

INTEGRITATEA STRUCTURALĂ A COMPONENTELOR DIN MATERIALE TERMOPLASTICE ÎMBINATE PRIN SUDARE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Marius Cocard

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina
Referenți științifici: Prof.univ.dr.ing. Cristian Mircea Dudescu
C.S.I dr.ing. Doru Romulus Pascu
Prof.univ.dr.ing. Nicolae Faur

Ziua susținerii tezei: 27.11.2015

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 | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica 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, 2015

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 Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

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

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul stagiului doctoral desfășurat în Departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor al Universității "Politehnica" Timișoara, respectiv a activității desfășurate la Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului științific de doctorat Prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina pentru îndrumarea acordată la alcătuirea structurii tezei, elaborarea și realizarea programului experimental, respectiv pentru sfaturile oferite la valorificarea și publicarea rezultatelor cercetărilor experimentale.

Mulțumesc tuturor cadrelor didactice, colegilor și colaboratorilor din cadrul Universității "Politehnica" Timișoara și ISIM Timișoara care m-au ajutat în procesul de cunoaștere științifică, al cercetărilor și valorificării rezultatelor experimentale.

Timișoara, Noiembrie 2015

Marius Cocard

Cocard, Marius

Integritatea structurală a componentelor din materiale termoplastice îmbinate prin sudare

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 163, Editura Politehnica, 2015, 184 pagini, 182 figuri, 12 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-606-554-952-4

Cuvinte cheie: Integritate, Materiale termoplastice, Sudare, Încercări mecanice, Termografie, Mecanica ruperii, Tenacitate, Integrala J, Planificare experimente (DOE), Optimizare.

Rezumat,

Teza este concepută și structurată pe șapte capitole în care sunt prezentate aspecte legate de structura și reologia polimerilor, particularități specifice privind îmbinarea prin sudare a componentelor din materiale termoplastice, comportarea la solicitări statice și la încercări de mecanica ruperii a materialelor de bază și a îmbinărilor sudate, respectiv metode moderne de realizare a programelor experimentale și optimizare a proceselor de sudare, care au fost îmbinate armonios în cadrul cercetărilor experimentale realizate, în scopul creșterii fiabilității sistemelor tehnice ce includ componente din materiale termoplastice.

CUPRINS

NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME	8
LISTA DE FIGURI	9
LISTA DE TABELE	15
1. OBIECTIVELE ȘI STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT	16
1.1. Actualitatea și importanța temei de cercetare abordată în teza de doctorat.....	16
1.2. Obiective	17
1.3. Structura tezei	18
2. MATERIALE TERMOPLASTICE.....	20
2.1. Introducere	20
2.2. Proprietăți generale ale polimerilor.....	22
2.2.1. Structura polimerilor.....	22
2.2.2. Proprietățile termice ale polimerilor	25
2.3. Comportarea reologică a polimerilor	27
2.3.1. Modele mecanice.....	27
2.3.2. Corpuri vâscoelastice	28
2.3.3. Ecuații reologice.....	30
2.3.4. Vâscoelasticitatea polimerilor.....	33
2.4. Concluzii privind proprietățile materialelor polimerice	36
3. PROCEDEE DE SUDARE PENTRU MATERIALE TERMOPLASTICE.....	37
3.1. Modalități de îmbinare a componentelor din materiale termoplastice	37
3.1.1. Sudarea țevilor și fittingurilor.....	40
3.1.2. Sudarea geomembranelor	48
3.1.3. Metode de examinare nedistructivă pentru îmbinări sudate din materiale termoplastice.....	50
3.2. Moduri și mecanisme de cedare	54
3.2.1. Mecanismul ruperii polimerilor	55
3.2.2. Moduri și procese specifice ruperii materialelor polimerice.....	56

3.3. Imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate	58
3.3.1. Imperfecțiuni și defecte	58
3.3.2. Tipuri de imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate la conducte	59
3.4. Concluzii privind sudarea și examinarea sudurilor	69
4. COMPORTAREA LA SOLICITĂRI MECANICE A MATERIALELOR DE BAZĂ	71
4.1. Considerații generale	71
4.2. Caracterizarea ruperii materialelor polimerice	72
4.2.1. Comportarea vâscoelastică	72
4.2.2. Modele mecanice ale comportării vâscoelastice	74
4.2.3. Curgerea și ruperea polimerilor	76
4.3. Comportarea la solicitări statice a materialelor de bază	81
4.3.1. Proprietăți mecanice ale materialelor termoplastice	81
4.3.2. Determinarea experimentală a caracteristicilor de tracțiune pe materiale de bază	87
4.4. Comportarea la încercări de mecanica ruperii a materialelor de bază	94
4.4.1. Determinarea experimentală a parametrilor de mecanica ruperii pe materiale de bază	94
4.4.2. Determinarea parametrilor de mecanica ruperii prin metoda elementelor finite	100
4.5. Concluzii privind comportarea la solicitări mecanice a materialelor de bază	104
5. COMPORTAREA LA SOLICITĂRI MECANICE A ÎMBINĂRILOR SUDATE ..	105
5.1. Considerații generale	105
5.2. Comportarea la solicitări statice a îmbinărilor sudate	106
5.2.1. Determinarea experimentală a caracteristicilor de tracțiune pe îmbinări sudate	106
5.3. Comportarea la încercări de mecanica ruperii a îmbinărilor sudate	112
5.3.1. Determinarea experimentală a parametrilor de mecanica ruperii pe îmbinări sudate	114
5.4. Concluzii privind comportarea la solicitări mecanice a îmbinărilor sudate	121

6. CREȘTEREA FIABILITĂȚII COMPONENTELOR SUDATE	122
6.1. Considerații privind optimizarea Response Surface Design (RSD)	122
6.2. Optimizarea procesului de sudare pentru țevi PE80	124
6.2.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru țevi PE80	125
6.2.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale	128
6.2.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevile PE 80	128
6.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevi PE100	138
6.3.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru țevi PE100	139
6.3.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale	141
6.3.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevile PE100	144
6.4. Optimizarea procesului de sudare pentru geomembrane	156
6.4.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru geomembrane	157
6.4.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale	160
6.4.3. Optimizarea procesului de sudare pentru geomembrane	163
6.5. Concluzii privind optimizarea proceselor de sudare	167
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	169
7.1. Concluzii.....	169
7.2. Contribuții personale.....	171
BIBLIOGRAFIE	173

NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME

Simbol - Descriere

a_0	- lungimea inițială a fisurii (determinarea integralei J)
B	- grosimea epruvetei (determinarea integralei J)
DOE	- proiectare a experimentelor (design of experiments)
IS	- îmbinare sudată
J	- Integrala J
J-R	- curbele J-R
MB	- material de bază
MFR	- indice de fluiditate la cald în masă
MRS	- rezistența minim necesară
NDT	- examinare nedistructivă
PE	- polietilenă
PE-HD	- polietilenă de înaltă densitate
PE-LD	- polietilenă de joasă densitate
PE-LLD	- polietilenă liniară de joasă densitate
PE-MD	- polietilenă de medie densitate
PP	- polipropilenă
PVC-U	- policlorură de vinil neplastifiată
PVDF	- polifluorură de viniliden
RCP	- propagarea rapidă a fisurii
RSD	- response surface design
SDR	- raportul dimensional standard
SUD	- sudură
W	- lățimea epruvetei (determinarea integralei J)
ZIT	- zona influențată termic
Δa	- extensia fisurii

LISTA DE FIGURI

Figura 2.1 Evoluția producției de materiale plastice pe plan mondial în perioada 1960 - 2020	21
Figura 2.2 Macromolecule: a) liniare; b) ramificate; c) reticulate.	22
Figura 2.3 Distribuția moleculelor în rețea.....	23
Figura 2.4 Compus macromolecular a) structură amorfă; b) structură parțial cristalină.....	24
Figura 2.5 Materiale termoplastice parțial cristaline și amorfe	25
Figura 2.6 Dependența de temperatură a volumului specific [9].....	25
Figura 2.7 Triunghiul comportărilor reologice.....	29
Figura 2.8 Corelația dintre tensiune și deformație în cazul comportării elastice [13]	29
Figura 2.9 Corelația dintre tensiune și deformație în cazul unui fluid Newtonian	30
Figura 2.10 Resort elastic (a), curbele deformație - timp (b) și tensiune - deformație (c), pentru solidul ideal [14]	32
Figura 2.11 Amortizor (a), curbele deformație - timp (b) și tensiune - deformație (c), pentru fluidul ideal [14].....	32
Figura 2.12 Modelul Maxwell (a), curba deformație - timp (b) și curba tensiune -deformație (c) [14]	34
Figura 2.13 Modelul Voigt (a), curba de fluaj (b) [14].....	34
Figura 2.14 Modele cu trei elemente: Modelul Voigt legat în serie cu elementul elastic (a), Modelul Maxwell legat în paralel cu elementul elastic (b) [14].....	35
Figura 2.15 Modele cu patru elemente: Modelul Alfrey (a), două modele Maxwell (b) [14]	35
Figura 3.1 Sudarea cap la cap cu element încălzitor - Echipament de tip GF	38
Figura 3.2 Sudarea tip manșon cu element încălzitor - Echipament de tip GF.....	38
Figura 3.3 Sudare prin electrofuziune - Echipament de tip FUSION - QBOX	39
Figura 3.4 Sudare cu material de adaos extrudat - Echipament de tip MUNSCH - MAK 18	40
Figura 3.5 Schema de principiu a sudării cap la cap cu element încălzitor.....	41
Figura 3.6 Diagramă de sudare pentru țevi și fittinguri PE80, respectiv pentru PE100 numai la grosimi de perete $e < 20$ mm [35]	41
Figura 3.7 Diagramă de sudare pentru țevi și fittinguri PE100, cu grosimi de perete $e \geq 20$ mm [35]	42
Figura 3.8 Echipament de sudare cap la cap cu element încălzitor RITMO DELTA 250.....	43
Figura 3.9 Cerințe de poziționare a componentelor.....	44
Figura 3.10 Răcirea îmbinării sudate sub presiune.....	44
Figura 3.11 Electrofiting tip manșon	45
Figura 3.12 Electrofiting tip derivație.....	45
Figura 3.13 Tipuri de îmbinări sudate prin electrofuziune	46
Figura 3.14 Codul cu bare pe un electrofiting de tip manșon.....	46
Figura 3.15 Identificarea fittingului prin citirea codului cu bare	47
Figura 3.16 Parcurgerea succesivă a etapelor necesare realizării îmbinării sudate .	47
Figura 3.17 Sudare cu pană încălzitoare - Echipament de tip HERZ - MION	48
Figura 3.18 Sudarea cu pană încălzitoare.....	49

Figura 3.19 Examinarea ultrasonică în tandem [41]	51
Figura 3.20 Examinarea ultrasonică cu undă longitudinală sub incidență normală [41]	51
Figura 3.21 Examinarea ultrasonică cu undă longitudinală sub incidență oblică [41]	51
Figura 3.22 Examinarea ultrasonică prin tehnica timpului de zbor - TOFD [41]	52
Figura 3.23 Creșterea fisurii la o încercare la încovoiere în trei puncte pe o epruvetă din polietilenă cu densitatea 0,964 g/cm ³ (SEM 315x) [62]	56
Figura 3.24 Fisură ductilă într-o țevă PE-HD, supusă la presiune interioară hidrostatică	57
Figura 3.25 Relația imperfecțiune - defect [67]	58
Figura 3.26 Epruvetă prelevată din îmbinare din sudată cap la cap cu element încălzitor (țevi PE-HD Ø 250 x 24 mm)	60
Figura 3.27 Imperfecțiune de tip nealinie axială	60
Figura 3.28 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 110 x 10 mm) - Imperfecțiune de tip nealinie axială, având excentricitatea $\Delta e = 0,4$ mm	61
Figura 3.29 Imperfecțiune de tip nealinie unghiulară	61
Figura 3.30 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 125 x 11 mm) - Imperfecțiune de tip nealinie unghiulară	61
Figura 3.31 Imperfecțiune de tip bavură excesivă	62
Figura 3.32 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 250 x 24 mm) - Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei	62
Figura 3.33 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 125 x 11,8 mm) - Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei	63
Figura 3.34 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 110 x 8,2 mm) - Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei	63
Figura 3.35 Imperfecțiune de tip lipsă de topire	63
Figura 3.36 Epruvetă încercată la tracțiune (țevi PE-HD Ø 110 x 10 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	64
Figura 3.37 Epruvetă încercată la tracțiune (țevi PE-HD Ø 110 x 10 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	64
Figura 3.38 Epruvetă încercată la încovoiere (țevi PE-HD Ø 110 x 10 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	64
Figura 3.39 Imperfecțiune de tip lipsă de topire	65
Figura 3.40 Epruvete tronson încercate la tracțiune	66
Figura 3.41 Epruvetă fâșie, vedere laterală (țevi PE-HD cu grosime de 12 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	66
Figura 3.42 Epruvetă fâșie, suprafață de rupere (țevi PE-HD cu grosime de 12mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	66
Figura 3.43 Epruvetă fâșie, vedere laterală (țevi PE-HD cu grosime de 18 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	66
Figura 3.44 Epruvetă fâșie, suprafață de rupere (țevi PE-HD cu grosime de 18 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	66
Figura 3.45 Porțiune din îmbinare sudată prin electrofuziune tip manșon, vedere frontală (țevi PE-HD Ø 180 x 16 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	67
Figura 3.46 Porțiune din îmbinare sudată prin electrofuziune tip manșon, suprafață de contact (țevi PE-HD Ø 180 x 16 mm) - Imperfecțiune de tip lipsă de topire	67
Figura 3.47 Imperfecțiune de tip pătrundere incompletă	68
Figura 3.48 Imperfecțiune de tip lipsă de legătură	68

Figura 3.49 Epruvetă prelevată din îmbinare sudată prin electrofuziune tip derivație (țeavă PE-HD Ø 63x5,8 mm) – Imperfecțiune de tip retasură.....	69
Figura 3.50 Epruvetă prelevată din îmbinare sudată prin electrofuziune tip derivație (țeavă PE-HD Ø 63x5,8 mm) – Imperfecțiune de tip retasură.....	69
Figura 4.1 Deformația lanțului polimeric. Forțe de legătură tip Van der Waals [76].	73
Figura 4.2 Modele mecanice pentru deformația vâscoelastică a polimerilor [76]	75
Figura 4.3 Formațiuni "craze" la polimeri amorfi. Zonele "craze" cresc prin atragerea de material suplimentar spre fibrile [76]	78
Figura 4.4 Zonă de microfisurare în polistiren [77].....	78
Figura 4.5 Schematizarea zonei cu microfisurare la vârful fisurii [76]	79
Figura 4.6 Imagine SEM a unei suprafețe de rupere dintr-o zonă "craze" în polipropilenă [76]	80
Figura 4.7 Procesul de creștere lentă a fisurii într-o zonă cu microfisurare, la o țeavă din polietilenă PE 100 [77]	80
Figura 4.8 Diagrama tensiune – deformație pentru materiale termoplastice [78]...	81
Figura 4.9 Efectul temperaturii asupra comportării materialelor termoplastice [78]	82
Figura 4.10 Efectul vitezei de deformare asupra comportării materialelor termoplastice [78]	83
Figura 4.11 Dependența tensiune-deformație la diferite tipuri de ABS [78].....	83
Figura 4.12 Curbe specifice pentru încercarea la tracțiune a PVC-U [78]	85
Figura 4.13 Curbe de fluaj pentru polipropilenă la 20 ° C (densitate 909 kg/m ³) [78]	85
Figura 4.14 Epruvetă pentru încercare la tracțiune din material PE80 (MB).....	87
Figura 4.15 Epruvetă pentru încercare la tracțiune din material PE100 (MB).....	87
Figura 4.16 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE80 - MB18 (23 ° C)	88
Figura 4.17 Diagramele încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE80: MB18(23 ° C), MB21(10 ° C) și MB24(0 ° C)	89
Figura 4.18 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 23 ° C	89
Figura 4.19 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 0 ° C.....	90
Figura 4.20 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C.....	90
Figura 4.21 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru materialul PE80 (MB)	91
Figura 4.22 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta PE100 - MB18 (23 ° C).....	91
Figura 4.23 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE100: MB18(23 ° C), MB21(10 ° C) și MB24(0 ° C)	92
Figura 4.24 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 23 ° C	92
Figura 4.25 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 0 ° C.....	93
Figura 4.26 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C.....	93
Figura 4.27 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru materialul PE100 (MB).....	94
Figura 4.28 Epruvetă pentru încercare la încovoiere SE(B)	95

Figura 4.29 Mașină de încercare la tracțiune în regim static Zwich/Roell Z005	95
Figura 4.30 Epruvete prelevate din material de bază PE100 (MB), prelucrate cu crestătură pentru încercarea la încovoiere în trei puncte	96
Figura 4.31 Epruveta MB3 – încercare la încovoiere în trei puncte	96
Figura 4.32 Suprafața de rupere a epruvetei MB7	97
Figura 4.33 Suprafața de rupere a epruvetei MB10	97
Figura 4.34 Măsurarea extensiei fisurii.....	98
Figura 4.35 Curba J-R pentru materialul de bază PE100.....	99
Figura 4.36 Modelul 3D al epruvetei cu definirea materialului	101
Figura 4.37 Definirea încărcării și a punctelor de rezemare.....	102
Figura 4.38 Discretizarea structurii.....	102
Figura 4.39 Distribuția tensiunilor von Mises	103
Figura 4.40 Distribuția tensiunilor normale S11	103
Figura 5.1 Epruvetă pentru încercare la tracțiune, prelevată din îmbinare sudată PE80 (IS).....	107
Figura 5.2 Epruvetă pentru încercare la tracțiune, prelevată din îmbinare sudată PE100 (IS).....	107
Figura 5.3 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE80 – IS2 (23 ° C)	108
Figura 5.4 Diagramele încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE80 – IS2 (23 ° C), PE80 –IS4 (10 ° C) și PE80 –IS7 (0 ° C).....	108
Figura 5.5 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (IS) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C	109
Figura 5.6 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru PE80 (IS)	109
Figura 5.7 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE100 – IS2 (23 ° C)	110
Figura 5.8 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE100 – IS2 (23 ° C), IS4 (10 ° C) și IS7 (0 ° C)	110
Figura 5.9 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (IS) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C	111
Figura 5.10 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru PE100 (IS)	111
Figura 5.11 Epruvete cu crestătură în ZIT destinate pentru încercarea la încovoiere în trei puncte	114
Figura 5.12 Epruvete cu crestătură în sudură (SUD) destinate pentru încercarea la încovoiere în trei puncte	115
Figura 5.13 Epruveta S1.6 – încercare la încovoiere în trei puncte.....	116
Figura 5.14 Epruveta S2.2 – încercare la încovoiere în trei puncte.....	116
Figura 5.15 Suprafața de rupere a epruvetei S1.4 (ZIT).....	117
Figura 5.16 Suprafața de rupere a epruvetei S1.6 (ZIT).....	117
Figura 5.17 Suprafața de rupere a epruvetei S2.2 (SUD)	118
Figura 5.18 Suprafața de rupere a epruvetei S2.4 (SUD)	118
Figura 5.19 Curba J-R pentru epruvete din îmbinare sudată PE100, cu crestătura în ZIT.....	119
Figura 5.20 Curba J-R pentru epruvete din îmbinare sudată PE100, cu crestătura în sudură	120
Figura 5.21 Curbele J-R pentru epruvete PE100, cu crestătura în MB - ZIT – sudură.....	120
Figura 6.1 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru țevi PE 80	125
Figura 6.2 Diagrama de sudare pentru țevi PE 80	126
Figura 6.3 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t5 și temperatura T	129

Figura 6.4 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t1 și timpul t5	130
Figura 6.5 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t1.....	130
Figura 6.6 Dependența: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t1 și temperatura T	131
Figura 6.7 Dependența: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t1 și timpul t2.....	131
Figura 6.8 Dependența: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de presiunea P1 și temperatura T	132
Figura 6.9 Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t2 și temperatura T	132
Figura 6.10 Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t1 și timpul t2.....	133
Figura 6.11 Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de presiunea P1 și timpul t2.....	133
Figura 6.12 Curbe de nivel: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t1 și presiunea P1	134
Figura 6.13 Curbe de nivel: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1	134
Figura 6.14 Curbe de nivel: Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1	135
Figura 6.15 Dependența: Funcții obiectiv = f (t1, P1)	135
Figura 6.16 Dependența: Funcții obiectiv = f (t5, P1)	136
Figura 6.17 Dependența: Funcții obiectiv = f (T, t2).....	136
Figura 6.18 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru țevi PE100	138
Figura 6.19 Diagrama de sudare pentru țevi PE100	139
Figura 6.20 Mașină de încercare la tracțiune Zwich/Roell Z005	141
Figura 6.21 Suprafețe de rupere, rezultate prin încercarea la tracțiune	141
Figura 6.22 Aspectul microscopic al unor epruvete din cadrul programului experimental PE100	142
Figura 6.23 Laborator cu echipamentul experimental: LIEA – ISIM Timișoara	143
Figura 6.24 Variația temperaturii epruvetei TS9 – PE100 pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C	143
Figura 6.25 Epruvetă fisurată în zona ZIT – încercare la încovoiere la o temperatură de referință de -20 ° C	144
Figura 6.26 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t1.....	145
Figura 6.27 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t2.....	145
Figura 6.28 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t5.....	146
Figura 6.29 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul t1 și timpul t5.....	146
Figura 6.30 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de presiunea P1 și temperatura T	147
Figura 6.31 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul t5 și temperatura T	147
Figura 6.32 Dependența: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t2 și temperatura T	148

Figura 6.33 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_1 și timpul t_2	148
Figura 6.34 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de presiunea P_1 și timpul t_1	149
Figura 6.35 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul t_2 și temperatura T	149
Figura 6.36 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de presiunea P_1 și timpul t_2	150
Figura 6.37 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul t_1 și temperatura T	150
Figura 6.38 Curbe de nivel: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t_1 și presiunea P_1	151
Figura 6.39 Curbe de nivel: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul t_1 și presiunea P_1	151
Figura 6.40 Curbe de nivel: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_1 și presiunea P_1	152
Figura 6.41 Curbe de nivel: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul t_1 și presiunea P_1	152
Figura 6.42 Dependența: Funcții obiectiv = $f(t_1, P_1)$	153
Figura 6.43 Dependența: Funcții obiectiv = $f(T, P_1)$	153
Figura 6.44 Echipament de sudare cu pană încălzită electric.....	157
Figura 6.45 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru geomembrane din PE-HD	158
Figura 6.46 Suprafață de rupere epruveta 3.1 - rupere în sudură [149]	160
Figura 6.47 Suprafață de rupere epruveta 12.1 - rupere mixta sudură/material de bază [149]	160
Figura 6.48 Variația temperaturii epruvetei 1.5 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere în materialul de bază).....	161
Figura 6.49 Variația temperaturii epruvetei 3.1 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere în sudură)	162
Figura 6.50 Variația temperaturii epruvetei 12.1 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere mixtă în sudură - material de bază).....	162
Figura 6.51 Dependența: Rezistența la desprindere (P) funcție de viteza v și temperatura T	164
Figura 6.52 Dependența: Reducerea grosimii (RG) funcție de viteza v și forța de presare F	164
Figura 6.53 Curbe de nivel: Rezistența la desprindere (P) funcție de temperatura T și viteza v	165
Figura 6.54 Curbe de nivel: Reducerea grosimii (RG) funcție de forța de presare F și viteza v	165
Figura 6.55 Zona albă - zonă de optim: Funcții obiectiv = $f(T,F)$	166
Figura 6.56 Zona albă - zonă de optim: Funcții obiectiv = $f(v,F)$	166

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1 Evoluția producției de materiale plastice pe plan mondial în perioada 1960-2020.....	21
Tabelul 4.1 Influența factorilor asupra modului E și a ductilității	84
Tabelul 6.1 MRS pentru țevile din polietilenă tip PE 80	125
Tabelul 6.2 Programul experimental pentru sudarea țevilor PE 80	127
Tabelul 6.3 Parametrii de sudare optimi pentru țevile PE 80	137
Tabelul 6.4 Rezultate experimentale la varianta tehnologică optimă PE 80	137
Tabelul 6.5 MRS pentru țevile din polietilenă tip PE100	139
Tabelul 6.6 Programul experimental pentru sudarea țevilor PE 100	140
Tabelul 6.7 Parametrii de sudare optimi pentru țevile PE 100	154
Tabelul 6.8 Rezultate experimentale la varianta tehnologică optimă PE 100	154
Tabelul 6.9 Programul experimental pentru sudarea geomembranelor PE-HD	159
Tabelul 6.10 Parametrii de sudare optimi pentru geomembranele PE-HD	167

1. OBIECTIVELE ȘI STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

1.1. Actualitatea și importanța temei de cercetare abordată în teza de doctorat

Dezvoltarea materialelor termoplastice a cunoscut o amploare deosebită, fiind elaborate în prezent o multitudine de semifabricate și produse pentru diferite aplicații industriale.

Polimerii și în mod special materialele termoplastice sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații, incluzând industria aerospațială, electronică și cea de automobile, construcțiile civile și industriale, etc. Datorită creșterii în continuare a interesului față de utilizarea materialelor polimerice, devine deosebit de importantă cunoașterea comportării acestora în diferite condiții de solicitare.

Polimerii prezintă, în general, o comportare neliniară foarte complexă în funcție de acțiunea diferiților factori externi (starea triaxială de tensiune, viteza de deformare și temperatură), respectiv de parametrii structurali (gradul de cristalinitate, masa moleculară și modul de reticulare).

Aspectele legate, spre exemplu, de comportarea materialelor termoplastice în diferite condiții de solicitare sunt parțial cunoscute și soluționate, domeniul fiind într-o continuă dezvoltare.

Numeroși cercetători și-au îndreptat atenția spre a descoperi modele constitutive capabile de a simula comportarea vâscoelastică, respectiv vâscoplastică însoțite de deformații mari, specifice polimerilor cu o structură parțial cristalină.

Materialele termoplastice de tip polietilenă (PE) au devenit cele mai utilizate pentru realizarea sistemelor de conducte de gaz și apă, datorită multiplelor lor proprietăți ce constituie avantaje importante în comparație cu cele metalice, cum ar fi: densitate mai mică, rezistența chimică și la coroziune ridicate, posibilități de îmbinare prin sudare simple și rapide, costuri de montaj și întreținere relativ scăzute. Datorită cerințelor de siguranță în exploatare și durată de viață ridicate (estimată la peste 50 ani), aspectele legate de îmbinarea prin sudare a acestor componente au o importanță însemnată.

Statisticile arată că țevile din polietilenă (PE) constituie în prezent principala componentă (peste 90%) a sistemelor de gaze naturale nou instalate.

Datorită necesității de asigurare a unor condiții sporite de siguranță la conductele care funcționează sub presiune, în special la cele care transportă gaze naturale, cercetările de dată recentă au urmărit să evidențieze influența imperfecțiunilor din îmbinările sudate ale structurilor din polietilenă asupra comportării mecanice a acestora. Simulând o serie de imperfecțiuni sferice și plane de diferite dimensiuni în îmbinările sudate cap la cap cu element încălzitor, s-a urmărit ca prin încercări la tracțiune și analiză cu element finit să se evalueze influența acestora asupra calității îmbinării sudate. Rezultatele experimentale obținute au arătat că o imperfecțiune singulară, cu o dimensiune sub 15% din grosimea peretelui țevii poate fi acceptată, fără a compromite integritatea

structurală a conductei pe termen scurt de utilizare, neluându-se în considerare aspectele legate de fluajul pe termen lung sau de creștere lentă a fisurii [1].

Prezența unor imperfecțiuni în structura materialului de bază și în îmbinările sudate din materiale termoplastice, asociată cu o serie de condiții legate de temperatură, mediu de lucru și anumite condiții de solicitare au condus pe parcursul anilor la apariția unor avarii.

Astfel, în ciuda avantajelor pe care le prezintă materialele termoplastice, au fost totuși înregistrate și în ultima perioadă unele avarii în cadrul sistemelor de conducte destinate vehiculării apei și gazelor naturale, în diferite țări ([2], [3], [4]).

În țara noastră, în contextul diversificării și dezvoltării aplicațiilor industriale, prin utilizarea unor semifabricate și produse noi din materiale termoplastice, se înscrie și realizarea rețelelor de conducte destinate vehiculării fluidelor sub presiune.

Cu toate măsurile ce se cer firmelor de execuție privind asigurarea unui anumit nivel calitativ al lucrărilor, au fost înregistrate și o serie de avarii în ultimii zece ani, la diferitele lucrări efectuate în România [5]. Rezultatele expertizelor tehnice efectuate pe ansambluri și respectiv pe îmbinări sudate, au evidențiat preponderent situații în care îmbinările sudate au fost neconforme, componentele fiind încălzite doar superficial ceea ce a condus la așa numitele „suduri reci”, care au cedat în timpul exploatarei.

În unele din situațiile analizate, cu toate că s-au identificat defecte evidente la diferitele îmbinări sudate, ansamblurile examinate nu au cedat în urma încercării la presiune interioară de scurtă durată. Având în vedere că durata de viață a conductelor din polietilenă de înaltă densitate este estimată la cca. 50 ani, pe baza rezultatelor obținute se poate sublinia faptul că doar o verificare a etanșeității conductei la finalul lucrărilor este insuficientă, deoarece imperfecțiunile sau defectele potențiale se pot dezvolta într-un interval de timp mai scurt sau mai lung, fapt ce poate conduce la avarii.

Din acest motiv este deosebit de importantă și o verificare prin metode de examinare nedistructivă (NDT) a îmbinărilor sudate, în vederea decelării imperfecțiilor/defectelor, preîntâmpinând apariția avariilor și determinând astfel creșterea siguranței în exploatarea sistemelor de conducte. Una din metodele NDT moderne este examinarea cu ultrasunete de tip “phased array” [6].

În acest context, date fiind cele prezentate, se poate concluziona că există încă o serie de aspecte insuficient cunoscute în ceea ce privește caracterizarea acestor materiale și respectiv, referitor la comportarea în exploatarea componentelor din materiale termoplastice. Din acest motiv, se poate considera că tematica propusă spre a fi abordată în cadrul tezei este una actuală și de un real interes, atât la nivel național cât și internațional.

1.2. Obiective

Obiectivul principal al tezei îl constituie creșterea fiabilității sistemelor tehnice, ce includ componente din materiale termoplastice, prin îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate și optimizarea proceselor de sudare.

În vederea atingerii acestui obiectiv s-au urmărit o serie de obiective specifice:

- Cunoașterea structurii polimerilor și a aspectelor legate de reologia acestora, având în vedere comportarea lor vâscoelastică;
- Cunoașterea și aprofundarea particularităților legate de procedeele de sudare specifice îmbinării componentelor din materiale termoplastice;

- Identificarea principalelor moduri și mecanisme specifice ruperii polimerilor;
- Evidențierea principalelor tipuri de imperfecțiuni care apar la sudarea conductelor din materiale termoplastice și stabilirea cauzelor care le determină;
- Identificarea unor metode noi, moderne, performante de examinare nedistructivă a îmbinărilor sudate;
- Comportarea la solicitări statice și la încercări de mecanica ruperii a materialelor de bază;
- Comportarea la solicitări statice și la încercări de mecanica ruperii a îmbinărilor sudate;
- Identificarea unor modalități moderne de concepere și realizare a programelor experimentale;
- Identificarea și utilizarea unor metode moderne de optimizare a proceselor de sudare pentru componente din materiale termoplastice.

În scopul atingerii acestor obiective s-a conceput, dezvoltat și îmbunătățit continuu un program experimental specific, care să cuprindă o cercetare științifică cu caracter multidisciplinar incluzând aspecte legate de sudare și examinare nedistructivă, comportare la solicitări statice și încercări de mecanica ruperii polimerilor, utilizare a unor programe de calcul cu element finit și metode statistice de modelare a sistemelor tehnice.

1.3. Structura tezei

Teza este concepută și structurată pe 7 capitole în care sunt prezentate aspecte teoretice ale temei abordate, cercetările experimentale și elementele de noutate privind creșterea fiabilității sistemelor tehnice ce includ componente din materiale termoplastice.

În capitolul 1 sunt evidențiate o serie informații care descriu actualitatea și importanța temei de cercetare abordată, obiectivele și structura tezei de doctorat.

Capitolul 2 prezintă aspecte teoretice privind proprietățile materialelor polimerice și comportarea reologică a acestora.

Capitolul 3 prezintă câteva din principalele modalități de îmbinare specifice componentelor din materiale termoplastice. De asemenea, sunt detaliate aspectele tehnologice la procedeele de sudare utilizate în cadrul analizelor și cercetărilor experimentale efectuate. Se evidențiază principalele tipuri de imperfecțiuni care apar la sudarea conductelor din materiale termoplastice, punându-se accent pe evidențierea cauzelor care conduc la formarea acestora, în cazul îmbinărilor sudate cap la cap cu element încălzitor și prin electrofuziune.

În capitolul 4 sunt prezentate aspecte legate de comportarea la solicitări mecanice statice ale materialelor de bază utilizate în cadrul cercetărilor experimentale. De asemenea, se prezintă modalitățile de determinare experimentală și respectiv prin metoda elementelor finite a parametrilor de mecanica ruperii.

În cadrul capitolului 5 sunt prezentate cercetările experimentale realizate pe îmbinări sudate, în vederea determinării comportării acestora la solicitări mecanice statice și la încercări specifice de mecanica ruperii.

În capitolul 6 se prezintă modalități moderne de optimizare prin planificarea experimentelor folosind programul de planificare și calcul statistic MINITAB 15. Utilizând metoda Response Surface Design (RSD), în cadrul acestui capitol sunt descrise cercetările experimentale și rezultatele obținute la optimizarea proceselor de sudare specifice sudării cap la cap a conductelor și respectiv sudării cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

În capitolul 7 sunt prezentate concluziile și principalele contribuții personale ale autorului.

2. MATERIALE TERMOPLASTICE

2.1. Introducere

Ingineria materialelor cuprinde patru mari grupe de materiale: metalice, ceramice, polimerice și compozite. Grupa materialelor polimerice se bucură în prezent de o atenție deosebită, existând astăzi peste 60 de tipuri principale de materiale plastice, respectiv, dacă se iau în considerație și rășinile modificate cu diverși aditivi, se ajunge la mii de materiale polimerice comerciale.

Dezvoltarea materialelor plastice artificiale, numite și "rășini sintetice" s-a realizat în mod deosebit în ultimii 50 de ani. Se cuvine însă a menționa faptul că toate realizările din prezent își au "rădăcinile" în secolele trecute.

Astfel în 1860, chimistul scoțian Thomas Graham a descoperit proprietatea anumitor substanțe de a polimeriza, adică de a-și "suda" moleculele în lanțuri foarte lungi, care unindu-se unele cu altele prin ramificații laterale, dau naștere unui material plastic.

O descoperire foarte importantă s-a realizat în 1907, când chimistul american de origine belgiană Leo Hendrik Baekeland descoperă bachelita, prima rășină sintetică, obținută prin condensarea fenolului cu aldehida formică [7].

În anul 1920, Hermann Staudinger a pus bazele chimiei polimerilor - chimia macromoleculară. Chimistul american Wallace Hume Carothers a studiat polimerii și procesele de polimerizare, descoperind în anul 1937 nailonul.

În 1933, chimiștii E.W. Fawcett et R.O. Gibson au descoperit o substanță obținută prin polimerizare numită polietilenă, prin care și-au adus o contribuție importantă la dezvoltarea materialelor termoplastice.

Continuând cercetările în acest domeniu, Karl Waldemar Ziegler și Giulio Natta realizează în anii 1960 un prim procedeu de fabricație la presiune joasă a polietilenei cu structură rectilinie, folosind un catalizator specific [7].

De-a lungul timpului, în scopul descoperirii și dezvoltării de noi materiale polimerice, eforturile cercetătorilor au fost concentrate pe mai multe direcții, cum ar fi: obținerea unor materiale plastice cu proprietăți și durată de funcționare ridicate, folosirea materialelor plastice în domenii și aplicații în care acestea să aibă eficiență maximă - vizând chiar înlocuirea materialelor metalice tradiționale, și respectiv îmbunătățirea permanentă a tehnologiilor de sinteză și prelucrare.

În vederea obținerii anumitor produse, în cadrul tehnologiilor de prelucrare a polimerilor, de cele mai multe ori, se utilizează amestecuri de polimeri cu alte substanțe denumite auxiliari sau aditivi, care îmbunătățesc condițiile de formare și proprietățile de utilizare, cum ar fi de exemplu: plastifianți, stabilizatori, materiale de armare, agenți de antistatici, agenți de reticulate, etc.

Materialele plastice s-au dezvoltat continuu, având aplicații în domenii dintre cele mai diverse, producția acestora cunoscând o creștere permanentă. Astfel, dacă în anul 1960 la nivel mondial au fost produse 7 milioane tone materiale plastice, în anul 2000 s-a atins o producție de 160 milioane tone. În această perioadă rata medie de creștere a producției de materiale plastice pe an a fost de 8,2 %, respectiv pe perioada dintre anii 2000 - 2020 se estimează o rată medie de creștere anuală de 6,25 % pe an, astfel încât în anul 2020 se preconizează o producție de 538 milioane tone (Tabelul 2.1 și Figura 2.1) [8].

Tabelul 2.1 Evoluția producției de materiale plastice pe plan mondial în perioada 1960-2020

Materiale Plastice /An	Producția de materiale plastice (mii tone)					Creștere anuală medie (%)	
	1960	1979	2000	2010	2020	1960-2000	2000-2020
Uz general	7000	60000	155000	287000	510000	8	6,15
Inginerie	50	900	4500	12000	24500	12	8,8
Speciale	3	40	170	400	1100	11	9,8
Compozite	0	1	80	200	500	23	9,6
Total	7053	60941	159750	299600	536100	8,2	6,25

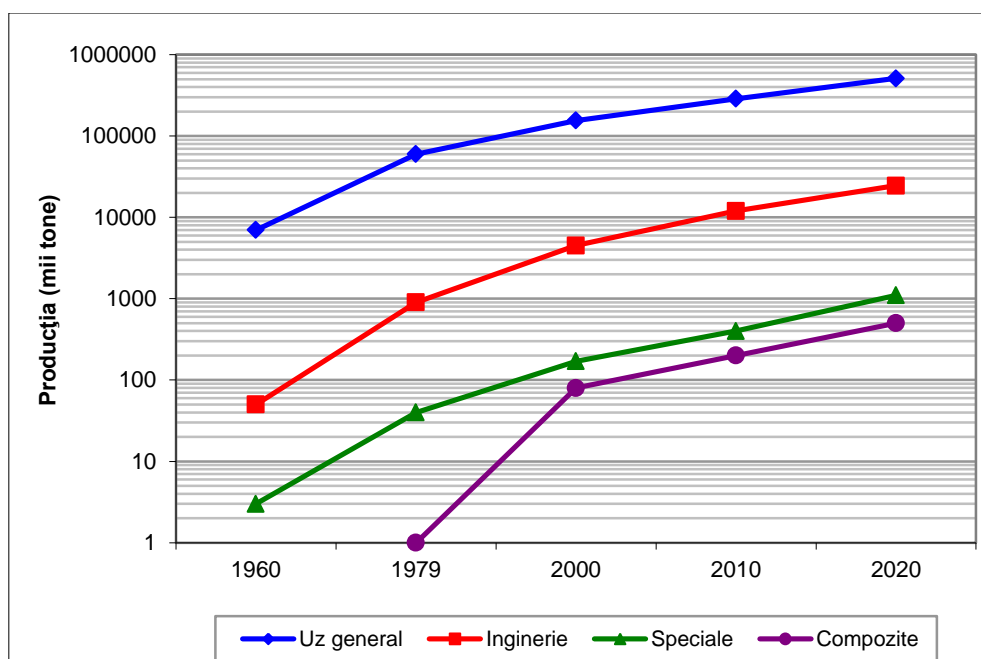


Figura 2.1 Evoluția producției de materiale plastice pe plan mondial în perioada 1960 - 2020

Cu toate că numărul polimerilor sintetizați în ultimii ani este însemnat, cea mai mare parte este acoperită de produsele realizate din materiale termoplastice: poliolefine (polietilenă și polipropilenă), policlorură de vinil și polistiren.

Din cadrul materialelor termoplastice, o pondere însemnată o au materialele destinate realizării țevilor și fittingurilor pentru conductele de transport a fluidelor sub presiune. Polimerii cei mai folosiți în acest scop sunt: polietilena (PE), polipropilena (PP), policlorura de vinil (PVC), polifluorura de viniliden (PVDF), etc.

Țevile din materiale termoplastice și în special cele din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), prezintă un interes deosebit în momentul actual, date fiind proprietățile lor superioare, adecvate utilizării acestor produse la vehicularea diferitelor lichide și compuși gazoși.

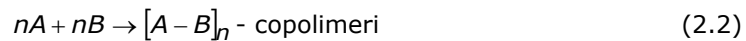
Prin caracteristicile lor, țevile din PE-HD acoperă cu succes un domeniu relativ larg de utilizare, având: densitate mică, rezistență la diferite medii corozive, rezistență mare la presiune hidraulică, posibilități de sudare-montare simple și rapide, costuri de fabricație relativ scăzute, etc.

