând o treime din grosimea foliilor PVC (0,2/ 0,6 mm) echilibrează transferul termic în cazul sudării CIF asimetrice.

În fig. 98 este reprezentată variația temperaturii în cazul sudării asimetrice a foliilor de PVC de 0,2 mm cu o folie de material plastic cu grosimea de 0,2 mm aplicată pe placa electrod. Dimensiunea totală a dielectricului în acest caz specific este de 0,6 mm.

Datele temperaturii sunt colectate prin intermediul termocupleurilor din ansamblul sudat conform figurii 99.

Gradientul temperaturii pentru $d = 2 \times 0,2$ mm și izolație 0,2 mm

$$\log(T[\text{C}]) = 1,60171 + 4,75968 a[\text{mm}] - 8,45538 a[\text{mm}]^2$$

$$S = 0,0523832 \quad R\text{-Sq} = 98,7 \% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 97,8 \%$$

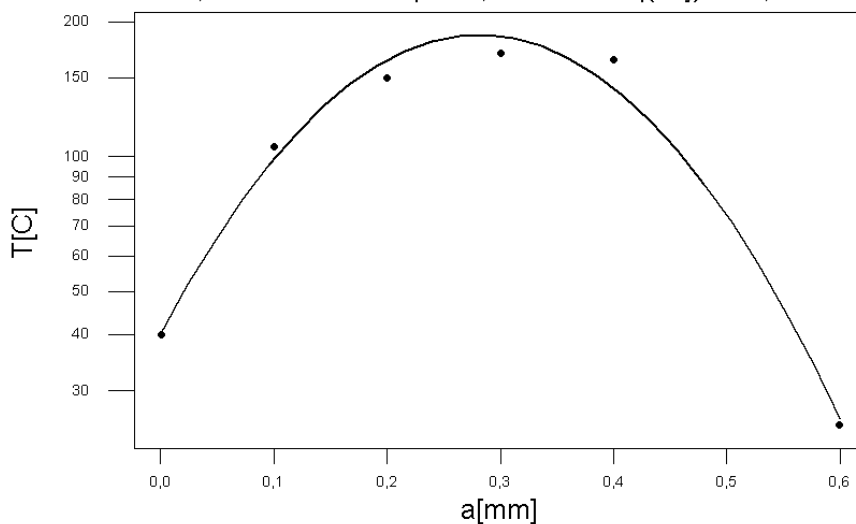


Fig. 98. Variația temperaturii în dielectric în timpul procesului de sudare

Ecuția dependenței gradientului termic de grosimea materialului este dată de formula 49.

$$\log T = 1,60171 + 4,75968 * a - 8,45538 * a^2 \quad (49)$$

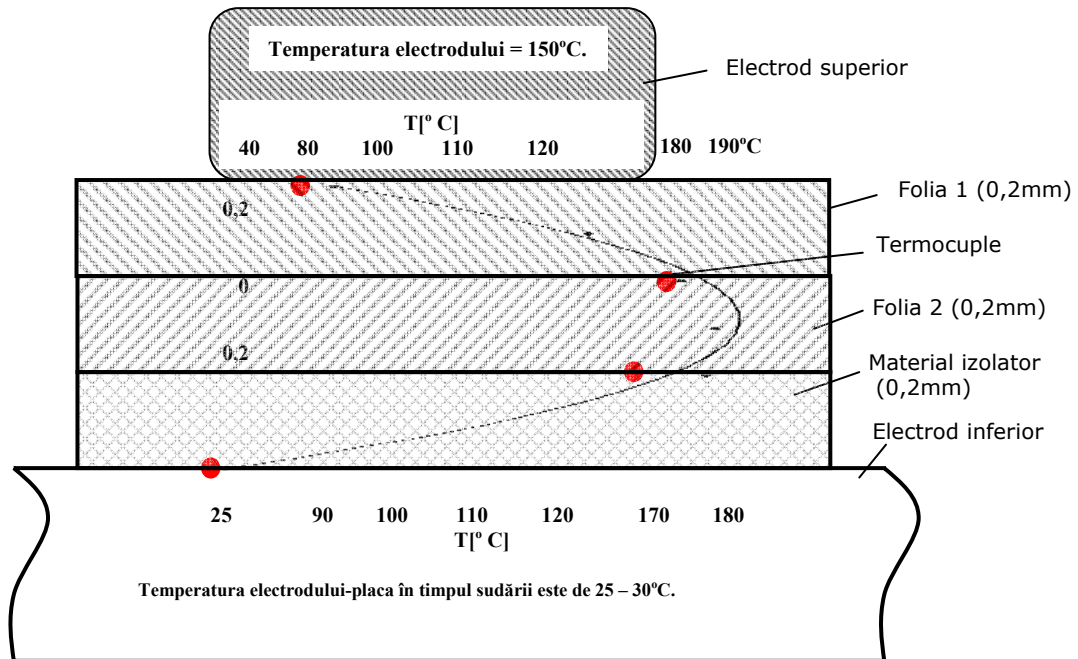


Fig. 99. Reprezentarea gradientului de temperatură în ansamblul sudat

În figura 99 raportul grosimilor materialului PVC și materialului izolant este de 1, temperatura maximă aflându-se în folia de jos (folia 2).

Temperatura electrodului-placa protejată cu folia de material izolator în timpul sudării este de 25 – 30°C, iar temperatura electrodului superior este de 150°C.

Concluzionăm din figurile 97 și 99 că odată cu creșterea raportului dintre grosimea foliei PVC și folia materialului care izolează placa electrod temperatura maximă în material se deplasează către placa electrod.

Efectul de încălzire în cazul sudării asimetrice CIF arată o extindere în afara zonei de contact a electrozilor odată cu reducerea grosimii foliilor, care duce la o încălzire a electrodului superior.

4.5. Concluzii parțiale

Sudarea CIF simetrică este procedeul favorit în practică datorită avantajelor de dispunere simetrică a liniilor de câmp, având cea mai mare eficiență energetică la sudarea foliilor de PVC sau alți polimeri.

La sudarea asimetrică, utilizând placa de bază pe post de contaelectrod, la scurt timp după aplicarea CIF, simetria câmpului generat se pierde astfel încât este necesară folosirea unui strat de material izolator care menține temperatura maximă la nivelul suprafeței de contact dintre folii, dar nu poate restabili complet simetria gradientului de temperatură.

Din acest motiv rezistența la rupere a cusăturii sudate obținută prin CIF este superioară în cazul sudării simetrice în comparație cu sudarea asimetrică.

Procesul de sudare al foliilor cu grosime mică (sub 0,2 mm) necesită o energie și o intensitate a câmpului mai ridicată, iar rezultatele obținute au o reproductibilitate scăzută.

Sudarea combinată, în special cu tăierea conturului reduce costurile de producție, dar trebuie aplicată atent respectând prescripțiile stabilite empiric și anume, electrozii de sudare și marginile tăietoare trebuie să fie unul lângă celălalt sau la o distanță care de obicei este sub 30% din lățimea electrodului.

La sudarea CIF variația gradientului de temperatură este dependentă de grosimea foliilor și de varianta de sudare.

5. Validarea procesului de sudare

5.1. Echipamentul folosit în experiment

5.1.1. Descrierea mașinii de sudare

În fig. 100 este prezentată vederea generală a mașinii de sudare CIF Herfurt Trumpf 15 000 folosită în experiment.

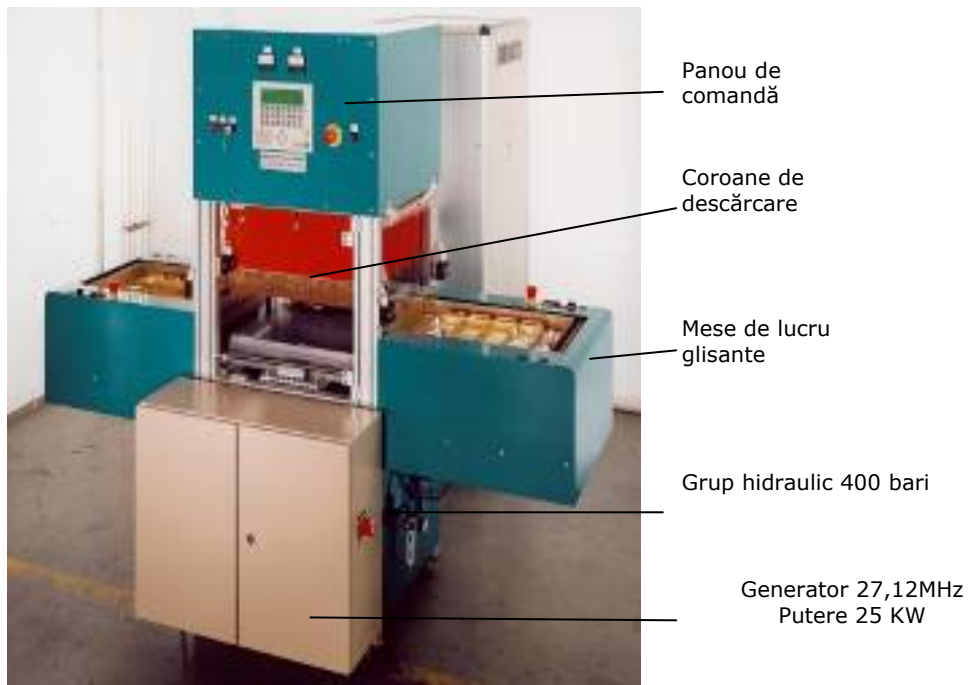


Fig. 100. Vederea de ansamblu a mașinii de sudare folosită în experiment

Schema electro-hidraulică a mașinii de sudare este prezentată în fig.101[6]. Mașina conține o bobină de inducție care este alimentată prin curenți electrici de radio-frecvență. Ea generează un câmp electromagnetic de înaltă frecvență care acționează ca un condensator electric (matrița de sudare ca armături și materialul ce urmează să fie sudat ca dielectric).

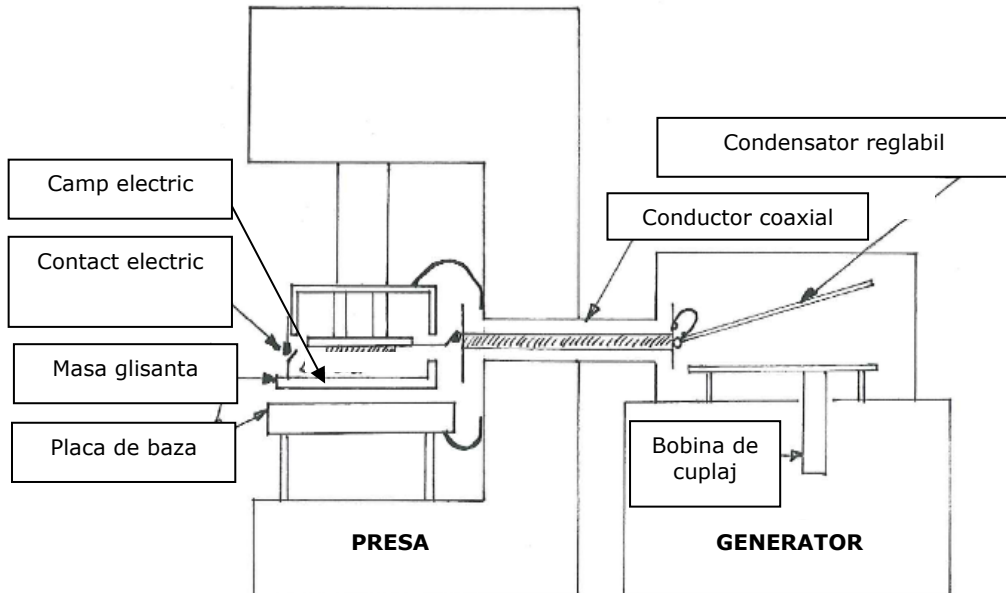


Fig. 101. Schema mașinii de sudare folosită în experiment

În figura 102 sunt descrise principalele componente electrice ale mașinii de sudare CIF.

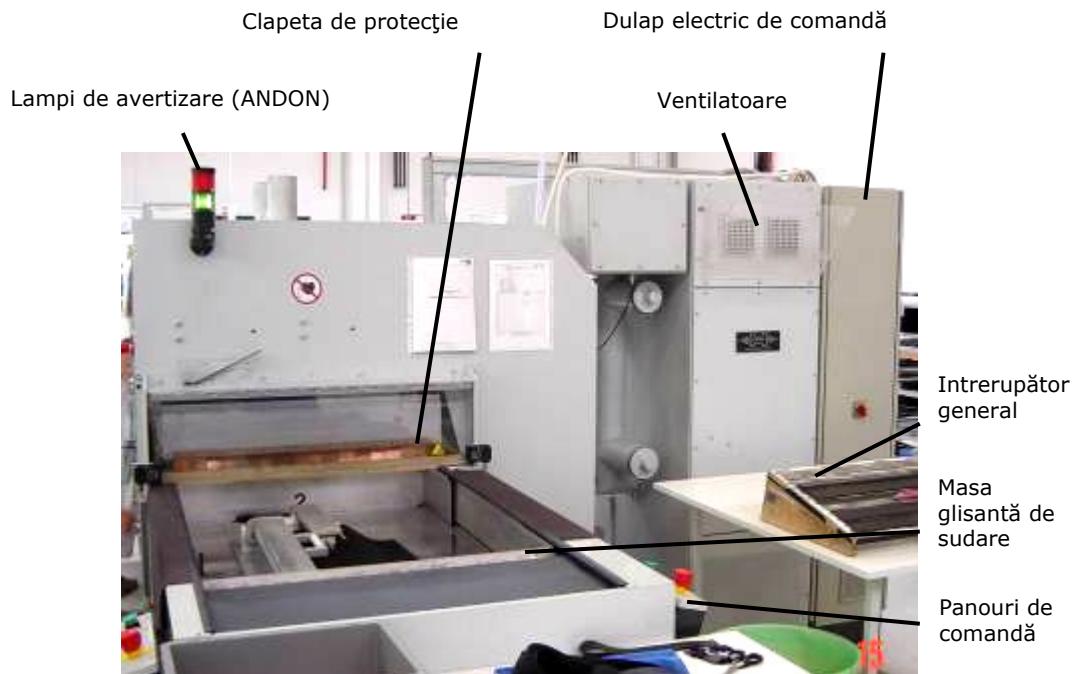


Fig. 102. Componentele electrice ale mașinii de sudare CIF din vedere laterală

Mașina de sudare este pusă în funcțiune comutând pe poziția „ON/ PORNIT” întrerupătorul general. Lampa de avertizare ANDON este un sistem de management vizual care indică starea de funcționare a mașinii.

În cazul în care matricea de sudare rămâne deschisă pe masa glisantă de sudare, la contactul cu clapeta de protecție, mașina de sudare resetează ciclul de sudare.

Masa glisantă de sudare este comandată de la panourile de comandă, care sunt dispuse la fiecare post de lucru.

Din programul mașinii se poate stabili posibilitatea de a lucra:

- cu două matrice de sudare pe masă și în acest caz ambele panouri de comandă sunt active,
- cu o matrice de sudare și în acest caz setăm doar un panou de comandă activ.

În figura 103 este descris modul de dispunere al butoanelor de comandă la fiecare masă glisantă de lucru.