2.2. Proprietăți generale ale polimerilor

2.2.1. Structura polimerilor

2.2.1.1. Tipurile și modul de aranjare a unităților structurale

În alcătuirea polimerilor, pot intra unități structurale de același fel, adică monomeri identici (A), în acest caz obținându-se homopolimeri sau pot intra monomeri diferiți (A+B), în care caz se obțin copolimeri:



Polimerii și copolimerii obținuți prin unirea unităților structurale (monomeri) pot avea structuri macromoleculare liniare (filiforme), ramificate și reticulate (Figura 2.2).

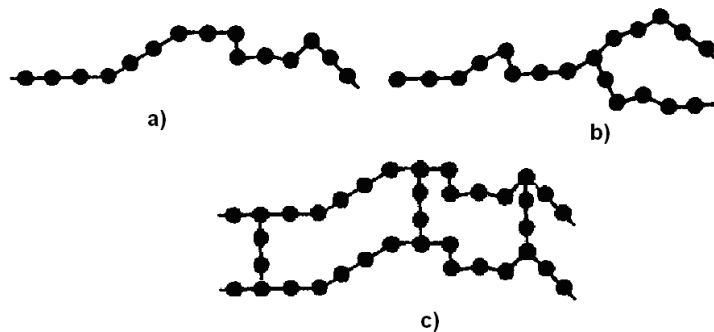


Figura 2.2 Macromoleculare: a) liniare; b) ramificate; c) reticulate.

Macromoleculare liniare au forma unui lanț lung, lungimea lor depășind cu mult mărimea secțiunii transversale. Macromoleculare ramificate conțin pe catena principală lanțuri laterale, iar macromoleculare reticulare sunt formate din catene liniare unite prin punți transversale scurte.

Materialele plastice, în funcție de particularitățile lor, se pot grupa astfel: termoplastice, termorigide și elastomeri (Figura 2.3).

Materialele termoplastice se caracterizează prin următoarele: sunt sudabile, se pot transforma termic de mai multe ori, proporția de stare cristalină din structura lor determină densitatea și proprietățile mecanice.

Materialele termorigide se caracterizează prin următoarele: nu sunt sudabile, numărul de legături transversale din rețeaua reticulară sunt determinante pentru caracteristicile mecanice, prezintă comportament elastic doar într-un domeniu de temperatură îngust și ridicat, fiind stabile la încălzire și se pot transforma termic o singură dată.

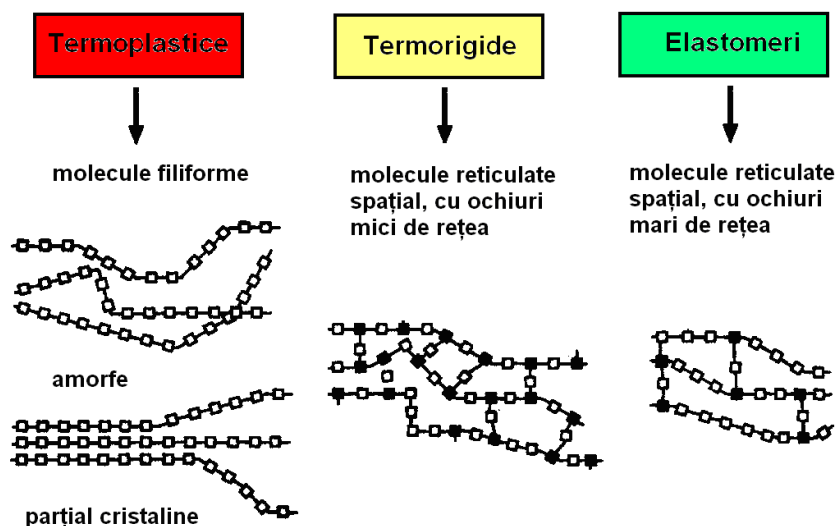


Figura 2.3 Distribuția moleculelor în rețea

2.2.1.2. Aranjarea spațială a catenelor de polimeri

Modul de aranjare spațială a catenelor de polimeri (morfologia polimerilor) determină caracterul cristalin sau amorf al acestora.

Polimerii se pot găsi în două stări de agregare fizică (lichidă și solidă) și în două stări de fază (cristalină și amorfă).

Multe dintre proprietățile fizico-mecanice (rezistență la: tracțiune, șoc, îndoiri repetate, abraziune), electrice, optice și termice ale polimerilor sunt determinate în mare măsură de starea de fază cristalină sau amorfă, de raportul ponderilor celor două faze cât și de distribuția lor în masa polimerului.

Cristalitele reprezintă primul stadiu în formarea structurii cristaline a polimerilor, fiind definite ca particule materiale caracterizate printr-o distribuție regulată a elementelor structurale.

Spre deosebire de cristalele obișnuite ale compușilor micromoleculari, cristalitele nu au o formă geometrică cu simetrie caracteristică, fiind separate unele de altele prin porțiuni de catene cu structură amorfă.

Figura 2.4 prezintă posibilitățile de dispunere a catenelor unui polimer cu structură amorfă și respectiv parțial cristalină.

Apariția fazei cristaline la polimeri este condiționată de factori structurali și respectiv de factori cinetici. Având în vedere că faza cristalină presupune o anumită ordine pe toate cele trei direcții ale spațiului, se poate sublinia faptul că pentru a putea cristaliza, este necesar ca polimerii să îndeplinească o serie de condiții structurale: liniaritate, tacticitate și regularitate conformațională a catenelor, o aranjare paralelă a lanțurilor macromoleculare și o orientare identică a secțiunilor unităților structurale în planuri perpendiculare pe axa macromoleculi.

Îndeplinirea doar parțială a acestor cerințe, cum ar fi spre exemplu lipsa tacticității sau a liniarității catenelor, determină micșorarea sensibilă a gradului de cristalinitate.

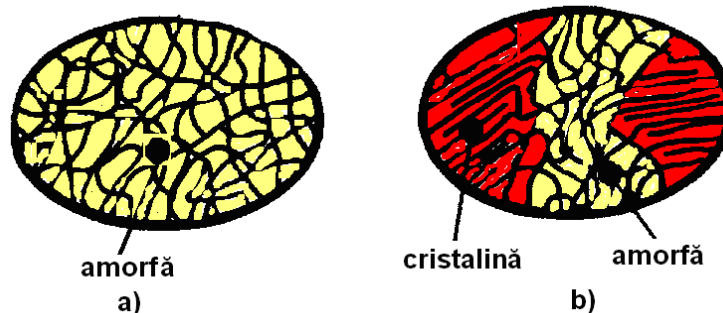


Figura 2.4 Compus macromolecular a) structură amorfă; b) structură parțial cristalină

Se poate menționa faptul că, de exemplu, polietilena de joasă densitate prezintă 2-3 ramificații la 100 atomi de carbon, având un grad de cristalinitate de 50 - 55 %, în timp ce polietilena de înaltă densitate prezintă 0,1 - 0,2 ramificații la 100 atomi de carbon, având un grad de cristalinitate de 90 - 95 %.

Cristalizarea polimerilor este determinată și de doi factori cinetici: viteza de apariție a germinilor cristalini și de viteza de creștere a cristalelor.

Gradul de cristalinitate este determinat și de valoarea masei moleculare. Astfel creșterea masei moleculare duce la scăderea cristalinității. De exemplu în cazul polietilenei liniare, o creștere a masei moleculare de la 45000 la $1,5 \times 10^6$, conduce la o scădere a gradului de cristalinitate de la 90 % la 80 %.

Gradul de cristalinitate este corelat și cu densitatea polimerilor. Acest fapt permite caracterizarea unui polimer din punct de vedere al conținutului de fază cristalină cu ajutorul densității, mărime fizică ușor de determinat experimental.

Datorită particularităților structurale specifice ale compuşilor macromoleculari amorfii, aceștia prezintă trei stări: sticloasă, înalt elastică și fluid vâscoasă. Starea sticloasă se caracterizează prin lipsa mișcării macromoleculelor și a părților de macromolecule (segmente), acestea găsindu-se într-o stare „înghețată”.

În starea înalt elastică, cu toate că macromolecula în întregul său nu are libertate de mișcare, segmentele pot participa la mișcări unele față de altele datorită transformărilor conformaționale.

În starea fluid - vâscoasă macromoleculele devin mobile, putând avea loc fenomene de curgere, caracterizate prin deplasări ale macromoleculelor unele față de altele.

Creșterea gradului de cristalinitate determină mărirea durtății, rigidității, rezistenței la tracțiune și respectiv scăderea rezistenței la șoc, alungirii la rupere și permeabilității la gaze a polimerilor.

Din punctul de vedere al comportării la încălzire, materialele plastice se împart în două categorii: termoplastice și termorigide.

Termoplasticele pot fi supuse la înmuieri (topiri) repetate, fără a suferi vreo transformare chimică și pot fi prelucrate la cald prin diferite procedee (extrudare, injecție, sudare).

Din această grupă fac parte materialele plastice cu structură liniară sau ramificată a catenelor și cu temperatura de descompunere ridicată (polietilena, polipropilena, polistirenul, polimetacrilatul de metil, poliamidele, etc.).

Poliiolefinenele sunt materiale termoplastice parțial cristaline. Din categoria poliiolefinelor fac parte: polietilena, polipropilena, polibutilena. Polistirenul și policlorura de vinil, de exemplu, sunt termoplastice amorfă (Figura 2.5).

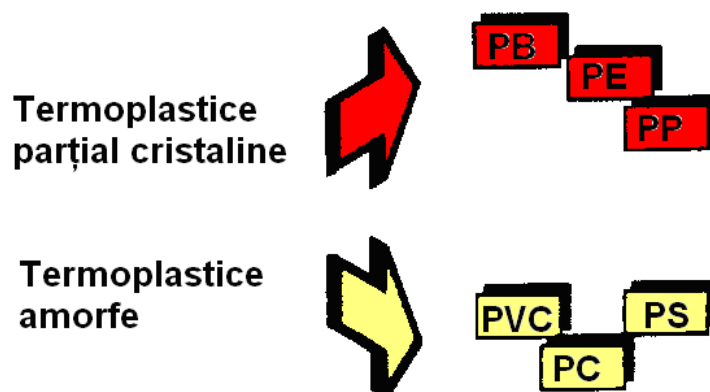


Figura 2.5 Materiale termoplastice parțial cristaline și amorfе

2.2.2. Proprietățile termice ale polimerilor

2.2.2.1. Temperaturi de tranziție

Trecerea unui compus macromolecular de la o stare de fază la alta se face la temperaturi sau în intervale de temperaturi de tranziție.

Tranzițiile de la o fază la alta se caracterizează prin variația în salt a unor mărimi fizice (de exemplu volumul specific) cu temperatura [9].

Figura 2.6 prezintă variația volumului specific cu temperatura pentru compușii macromoleculari.

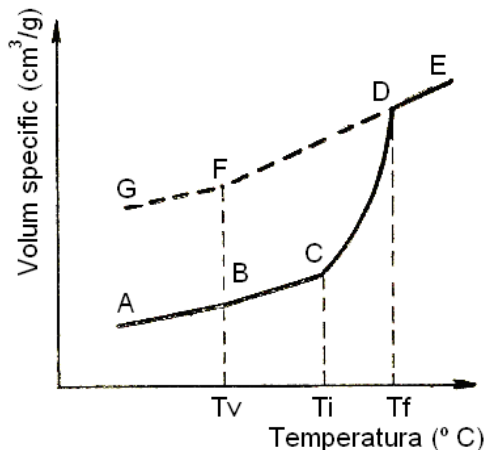


Figura 2.6 Dependența de temperatură a volumului specific [9]

Se poate observa că topirea polimerilor nu are loc la o temperatură bine definită, aceasta realizându-se într-un anumit interval de temperatură cuprins între T_i și T_f . Se constată astfel că, temperatura finală de topire (T_f) crește cu creșterea masei moleculare, iar lărgirea distribuției maselor moleculare conduce la o lărgire a intervalului de topire.

În cazul în care un anumit polimer ar forma un macrocristal perfect, topirea acestuia s-ar la o temperatură bine definită. De exemplu, într-o astfel de situație, la polietilena liniară această temperatură ar fi $T_t = 137^\circ\text{C}$, spre deosebire de situația reală în care topirea polietilenei liniare are loc în intervalul de temperatură cuprins între $120 - 135^\circ\text{C}$. Se constată că pe măsură ce numărul de ramificații al polietilenei crește, temperatura finală de topire devine tot mai mică, iar intervalul de topire mai larg.

Din figura 2.6 se observă că în cazul polimerilor care pot cristaliza, prin răcirea lentă a topiturii se obține curba definită de punctele EDCBA, punctul B fiind corespunzător temperaturii de vitrifiere. Pe porțiunea ED a curbei polimerul se află în stare fluid - vâscoasă, stare în care atât catenele cât și segmentele de catenă se pot deplasa unele față de altele.

Pe măsură ce are loc scăderea temperaturii, în intervalul DC are loc fenomenul de cristalizare și obținere a cristalitelor care sunt înglobate într-o masă amorfă. Zona CB corespunde unei stări de coexistență a fazei cristaline cu faza amorfă.

La temperatura de vitrifiere (T_v) faza amorfă suferă o nouă tranziție în punctul B, când segmentele de catenă își pierd libertatea de mișcare, polimerul devenind sticlos (intervalul BA).

În cazul în care are loc o răcire bruscă a topiturii unor polimeri care nu pot cristaliza se obține curba definită de punctele EDFG. În această situație, prin răcirea topiturii se formează o masă amorfă cu vâscozitate mare, corespunzător intervalului dintre punctele DF. La atingerea punctului F, corespunzător temperaturii de vitrifiere T_v , catenele își pierd libertatea de rotație în jurul legăturilor simple și masa polimerului devine rigidă [9].

Se poate concluziona faptul că polimerii cristalini se topesc peste o anumită temperatură. Trecerea din starea cristalină în starea fluid vâscoasă se face într-un interval de temperatură denumit temperatură de topire (T_t), care este însoțită de o variație bruscă a volumului specific și o modificare a unor proprietăți fizice, macromoleculele polimerului pierzându-și rigiditatea din starea cristalină și trecând astfel în starea fluid vâscoasă, în care pot efectua mișcări de translație.

Compușii macromoleculari cu structură amorfă, în funcție de temperatură, se pot afla în trei stări fizice: starea sticloasă sau vitroasă, starea înalt elastică și starea fluid vâscoasă. Trecerea de la o astfel de stare fizică la alta se produce într-un interval de temperatură și nu la o temperatură fixă.

Trecerea polimerului din stare vitroasă în stare înalt elastică are loc într-un interval de temperatură care se numește temperatură de vitrifiere (T_v), iar cel în care se produce trecerea polimerului din stare înalt elastică în stare fluidă vâscoasă se produce într-un interval de temperatură care poartă denumirea de temperatură de curgere (T_c).

Temperatura de curgere crește cu gradul de polimerizare, deoarece în acest caz datorită forțelor intermoleculare care se însumează de-a lungul catenei, mișcarea de translație a moleculelor este frânată.

Trecerea polimerilor amorfi dintr-o stare fizică în alta este însoțită de o variație lentă a volumului acestora. Fiecărei stări fizice a polimerilor amorfi îi este caracteristică o anumită mobilitate a macromoleculelor. De exemplu, starea înalt elastică se caracterizează printr-o mare flexibilitate a macromoleculelor determinată de rotațiile porțiunilor de catenă în jurul legăturilor simple.

Peste temperatura de curgere, adică în starea fluid vâscoasă forțele intermoleculare slăbesc și macromoleculele pot efectua mișcări de translație deplasându-se unele în raport cu altele.

2.3. Comportarea reologică a polimerilor

Studiind răspunsul materiei la acțiunea solicitărilor exterioare, reologia se ocupă cu acele deplasări care sunt însoțite de deformații și de aceea este definită, în general, ca fiind știința deformației și curgerii materiei.

Reologia având ca instrument de bază conceptul de model reologic, urmărește stabilirea unor relații matematice referitoare la interdependența dintre solicitările mecanice, răspunsul corpurilor și proprietățile acestora [10].

Reologia operează cu două categorii de corpuri, care răspund diferit la solicitările mecanice: solide ideal elastice și fluide ideal vâscoase.

În cazul unui solid ideal elastic lucrul mecanic produs de forțele exterioare este înmagazinat și poate fi restituit în întregime la îndepărtarea solicitării.

Fluidul ideal vâscos este acela care suferă deformații ireversibile ca rezultat al curgerii și disipează întreaga energie primită în procesul de deformație sub formă de căldură.

A treia categorie o reprezintă corpurile perfect plastice, care la solicitări inferioare unei tensiuni critice se comportă ca solide elastice, iar peste această valoare ca fluide vâscoase.

Polimerii nu se încadrează în nici una din aceste categorii, ei prezentând atât comportare elastică, cât și vâscoasă. Pentru a descrie asemenea comportări se folosește termenul de material vâscoelastic.

Reologia are un rol important în domeniul cercetării polimerilor, constituind o componentă esențială a cunoașterii, fiind absolut necesară în scopul producerii și utilizării diferitelor categorii de materiale polimerice. Un loc aparte îl ocupă reologia poliolefinelor în stare topită, polimeri care reprezintă categoria cea mai utilizată din cadrul polimerilor termoplastici [11].

Solicitările mecanice care acționează asupra corpurilor pot fi relativ mici, nedistructive și respectiv solicitări urmate de rupere, astfel încât răspunsurile sistemelor se pot studia în condiții statice sau dinamice.

În acest context, rolul reologiei este acela de a stabili relațiile de legătură dintre starea de solicitare și starea de deformație, respectiv de a determina comportarea corpurilor reale la diferite tipuri de solicitări.

2.3.1. Modele mecanice

În scopul de a simula comportarea unor corpuri reale, prin modelarea comportării reologice se utilizează modele mecanice formate din mai multe elemente, fiecare element constituind modelul unui corp cu comportare ideală.

Astfel, pe baza modelului mecanic se poate stabili modelul matematic ce constituie funcția răspuns la solicitare.

2.3.1.1. Modelul solidului lui Hooke

Solidul lui Hooke este caracterizat prin elasticitate instantanee. Un element mecanic cu o comportare asemănătoare este resortul elicoidal. Deformația fiind proporțională cu efortul, la descărcarea corpului, aceasta se recuperează în totalitate.

Considerând un resort asupra căruia acționează o forță instantanee, acesta se deformează instantaneu, astfel încât sub acțiunea forței deformația se menține constantă în timp. După îndepărtarea forței, resortul revine la starea inițială, recuperarea deformației fiind instantanee.

Se poate constata astfel o asemănare între resort și modelul mecanic al solidului Hooke. Funcția de model mecanic presupune că arcul se deformează elastic pe întregul domeniu de solicitare, astfel încât masa acestuia considerându-se extrem de redusă, forțele inerțiale și gravitaționale pot fi neglijate.

2.3.1.2. Modelul lichidului lui Newton

În cazul fluidelor cu o comportare newtoniană se consideră că modelul mecanic este un amortizor format dintr-un recipient cilindric, umplut cu un lichid newtonian, în care se deplasează un piston, astfel încât între partea fixă și cea mobilă a amortizorului neexistând puncte de contact, efectele inerțiale și gravitaționale sunt neglijabile.

La aplicarea unei forțe, amortizorul nu reacționează instantaneu, viteza de deplasare fiind constantă atât timp cât forța este constantă, între cele două mărimi existând o relație de proporționalitate directă, respectiv se consideră că amortizorul este modelul mecanic al lichidului lui Newton.

2.3.1.3. Modelul plasticului lui St. Venant

Corpurile caracterizate de o deformație perfect plastică ajung la deformații ireversibile numai după ce tensiunea atinge o anumită valoare limită. De asemenea, un corp așezat pe o suprafață orizontală plană poate fi pus în mișcare numai când forța aplicată asupra sa depășește valoarea forțelor de frecare.

Astfel, făcându-se o analogie între plasticitate și fenomenul mecanic de alunecare prin frecare, se poate considera că un corp cu frecare de acest tip este modelul mecanic al plasticului lui St. Venant.

În acest fel, modelele simple formate dintr-un singur element, reproduc comportarea unui număr foarte restrâns de corpuri și pe domenii relativ limitate de solicitări. Prin asocierea mai multor elemente într-un model se extinde sfera posibilităților de a descrie comportarea corpurilor reale, încât modelele mecanice astfel obținute pot descrie o comportare liniară sau neliniară a diferitelor corpuri.

2.3.2. Corpuri vâscoelastice

Comportarea unor corpuri simultan elastică și vâscoasă, denumită vâscoelastică este caracteristică unui număr mare de corpuri în stare solidă sau lichidă. Un solid, sub acțiunea unei solicitări, se deformează până la o stare de echilibru static între forțele externe și interne.

La clasificarea comportării corpurilor, pe lângă aspectul legat de starea de agregare este necesar să se țină cont de condițiile specifice, de nivelul solicitărilor, de timp și de domeniul temperaturilor.

Prin combinarea celor trei proprietăți: vâscozitate, elasticitate și plasticitate în anumite proporții se obține triumphiul comportărilor reologice (Figura 2.7).

Având în vârfurile sale poziționate corpurile cu proprietăți unitare, laturile acestui triunghi echilateral vor fi formate din totalitatea punctelor ce reprezintă comportarea corpurilor ce posedă două proprietăți în diverse proporții: vâscoplastică, vâscoelastică și elastoplastică. Punctele din interiorul triunghiului reprezintă corpuri cu o comportare vâscoelastoplastică [12].

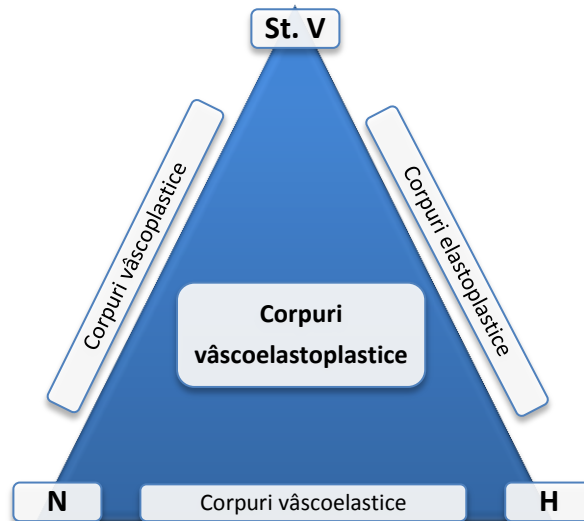


Figura 2.7 Triunghiul comportărilor reologice

În cazul materialelor cu o comportare elastică, la aplicarea unei forțe asupra lor, deformația se manifestă până când forța este îndepărtată, după care materialul revine la configurația sa inițială (Figura 2.8) [13].

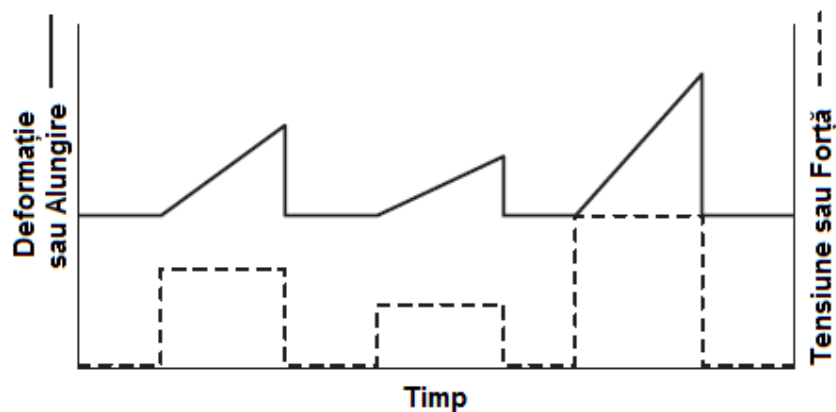


Figura 2.8 Corelația dintre tensiune și deformație în cazul comportării elastice [13]

În cazul în care se aplică o forță unui fluid newtonian are loc o anumită deformație, care se păstrează chiar dacă forța este îndepărtată, fluidul rămânând în această stare până la aplicarea unei noi forțe (Figura 2.9).

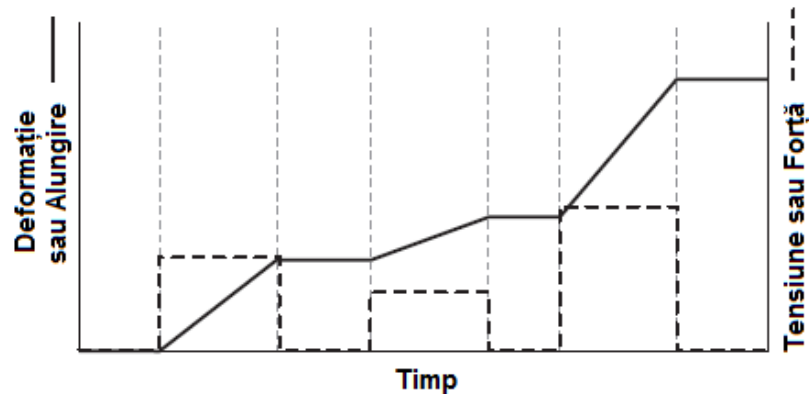


Figura 2.9 Corelația dintre tensiune și deformare în cazul unui fluid Newtonian

În cazul polimerilor aflați în stare topită la aplicarea unei forțe asupra lor, se constată un răspuns ne-newtonian, ce conține atât o componentă vâscoasă, cât și una elastică. Astfel, odată cu îndepărtarea forței deformarea remanentă este dată doar de componenta vâscoasă.

Masa moleculară este mărimea cea mai importantă în determinarea vâscozității polimerilor, între acestea existând relația:

$$\eta = kxMw^{3.5} \quad (2.3)$$

unde: η este vâscozitatea, k - constantă și Mw reprezintă masa moleculară.

Se observă că masa moleculară are un efect puternic asupra valorii vâscozității, astfel încât la o dublare a masei moleculare are loc o creștere de aproximativ 10 ori a vâscozității [13].

În funcție de starea în care se află polimerii, vâscozitatea acestora se măsoară diferit. Astfel vâscozitatea relativă a unui polimer în comparație cu un altul din aceeași categorie este măsurată cu ajutorul indicelui de curgere MFI, sau prin vâscozitatea soluției, denumită vâscozitate intrinsecă.

2.3.3. Ecuații reologice

Comportarea reologică a corpurilor vâscoelastice se poate exprima cu ajutorul unor relații matematice care reprezintă interdependența dintre parametrii solicitării: tensiuni, deformații, viteze de deformare, care includ unul sau mai mulți parametri de material. Aceste expresii matematice sunt cunoscute sub numele de ecuații reologice.

Ecuațiile reologice se pot deduce pe baza modelelor mecanice. Dintre acestea, cele mai simple modele mecanice obținute prin legarea în serie sau în paralel a unui resort cu un amortizor pot descrie comportarea vâscoelastică.

Prin compunerea modelelor mecanice simple se pot obține modele reologice care descriu comportarea vâscoelastică liniară.

2.3.3.1. Solidul ideal elastic

În cazul solidului ideal elastic, ce urmează legea lui Hooke, tensiunea este proporțională cu deformația. Astfel, în funcție de tipul tensiunii aplicate la corpurile elastice izotrope se disting trei constante de proporționalitate între tensiune și deformație, numite moduli. Relația ce caracterizează deformația de alungire este:

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

unde σ este tensiunea aplicată, ε este deformația de alungire definită ca raportul dintre creșterea lungimii ΔL și lungimea inițială L_0 , iar E reprezintă modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young.

O relație asemănătoare se poate scrie pentru deformația determinată de solicitarea de forfecare:

$$\tau = G\gamma = G \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.5)$$

unde τ este tensiunea de forfecare, γ este deformația de forfecare definită ca raportul dintre deplasarea ΔL pe orizontală a suprafeței superioare și distanța L_0 până la suprafața inferioară, iar G este modulul de elasticitate transversal.

În cazul deformației de volum se poate scrie următoarea relație:

$$p = K \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2.6)$$

unde p este presiune hidrostatică, $\Delta V/V_0$ reprezintă deformația de volum definită ca raportul dintre modificarea volumului ΔV și volumul inițial V_0 , iar K este modulul de volum.

Coeficientul lui Poisson ν este definit ca fiind dat de raportul dintre deformațiile relative ale corpului pe două direcții perpendiculare, transversală și axială.

Astfel, între cei trei moduli există următoarea ecuație:

$$E = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu) \quad (2.7)$$

Mărimile inverse modurilor, denumite complianțe, se definesc: complianța de alungire $D = 1/E$, complianța de forfecare $J = 1/G$ și complianța de volum $k = 1/K$, numită și compresibilitate.

Se constată că pentru modelul elementar Hooke, specific solidelor ideal elastice, deformația este proporțională cu tensiunea, iar panta dreptei dă modulul de elasticitate. În acest caz, comportarea elastică ideală se poate asimila cu cea a unui resort elastic, pentru care deformația este proporțională cu tensiunea (Figura 2.10).

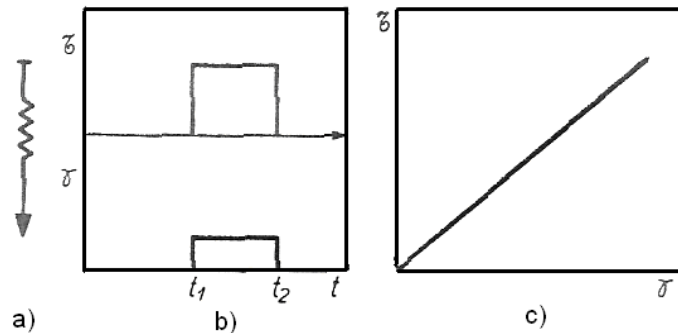


Figura 2.10 Resort elastic (a), curbele deformație – timp (b) și tensiune – deformație (c), pentru solidul ideal [14]

2.3.3.2. Fluidul ideal vâscos

În cazul fluidelor care respectă legea lui Newton tensiunea tangențială de forfecare τ este proporțională cu gradientul de viteză $\frac{dv}{dx} = \Gamma$:

$$\tau = \eta \Gamma = \eta \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

unde η este coeficientul de vâscozitate, iar $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx}$ reprezintă viteza de forfecare.

Coeficientul de vâscozitate η se numește vâscozitate dinamică, respectiv raportul ν dintre vâscozitatea dinamică η și densitatea ρ :

$$\nu = \eta / \rho \quad (2.9)$$

se numește vâscozitate cinetică. Mărimea inversă vâscozității dinamice poartă denumirea de fluiditate.

Astfel, pentru modelul elementar Newton, specific fluidelor ideal vâscoase, pe curba caracteristică deformație-timp se observă că deformația începe în momentul aplicării tensiunii și continuă să crească cu viteză constantă până în momentul îndepărtării tensiunii (Figura 2.11).

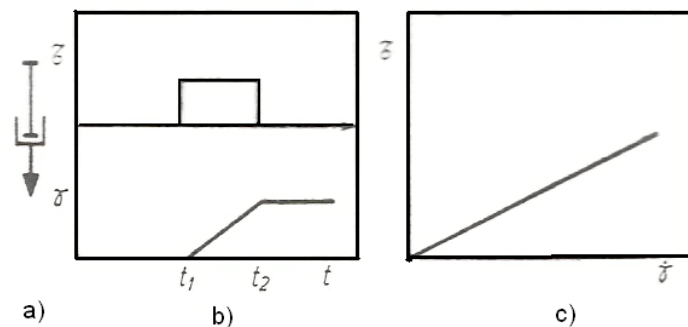


Figura 2.11 Amortizor (a), curbele deformație – timp (b) și tensiune – deformație (c), pentru fluidul ideal [14]

2.3.4. Vâscoelasticitatea polimerilor

Proprietățile mecanice ale polimerilor sunt influențate semnificativ de temperatură, intensitatea solicitării mecanice și viteza de aplicare a tensiunii.

La polimerii cu structură amorfă se disting trei stări principale: starea sticloasă, starea înalt elastică, starea de fluid - vâscoasă.

În cazul unui polimer amorf, la temperaturi scăzute, acesta prezintă o comportare specifică stării sticloase, iar pe măsură ce temperatura crește se ajunge la o comportare înalt elastică, respectiv odată cu creșterea în continuare a temperaturii, polimerul suferă o deformare permanentă sub acțiunea tensiunii și se comportă ca un lichid vâscos. În intervalul de curgere, polimerul combină proprietățile stării înalt elastice și fluid vâscoase: curgerea este însoțită de deformare înalt elastică, astfel încât la îndepărtarea tensiunii are loc revenirea parțială, comportarea fiind una vâscoelastică și caracterizată de o disipare a unei părți importante din energia primită în timpul deformării sub formă de căldură.

În cazul polimerilor cu structură combinată cristalino - amorfă deformarea se realizează, în cea mai mare parte, în cadrul regiunilor amorfe, regiunile cristaline având o comportare caracterizată de o deformare relativ mică.

2.3.4.1. Vâscoelasticitatea liniară a polimerilor

La definirea ecuației reologice în cazul unui solid ideal elastic se consideră că deformațiile sunt relativ mici și relația tensiune - deformare este una liniară.

În cazul polimerilor, a căror deformare este dependentă de timp, se poate aplica principiul suprapunerii efectelor dat de Boltzmann, conform căruia, dacă un corp cu vâscoelasticitate liniară este supus acțiunii unor tensiuni succesive, fiecare creștere de tensiune aduce o contribuție independentă, iar deformarea totală este egală cu suma deformațiilor individuale.

Comportarea vâscoelastică a polimerilor poate fi descrisă cu ajutorul unor modele combinate, formate din modele elementare cu o comportare elastică și respectiv vâscoasă. În cazul în care se procedează la legarea în serie a unui element elastic cu unul vâscos deformarea totală este egală cu suma deformațiilor, iar dacă cele două elemente sunt legate în paralel tensiunea totală este egală cu suma tensiunilor.

Un astfel de model combinat este modelul Maxwell, alcătuit dintr-un resort și un amortizor legate în serie, prin care se consideră că la aplicarea tensiunii are loc mai întâi o deformare elastică instantanee, urmată de o deformare vâscoasă de tip newtonian (Figura 2.12). Astfel, deformarea totală γ va fi dată de suma dintre deformarea resortului γ_1 și cea a amortizorului cu γ_2 :

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt} \quad (2.10)$$

Prin înlocuirea deformațiilor γ_1 și γ_2 cu expresiile lor, se obține ecuația diferențială a modelului Maxwell:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \left(\frac{d\tau}{dt} \right) + \frac{\tau}{\eta} \quad (2.11)$$

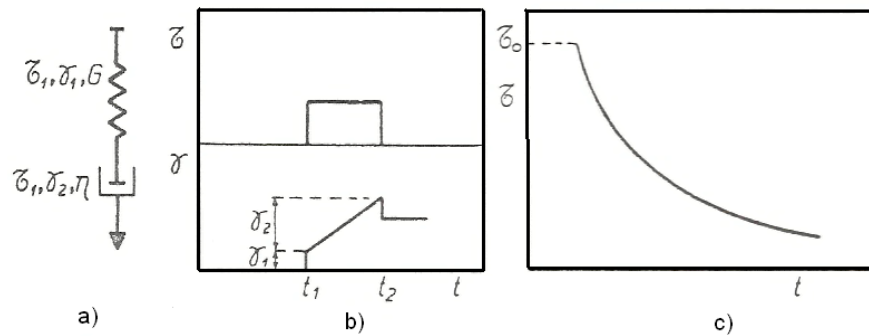


Figura 2.12 Modelul Maxwell (a), curba deformație – timp (b) și curba tensiune –deformație (c) [14]

Un alt model combinat este modelul Voigt, alcătuit dintr-un resort legat în paralel cu un amortizor (Figura 2.13).

Prin legarea în paralel a elementului vâscos cu elementul elastic se obține deformația elastică întârziată. În acest caz, deformația totală γ va fi: $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$, iar tensiunea totală τ este $\tau = \tau_1 + \tau_2$. Astfel, ecuația diferențială a modelului Voigt este:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} \tag{2.12}$$

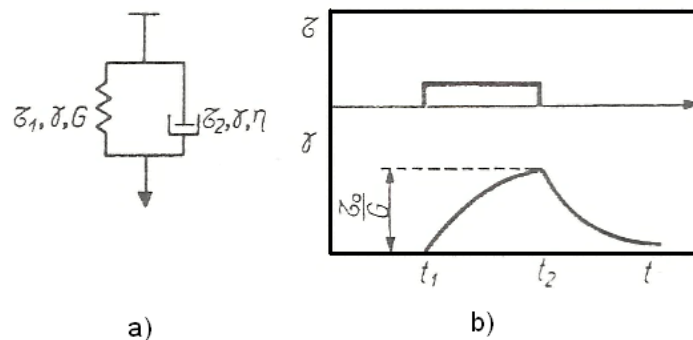


Figura 2.13 Modelul Voigt (a), curba de fluaj (b) [14]

Analizând cele două modele se constată că nici unul din ele nu descrie suficient de bine comportarea generală a polimerilor, modelul Maxwell descriind, în primă aproximație, relaxarea tensiunii în fluidele elastice iar modelul Voigt comportarea la fluaj.

În scopul obținerii unor rezultate mai bune se folosesc modele cu trei elemente. Astfel, prin legarea modelului Voigt în serie cu modelul elastic se obține un model care prezintă atât deformație instantanee cât și deformație elastică

întârziată (Figura 2.14 a). Ecuația acestui model se obține având în vedere faptul că deformația totală γ este suma deformațiilor elementului elastic și modelului Voigt.

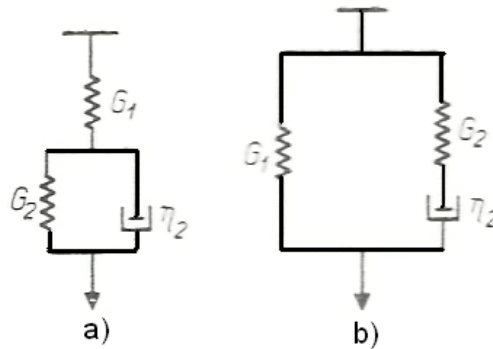


Figura 2.14 Modele cu trei elemente: Modelul Voigt legat în serie cu elementul elastic (a), Modelul Maxwell legat în paralel cu elementul elastic (b) [14]

Prin legarea modelului Maxwell în paralel cu modelul elastic se obține modelul Zener, denumit modelul solidului liniar standard, care prezintă atât elasticitate instantanee cât și întârziată (Figura 2.14 b).

Ecuația sa se obține scriind tensiunea totală τ egală cu suma tensiunilor elementului elastic și modelului Maxwell.

Modelele cu trei elemente, prezentând elasticitate instantanee și întârziată sau fluaj reversibil dar nu curgere ireversibilă, servesc la interpretarea datelor polimerilor reticulați. Pentru a reprezenta comportarea polimerilor liniari, modelele cu trei elemente trebuie să li se adauge încă un element vâcos, devenind astfel modele cu patru elemente (Figura 2.15).

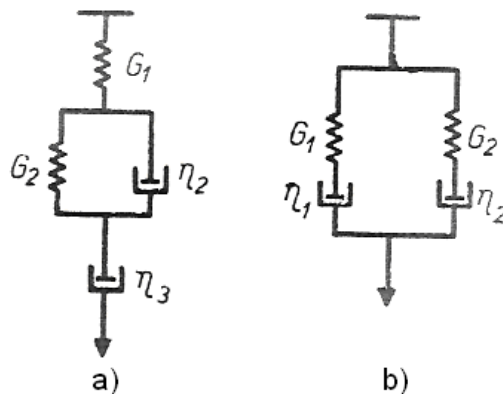


Figura 2.15 Modele cu patru elemente: Modelul Alfrey (a), două modele Maxwell (b) [14]

2.4. Concluzii privind proprietățile materialelor polimerice

În cadrul acestui capitol sunt prezentate aspecte teoretice privind proprietățile materialelor polimerice și comportarea reologică a acestora.

Se menționează faptul că materialele plastice, în funcție de particularitățile lor, pot fi grupate în: termoplastice, termorigide și elastomeri. Cu toate că numărul polimerilor sintetizați în ultimii ani este însemnat, cea mai mare parte este acoperită de produsele realizate din materiale termoplastice: poliolefine (polietilenă și polipropilenă), policlorură de vinil și polistiren.

Din cadrul materialelor termoplastice, o pondere însemnată o au materialele destinate realizării țevilor și fittingurilor pentru conductele destinate transportului fluidelor sub presiune. Polimerii cei mai folosiți în acest scop sunt: polietilena (PE), polipropilena (PP), policlorura de vinil (PVC) și polifluorura de viniliden (PVDF).

De asemenea, se evidențiază că materialele termoplastice parțial cristaline au o comportare foarte bună la sudare, proporția de stare cristalină din structura lor determinând densitatea și proprietățile mecanice.

În cadrul proceselor de sudare, caracteristice materialelor termoplastice, un rol deosebit îl au fenomenele specifice reologiei.

Reologia având ca instrument de bază conceptul de model reologic, urmărește stabilirea unor relații matematice referitoare la interdependența dintre solicitările mecanice, răspunsul corpurilor și proprietățile acestora.

În scopul de a simula comportarea unor corpuri reale, prin modelarea comportării lor reologice, se utilizează modele mecanice formate din mai multe elemente, fiecare element constituind modelul unui corp cu o comportare ideală.

Pe baza modelului mecanic se poate stabili modelul matematic ce constituie funcția răspuns la solicitare.

Astfel, comportarea vâscoelastică specifică polimerilor poate fi descrisă cu ajutorul unor modele elementare combinate, ce prezintă astfel o comportare atât elastică cât și vâscoasă.

3. PROCEDEE DE SUDARE PENTRU MATERIALE TERMOPLASTICE

3.1. Modalități de îmbinare a componentelor din materiale termoplastice

Materialele termoplastice fiind caracterizate prin performanțe înalte în ceea ce privește proprietățile mecanice, stabilitatea dimensională, termică, chimică și un grad ridicat de prelucrabilitate, a determinat în multe domenii înlocuirea materialelor metalice.

Diversificarea continuă a aplicațiilor materialelor termoplastice în diferite domenii industriale a necesitat soluționarea îmbinării acestora [15]. Principalele modalități de îmbinare pentru produsele realizate din materiale termoplastice sunt: sudarea [16], îmbinarea mecanică și lipirea cu adezivi.

În general, criteriul principal de clasificare a procedeelor de sudare destinate materialelor termoplastice îl constituie natura surselor de încălzire utilizate pentru sudare, având astfel: sudare cu corpuri solide [17], sudare cu gaze încălzite, sudare cu material de adaos extrudat, sudare cu element rezistiv, sudare prin frecare și vibrații, și respectiv sudare cu radiații ([18], [19], [20], [21]).

Alegerea optimă a procedeelor de sudare, respectiv a echipamentelor și dispozitivelor de sudare, în condițiile unui consum minim energetic pe unitatea de produs, este posibilă prin cunoașterea particularităților fiecărui procedeu de sudare ([22], [23], [24], [25]).

În prezent o pondere ridicată de utilizare a produselor din materialele termoplastice o au țevile, fittingurile, plăcile și membranele. Procedeele de sudare specifice pentru sudarea acestora sunt grupate în funcție de modul prin care se realizează încălzirea, respectiv introducerea de energie termică la locul contactului dintre componentele ce urmează a fi sudate [26].

Procedeele de sudare cele mai utilizate pentru sudarea componentelor din materiale termoplastice, obținute prin injectare și respectiv extrudare, se împart în:

- A. Procede de sudare cu element încălzitor
 - sudarea cap la cap cu element încălzitor
 - sudarea tip manșon cu element încălzitor
 - sudarea tip derivație cu element încălzitor
 - sudarea cu pană încălzitoare
- B. Procede de sudare prin electrofuziune
 - sudarea tip manșon prin electrofuziune
 - sudarea tip derivație prin electrofuziune
- C. Procede de sudare cu gaz încălzit
- D. Procede de sudare prin extrudare

Calitatea îmbinărilor sudate depinde de o serie de factori: calitatea materialelor utilizate, starea echipamentelor de sudare, nivelul de pregătire al personalului sudor și respectiv utilizarea unor proceduri de sudare calificate.

În funcție de aplicațiile la care sunt folosite, materialele termoplastice pot fi grupate astfel [27]:

- plăci, țevi și fittinguri
 - grupa 1: PVC (include toate tipurile de PVC-U, PVC-C), ABS
 - grupa 2: PP (include toate tipurile de PP)
 - grupa 3: PE (include toate tipurile de PE)
 - grupa 4: PVDF
 - grupa 5: ECTFE sau PFA, FEP

- pentru geomembrane:
 - grupa 6: PVC-P
 - grupa 7: PE (include toate tipurile de PE)
 - grupa 8: ECB
 - grupa 9: PP

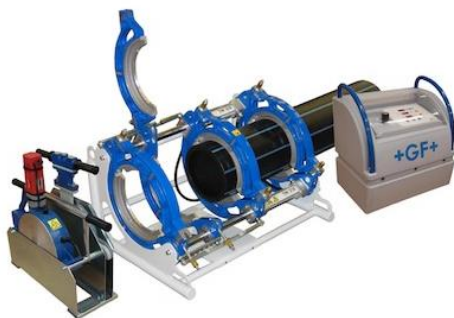
□ Sudarea cu element încălzitor

Sudarea cu element încălzitor este un procedeu de îmbinare fără material de adaos, la care suprafețele componentelor de sudat sunt încălzite cu ajutorul unor elemente încălzitoare cu forme specifice procedurii ales, după care, prin presarea reciprocă a acestora se realizează sudarea.

Sudarea cu element încălzitor se poate aplica la îmbinarea componentelor obținute prin procese de injectare sau extrudare: semifabricate sub formă de plăci sau membrane, respectiv țevi și fittinguri din materiale termoplastice ([28], [29], [30]).

Dintre procedeele de sudare destinate îmbinării materialelor termoplastice, sudarea cu element încălzitor are o pondere ridicată de utilizare, în special pentru realizarea conductelor destinate transportului fluidelor sub presiune ([31], [32]).

În funcție de tipul îmbinării sudate necesar a fi realizată, sudarea cu element încălzitor se poate efectua folosind fie cu un element încălzitor cu suprafață plană, utilizat de exemplu pentru sudarea cap la cap a țevelor, fie cu unul profilat ce se utilizează la sudarea de tip manșon (Figura 3.1, Figura 3.2).



www.gfps.com

Figura 3.1 Sudarea cap la cap cu element încălzitor - Echipament de tip GF



www.gfps.com

Figura 3.2 Sudarea tip manșon cu element încălzitor - Echipament de tip GF

Materialul componentelor de sudat este supus unor procese de încălzire, deformare și de întrepătrundere moleculară, urmată de o recristalizare și formare a unei noi structuri în conformitate cu starea de tensiune determinată de procesul de sudare.

Leskovics a ajuns la concluzia că în zona sudurii se pot deosebi două zone distincte: o zonă influențată termic cu o structură grosieră și o zonă de difuzie. Se constată astfel că toți factorii care influențează procesul de difuzie au efecte importante asupra sudurii: masa moleculară, distribuția masei moleculare, temperatura, presiunea și timpul [33].

- Sudarea cu pană încălzitoare

În categoria procedeelor de sudare cu element încălzitor se înscrie și un procedeu specific pentru îmbinarea prin suprapunere a geomembranelor destinate lucrărilor din domeniul construcțiilor civile și industriale, denumit sudarea cu pană încălzitoare.

Componentele sunt încălzite cu ajutorul unui element încălzitor sub forma unei pene încălzită electric sau cu aer cald, care se poziționează între acestea. Concomitent cu încălzirea celor două materiale are loc trecerea acestora printre două role presoare, prin intermediul cărora se realizează sudarea.

□ Sudarea prin electrofuziune

Sudarea prin electrofuziune este un procedeu de îmbinare modern, fără material de adaos, care utilizează fittinguri speciale, cu ajutorul cărora este generată căldura necesară sudării componentelor [34].

În acest caz, sudarea se realizează între un fitting de tip manșon sau derivație, având încorporat un element rezistiv și după caz, una sau două țevi. La trecerea curentului electric prin elementul rezistiv, componentele aduse inițial în contact, se încălzesc ajungând la temperatură optimă pentru sudare.

Urmare a dilatării materialelor componentelor, astfel încălzite, se realizează întrepătrunderea și îmbinarea prin sudare a acestora (Figura 3.3).



Figura 3.3 Sudare prin electrofuziune - Echipament de tip FUSION - QBOX

□ Sudarea prin extrudare

Sudarea prin extrudare este un procedeu de îmbinare cu material de adaos, la care, cu ajutorul unui extruder (parte componentă a echipamentului de sudare) se furnizează materialul termoplastic încălzit necesar sudării componentelor, printr-o duză adecvată tipului îmbinării și formei rostului (Figura 3.4). În același timp, echipamentul de sudare furnizează și un jet de aer cald, care este direcționat spre rostul de sudare, realizându-se astfel simultan și preîncălzirea materialului de bază.



Figura 3.4 Sudare cu material de adaos extrudat - Echipament de tip MUNSCH – MAK 18

În continuare se prezintă trei dintre procedeele de sudare mai des utilizate pentru îmbinarea componentelor din materiale termoplastice, incluzând pe acelea folosite în cadrul cercetărilor experimentale, cu evidențierea principalelor aspecte tehnologice specifice acestora.

Astfel sunt descrise sudarea cap la cap cu element încălzitor și prin electrofuziune, destinate sudării țevilor și fittingurilor, respectiv sudarea cu pană încălzitoare a geomembranelor.

3.1.1. Sudarea țevilor și fittingurilor

În funcție de aplicație și tipul îmbinării, țevile și fittingurile din materiale termoplastice se pot suda prin următoarele procedee: sudare cap la cap cu element încălzitor și sudare prin electrofuziune.

3.1.1.1. Sudarea cap la cap cu element încălzitor

3.1.1.1.1 Principiul procedurii

Sudarea cap la cap cu element încălzitor se realizează prin încălzirea componentelor de sudat cu ajutorul elementului încălzitor până la atingerea stării fluid vâscoase, având ca etape principale: încălzirea componentelor, îndepărtarea elementului încălzitor și sudarea propriu-zisă, consecință a apropierei pieselor de sudat încălzite și a aplicării presiunii de sudare (Figura 3.5).

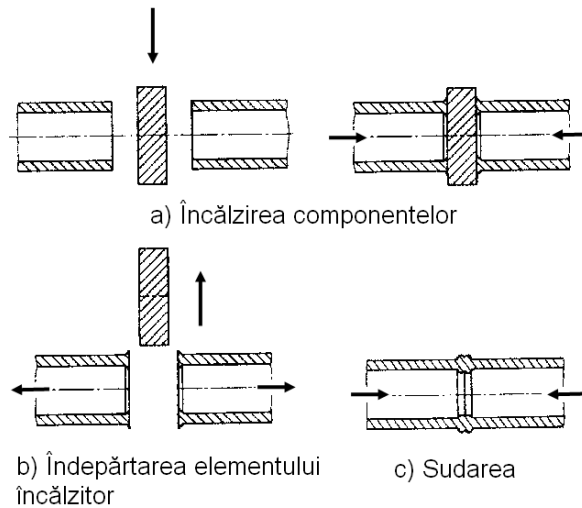
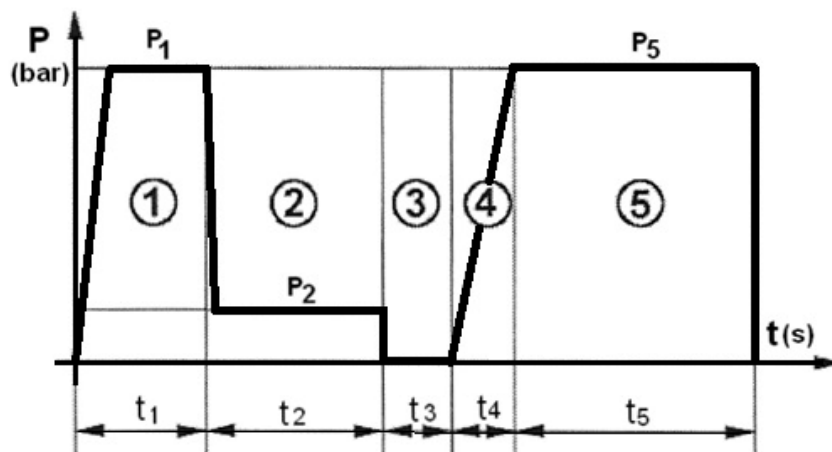


Figura 3.5 Schema de principiu a sudării cap la cap cu element încălzitor

3.1.1.1.2 Diagrame și parametrii de sudare

În funcție de echipamentul de sudare utilizat, de materialul și dimensiunile componentelor, sudarea se realizează conform unor diagrame presiune - timp, parametrii de sudare având în general valori diferite de la caz la caz.

De exemplu, în cazul unui echipament de sudare semimecanizat de tip RITMO DELTA 250, diagramele de sudare recomandate de producătorul echipamentului de sudare au configurații specifice, în funcție de tipul materialului și grosimea peretelui țevii (Figura 3.6 și Figura 3.7).

Figura 3.6 Diagramă de sudare pentru țevi și fittinguri PE80, respectiv pentru PE100 numai la grosimi de perete $e < 20$ mm [35]

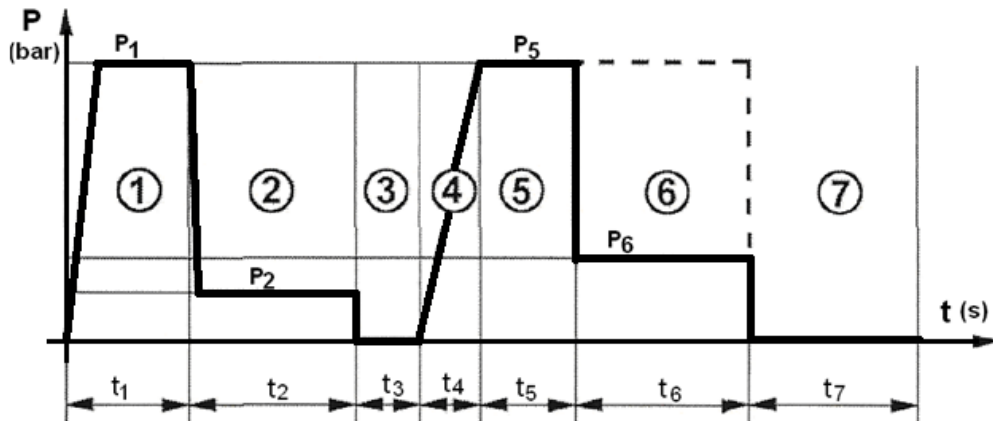


Figura 3.7 Diagramă de sudare pentru țevi și fittinguri PE100, cu grosimi de perete $e \geq 20$ mm [35]

Principalii parametri de sudare utilizați la sudarea cap la cap cu element încălzitor sunt:

- temperatura elementului încălzitor (T)
- timpul de încălzire (t_1)
- timpul de menținere (t_2)
- timpul de manevră (t_3)
- timpul de creștere a presiunii (t_4)
- timpul de sudare (t_5)
- timpul de răcire (t_6)
- timpul în care îmbinarea sudată nu se manevrează (t_7)
- presiunea de încălzire (P_1 , P_2)
- presiunea de sudare (P_5)
- presiunea de răcire (P_6), la PE100 cu grosimi de perete $e \geq 20$ mm

Temperatura elementului încălzitor (T) reprezintă temperatura la care vor fi încălzite și menținute componentele, ea neavând voie să depășească temperatura de degradare termică a polimerului pentru a nu se produce modificări structurale în zona îmbinării cu consecințe directe asupra rezistenței mecanice a acesteia.

Timpii t_1 și t_2 determină cantitatea de căldură introdusă în componente. Mărimea acestor timpi este determinată de grosimea componentelor, respectiv de aria secțiunii acestora.

Cu cât timpii de încălzire t_1 și respectiv menținere t_2 sunt mai mari, cu atât crește cantitatea de material topit, care influențează direct calitatea îmbinării sudate.

Trebuie însă specificat faptul că utilizarea unui timp de încălzire prea mare poate avea și efecte negative datorită faptului că se produce o cantitate prea mare de material topit. În timpul sudării, acest material se îndepărtează din zona îmbinării ceea ce conduce la punerea în contact a unor suprafețe insuficient încălzite și implicit la obținerea de îmbinări cu bavură mare.

În general timpul de încălzire t_1 necesar formării inelului de material topit inițial este corespunzător atingerii unei anumite înălțimi recomandate a acestuia, fiind corelat cu indicele de fluiditate la cald în masă (MFR).

3.1.1.1.3 Echipamente de sudare

Sudarea cap la cap cu element încălzitor se face utilizând echipamente de sudare, în general, cu acționare hidraulică. În cadrul cercetărilor experimentale s-a utilizat un astfel de echipament, de tip RITMO DELTA 250 (Figura 3.8).



Figura 3.8 Echipament de sudare cap la cap cu element încălzitor RITMO DELTA 250

Fixarea componentelor în echipamentul de sudare se realizează prin strângere mecanică cu ajutorul unor perechi de bacuri interschimbabile, corespunzătoare diametrului de țevă ales.

Presiunile necesare în fazele de încălzire și respectiv sudare se realizează cu ajutorul sistemului de acționare hidraulică. Suprafețelor frontale ale capetelor componentelor se prelucrează prin frezare, aducându-se la o formă plană.

Elementul încălzitor se poate regla la o anumită temperatură, adecvată încălzirii componentelor, în funcție de grosimea și tipul materialelor.

3.1.1.1.4 Pregătirea pentru sudare

Pregătirea componentelor pentru sudare presupune ca suprafețele ce vin în contact cu elementul încălzitor și urmează a fi îmbinate, să fie curate, fără urme de impurități, strat de oxizi sau grăsimi.

Înainte de începerea sudării este necesar să se proceda la verificarea următoarelor aspecte: integritatea stratului de teflon și starea de curățenie a suprafețelor active ale elementului încălzitor, funcționalitatea sistemului de acționare hidraulică și respectiv corectitudinea reglării temperaturii elementului încălzitor.

Capetele țevilor ce urmează a fi sudate se fixează în bacurile echipamentului de sudare, urmărindu-se poziționarea corectă a componentelor, astfel încât să fie îndeplinite următoarele cerințe: excentricitatea $\Delta e \leq 10\%$ e și deschiderea $v \leq 5\%$ e; unde "e" reprezintă grosimea peretelui țevii (Figura 3.9).

Prelucrarea părților frontale ale componentelor se realizează prin frezare, cu o presiune adecvată dimensiunilor acestora, astfel încât cele două suprafețe să fie în final plane și paralele între ele.

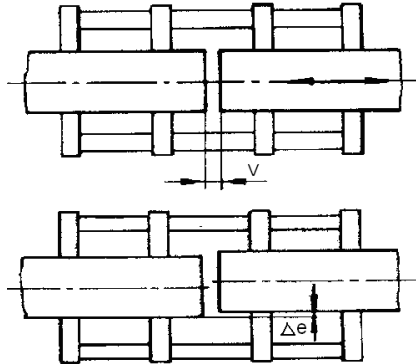


Figura 3.9 Cerințe de poziționare a componentelor

În momentul încadrării celor doi parametri - Δe și V în limitele admise, se face o curățare chimică a capetelor componentelor atât pe suprafețele frontale cât și pe cele adiacente lor (la interior și exterior).

Suprafețele de sudat trebuie să fie menținute în continuare curate, aceasta constituind o condiție esențială pentru obținerea unei îmbinări sudate de calitate.

3.1.1.1.5 Sudarea

În general, fiecare echipament de sudare este însoțit de o carte tehnică care cuprinde și o serie de tabele cu parametrii de sudare recomandați de către producător. Acești parametri de sudare, fiind doar orientativi, este necesar să fie verificați și corecți în funcție de: condițiile concrete de sudare și de comportarea la încălzire a materialului componentelor ce urmează a fi sudate. În acest sens, pentru stabilirea parametrilor de sudare corespunzători, se recomandă optimizarea proceselor de sudare.

Încălzirea componentelor se face sub presiune, în două etape: prin menținere la presiunea P_1 în vederea aducerii materialului în starea fluid vâscoasă, respectiv la presiunea P_2 pentru penetrarea căldurii în profunzimea materialului.

După finalizarea procesului de încălzire se îndepărtează elementul încălzitor, iar componentele se aduc în contact și se supun unei presiuni care crește progresiv (în timpul t_4) până la valoarea necesară sudării P_5 . Se mențin în continuare sub această presiune constantă, până la epuizarea timpului t_5 (Figura 3.10).



Figura 3.10 Răcirea îmbinării sudate sub presiune

În cazul sudării componentelor din polietilenă PE100, cu grosimi mai mari de 20 mm, la finalul sudării se recomandă scăderea presiunii în trepte, cu menținerea la presiunea intermediară P6 un timp t_6 și respectiv un timp t_7 fără presiune, în care nu se manevrează îmbinarea sudată.

Chiar în cazul în care există o bogată experiență în ceea ce privește sudarea în condiții de șantier, este relativ dificil de eliminat toate tipurile de impurități din zona sudării: praf, nisip, apă, grăsimi care pot să intervină și respectiv a imperfecțiunilor ce pot astfel rezulta. Spre exemplu, imperfecțiunile de tip lipsă de topire ("suduri reci") pot să apară ca urmare a utilizării unor parametri, respectiv condiții de pregătire și sudare necorespunzătoare ([36], [37]).

În consecință este important ca îmbinările sudate să fie verificate prin metode de examinare nedistructivă, stabilindu-se măsuri de prevenire și eliminare a cauzelor care determină apariția imperfecțiunilor, în vederea creșterii siguranței în exploatare a sistemelor de conducte.

3.1.1.2. Sudarea prin electrofuziune

3.1.1.2.1 Principiul procedurii

Sudarea prin electrofuziune se utilizează pentru îmbinarea a două țevi prin intermediul unor elemente de legătură speciale denumite electrofitinguri (Figura 3.11, Figura 3.12 și Figura 3.13).

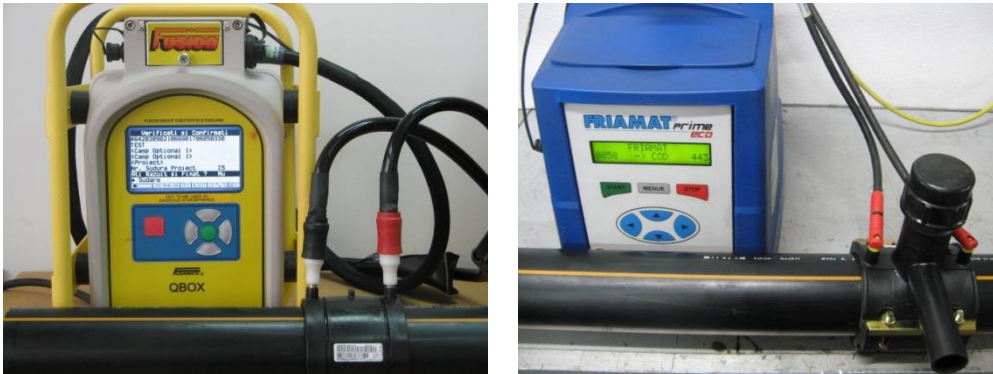


Figura 3.11 Electrofiting tip manșon



Figura 3.12 Electrofiting tip derivație

În componența electrofitingului, în zona din imediata apropiere a suprafeței interioare ce vine în contact cu țeava, există inserat din fabricație un element încălzitor rezistiv, care prin alimentare cu energie de la echipamentul de sudare, dezvoltă prin efect Joule cantitatea de căldură necesară încălzirii componentelor ce urmează a fi sudate.



a) Îmbinare sudată tip manșon

b) Îmbinare sudată tip derivație

Figura 3.13 Tipuri de îmbinări sudate prin electrofuziune

Identificarea tipului de electrofiting utilizat și setarea parametrilor de sudare se face prin citirea codului cu bare de pe eticheta sau cartela atașată acestuia.



Figura 3.14 Codul cu bare pe un electrofiting de tip manșon

3.1.1.2.2 Parametrii de sudare

Principalii parametri tehnologici utilizați la sudarea tip manșon cu element rezistiv sunt: timpul de încălzire și respectiv timpul de răcire.

Echipamentele de sudare prin electrofuziune oferă posibilitatea identificării tipului electrofitingului ce urmează a fi sudat și stabilirea timpului de încălzire necesar. De asemenea, efectuează autoreglarea timpului de încălzire necesar sudării componentelor în funcție de temperatura mediului ambiant, astfel încât prin corectarea timpului de încălzire, se dezvoltă o cantitate de căldură optimă pentru sudare.

3.1.1.2.3 Pregătirea pentru sudare

Pregătirea țevelor în vederea sudării se face prin tăierea acestora la lungimea dorită și îndepărtarea prin răzuire a unei pelicule de material de pe suprafața exterioară a capetelor țevelor, pe o adâncime de cca. 0,1 - 0,2 mm, corespunzător lungimii țevii care se introduce în manșon.

În vederea îndepărtării impurităților de pe suprafețele componentelor, se face o curățare chimică atât a țevilor la exterior cât și a manșonului la partea interioară.

După introducerea pe rând a capetelor țevilor în manșon și fixarea acestora cu ajutorul unor dispozitive, se trece la etapa de sudare.

3.1.1.2.4 Sudarea

Manșonul se conectează, prin cele două borne, la echipamentul de sudare și prin citirea codului cu bare se identifică tipul și caracteristicile electrofitingului. Setarea timpului de încălzire se face în mod automat de către echipament (Figura 3.15).



Figura 3.15 Identificarea fittingului prin citirea codului cu bare

În urma îndeplinirii condițiilor de pregătire necesare, se parcurge timpul de încălzire necesar sudării componentelor (Figura 3.16).



Figura 3.16 Parcurgerea succesivă a etapelor necesare realizării îmbinării sudate

După finalizarea etapei de încălzire, urmează parcurgerea unui timp de răcire în dispozitiv a îmbinării sudate, prin care se definitivează îmbinarea componentelor. Echipamentul înregistrează datele sudării, existând posibilitatea de accesare ulterioară a acestora și de transferare la o imprimantă.

3.1.2. Sudarea geomembranelor

3.1.2.1. Sudarea cu pană încălzitoare

3.1.2.1.1 Principiul procedurii

Procedul de sudare cu pană încălzitoare reprezintă o aplicație destinată îmbinării prin suprapunere a componentelor relativ subțiri de tip membrană, cu grosimea cuprinsă între 1 și 5 mm, denumite în aplicațiile specifice geomembrane.

Geomembranele sunt produse polimerice cu permeabilitate foarte scăzută, utilizate pentru lucrări de etanșare, în contact cu pământuri sau alte materiale din domeniul construcțiilor.

Principial sudarea cu pană încălzitoare se realizează prin utilizarea unei perechi de pene încălzite electric, care dezvoltă cantitatea de căldură necesară sudării componentelor. Marginile geomembranelor sunt introduse în echipamentul de sudare, astfel încât acestea ajung în contact cu suprafața penelor încălzite. Prin intermediul unui sistem de rolelele presoare din componența echipamentului se aplică concomitent cu încălzirea componentelor și presiunea necesară sudării.

3.1.2.1.2 Parametrii de sudare

Echipamentele de sudare cu pană încălzită electric permit reglarea următorilor parametrii de sudare: forța de presare, temperatura penei și viteza de sudare (Figura 3.17).



Figura 3.17 Sudare cu pană încălzitoare - Echipament de tip HERZ - MION

Reglarea parametrilor de sudare este strâns legată de tipul, lungimea și grosimea materialelor, dar și de temperatura mediului ambiant.

În cazul în care temperatura mediului ambiant este scăzută, geomembrana devine mai rigidă, ceea ce impune ca viteza de sudare să fie mai redusă, iar pe măsura creșterii temperaturii, fapt ce conduce la o creștere a flexibilității

materialului, este necesară o mărire corespunzătoare a vitezei de sudare pentru a evita supraîncălzirea componentelor. La sudarea pe șantier în condiții de vânt, este necesară de asemenea stabilirea atentă a parametrilor de sudare, având în vedere efectul de răcire care este exercitat, în aceste condiții, asupra penei și a componentelor.

Valoarea temperaturii penei pentru sudarea geomembranelor din PE-HD este de cuprinsă între 220 - 400 ° C, respectiv valoarea vitezei de sudare poate varia între 0,7 - 4 m/min în funcție de grosimea materialului, condițiile de mediu și tipul echipamentului utilizat [38].

3.1.2.1.3 Sudarea

Având în vedere faptul că tipul îmbinării fiind în acest caz unul de sudare prin suprapunere este necesar ca suprafețele componentelor care se vor îmbina și zonele adiacente să fie curate, fără impurități: praf, nisip, apă, etc., care ajungând în sudură constituie imperfecțiuni sau chiar defecte, ce pot diminua semnificativ rezistența acestora.

Stabilirea unui set de parametri de sudare adecvați pentru o anumită situație de lucru este una din cerințele de bază necesară pentru realizarea unei îmbinări sudate de calitate cerută. De exemplu standardul SR EN 13067, referitor la cerințele de evaluare și acceptare a sudurilor de acest tip, prevede ca ruperea rezultată în urma încercării de desprindere să aibă loc în materialul de bază. În acest sens, pentru îndeplinirea acestei cerințe este necesară optimizarea procesului de sudare prin realizarea și verificarea unor probe preliminare, în vederea stabilirii valorilor optime pentru parametri de sudare corespunzător condițiilor concrete de lucru.

Echipamentul de sudare se reglează la valorile optime ale parametrilor de sudare: temperatură - viteză - forță de presare.

Marginile celor două componente sunt introduse în echipamentul de sudare, după care se aduc penele încălzite în contact cu suprafețele componentelor și se cuplează pârghia ce determină exercitarea forței necesare asupra materialelor, prin intermediul roților presoare. Prin pornirea motorului de antrenare a roților presoare se imprimă astfel echipamentului o deplasare cu viteza de sudare dorită (Figura 3.18).



Figura 3.18 Sudarea cu pană încălzitoare

Pe lângă stabilirea unor valori potrivite pentru temperatura penei și viteza de sudare, adecvate unei anumite situații, este foarte importantă și reglarea forței de presare a componentelor care să favorizeze realizarea unei îmbinări cu rezistență mecanică la nivelul materialului de bază.

3.1.3. Metode de examinare nedistructivă pentru îmbinări sudate din materiale termoplastice

3.1.3.1. Examinarea vizuală

Examinarea vizuală se poate aplica în toate etapele de realizare a unei îmbinări sudate, în special după finalizarea sudării, ca o metodă nedistructivă individuală sau complementar cu alte încercări și examinări nedistructive.

Îmbinările sudate în starea finală se supun examinării vizuale conform cerințelor standardului SR EN 13000-1 [39], urmărindu-se evidențierea imperfecțiunilor de suprafață și verificarea încadrării lor în cerințele de calitate cerute.

3.1.3.2. Examinarea cu ultrasunete

Examinarea nedistructivă ultrasonică se aplică la verificarea îmbinărilor sudate cu element încălzitor, prin electrofuziune, prin extrudare și cu aer cald. Produsele din materiale termoplastice la care se pretează această examinare sunt cele de tipul țevilor și plăcilor, cu grosimi cuprinse între 10 și 100 mm.

Examinarea cu ultrasunete are ca scop evidențierea imperfecțiunilor interne de tip: fisuri, incluziuni, cavități, lipsă de topire, lipsă de pătrundere și încadrarea lor în anumite niveluri de calitate [40]. Standardul SR EN 13100-3 stabilește tehnicile și cerințele de examinare manuală cu ultrasunete a îmbinărilor sudate din materiale termoplastice [41].

3.1.3.2.1 Tehnici de examinare cu ultrasunete

Suprafețele de examinat trebuie să fie netede și lipsite de impurități. Examinarea se poate efectua pe îmbinarea neprelucrată, sau dacă este cazul după îndepărtarea supraînălțării sudurii.

Principalele tehnici de examinare cu ultrasunete utilizate pentru îmbinări sudate din materiale termoplastice sunt următoarele:

□ Examinarea în tandem

Tehnica de examinare în tandem se utilizează pentru examinarea îmbinărilor sudate cu element încălzitor și constă în utilizarea a două traductoare cu incidență oblică similară (la 45° sau la 60°), unul funcționând ca emitor, iar celălalt ca receptor (Figura 3.19).

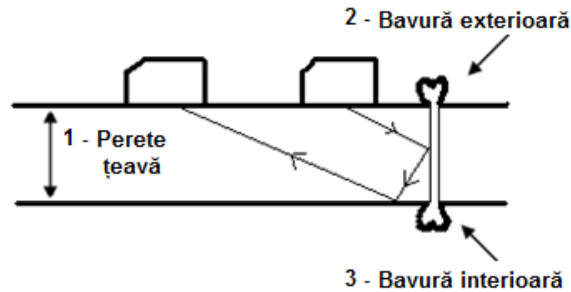


Figura 3.19 Examinarea ultrasonică în tandem [41]

□ Examinarea cu undă longitudinală sub incidență normală

Această tehnică este utilizată pentru examinarea îmbinărilor sudate prin electrofuziune. Se utilizează un singur traductor cu undă longitudinală la 0° care funcționează ca emitor-receptor și permite focalizarea în profunzimea îmbinării sudate (Figura 3.20).

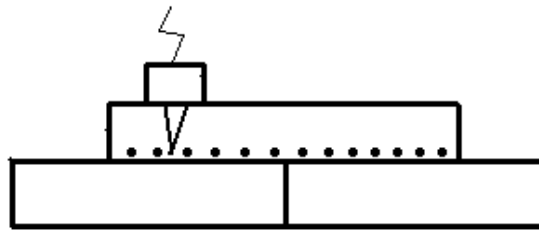


Figura 3.20 Examinarea ultrasonică cu undă longitudinală sub incidență normală [41]

□ Examinarea cu undă longitudinală sub incidență oblică

Această tehnică este utilizată pentru examinarea îmbinărilor sudate cu aer cald sau prin extrudare, necesitând alegerea unui unghi de incidență corespunzător al traductorului (Figura 3.21).

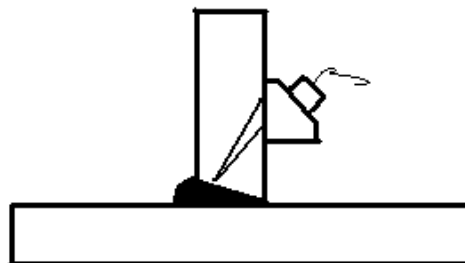


Figura 3.21 Examinarea ultrasonică cu undă longitudinală sub incidență oblică [41]

□ Examinarea prin tehnica timpului de zbor (TOFD)

Tehnica de examinare TOFD este utilizată pentru examinarea îmbinărilor sudate cu element încălzitor; utilizează două traductoare similare la 45° sau la 60° (unul funcționează ca emitor, iar celălalt ca receptor), poziționate de o parte și de alta a sudurii (Figura 3.22).

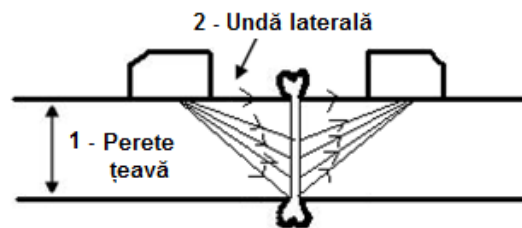


Figura 3.22 Examinarea ultrasonică prin tehnica timpului de zbor - TOFD [41]

La examinarea îmbinărilor sudate din materiale termoplastice se recomandă utilizarea traductoarelor cu unde longitudinale și frecvența cuprinsă între 1 - 5 MHz, care se alege astfel încât sensibilitatea la imperfecțiuni să fie maximă [41].

Cercetările efectuate de Messer, utilizând tehnica de examinare cu ultrasunete TOFD au arătat existența unei corelații strânse între imperfecțiunile identificate prin scanare TOFD și cele reale, atât pe probe cât și în cazul sudurilor aflate pe șantier. Astfel, prin utilizarea acestei tehnici de examinare ultrasonică, se poate efectua cu rezultate foarte bune atât verificarea sudurilor în timpul fabricației, cât și monitorizarea integrității conductei pe parcursul perioadei de exploatare.

De asemenea s-a constatat că la scanarea TOFD a zonei îmbinării sudate apare o perturbare semnificativă a semnalelor ultrasonice, ceea ce demonstrează că există o neomogenitate a materialului rezultat prin sudare, față de materialul de bază [42].

3.1.3.3. Metode moderne de examinare nedistructivă

Examinarea nedistructivă cu ultrasunete este bine cunoscută ca o metodă de evaluare a integrității structurilor sudate din oțel, titan, aluminiu, compozite [43], dar și a celor din materiale termoplastice, oferind posibilități de identificare a imperfecțiunilor de tipul: fisurilor, cavităților, pătrunderii incomplete, incluziunilor, lipsei de topire, precum și a altor imperfecțiuni care pot diminua rezistența îmbinării sudate.

Între metodele moderne de examinare nedistructivă se înscrie metoda de examinare cu ultrasunete denumită "phased array" [44]. Această metodă folosește imagini color care simplifică foarte mult interpretarea rezultatelor, prin crearea de imagini în secțiunea transversală a sudurii, oferind totodată și posibilitatea de stocare a datelor.

Imagistica ultrasonică reprezintă cel mai actual și complex sistem de detectare a discontinuităților din piese, instalații și îmbinări sudate.

Defectosopia cu ultrasunete în sistemul phased array dispune de caracteristici tehnice net superioare defectosopiei ultrasonice clasice, având următoarele avantaje principale:

- productivitate de examinare, prin scanare simplificată a zonei examinate;
- informatizarea completă a secțiunilor de interes din îmbinarea sudată prin posibilitatea focalizării automate în adâncime a undelor în orice punct de interes din secțiunea investigată;
- posibilitatea prelucrării automate a semnalelor reflectate de la discontinuități (imperfecțiuni), a reconstrucției imaginii reale a acestora și a vizualizării în secțiunile de interes pentru operator;
- precizie în identificarea poziției discontinuității și determinarea mărimii și respectiv orientării acesteia [45].

3.1.3.3.1 Examinare cu ultrasunete folosind traductoare matriciale (phased array) a îmbinărilor sudate cap la cap cu element încălzitor

În ultimii ani metoda de examinare cu ultrasunete folosind traductoare matriciale (phased array) a fost adaptată și dezvoltată pentru a se aplica și la determinarea calității îmbinărilor sudate din materiale termoplastice, realizate prin procedee de sudare cap la cap cu element încălzitor [46], [47].

Utilizând o combinație din cele mai recente tehnologii disponibile cu ultrasunete phased array, a fost dezvoltată o nouă tehnică de determinare a calității îmbinărilor sudate cap la cap din polietilenă PE 100. Imperfecțiuni cum ar fi: lipsă de topire, incluziuni și cavități sunt ușor de localizat și evaluat, la o singură scanare cu ultrasunete [48].

3.1.3.3.2 Examinare cu ultrasunete folosind traductoare matriciale (phased array) a îmbinărilor sudate prin electrofuziune

Unul din procedeele de sudare des utilizat la îmbinarea produselor din materiale termoplastice este sudarea prin electrofuziune. Astfel de îmbinări ce conțin fittinguri speciale cu element încălzitor rezistiv, utilizate la sudarea de tip țevă - fitting prin suprapunere, fac relativ dificilă examinarea cu ultrasunete.

Pe măsura dezvoltării tehnicilor de examinare cu ultrasunete folosind traductoare matriciale s-a făcut un pas important în direcția evaluării calității îmbinării sudate prin electrofuziune ([49], [50]).

Caravaca a utilizat examinarea ultrasonică cu palpatoare matriciale, pentru a evidenția imperfecțiunile din îmbinările sudate prin electrofuziune, de tip: incluziuni, lipsă de topire și lipsă de pătrundere. Această tehnică a fost utilizată pentru a oferi o soluție rapidă de detectare și monitorizare a imperfecțiunilor în zona sudurii. În acest mod se urmărește atât identificarea imperfecțiunilor, cât și stabilirea corectitudinii încălzirii componentelor prin analiza poziției și mărimii zonei influențate termic.

Din studiile și cercetările efectuate pe îmbinări sudate cu diferite regimuri, a rezultat că detectarea imperfecțiunilor de sudare s-a realizat relativ ușor și precis prin tehnica phased array utilizată [51].

Încălzirea insuficientă a componentelor urmare a regimurilor de sudare alese, influențează în mod direct mărimea zonei influențate termic, astfel încât prin tehnica de examinare cu traductoare matriciale se pot obține indicații asupra

cantității de căldură dezvoltată pentru sudare și implicit a rezistenței îmbinării sudate [51], [52].

Shin ajunge la rezultate și concluzii similare celor prezentate, arătând că examinarea ultrasonică phased array oferă o rezoluție bună și o putere de penetrare adecvată a ultrasunetelor în îmbinările sudate prin electrofuziune, elementele constitutive ale îmbinării fiind clar identificate [53].

3.2. Moduri și mecanisme de cedare

În sfera preocupărilor cercetătorilor există relativ puține lucrări care să vizeze analiza îmbinărilor sudate din materiale termoplastice. Literatura de specialitate prezintă în general lucrări axate pe comportarea la diferite solicitări a materialelor de bază.

Materialele termoplastice se îmbină prin procedee de sudare specifice, cu sau fără utilizare de material de adaos, folosind în principal încălzirea componentelor prin diferite metode în vederea întrepătrunderii lanțurilor macromoleculare.

Una din lucrările recent apărute (Mikula 2015), caută să facă o analiză mai complexă a cedării sistemelor de conducte din materiale termoplastice sudate, luând în considerare atât modificarea caracteristicilor mecanice și neomogenitatea materialului din zona sudurii, cât și aspectele legate de influența geometriei bavurii sudurii în apariția și propagarea fisurilor în aceste conducte.

Rezultatele cercetărilor efectuate s-au concretizat în elaborarea unei metodologii de evaluare a duratei de viață a conductelor din materiale termoplastice sudate folosind conceptele mecanicii ruperii liniar elastice. Referitor la estimarea duratei de viață a conductei, s-a concluzionat că procesul de sudare are efect de accelerare a propagării lente a fisurii, atât pentru fisuri axiale cât și pentru cele circumferențiale. De asemenea s-a constatat că bavura constituie un concentrator de tensiune care favorizează inițierea de fisuri circumferențiale, ceea ce determină reducerea duratei de viață estimată a conductei, comparativ cu situația unei țevi fără sudură [54].