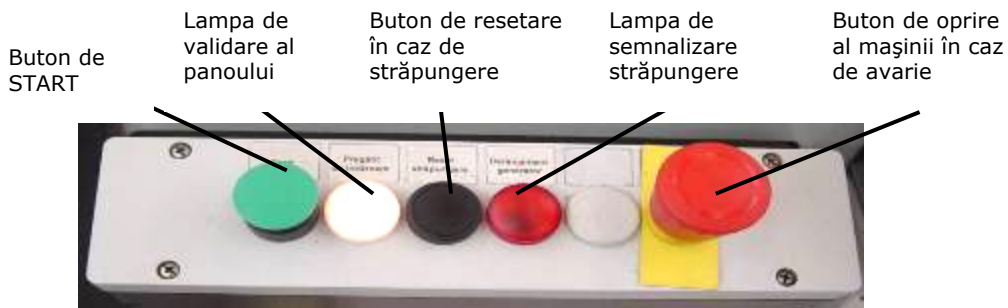


Fig. 103. Modul de dispunere al butoanelor pe panoul de comanda

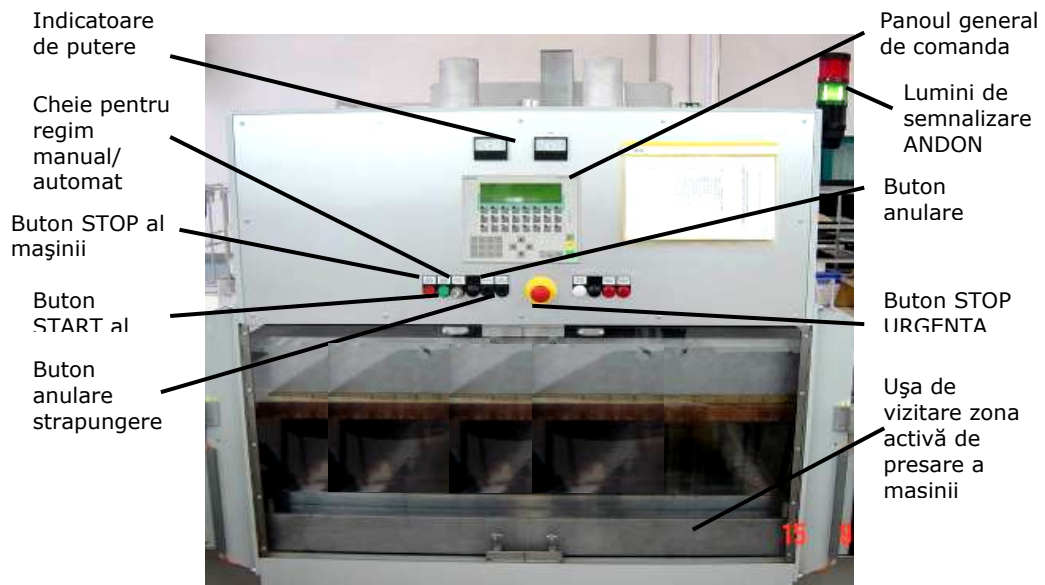


Fig. 104. Componentele mașinii de sudare CIF din vedere frontală

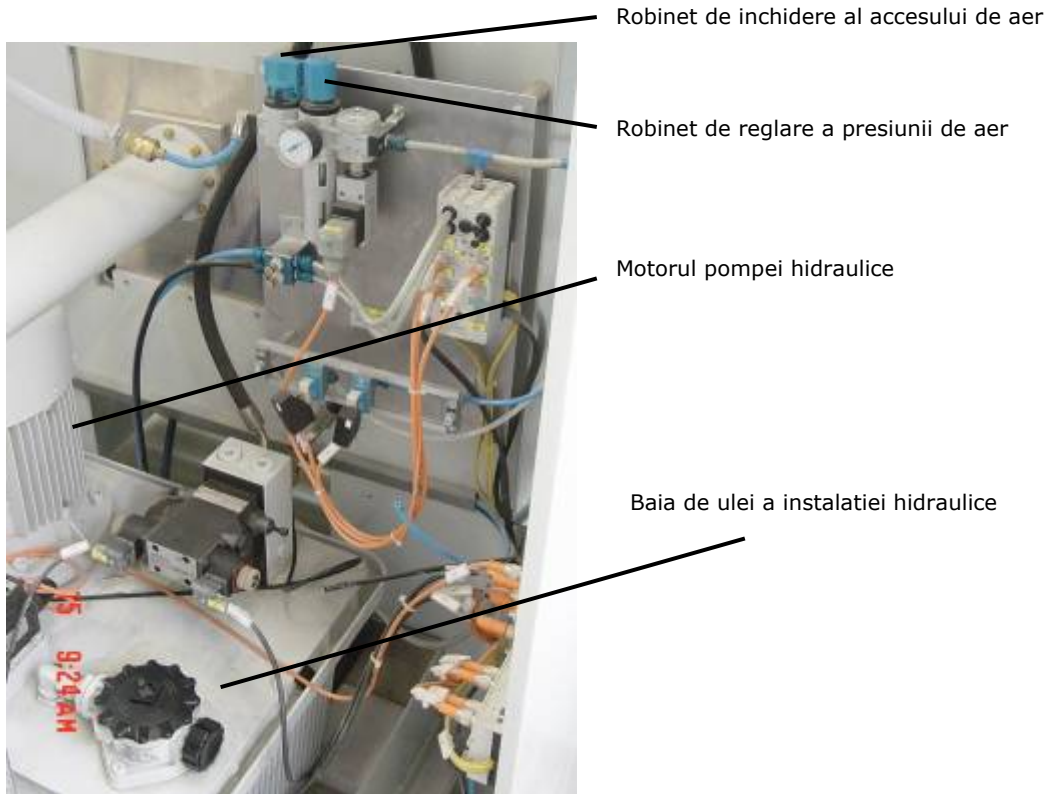


Fig. 105. Componentele pneumatice și hidraulice ale mașinii



Fig. 106. Dispozitiv de monitorizare al grupului hidraulic

Mașina de sudare CIF are parametri descriși în tabelul 12.

Tabelul 12. Parametrii mașinii de sudare CIF

Nr. Crt.	Descrierea parametrilor mașinii de sudare CIF	UM	Valoare
1	Furnizor	-	Schirmacher
2	Model mașină	-	Trumpf 15000
3	Lățimea mașinii	[m]	2,4
4	Adâncimea mașinii (lungimea mașinii)	[m]	5,9
5	Înălțimea mașinii	[m]	2,3
6	Greutate	[t]	3,6
7	Tensiune	[V]	400
8	Frecvență	[Hz]	50
9	Putere de intrare	[kVA]	30
10	Numărul de mese glisante	[buc]	2
11	Numar maxim operatori	-	4
12	Puterea CIF maximă	[kW]	15
13	Forța maximă a presei	[kN]	200
14	Etape programabile sudare	-	5
15	Lățimea mesei glisante	[mm]	1400
16	Adâncimea mesei glisante	[mm]	820
17	Lățimea maximă a matriței de sudare	[mm]	1350
18	Lungimea maximă a matriței de sudare	[mm]	800
19	Înălțimea maximă a matriței de sudare	[mm]	130
20	Înălțimea minimă a matriței de sudare	[mm]	75

Pentru o bună funcționare mașina de sudare CIF este inclusă într- un program de întreținere preventivă.

5.1.2. Matrița de sudare

Matrița de sudare CIF este prezentată în figura 107.

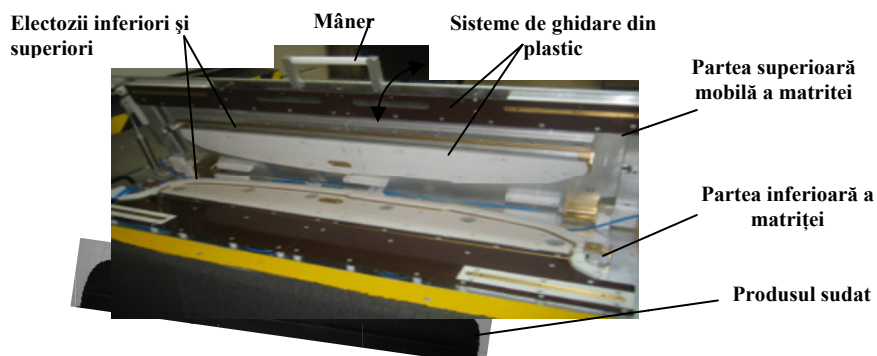


Fig. 107. Vederea de ansamblu a matriței de sudare folosită în experiment

Electrozii mășurați au lățimea (B) de 0,4 cm și o lungime totală (L) de 150 cm. Pentru o funcționare optimă trebuie incluse într-un program de întreținere preventivă pentru a nu afecta calitatea îmbinărilor sudate.

5.1.3. Dispozitivul de testare a forței de rupere

Ca metodă de testare pentru a stabili conformitatea sudării CIF a foliilor din PVC vom considera PEUGEOT S.A. test method D41 1033 care are ca cerință impusă o valoare minimă a forței de rupere de 35N/50 mm. Pentru testare a fost proiectat dispozitivul de testare prezentat în figura 108.

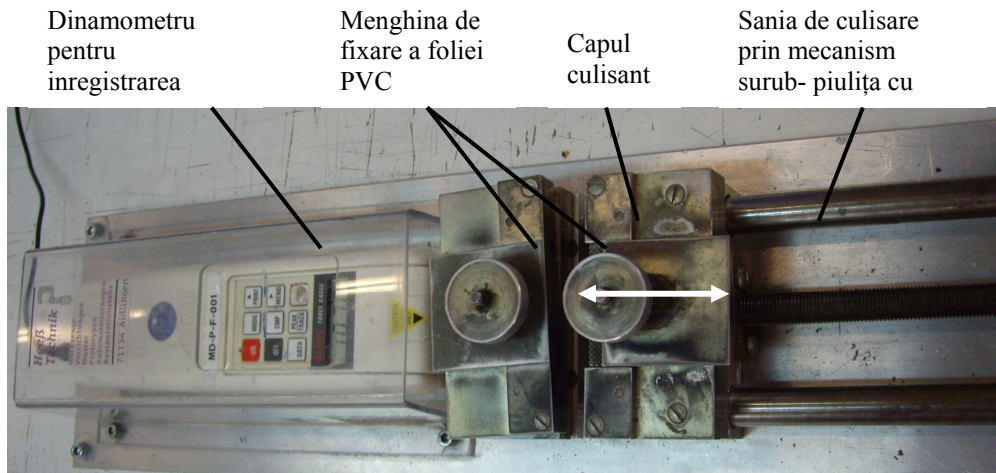


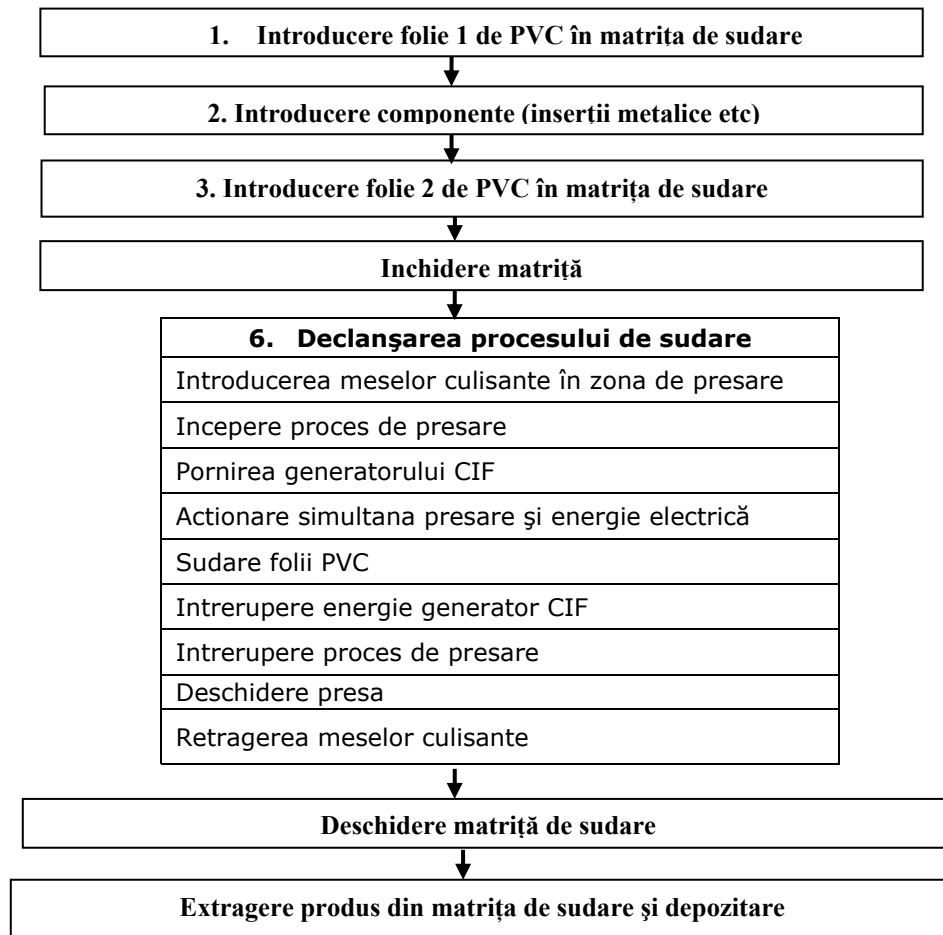
Fig. 108. Dispozitivul de testare

Dispozitivul de măsurare al forței de rupere [6] a fost construit astfel încât să respecte cerințele metodei de testare.

Acesta se compune dintr-o parte fixă în care se fixează eșantionul de testat prin intermediul unui bolț și o sanie mobilă cu părți de prindere ce culisează prin intermediul unui mecanism șurub – piuliță [6].

5.2. Organizarea locului de muncă

Pentru organizarea locului de muncă trebuie trasat fluxul materialelor și succesiunea pașilor de proces. În figura 109 este redat fluxul tehnologic al sudării CIF.



În figura 110 este reprezentată dispunerea optimă a mașinii de sudare și a fluxului de materiale care intră și ies din proces.

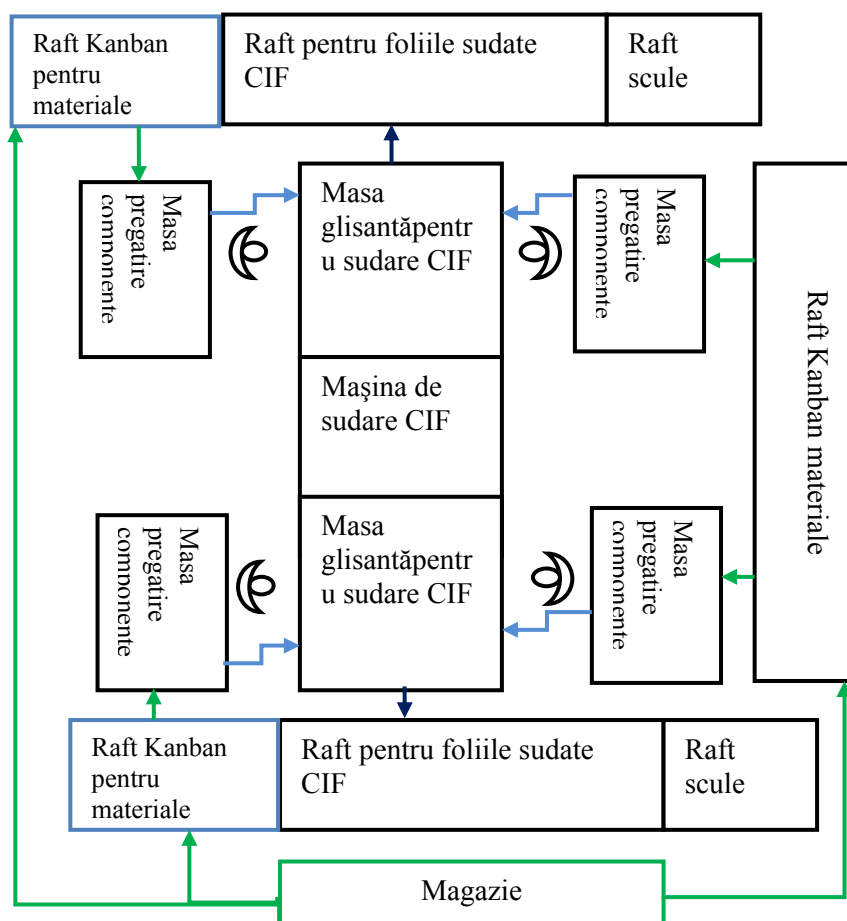


Fig. 110. Dispunerea echipamentului și operatorilor

La stabilirea dispunerii echipamentului, cărucioarelor cu materiale care intră în proces și care ies din proces s-a ținut cont de regulile de producție „lean”, pe baza cărora se obține maxim de productivitate cu resurse minime.

Regulile „lean manufacturing” au la baza eliminarea pierderilor din producție care sunt clasificate după Taichi Ohno, astfel:

- 1. Supraproducția:** producerea în plus față de necesarul procesului din aval clientului e cea mai gravă formă de risipă, pentru că determină în mod direct celelalte 6 tipuri de pierderi
- 2. Așteptarea:** operatorii își întrerup lucrul datorită defectării mașinilor, echipamentelor sau întârzierii materialelor / desenelor / pieselor necesare pentru prelucrare.
- 3. Transport:** declanșarea pieselor și produselor în mod inutil, ca de exemplu de la linia de procesare la depozit și de aici iar în secție - la procesul următor de prelucrare, când mai rațional ar fi procesul următor să fie amplasat în imediata apropiere a primului post de prelucrare.
- 4. Procesare:** realizarea unor operații necesare sau incorecte, datorită echipamentelor de slabă calitate sau a neatenției.

5. Stocuri: deținerea unui stoc mai mare decât minimul necesar pentru funcționarea sistemului de producție „lean manufacturing” de tip împins (pull).

6. Mișcare: operatorii fac mișcări ce nu sunt necesare - precum căutarea pieselor, echipamentelor, documentelor, mutarea repetată a sculelor etc.

7. Corecții: inspecție, re prelucrare, rebuturi.

De asemenea la designul liniei de producție s-a ținut cont de următoarele reguli de ergonomie:

- Poziția de lucru stând pe scaun este prezentată în fig. 111.

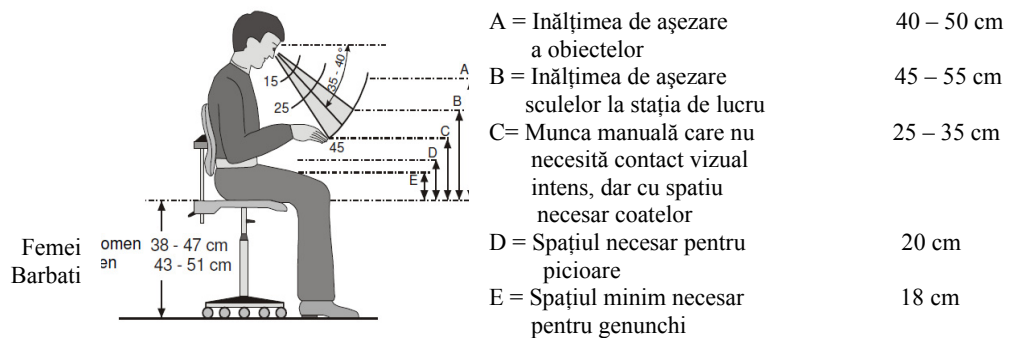


Figura 111. Dimensiunile poziției de lucru stând pe scaun

- Vederea de sus a stației de lucru cu distanțele recomandate de prindere a obiectelor este reprezentată în figura 112.