Morfologia îmbinărilor sudate din materiale termoplastice, în particular a celor realizate prin sudare cu element încălzitor este diferită față de cea a materialului de bază. Forma și dimensiunile bavurii rezultate la sudarea cap la cap cu element încălzitor depind în mod semnificativ de regimul termic utilizat și de starea de tensiune care se creează prin acțiunea procesului de sudare. Acești factori au o influență importantă asupra fiabilității și siguranței în exploatare a întregului sistem de conducte. Prin cercetările efectuate de către Ševčík s-a constatat că în materialul neomogen al sudurii are loc o ușoară creștere a valorii factorului de intensitate a tensiunii față de materialul de bază, respectiv prezența bavurii rezultate în urma sudării are o influență semnificativă în posibila inițiere a fisurii, datorită concentrării tensiunii în zona de contact dintre bavură și materialul țevii [55].

Fazele incipiente de proiectare a unui produs se bazează în principal pe o serie de calcule folosind metode numerice și validări bazate pe legi de comportare adecvate. În cazul materialelor polimerice legile care guvernează comportarea acestora în fazele de fabricație, îmbinare și de exploatare sunt încă insuficient cunoscute. Parenteau arată că cel mai adecvat model de comportare micromecanică, pentru materiale termoplastice parțial cristaline de tip polipropilenă, este cel realizat cu faza cristalină care înconjoară faza amorfă [56].

Materiale termoplastice, în special cele din subgrupa poliolefine (polietilenă, polipropilenă, etc.) și conductele realizate din aceste materiale, prezintă în general la temperatura de 23 ° C și la o viteză relativ redusă de încărcare, o comportare preponderent ductilă. Cu toate acestea, chiar și la un material extrem de ductil, cum ar fi polietilena se poate manifesta o comportare cu un pronunțat caracter fragil. De exemplu, temperatura scăzută și o viteză mare de încărcare, împreună cu tensiunile reziduale [57], [58] pot conduce la un comportare fragilă a acestor materiale. Fenomenul de propagare rapidă a fisurilor (RCP) este unul dintre aspectele de manifestare a cedării prin rupere fragilă.

Prezența unor fisuri sau a altor tipuri de imperfecțiuni sau defecte în materialul unui produs, determină în general un efect de concentrare locală a tensiunii, care în anumite condiții amplificându-se, poate depăși limita de curgere a materialului.

3.2.1. Mecanismul ruperii polimerilor

Ruperea unei structuri polimerice sub acțiunea unor forțe mecanice exterioare poate fi explicată prin intermediul așa numitului proces mecano-chimic, care constă în scindarea legăturilor și separarea lanțurilor macromoleculare, având în principal trei etape: absorbția energiei elastice și deformarea lanțurilor macromoleculare, scindarea legăturilor tensionate sub acțiunea fluctuațiilor termice și inițierea formării microfisurilor, respectiv creșterea microfisurilor și contopirea lor în fisuri mai mari, prin propagarea cărora se realizează ruperea macroscopică a structurii, însoțită de o reorganizare și formare de noi suprafețe.

Printr-o anumită solicitare mecanică exercitată asupra unei structuri polimerice se constată diferite răspunsuri la nivel molecular, în funcție de compoziția chimică și alcătuirea morfologică a polimerului. Macromoleculile încolăcite, tind să se desfacă și să se alinieze pe direcția acțiunii forței exterioare. În cazul în care polimerul este în stare vitrosă acest fenomen se concretizează numai la eforturi relativ mari, astfel încât lanțurile macromoleculare complet întinse, se vor deforma mai întâi elastic.

Polimerii se caracterizează în general prin lungimi neuniforme ale lanțurilor macromoleculare, ceea ce face ca în prima fază, în cazul unor solicitări mecanice, în lanțurile mai lungi să apară scindări ale legăturilor chimice. Continuarea deformării și atingerea domeniului de deformare plastică reprezintă de fapt acumularea, prin fenomene mecano-chimice specifice, a unei stări cu deformații ireversibile. Curgerea materialului poate fi uniformă așa cum este cazul forfecării, sau poate avea loc la nivel local în situația dezvoltării unor imperfecțiuni [59].

Ruperea polimerilor, prin prisma teoriei cinetico-moleculare, este determinată de o acțiune sinergică a efortului mecanic și a fluctuațiilor termice, viteza acestui proces fiind în strânsă legătură cu valoarea forței aplicate, sau a tensiunii dezvoltate în polimer și cu temperatura. Ca urmare, procesul de rupere poate avansa numai dacă forța aplicată crește astfel încât noi lanțuri macromoleculare să fie aduse în stare complet întinsă.

În cazul în care efortul este redistribuit într-o zonă restrânsă de material, ruperile moleculare tind să se acumuleze într-un volum limitat, dând naștere la o microfisură. Astfel, prin inițierea unor microfisuri are loc o întrerupere a continuității materialului și implicit o creștere a tensiunilor interne, care se pot amplifica și pot genera noi microfisuri.

Microfisurile pot fi de două tipuri: extrinseci care se formează pe suprafața unui produs sub influența imperfecțiunilor sau a concentratorilor de tensiune, respectiv intrinseci care apar în volumul produsului urmare a unei solicitări semnificative și a ruperii rețelei macromoleculare [59].

Creșterea prin coalescență a microfisurilor poate conduce la formarea unei fisuri la nivel macroscopic, care prin propagare să determine ruperea, sau la formarea unei multitudini de microfisuri stabile, fenomen cunoscut sub numele de microfisurare.

Principali factori care influențează ruperea materialelor polimerice sunt pe de-o parte cele legate de proprietățile fizice ale acestora, de geometria corpului supus solicitării mecanice și pe de altă parte de condițiile de solicitare (viteza de deformare, temperatură și mediu).

3.2.2. Moduri și procese specifice ruperii materialelor polimerice

La structurile din materiale polimerice, în funcție de modul de propagare a fisurii, pot să apară cele trei moduri distincte de rupere: Modul I - fisura se extinde prin deschiderea suprafețelor de rupere; Modul II - fisura se extinde prin alunecarea plană a suprafețelor de rupere; Modul III - fisura se extinde prin alunecarea laterală a suprafețelor de rupere.

Fenomenele de rupere pot să apară ca urmare a influenței diversilor factori: sarcinile externe aplicate, agenții chimici [60], variațiile temperaturii, mediul și condițiile de exploatare, al căror efect combinat poate conduce la accelerarea fenomenelor de îmbătrânire a materialului [61].

3.2.2.1. Microfisurarea

Microfisurile reprezintă imperfecțiuni de dimensiuni microscopice, care pot să apară în special la polimerii termoplastici amorfii, la tensiuni mai mici decât limita de curgere a materialului.

Diferența dintre microfisuri și fisuri constă în faptul că în timp ce fisura constituie o discontinuitate bidimensională a materialului având două suprafețe opuse distincte, la microfisuri flancurile acestora sunt unite prin fibrile cu dimensiuni de cca. 10 nm (Figura 3.23).

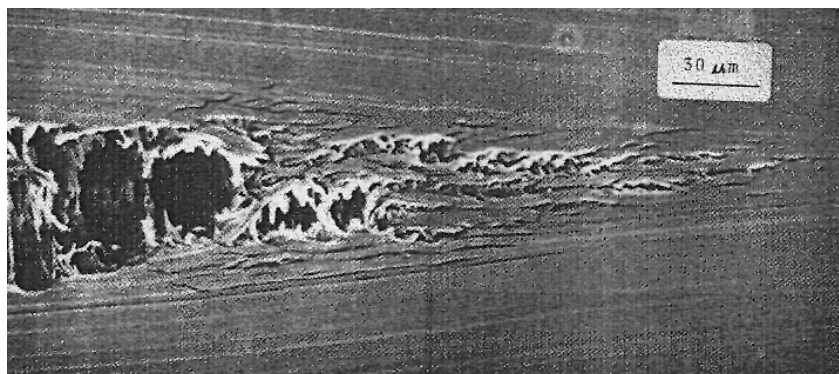


Figura 3.23 Creșterea fisurii la o încercare la încovoiere în trei puncte pe o epruvetă din polietilenă cu densitatea $0,964 \text{ g/cm}^3$ (SEM 315x) [62]

Se consideră că la originea apariției microfisurilor se găsește o stare triaxială de tensiune distribuită la limitele dintre structurile macromoleculare și discontinuitățile din cadrul acestora. Pe măsură ce timpul de solicitare crește, poate avea loc curgerea ductilă a materialului la tensiuni relativ mici. În plus, datorită prezenței unor imperfecțiuni, incluziuni, concentratori de tensiune și tensiuni reziduale, poate să apară curgerea la nivel microscopic. Aceste zone de curgere la nivel microscopic se pot reuni și forma de așa numitele microgoluri, care dau naștere la fibrile și astfel se formează zone cu microfisuri de tip "craze".

3.2.2.2. Fisurarea

Fisurarea unei structuri este unul dintre elementele cele mai clare ce indică o depășire locală a tenacității la rupere a materialului, care poate astfel să conducă la avarierea în timp a acesteia.

Fisurile care apar în materiale termoplastice pot fi clasificate în două categorii: ductile și fragile. Dacă în cazul fisurilor ductile are loc o deformare plastică semnificativă a materialului înaintea ruperii, în cazul ruperilor fragile deformările plastice sunt foarte mici, viteza de propagare a fisurii fiind relativ ridicată.

Atât la nivel macroscopic cât și la nivel microscopic ruperile ductile prezintă suprafețe de rupere cu deformații plastice mari și aspect mai rugos decât al celor realizate prin rupere fragilă (Figura 3.24).

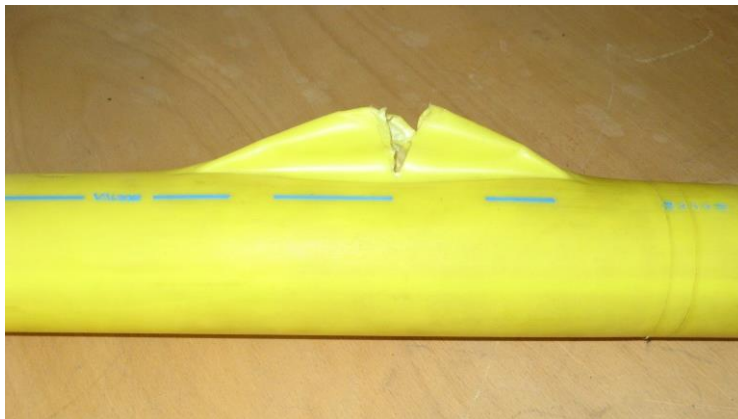


Figura 3.24 Fisură ductilă într-o țevă PE-HD, supusă la presiune interioară hidrostatică

Ruperea în conductele din materiale termoplastice, la o temperatură de referință de 23 ° C, este de tip ductil. La temperaturi mai scăzute, respectiv negative și viteze de solicitare mari, ruperea capătă un caracter fragil. În aceste condiții are loc fenomenul de propagare rapidă a fisurii, caz în care fisura se propagă în lungul țevii cu viteze de până la 370 m/s [63].

În vederea prevenirii acestor fenomene deosebit de periculoase, privind propagarea rapidă a fisurii în conductele din materiale termoplastice au fost dezvoltate numeroase metode de analiză, investigare și evaluarea a riscului de defectare ([64], [65], [66]).

3.3. Imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate

3.3.1. Imperfecțiuni și defecte

Una din modalitățile cele mai rapide și mai des utilizate în prezent pentru verificarea îmbinărilor sudate din materiale termoplastice, în scopul micșorării gradului de risc și evitarea pierderilor provenite din avarii, o reprezintă utilizarea metodelor de examinare nedistructivă.

Cu ajutorul defectoscopiei nedistructive se pot decela imperfecțiunile pentru a le determina natura, poziția și mărimea, în vederea emiterii deciziilor de acceptare, remediere sau neacceptare, în concordanță cu limitele de admisibilitate prescrise în documentația de referință.

Imperfecțiunea unui material, produs, sau în particular a unei îmbinări sudate reprezintă orice abatere de la formă, dimensiuni, aspect, structură, compoziție chimică sau proprietăți mecanice și fizice, prescrise în standardele sau documentația de execuție.

Defectul este imperfecțiunea care depășește mărimea admisă în nivelul de calitate prescris, fie ca dimensiune absolută a_a , fie ca suprafață ocupată în secțiunea considerată A_a (Figura 3.25). Determinarea naturii defectului este deosebit de importantă în vederea identificării cauzelor și stabilirii măsurilor de corectare a execuției [67].

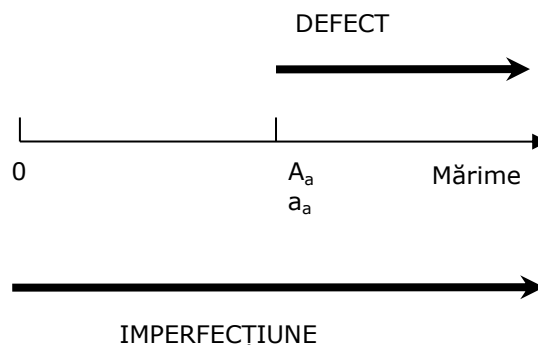


Figura 3.25 Relația imperfecțiune - defect [67]

Standardul SR EN 14728 prezintă principalele categorii de imperfecțiuni care pot să apară la îmbinările sudate din materiale termoplastice, cum ar fi cele de tip: fisură, cavitate, incluziune, lipsă de topire, lipsă de pătrundere, respectiv cele legate de forma și dimensiunile îmbinării sudate [68].

Criteriile de admisibilitate a imperfecțiunilor pentru îmbinările sudate din materiale termoplastice sunt stabilite prin standardul DVS 2202-1 [69]. Astfel, sunt prevăzute trei niveluri de calitate pentru imperfecțiuni: nivelul I – sever, nivelul II – mediu și nivelul III – moderat.

Realizarea unor îmbinări sudate de calitate cerută este strâns legată de influența principalilor factori care intervin: nivelul de pregătire și experiența

sudorului, calitatea materialelor, starea echipamentelor de sudare, condițiile de lucru, etc.

Utilizarea unor echipamente de sudare și dispozitive adecvate, care sunt verificate tehnic periodic, asigurarea unor condiții de lucru optime pe șantier și respectarea strictă a procedurilor de sudare calificate, contribuie deopotrivă la reducerea numărului de imperfecțiuni și la creșterea duratei de viață a componentelor din materiale termoplastice.

3.3.2. Tipuri de imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate la conducte

În general la realizarea unei îmbinări sudate, în funcție de condițiile concrete existente, poate să apară un spectru relativ larg de imperfecțiuni, care în unele situații depășind limitele admise și fiind astfel încadrate în categoria defectelor, conduc la scăderea siguranței în exploatare a structurii sudate, la apariția unor avarii și implicit la înregistrarea unor costuri suplimentare.

Cunoașterea tipurilor de imperfecțiuni care pot să apară la îmbinările sudate din materiale termoplastice și a cauzelor acestora, constituie un fapt deosebit de important în luarea măsurilor necesare privind elaborarea și corectarea procedurilor de sudare și respectiv a sistemului de proiectare, execuție și exploatare în ansamblul său.

Având în vedere că dintre produsele din materiale termoplastice, în prezent, o pondere relativ ridicată o are sudarea țevilor și fittingurilor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), în continuare se prezintă aspecte legate de imperfecțiunile specifice acestora.

Se evidențiază astfel principalele tipuri de imperfecțiuni care apar cel mai frecvent la sudare, respectiv cauzele care le-au determinat.

Procedeele de sudare la care se face referire sunt:

- sudare cap la cap cu element încălzitor;
- sudare tip manșon prin electrofuziune;
- sudare tip derivație prin electrofuziune.

În acest scop se analizează o serie de îmbinări sudate reprezentative, care au fost supuse examinării macroscopice și încercărilor mecanice [70].

Prezentarea se face succesiv în ordinea procedeelor de sudare amintite, conținând la fiecare tip de imperfecțiune o scurtă definiție a acesteia și exemple de epruvete cu imperfecțiuni specifice.

3.3.2.1. Imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate cap la cap cu element încălzitor

În cazul sudării cap la cap cu element încălzitor sunt prezentate imperfecțiunile care sunt cel mai frecvent întâlnite, exemplificarea realizându-se pe o serie de epruvete prelevate din îmbinări sudate din țevi de polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), cu diametre cuprinse între \varnothing 110 - 250 mm.

În primul rând, se prezintă o epruvetă de referință, care a fost prelevată dintr-o îmbinare sudată cap la cap cu element încălzitor, la care, în urma examinării macroscopice nu au fost evidențiate imperfecțiuni. De asemenea, s-a constatat

faptul că inclusiv bavurile interioare și exterioare au o formă și mărime corespunzătoare.

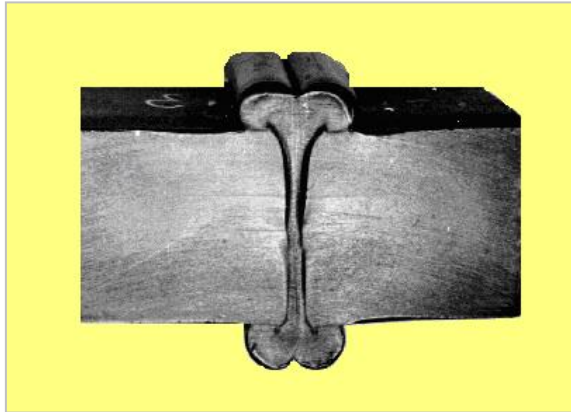


Figura 3.26 Epruvetă prelevată din îmbinare din sudată cap la cap cu element încălzitor (țeavi PE-HD Ø 250 x 24 mm)

3.3.2.1.1. Nealinierie axială

Una din imperfecțiunile cel mai des întâlnite la sudarea cap la cap cu element încălzitor este cea denumită nealinierie axială, caz în care părțile superioare ale suprafețelor exterioare ale celor două componente sunt paralele, dar sunt deaxate una față de alta.

Nealinieria axială reprezintă astfel deplasarea cu o distanță Δe în planul secțiunii transversale, după direcția verticală, a unei componente în raport cu cea de-a doua componentă (Figura 3.27).

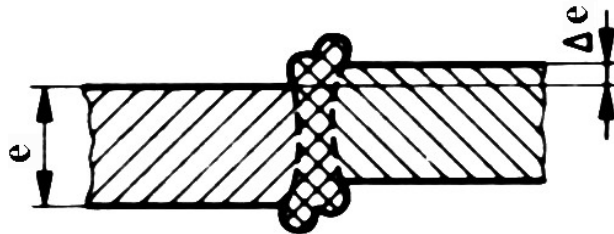


Figura 3.27 Imperfecțiune de tip nealinierie axială

Acest tip de imperfecțiune apare în urma fixării necorespunzătoare în bacuri a componentelor, situațiile cele mai frecvente întâlnindu-se în cazul țevelor livrate în colac. Cauzele care determină obținerea unor astfel de imperfecțiuni se pot datora pe de-o parte ovalității ridicate a țevelor, respectiv echipamentelor de sudare cu grad ridicat de uzură, la care bacurile de fixare a componentelor nu mai sunt coaxiale.

Figura 3.28 prezintă o epruvetă prelevată dintr-o îmbinare din sudată cap la cap cu element încălzitor utilizând țevi PE-HD, Ø 110 x 10 mm, la care în urma analizei macroscopice s-a identificat o imperfecțiune de tip nealinierie axială cu o excentricitate de 0,4 mm.

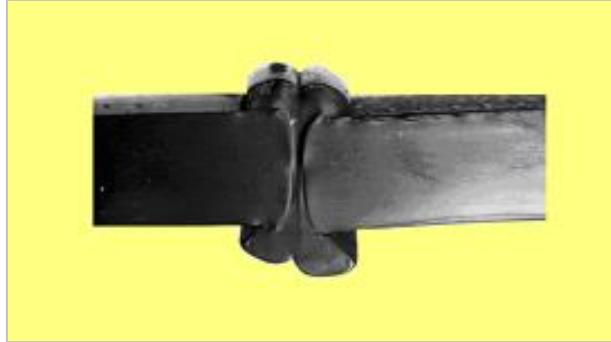


Figura 3.28 Epruvetă examinată macroscopic (țeavi PE-HD Ø 110 x 10 mm) – Imperfecțiune de tip nealiniere axială, având excentricitatea $\Delta e = 0,4$ mm

3.3.2.1.2. Nealiniere unghiulară

Imperfecțiunea de tip nealiniere unghiulară este definită ca fiind deplasarea cu un anumit unghi a axei de simetrie a unei componente față de axa celei de-a doua componente (Figura 3.29).

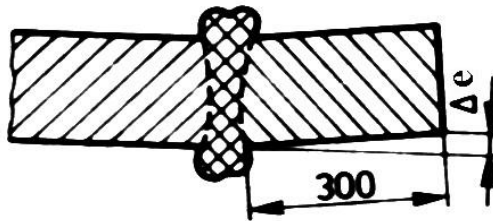


Figura 3.29 Imperfecțiune de tip nealiniere unghiulară

Cauzele care determină obținerea unor astfel de imperfecțiuni se pot datora deformațiilor remanente pronunțate în cazul țevelor livrate în colac și/sau unei pregătiri și fixări necorespunzătoare a componentelor în vederea sudării.

Un astfel de mod necorespunzător de poziționare poate conduce la diferențe de lățime atât la semibavurile interioare cât și la cele exterioare (Figura 3.30).

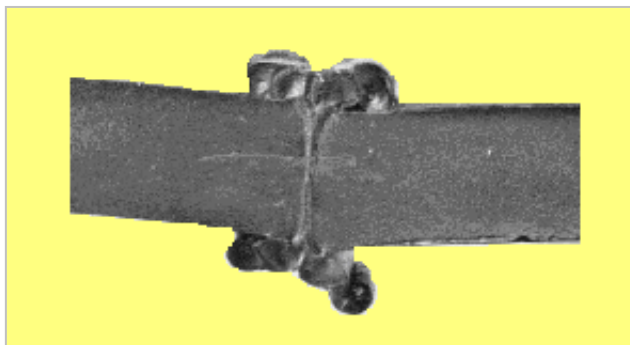


Figura 3.30 Epruvetă examinată macroscopic (țeavi PE-HD Ø 125 x 11 mm) – Imperfecțiune de tip nealiniere unghiulară

3.3.2.1.3. Bavură excesivă

Imperfecțiunea de tip bavură excesivă se caracterizează prin aceea că bavurile de la exteriorul și/sau interiorul conductei au dimensiuni prea mari, uneori și cu formă necorespunzătoare, pe întreaga circumferință sau doar parțial pe anumite zone (Figura 3.31).

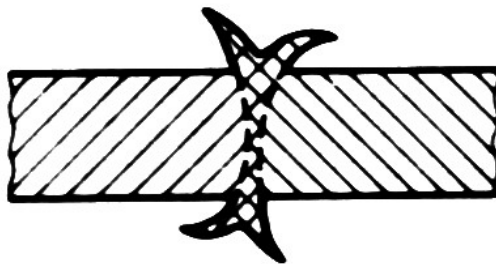


Figura 3.31 Imperfecțiune de tip bavură excesivă

Cauzele apariției unei astfel de imperfecțiuni se datorează utilizării unor parametrii de sudare necorespunzători (timp și presiuni de încălzire prea mari).

În cele mai multe situații, acest tip de imperfecțiune apare doar la partea interioară a îmbinărilor sudate cap la cap cu element încălzitor.

Acest fenomen este mai pronunțat în cazul utilizării unor materiale caracterizate prin indici de fluiditate la cald în masă (MFR) cu valori relativ mici, respectiv utilizarea unor parametrii de sudare neadecvați valorilor indicelui MFR (Figura 3.32, Figura 3.33, Figura 3.34).

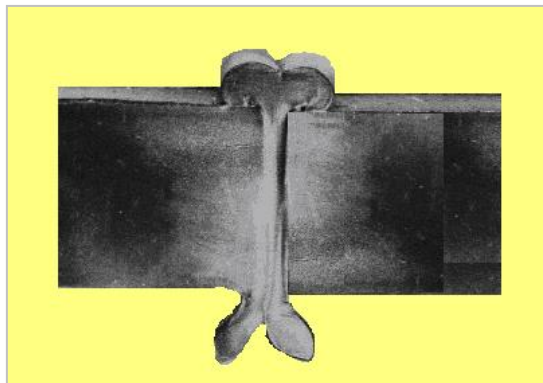


Figura 3.32 Epruvetă examinată macroscopic (țevi PE-HD Ø 250 x 24 mm) – Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei

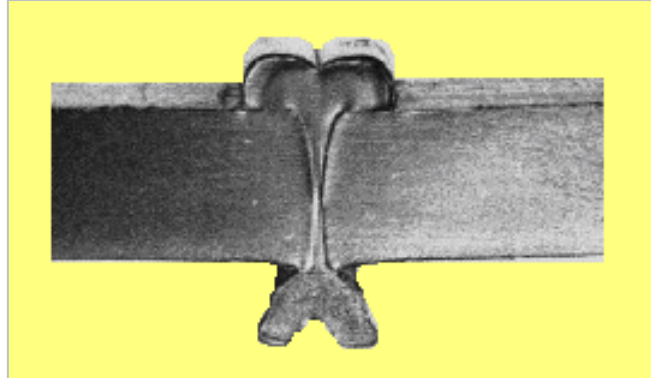


Figura 3.33 Epruvetă examinată macroscopic (țeavi PE-HD Ø 125 x 11,8 mm) – Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei

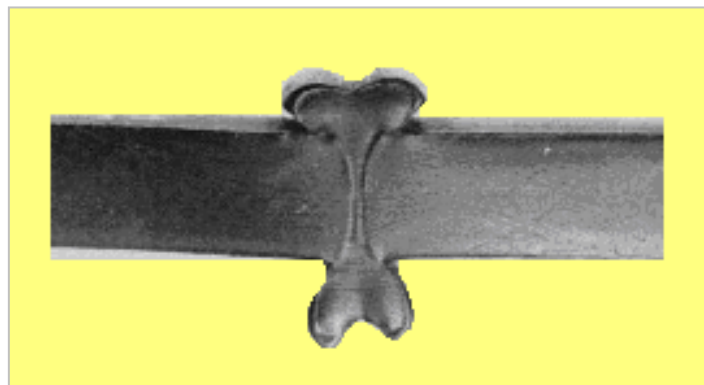


Figura 3.34 Epruvetă examinată macroscopic (țeavi PE-HD Ø 110 x 8,2 mm) – Imperfecțiune de tip bavură excesivă situată la interiorul conductei

3.3.2.1.4. Lipsă de topire

Imperfecțiunea de tip lipsă de topire se definește prin aceea că între cele două componente sudate apare o întrepătrundere incompletă, pe întreaga suprafață de contact sau parțial, obținându-se așa numita "sudură rece" (Figura 3.35).

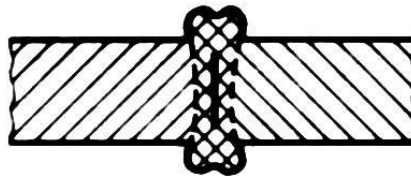


Figura 3.35 Imperfecțiune de tip lipsă de topire

Cauzele care pot conduce la lipsă de topire sunt următoarele: suprafețele componentelor de sudat cu impurități, temperatura elementului încălzitor și timpii de încălzire prea mici, respectiv timpul de manevră și de creștere a presiunii de sudare sunt prea mari.

Informații importante legate de calitatea unei îmbinări sudate se pot obține și prin încercări mecanice. Spre exemplu, în figurile următoare se prezintă câteva cazuri de încercări la tracțiune și respectiv încovoiere realizate pe epruvete prelevate din îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor, la care ruperea realizându-se în sudură s-au evidențiat imperfecțiuni de tip lipsă de topire [70].

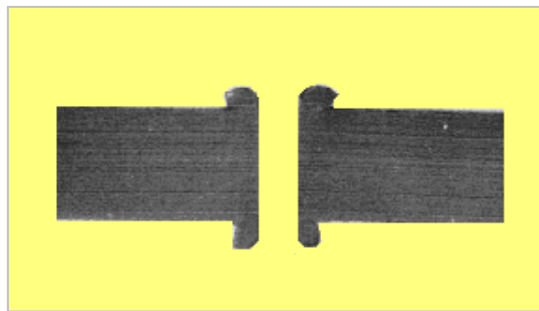


Figura 3.36 Epruvetă încercată la tracțiune (țeavi PE-HD Ø 110 x 10 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

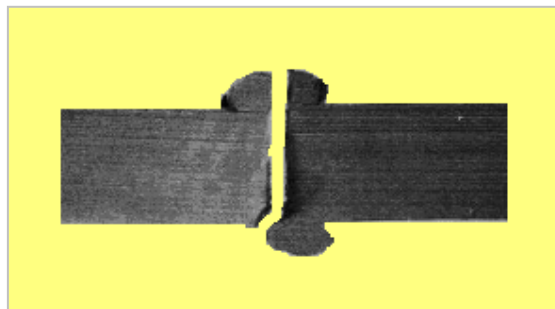


Figura 3.37 Epruvetă încercată la tracțiune (țeavi PE-HD Ø 110 x 10 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

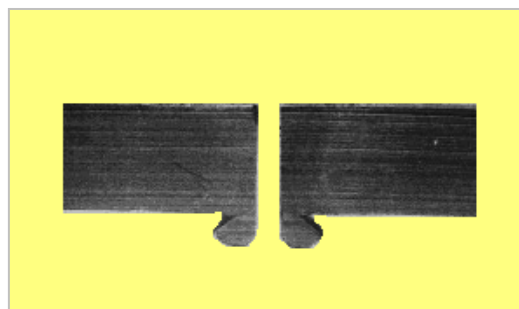


Figura 3.38 Epruvetă încercată la încovoiere (țeavi PE-HD Ø 110 x 10 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

3.3.2.2. Imperfecțiuni specifice îmbinărilor sudate prin electrofuziune

În continuare se prezintă principalele tipuri de imperfecțiuni specifice îmbinările sudate prin electrofuziune. Totodată sunt prezentate exemple de imperfecțiuni pe epruvete de tip tronson sau fâșii, evidențiate prin examinare macroscopică și încercări mecanice, în diferite cazuri de îmbinări sudate din țevi și fittinguri din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

3.3.2.2.1. Lipsă de topire

Lipsa de topire se definește ca fiind acea situație în care între componentele supuse sudării prin suprapunere se înregistrează o lipsă de legătură parțială sau completă pe întreaga suprafață de îmbinat (Figura 3.39).

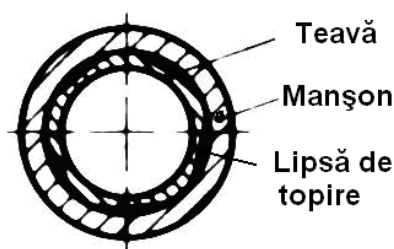


Figura 3.39 Imperfecțiune de tip lipsă de topire

Principalele cauze care pot conduce la lipsă de topire într-o îmbinare sudată prin electrofuziune sunt următoarele: crestături pe suprafața țevii, toleranțe neadmise la diametrul sau grosimea de perete a țevii sau fittingului, prelucrarea mecanică necorespunzătoare a țevii și/sau energia de sudare prea mică. De asemenea, una din cauzele destul de des întâlnită în practică o reprezintă ovalitatea pronunțată a țevilor, fapt care conduce doar la un contact parțial între cele două componente, insuficient pentru a se putea obține o îmbinare sudată corespunzătoare.

În figurile următoare sunt prezentate probe sudate prin electrofuziune de tip manșon, care au fost încercate la tracțiune, fie direct pe epruvete tip tronson $\varnothing 32 \times 3$ mm, fie pe epruvete fâșii prelevate din îmbinările sudate ale țevilor cu dimensiuni mari (țevi cu grosimi de 12 mm și 18 mm).

Figura 3.40a) prezintă o epruvetă tronson cu o rezistență corespunzătoare a îmbinării sudate, ruperea producându-se în materialul de bază. În cazurile b) și c) se poate observa că ruperea s-a produs în sudură, din cauza lipsei de topire. Cauzele care pot conduce la astfel de situații sunt legate incompatibilități dimensionale între țevă și fitting, respectiv de introducerea unei cantități de căldură insuficiente între componente.

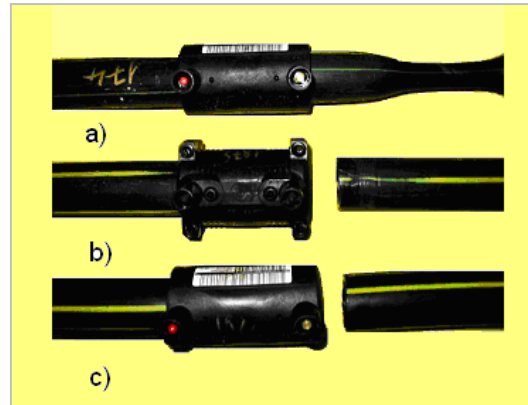


Figura 3.40 Epruvete tronson încercate la tracțiune (țeavi PE-HD Ø 32 x 3 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

De asemenea, la unele epruvete fâșii prelevate din îmbinări sudate prin electrofuziune tip manșon s-au constatat imperfecțiuni de tip lipsă de topire, ruperea producându-se în sudură în urma încercărilor efectuate la tracțiune, cauzele principale fiind legate de incompatibilități dimensionale între țevi și fittinguri (Figura 3.41, Figura 3.42, Figura 3.43, Figura 3.44).

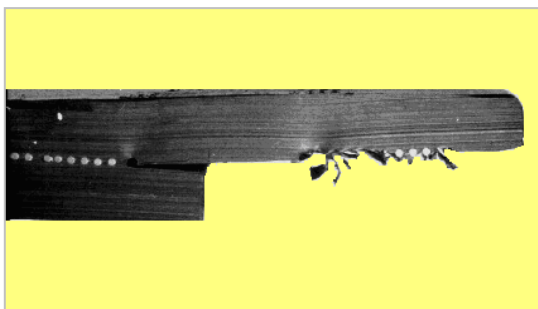


Figura 3.41 Epruvetă fâșie, vedere laterală (țeavi PE-HD cu grosime de 12 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

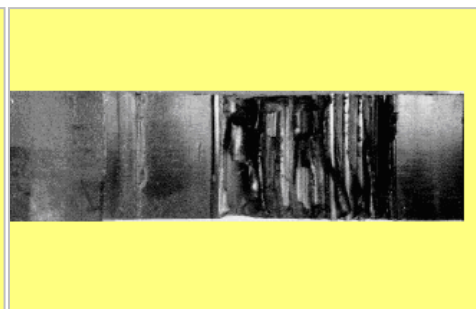


Figura 3.42 Epruvetă fâșie, suprafață de rupere (țeavi PE-HD cu grosime de 12mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

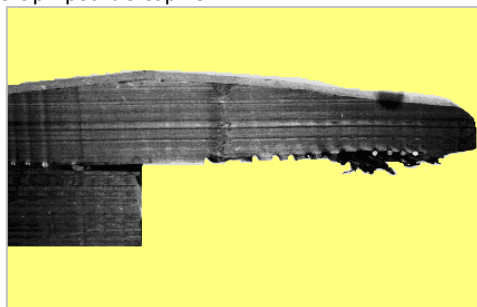


Figura 3.43 Epruvetă fâșie, vedere laterală (țeavi PE-HD cu grosime de 18 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire



Figura 3.44 Epruvetă fâșie, suprafață de rupere (țeavi PE-HD cu grosime de 18 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

Un caz asemănător, cu imperfecțiune de tip lipsa de topire s-a înregistrat la o conductă destinată transportului gazelor naturale. Îmbinarea componentelor țevă-fiting fost realiză prin procedeul de sudare tip manșon prin electrofuziune.

Utilizarea unor componente incompatibile dimensional și respectiv ovalitatea relativ ridicată a țevii au condus, chiar în urma parcurgerii unui timp de încălzire corespunzător, la imposibilitatea realizării unei îmbinări sudate. Se poate observa relativ ușor existența unei lipse totale de topire între componente pe porțiunea din îmbinarea sudată analizată (Figura 3.45, Figura 3.46).

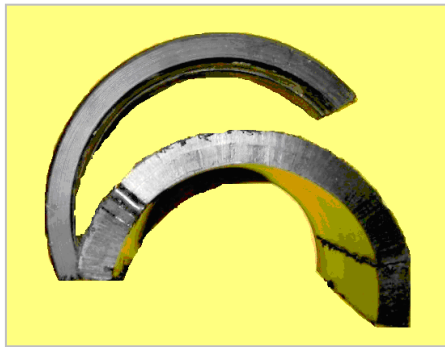


Figura 3.45 Porțiune din îmbinare sudată prin electrofuziune tip manșon, vedere frontală (țevi PE-HD Ø 180 x 16 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

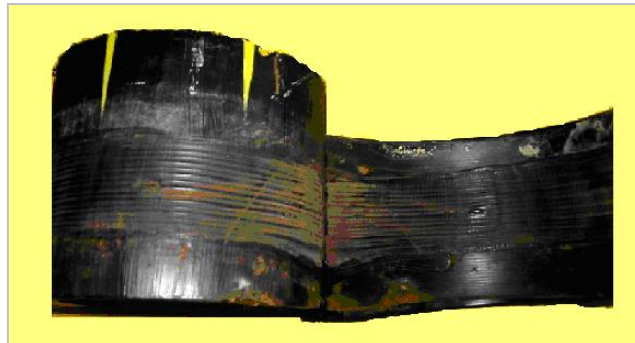


Figura 3.46 Porțiune din îmbinare sudată prin electrofuziune tip manșon, suprafață de contact (țevi PE-HD Ø 180 x 16 mm) – Imperfecțiune de tip lipsă de topire

3.3.2.2.2. Pătrundere insuficientă

Imperfecțiunile de tip pătrundere insuficientă se întâlnesc la sudarea de tip manșon prin electrofuziune, în cazul în care țeava este poziționată necorespunzător în interiorul manșonului, sudarea realizându-se doar parțial din suprafața de contact destinată îmbinării componentelor (Figura 3.47).

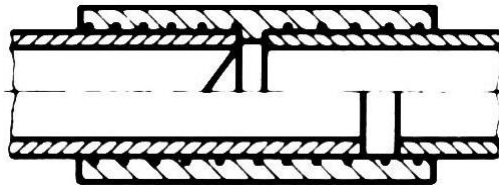


Figura 3.47 Imperfecțiune de tip pătrundere incompletă

Principalele cauze care pot conduce la o astfel de imperfecțiune sunt următoarele: lipsa marcajului sau marcarea necorespunzătoare a capătului țevii, prelucrarea necorespunzătoare a capătului țevii (capetele țevii tăiate oblic) sau deplasare axială a țevilor în timpul încălzirii sau răcirii componentelor [71].

3.3.2.2.3. Lipsă de legătură

Imperfecțiunile de tip lipsă de legătură pot să apară la sudarea prin electrofuziune de tip derivație, în cazul în care fittingul nu este în contact cu țeava pe întreaga suprafață destinată îmbinării, sudarea realizându-se doar parțial din suprafața de îmbinat (Figura 3.48).

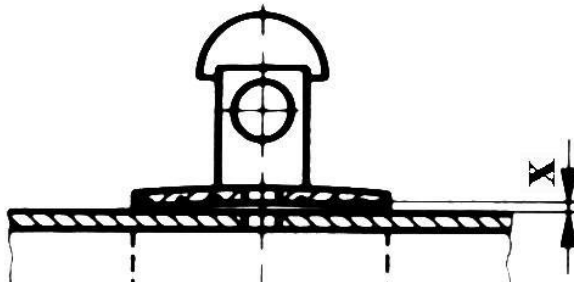
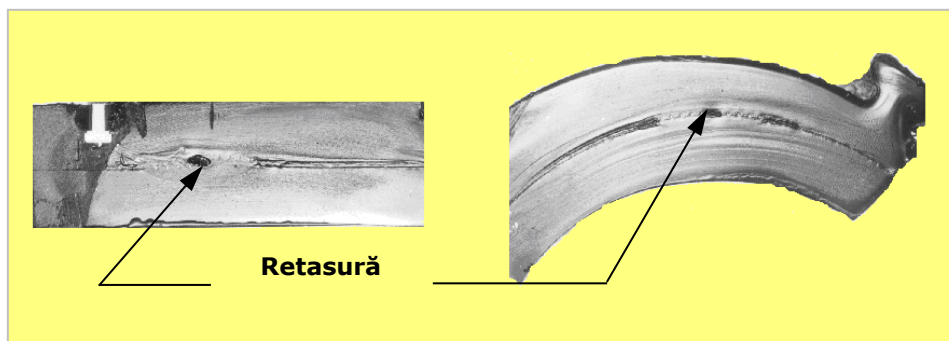


Figura 3.48 Imperfecțiune de tip lipsă de legătură

Un caz particular care poate să apară în anumite situații și la sudarea tip derivație prin electrofuziune, este acela al imperfecțiunilor de tip retasură.

Spre exemplificare se prezintă două epruvete prelevate dintr-o îmbinare sudată de tip derivație prin electrofuziune: derivație $\varnothing 63/32$ mm cu o țevă $\varnothing 63 \times 5,8$ mm.

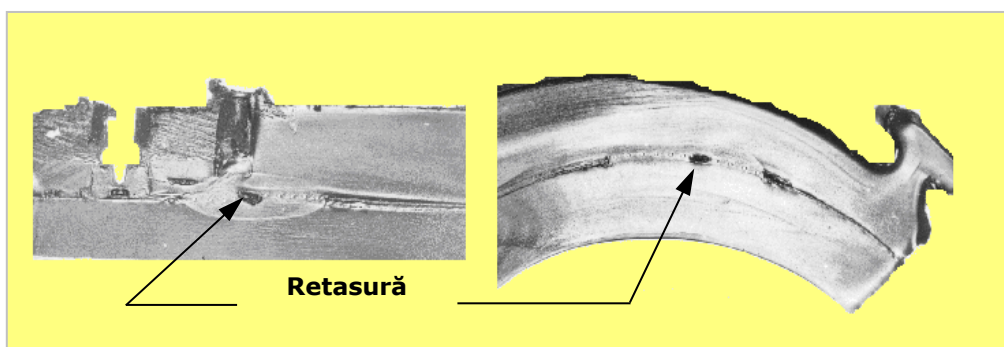
Se poate observa că în urma analizei macroscopice au fost decelate imperfecțiuni de tip retasură. Acest fapt are ca efect reducerea rezistenței îmbinării sudate și poate conduce într-un anumit interval de timp chiar la cedarea acesteia (Figura 3.49, Figura 3.50).



a) Secțiune longitudinală

b) Secțiune transversală

Figura 3.49 Epruvetă prelevată din îmbinare sudată prin electrofuziune tip derivație (țeavă PE-HD Ø 63x5,8 mm) – Imperfecțiune de tip retasură



a) Secțiune longitudinală

b) Secțiune transversală

Figura 3.50 Epruvetă prelevată din îmbinare sudată prin electrofuziune tip derivație (țeavă PE-HD Ø 63x5,8 mm) – Imperfecțiune de tip retasură

Rezultatele analizei efectuate în acest caz au arătat că lungimea însumată a imperfecțiunilor pe cele patru suprafețe investigate, reprezintă 10 % din lungimea totală a sudurii. Principala cauză care a generat apariția acestor retasuri este legată de tipul constructiv al derivației și o posibilă așezare necorespunzătoare a derivației pe țeavă.

3.4. Concluzii privind sudarea și examinarea sudurilor

În acest capitol se prezintă câteva din principalele modalități de îmbinare specifice componentelor din materiale termoplastice. De asemenea, sunt detaliate aspectele tehnologice privind sudarea cu ajutorul procedeelor utilizate în cadrul analizelor și cercetărilor experimentale efectuate: sudarea cap la cap cu element încălzitor și prin electrofuziune, destinate sudării țevilor și fittingurilor, respectiv sudarea cu pană încălzitoare a geomembranelor.

În scopul punerii în evidență a imperfecțiunilor se prezintă unele aspecte referitoare la examinarea nedistructivă ultrasonică, ca fiind o metodă de evaluare a integrității structurilor sudate din materiale metalice și nemetalice - inclusiv cu o

bună aplicabilitate pentru materiale termoplastice, ce oferă posibilități de identificare a imperfecțiunilor de tip: fisuri, cavități, pătrundere incompletă, incluziuni și lipsă de topire.

Una din metodele moderne de examinare nedistructivă cu ultrasunete, denumită "phased array", folosește imagini color ce simplifică foarte mult interpretarea rezultatelor, prin crearea de imagini în secțiunea transversală a sudurii. Imagistica ultrasonică reprezintă cel mai actual și complex sistem de detectare a imperfecțiunilor din piese, instalații și îmbinări sudate.

În cadrul prezentului capitol se evidențiază principalele tipuri de imperfecțiuni care apar la sudarea conductelor din materiale termoplastice și se analizează o serie de îmbinări sudate reprezentative, care au fost supuse examinării macroscopice și încercărilor mecanice, în scopul evidențierii imperfecțiunilor și respectiv pentru stabilirea cauzelor care le-au determinat, în cazul următoarelor procedee de sudare:

- sudare cap la cap cu element încălzitor - epruvete prelevate din îmbinări sudate din țevi de polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), cu diametre cuprinse între Ø 110 - 250 mm;
- sudare prin electrofuziune - epruvete de tip tronson sau fâșii din îmbinări sudate din țevi și fittinguri de polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), cu diametre cuprinse între Ø 32 - 180 mm.

4. COMPORTAREA LA SOLICITĂRI MECANICE A MATERIALELOR DE BAZĂ

În capitolele 4 și 5 se prezintă aspecte legate de caracterizarea materialelor termoplastice de tip PE80 și PE100, care au fost utilizate în cadrul cercetărilor experimentale, în două variante: nesudate (materiale de bază) și sudate.

Cercetările experimentale au fost direcționate spre studierea fenomenelor de rupere, determinarea caracteristicilor de rezistență statică și a tenacității materialelor termoplastice din componența acestor conducte.

În prezentul capitol se urmărește caracterizarea materialelor de bază (MB) PE80 și PE100 care sunt destinate a fi utilizate în alcătuirea sistemelor de conducte destinate vehiculării gazelor naturale sub presiune.

4.1. Considerații generale

Sistemele de conducte reprezintă unul dintre mijloacele cele mai eficiente și mai sigure de transfer a materiei și energiei. Materialele noi, cum ar fi cele plastice și compozite își aduc o contribuție importantă la dezvoltarea domeniului de utilizare a sistemelor de conducte destinate vehiculării fluidelor sub presiune.

Tejile din materiale termoplastice (PE - polietilenă, PP - polipropilenă, PVDF - polifluorură de viniliden) prezintă o serie de caracteristici superioare celor din materiale metalice, cum ar fi: greutatea scăzută, comportarea foarte bună la îmbinate prin sudare, rezistența la coroziune și o durată de viață proiectată de peste 50 de ani. Aceste caracteristici importante sunt avute în considerare în toate aspectele ce țin de siguranța în exploatare, limitarea posibilităților de apariție a unor avarii și respectiv la strategiile de rețehnologizare.

Cu toate că din punct de vedere statistic conductele prezintă, pe baza evenimentelor înregistrate în timp, o siguranță mai bună în funcționare decât alte moduri de transport pentru fluide, sistemele de conducte, la fel ca toate celelalte sisteme, pot prezenta anumite evenimente nedorite de tipul avariilor. În aceste situații în care, din anumite cauze, este afectată buna funcționare a sistemului de conducte prin: afectarea integrității, schimbarea configurației acestuia, disfuncții, etc., se poate ajunge uneori chiar să fie pusă în pericol securitatea oamenilor și a mediul înconjurător.

Un sistem de conducte poate ceda dintr-o mare varietate de cauze și mecanisme de cedare specifice, care pot include: erori de proiectare, materiale necorespunzătoare, cauze legate de instalare, condiții de exploatare, factorii de mediu, diferiți agenți termici, chimici, mecanici și alți factori care pot determina îmbătrânirea prematură și deteriorarea materialelor.

În ultimii ani studiile teoretice și experimentale sunt concentrate în direcția cercetării, verificării și corelării criteriilor de Mecanica Ruperii. Elaborarea unor programe de calcul a parametrilor de mecanica ruperii, bazate pe Metoda Elementelor Finite sau Metoda Elementelor de Frontieră [72], reprezintă la ora actuală o direcție importantă de cercetare.

În vederea estimării comportării materialelor termoplastice, cum ar fi de exemplu cele de tip polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), din componența unor structuri mecanice în timpul fazei în exploatare, se consideră că dezvoltarea unor modele constitutive este de prim interes. Acest fapt presupune în primul rând obținerea de date relevante privind înțelegerea comportării mecanice a materialului în diferite condiții de solicitare. Rezultatele cercetărilor experimentale au arătat că aspectele legate de comportarea la curgere a materialelor de tip PE-HD poate fi estimată folosind modelele micromecanice [73].

Djokovic a investigat comportarea polietilenei de înaltă densitate (PE-HD) și a celei liniare de joasă densitate (PE-LLD) la temperatura ambiantă și temperaturi ridicate de până la 100 ° C, determinând parametrii vâscoelastici ai părții de structură amorfă și respectiv cristalină [74].

Materialele termoplastice sunt utilizate și în componența unor compozite cu diverse aplicații, cum ar fi țevile cu matrice termoplastică armate (ranforsate) simbolizate RTP ("reinforced thermoplastic pipe"), destinate vehicularii produselor petroliere. Principalele componente ale unui material RTP sunt o matrice termoplastică având rolul de a conferi impermeabilizate și rezistență la coroziune, respectiv un set de înfășurări elicoidale de armare continuă care asigură rezistența la presiunea interioară și respectiv un strat de acoperire exterior pentru protecția împotriva acțiunilor externe. Cercetările efectuate de Kruijer, utilizând un model bazat pe analiza tensiunilor, au analizat și explicat comportarea mecanică a materialului compozit de tip RTP cu matrice termoplastică PE100 [75].

În acest context cercetările experimentale urmărite în cadrul acestui capitol au fost direcționate spre studierea fenomenelor de rupere și determinarea caracteristicilor de rezistență statică a materialelor termoplastice din componența acestor conducte.

4.2. Caracterizarea ruperii materialelor polimerice

Utilizarea foarte intensă în ultimii ani a materialelor plastice, în special a celor termoplastice, în numeroase aplicații "de rezistență" a condus la necesitatea aplicării conceptelor de mecanica ruperii și în acest domeniu.

În timp ce materialele polimerice vâscoelastice, deformate în domeniul elastic revin la forma inițială, la materialele care prezintă fenomene de curgere apare o deformare ireversibilă a cărei valoare depinde de: natura polimerului, mărimea forței aplicate, durata aplicării ei și de temperatură.

4.2.1. Comportarea vâscoelastică

În cazul unui componente supusă acțiunii unei forțe uniaxiale, tensiunea σ care apare în material este forța aplicată (tracțiune sau compresiune) raportată la aria secțiunii transversale.

Deformația ε reprezintă alungirea (sau reducerea lungimii) raportată la lungimea inițială. Pentru un material perfect elastic tensiunea este direct proporțională cu deformația:

$$\sigma = \text{constant} \times \varepsilon \quad (4.1)$$

Într-un fluid perfect vâscos (Newtonian) tensiunea de forfecare τ este direct proporțională cu viteza de deformare (dy/dt), având următoarea relație:

$$\tau = \text{constant} \times \frac{d\gamma}{dt} \quad (4.2)$$

unde constanta în acest caz se referă la vâscozitatea fluidului.

Materialele polimerice, în ceea ce privește proprietățile mecanice se află undeva între aceste două cazuri ideale, drept urmare se numesc vâscoelastice.

La materialele vâscoelastice tensiunea este funcție de deformare și timp, care poate fi descrisă prin ecuația:

$$\sigma = f(\varepsilon, t) \quad (4.3)$$

Acest tip de răspuns este corespunzător unui material vâscoelastic neliniar, dar pentru o analiză mai simplă, adesea relația de mai sus se poate reduce la următoarea formă:

$$\sigma = \varepsilon f(t) \quad (4.4)$$

Polimerii prezintă o deformare vâscoelastică dependentă de viteza de deformare, ceea ce constituie o consecință directă a structurii lor moleculare.

Figura 4.1 prezintă în mod simplificat comportarea vâscoelastică la nivel molecular. Între două molecule învecinate sau între diferitele segmente suprapuse ale unei singure molecule, se manifestă forțe de atracție slabe, numite legături de tip Van der Waals (legături secundare).

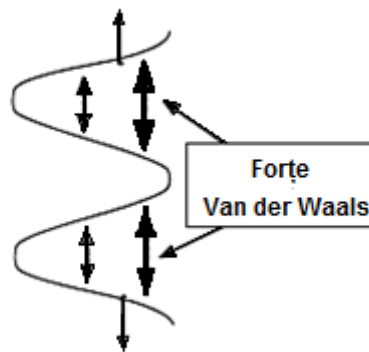


Figura 4.1 Deformația lanțului polimeric. Forțe de legătură tip Van der Waals [76].

Modulul de elasticitate pentru un polimer obișnuit este semnificativ mai mic decât modulul Young pentru metale și ceramice, deoarece legăturile Van der Waals sunt mult mai slabe decât legăturile primare.

Materialul se deformează relativ ușor dacă viteza de deformare este scăzută, oferind astfel timp suficient pentru mișcare. La viteze de deformare ridicate sunt necesare forțe mai mari pentru a deforma materialul. Dacă forța este îndepărtată, materialul încearcă să revină la forma sa inițială, dar dispunerea moleculară încălțită împiedică revenirea elastică instantanee. Dacă deformarea este suficient de mare,

apar fenomene de curgere, cum ar fi microfisurarea ("crazing") sau forfecarea ("shear deformation"), o anumită parte a deformației având caracter ireversibil.

Trecerea corpurilor reale, spre deosebire de solidele ideale la care trecerea se face instantaneu dintr-o stare de dezechilibru în cea de echilibru, spre nouă stare de echilibru se face după o anumită perioadă de timp numită perioada de relaxare. Fenomenul de relaxare este caracteristic proceselor de trecere, cu viteza finită, la noua formă de echilibru.

Perioada de timp necesară rearanjării segmentelor macromoleculii este influențată de temperatură; cu cât temperatura va fi mai ridicată, cu atât perioada de timp necesară relaxării va fi mai scurtă.

În timp ce materialele polimerice vâscoelastice, deformate în domeniul elastic revin la forma inițială, la materialele care prezintă fenomene de curgere apare o deformație ireversibilă a cărei valoare depinde de natura polimerului, de mărimea forței aplicate, de durata aplicării ei și de temperatură.

Modulul de relaxare $E(t)$ și complianța la fluaj $D(t)$ descriu comportarea funcție de timp a materialelor vâscoelastice. Modulul de relaxare $E(t)$ și complianța la fluaj $D(t)$ se pot obține experimental prin stabilirea tensiunii și deformației:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (4.5)$$

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (4.6)$$

Pentru materiale vâscoelastice liniare, $E(t)$ și $D(t)$ se regăsesc în formula lui ε și respectiv σ [76], astfel:

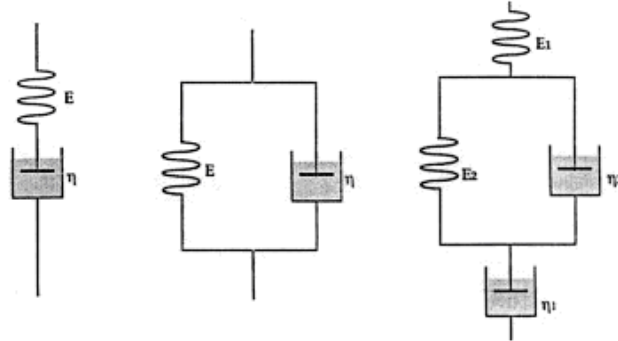
$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4.7)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4.8)$$

4.2.2. Modele mecanice ale comportării vâscoelastice

Modelele mecanice simple pot fi utilizate pentru a înțelege comportarea vâscoelastică a polimerilor. Figura 4.2 ilustrează trei asemenea modele:

- modelul Maxwell, care constă dintr-un resort și un amortizor așezate în serie
- modelul Voigt, care constă dintr-un resort și un amortizor așezate în paralel
- modelul Maxwell-Voigt, care constă dintr-o combinație a celor două.



a) Modelul Maxwell b) Modelul Voigt c) Modelul combinat
 Figura 4.2 Modele mecanice pentru deformația vâscoelastică a polimerilor [76]

Relația tensiune-deformație în cazul resortului este de forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.9)$$

în timp ce răspunsul amortizorului este dependent de timp:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (4.10)$$

unde $\dot{\varepsilon}$ este viteza de deformație și η reprezintă vâscozitatea fluidului din amortizor.

Dependența lui η de temperatură poate fi descrisă cu ajutorul unei ecuații de tip Arrhenius:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.11)$$

unde Q este energia de activare pentru fluidul vâscos (care poate depinde de temperatură), T este temperatura absolută și R este constanta gazelor.

În cazul modelului Maxwell, tensiunile în resort și în amortizor sunt egale, iar deformațiile se însumează. Deci,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.12)$$

Într-un experiment pentru relaxarea tensiunii, deformația este stabilită la valoarea ε_0 și $\dot{\varepsilon} = 0$. Integrând în funcție de timp se obține:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{t_R}\right) \quad (4.13)$$

unde σ_0 este tensiunea la $t=0$, iar $t_R + \frac{\eta}{E}$ este timpul de relaxare.

În cazul modelului Voigt deformațiile sunt egale și tensiunile se însumează:

$$\sigma(t) = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (4.14)$$

Într-o încercare la fluaj, ecuația de mai sus poate fi integrată, obținându-se:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - \exp^{-\frac{t}{t_R}} \right) \quad (4.15)$$

Se observă că valoarea limită a deformației la fluaj pentru acest model este σ_0/E , care corespunde la tensiune egală cu zero în amortizor. Dacă tensiunea revine la valoarea inițială, deformația revine ca o funcție de timp:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp^{-\frac{t}{t_R}} \quad (4.16)$$

unde ε_0 este deformația la $t=0$, care este momentul la care începe descărcarea.

Nici unul dintre aceste modele nu descrie toate tipurile de răspuns vâscoelastic. De exemplu, modelul Maxwell nu consideră revenirea vâscoelastică, în timp ce modelul Voigt nu se poate aplica în cazul relaxării tensiunii.

În cazul în care facem o combinație a celor două modele obținem unul mai apropiat de realitate referitor la comportarea vâscoelastică. Pentru o încercare la fluaj sub tensiune constantă, se obține următoarea relație:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - \exp^{-\frac{t}{t_R}} \right) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_1} \quad (4.17)$$

Toate cele trei modele sunt modele simplificate ale comportării polimerilor, dar pot fi utilizate pentru aproximarea diferitelor tipuri de comportări vâscoelastice.

4.2.3. Curgerea și ruperea polimerilor

Dacă în cazul materialelor metalice cele mai multe din aspectele legate de ruperea acestora sunt bine stabilite, la materiale nemetalice, în particular la polimerii termoplastici cercetările sunt în plin proces de desfășurare.

Comportarea la rupere a materialelor polimerice a devenit în ultimii ani o preocupare majoră, având în vedere multitudinea domeniilor industriale în care acestea au aplicații.

Având un important suport teoretic și experimental existent din domeniul materialelor metalice privind curgerea și particularitățile referitoare la ruperea

acestora, se studiază posibilitățile ca aceste informații să poată fi folosite și la materiale polimerice.

S-a constatat însă, până în prezent, că doar într-o măsură relativ mică pot fi aplicate conceptele legate de curgerea și ruperea materialelor metalice, date fiind diferențele semnificative legate de curgerea și ruperea la nivel microscopic specifice polimerilor.

Există de exemplu, multe situații în care conceptele de mecanica ruperii ce se aplică la metale își pierd valabilitatea la alte materiale.

La metale, ruperea și curgerea urmăresc un mecanism de cedare. Ruperea fragilă apare la materialele la care curgerea este dificilă. Metalele ductile, prin definiție, suferă deformații plastice extinse înaintea ruperii. Temperaturile scăzute, vitezele de deformare ridicate și triaxialitatea stării de tensiune tind să suprimă curgerea și să favorizeze ruperea fragilă.

Factorii care guvernează tenacitatea și ductilitatea polimerilor includ viteza de deformare, temperatura și structura moleculară. La viteze mari sau temperaturi scăzute (față de temperatura de vitrifiere T_v) polimerii tind să devină fragili întrucât nu este suficient timp pentru ca materialul să răspundă la tensiune cu o deformație vâscoelastică la scară mare sau curgere.

Se cunoaște că rezistența la rupere teoretică la majoritatea materialelor este cu câteva ordine de mărime mai mare decât rezistența la rupere efectivă, lucru pus pe seama imperfecțiunilor ce produc local concentratori importanți de tensiune.

Alt factor ce ajută scindarea catenei este faptul că moleculele nu sunt tensionate uniform. Când se aplică o tensiune unei epruvete realizate dintr-un polimer, anumite segmente de lanț suportă o sarcină disproporționată, care poate fi suficientă pentru depășirea locală a rezistenței legăturii.

Majoritatea polimerilor, ca și metalele, curg la o tensiune suficient de mare. În timp ce metalele curg prin deplasarea dislocațiilor în lungul suprafeței de alunecare, polimerii prezintă două mecanisme de cedare: curgerea prin forfecare și microfisurarea ("crazing").

Curgerea prin forfecare la polimeri se aseamănă cu curgerea plastică la metale, cel puțin din punctul de vedere al continuității mecanice. Moleculele alunecă unele pe lângă altele când se atinge tensiunea critică de forfecare. Principiul curgerii prin forfecare poate fi bazat pe tensiunea maximă de forfecare sau tensiunea octoedrică de forfecare [76]:

$$\tau_{max} = \tau_0 - \mu_s \sigma_m \quad (4.18)$$

sau

$$\tau_{oct} = \tau_0 - \mu_s \sigma_m \quad (4.19)$$

unde σ_m este tensiunea hidrostatică și μ_s este o constantă de material ce caracterizează sensibilitatea spre o comportare ductilă sub σ_m . Dacă $\mu_s = 0$, ecuațiile se reduc la criteriul curgerii lui Tresca, respectiv von Mises.

Polimerii amorfi supuși unei solicitări de întindere deseori curg prin mecanismul de microfisurare, care apare datorită unor deformații puternic localizate, fapt ce conduce la fenomene de cavitație (formarea de goluri) și deformații de peste 100 %.

La nivel macroscopic, fisurile apar ca o zonă tensionată înălbită datorită indicelui de refracție scăzut. Zona "craze" deseori se formează perpendicular pe tensiunea normală principală maximă.

Polimerii amorfi omogeni prezintă un mecanism de cedare prin microfisurare. La deformării suficient de mari, lanțurile moleculare formează fascicule aliniat denumite fibrile. Între fibrile se formează microgoluri datorită unei incompatibilități a deformației din vecinătatea fibrelor. Structura aliniată permite fibrelor să suporte tensiuni relativ mari raportat la starea amorfă nedeformată (Figura 4.3).

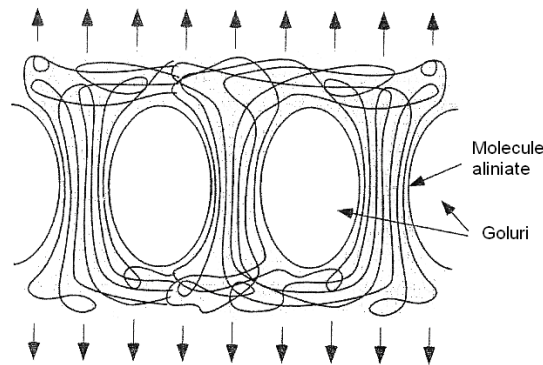


Figura 4.3 Formațiuni "craze" la polimeri amorfi. Zonele "craze" cresc prin atragerea de material suplimentar spre fibrile [76]

Microfisurile de tip "craze" apar atât în polimeri amorfi, cât și în unii polimeri parțial cristalini, cum ar fi polietilena (PE), polipropilena (PP), etc.

Figura 4.4 prezintă o microfisurare de tip "craze" într-o probă subțire din polistiren (PS). Se observă că fisura este perpendiculară pe direcția de solicitare la tracțiune uniaxială, în timp ce fibrilele din cadrul zonei microfisurate sunt dispuse paralel cu axa de solicitare.

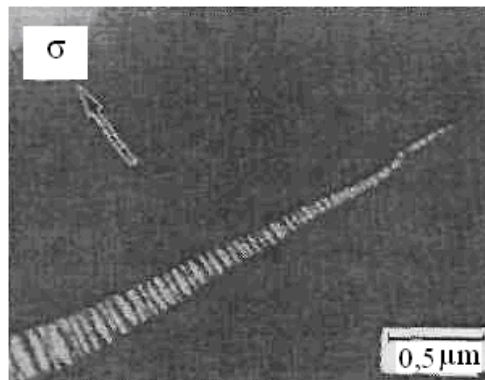


Figura 4.4 Zonă de microfisurare în polistiren [77]

Oxborough și Bowden au propus următoarea lege pentru cedarea de tip "craze" [76]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\beta(t, T)}{E} + \frac{\gamma(t, T)}{3\sigma_m} \quad (4.20)$$

unde ε_I este deformația normală principală maximă, iar β și γ sunt parametri dependenți de timp și temperatură.

Ruperea apare într-o zonă "craze" când fibrilele individuale cedează. Acest proces poate fi instabil, dacă la cedarea unei fibrile tensiunea redistribuită este suficient de mare pentru a rupe una sau mai multe fibrile învecinate.

Fenomenul de microfisure, în general, are conotație cu ruperea fragilă, în timp ce curgerea prin forfecare reprezintă un proces ductil.

Microfisurarea de tip "craze" și curgerea prin forfecare sunt mecanisme concurente. Comportarea predominantă la curgere depinde de structura moleculară, de starea de tensiune și temperatură. Fiecare mecanism de curgere prezintă o dependență diferită de temperatură, astfel încât mecanismul dominant se poate schimba la modificarea temperaturii.

4.2.3.1. Comportarea la vârful fisurii

La fel ca în cazul metalelor și la polimeri zona de curgere se formează la vârful fisurii. În cazul curgerii prin forfecare, zona degradată se aseamănă cu zona plastică de la metale, deoarece deformarea prin alunecare de la metale și polimeri sunt guvernate de legi de curgere similare. Curgerea prin microfisure, produce o zonă cu benzi de curgere de tip Dugdale dinaintea vârfului fisurii.

Dintre cele două mecanisme specifice polimerilor, microfisurea este într-o oarecare măsură mai mult întâlnită la vârful fisurii, datorită stării de tensiune triaxială. Curgerea prin forfecare poate să apară și ea la vârful fisurii la anumite materiale, în funcție de temperatură și de geometria epruvetei.

Figura 4.5 prezintă o zonă "craze" la vârful fisurii.

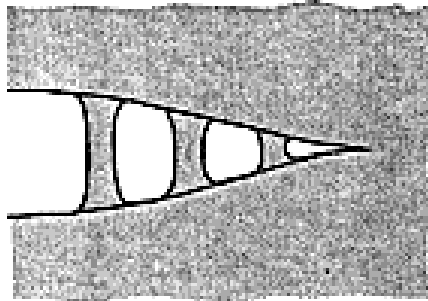


Figura 4.5 Schematizarea zonei cu microfisure la vârful fisurii [76]

În cazul în care zona microfisurată din fața vârfului fisurii este mică comparativ cu dimensiunile epruvetei, se poate estima dimensiunea acesteia ρ , cu ajutorul modelului benzilor de curgere Dugdale-Barenblatt:

$$\rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_c} \right)^2 \quad (4.21)$$

unde K_I este factorul de intensitate a tensiunii la vârful fisurii, iar σ_c este tensiunea care determină curgerea.

Fisura avansează până când fibrele de la marginea zonei solicitate cedează, adică cu alte cuvinte, când cavitățile din zona "craze" se unesc cu vârful fisurii.

Figura 4.6 reprezintă o fractografie SEM a suprafeței de rupere a unei epruvete din polipropilenă care a cedat după un mecanism de microfisurare "craze".

Creșterea fisurii prin microfisurare poate fi stabilă sau instabilă, aceasta depinzând de tenacitatea relativă a materialului. Unii polimeri cu tenacitate intermediară prezintă sporadic, așa numita creștere stick/slip a fisurii: la o deschidere critică la vârful fisurii, întreaga zonă microfisurată se rupe, fisura după o propagare bruscă se oprește, și apoi zona microfisurată se reface la un nou vârf al fisurii.

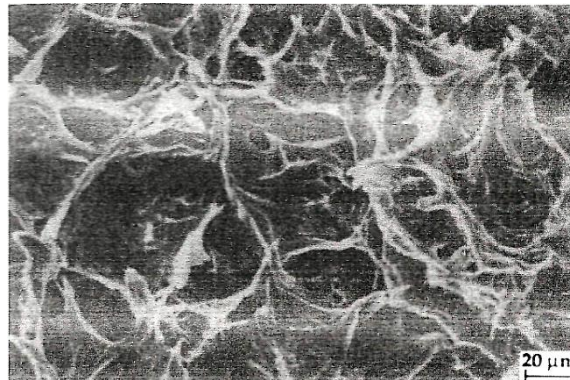


Figura 4.6 Imagine SEM a unei suprafețe de rupere dintr-o zonă "craze" în polipropilenă [76]

Fenomenul de microfisurare tip "craze" este specific și materialelor țevilor din polietilenă. Polietilena fiind un polimer parțial cristalin, reacționează la concentrarea de tensiune la vârful fisurii, cu formarea unei zone "craze" specifice (Figura 4.7).

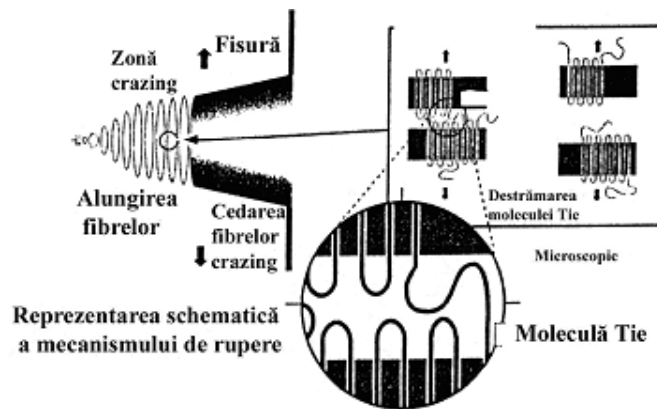


Figura 4.7 Procesul de creștere lentă a fisurii într-o zonă cu microfisurare, la o țevă din polietilenă PE 100 [77]

Zona de microfisurare "craze" constă din fibrile orientate perpendicular pe direcția de înaintare a fisurii. Fibrilele fiind deformate tot mai mult până la rupere, tensiunea în vârful fisurii crește și din zona de nucleație se formează noile fibrile, care preiau tensiunea. Astfel fisura se propagă prin materialul țevii, în lungul acesteia.

4.3. Comportarea la solicitări statice a materialelor de bază

4.3.1. Proprietăți mecanice ale materialelor termoplastice

Materialele termoplastice sunt vâscoelastice ceea ce înseamnă că proprietățile lor mecanice reflectă ambele caracteristici: vâscozitatea lichidelor și elasticitatea solidelor. Astfel, în cazul în care un anumit corp din material termoplastic este supus acțiunii unor solicitări mecanice, acesta răspunde pe de-o parte printr-o curgere vâscoasă (prin care se disipă energie), iar pe de alta printr-o deplasare elastică, prin care se înmagazinează energie.

Proprietățile materialelor vâscoelastice sunt dependente de: timp, temperatură și viteza de deformație. Din acest motiv încercările necesare determinării dependenței tensiune-deformație sunt în mod uzual folosite doar pentru a descrie proprietățile mecanice de scurtă durată pentru materiale termoplastice. În vederea obținerii datelor necesare pentru proiectare, acestea se obțin de obicei prin încercări de lungă durată.

În unele privințe diagramele tensiune-deformație pentru un material termoplastic, sunt asemănătoare cu cele pentru metale (Figura 4.8).

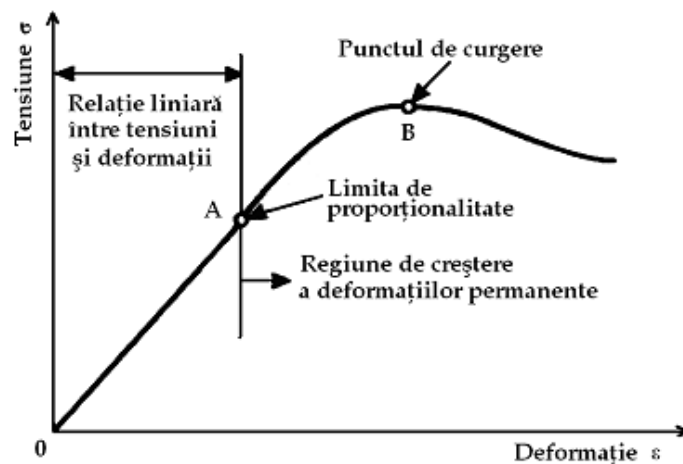


Figura 4.8 Diagrama tensiune – deformație pentru materiale termoplastice [78]

La tensiuni mici diagrama prezintă porțiune liniară corespunzătoare unei deformații elastice, în timp ce la tensiuni mai ridicate există o relație neliniară între tensiuni și deformații. În absența unor informații concrete despre un anumit material termoplastic, deformațiile care se iau în considerare în faza de proiectare sunt limitate în general la valori situate sub 1%. Valorile deformațiilor de cca. 0,5% sunt recomandate pentru materialele termoplastice mai fragile cum ar fi de exemplu acrilicele sau polistirenul, respectiv cele de 0,2-0,3 % se recomandă a fi folosite la proiectarea materialelor termorigide [78].

Efectul temperaturii asupra formei curbei tensiune-deformație este important, astfel încât pe măsură ce crește temperatura, materialul devine mai flexibil și în felul acesta pentru o tensiune dată, deformația este mai mare (Figura 4.9).

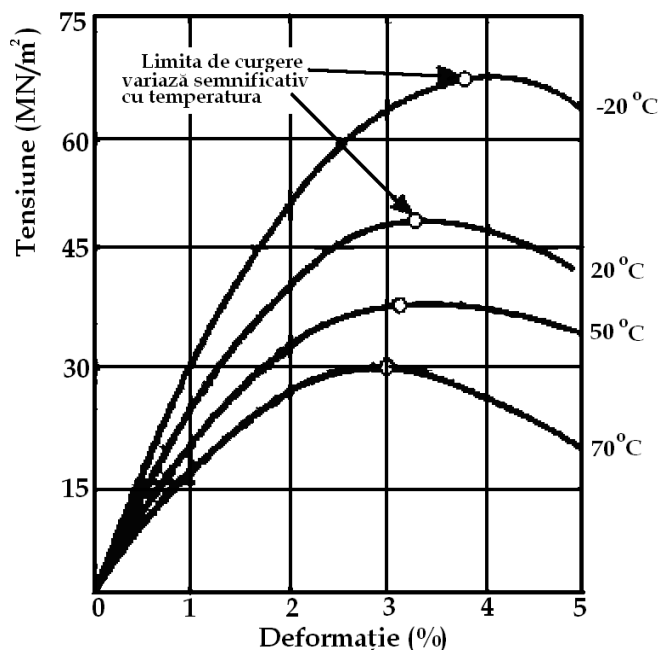


Figura 4.9 Efectul temperaturii asupra comportării materialelor termoplastice [78]

Un alt aspect important al comportării materialelor termoplastice îl constituie efectul vitezei de deformare. În cazul în care un material termoplastic este supus la diferite viteze de sollicitare, diagrama tensiune-deformație prezintă modificări importante (Figura 4.10).

Este important de subliniat faptul că în cazul unui anumit tip de material plastic, pot exista diferențe semnificative ale proprietăților mecanice. De exemplu în cazul modificării densității polipropilenei, pentru fiecare 1 kg/m³ îi corespunde o modificare cu 4% a modului de elasticitate longitudinal E.

Figura 4.11 prezintă variațiile tipice care apar la diferite tipuri de acrilonitril-butadien-stiren (ABS). Se poate observa că adesea un anumit material termoplastic ales pentru o anumită caracteristică dorită (de exemplu rezistență ridicată la impact) prezintă o diminuare pentru alte proprietăți de material (rezistența la tracțiune).

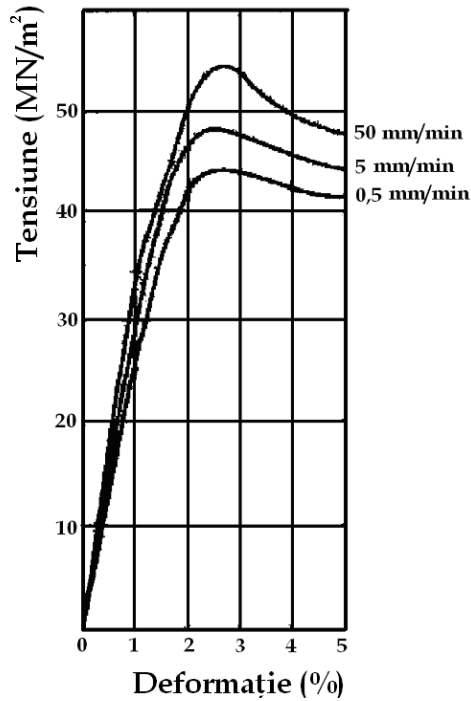


Figura 4.10 Efectul vitezei de deformare asupra comportării materialelor termoplastice [78]

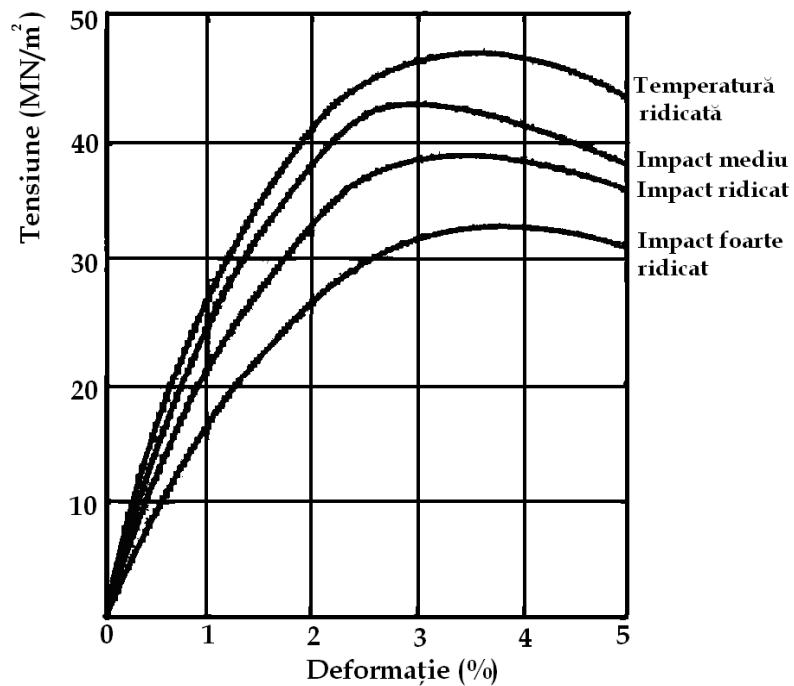


Figura 4.11 Dependența tensiune-deformație la diferite tipuri de ABS [78]

Proprietățile mecanice de scurtă durată pentru materiale termoplastice depind de densitatea acestora. Astfel, chiar în cadrul unei anumite categorii de materiale termoplastice, sinteza însoțită de modificarea densității determină obținerea unor polimeri care prezintă o variație relativ largă a proprietăților.

O anumită componentă nu trebuie să se deformeze foarte mult sub acțiunea tensiunilor de serviciu, care ar putea astfel să-i afecteze buna sa funcționare. De aceea valorile ridicate ale modului E și ale rezistenței, însoțite de o ductilitate optimă sunt combinațiile dorite pentru diferitele tipuri de materiale termoplastice.

Tablul 4.1 prezintă efectele rezultate ca urmare a acțiunii diferiților factori de influență asupra unor proprietăți ale materialelor termoplastice.

Tablul 4.1 Influența factorilor asupra modului E și a ductilității

Factori de influență	Efect	
	Modulul E	Ductilitate
Reducerea temperaturii	creștere	descreștere
Creșterea vitezei de deformare	creștere	descreștere
Câmp de tensiune multiaxial	creștere	descreștere
Introducere de plastifiant	descreștere	creștere
Introducere de fibre de sticlă	creștere	descreștere
Introducere de macroparticule	creștere	descreștere

Materialele termoplastice manifestă și în cazul solicitării sub o sarcină constantă (la fluaj), o comportare dependentă de timp.

În mod similar dacă sarcina care acționează asupra materialului este înlăturată, se constată o revenire dependentă de timp prin eliminarea deformațiilor, spre dimensiunile sale inițiale.

La materialele termoplastice este necesară utilizarea datelor de proiectare obținute prin încercări de lungă durată, deoarece anumite materiale termoplastice care manifestă ductilitate relativ scăzută la încercări de scurtă durată, tind să devină fragile la încercările de lungă durată.

Încercarea la tracțiune este una din modalitățile cel mai des utilizate pentru a caracteriza materialele termoplastice. Se impune însă o atenție ridicată, având în vedere faptul că este posibil să se obțină rezultate diferite pentru același tip material, prin simpla modificare a condițiilor de încercare.

Spre exemplu, dependența tensiune - deformație în cazul încercării la tracțiune pentru policlorura de vinil neplastifiată (PVC-U), evidențiază faptul că în cazul unor viteze de încercare relativ ridicate, mai mari de 1 mm/s, se constată o comportare fragilă, un modul de elasticitate și rezistență relativ ridicate, iar pentru viteze de încercare relativ scăzute, mai mici de 0,05 mm/s, același material prezintă un modul de elasticitate și rezistență scăzute (Figura 4.12).