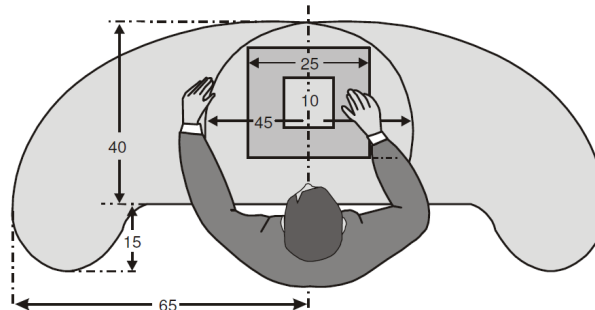
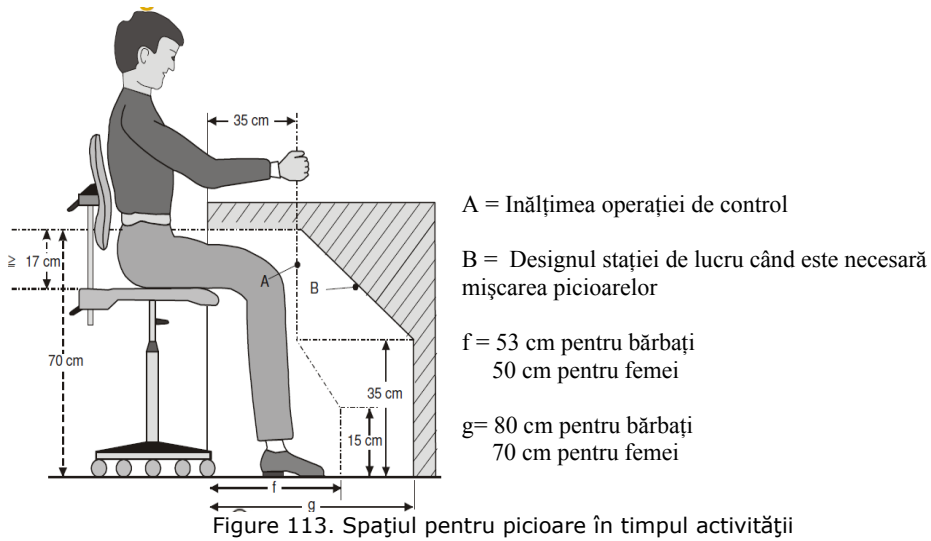
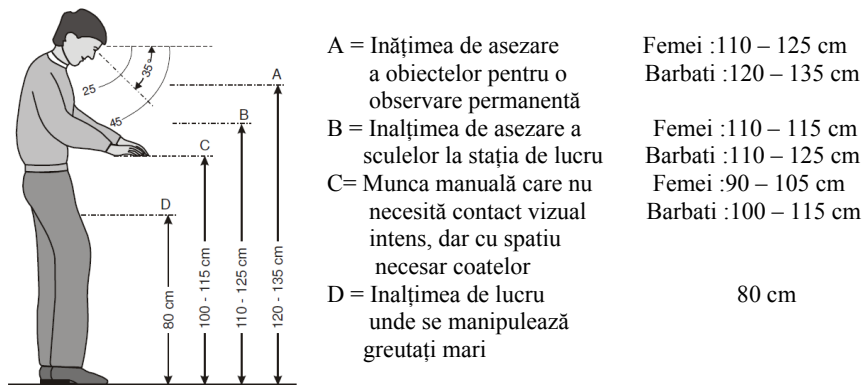


Figura 112. Vederea de sus a stației de lucru cu distanțele recomandate pentru prinderea obiectelor

- Spațiul pentru picioare în timpul muncii este redat în figura 113.



- Nivelul de lucru pentru stațiile de lucru în picioare este redat în fig. 114.



- Poziția corectă de lucru este redată în figura 115.

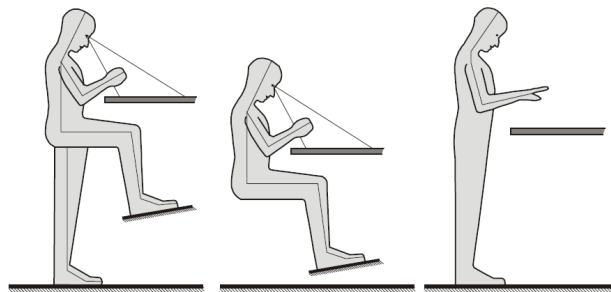


Figura 115. Poziția corectă de lucru

Factorii care stau la baza ergonomiei sunt:

- Forța exercitată,
- Poziția corpului,
- Frecvența acțiunii.

Abordarea ergonomică trebuie să fie parte a programului de siguranță și securitatea muncii, care trebuie să fie făcut continuu în conformitate cu ciclul prezentat în imaginea 116.

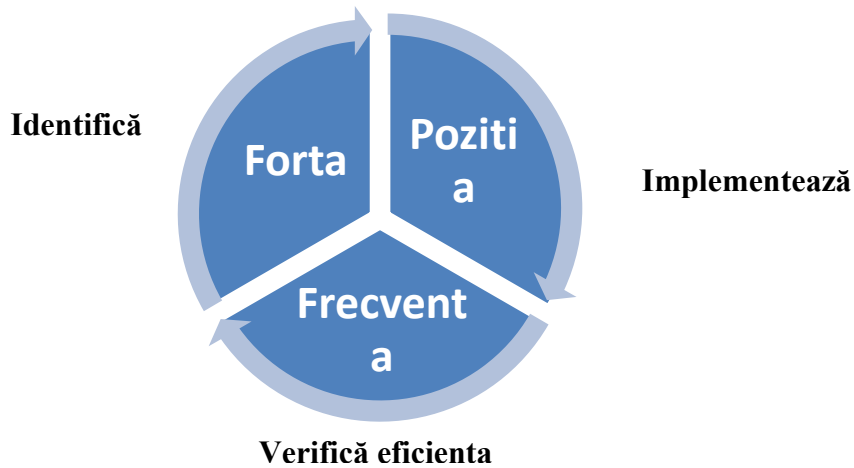


Figure 116. Ciclul continuu de ergonomie

5.3. Utilizarea statisticii la validarea procesului de sudare CIF

Pentru a determina gradul de uniformitate al unei anumite caracteristici dintr-un proces dat avem nevoie de următoarele informații:

- Prescripțiile din specificație, conform așteptărilor clientului
- Măsura centrării (valoarea țintă)
- Măsura întregii variații constatate în proces, într-o perioadă de timp dată
- Măsura variabilității naturale sau inerente a procesului ("gradul instantaneu de reproductibilitate" al procesului)
- Relevarea naturii cauzelor tuturor discrepanțelor dintre măsura centrării și măsura întregii variații constatate în proces, într-o perioada de timp dată și o estimare a costurilor necesare pentru eliminarea acestor cauze.

Elementele care se evaluează în studiile de capabilitate sunt prezentate în tabelul 13.

Tabelul 13. Elemente de capabilitate

Centrarea	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{j=1}^k \bar{X}_j}{k}$; $\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{X}_j}{n}$
Dispersia	6σ	$6\frac{\bar{R}}{d_2}$; $6\frac{\bar{s}}{c_4}$; 6σ
Indicii de capabilitate	C_p și C_{pk} P_p și P_{pk}	$6_c = \frac{6\sigma}{d_2}$; $6_p = s$ (tot eșantionul)

Variația caracteristicii sub influența fluctuațiilor proceselor formează câmpul de împrăștiere (capabilitatea) [5].

Limitele în interiorul cărora este permisă variația caracteristicii constituie limitele de toleranță, date prin specificații (limite inferioare și limite superioare).

Semisuma limitelor de toleranță poartă denumirea de centrul câmpului de toleranță.

Reglarea mașinii este caracterizată prin poziția câmpului de împrăștiere a valorii caracteristicii, exprimată prin centrul de grupare al distribuției.

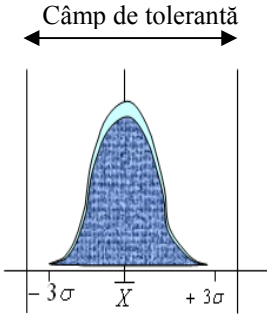
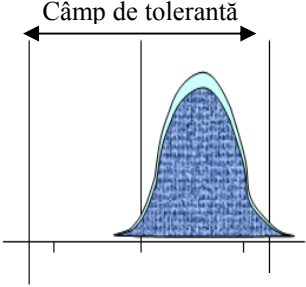
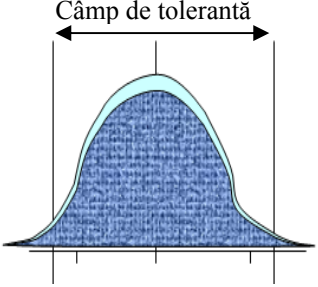
Precizia mașinii este caracterizată prin mărimea câmpului de împrăștiere. Ea este considerată corespunzătoare când mărimea centrului de împrăștiere nu depășește câmpul de toleranță.

Stabil ca reglaj este procesul la care valoarea parametrului centrare (\bar{X} , X_{med} , X_{max} , X_{min}) este stabil în timp.

Stabil ca precizie este procesul la care valoarea parametrului de împrăștiere (σ , R , $R\text{-bar}$) rămâne neschimbat într-un interval de timp.

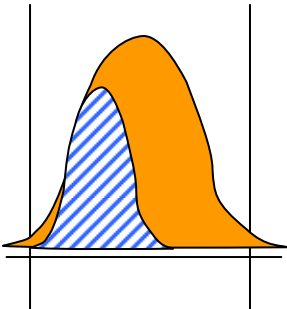
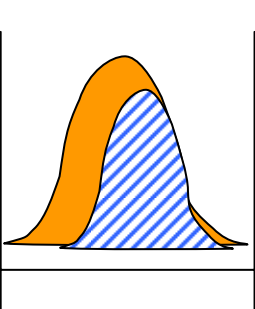
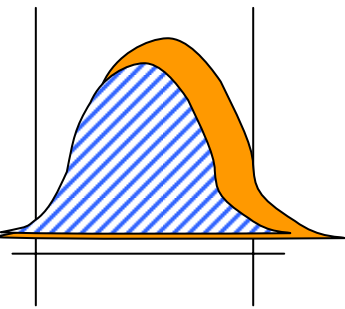
Situațiile tipice pentru repartiții în procese stabile determinate de poziția și distribuția câmpului de împrăștiere constantă în timp sunt redată în tabelul 14.

Tabelul 14. Mărimile repartițiilor în procese stabile

Centrare bună, capacitate adecvată.	Centrare incorectă, capacitate adecvată.	Centrare corectă, capacitate inadecvată.
		
Nu e necesară nici o acțiune.	Îmbunătățirea centrării prin modificarea țintei procesului.	Modificarea procesului sau revizuirea specificației.

Situațiile tipice pentru repartiții în procese instabile: centrarea și distribuția câmpului de împrăștiere sunt variabile în timp sunt arătate în tabelul 15.

Tabelul 15. Mărimile repartițiilor în procesele instabile

Imprăștiere în afara limitelor specificate, capacitate bună.	Imprăștiere în limitele specificate, capacitate f. bună .	Imprăștiere în afara limitelor specificate, capacitate inadecvată.
		
Găsirea cauzei instabilității și eliminarea ei dacă este economic.	Nu este necesară nici o acțiune.	Schimbarea procesului sau revizuirea specificațiilor sau găsirea cauzelor și eliminarea lor dacă este economic

5.4 Incercări experimentale

Proprietățile anumitor materiale termoplastice care fac posibilă sudarea cu CIF evidențiază avantajele particulare datorate efectului termomecanic scurt și unei rezistențe mari de rupere a cusăturii sudate.

Condiția necesară pentru topirea unui material prin tehnologia de sudare CIF este să se folosească materiale termoplastice cu caracteristici polare (bipolare). Materialele trebuie să aibă un factor de pierdere dielectric $\tan \delta > 0,1$.

Prin introducerea în câmp electric a unui material dielectric, o parte din energia câmpului se disipă în substanță, în majoritatea cazurilor transformându-se în căldură. Energia disipată în unitatea de timp în material, sub influența și pe seama câmpului electric, constituie pierderile în dielectric (materialul sudat).

Materialele cu proprietăți de sudabilitate prin CIF, respectiv materialele termoplastice sunt:

- Policlorura de vinil (PVC) moale și dură,
- Poliamidele (PA),
- Poliesterul (PES),
- Poliuretanul termoplastic (TPU),
- Câteva tipuri de materiale compozite (TPO).

O matriță de sudare CIF poate folosi maxim 2 straturi de material cu grosimi între 0,2- 0,5 mm.

Mașina de sudare CIF Herfurt Trumpf 15 000 cu mese de sudare glisante și matrița de sudare au fost prezentate în cap 5.1.

5.4.1. Rezultate și discuții

Ca metodă de testare pentru a stabili aptitudinea la sudare a materialelor se va utiliza metoda de testare *PEUGEOT S.A. test method D41 1033* care are ca cerință impusă o valoare minimă a forței de rupere de 35N/50 mm, conform schiței din fig. 117.

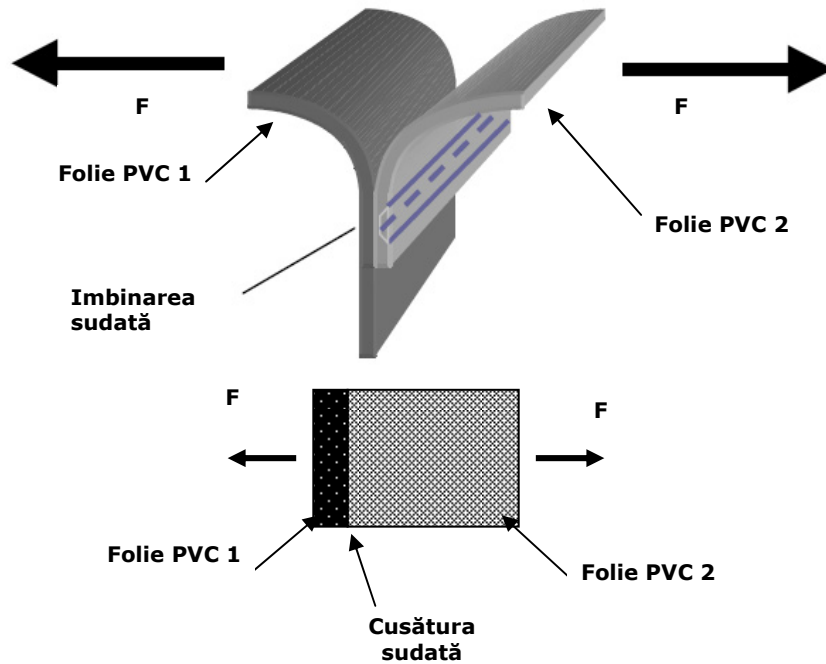


Fig. 117. Schema metodei de testare

Modul de utilizare al dispozitivului de măsurare a forței de rupere este arătat în fig. 118.

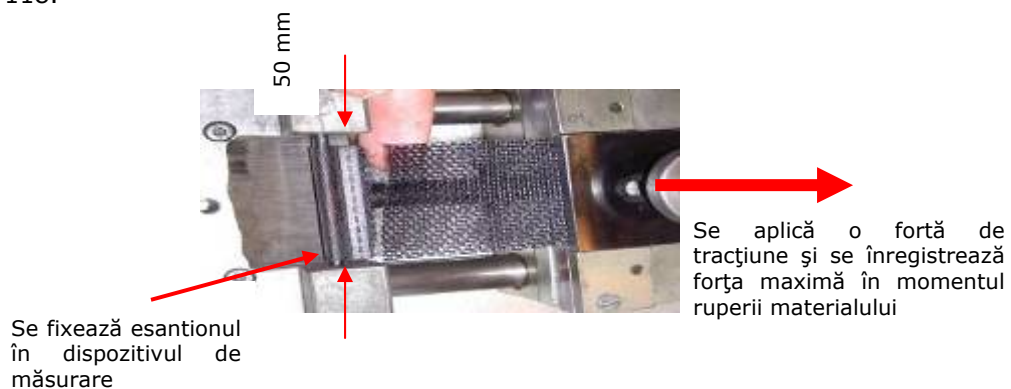


Fig. 118. Metodica testării la rupere

Pentru studiul aptitudinii la sudare a polimerilor s-au folosit datele obținute în timpul validării la sudare CIF a trei produse distincte:

- **PVC cu insertie textila 0,4 +/- 0,1 mm** (structura conform fig. 32)
Parametrii de sudare CIF pentru sudarea materialului PVC cu inserție textilă 0,4 +/- 0,1 mm sunt prezentați în tabelul 16.

Tabelul 16. Parametrii de sudare pentru PVC 0,4 +/- 0,1 mm

Parametrii de sudare	Valoarea parametrilor
Curentul de sudare [mA]	5,0
Timp sudare [s]	2,2
Presiunea de sudare [bar]	5,0
Timpul de răcire [s]	2,0
Presiunea de răcire [bar]	5,0

După sudare piesele trebuie să aibe pașii de sudare vizibili (fig. 119) și forța de rupere să fie minim 35 N/ 50 mm.



Fig. 119. Aspectul macroscopic al piesei sudate

Utilizând metoda de testare descrisă mai sus se vor măsura și înregistra forțele de rupere pe un număr de 75 eșantioane, prelevate din 25 piese sudate, trei zone din cusătura sudată, conform figurii 120.

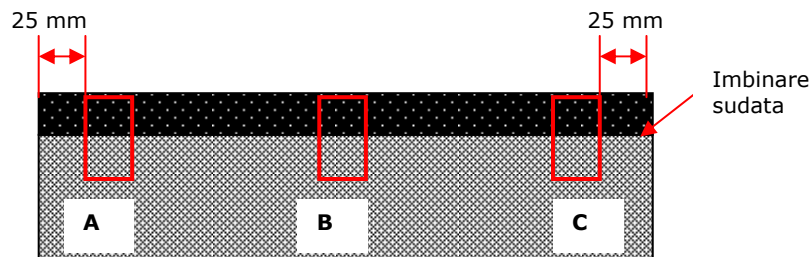


Fig. 120. Schita de prelevare a esantioanelor

În urma încercărilor distructive repartitia zonei de material topit la nivel macroscopic trebuie să fie constantă (figura 121).



Fig. 121. Repartiția zonei de material topit

Valorile forței de rupere sunt redade în tabelul 17.