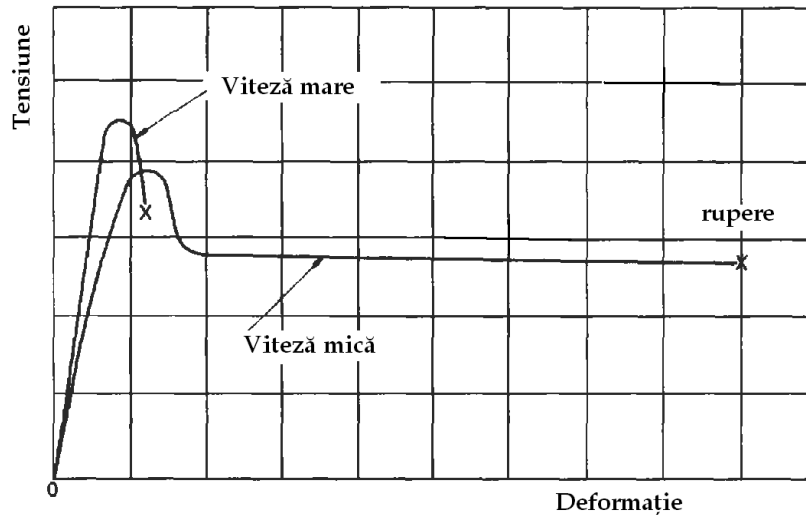
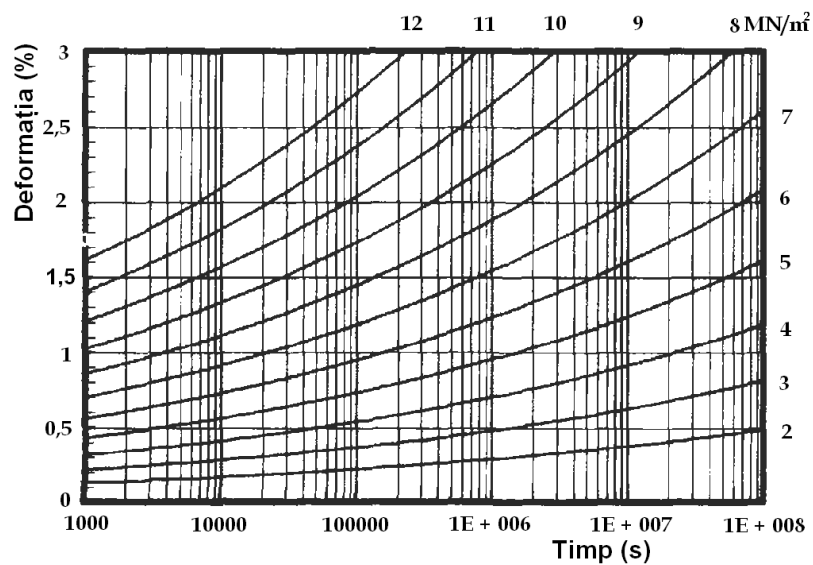


Figura 4.12 Curbe specifice pentru încercarea la tracțiune a PVC-U [78]

Dacă încercarea la tracțiune prezintă anumite dezavantaje, așa cum rezultă din exemplul anterior, încercarea la fluaj a evoluat ca fiind una dintre cele mai bune metode de evaluare a deformațiilor la materiale termoplastice. În această încercare se aplică o sarcină constantă materialului și se înregistrează variația deformației în funcție de timp.

În cazul curbelor de fluaj pentru polipropilenă (PP) la 20 ° C, având densitatea 909 kg/m³, se constată o creștere relativ constantă a deformației pentru un anumit moment, de la o curbă la alta (Figura 4.13).

Figura 4.13 Curbe de fluaj pentru polipropilenă la 20 ° C (densitate 909 kg/m³) [78]

Uneori curbele de fluaj sunt reprezentate în coordonate logaritmice atât pentru deformații cât și pentru timp.

Cel mai frecvent comportarea la fluaj este descrisă cu ajutorul unei ecuații de tipul:

$$\varepsilon(t) = At^n \quad (4.22)$$

unde n este o constantă de material, iar A este o constantă care depinde de nivelul tensiunii.

Există o serie de alte ecuații pentru a caracteriza deformația de fluaj, care au fost propuse de Sterrett [78]:

Ecuatie parabolică	$\varepsilon = a + bt^c$	(4.23)
--------------------	--------------------------	--------

Ecuatie hiperbolică	$\varepsilon = \frac{at}{1 + bt}$	(4.24)
---------------------	-----------------------------------	--------

Ecuatie logaritmică	$\varepsilon = a + \ln(b + t)$	(4.25)
---------------------	--------------------------------	--------

Ecuatie exponențială	$\varepsilon = a + b(1 - e^{-ct})$	(4.26)
----------------------	------------------------------------	--------

Ecuatie hiperbolică sinusoidală	$\varepsilon = \sinh at$	(4.27)
---------------------------------	--------------------------	--------

Ecuatie hiperbolică sinusoidală	$\varepsilon = a + b \sinh ct$	(4.28)
---------------------------------	--------------------------------	--------

Ecuatie putere / exponențială	$\varepsilon = a(1 + bt^{1/3})e^{-ct}$	(4.29)
-------------------------------	--	--------

4.3.2. Determinarea experimentală a caracteristicilor de tracțiune pe materiale de bază

Programul experimental a urmărit să evidențieze comportarea la solicitări statice a celor două tipuri de materiale, PE80 și PE100, ca materiale de bază (MB).

Experimentele au fost concepute a se realiza la o viteză de încercare la tracțiune de 50 mm/min și la diferite temperaturi de încercare: 23 ° C, 10 ° C, 0 ° C și -10 ° C.

Având în vedere faptul că majoritatea materialelor se încălzesc urmare a unor solicitări la tracțiune, în cadrul programului experimental s-a utilizat și metoda termografiei pentru evidențierea emisiei de energie termică a epruvetei. Astfel, prin această modalitate se permite vizualizarea și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes.

Încercările la tracțiune au fost efectuate la Institutul de structuri ușoare și tehnologia polimerilor, al Universității Tehnice din Dresda și Laboratorul LIEA - ISIM Timișoara.

4.3.2.1. Materiale, prelucrare și metode de încercare

În prezentul subcapitol se prezintă comportarea la solicitări mecanice la tracțiune a epruvetelor prelevate din cele două tipuri de țevi PE80 și PE100.

În acest sens țevile PE80 și PE100, SRD 11, destinate vehiculării gazelor naturale, având dimensiuni $\varnothing 110 \times 10$ mm au fost debitate la lungimi de 240 mm, după care s-au prelevat și s-au prelucrat mecanic epruvete fâșii cu lățimea în zona profilată de 10 mm (Figura 4.14, Figura 4.15).

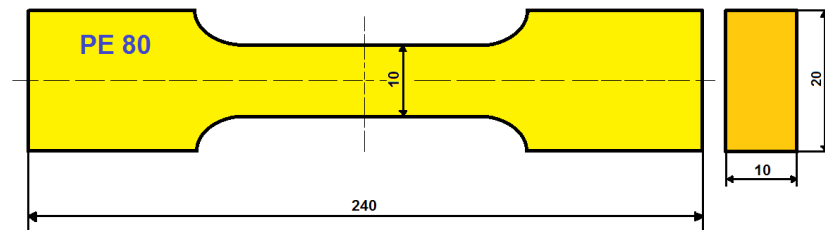


Figura 4.14 Epruvetă pentru încercare la tracțiune din material PE80 (MB)

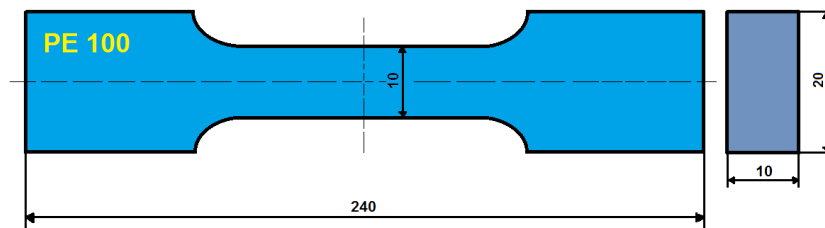


Figura 4.15 Epruvetă pentru încercare la tracțiune din material PE100 (MB)

În această etapă a cercetărilor experimentale s-a urmărit determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor de bază și respectiv a modului de variație a acestora în diferite condiții de solicitare, prin modificarea valorii temperaturii de încercare într-un domeniu cuprins între limita superioară de 23 ° C și cea inferioară de -10 ° C.

La încercarea la tracțiune s-a ținut cont de prevederilor standardelor specifice pentru determinarea caracteristicilor la țevi din materiale termoplastice – categoria poliolefine, SR EN ISO 6259-1 [79], ISO/WD 6259-3 [80] și cel referitor la materiale plastice SR EN ISO 527-1 [81].

Încercările la tracțiune s-au stabilit a se realiza pe seturi de câte 3 epruvete, din fiecare tip de material și potrivit celor patru valori ale temperaturii de încercare: 23 ° C, 10 ° C, 0 ° C și - 10 ° C.

4.3.2.2. Comportarea la tracțiune a materialului de bază PE 80

Într-o primă fază s-a urmărit determinarea caracteristicilor mecanice de referință ale materialului de bază PE80 și modul de variație a acestora în funcție de condițiile de solicitare. Astfel, un prim set din epruvetele destinate încercării materialului de bază PE80 au fost supuse încercării la tracțiune, cu o viteză de 50 mm/min și la o temperatură de referință de 23 ° C.

Spre exemplificare se prezintă dependența dintre forța aplicată și deplasare, pentru cazul epruvetei cu marcajul PE80 - MB18 (Figura 4.16). Se poate observa, din datele înregistrate, că forma curbei este una specifică polimerilor ductili cu limită de curgere. Pentru un astfel de tip de curbă se consideră că tensiunea la limita de curgere este egală cu tensiunea maximă de tracțiune suportată de către epruvetă în timpul încercării.

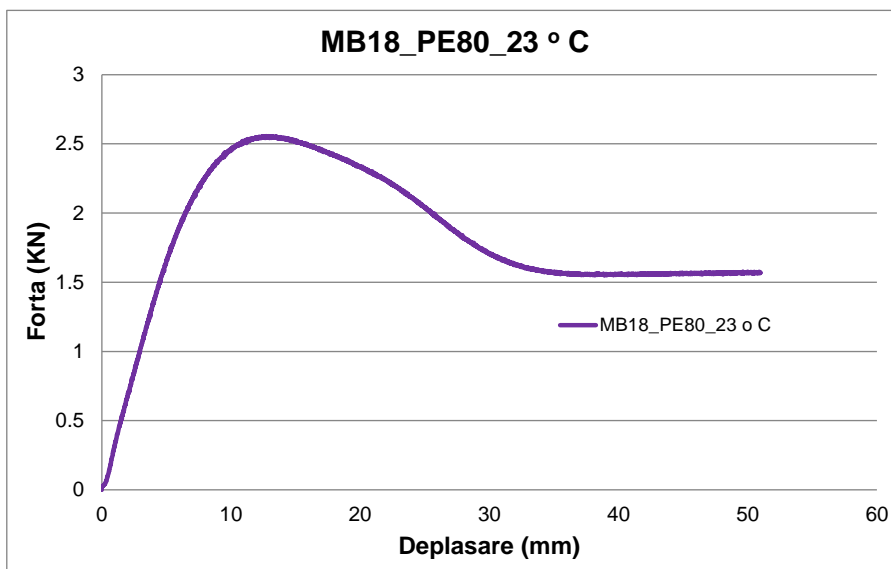


Figura 4.16 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE80 - MB18 (23 ° C)

În continuare s-au efectuat încercările la tracțiune pentru seturile de epruvete destinate solicitării la temperaturi de referință de 10 ° C și respectiv 0 ° C.

Figura 4.17 prezintă diagramele specifice înregistrate în urma acestor încercări, în cazul epruvetelor cu marcajele PE80 - MB21 și PE80 - MB24.

Prin suprapunerea celor trei curbe astfel determinate, corespunzător încercării epruvetelor cu marcajele PE80: MB18, MB21 și MB24, se poate observa că odată cu scăderea temperaturii de încercare de la 23 ° C la 0 ° C se înregistrează o

creștere semnificativă a valorii maxime a forței, respectiv a rezistenței la tracțiune a materialului de bază de tip PE80.

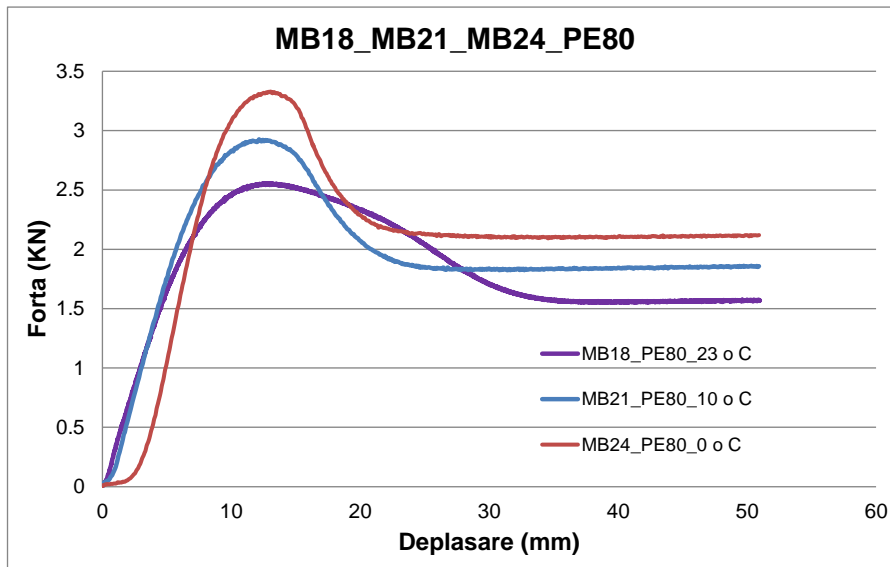


Figura 4.17 Diagramele încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE80: MB18(23 °C), MB21(10 °C) și MB24(0 °C)

Pe parcursul desfășurării încercărilor s-a utilizat și o cameră termografică cu infraroșu de tip FLIR System A40, cu ajutorul căreia s-a urmărit evoluția degradării epruvetei, în corelație cu modificările de temperatură ce se înregistrează pe epruvetă în timpul încercării. Spre exemplificare se prezintă trei imagini termice ale epruvetelor încercate la tracțiune la temperaturi de referință de 23 °C, 0 °C și respectiv -10 °C (Figura 4.18, Figura 4.19 și Figura 4.20).

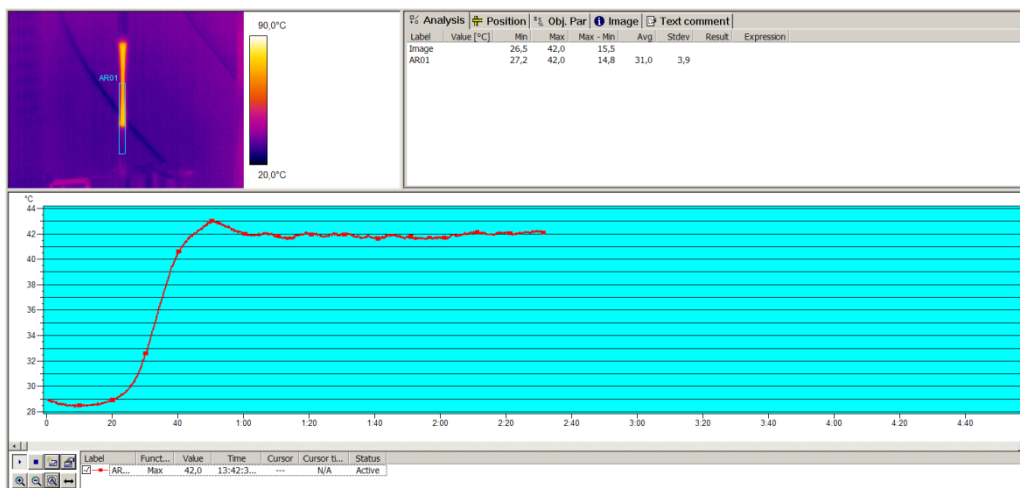


Figura 4.18 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 23 °C

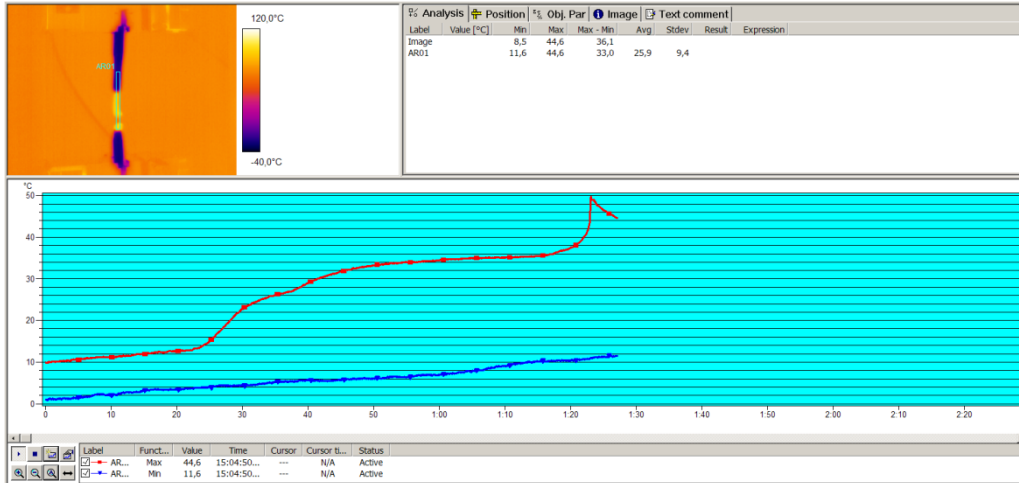


Figura 4.19 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 0 ° C

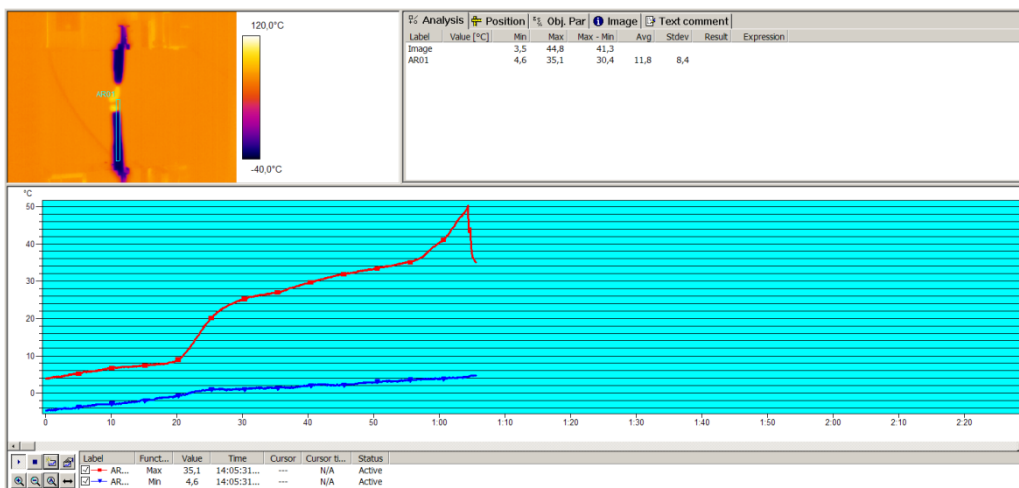


Figura 4.20 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C

Se observă că în toate cele trei situații ruperea epruvetelor a avut loc în zona centrală a epruvetei, zonă în care s-a înregistrat și temperatura maximă din timpul încercării la tracțiune.

Analizând rezultatele obținute se poate observa că rezistența la rupere a materialului țevii PE80, corespunzător intervalului de temperatură analizat este o funcție liniară de temperatură (Figura 4.21).

Se constată că valoarea rezistenței la rupere medie $R_{m \text{ med}}$ se modifică semnificativ cu variația temperaturii, fiind cuprinsă între 24,71 N/mm² corespunzător încercării la tracțiune la 23 ° C și respectiv 34,88 N/mm² pentru încercarea la -10 °C.

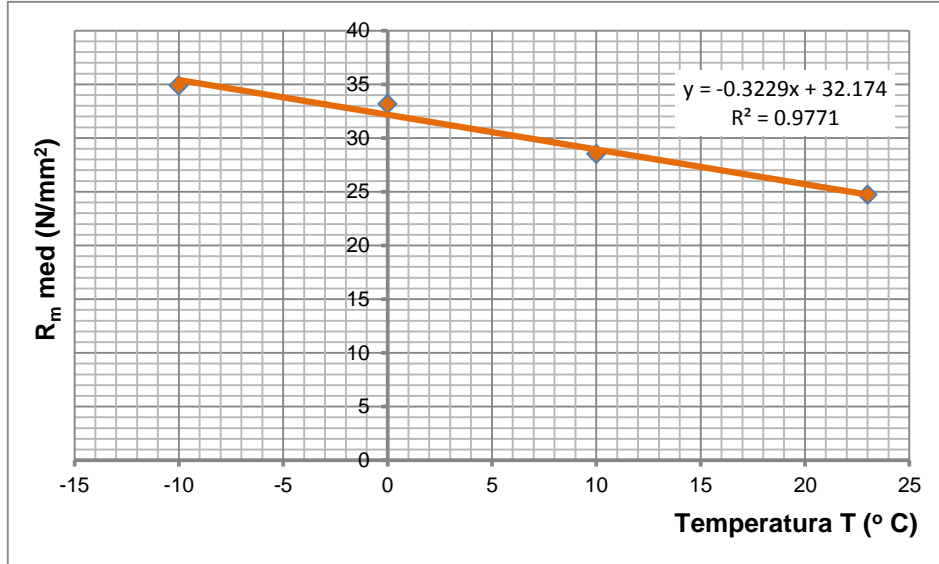


Figura 4.21 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru materialul PE80 (MB)

4.3.2.3. Comportarea la tracțiune a materialului de bază PE100

În cea de-a doua fază a experimentărilor din cadrul acestui capitol s-a urmărit determinarea caracteristicilor mecanice de referință ale materialului de bază PE100 și modul de variație a acestora în funcție de condițiile de solicitare.

În acest sens un set din epruvetele destinate încercării materialului de bază PE100 au fost supuse încercării la tracțiune, cu o viteză constantă de 50 mm/min și la o temperatură de referință de 23 $^{\circ}C$. Figura 4.22 prezintă dependența dintre forța aplicată și deplasare, pentru epruveta PE100 - MB18.

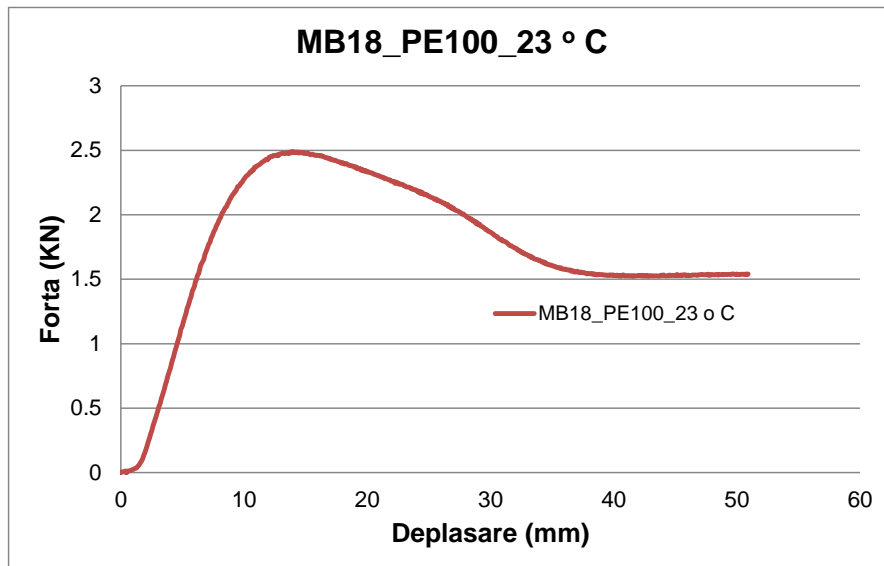
Figura 4.22 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta PE100 - MB18 (23 $^{\circ}C$)

Figura 4.23 prezintă diagramele obținute în urma încercărilor la temperaturi de referință de 10°C și respectiv 0°C , în cazul epruvetelor cu marcajele PE100 - MB21 și PE100 - MB24.

Din analiza celor trei curbe, corespunzător încercării epruvetelor cu marcajele PE100: MB18, MB21 și MB24, se observă de asemenea că odată cu scăderea temperaturii de încercare de la 23°C la 0°C are loc o creștere semnificativă a rezistenței la tracțiune a materialului de bază de tip PE100.

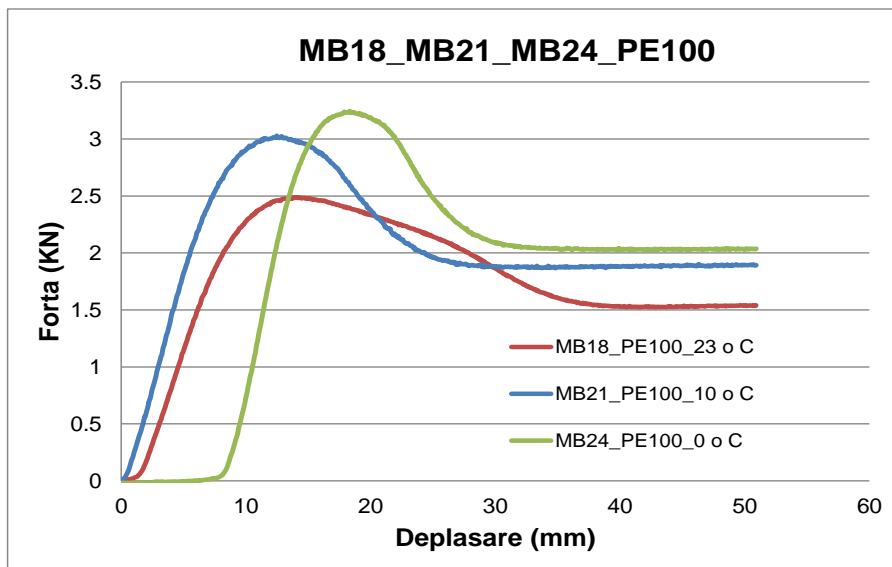


Figura 4.23 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE100: MB18(23°C), MB21(10°C) și MB24(0°C)

Modificările de temperatură obținute pe epruvetele încercate la tracțiune au fost înregistrate cu ajutorul camerei termografice (Figura 4.24, Figura 4.25 și Figura 4.26).

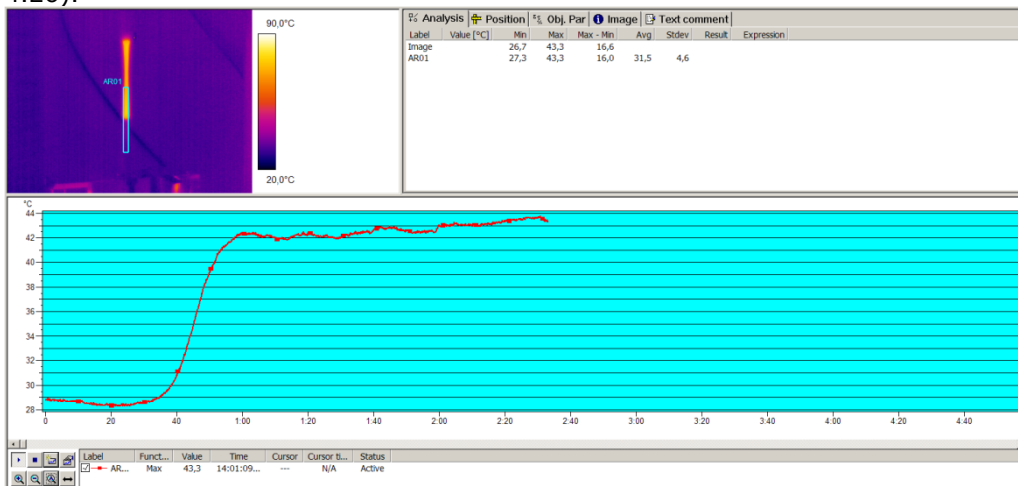


Figura 4.24 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 23°C

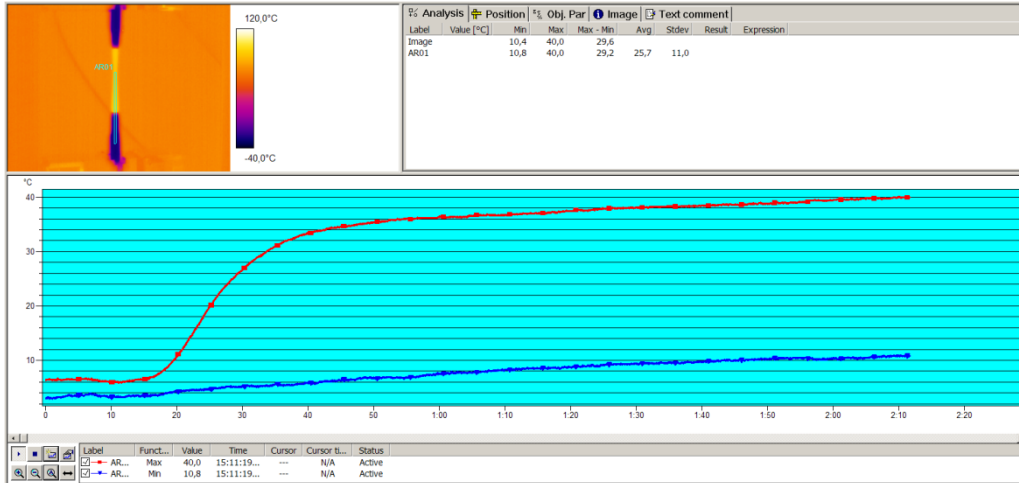


Figura 4.25 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de 0 ° C

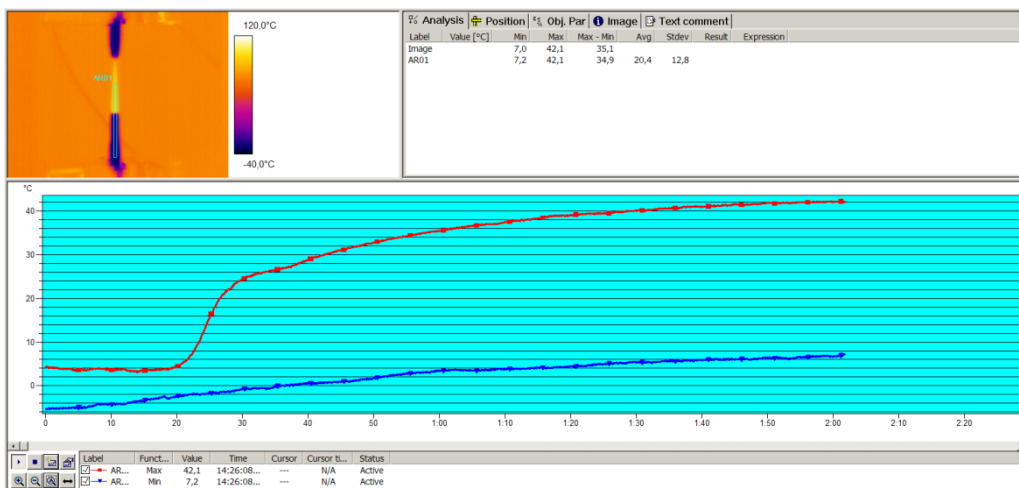


Figura 4.26 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (MB) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C

Ruperea epruvetelor a avut loc și în aceste cazuri în zona centrală, unde s-au înregistrat valorile maxime ale temperaturii din timpul încercării la tracțiune.

Din analiza rezultatele obținute se constată că rezistența la rupere a materialului țevii PE100, pentru intervalul de temperatură cuprins între 23 ° C și -10 ° C variază de asemenea liniar cu temperatura (Figura 4.27).

Astfel, s-a constatat că rezistența la rupere medie $R_{m, med}$ a materialului PE100 analizat crește semnificativ cu scăderea temperaturii, având valori cuprinse între 23,98 N/mm² corespunzător încercării la tracțiune la 23 ° C și respectiv 34,22 N/mm² pentru încercarea la -10 ° C.

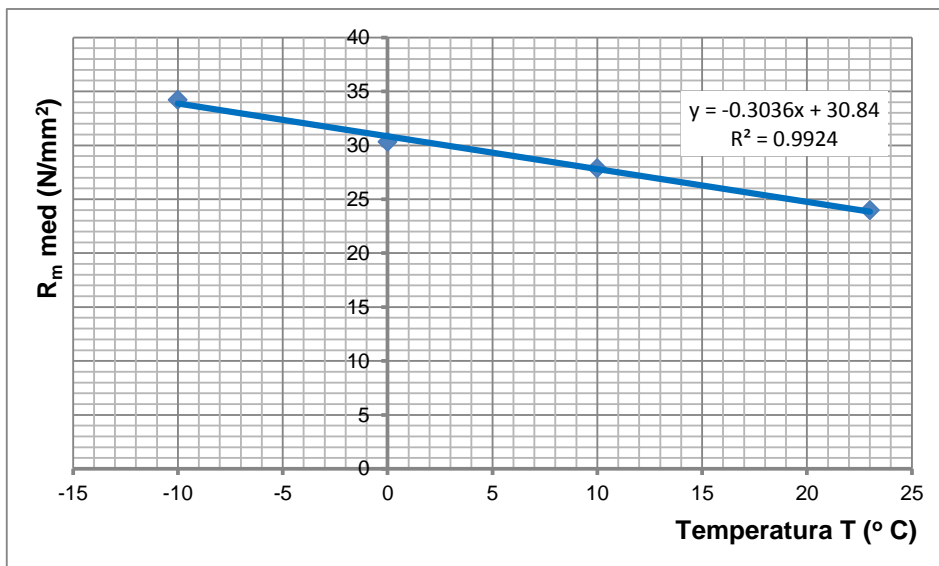


Figura 4.27 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru materialul PE100 (MB)

4.4. Comportarea la încercări de mecanica ruperii a materialelor de bază

4.4.1. Determinarea experimentală a parametrilor de mecanica ruperii pe materiale de bază

4.4.1.1. Metoda integralei J și stabilirea programului experimental

Una din metodele energetice globale recomandate a fi utilizată în cazul materialelor termoplastice, care permite analiza extinderii fisurii în cursul unei încărcări lente, este metoda integralei J. Standardul ASTM D 6068 prezintă metodologia de încercare pentru determinarea rezistenței la fisurare a materialului cu ajutorul curbelor J-R, integrala J reprezentând energia disponibilă pe unitatea de lungime a fisurii în extensie [82].

Cu ajutorul curbelor J-R se poate caracteriza rezistența unui material termoplastic privind capacitatea acestuia de a inhiba creșterea stabilă a fisurii, după inițierea ei de la un defect ascuțit preexistent [83].

Prin programul experimental stabilit, în vederea efectuării încercărilor de mecanica ruperii, s-a realizat un set de epruvete prelevate din țeavă de PE100, care au fost marcate cu indicativul MB și cifre de la 1 la 10.

4.4.1.2. Cercetări experimentale pe material de bază PE100

În cadrul acestui subcapitol se prezintă cercetările experimentale efectuate folosind epruvete prelevate din țeavă de polietilenă PE100, destinată vehiculării gazelor naturale, având diametrul de 110 mm și grosimea de perete 10 mm.

În vederea efectuării încercărilor la încovoiere în trei puncte, epruvetele prelevate din țevi pe direcție longitudinală, au fost prelucrate mecanic conform cerințelor ASTM D 6068. Configurația și dimensiunile epruvetelor (simbolizate SE(B)) sunt specifice pentru încercarea la încovoiere în trei puncte (Figura 4.28).

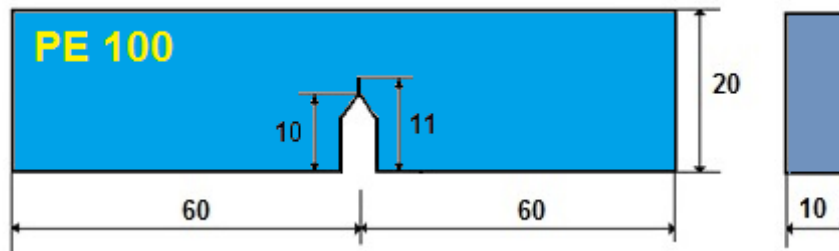


Figura 4.28 Epruvetă pentru încercare la încovoiere SE(B)

Programul încercărilor experimentale a cuprins încercarea la încovoiere în trei puncte a unui număr de zece epruvete prelucrate cu creștătură și apoi prefisurate pe o lungime de 1mm, având configurații și dimensiuni similare.

Încercările la încovoiere au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C, utilizând o mașină ce poate dezvolta o forță maximă de 5 kN de tip Zwich/Roell Z005, din cadrul Laboratorului de Rezistența Materialelor "Ștefan Nădășan" al Universității "Politehnica" Timișoara (Figura 4.29).



Figura 4.29 Mașină de încercare la tracțiune în regim static Zwich/Roell Z005

Prin realizarea acestor încercări s-a urmărit obținerea curbei J-R, cu ajutorul căreia să se evidențieze corelația dintre valorile integralei J și cele corespunzătoare creșterii lungimii fisurii Δa . Astfel, utilizând această metodă, denumită cu epruvete multiple, prin fiecare epruvetă încercată s-a determinat un singur punct de pe curba J-R.

Epruvetele cu marcajele PE100 - MB de la 1 la 10 au fost încărcate la diferite sarcini, corespunzătoare anumitor valori ale deplasărilor punctului de aplicare a

forței: de la 1,25 mm până la 3,50 mm, cu o creștere constantă de 0,25 mm (Figura 4.30).



Figura 4.30 Epruvete prelevate din material de bază PE100 (MB), prelucrate cu creștătură pentru încercarea la încovoiere în trei puncte

Urmare a încercării la încovoiere în trei puncte, valorile forțelor înregistrate au fost cuprinse între minim 172 N și maxim 328 N. Spre exemplu, la epruveta MB3 corespunzător deplasării punctului de aplicație al forței pe o distanță de 1,75 mm, s-a înregistrat o forță de 214 N (Figura 4.31).

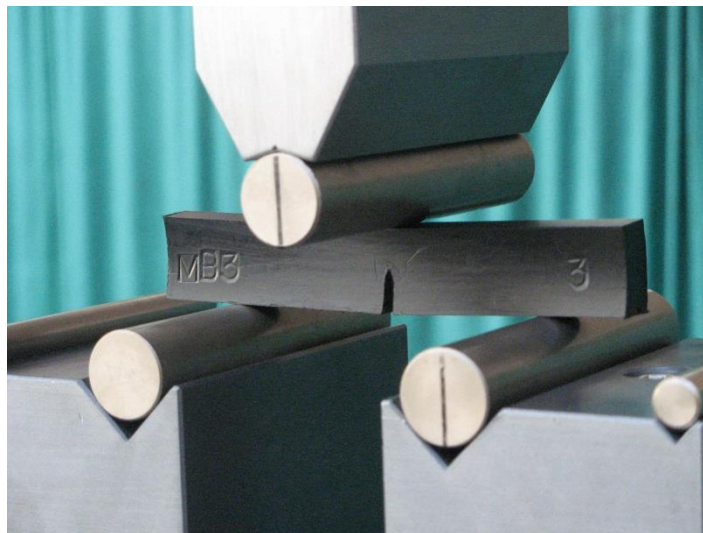


Figura 4.31 Epruveta MB3 – încercare la încovoiere în trei puncte

În vederea identificării frontului fisurii pe suprafețele epruvetelor, urmare a efectuării încercărilor la încovoiere, epruvetele au fost condiționate la o temperatură de -20°C timp de o oră și apoi au fost supuse ruperii la încovoiere prin șoc Charpy.

În acest mod a fost posibilă evidențierea zonelor specifice ruperii ductile obținută prin încercarea la încovoiere și identificarea frontului fisurilor astfel propagate. Spre exemplificare, se prezintă aspectul macroscopic al suprafețelor de rupere în cazul epruvetelor MB7 și respectiv MB10 (Figura 4.32, Figura 4.33).

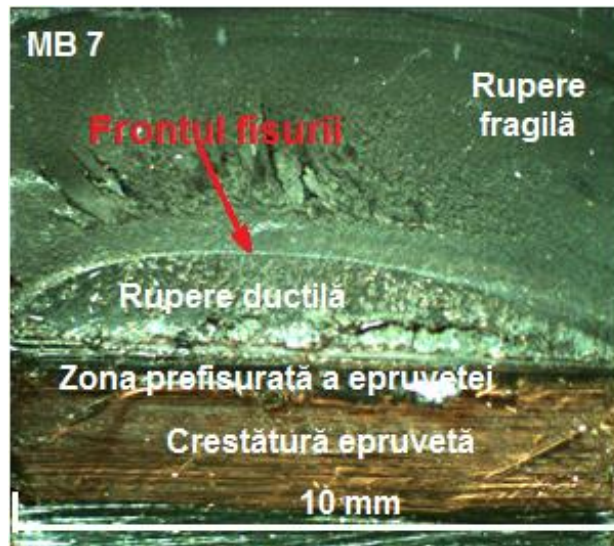


Figura 4.32 Suprafața de rupere a epruvetei MB7

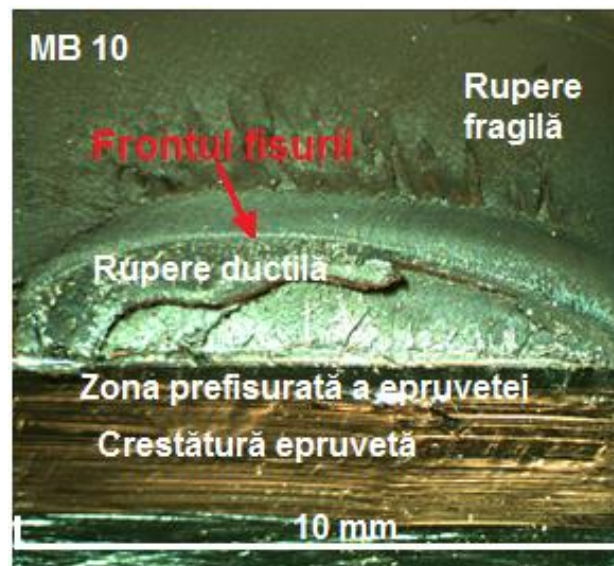


Figura 4.33 Suprafața de rupere a epruvetei MB10

În vederea determinării mărimii extensiei fisurii, măsurătorile au fost efectuate folosind softul SigmaScan Pro în cinci puncte echidistante, centrat față de mijlocul epruvetei și la o distanță de 0,1 mm față de marginile acestuia (Figura 4.34).