Tabelul 17. Inregistrările forței de rupere a îmbinării sudate

Piesa sudată	Zona	Forța de rupere [N]		
		A	B	C
1		70	92	88
2		68	70	81
3		79	88	78
4		91	89	93
5		71	91	89
6		70	72	83
7		80	94	79
8		93	91	95
9		78	94	79
10		90	90	93
11		75	91	90
12		73	72	83
13		80	94	79
14		93	91	95
15		78	94	79
16		90	90	93
17		75	91	90
18		71	91	89
19		70	72	83
20		78	94	79
21		90	90	93
22		70	92	88
23		68	70	81
24		72	93	89
25		69	69	81

Utilizând software MINITAB pentru analiza statistică a proceselor, la prelucrarea datelor din tabelul 17 se obțin rezultatele din figura 122.

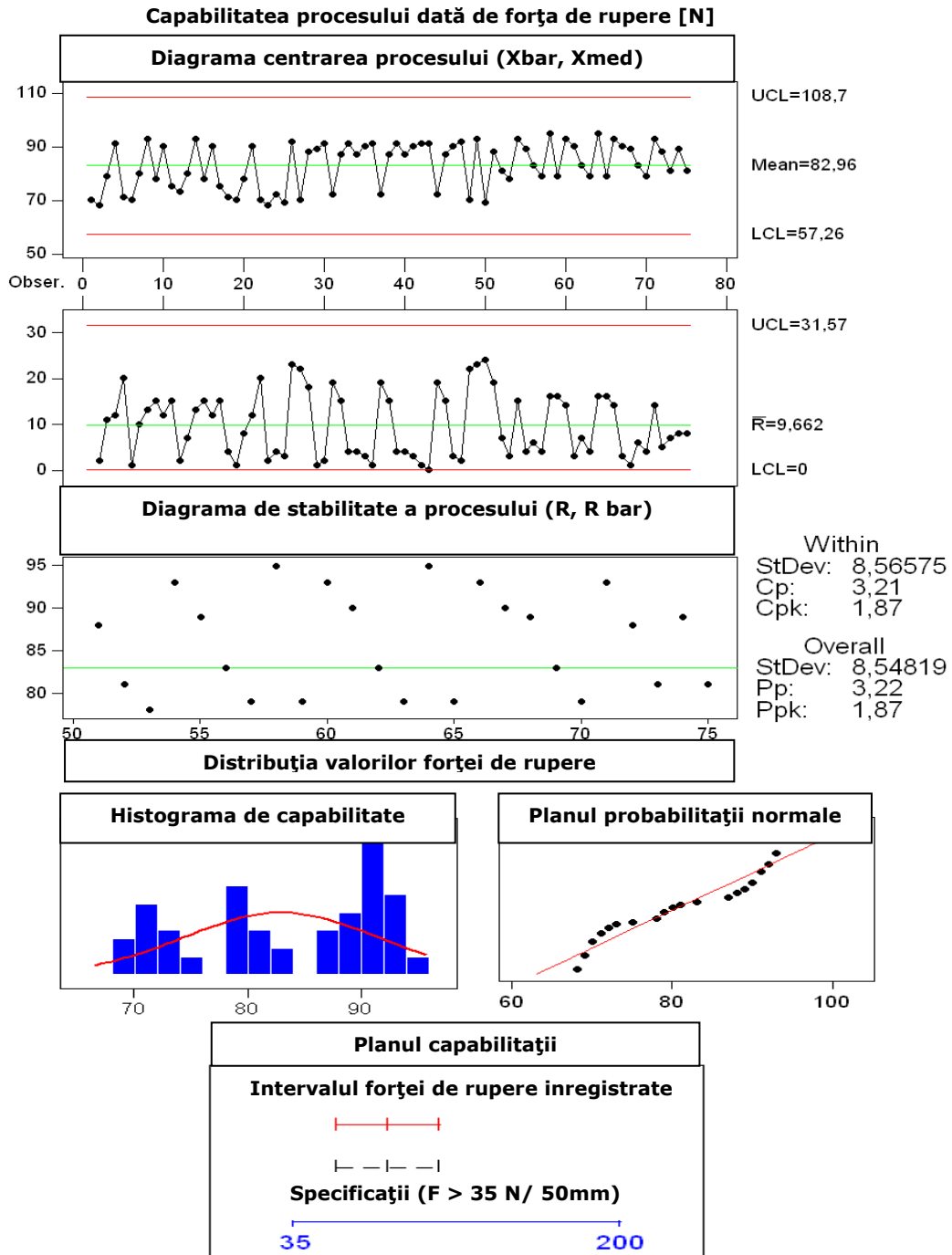


Fig. 122. Capabilitatea procesului de sudare a foliilor PVC 0,4 +/- 0,1

Din histograma de capabilitate observăm o distribuție mare a forței de rupere în intervalul 70- 90 N, ceea ce ne duce la concluzia că alinierea electrozilor de-a lungul matriței de sudat (fig.95) influențează presiunea exercitată de aceștia asupra materialului PVC în timpul sudării și asupra caracteristicilor mecanice ale cusăturii sudate, în cazul nostru a forței de rupere.

Cu cât matrița de sudare este mai mare ca suprafață, cu atât mai mare este influența asupra caracteristicilor mecanice ale cusăturii sudate.

Din diagrama de centrare a procesului (\bar{X} , \bar{X}_{med}) se poate vedea ca procesul de sudare CIF este stabil ca reglaj, deci cu parametrii de sudare stabiliți pot fi îndeplinite cerințele impuse. Procesul este stabil ca precizie conform diagramei de stabilitate a procesului (R , R_{bar}).

Indicii de capabilitate sunt în conformitate cu limitele 6σ ($C_p > 1,67$; $C_{pk} > 1,33$).

$C_p = 3,21$

$C_{pk} = 1,94$

- **PVC cu insertie textila 0,6 +/- 0,1 mm** (structura conform fig. 32)

Parametrii de sudare CIF pentru sudarea foliilor din material PVC cu insertje textilă 0,6 +/- 0,1 mm sunt redați în tabelul 18.

Tabelul 18. Parametrii de sudare CIF pentru sudarea foliilor PVC 0,6 +/- 0,1 mm

Parametrii de sudare	Valoarea parametrilor	
	Pas de sudare 1	Pas de sudare 2
Curentul de sudare [mA]	2,5	4,0
Timp sudare [s]	2,0	5,0
Presiunea de sudare [bar]	100	120
Timpul de răcire [s]	6,0	6,0
Presiunea de răcire [bar]	140	140

Dupa sudare, piesele trebuie să aibe pașii de sudare vizibili (fig. 123) și forța de rupere sa fie minim 35N/50mm.



Fig. 123. Aspectul macroscopic al piesei sudate

Utilizând metoda de testare descrisă mai sus, s-a măsurat și înregistrat forța de rupere pe un numar de 125 esantioane, prelevate din 25 piese sudate, 5 zone din cusătura sudată (fig. 125). In urma încercarilor distructive repartiția zonei de material topit la nivel microscopic trebuie sa fie constantă (fig.124).

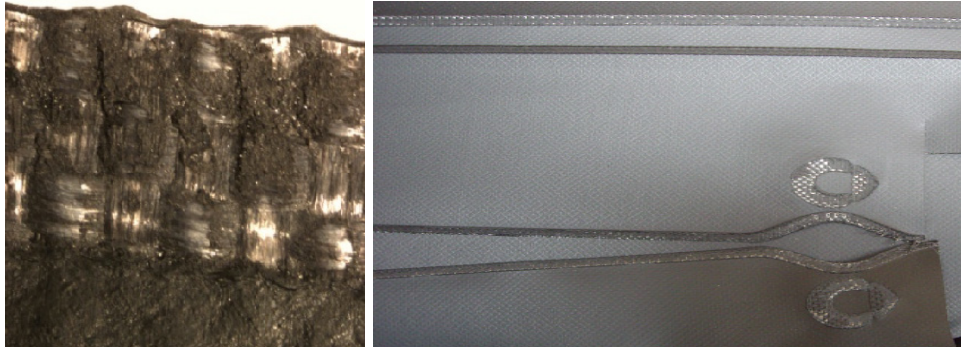


Fig. 124. Repartiția zonei de material topit, 50X

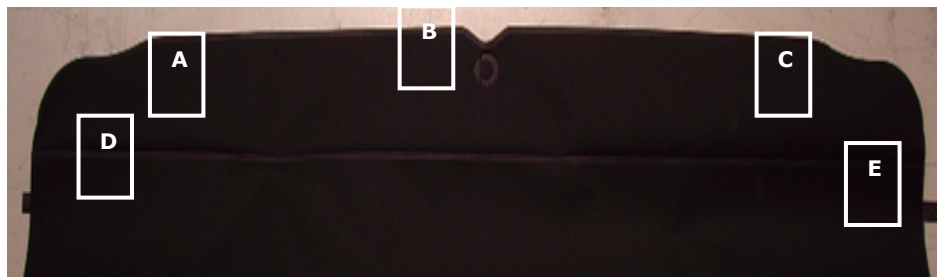


Fig. 125. Repartiția eșantioanelor în piesa sudată

Valorile forței de rupere sunt date în tabelul 19.
Utilizând programul pentru statistica proceselor MINITAB, folosind datele din tabelul 19 obținem graficele din fig. 116.

Tabelul 19. Inregistrările forței de rupere ale îmbinării sudate

Piesa sudată	Zona	Forța de rupere [N]				
		A	B	C	D	E
1		72	78	61	90	67
2		79	82	77	84	65
3		73	89	86	89	65
4		75	80	73	82	84
5		81	83	76	72	68
6		74	81	75	83	85
7		72	88	89	89	69
8		76	81	74	81	86
9		70	76	69	90	76
10		79	82	77	84	65
11		76	81	74	81	86
12		81	83	76	72	68
13		74	81	75	83	85
14		73	89	86	89	65
15		73	89	86	89	65
16		76	81	74	81	86
17		72	88	89	89	69
18		70	76	69	90	76
19		72	88	89	89	69
20		75	80	73	82	84
21		79	82	77	84	65
22		70	76	69	90	76
23		72	88	89	89	69
24		70	76	69	90	76
25		76	81	74	81	86

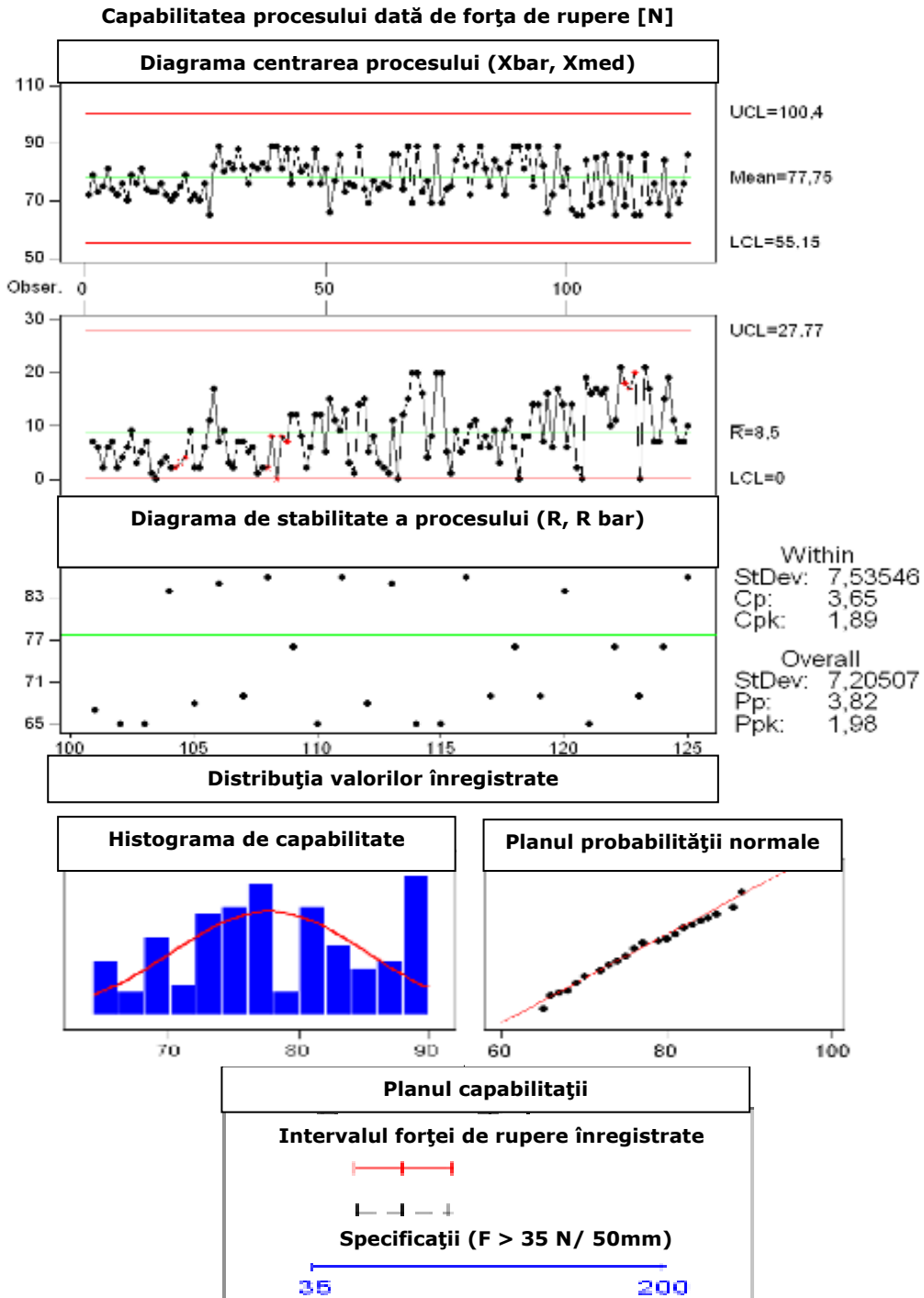


Fig. 126. Capabilitatea procesului de sudare C1F a foliilor PVC de 0,6 +/- 0,1 mm

Din histograma de capabilitate observăm o distribuție mai bună a forței de rupere în intervalul 66 - 90 N decât în cazul precedent, ceea ce ne duce la concluzia că alinierea electrozilor de-a lungul matriței de sudat prezentată în fig.107 care influențează presiunea exercitată de aceștia asupra materialului PVC în timpul sudării este mai stabilă cu creșterea grosimii materialului. Din diagrama de centrare a procesului (\bar{X} , X_{med}) se poate vedea ca procesul de sudare CIF este stabil ca reglaj, deci cu parametrii de sudare stabiliți pot fi îndeplinite cerințele impuse. Procesul este stabil ca precizie conform diagramei de stabilitate a procesului (R , R_{bar}). Indicii de capabilitate sunt în conformitate cu limitele 6σ : $C_p = 3,65 > 1,67$
 $C_{pk} = 1,89 > 1,33$

- **Malivat 0,6 +/- 0,1 mm** (structura conform fig. 33)

Parametrii de sudare CIF pentru sudarea foliilor din material Malivat cu inserție textilă 0,6 +/- 0,1 mm, sunt redați în tab.20.

Tabelul 20. Parametrii de sudare CIF pentru foliile MALIVAT 0,6 +/- 0,1 mm

Parametrii de sudare	Valoarea parametrilor		
	Pas de sudare 1	Pas de sudare 2	Pas de sudare 3
Curentul de sudare [mA]	2.5	4.0	5.0
Timp sudare [s]	1.0	2.0	3.0
Presiunea de sudare [bar]	100	110	120
Timpul de răcire [s]	6.0	6.0	6.0
Presiunea de răcire [bar]	140	140	140

Dupa sudare piesele sudate trebuie sa aibe pașii de sudare vizibili (fig. 127) și forța de rupere sa fie minim 35N/50mm.

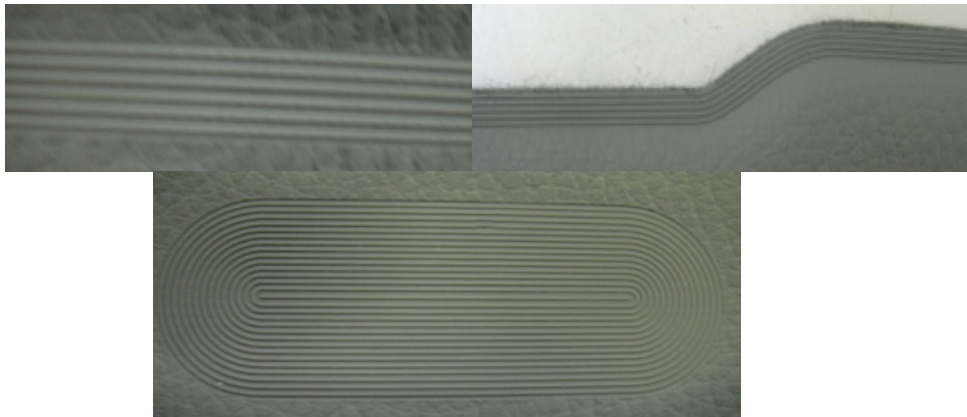


Fig. 127. Aspectul macroscopic al piesei sudate

Materialele ce urmează a fi sudate sunt poziționate între electrozi ca în fig.128.

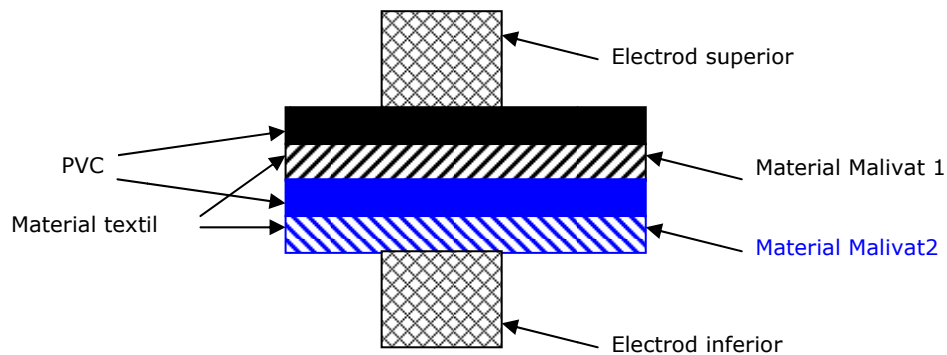


Fig. 128. Dispunerea materialelor MALIVAT în timpul sudării cu CIF

Utilizând metoda de testare descrisă mai sus, s-a măsurat și înregistrat forța de rupere pe un număr de 75 esantioane, prelevate din 25 piese sudate, 3 zone din cusatura sudată. În urma încercărilor distructive repartitia zonei de material topit la nivel macroscopic trebuie să fie constantă (fig. 129).



Fig. 129. Repartiția zonei de material topit

Rezultatele forței de rupere a celor 75 de esantioane s-au înregistrat în tabelul 21.

Tabelul 21. Inregistrările forței de rupere a îmbinării sudate

Piesa Sudata	Zona	Forța de rupere [N]		
		A	B	C
1		129	125	122
2		130	131	139
3		155	141	148
4		133	156	129
5		126	142	122
6		112	124	125
7		110	115	122
8		124	136	119
9		129	125	122
10		133	156	129
11		122	115	117
12		125	106	123
13		119	118	102
14		104	129	135
15		127	136	128
16		129	125	145
17		124	124	134
18		142	145	123
19		124	129	127
20		143	135	136
21		126	127	136
22		136	112	106
23		105	145	125
24		154	145	122
25		143	102	112

Utilizând software pentru statistica proceselor MINITAB și folosind datele din tabelul 22 se obțin graficele din fig. 130.

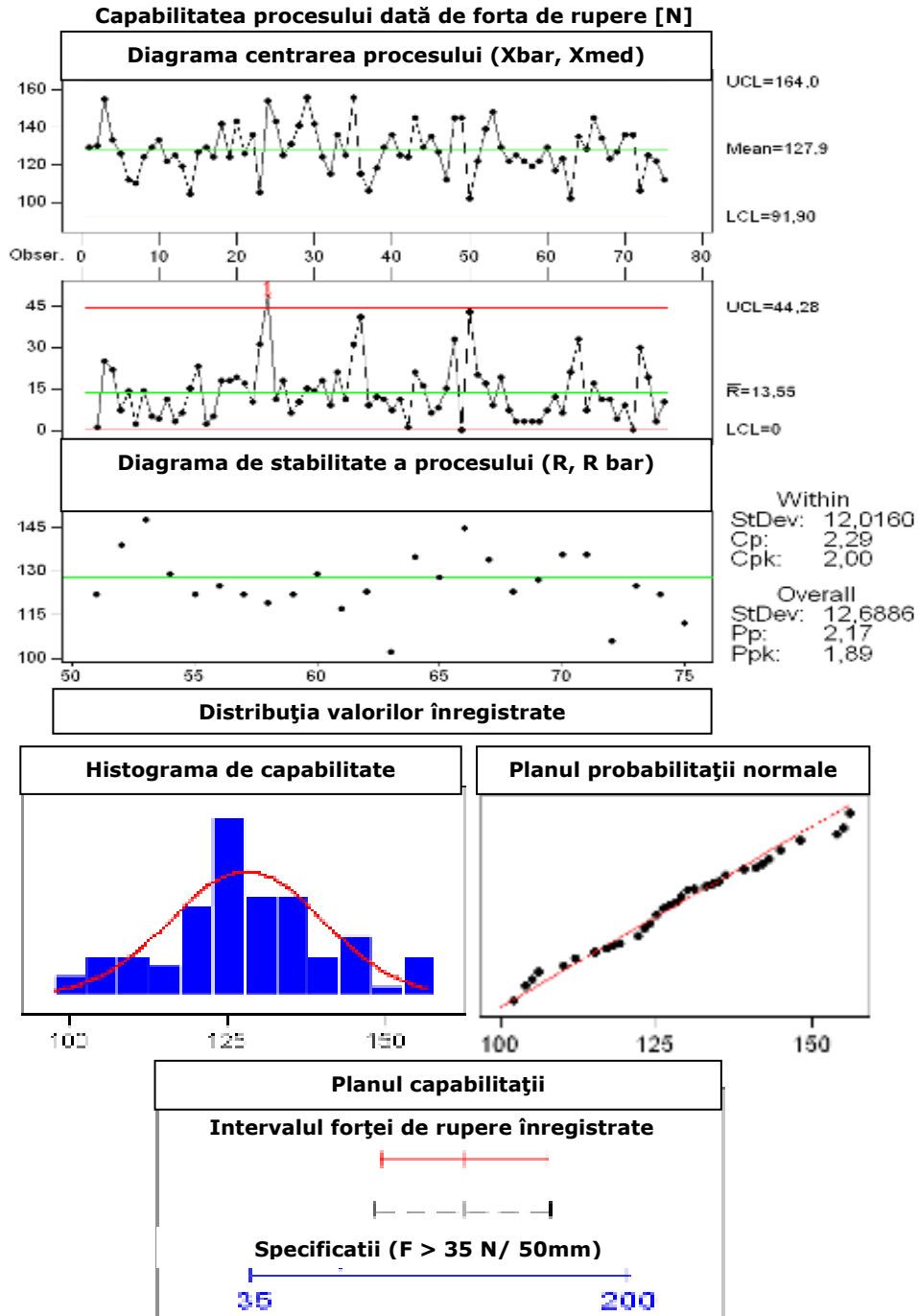


Fig. 130. Capabilitatea procesului pentru materialele Malivat 0,6 +/- 0,1mm

Din histograma de capabilitate observăm o distribuție relativ uniformă a forței de rupere în intervalul 100 - 150 N. Forța de rupere în cazul materialelor Malivat este mai mare decât în cazul materialelor de PVC cu inserție textilă.

În plus, materialul Malivat fiind acoperit doar pe una din fețe cu PVC este mai ieftin decât PVC cu inserție textilă.

Din diagrama de centrare (\bar{X} , X_{med}) se poate vedea că procesul de sudare CIF este stabil ca reglaj, deci cu parametrii de sudare stabiliți pot fi îndeplinite cerințele impuse. Procesul este stabil ca precizie conform diagramei de stabilitate a procesului (R , R_{bar}).

Indicii de capabilitate sunt în conformitate cu limitele 6σ ($C_p > 1,67$; $C_{pk} > 1,33$):

$C_p = 2,29$;

$C_{pk} = 2$.

5.5. Concluzii parțiale

Din histogramele de capabilitate a forței de rupere ale îmbinării sudate observăm o distribuție mai bună odată cu creșterea presiunii de sudare și a presiunii de răcire aplicate în timpul procesului, aceasta compensând diferențele de nivel ale electrozilor pe toată suprafața matriței de sudare.

De asemenea, putem observa că pentru a obține forțe de rupere similare la grosimi diferite este nevoie de parametrii de sudare mai duri pentru grosimi mai mari ale materialelor ce urmează a fi sudate.

Proprietățile PVC determinate experimental sunt:

Nr.crt.	Caracteristici ale PVC	Valoare
1	Temperatura de aprindere	391 °C
2	Temperatura de descompunere	> 120 °C
3	Temperatura de autoaprindere	454 °C (in stat)

Pentru a influența cât mai puțin structura de bază a materialelor PVC, odată cu creșterea grosimii materialelor ce urmează a fi sudate se folosesc regimuri de sudare în trepte (vezi parametrii de sudare CIF de la punctul 5.3), evitându-se regimuri dure de sudare care ar putea genera temperaturi de amorsare a descompunerii a materialului, riscând scurtcircuite între electrozii matriței de sudare. Parametrii tehnologici stabiliți experimental pentru procesul de sudare în curenți de înaltă frecvență a policlorurii de vinil demonstrează că acesta este stabil atât ca reglaj cât și ca precizie, asigurând cerințele de calitate impuse pentru îmbinările sudate.

6. Controlul calității îmbinarilor sudate

6.1 Influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor de rezistență mecanică ale sudurii omogene

Proprietățile mecanice ale îmbinării sudate depind în mare măsură de parametrii de proces. În fig. 63 este reprezentată corelația dintre parametrii care concurează la realizarea îmbinării sudate și anume, puterea specifică P_s [w/cm^2], timpul de sudare t_s [sec] și grosimea materialului d [mm]. Astfel, menținând constantă puterea specifică, pentru o sudabilitate bună trebuie crescut timpul de sudare odată cu creșterea grosimii foliei PVC. Menținând constant timpul de sudare pentru o sudabilitate bună trebuie crescută puterea specifică. Mărimile timpul de sudare și puterea specifică se compensează reciproc în intervalul de sudabilitate (zona nehașurată din fig. 63) și anume, dacă creștem puterea specifică pentru aceeași grosime de material trebuie redus timpul de sudare.

Timpul de răcire este de asemenea un parametru important care influențează caracteristicile mecanice ale îmbinării sudate, de aceea cu creșterea grosimii materialului este necesar un timp de răcire mai mare, dependență ce rezultă și este reprezentată în fig. 64.

Pentru a studia influența parametrilor de sudare s-au folosit 75 esantioane de folii PVC sudate de 0,4 mm grosime și 75 esantioane de folii PVC sudate de 0,6 mm care au fost prelucrate statistic prin programul Minitab, folosind funcția „regresie”. Rezultatul prelucrării statistice determină ecuații între parametrii și implicit dependențe. Înregistrările sunt redată în tabelul 23.

Tabelul 23. Înregistrări ale forței de rupere

Grosime [mm]	F[N]	Is	ts	Ps	tr	Pr	Grosime [mm]	F[N]	Is	ts	Ps	tr	Pr
0,4	129	11,5	6	120	6	14	0,6	72	6,5	7	120	6	1
0,4	130	11,5	6	120	6	14	0,6	79	6,5	7	120	6	1
0,4	155	11,5	6	120	6	14	0,6	73	6,5	7	120	6	1
0,4	133	11,5	6	120	6	14	0,6	75	6,5	7	120	6	1
0,4	126	11,5	6	120	6	14	0,6	81	6,5	7	120	6	1
0,4	112	11,5	6	120	6	14	0,6	74	6,5	7	120	6	1
0,4	110	11,5	6	120	6	14	0,6	72	6,5	7	120	6	1
0,4	124	11,5	6	120	6	14	0,6	76	6,5	7	120	6	1
0,4	129	11,5	6	120	6	14	0,6	70	6,5	7	120	6	1
0,4	133	11,5	6	120	6	14	0,6	79	6,5	7	120	6	1
0,4	122	11,5	6	120	6	14	0,6	76	6,5	7	120	6	1
0,4	125	11,5	6	120	6	14	0,6	81	6,5	7	120	6	1
0,4	119	11,5	6	120	6	14	0,6	74	6,5	7	120	6	1
0,4	104	11,5	6	120	6	14	0,6	73	6,5	7	120	6	1

Tabelul 23 (continuare)

Grosime	F [N]	Is	ts	Ps	tr	Pr	Grosime	F [N]	Is	ts	Ps	tr	Pr
0,4	127	11,5	6	120	6	140	0,6	73	6,5	7	120	6	140
0,4	129	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	124	11,5	6	120	6	140	0,6	72	6,5	7	120	6	140
0,4	142	11,5	6	120	6	140	0,6	70	6,5	7	120	6	140
0,4	124	11,5	6	120	6	140	0,6	72	6,5	7	120	6	140
0,4	143	11,5	6	120	6	140	0,6	75	6,5	7	120	6	140
0,4	126	11,5	6	120	6	140	0,6	79	6,5	7	120	6	140
0,4	136	11,5	6	120	6	140	0,6	70	6,5	7	120	6	140
0,4	105	11,5	6	120	6	140	0,6	72	6,5	7	120	6	140
0,4	154	11,5	6	120	6	140	0,6	70	6,5	7	120	6	140
0,4	143	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	125	11,5	6	120	6	140	0,6	65	6,5	7	120	6	140
0,4	131	11,5	6	120	6	140	0,6	82	6,5	7	120	6	140
0,4	141	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	156	11,5	6	120	6	140	0,6	80	6,5	7	120	6	140
0,4	142	11,5	6	120	6	140	0,6	83	6,5	7	120	6	140
0,4	124	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	115	11,5	6	120	6	140	0,6	88	6,5	7	120	6	140
0,4	136	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	125	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	156	11,5	6	120	6	140	0,6	82	6,5	7	120	6	140
0,4	115	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	106	11,5	6	120	6	140	0,6	83	6,5	7	120	6	140
0,4	118	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	129	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	136	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	125	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	124	11,5	6	120	6	140	0,6	88	6,5	7	120	6	140
0,4	145	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	129	11,5	6	120	6	140	0,6	88	6,5	7	120	6	140
0,4	135	11,5	6	120	6	140	0,6	80	6,5	7	120	6	140
0,4	127	11,5	6	120	6	140	0,6	82	6,5	7	120	6	140
0,4	112	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	145	11,5	6	120	6	140	0,6	88	6,5	7	120	6	140
0,4	145	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	102	11,5	6	120	6	140	0,6	81	6,5	7	120	6	140
0,4	122	11,5	6	120	6	140	0,6	66	6,5	7	120	6	140

Tabel 23 (continuare)

Grosime [mm]	F [N]	Is	ts	Ps	tr	Pr	Grosime [mm]	F [N]	Is	ts	Ps	tr	Pr
0,4	139	11,5	6	120	6	140	0,6	77	6,5	7	120	6	140
0,4	148	11,5	6	120	6	140	0,6	86	6,5	7	120	6	140
0,4	129	11,5	6	120	6	140	0,6	73	6,5	7	120	6	140
0,4	122	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	125	11,5	6	120	6	140	0,6	75	6,5	7	120	6	140
0,4	122	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	119	11,5	6	120	6	140	0,6	74	6,5	7	120	6	140
0,4	122	11,5	6	120	6	140	0,6	69	6,5	7	120	6	140
0,4	129	11,5	6	120	6	140	0,6	77	6,5	7	120	6	140
0,4	117	11,5	6	120	6	140	0,6	74	6,5	7	120	6	140
0,4	123	11,5	6	120	6	140	0,6	76	6,5	7	120	6	140
0,4	102	11,5	6	120	6	140	0,6	75	6,5	7	120	6	140
0,4	135	11,5	6	120	6	140	0,6	86	6,5	7	120	6	140
0,4	128	11,5	6	120	6	140	0,6	86	6,5	7	120	6	140
0,4	145	11,5	6	120	6	140	0,6	74	6,5	7	120	6	140
0,4	134	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	123	11,5	6	120	6	140	0,6	69	6,5	7	120	6	140
0,4	127	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	136	11,5	6	120	6	140	0,6	73	6,5	7	120	6	140
0,4	136	11,5	6	120	6	140	0,6	77	6,5	7	120	6	140
0,4	106	11,5	6	120	6	140	0,6	69	6,5	7	120	6	140
0,4	125	11,5	6	120	6	140	0,6	89	6,5	7	120	6	140
0,4	122	11,5	6	120	6	140	0,6	69	6,5	7	120	6	140
0,4	112	11,5	6	120	6	140	0,6	74	6,5	7	120	6	140

Făcând regresia forței de rupere $F[N]$ în funcție de curentul de sudare $I_s [A]$ rezultă graficul din figura 131 și ecuația 50, care ne arată că obținem o forță mai mare de rupere odată cu creșterea curentului de sudare.

$$F [N] = 12,6707 + 10,024 \cdot I_s \quad (50)$$

Conform relației 50 putem determina ce curent de sudare trebuie aplicat pentru obținerea forței de rupere cerută.

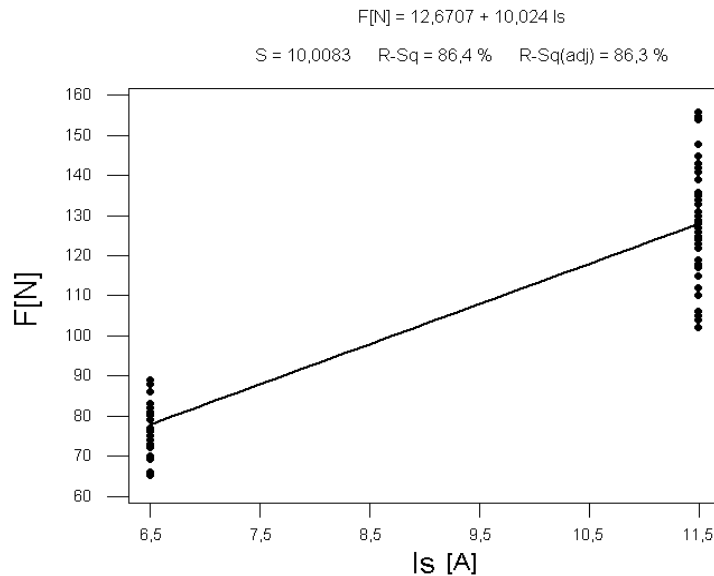


Fig. 131. Reprezentarea regresiei F[N] în funcție de Is [A]

6.2. Criterii de apreciere a calității îmbinărilor sudate

I. Caracteristici mecanice

Ca metodă de testare, pentru a stabili aptitudinea la sudare CIF a foliilor PVC de diferite tipuri și dimensiuni utilizate în industria de autoturisme, s-a considerat PEUGEOT S.A. test method D41 1033 care are ca cerință impusă o valoare minimă a forței de rupere de 35N/50 mm lungime îmbinare sudată, conform fig.117 și fig. 118 [6].

II. Caracteristici geometrice

Caracteristicile geometrice constau în:

- aspectul vizual al cusăturii sudate să fie conform figurii 132.