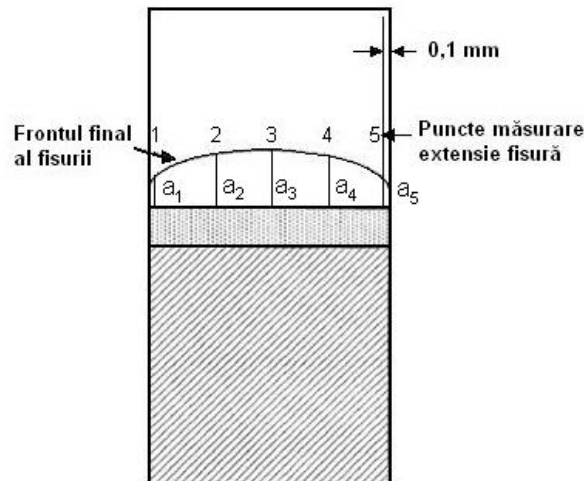


Figura 4.34 Măsurarea extensiei fisurii

Calculul extensiei medii a fisurii Δa s-a realizat efectuând mai întâi media aritmetică celor două măsurători laterale (a_1 și a_5) și apoi, combinând rezultatul cu cele trei măsurători din partea centrală (a_2 , a_3 , a_4) s-a calculat media aritmetică finală a acestor patru valori.

Determinarea valorilor integralei J necesită calculul energiei necesare pentru extensia fisurii. Energia totală U_T reprezintă de aria de sub curba forță-deplasare, obținută prin însumarea dintre energia U corespunzătoare forței de referință pentru fiecare epruvetă cu creștătură încercată și energia de indentare U_i .

În vederea determinării valorilor energiei de indentare, epruveta a fost încărcată la o sarcină de 110% din valoarea forței maxime înregistrată la încercările la încovoiere pe epruvetele cu creștătură.

Încercarea de indentare s-a realizat prin sprijinirea epruvetei pe două role în contact, conform celor prevăzute de standardul ASTM D 6068 pentru epruvetele de tip SE(B). În acest caz valorile componentelor energiei U_i s-au obținut prin selectarea valorilor înregistrate pe curba forță - deplasare a încercării de indentare, corespunzător sarcinilor maxime atinse pentru fiecare epruvetă încercată la încovoiere.

Valorile integralei J s-au calculat cu următoarea relație:

$$J = \frac{\eta U}{B(W - a_0)} \quad (4.30)$$

unde:

- $\eta = 2$ pentru epruvete supuse la încovoiere - SE(B),
- B = grosimea epruvetei,
- W = lățimea epruvetei,
- a_0 = lungimea inițială a fisurii.

Cu ajutorul valorilor astfel determinate a fost posibilă trasarea curbei integralei J în funcție de extensia fisurii Δa , ca o funcție de putere de forma:

$$J = C_1 \Delta a^{C_2} \quad (4.31)$$

unde:

Δa = extensia medie a fisurii,
 C_1, C_2 = coeficienții funcției.

Având în vedere faptul că o parte din valorile medii ale extensiei fisurii înregistrate pentru deplasările punctului de aplicare a forței au fost mai mari decât valoarea urmărită Δa de 1 mm, în vederea trasării diagramei J-R s-a procedat la determinarea prin interpolare încă patru puncte corespunzătoare unor valori medii ale extensiei fisurii mai mici de 0,4 mm și eliminarea ultimelor patru puncte cu deplasări mai mari de cca. 1 mm (Figura 4.35).

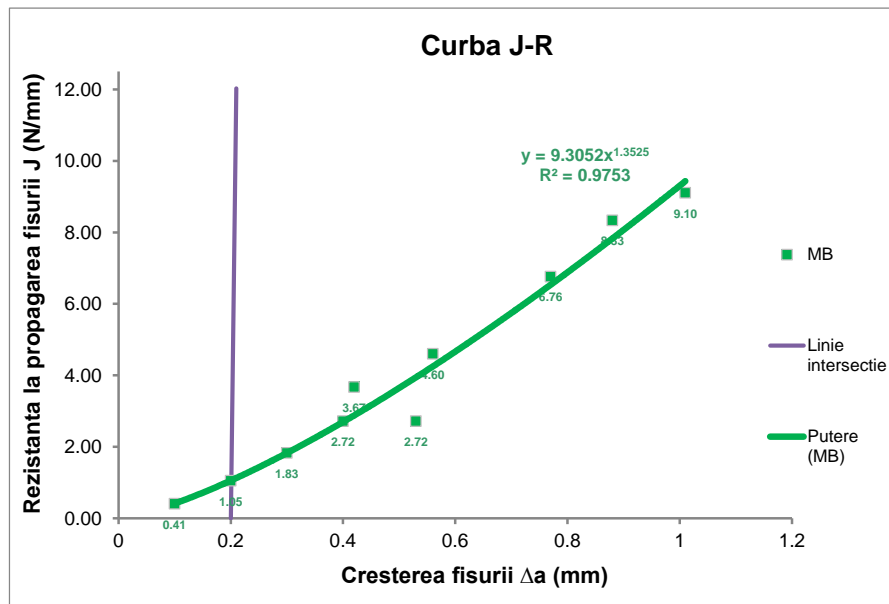


Figura 4.35 Curba J-R pentru materialul de bază PE100

În vederea stabilirii valorii J_{IC} s-au folosit indicațiile prevăzute în standardul ASTM E 1820, trasându-se o dreaptă cu originea pe axa Δa la valoarea 0,2 mm, înclinată la un unghi de 89° față de axa creșterii fisurii Δa [84].

Prin intersectarea curbei J-R cu dreapta astfel construită s-a determinat valoarea tenacității la rupere J_{IC} pentru materialul de bază PE 100 utilizat în cadrul cercetărilor experimentale - $J_{IC MB} = 1,06$ N/mm.

4.4.2. Determinarea parametrilor de mecanica ruperii prin metoda elementelor finite

Metoda elementelor finite are la bază conceptul construirii unui anumit obiect complex din elemente mai simple, pentru care se pot aplica scheme de calcul cunoscute. În funcție de modul de abordare ales, prin înlocuirea geometriei reale cu o rețea de elemente finite care urmărește forma reală, precizia de calcul crește odată cu mărirea numărului de elemente finite [85].

Calculul numeric al parametrilor de Mecanica Ruperii se utilizează tot mai mult în ultima perioadă dată fiind complexitatea corpurilor cu fisuri. Metoda Elementelor Finite (MEF) este una din metodele cele mai utilizate de determinare numerică a acestor parametri.

În programele de analiză cu elemente finite utilizate în aplicațiile specifice mecanicii ruperii materialelor, după determinarea deplasărilor, deformațiilor și a tensiunilor se poate continua cu calculul parametrilor de mecanica ruperii.

Literatura de specialitate cuprinde o serie lucrări referitoare la aplicarea metodelor de calcul cu elemente finite pentru diferite aplicații de structuri din materiale termoplastice. Direcțiile principale de cercetare sunt legate de simularea comportării la diverse tipuri de încercări, spre exemplu: la tracțiune a materialelor de tip PE-HD cu sau fără prezența fisurii [86], tracțiune uniaxială și încercare la îndoire în trei puncte pentru polipropilenă, policarbonat/acrilonitril-butadien-stiren (PC/ABS) [87], respectiv pentru alegerea unor materiale corespunzătoare în vederea proiectării anumitor componente astfel încât să se asigure o rezistență corespunzătoare la propagarea fisurii [88].

Un alt caz de calcul cu elemente finite a fost acela prin care s-a urmărit analiza gradului de severitate al defectelor de tip fisură semi-eliptice aflate în peretele unei țevi PE-HD sub presiune interioară și evaluarea gradul de afectare al acesteia, în timpul propagării fisurii. Utilizând metoda elementelor finite și pe baza calculului integralei J a fost făcută analiza comportării fisurilor din aceste structuri. Rezultatele au arătat că valorile integralei J depind de mărimea și poziția fisurii, de viteza de deformare și în mod deosebit de creșterea temperaturii [89], [90].

În cadrul acestui capitol, în vederea determinării parametrilor de mecanica ruperii, s-a utilizat o metodă de cercetare combinată: experimentală – numerică, prin care se pun în valoare avantajele ambelor metode.

Determinările experimentale sunt preferabile din punctul de vedere al acurateței rezultatelor, dar prezintă câteva dezavantaje, cum ar fi costul ridicat și o durată de timp relativ mare.

Pe de altă parte, analizele numerice oferă o precizie satisfăcătoare fiind incomparabil mai ieftine, permițând modificări importante ale geometriei structurii pentru optimizări sau comparații, ce se pot realiza într-un interval de timp relativ scurt.

Evoluția tehnicii de calcul și implicit dezvoltarea programelor de analiză numerică permit determinări precise ale parametrilor de mecanica ruperii prin utilizarea unei discretizări fine, obținându-se astfel o reducere semnificativă a timpului și a costurilor necesare unei investigații privind determinarea stării de tensiune și deformație pentru o anumită situație dată.

Dintre metodele numerice, metoda elementelor finite (MEF) este la momentul actual cea mai utilizată metodă de simulare numerică implementată pe calculator în inginerie.

Programele de analiză numerică care au implementate și aplicații de mecanica ruperii, vizează în principal determinarea factorului de intensitate a tensiunii și respectiv a integralei J.

Având în vedere faptul că integrala J are aplicabilitate atât în domeniul elastic, dar mai ales în cel elasto - plastic, se consideră a fi principalul parametru de mecanica ruperii utilizat în aplicațiile cu elemente finite.

În scopul modelării și analizei cu elemente finite, respectiv a determinării valorilor integralei J pentru cazul unei epruvete supusă încercării la încovoiere în trei puncte s-a utilizat programul de calcul ABAQUS 6.10.

Atingerea obiectivului propus presupune parcurgerea în cadrul preprocesării a unei serii de etape succesive, de la realizarea modelului 3D și până la discretizarea acestuia.

În primul rând a fost creat modelul 3D al epruvetei supusă încercării la încovoiere în trei puncte, având forma și dimensiunile epruvetelor utilizate în cercetările experimentale (Figura 4.28).

În continuare au fost introduse caracteristicile pentru materialul PE100 avut în vedere: densitatea - $0,96 \text{ g/cm}^3$, modulul de elasticitate longitudinal - 780 N/mm^2 coeficientul lui Poisson - $0,45$ și a fost definită secțiunea (Figura 4.36).

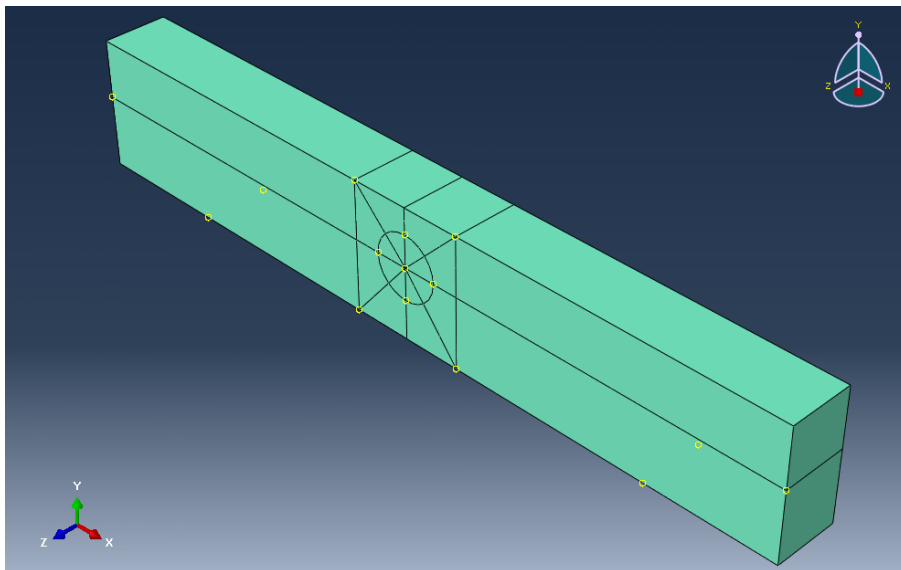


Figura 4.36 Modelul 3D al epruvetei cu definirea materialului

După crearea ansamblului a fost realizată fisura cu o lungime de 11 mm, dispusă la mijlocul epruvetei, utilizând modulul "interaction" și selectând "special" din meniul principal

Din modulul "load" au fost definite încărcările și condițiile de rezemare a epruvetei. Astfel, s-au definit cele două reazeme pe partea inferioară a epruvetei, așezate simetric față axa centrală transversală la o distanță de 40 mm. Încărcarea a fost definită prin deplasarea punctului pe aplicare al forței pe direcția verticală descendentă, pe o distanță de 1,5 mm - potrivit încercării epruvetei cu marcajul PE100 - MB2 (Figura 4.37).

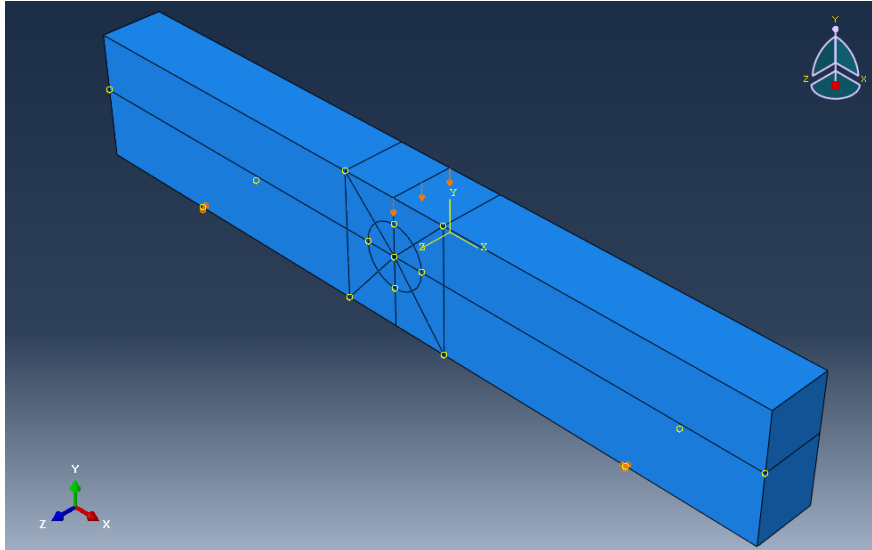


Figura 4.37 Definierea încărcării și a punctelor de rezemare

Geometria 3D a epruvetei s-a discretizat diferențiat pe cele trei zone, utilizându-se o discretizare mai fină în zona centrală ce include fisura. Astfel, modelul discretizat conține 5360 de elemente și 25772 de noduri (Figura 4.38).

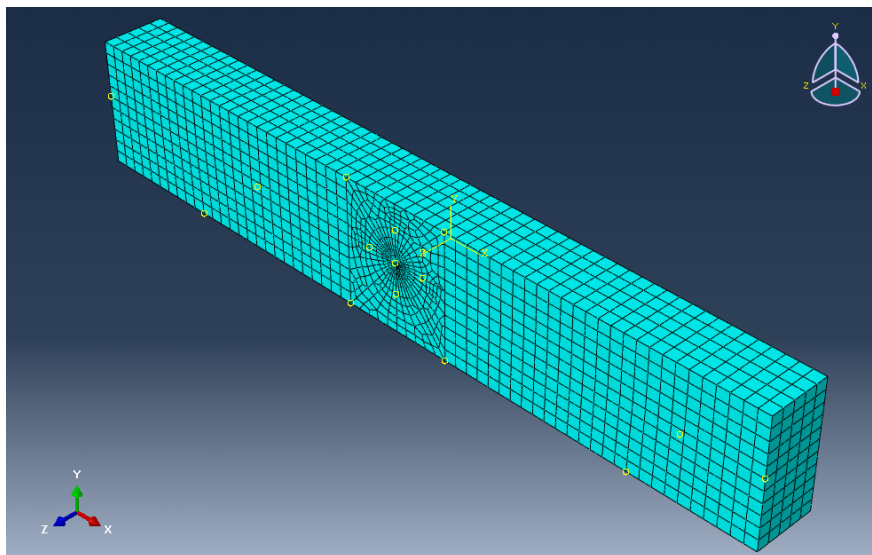


Figura 4.38 Discretizarea structurii

În continuare, s-a trecut la efectuarea calculelor cu ajutorul programului ABAQUS 6.10, urmărindu-se evidențierea stării de tensiune și deformație. Astfel, prin analiza cu elemente finite a fost posibilă determinarea distribuției tensiunilor normale și a tensiunii echivalente von Mises (Figura 4.39, Figura 4.40).

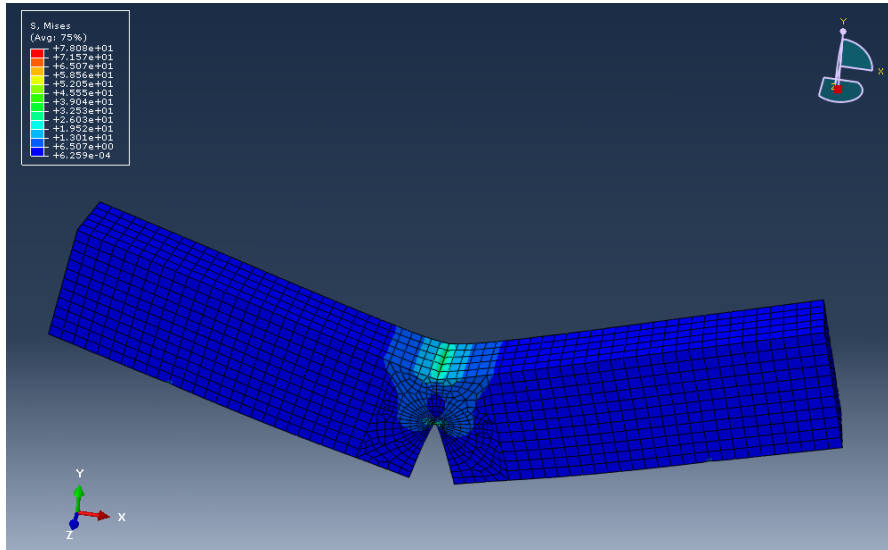


Figura 4.39 Distribuția tensiunilor von Mises

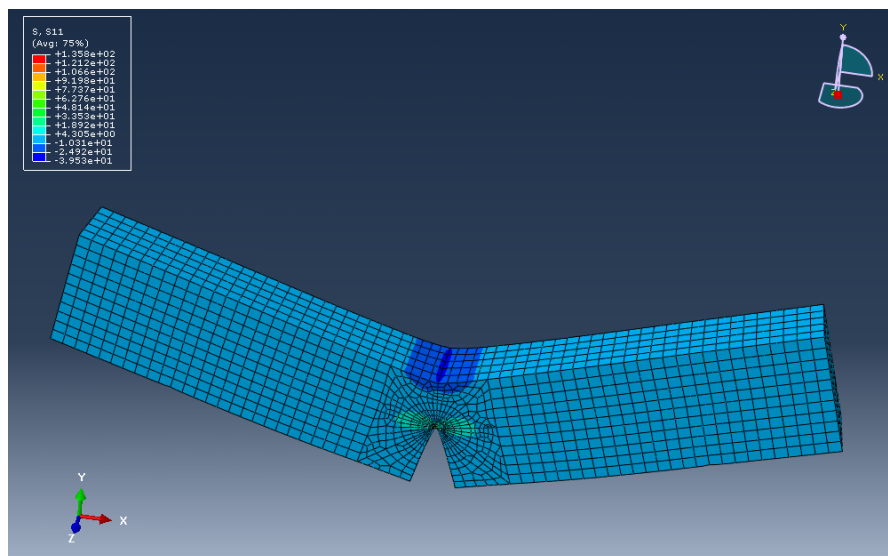


Figura 4.40 Distribuția tensiunilor normale S11

În final a fost posibilă determinarea și a valorilor integralei J pentru epruveta de îndoire analizată. În cazul epruvetei MB2, corespunzător unei deplasări de 1,5mm, s-a obținut o valoarea a integralei J de 3,02 N/mm.

4.5. Concluzii privind comportarea la solicitări mecanice a materialelor de bază

În prezentul capitol s-a urmărit caracterizarea materialelor de bază (MB) PE80 și PE100 care sunt utilizate în alcătuirea sistemelor de conducte destinate vehiculării gazelor naturale sub presiune.

Cercetările experimentale au fost direcționate spre studierea fenomenelor de rupere, determinarea caracteristicilor de rezistență statică și a tenacității materialelor termoplastice din componența acestor conducte.

Experimentele destinate încercărilor la tracțiune au fost concepute a se realiza la o viteză de încercare de 50 mm/min și la diferite temperaturi de încercare: 23 ° C, 10 ° C, 0 ° C și -10 ° C.

În cadrul programului experimental s-a utilizat o metodă combinată tracțiune – termografie, astfel încât prin evidențierea emisiei de energie termică a epruvetei cu ajutorul unei camere termografice, să fie posibilă vizualizarea și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes.

Din analiza rezultatele obținute s-a constatat că rezistența la rupere a celor două tipuri de materiale PE80 și PE100, pentru intervalul de temperatură cuprins între 23 ° C și -10 ° C, crește liniar cu scăderea temperaturii.

De asemenea în cadrul acestui capitol au fost realizate încercări de mecanica ruperii pe epruvete prelevate din țevă de tip PE100.

În acest scop s-a utilizat metoda integralei J, care permite analiza propagării fisurii în cursul unei încărcări lente, conform standardul ASTM D 6068. Încercările la încovoiere în trei puncte au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C.

Epruvetele au fost încărcate la diferite sarcini, corespunzătoare anumitor valori ale deplasărilor punctului de aplicare a forței: de la 1,25 mm până la 3,50 mm, cu o creștere constantă de 0,25 mm.

Cu ajutorul valorilor integralei J astfel determinate s-a trasat curba J-R, ca o funcție de putere, ce evidențiază dependența dintre integrala J și extensia fisurii Δa .

Valoarea tenacității la rupere J_{IC} , obținută pentru materialul de bază PE 100 utilizat în cadrul cercetărilor experimentale a fost $J_{IC MB} = 1,06$ N/mm.

În scopul modelării și realizării analizei cu elemente finite, respectiv a determinării valorilor integralei J pentru cazul unei epruvete supusă încercării la încovoiere în trei puncte s-a utilizat programul de calcul ABAQUS 6.10. În cazul epruvetei cu marcajul MB2, corespunzător unei deplasări a punctului de aplicare a forței de 1,5 mm, s-a obținut o valoarea a integralei J de 3,02 N/mm.

Rezultatul astfel înregistrat, prin metoda elementelor finite, indică obținerea unei valori a integralei J relativ apropiată față de cea rezultată în cadrul cercetărilor experimentale, de 3,67 N/mm.

5. COMPORTAREA LA SOLICITĂRI MECANICE A ÎMBINĂRILOR SUDATE

Prezentul capitol are drept scop caracterizarea, prin prisma comportării la solicitări mecanice, a îmbinărilor sudate (IS) similare din materiale PE80 și PE100, care se utilizează în structura sistemelor de conducte destinate vehiculării gazelor naturale sub presiune.

5.1. Considerații generale

Cercetările privind comportarea la rupere a materialelor polimerice a devenit în ultimii ani o preocupare majoră, având în vedere multitudinea domeniilor industriale în care acestea au aplicații.

Unul din domeniile cele mai importante în care sunt utilizate materialele termoplastice este acela al conductelor destinate vehiculării fluidelor sub presiune.

Fiind un domeniu într-o continuă dezvoltare, domeniul instalațiilor necesită soluții din ce în ce mai performante privind producerea de materiale noi, cu caracteristici și durată de viață ridicate.

În ultima perioadă, o serie de lucrări de cercetare științifică investigând comportarea mecanică a polimerilor au condus la stabilirea unor relații constitutive, prin utilizarea în principal a două abordări referitoare la dezvoltarea modelelor constitutive: pe baze fizice sau pe baze fenomenologice.

Studiile experimentale recente au arătat că materialele de tip polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) prezintă atât o comportare vâscoelastică cât și una vâscoplastică, aceasta depinzând de tipul solicitării și de viteza de deformare.

Ayoub investigând comportarea mecanică a epruvetelor prelevate din țevă de tip polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) cu pereți groși, prin efectuarea unor încercări mecanice de încărcare monotonă și încărcare-descărcare, a concluzionat că materialul prezintă o comportare neliniară și dependentă de viteza de deformare. Astfel, modelul vâscoelastic - vâscoplastic dezvoltat pe baze fizice permite descrierea principalelor aspecte ale comportării acestui material, ce este caracterizată prin deformații neliniare mari [91].

Calculul modern de proiectare și problemele care se pun pentru evaluarea integrității structurale a instalațiilor ce funcționează sub presiune, necesită aplicarea conceptelor "Mecanicii Ruperii Materialelor" ([92], [93]).

O preocupare actuală a cercetătorilor este aceea de a extinde conceptele mecanicii ruperii la materiale plastice, ceramice și compozite. Materialele termoplastice sunt vâscoelastice ceea ce înseamnă că proprietățile lor mecanice reflectă ambele caracteristici: vâscozitatea lichidelor și elasticitatea solidelor [94].

Caracterizarea tenacității materialelor este unul din aspectele importante ale mecanicii ruperii. Aplicarea conceptelor mecanicii ruperii în proiectare, de exemplu, presupune stabilirea unei relații matematice între tenacitate, tensiune și mărimea imperfecțiunii.

În timp ce mecanica ruperii liniar-elastică respectiv elasto-plastică, au în atenție materiale independente de timp, mecanica ruperii vâscoelastică și vâscoplastică includ materialele la care timpul este o variabilă importantă.

Comportarea la rupere a materialelor polimerice, în funcție de condițiile de exploatare respectiv încercare, se poate situa în domeniul liniar elastic sau așa cum se întâmplă de cele mai multe ori în domeniul vâscoelastic.

Dintre numeroasele tipuri de comportări la solicitări mecanice, prin care sunt caracterizate materialele în general, cele de tip elasto-plastic, vâscoelastic și vâscoplastic pot fi grupate într-un domeniu aparte, specific mecanicii ruperii neliniare [76].

În cazul polimerilor cu o structură parțial cristalină (incluzând cei de tip polietilenă), având în vedere deformațiile mari care apar la curgerea materialului la vârful fisurii, au fost dezvoltate metode adecvate pentru caracterizarea ruperii acestora. Una din metodele recomandate pentru aceste tipuri de materiale este metoda integralei J [95].

Fenomenele de rupere care apar la conductele din materiale termoplastice, constituie unul din aspectele destul de des întâlnite, aceste evenimente putându-se manifesta imprevizibil și provoca reacții adverse diferite.

Ruperea unei conducte este de fapt un fenomen legat de stabilitatea sau instabilitatea propagării unei fisuri în materialului acesteia. O anumită fisură existentă poate să rămână stabilă din punct de vedere geometric, sau poate manifesta instabilitate și să crească, în funcție de variația stării de tensiune din peretele conductei, datorată condițiilor concrete de solicitare.

În cazul unor valori relativ ridicate ale tenacității materialului, acesta prezintă acea însușire importantă de a inhiba dezvoltarea unor imperfecțiuni preexistente, preîntâmpinând astfel formarea și propagarea ulterioară a fisurii.

În caz contrar la valori relativ scăzute ale tenacității materialului, poate să survină fenomenul de fisurare a conductelor în anumite condiții de exploatare.

Materialele termoplastice, cum ar fi de exemplu cele de tip polietilenă (PE) sunt în prezent materialele preferate care se utilizează în sistemele de distribuție pentru gaze naturale.

Utilizarea acestor materiale a adus numeroase avantaje, cum ar fi creșterea duratei de viață a conductelor, reducerea costurilor, dar au fost semnalate și unele situații în care s-au înregistrat avarii.

În acest sens, cercetările experimentale prezentate în cadrul acestui capitol au fost direcționate spre studierea fenomenelor de rupere, determinarea caracteristicilor de rezistență mecanică statică și a tenacității îmbinărilor sudate din materialelor termoplastice.

5.2. Comportarea la solicitări statice a îmbinărilor sudate

5.2.1. Determinarea experimentală a caracteristicilor de tracțiune pe îmbinări sudate

În prezenta etapă, cercetările experimentale au fost efectuate pe epruvete din îmbinări sudate realizate din țevi PE80 și respectiv PE100 (IS - îmbinare sudată), urmărindu-se determinarea caracteristicilor mecanice și comportarea acestora la modificarea valorii temperaturii de încercare între o limită superioară de 23 ° C și una inferioară de -10 ° C. Încercările la tracțiune au fost efectuate la Institutul de structuri ușoare și tehnologia polimerilor, al Universității Tehnice din Dresda și Laboratorul LIEA - ISIM Timișoara.

5.2.1.1. Materiale, prelucrare și metode de încercare

Țevile PE80 și PE100, SRD 11, destinate vehiculării gazelor naturale, cu dimensiuni $\varnothing 110 \times 10$ mm au fost mai întâi îmbinate prin procedeul de sudare cap la cap cu element încălzitor. Sudarea s-a realizat folosindu-se un echipament de tip RITMO DELTA 250.

Ulterior au fost debitate tronsoane simetrice față de axa sudurii, la lungimi totale de 240 mm, după care s-au prelevat și prelucrat mecanic epruvete fâșii cu lățimea de 15 mm, formându-se seturi de câte trei epruvete corespunzător fiecărui tip de material și temperatură de încercare: 23°C , 10°C , 0°C și -10°C (Figura 5.1, Figura 5.2).

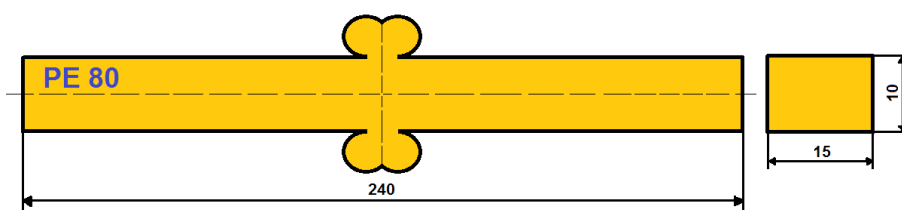


Figura 5.1 Epruvetă pentru încercare la tracțiune, prelevată din îmbinare sudată PE80 (IS)

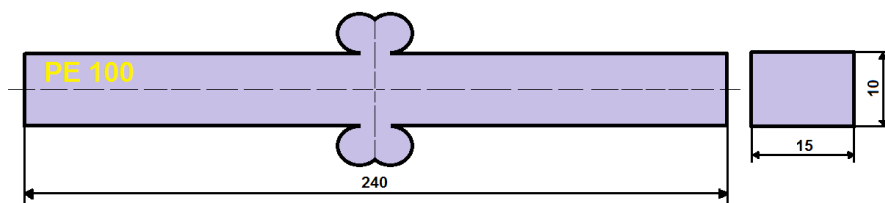


Figura 5.2 Epruvetă pentru încercare la tracțiune, prelevată din îmbinare sudată PE100 (IS)

Încercarea la tracțiune s-a realizat conform standardului SR EN ISO 12814-2, care specifică cerințele și metodologia de determinare a caracteristicilor mecanice la componente din materiale termoplastice îmbinate prin sudare [96].

5.2.1.2. Comportarea la tracțiune a îmbinărilor sudate PE80

Încercările la tracțiune efectuate pe un prim set de epruvete PE80 s-au realizat cu o viteză de 50 mm/min și la o temperatură de referință de 23°C .

Figura 5.3 prezintă dependența forță – deplasare în cazul încercării la tracțiune a unei epruvete din îmbinare sudată PE80, având marcajul PE80 - IS2.

Încercările la tracțiune au continuat cu epruvetele din îmbinări sudate PE80 destinate încercărilor la temperaturi de referință de 10°C și respectiv 0°C .

Figura 5.4 prezintă diagramele forță – deplasare, înregistrate în urma acestor încercări, în cazul epruvetelor cu marcajele PE80 – IS4 și PE80 – IS7.

Analizând comparativ cele trei curbe forță - deplasare, corespunzătoare încercării epruvetelor cu marcajele PE80: IS2, IS4 și IS7, se constată că pe măsură ce are loc scăderea temperaturii de încercare de la 23°C la 0°C se înregistrează o creștere semnificativă a valorii forței maxime, respectiv a rezistenței la tracțiune a îmbinărilor sudate de tip PE80 (Figura 5.4).

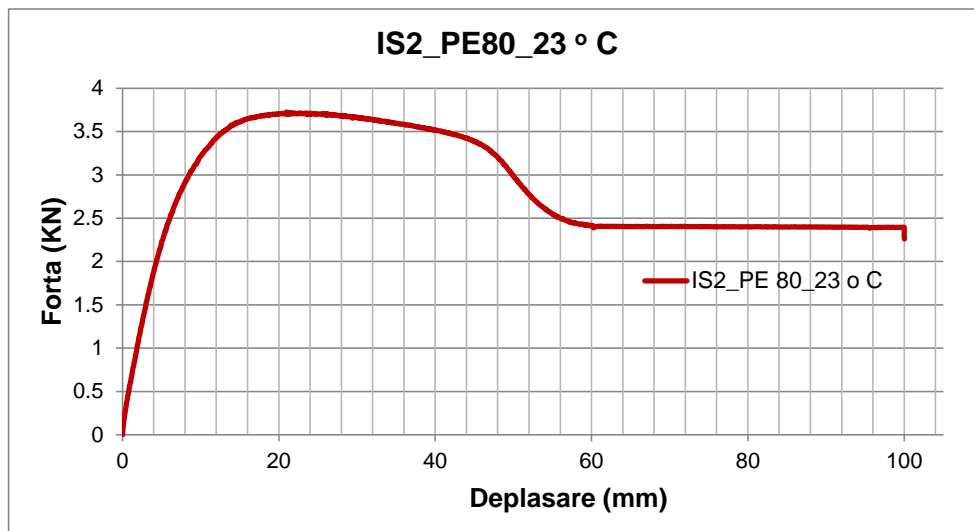


Figura 5.3 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE80 – IS2 (23 ° C)

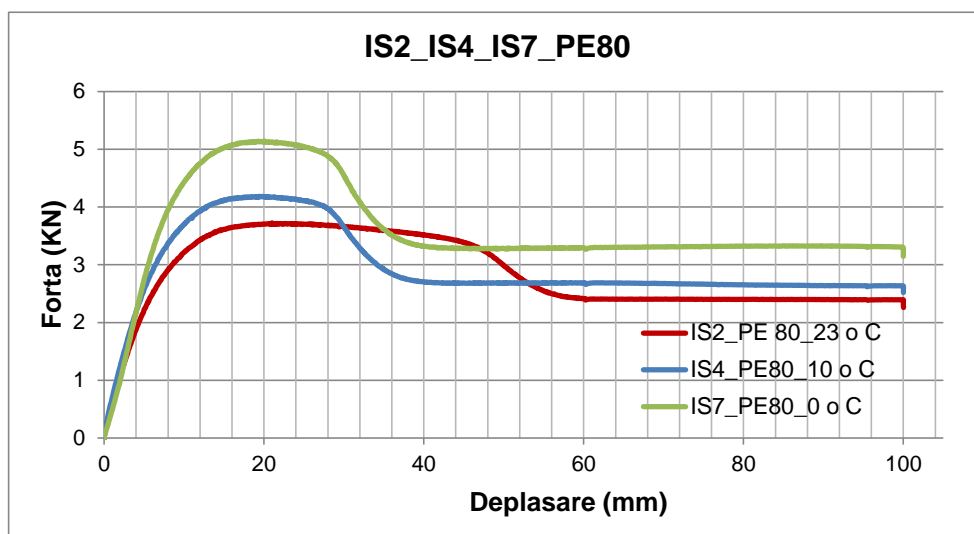


Figura 5.4 Diagramele încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE80 – IS2 (23 ° C), PE80 –IS4 (10 ° C) și PE80 –IS7 (0 ° C)

Pe parcursul desfășurării încercărilor cu ajutorul camerei termografice FLIR System A40, s-a urmărit evoluția degradării epruvetei și interdependența astfel creată cu variația temperaturii epruvetei din timpul încercării.

Figura 5.5 prezintă imaginea termică a unei epruvete de tip PE80 (IS) încercată la tracțiune, la o temperatură de referință de -10 ° C.

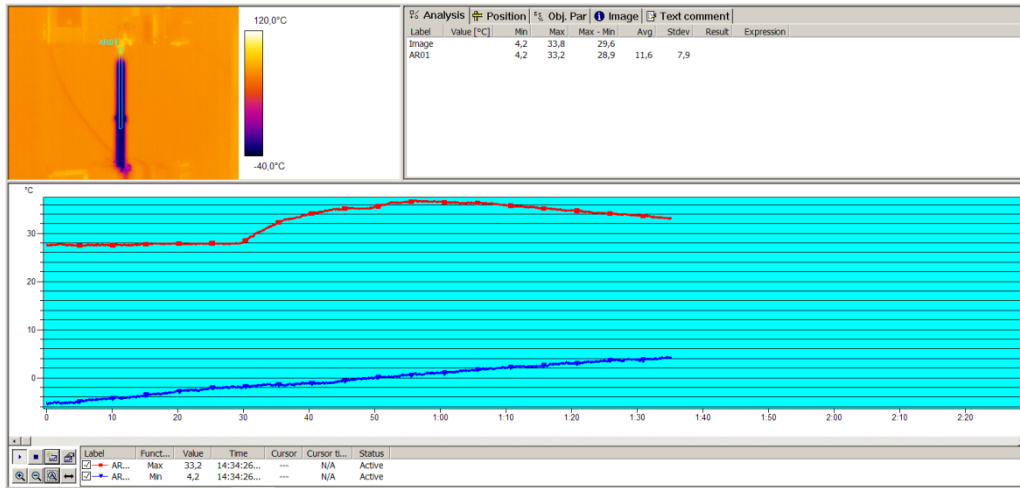


Figura 5.5 Variația temperaturii unei epruvete PE80 (IS) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

În acest caz, în urma încercării epruvetei în domeniul temperaturilor negative ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) se observă că cedarea, datorită efectului de concentrare a tensiunii, a avut loc în zona de prindere a epruvetei în bacurile mașinii, unde s-a înregistrat și valoarea maximă a temperaturii în timpul încercării la tracțiune.

Rezultatele obținute arată că rezistența la rupere a îmbinărilor sudate PE80, pentru intervalul de temperatură considerat variază liniar cu temperatura (Figura 5.6).

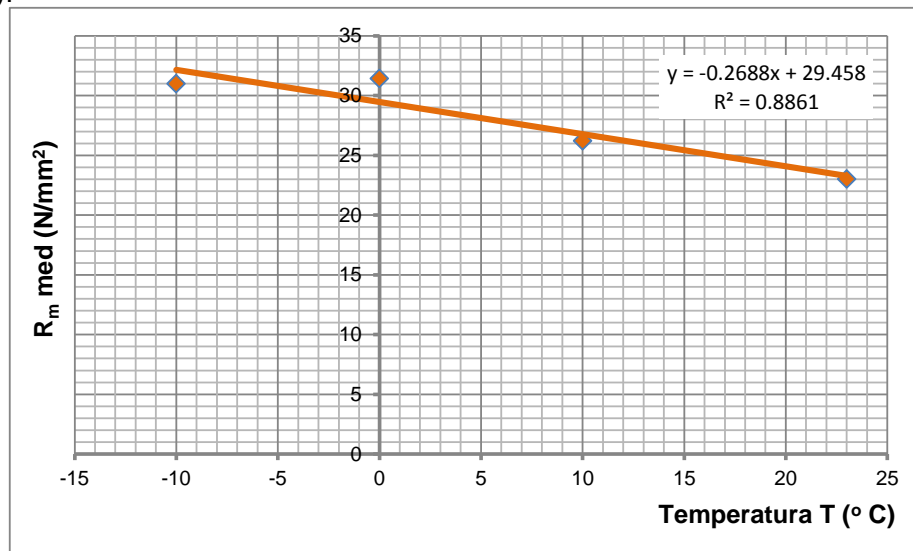


Figura 5.6 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru PE80 (IS)

Din datele obținute, rezultă că rezistența la rupere medie $R_{m\text{ med}}$ a îmbinărilor sudate PE80 crește semnificativ cu scăderea temperaturii, având valori cuprinse între $23,02\text{ N/mm}^2$ corespunzător încercării la tracțiune la $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ și respectiv $31,00\text{ N/mm}^2$ pentru încercarea la $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.2.1.3. Comportarea la tracțiune a îmbinărilor sudate PE100

Încercările la tracțiune efectuate pe epruvetele PE100 s-au realizat de asemenea cu o viteză de 50 mm/min și într-un interval de temperatură cuprins între 23 ° C și -10 ° C.