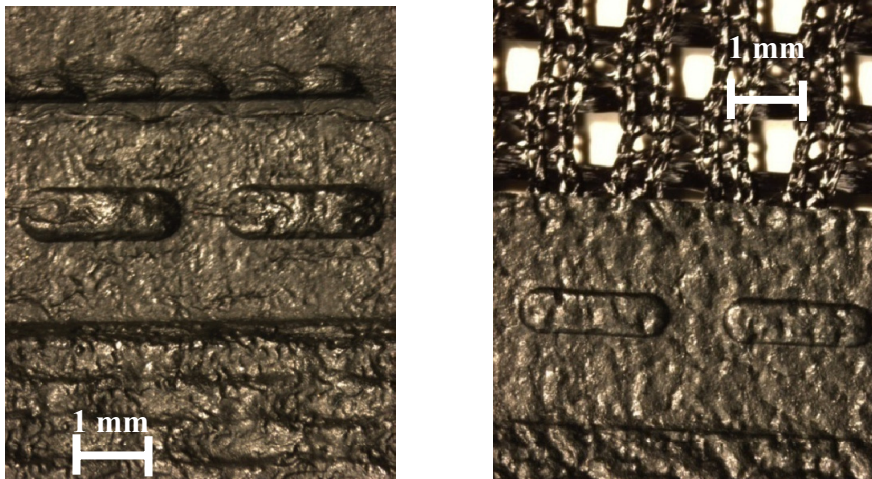


Fig. 132. Reprezentarea aspectului vizual al cusăturii sudate, x 50

- Lățimea cusăturii sudate să fie constantă conform cu figura 133.



Fig. 133. Aspectul macroscopic al piesei sudate

- Deviația de suprapunere a materialului PVC după sudare trebuie să fie de maxim 1mm), vizualizat în fig. 134 la microscop tip CL 1500 ECO.

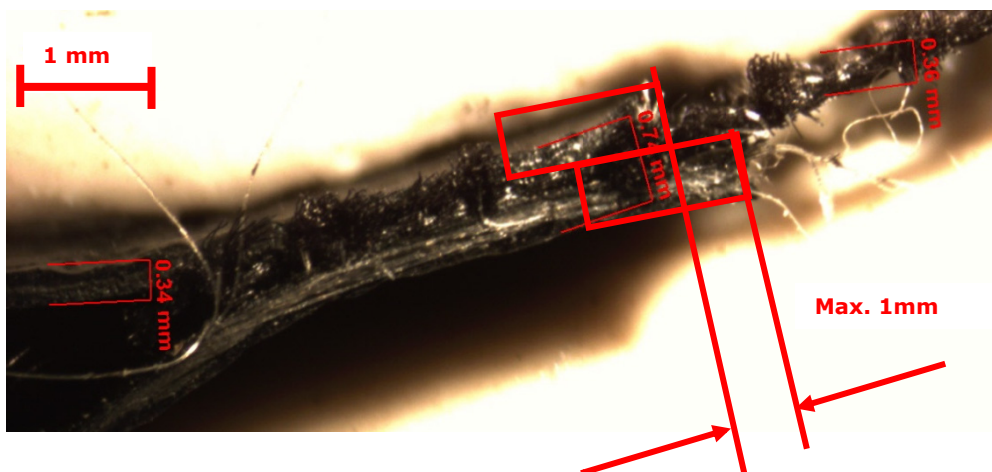


Fig. 134. Reprezentarea deviației de suprapunere, x 50

6.3. Defecte posibile și modalități de soluționare

În cele ce urmează sunt descrise principalele defecte, cauzele ce duc la aceste defecte și modalitățile de remediere:

a. Defazare la suprapunerea materialului PVC de peste 1mm

În fig. 135 este redat un defect determinat de suprapunerea materialului PVC care nu este conform specificației (max. 1 mm), în zona ferestrei.



Fig. 135. Reprezentarea defectului suprapunerea materialului PVC

Cauza o constituie distanța dintre piesa de material plastic și piesa de ghidare care determină o mișcare a ansamblului tijă - mâner care deplasează materialul PVC în timpul închiderii matriței de sudare, conform fig. 136.

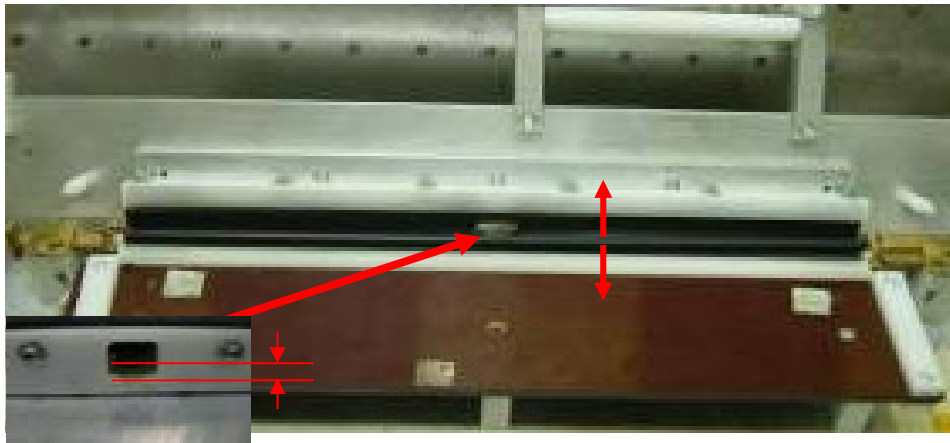


Fig. 136. Reprezentarea distanțelor în matrița de sudare

Corectarea se face prin reducerea dimensiunilor ghidajului plastic, astfel încât să se reducă mișcarea piesei în interiorul acestuia. Așadar, piesa de plastic se fixează în ghidaj și mișcarea materialului PVC dispăre (fig. 137).

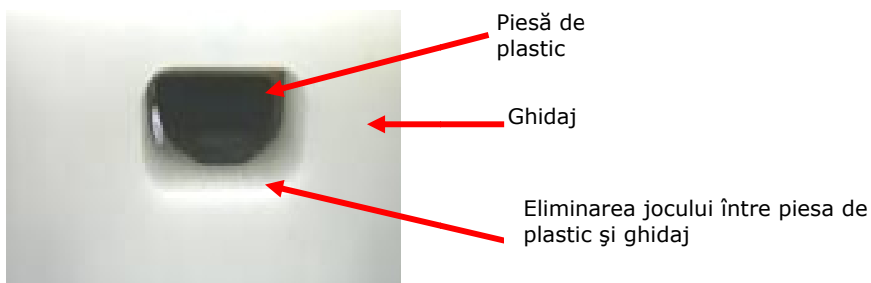


Fig. 137. Reprezentarea corecției pentru eliminarea defectului

b. Ruperea materialului textil în zona îmbinării sudate (fig.138).



Fig. 138. Reprezentarea defectului rupere material în zona îmbinării sudate

Se analizează defectul pornind de la diagrama „Os de pește” sau Ishikawa redată în figura 139.

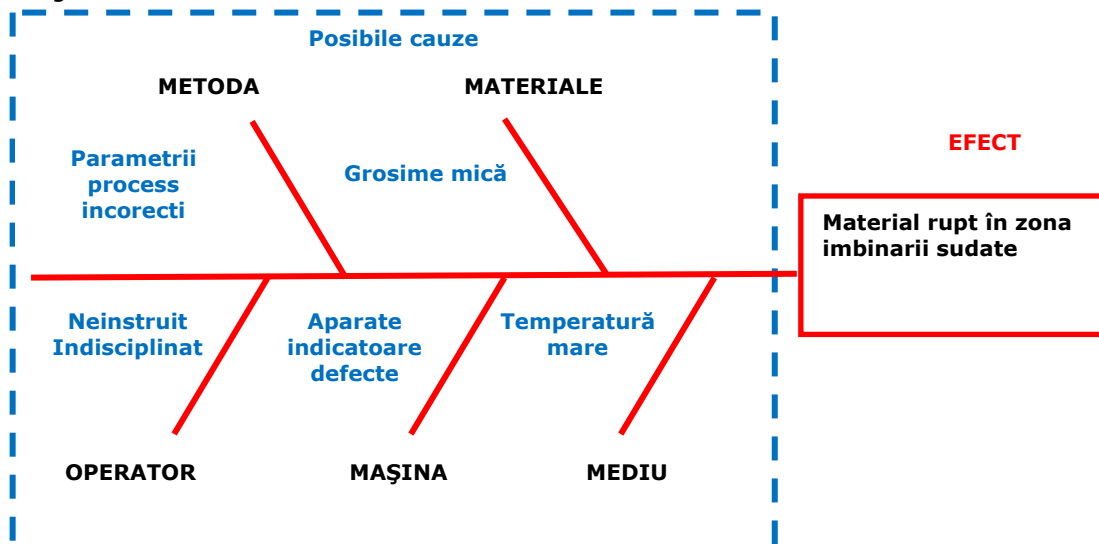


Fig. 139. Reprezentarea diagramei de analiză Ishikawa

Aceasta metodă de analiză este foarte complexă deoarece ține cont de toate variabilele care pot influența procesul și se realizează în echipă.

Rezolvarea problemelor aparute în activitatea unei echipe este deseori o provocare, mai ales dacă opiniile membrilor sunt diferite privind cauza reală a problemei – diferite și totuși identificate corect. Una din metodele de analiză a problemelor complexe care par a avea mai multe cauze interdependente este **diagrama Ishikawa**.

Diagrama are mai multe denumiri și anume:

- diagrama Ishikawa (a fost dezvoltată în 1943 de Kaoru Ishikawa, consultant japonez);
- diagrama cauza-efect (ilustrează cauzele principale și secundare ale unui efect);
- os de pește (seamă cu scheletul unui pește).

Diagrama are ca scop:

- ilustrarea grafică a legăturii dintre un rezultat și factorii ce au dus la apariția acestuia;

- imaginea de ansamblu a cauzelor potențiale ce au dus la o problema sau efect. Etapele de analiză sunt:
 - Definiere problemă – sub forma unor întrebări "DE CE..?" (de ex. "de ce s-a rupt materialul în zona îmbinării sudate?") – notează problema în „capul” peștelui. Este important ca toți membrii grupului să agreeze formularea problemei.
 - Construire "schelet" - Identificarea cauzelor potențiale și gruparea în categorii principale (exemplu: mașini , proceduri, personal, management). Fiecare dintre aceste categorii majore va fi explorată în detaliu. Subcauzele identificate sunt poziționate pe "oasele" principale și pentru fiecare se continuă cu întrebarea "de ce s-a întâmplat acest lucru?"
 - Analiza informațiilor - evaluează fiecare cauză majoră și potențialele cauze detaliate asociate cu aceasta; marchează (eventual cu culoare distinctă) elementele cele mai promițătoare în acest sens, pentru investigarea ulterioară.
 - Plan de acțiune - crează un plan de acțiuni pentru rezolvarea cauzei încercuite; de obicei pot fi mai multe cauze potențiale care interacționează în crearea problemei; planul de acțiune trebuie să ia în considerare aceste interdependențe. Se pornește cu analiza metodei și anume de la parametrii de proces validați, redați în tabelul 24.

Tabelul 24. Parametrii validați ai procesului de sudare CIF









Descrierea parametrilor	Valoarea parametrilor	Piesa sudată
Energia [kW] Limite de ajustare: Operatori: Min: 0,2 / Max: 1,0 Tehnicienii: Min: 0,1 / Max: 1,2	0,5	
Timp sudare [sec] Limite de ajustare: Operatori: Min: 0,5 / Max: 2,0 Tehnicienii: Min: 0,4 / Max: 3,0	1,4	
Timp de răcire [sec] Limite de ajustare: Operatori: Min: 1,0 / Max: 2,0 Tehnicienii: Min: 1,0 / Max: 3,0	1,5	

Timpul de răcire nu influențează negativ structura materialului, motiv pentru care se analizează și revalidează limita inferioară și superioară a parametrilor de proces:

- Energia [kW] = 0,2 – 1,2 .
- Timp sudare [sec] = 0,5 – 3.

În tabelul 25 sunt redată aspecte ale pieselor sudate, în funcție de parametrii procesului.

Tabelul 25. Aspecte ale pieselor sudate, în funcție de parametrii procesului.

Nr. încercări	Putere [kW]	Timp de sudare [sec]	Imbinarea sudată
1	0,5	1,5	 Fig. 141
2	1,0	1,5	 Fig. 142
3	1,5	1,5	 Fig. 143
4	1,8	1,5	 Fig. 144
5	1,5	3,0	 Fig. 145
6	2,0	3,0	 Fig. 136
7	2,2	3,0	 Fig. 147
8	2,0	3,0	 Fig. 148

Observație: Pe mașina pe care s-a sudat piesa, presiunea de sudare nu poate fi modificată. Se poate observa că dacă se lucrează în limitele validate ale parametrilor de proces, ruperea materialului nu este posibilă.

Deci, aceasta presupunere este eliminată.

La verificarea materialelor din punct de vedere al grosimii se constată că acestea sunt conforme.

Verificarea mașinii ne arată ca are o funcționare corectă.

Sudarea la diferite temperaturi ne demonstrează că temperatura ambiantă nu are influențe în limitele în care variază 25 ± 5 °C.

La verificarea instruirii s-a constatat ca se lucrea cu un operator nou care nu avea capacitatea de a intelege importanța limitelor parametrilor.

Deci, concluzionăm ca defectul a fost generat de operator.

c) Bule de aer în cusătura sudată

Pentru prevenirea acestui defect se aplică următoarele acțiuni corective:

1. Creșterea presiunii de sudare.
2. Descreșterea înălțimii ghidajelor din plastic.
3. Înălțarea electrozilor, punând plăcuțe de alamă între electrozi și placa de bază a matriței de sudare.

d) Testul de durabilitate neconform la 100°C pentru materialul PVC sudat

Un defect de metodă îl reprezintă testul de durabilitate la 100°C pentru materialul PVC sudat cu inserția de fibră textilă paralelă cu îmbinarea sudată.

Prin metoda de testare PEUGEOT S.A. test method D41 1033 s-a analizat comportarea la sudarea CIF a materialului PVC cu fibra textilă perpendiculară pe îmbinarea sudată, fig 149. a) și paralelă la îmbinarea sudată, fig.149. b).



Fig.149. Poziția fibrei textile față de îmbinarea sudată

Analizele atent efectuate au condus la următoarele concluzii:

1. la *fibra textilă perpendiculară* pe îmbinarea sudată materialul topit este constant, dar prezintă expulzări.
2. la *fibra textilă paralelă* la îmbinarea sudată distribuția materialului topit este constantă fără expulzări.

După cum rezultă și din fig.140, forțele de rupere ale îmbinării paralelă cu fibra textilă au valori net superioare celei cu perpendiculară pe fibra textilă. Din acest motiv se recomandă utilizarea materialului cu direcția *fibrei textile paralelă la* îmbinarea sudată (graficul marcat cu linie continuă).

În urma analizei se recomandă utilizarea materialului cu direcția *fibrei textile paralelă la* îmbinarea sudată (graficul marcat cu linie continuă în fig. 150).

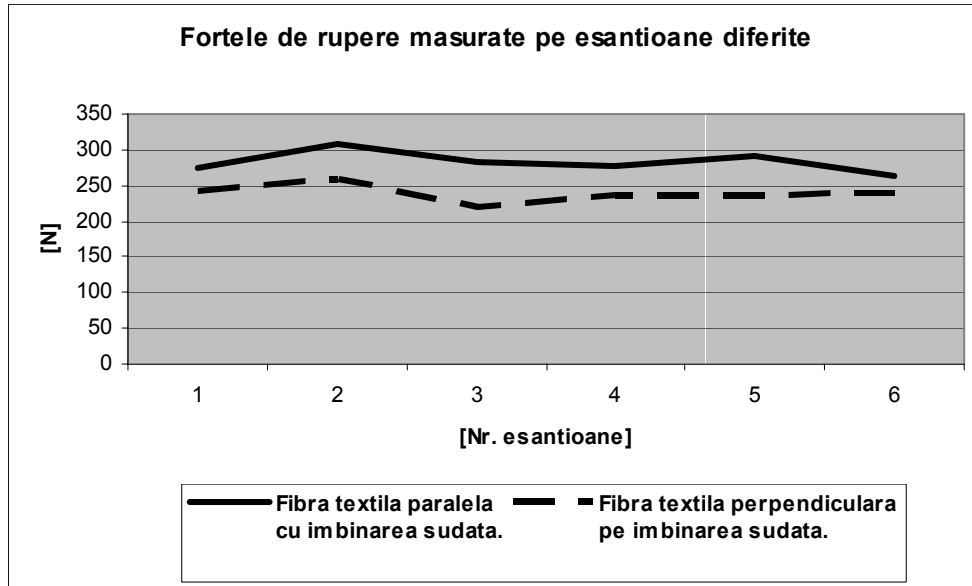


Fig.150. Variația forțelor de rupere

e) Arderea materialului PVC prin scurtcircuit reprezentată în figura 151.

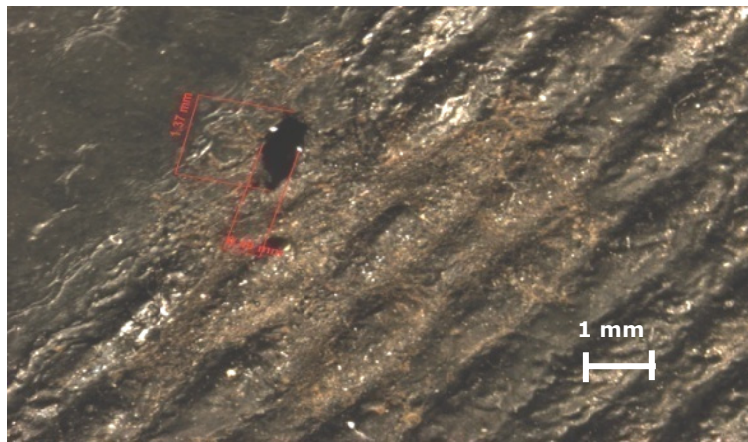


Fig.151. Arderea materialului PVC prin scurtcircuit, x 50

Acest defect nu poate fi controlat, deoarece este determinat de natura materialului PVC care are în compoziție carbon, care este bun conducător electric și care poate genera scurtcircuite în matrița de sudare (zona marcată din fig.152).

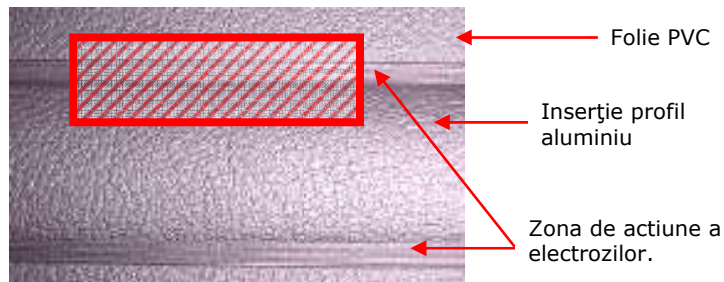


Fig.152. Defect generat de scurtcircuitul din matrița de sudare

Analizînd acest defect s-a ajuns la concluzia că acest defect este cauzat de zone cu aglomerări de carbon pe grosimea materialului, care cresc riscul unor descărcări electrice, dacă acestea se află în zona hașurată (lângă electrozi).

Corectarea defectului este posibilă doar prin înlocuirea electrozilor afectați de scurtcircuit (comandarea și menținerea unui stoc minim al electrozilor, ca piese de schimb).

f) Zone de material PVC lucioase și/ sau cu pori lângă îmbinarea sudată.

Defectul are ca efect crearea unei zone de material PVC lucioasă și/ sau cu pori lângă îmbinarea sudată (fig.153) și este dependent de poziția electrozilor față de inserția metalică a produsului sudat. Acest defect apare din cauza energiei mari la care este supus materialul care își schimbă structura macroscopică.

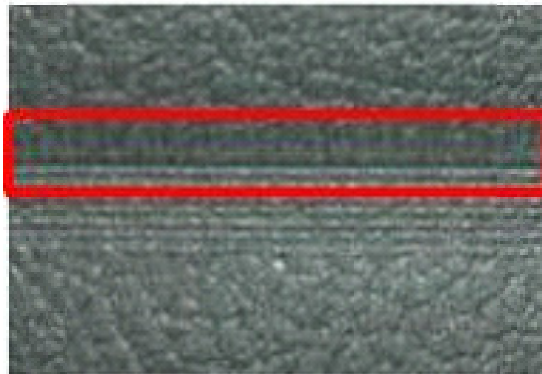


Fig.153. Diferența de structură a zonei îmbinate față de materialul de bază

În urma analizei s-a constatat că materialul PVC capătă un aspect mai lucios cu cât distanța dintre inserția de aluminiu a piesei și electrod este mai mică.

g) Lipsa inserției metalice care asigură rigiditatea produsului sudat.

Lipsa inserției metalice care asigură rigiditatea produsului sudat, fig.154, este generată de neglijența operatorului și duce la rebutarea produsului.



Fig.154. Defectul-Lipsa inserției metalice pentru rigiditate

Evitarea acestui defect se face prin reinstruirea operatorului și instalarea unui sistem Poka-Yoke (dispozitiv antieroare) cu senzori inductivi care detectează inserțiile metalice (fig.145).

h) Distrugerea electrozilor prin scurtcircuit sau/și deformare mecanică

Distrugerea electrozilor prin scurtcircuit sau/și deformare mecanică cauzată de insertia metalică pentru rigiditate poziționată greșit, poate fi de asemenea generator de defecte.

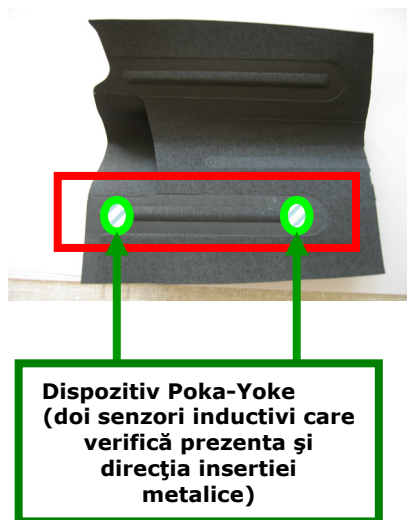


Fig.155. Reprezentarea dispozitivului Poka-Yoke

Pentru evitarea defectului se implementează dispozitivul antieroare Poka-Yoke care constă în doi senzori inductivi care verifică poziția și prezența inserției metalice), conform fig.155.

h) Sudură slabă sau prea puternică.

Cele mai dese defecte sunt create de stabilirea incorectă a parametrilor de sudare care conduc la o sudare slabă sau prea puternică, ceea ce duce la o cusătură sudată necorespunzătoare de-a lungul întregii arii a electrozilor.

La sudarea slabă nu sunt atinse valorile minime specificate ale forței de rupere.

La sudarea cu un regim de sudare prea dur apar bavuri de-a lungul electrozilor conform fig. 156 sau arduri conform fig. 151.

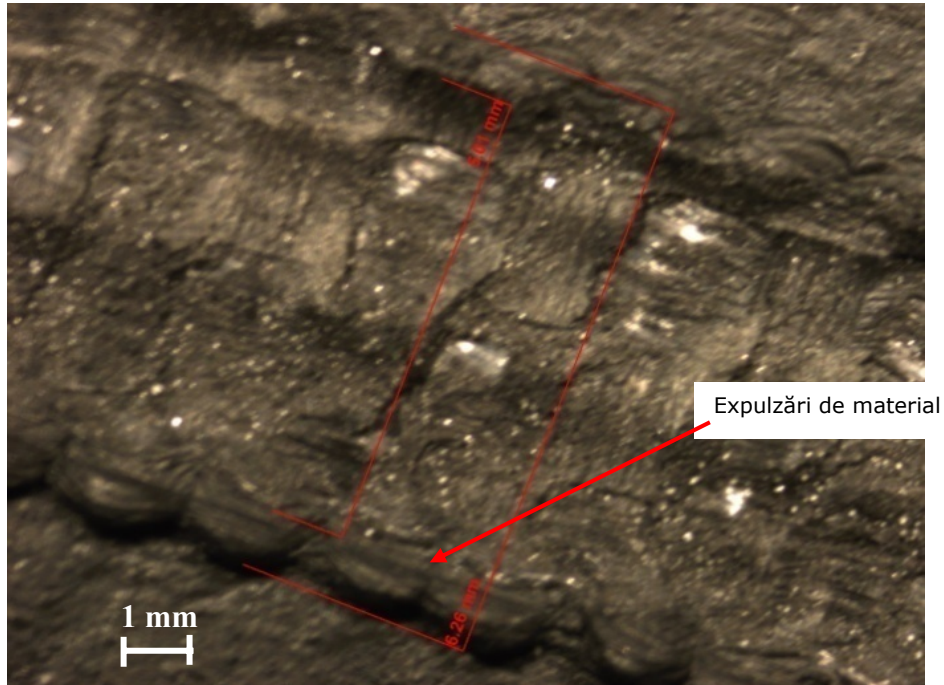


Fig.156. Reprezentarea secțiunii unei îmbinări cu regim dur de sudare, x50

j) Impurități în îmbinarea sudată și/sau pași de sudare neconformi

Aceste defecte sunt generate de impuritățile de pe electrozi sau din cauza suprafețelor distruse ale acestora, care fac ca pe folie să rămână impurități reprezentate în fig. 157. Aceste defecte pot fi prevenite prin controlul vizual al suprafeței electrozilor (puncte, pași care nu sunt constanți, etc).



Fig.157. Reprezentarea defectului impurități în îmbinarea sudată

k) Bavură de pe marginea cusăturii sudate

Un defect ce poate fi remediat îl constituie bavura de pe marginea cusăturii sudate, reprezentat în fig. 158.

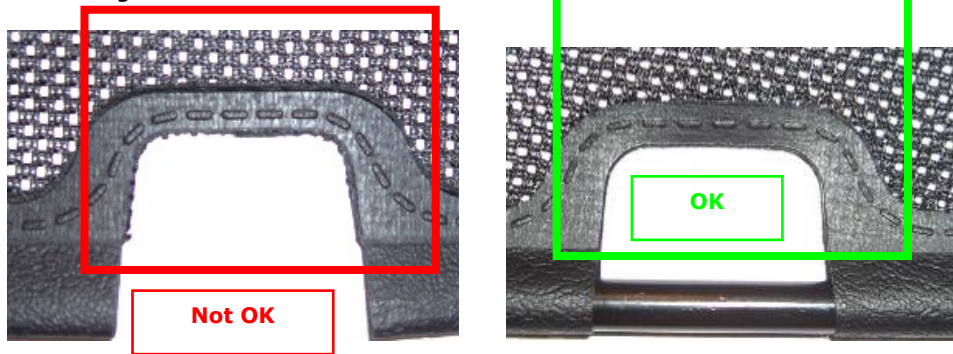


Fig.158. Reprezentarea defectului bavuri pe marginea imbinarii sudate

Aceasta apare din cauza spațiului dintre electrod și ghidaj care permite curgerea materialului în timpul sudării, fig. 159, dar și prin presarea neuniformă pe întreaga suprafață a matriței, fig. 160.



Spațiul dintre electrod și gidaj permite curgerea materialului în timpul sudării

Fig.159. Zona din matrița de sudare cu spațiu între electrod și gidaj



Fig.160. Reprezentarea matriței de sudare supusă la presarea neuniformă
Evitarea acestor defecte, destul de dese, se face prin repararea matriței de sudare și poziționarea a 4 blocuri din plastic în interiorul mesei mașinii, de aceeași

înălțime cu matrița de sudare, pentru uniformizarea presiunii exercitate pe suprafața acesteia.

m) Defazare la suprapunerea materialului PVC de peste 1mm

Pot apărea defecte de geometrie în zona elementelor de material plastic, defazări de suprapunere de peste 1 mm, cauzate de reglaje necorespunzătoare ale mașinii conform fig. 133, 134, 135.

În urma colectării datelor măsurate în tabelul 25 s-a constatat că materialul PVC este deviat față de specificație (marcate cu gri) în ceea ce privește dimensiunea ferestrei și chiar grosimea foliei (fig. 161).

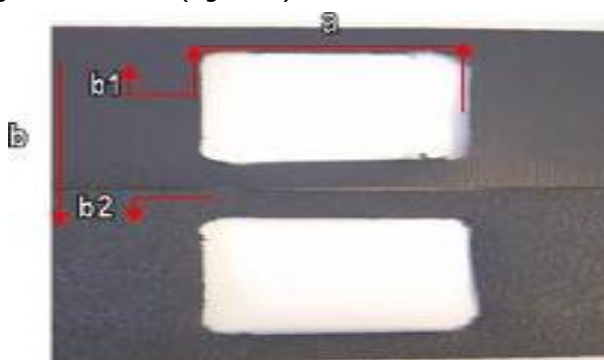


Fig.161. Reprezentarea geometriei ferestrei benzii de PVC

Tabelul 25. Inregistrările măsurătorilor ferestrei și grosimii materialului

Măsuratori PVC				
$b_1 = 6,5 \pm 0,2$	$a = 27 \pm 0,2$	$b_2 = 6,5 \pm 0,2$	$b = 27,1 \pm 0,2$	Grosime = $0,37 \pm 0,03$
6,31	26,66	6,71	27,02	0,341
6,27	26,81	6,76	27,04	0,34
6,22	26,88	6,67	27,14	0,347
6,3	26,83	6,7	27,12	0,344
6,2	26,8	6,74	27,6	0,355
6,24	26,84	6,83	27,88	0,349
6,32	26,74	6,73	27,06	0,344
6,22	26,88	6,86	27,14	0,353
6,23	26,76	6,84	27,08	0,352
6,28	26,79	6,72	27,15	0,344
6,32	26,72	6,86	27,06	0,352
6,29	26,77	6,78	27,103	0,351
6,31	26,74	6,83	27,12	0,337
6,32	26,83	6,84	26,99	0,35
6,66	26,88	6,91	26,99	0,345

Soluția, în acest caz, este sortarea stocului existent de material PVC.

6.3. Concluzii

Utilizând diagrama de analiză Ishikawa (5M = Masina, Manpera, Metoda, Material, Mediu) pentru analiza defectelor și prelucrând date experimentale s-a întocmit diagrama de defectologie a îmbinărilor sudate (fig. 162).

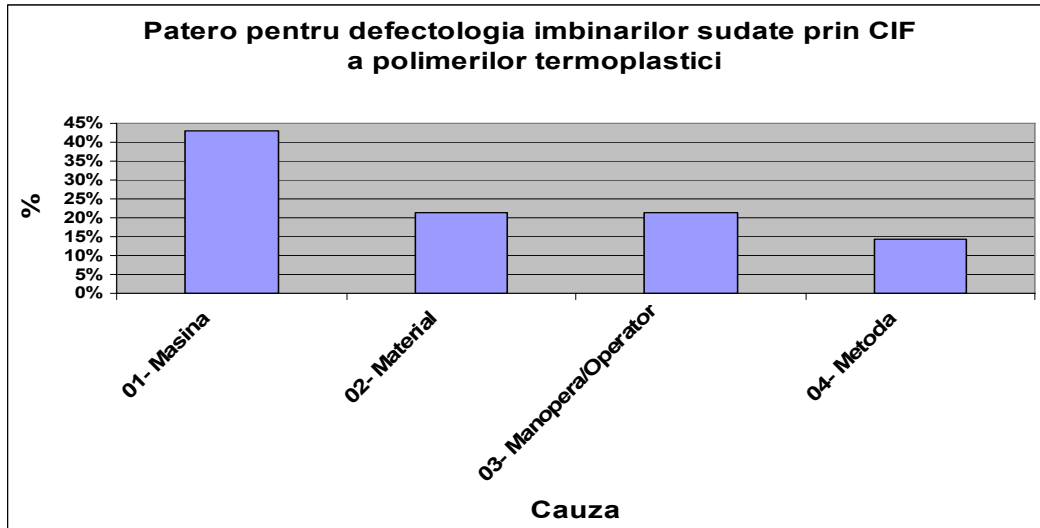


Fig.162. Diagrama Patero pentru defectologia îmbinărilor

Din acest grafic rezultă că principalele defecte apar din cauza designului matriței de sudare CIF, a calității materialelor și a influenței operatorului, iar în mai mică măsură intervine metoda de lucru.

Se concluzionează că validarea procesului de sudare CIF la implementare este obligatorie și anume matrița de sudare, metoda de lucru și parametri de proces [6, 9].

Totodată, o importanță deosebită o are stabilirea de mostre limită de acceptabilitate și cataloage de defecte pentru componente și piese sudate.

Optimizarea procesului de sudare impune investigarea prealabilă a materialelor ce urmează a fi sudate.

Pentru eliminarea influenței operatorilor se recomandă implementarea sistemelor antieroare (Poka-Yoke). Pentru mărirea stabilității și îmbunătățirea procesului este importantă extinderea și utilizarea celor mai bune practici validate la nivelul actual (Lesson Learned).

7. Concluzii și contribuții originale

Lucrarea de doctorat elaborată se înscrie în tendința actuală a cercetărilor din domeniul Științei și ingineriei materialelor, de a dezvolta noi tehnici de procesare și de a aprofunda mecanismul de realizare a îmbinarilor sudate din materiale polimerice bipolare sub acțiunea unui curent electric de înaltă frecvență și la care încălzirea este determinată de frecarea moleculelor prin schimbarea polarității (27 milioane ori/ secundă).

Principalele concluzii și contribuții originale pot fi sintetizate astfel:

1. Comportarea ca dielectric a polimerilor între electrozii matriței de sudare conduce la modificări în structura moleculară, a căror intensitate depinde în principal de temperatura de plastifiere, de frecvența curentului și de tensiunea aplicată; urmare a gamei sortimentale variate pentru tipurile de PVC, comportarea lor tehnologică este diferită și alături de factorul de pierdere dielectrică $\tan \delta$, calitatea îmbinarilor sudate CIF este influențată de vâscozitatea topiturii.
2. Investigarea prin experiment a sudabilității CIF a foliilor din PVC cu grosimi de 0,4 - 0,6 mm, care a permis stabilirea parametrilor optimi ai procesului de imbinare la o presiune de 50 bari; astfel s-a demonstrat ca temperaturile de 150°C cu timpi de 5-15 sec permit obținerea de îmbinări sudate fără defecte de continuitate a materialelor și cu o geometrie corespunzătoare.
3. Stabilirea unei metodologii de apreciere prin calcul a căldurii dezvoltate în procesul de sudare CIF și a evoluției în timp a gradientului termic pe secțiune.
4. Intocmirea unui algoritm de calcul pentru sudarea CIF a foliilor de PVC cu definirea capacității matriței de sudare și a corelației dintre temperatura electrozului și grosimea materialului; în plus, se definesc valorile optime ale puterii specifice pentru diferiți timpi de sudare și variația timpului de răcire cu grosimea foliilor.
5. Analiza comparativă a variantelor tehnologice de sudare din punctul de vedere al dispunerii liniilor câmpului electromagnetic și implicit al eficienței energetice; se demonstrează că rezistența la rupere a sudurilor realizate în varianta sudării simetrice este mai mare decât la sudarea asimetrică și că odată cu creșterea grosimii componentelor se impun regimurile de sudare în trepte, evitându-se regimuri dure, care pot genera degradarea materialului și apariția unor scurtcircuite între electrozii matriței de sudare.
6. Stabilirea prin statistică matematică a condițiilor în care procesul de sudare CIF este stabil atât ca reglaj cât și ca precizie, asigurând cerințele de calitate impuse îmbinarilor sudate.
7. Histogramele de capabilitate ale forței de rupere a îmbinării sudate evidențiază o distribuție mai favorabilă, odată cu creșterea presiunii de sudare și a celei de răcire aplicate în cursul procesului, ambele mărimi compensând diferențele de planeitate ale electrozilor pe întreaga suprafață a matriței de sudare.

8. Intocmirea diagramei de defectologie a îmbinărilor sudate, bazată pe designul mașinii de sudare, performanțele materialelor și parametrii operatorii de proces.
9. Contribuții noi legate de dezvoltarea procesului de sudare CIF, cu referire la:
 - tratarea matriței de sudare ca și condensator și algoritmul de calcul al acesteia;
 - stabilirea corelației dintre mărimile fizice și parametrii de proces utilizând prelucrarea statistică;
 - abordarea statistică a validării procesului de sudare prin tehnici 6 Sigma;
 - fundamentarea științifică a influenței gradientului termic pe secțiune asupra calității îmbinărilor sudate;
 - optimizarea parametrilor de proces și aprofundarea mecanismului de realizare a sudurilor fără defecte de continuitate a materialului și cu proprietăți reproductibile.

Direcții de cercetare:

- Extinderea sudării CIF pentru grosimi ale materialelor de peste 5mm,
- Sudarea CIF a materialelor plastice nepolare utilizând ca material de adaos folii de materiale plastice polare,
- Aplicarea procesului de sudare CIF în industria electronică la circuitele integrate sensibile la temperaturi ridicate,
- Utilizarea proceselor combinate simultane pentru creșterea eficienței prin reducerea costurilor de producție (sudare CIF cu alte procese tehnologice, ca de exemplu debitare, presare etc).

Lista lucrărilor științifice elaborate și publicate

1. Mitelea I., **Vărzaru N.**: Researches of High Frequency Welding Process Validation for Same Polymers, Revista de Materiale plastice, Vol.3, pp. 289 - 293 , ISSN 1454-4164, 2008, București, România (Revistă ISI).
2. Mitelea I., **Vărzaru N.**: The High Frequency Welding Aptitude of Thermoplastic Polymers, Revista de Materiale plastice, Vol.1, pp.101-107, ISSN 1454-4164 2009, București, România (Revistă ISI).
3. Mitelea I., **Vărzaru N.**: Failure Analysis of High Frequency Welding Fixed Joints of Thermoplastic Polymers, Revista de Materiale plastice, Vol.4, pp. . 439 -443 ISSN: 1454-4164, 2009, București, România (Revistă ISI).
4. Mitelea I., **Vărzaru N.**: Algoritmul de calcul pentru matrița simetrică de sudare cu curenți de înaltă frecvență a foliilor de policlorură de vinil, Revista Asociației de sudură din Romania SUDURA, XXI/ 3-2011, P6-10, ISSN 1453 – 0384 (Revistă BDI).
5. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: The influence of physical parameters of the high frequency welding of polymers, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, Vol 56(70) ISSN 1224 – 6077, Iss. 1, 2011 p31-36.
6. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: Implementation of health and safety management system in automotive industry, International conference Saffety of technical systems in living and working enviroment, University of Nis, Serbia, p 131-137, October 2011, ISBN 978-86-6093-035-6.
7. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: About the thermal gradient at the high frequency simetric welding of thermoplastics, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, 2012 (acceptată pentru publicare).
8. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: Research of quality of high frequency welding join for PVC foils, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, 2012 (acceptată pentru publicare).

BIBLIOGRAFIE

1. Aksch E. ș.a.: Materiale plastice poliamidice, Editura Tehnică, București, 1988.
2. Allen N.S., Edge M.: Fundamentals of polymer degradation and stabilization, Elsevier, New York, 1992.
3. Arroyo M.T., Fernandez L.J., Agirregabiria M., Ibanez N., Aurrekoetxea J., Blanco F.J.: Novel all-polymer microfluidic devices monolithically integrated within metallic electrodes for SDSCGE of proteins. *Micromech Microeng* 17(7), 2007.
4. Barton A.F.M.: Handbook of solubility parameters and other cohesion parameters, CRC Press, Boca Raton, 1991.
5. Becker H., Gartner C.: Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications, *Electrophoresis* 21(1), p. 12–26, 2000.
6. Becker H., Locascio L.E.: Polymer microfluidic devices. *Talanta* 56, p. 267–287, 2002.
7. Bolon D.A., Kunz C.O.: Ultraviolet depolymerization of photoresist polymers. *Polym Eng Sci*, p. 109, 1972.
8. Brown L., Koerner T., Horton J.H., Oleschuk R.D.: Fabrication and characterization of poly(methylmethacrylate) microfluidic devices bonded using surface modifications and solvents, p66–73, 2006.
9. Beutin P.: Les matériaux composites suscitent des progrès technologiques dans l'industrie d'automobile, *Matériaux Et Techniques*, 1990.
10. Baijal M.D.: *Plastics polymer science and technology*, Edition Wiley-Interscience, Sua, New York, 1982.
11. Benatar A. ș.a.: *Composites, Welding Handbook*, 1996.
12. Baron T., Isac-Maniu A.L.: Calitate și Fiabilitate, p.90...153, 336...470, Ed. Tehnică București, 1988.
13. Baron T. : Metode statistice pentru analiza și controlul calității producției, Ed. Tehnică București, 1988, p. 270...292.
14. Bunn C. W., Hill R.: *Fasern aus synth. Polymeren*, Berlin Union, Stuttgart 1956.
15. Baijal M.D.: *Plastics polymer science and technology*, Edition Wiley-Interscience, Sua, New York, 1982.
16. Benatar A. ș.a.: *Composites, Welding Handbook*, 1996.
17. Bogucka R., Brunner, P.H.: Evaluation of Plastic Flows and Their Management in Austria and Poland- Challenges and Opportunities, Vienna University of Technology, Institute for Water Quality Recourses and Waste Management, Vienna, 2007.
18. Börnheim B.: De nouveaux matériaux-composites de fibres en concurrence avec les métaux, *ASEA – Revue, Suedia*, 1987.
19. Cognard P. H.: Les applications industrielles des matériaux composites, Edition du Moniteur, 1989.
20. Chitanu G. C., Creanga D. M., Hirano T., Badea N.: Supramolecular structures in complex systems from natural and synthetic polymers. Interaction between collagen, maleic polyelectrolytes and chromium ions, *Rev. Roum. Chim.* 47(3-4), 2002.

21. Cogswell F.N.: Microstructure and properties of thermoplastic aromatic polymer composites, *Journal Japan Sampe Quarterly*, vol. 14, nr. 4, 1983.
22. Colombié M.: Problèmes d'assemblage posés par l'évolution des matériaux, *Soudage et Techniques Connexes*, vol.43, nr. ¾, p.172, 1989.
23. Curtașu, E.: Reducerea greutateii produselor prin utilizarea de noi materiale, INID, București, 1990.
24. Drăgulescu D., Popescu M.: Enciclopedia materialelor compozite, Editura Politehnică, Timișoara, 2006.
25. Drăgulescu D., Popescu M.: Perspective în dezvoltarea materialelor compozite, în contextul dezvoltării "noilor materiale", *Buletin de Informare Documentară BID-Sudura*, an I, nr. 1, p. 4-7, 1992.
26. Davidescu C.M.: Aplicații ale polimerilor, Editura Universitatea Tehnică din Timișoara, Timișoara 1992.
27. Drăgulescu D., Popescu M.: Prognoza utilizării materialelor compozite în diferite domenii. Sinteza IDMK nr. 12-35, OID.ICM București, 1994.
28. Fikentscher H., R. Pummerer: *Chem. Textilfasern, Filme u. Folien* 1953.
29. Guran C.: *Organometallic Chemistry*, Ed. UPB, 1994.
30. Guran C., Jitaru I.: *Chimie anorganica. Probleme, întrebări, raspunsuri*, vol. 2, Ed. Tehnica, 1995.
31. Gottstein, G.: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. Auflage. Springer-Verlag, Heidelberg, 2001.
32. Grimm, T.G.: Squeezing flow of polymeric liquids, *American Institute Of Chemical Engineers Journal*, vol. 24, nr. 3, p.58-60, 1978.
33. Hausen J.: *Werkstoffe aus der Retorte*, Franzis-Verlag, 1994.
34. Harper, A.: *Handbook of plastics, elastomers and composites*, 2-nd Edition Mc.Graw-Hill Book, Sua, New York, 1997.
35. Haiduc I.: *Chimia compusilor metalorganici*, Editura Științifică, București, 1974.
36. Hoffmann R. & Knappe W. : *Kolloid-Z & Polymere* 240, p. 784-789, 1970.
37. Ispas S.: *Materiale, elaborare, utilizare, reciclare, înlocuitori, tehnologii, calitate, mașini, materiale, progres tehnic*, TCMM, Editura Tehnică, nr. 2, 1988.
38. Jacsch E., Chetariti D. : *Materiale plastice poliamidice*, p.14...29, Ed. Tehnică București, 1988.
39. Kraus & Kraus Academie: *Methods of Time Management and Process Planning*, p. 8-15, Germany, 2010.
40. Kissling D.: *Plaste and Kautschuk*, Germany, p. 679-685, 1972.
41. Kogyo Chosakai Publishing Co, Ltd, Japan: *Plastic utilization*, 3rd edition, 2009.
42. Lorenscheit K.: *Frequenz Technik*, Verlag, Mainz, Germany, 1997/1998.
43. Leontin David, Onuc Cozar, Castelia Cristea, Luiza Gaina: *Identificarea structurii moleculare prin metode spectroscopice*, Presa Universitară Clujeană, 2004.
44. Manea D.: *Tehnologiile și materialele viitorului*, INID, București, 1988.
45. Mihalcu M.: *Materiale plastice armate*, Editura Tehnică, București, 1986.
46. Mitelea I., Radu B.: *Selecția și utilizarea materialelor ingineresti*, Editura Politehnică, Timișoara, 2004.
47. Mitelea I., **Vărzaru N**: *Researches of High Frequency Welding Process Validation for Same Polymers*, *Revista de Materiale plastice*, Vol.3, pp. 289 - 293, ISSN 1454-4164, București, România, 2008.

48. Mitelea I., **Vărzaru N.**: The High Frequency Welding Aptitude of Thermoplastic Polymers, *Revista de Materiale plastice*, Vol.1, pp.101-107, ISSN 1454-4164, București, România, 2009.
49. Mitelea I., **Vărzaru N.**: Failure Analysis of High Frequency Welding Fixed Joints of Thermoplastic Polymers, *Revista de Materiale plastice*, Vol.4, pp. . 439 -443 ISSN: 1454-4164, București, România, 2009.
50. Mitelea I., **Vărzaru N.**: Algoritmul de calcul pentru matrita simetrica de sudare cu curenti de inalta frecventa a foliilor de policlorura de vinil, *Revista Asociatiei de sudura din Romania SUDURA*, P6-10, ISSN 1453 – 0384, XXI/ 3-2011.
51. Mitrache M.: Noi materiale pentru industria de automobile, TCCM, Editura Tehnică, București, nr. 5, 1989.
52. Mottram T.: Fibre reinforced polymer composites in structural engineering, *Structural Engineer*, vol. 82, nr. 14, 2004.
53. Moțoiu M. și Palade T.: Rășini poliesterice nesaturate, Editura Tehnică, București, 1986.
54. Miessler G.L., Tarr D.A.: *Inorganic Chemistry*, Prentice Hall Inc., USA, 1991.
55. Michael Ash, Irene Ash: *Handbook of Food Packaging Chemicals and Materials*, 1999.
56. Manfred Schlosser, John Wiley & Sons: *Organometallics in Synthesis. Manual*, 2nd edition, ed. by, 2002.
57. Nenitescu C.D.: *Chimie organica*, vol. I, Ed. Didactică și Pedagogică București, 1980.
58. Novacu V.: *Electrodinamica*, Editura didactică și pedagogică-București 1966.
59. Nenițescu C.: *Enciclopedia de Chimie*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, vol. I-VI, 1989.
60. Pece S.: *Managementul securității și sănătății în muncă*, AGIR, București, 2001.
61. Pece S.: *Evaluarea riscurilor în sistemul om-mașină*, Atlas, București, 2001.
62. Parry R. T.: *Principles and applications of modified atmosphere packaging of foods*, Edition: 2nd, 1999.
63. Petruș O.: *Materiale polimerice*, Editura Cermi, Iași, 1999 .
64. Popescu M. ș.a.: *Materiale avansate – ISIM Rezumate*, 2001.
65. Popescu M., Cleșiu S.R.: *Metode de sudare a materialelor compozite termoplastice*, Sesiunea Academiei Timișoara, 1992.
66. Popescu M.: *Îmbinarea materialelor avansate: ●●● Materiale compozite*, Editura Eurostampa, Timișoara, 2002.
67. Popescu M.: *Tehnici de îmbinarea materialelor plastice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2004.
68. Peukert H.: *Vortrag GIS*, Munchen, Oktober 1962.
69. Rubin I.: *Handbook of Plastic Materials and Technology*, Ed. John Wiley&Sons, New York, SUA, 1990.
70. Sandu Ioan-Gheorghe: *Raport de Cercetare Grant*, COD CNCIS 500/2004, Universitatea "Politehnica" din București.
71. Segovia F. ș.a.: *Evolution of tensile behaviour on polyester-glass fibre composites thermal and sunlight degraded*, CENIM - *Revista de metalurgie*, vol. 37, nr. 7 , p.51-56, 2001.
72. Shriver D.F., Atkins P.W., Langford C.H.: *Chimie anorganica*, Ed. Tehnica, 1998.
73. Schatt W., Worch H.: *Werkstoffwissenschaft. Auflage*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2002.

74. Scott P. F.: Key Parameters of High Frequency Welding, Proceedings of the Tube/Pipe Congress 96, Dusseldorf, Germany, April 16-18, 1996.
75. Schreyer G., Szigeti P. R.: Kunststoffe, p.703-710, 1963.
76. Smyth C. P.: Dielektric Behavior und Strukture, New York 1955.
77. Steger J. G.: Plastverarbeiter, p. 43/44, 1971.
78. SR ISO/TS 16949: Editia 1, ASRO Bucuresti, p.40...48, 2002.
79. Taylor N.S., Watson M.N.: Welding techniques for plastics and composites, Joining and Materials, p.78-81, 1988.
80. Tătar Moiescu E., Timiș L.: Materiale compozite, INID, București, 1988.
81. Tătar Moiescu E.: Fabricarea și utilizarea materialelor compozite, INID, București, 1985.
82. Timiș L.: Materiale noi cu proprietăți speciale, INID, București, 1989.
83. Trifănescu C.: Materiale plastice. Rezistența la agenți chimici, Editura Tehnică, București, 1985.
84. Thomass H.: PVC-Folien, C. Hanser-Verlag 1963.
85. Thinius K., W. Reicherdt, C. Hsiao-zuan: Plaste und Kautschuk ,1964.
86. Tudorachi, N.: Studiul de biodegradare a unor materiale compozite cu matrici termoplastice și materiale lignocelulozice, Materiale Plastice, vol. 41, nr. 4, 2004.
87. Vasilescu, E. ș.a.: Rășini poliesterice. Performanțe anticorozive în medii agresive, Revista de chimie, vol. 51, nr. 7, 2003.
88. Victor O. Sheftel: Indirect Food Additives and Polymers - Migration and Toxicology, 2000.
89. VHA National Center for Patient Safety: Healthcare Failure Mode and Effect Analysis (HFMEATM), Internet, 2001.
90. Vasiliu O. ș.a.: Polimeri-Structură și proprietăți, vol. II, Editura Tehnică, București, 1986.
91. Vavilov V. ș.a.: Thermal nondestructive testing of carbon epoxy composites: detailed analysis and data processing, NDT, vol. 26, nr. 2, p.81-86, 1993.
92. **Varzaru N.**, Mitelea I.: The influence of physical parameters of the high frequency welding of polymers, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, Vol 56(70) ISSN 1224 – 6077, Iss. 1, p31-36, 2011.
93. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: Implementation of health and safety management system in automotive industry, International conference Saffety of technical systems in living and working enviroment, University of Nis, Serbia, p. 131-137, October 2011, ISBN 978-86-6093-035-6.
94. Vujić G. V.: Assessment of plastic flows and stocks using material flow, thermal science: Vol. 14, p. 89-S95, Serbia, 2010.
95. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: About the thermal gradient at the high frequency simetric welding of thermoplastics, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, 2012 (acceptată pentru publicare).
96. **Vărzaru N.**, Mitelea I.: The influence of physical parametres of the high frequency welding of polymers, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Romania Transactions on Mechanics, România, Seria Mecanică, 2012 (acceptată pentru publicare).
97. Velceanu C.: Metode fizice de investigare a polimerilor, Editura științifică, București 1992.
98. Victor O. Sheftel: Indirect Food Additives and Polymers , 2000.

99. Wurstlin F., Klein H.: Kunststoffe, p. 445 , 1952.
100. Wurstlin F.: Kolloid-Z. 152, p. 31 , 1957.
101. Wintergerst S.: Gummi-Asbest-Kunststoffe, p. 408, 1965.
102. Wintergerst S.: Elektrotechn. Zeitschrift 71, H. 4, p.79, 1950.
103. Wtirstlin F.: Nachrichtentechn. Fachberichte, Beihefte der NTZ , p. 18- 24 (Technical news. Technical Reports), 1964.
104. ***: Composite Materials Handbook, Department Of Defense Handbook, vol. 4, Metal Matrix Composites, vol. 4, 21 sept, 1999.
105. ***: Handbook of Reinforcement for Plastics, Edition Katz And Milewski, 1987.
106. *** :The Compelling Facts About Plastics 2009,
107. *** :An Analysis of European Plastics Production and Recovery for 2008.
108. ***: Normalisation Renault Automobiles - Renault V.I. Service 60201 Section Normes et Cahiers des Charges: Norma 1033- Shearing Stengh of HF Welds Textiles- Plastic Sheets, Plastic- Coated Textiles, p.2...5, Revision February 1994.
109. ***: Industry of the Republic of Serbia 2008, Statistical Office of the Republic of Serbia, ISSN 0354 – 3641, Belgrade, 2009.