Rezultatele obținute au evidențiat o creștere importantă a valorii forței maxime înregistrate cu scăderea valorii temperaturii, de la cca. 3600 N corespunzător încercării la 23 ° C la valori în jurul a 5000 N în cazul încercării epruvetelor la 0 ° C și respectiv -10 ° C (Figura 5.7 și Figura 5.8).

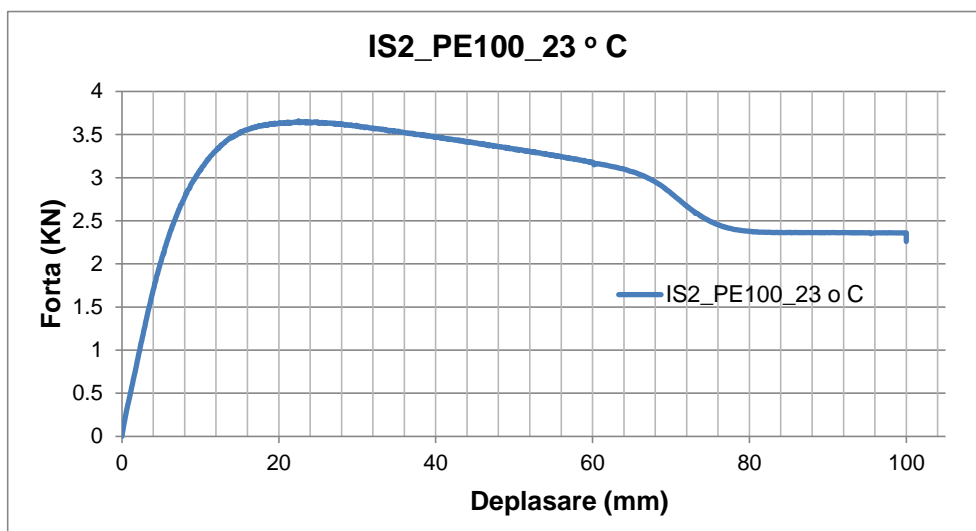


Figura 5.7 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruveta din material PE100 – IS2 (23 ° C)

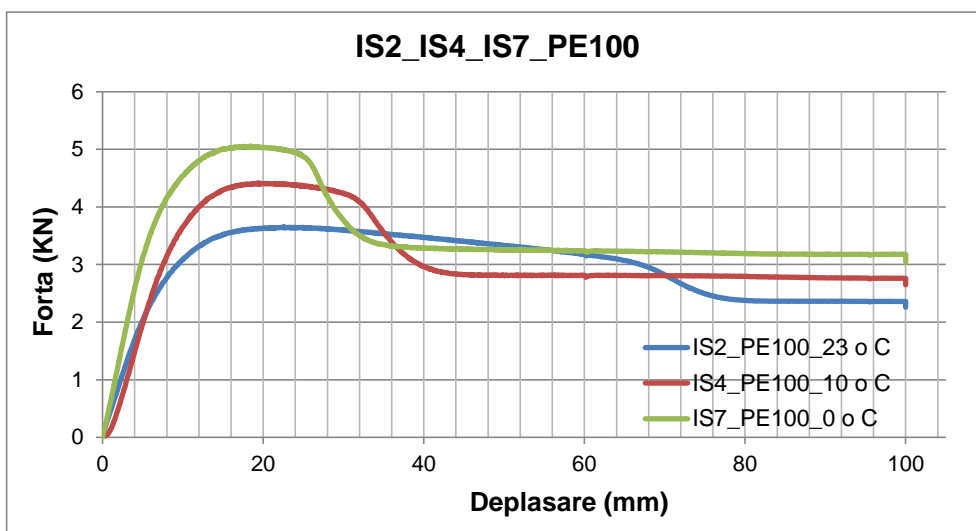


Figura 5.8 Diagrama încercării la tracțiune pentru epruvete din material PE100 – IS2 (23 ° C), IS4 (10 ° C) și IS7 (0 ° C)

Figura 5.9 prezintă imaginea termică, înregistrată cu ajutorul camerei termografice, în cazul unei epruvete PE100 (IS) încercată la tracțiune la o temperatură de referință de -10°C . Se observă că cedarea și temperatura maximă a epruvetei s-au înregistrat în zona de fixare a epruvetei în bacurile mașinii de încercare la tracțiune.

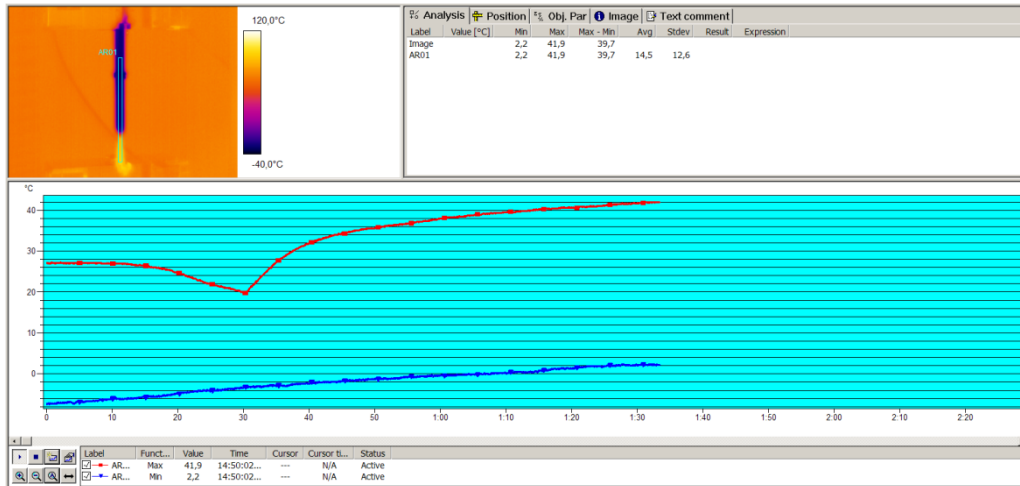


Figura 5.9 Variația temperaturii unei epruvete PE100 (IS) pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10°C

Figura 5.10 arată că rezistența la rupere medie $R_{m\ med}$ a îmbinărilor sudate PE100 crește după o funcție de gradul I odată cu scăderea temperaturii, de la $22,50\text{ N/mm}^2$ (pentru 23°C) la $31,08\text{ N/mm}^2$ aferent celei de la -10°C .

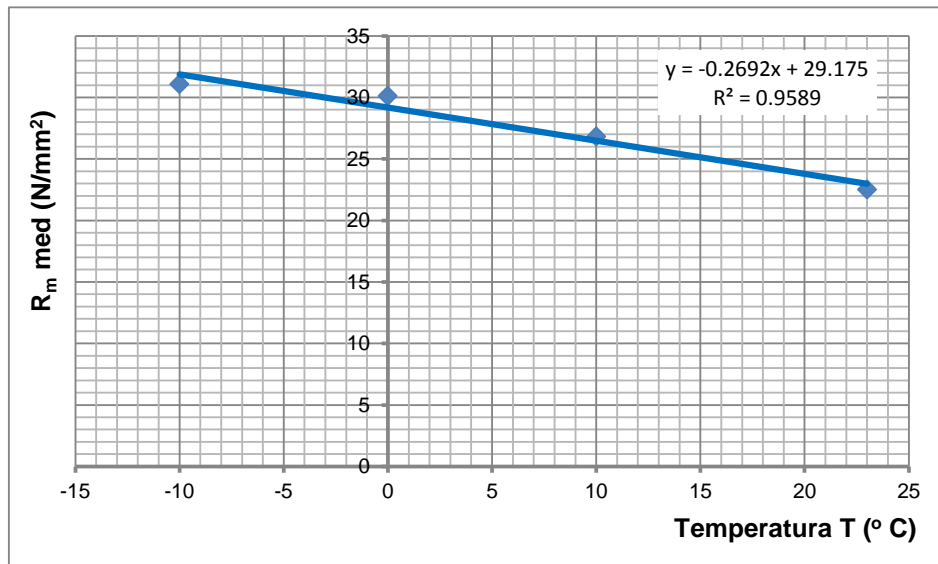


Figura 5.10 Variația rezistenței la rupere cu temperatura pentru PE100 (IS)

5.3. Comportarea la încercări de mecanica ruperii a îmbinărilor sudate

În exploatarea pe termen lung a sistemelor de conducte din materiale termoplastice, trebuie luată în considerare și comportarea la îmbătrânire a materialului. Îmbătrânirea fizică sau chimică a materialului poate conduce la modificarea proprietăților acestuia prin influențarea morfologiei (cristalinitatea) și masei moleculare (modul de reticulare), ambele având un efect semnificativ asupra proprietăților mecanice ale conductelor și a rezistenței la inițierea și propagarea fisurii.

Rezultatele cercetărilor experimentale efectuate pe materialele țevilor de tip PE80 aflate în exploatare într-un interval de până la de 30 ani, au arătat că durata remanentă de viață a conductei este în strânsă legătură cu dimensiunile imperfecțiunilor. Mărimi ale imperfecțiunilor cuprinse între 0,1 – 0,4 mm pot conduce la inițierea unor fisuri cvasi-fragile [97].

Durata de viață a unei conducte din material termoplastic este determinată de trei factori principali: starea materialului, fluidul vehiculat și de tipul solicitării. Cercetările efectuate au estimat că durata de viață a conductelor expuse la apă fără clor este 10-30 de ori mai mare decât în cazul aceluiași conducte expuse la apă cu clor, fiind prin urmare necesară utilizarea în materialul țevilor a unor elemente de stabilizare speciale. Utilizând o metodă mixtă, care combină încercarea la presiune hidrostatică și analizele chimice a fost posibilă estimarea duratei de viață a materialului unei conducte PE100, destinată pentru vehicularea apei [98].

De asemenea, un alt caz investigat a fost acela al unor țevi din polietilenă de medie densitate care au fost încercate la presiune interioară folosindu-se apă conținând dioxid de clor cu 4 ppm, având pH = 6,8 și la temperatura de 90 ° C. Rezultatele au arătat că stabilizatorii din materialul țevii au fost diminuați de patru ori mai mult decât în situația în care s-a utilizat apă cu clor (4 ppm, pH = 6.8), la aceeași temperatură.

Prin degradarea materialului țevii s-a constatat că a fost afectată în mod special componenta amorfă a polimerului, ceea ce a condus la o creștere semnificativă a gradului de cristalinitate cu efecte directe în scăderea tenacității și mărirea tendinței de fisurare a materialului [99].

Noile categorii de polietilenă de tip "bimodal", sunt alcătuite din două familii de lanțuri moleculare lungi și scurte, care fac posibilă obținerea unor proprietăți superioare. În timp ce lanțurile macromoleculare scurte neramificate, produse în prima etapă de procesului de fabricație a polimerului PE 100, furnizează o densitate ridicată, cele lungi ramificate produse în etapa a doua, conferă o rezistență ridicată la fisurare materialului [100].

Această tehnologie avantajoasă de producere a polimerilor pentru conducte, determină creșterea rezistenței la presiune hidrostatică, combinată cu proprietăți foarte bune pe termen lung, cum ar fi de exemplu creșterea rezistenței la propagarea rapidă a fisurii – RCP [101].

Una din metodele cel mai des utilizate în Europa pentru încercarea la încovoiere prin șoc este metoda de încovoiere în trei puncte de tip Charpy, care utilizează epruvete drepte crestate. În cazul în care se folosesc epruvete sub formă

de arc este necesară introducerea unui factor de corecție a energiei dependente de geometria epruvetei [102].

Evaluarea integrității structurilor cu defecte devine deosebit de importantă atunci când este vorba sisteme de conducte sub presiune, așa cum sunt cele de distribuție pentru apă și gaz, a căror posibile cedări pot avea consecințe deosebit de grave. În acest sens conceptele mecanicii ruperii sunt aplicate în diferite lucrări de cercetare care urmăresc să stabilească metodologii adecvate de estimare a cedărilor structurilor din polimeri ductili, așa cum sunt cei de tip polietilenă ([103], [104], [105], [106], [107], [108] [109], [110]).

Țevile din polietilenă (PE) destinate vehiculării fluidelor sub presiune, de până în prezent, sunt proiectate pentru a fi utilizate în funcționare pe o perioadă de cel puțin 50 de ani. Ca urmare a îmbunătățirilor aduse materiilor prime din care se fabrică aceste țevi, în special în ceea ce privește distribuția masei moleculare de tip bimodal și introducerea controlată de lanțuri moleculare scurte, se urmărește o creștere a duratei de viață minime în serviciu la 100 de ani.

În aceste condiții, în contextul îmbunătățirii semnificative a proprietăților materiilor prime, încercarea la presiune interioară a țevelor din PE nu mai este practică, fiind necesar un timp de încercare prea lung (țeava poate să nu cedeze până la 10^4 ore - peste un an) și costuri relativ ridicate. Mai ales pentru clasele moderne de polietilenă, de tip PE 100 și PE 100-RC, nu se mai pot obține informații cantitative despre cedarea cvasi-fragilă prin încercări la presiune interioară. Cercetările recent efectuate au demonstrat că prin utilizarea epruvetelor rotunde crestate (CRB) și supunerea lor la solicitări ciclice, rezultatele se pot obține într-un timp relativ scurt, de doar câteva zile, curba de cedare la un anumit număr de cicluri de solicitare fiind un indicator pentru evaluarea și clasificarea unui material ([111], [112]).

Un rol important în contextul evaluării rezistenței materialelor termoplastice în timp, îl are cunoașterea celor două moduri de cedare specifice: propagarea lentă a fisurii (SCG) și propagarea rapidă a fisurii (RCP). Rezistența la propagarea fisurii în domeniul materialelor polimerice este guvernată de plasticitatea locală care este reflectată într-un mecanism de micro-deformare. Astfel polimerii cedează fie printr-o deformare fără modificare de volum denumită "shear" (forfecare), fie prin așa numita "crazing" (microfisurare) care este însoțită de o creștere de volum. Drept urmare devine foarte importantă cunoașterea cât mai profundă a aspectelor legate de comportarea la deformare și rupere a materialelor termoplastice. Modelele dezvoltate privind inițierea și propagarea microfisurilor, respectiv tranziția microfisură - fisură, justifică modul în care polimerii manifestă rezistență la propagarea lentă a fisurii. Se poate concluziona că pentru înțelegerea comportării la rupere și cedare a polimerilor amorfi sau parțial cristalini este important a se avea în vedere tipul rețelei macromoleculare a structurii analizate ([113], [114], [115], [116], [117], [118]).

O serie de cercetători au urmărit să determine rezistența diferitelor materiale polimerice și compozite la propagarea fisurii, prin trasarea curbelor J-R obținute cu ajutorul valorilor integralei J în funcție de extensia fisurii ([119], [120], [121], [122], [123], [124]).

Una din lucrările efectuate recent a urmărit să analizeze efectul vitezei de deformare, grosimii epruvetei și influența sudării asupra tenacității la rupere pe materiale de tip polietilenă de înaltă densitate (PE-HD). Încercările la tracțiune au fost efectuate la diferite viteze (10-500 mm/min), pe epruvete prelevate din țevi și îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor, pentru a determina proprietățile

mecanice ale îmbinărilor sudate și respectiv ale materialelor de bază. De asemenea, pentru determinarea tenacității la rupere J_{IC} s-au efectuat încercări specifice de mecanica ruperii pe epruvete sudate și fără sudură la temperatura de 23 ° C, la diferite viteze de încercare (10-500 mm/min). Rezultatele obținute au relevat că viteza de încercare are un efect semnificativ asupra tenacității la rupere pentru ambele categorii de epruvete: sudate și fără sudură. Valorile tenacității la rupere J_{IC} înregistrate au fost mai mari pentru epruvetele din material de bază decât în cazul celor sudate [125].

5.3.1. Determinarea experimentală a parametrilor de mecanica ruperii pe îmbinări sudate

Aspectele specifice comportării la rupere ale materialelor termoplastice, ce sunt caracterizate prin deformații mari, care preced ruperea prin curgerea materialului la vârful fisurii, sunt supuse în continuare atenției cercetătorilor spre a fi dezvoltate o serie de metode adecvate pentru a caracteriza câmpul de tensiuni - deformații din vecinătatea vârfului fisurii.

Metoda integralei J permite analiza propagării fisurii în cursul unei încărcări lente, în vederea determinării rezistenței la fisurare a materialului, cu ajutorul curbelor J-R.

În cadrul programul experimental, prezentat în acest subcapitol, s-au realizat două serii de epruvete (S1, S2) prelevate din îmbinări sudate din țevi PE 100, având diametrul de 110 mm și grosimea de perete 10 mm.

În cazul seriei S1 creștătura epruvetelor s-a realizat prin prelucrare mecanică în zona influențată termic a epruvetei (simbolizare ZIT), respectiv la cele din seria S2 creștătura au fost realizată centrat în axa sudurii (simbolizare SUD). În ambele cazuri epruvetele au fost marcate suplimentar indicativelor S1, S2 și cu cifre de la 1 la 10 (Figura 5.11 și Figura 5.12).



Figura 5.11 Epruvete cu creștătură în ZIT destinate pentru încercarea la încovoiere în trei puncte



Figura 5.12 Epruvete cu creștătură în sudură (SUD) destinate pentru încercarea la încovoiere în trei puncte

Cele două bavuri ale epruvetelor de la partea interioară și exterioară, rezultate în urma procesului de sudare cap la cap cu element încălzitor, au fost îndepărtate după efectuarea creștăturilor, pentru ca epruvetele să aibă aceleași dimensiuni ale secțiunii transversale pe întreaga lungime.

În vederea efectuării încercărilor la încovoiere în trei puncte, după prelucrarea mecanică a epruvetelor, acestea au fost prefisurate conform cerințelor standardului ASTM D 6068.

Încercările la încovoiere au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C, utilizând o mașină Zwich/Roell Z005 din cadrul Laboratorului de Rezistența Materialelor "Ștefan Nădășan" al Universității "Politehnica" Timișoara (Figura 4.29).

Epruvetele cu creștătura dispusă în zona influențată termic (ZIT) din seria S1 (marcaj de la 1 la 10), au fost încărcate la diferite sarcini corespunzătoare anumitor valori ale deplasărilor punctului de aplicare a forței: de la 1,25 mm până la 3,50 mm, cu o creștere constantă de 0,25 mm. Valorile forțelor corespunzătoare atingerii deplasărilor stabilite prin încercarea la încovoiere în trei puncte, au fost cuprinse între minim 166 N (epruveta S1.1) și maxim 325 N (epruveta S1.10).

De asemenea și epruvetele cu creștătură în sudură (seria S2) au fost încărcate la sarcini corespunzătoare atingerii unor deplasărilor ale punctului de aplicare a forței cuprinse între 1,25 mm și 3,50 mm. În acest caz, valorile forțelor înregistrate au fost cuprinse între minim 168 N (epruveta S2.1) și maxim 327 N (epruveta S2.10).

Astfel, în cadrul seriei de epruvete cu creștătură în ZIT (S1), spre exemplu la epruveta S1.6, corespunzător deplasării punctului de aplicație al forței pe o distanță de 2,50 mm, s-a înregistrat o forță de 274 N (Figura 5.13).

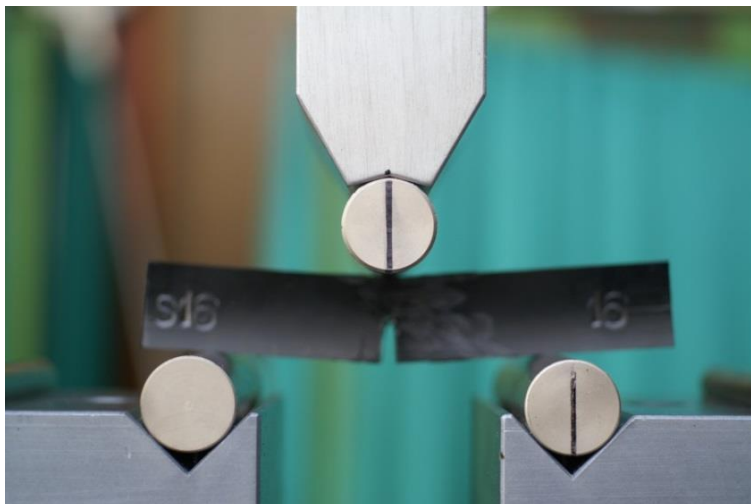


Figura 5.13 Epruveta S1.6 – încercare la încovoiere în trei puncte

În cazul seriei S2 de epruvete cu creștură în sudură (SUD), de exemplu la epruveta S2.2 corespunzător deplasării punctului de aplicație al forței pe o distanță de 1,50 mm, s-a înregistrat o forță de 204 N (Figura 5.14).

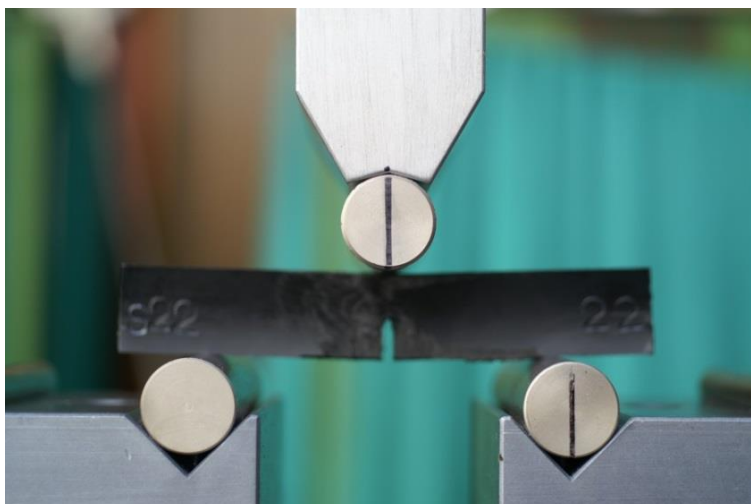


Figura 5.14 Epruveta S2.2 – încercare la încovoiere în trei puncte

În vederea identificării frontului fisurii pe suprafețele epruvetelor, urmare a efectuării încercărilor la încovoiere, epruvetele au fost condiționate la o temperatură de -20°C timp de o oră și apoi au fost supuse ruperii la încovoiere prin șoc Charpy.

În acest mod a fost posibilă evidențierea zonelor specifice ruperii ductile, determinată de încercarea la încovoiere și respectiv ruperii fragile, rezultată în urma răcirii epruvetelor și a ruperii la încovoiere prin șoc.

Spre exemplificare se prezintă aspectul macroscopic al suprafețelor de rupere în cazul epruvetelor S1.4 și respectiv S1.7 (Figura 5.15 și Figura 5.16).

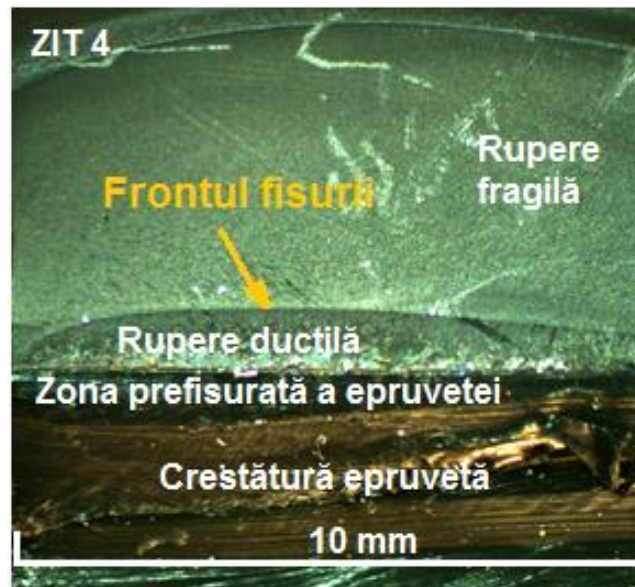


Figura 5.15 Suprafața de rupere a epruvetei S1.4 (ZIT)



Figura 5.16 Suprafața de rupere a epruvetei S1.6 (ZIT)

În ceea ce privește epruvetele cu creștătură în sudură se prezintă aspectul macroscopic al suprafețelor de rupere pentru epruvetele S2.2 și respectiv S2.4 (Figura 5.17 și Figura 5.18).

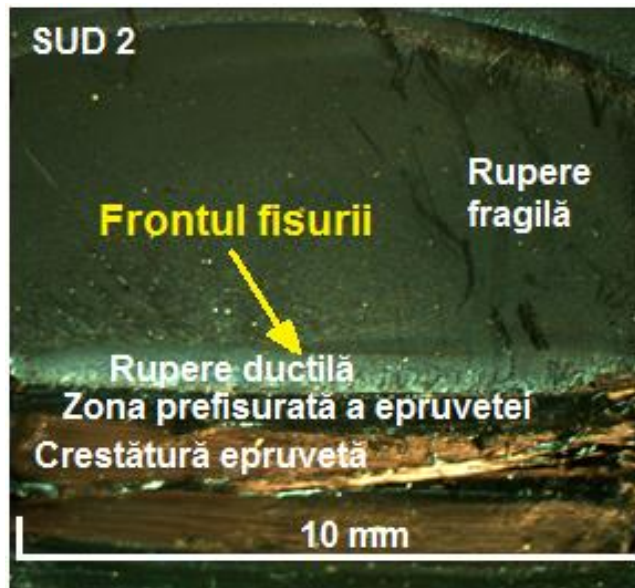


Figura 5.17 Suprafața de rupere a epruvetei S2.2 (SUD)

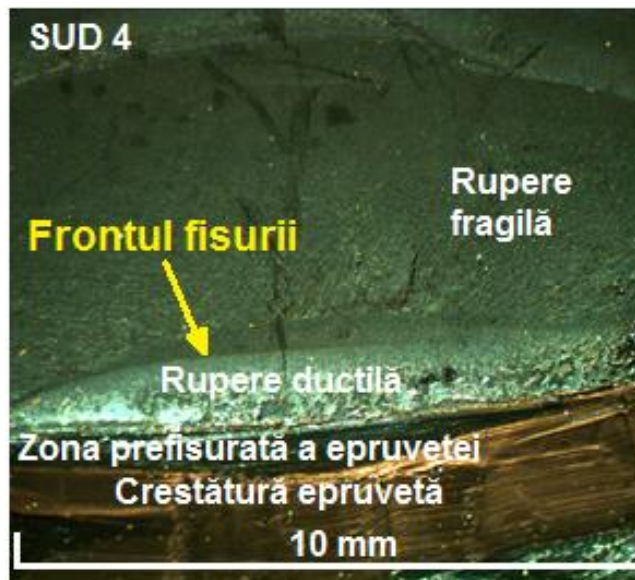


Figura 5.18 Suprafața de rupere a epruvetei S2.4 (SUD)

În vederea determinării mărimii extensiei fisurii, utilizând softul SigmaScan Pro, au fost efectuate măsurători în cinci puncte echidistante, centrat față de mijlocul epruvetei și la o distanță de 0,1 mm față de marginile acesteia (Figura 4.34).

Calculul extensiei medii a fisurii Δa s-a realizat în mod similar, folosind algoritmul pentru cazul materialului de bază, menționat în subcapitolul 4.4.1.2.

În scopul determinării valorilor integralei J a fost necesar, în prealabil, calculul energiei necesare pentru extensia fisurii, ca fiind suma dintre energia U corespunzătoare forței de referință pentru fiecare epruvetă cu creștătură încercată și energia de indentare U_i .

Calculul valorilor integralei J și trasarea curbelor J-R s-au realizat folosind ecuațiile 4.30 și 4.31 prezentate la pagina 98, pentru cazul materialului de bază.

În vederea trasării diagramelor J-R, pentru ambele serii de epruvete S1 și S2, s-a procedat la eliminarea ultimelor patru puncte obținute cu deplasări mai mari de cca. 1 mm și determinarea prin interpolare a încă patru puncte corespunzătoare unor valori medii ale extensiei fisurii mai mici de 0,2 mm și respectiv 0,3 mm.

Prin intersectarea curbelor J-R, pentru cazul epruvetelor cu creștătură în zona influențată termic (ZIT) și respectiv a celor având creștătură în sudură (SUD), cu dreapta construită la $\Delta a = 0,2$ mm (ASTM E 1820) s-au determinat valorile tenacității la rupere J_{IC} pentru aceste două cazuri: $J_{IC \text{ ZIT}} = 2,02$ N/mm și $J_{IC \text{ SUD}} = 1,15$ N/mm (Figura 5.19 și Figura 5.20).

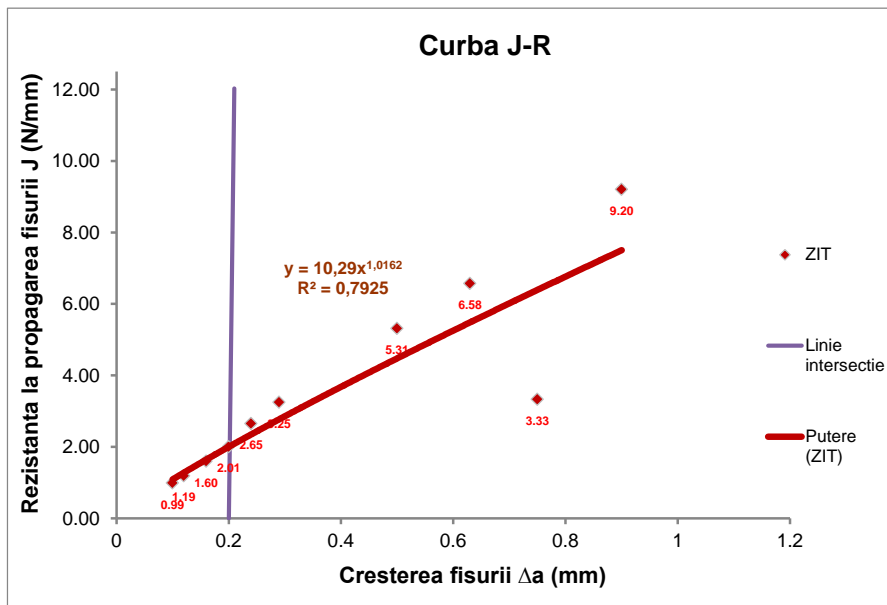


Figura 5.19 Curba J-R pentru epruvete din îmbinare sudată PE100, cu creștătura în ZIT

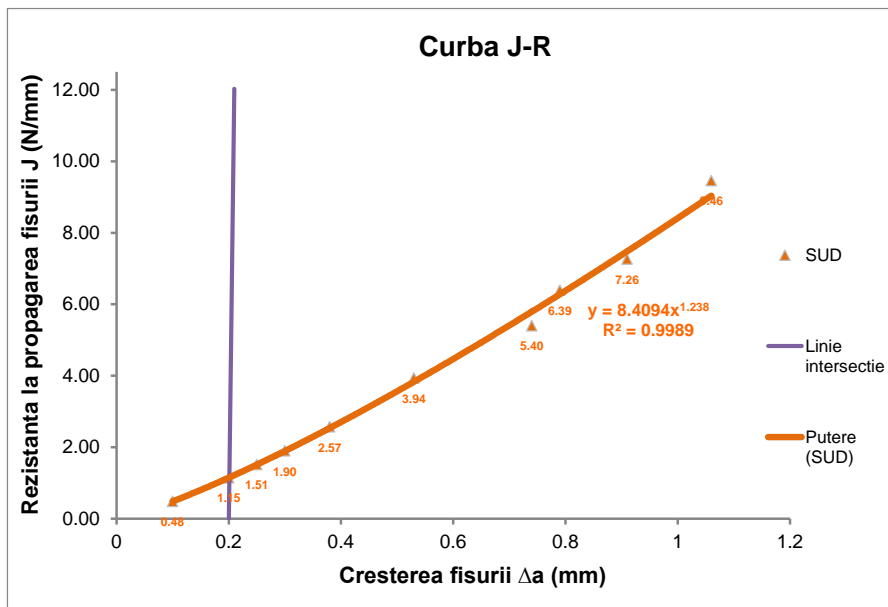


Figura 5.20 Curba J-R pentru epruvete din îmbinare sudată PE100, cu creștătura în sudură

Figura 5.21 prezintă suprapunerea graficelor determinate în cadrul cercetărilor experimentale efectuate, corespunzător celor trei cazuri investigate.

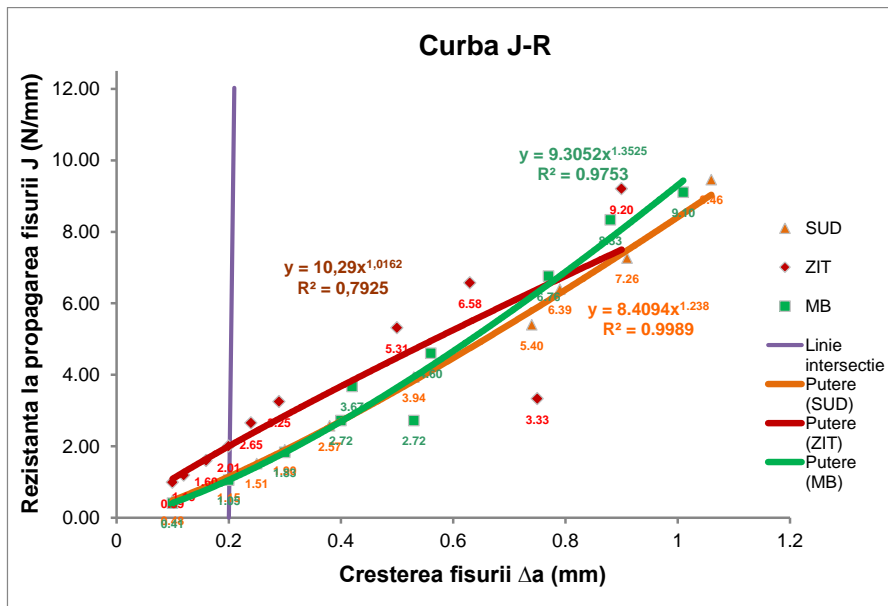


Figura 5.21 Curbele J-R pentru epruvete PE100, cu creștătura în MB - ZIT – sudură

Analizând comparativ alura curbelor astfel obținute, se poate remarca faptul că există diferențe relativ mici ale valorilor integralei J aferente determinărilor realizate pentru materialul de bază, ZIT și sudură.

5.4. Concluzii privind comportarea la solicitări mecanice a îmbinărilor sudate

În acest capitol sunt prezentate cercetările experimentale realizate pe îmbinări sudate, în vederea determinării comportării acestora la solicitări mecanice statice și la încercări specifice de mecanica ruperii.

În prima parte a cercetărilor efectuate, încercările au fost efectuate pe epruvete prelevate din îmbinări sudate, realizate din țevi de tip PE80 și PE100 destinate vehiculării gazelor naturale, urmărindu-se determinarea caracteristicilor mecanice și variația acestora prin modificarea valorii temperaturii de încercare între 23 ° C și -10 ° C.

Astfel, epruvetele prelevate din îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor au fost supuse încercării la tracțiune cu o viteză de 50 mm/min și la diferite temperaturi de încercare: 23 ° C, 10 ° C, 0 ° C și -10 ° C.

Încercările la tracțiune au fost monitorizate cu ajutorul unei camere termografice, urmărindu-se astfel evoluția degradării epruvetei și interdependența astfel creată cu variația temperaturii epruvetei din timpul încercării.

Rezultatele obținute au arătat că rezistența la rupere a îmbinărilor sudate atât în cazul țevilor PE80 cât și a celor de tip PE100 crește conform unor funcții de gradul I, odată cu scăderea temperaturii de încercare.

În a doua parte a cercetărilor efectuate în cadrul acestui capitol, au fost realizate două serii de epruvete (S1, S2) prelevate din îmbinări sudate din țevi PE100, care au fost destinate încercărilor specifice de mecanica ruperii. Astfel, epruvetele din seria S1 cu creștătura în zona influențată termic și respectiv cele din seria S2 având creștătura în axa sudurii au fost supuse încercărilor la încovoiere în trei puncte. Încercările au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C, conform cerințelor standardului ASTM D 6068.

Epruvetele din cele două serii S1 și S2 au fost încărcate la diferite sarcini, respectiv deplasări ale punctului de aplicare a forței între 1,25 mm - 3,50 mm.

Prin determinarea valorilor integralei J și trasarea curbelor J-R, atât pentru cazul epruvetelor cu creștătură în zona influențată termic (ZIT), cât și a celor cu creștătură în sudură (SUD), s-au determinat valorile tenacității la rupere J_{IC} , pentru cele două situații analizate: $J_{IC\ ZIT} = 2,02\ \text{N/mm}$ și $J_{IC\ SUD} = 1,15\ \text{N/mm}$.

Se poate concluziona astfel că cele trei zone specifice ale îmbinării sudate prezintă omogenitate prin prisma rezultatelor obținute referitoare la variația tenacității materialului.

6. CREȘTEREA FIABILITĂȚII COMPONENTELOR SUDATE

6.1. Considerații privind optimizarea Response Surface Design (RSD)

Conceptele și metodele de proiectare, efectuare și de analiză a rezultatelor experimentale se află într-o continuă dezvoltare. Cercetarea experimentală este astăzi strâns legată de metodele statistice, programele multifactoriale și modele matematice utilizate în determinarea domeniilor optime de funcționare a sistemelor tehnologice.

În contextul funcționării acestora este foarte important să se țină cont de anumite particularități cum ar fi cele legate de unele restricții și respectiv de acțiunea inerentă a factorilor perturbatori.

Sistemele tehnologice au o structură și funcționalitate determinate, ce vizează prin anumite procese specifice transformarea intrărilor în ieșiri.

Această legătură de cauzalitate, ce caracterizează funcționalitatea sistemului, poate fi exprimată printr-o ecuație ce subliniază interdependența dintre factorii de influență și funcțiile obiectiv.

Cercetarea științifică apelează adesea, în vederea studierii anumitor fenomene sau procese care sunt supuse unor analize, la modele analitice sau experimentale.

În cazul modelării experimentale se are în vedere stabilirea, pe baza principiilor statisticii matematice și analizei regresionale, a legăturii dintre funcțiile obiectiv și variabilele independente ale sistemului într-o formă matematică cât mai simplă, adaptabilă calculului computerizat [126].

Cercetarea experimentală reprezintă o intervenție controlată în funcționarea unui sistem, având drept scop pe de-o parte cunoașterea influenței variabilelor independente (factorii controlabili) asupra funcțiilor obiectiv și respectiv determinarea condițiilor optime de funcționare a unui sistem în funcție de criterii și restricții impuse.

În acest sens se concepe, proiectează și se realizează un set de experimente, ale cărui rezultate să permită explicitarea modelului. Astfel, în cazul modelării experimentale se are în vedere și faptul că efectuarea încercărilor experimentale presupune anumite costuri, ceea ce presupune apropierea de un optim al raportului între informațiile obținute și costurile experimentale.

Metodologia optimizării reprezintă un ansamblu de tehnici matematice și statistice care se utilizează pentru stabilirea unei relații de legătură între funcția sau funcțiile obiectiv și factorii de influență. Obiectivul principal este acela de a optimiza răspunsurile prin prisma unor criterii prestabilite [127].

În acest sens, având în vedere pe de-o parte necesitatea de a analiza influența unui număr cât mai mare de factori controlabili, cu domenii cât mai largi, iar pe de alta de a reduce volumul global al experimentării, se impune stabilirea unui program experimental optimal ca parte componentă a strategiei globale de concepere și realizare a încercărilor.

Există în principal două strategii de experimentare: Gauss-Seidel (clasică) caracterizată prin "un factor la un moment dat" și o strategie modernă (factorială – Box-Wilson) definită prin "toți factorii în fiecare moment" [128].

Având în vedere faptul că în general se analizează dependența funcției obiectiv de mai mult de doi factori de influență, reprezentarea grafică tridimensională evidențiază doar o parte din modelul empiric global, prezentând evoluția funcției de către doi factori de influență. În acest caz de reprezentare grafică, celorlalți factori de influență li se atribuie valori fixe – de obicei aceștia au valorile medii din domeniul lor de variație.

Adeeseori pentru identificarea modelului experimental adecvat caracterizării zonei de optim se recurge la modele polinomiale de ordinul doi, iar reprezentarea grafică în acest caz poartă denumirea de suprafață de răspuns de ordin superior.

În cazul situațiilor când există mai mulți de patru factori de influență, la proiectarea experimentelor de ordin superior sunt adăugate și măsurări realizate în punctul central al experimentului obținându-se programele factoriale central-compuse [129].

Literatura de specialitate prezintă relativ puține lucrări de cercetare științifică referitoare la planificarea experimentelor în domeniul sudării materialelor termoplastice [130].

În domeniul sudării cu element încălzitor și prin vibrații, de exemplu, se înscrie o lucrare care urmărește aspecte specifice privind sudabilitatea a două tipuri de poliolefine termoplastice (TPO). În cadrul cercetărilor experimentale s-a utilizat metoda de proiectare a experimentelor (DOE) pe componente utilizate în industria automobilelor. Rezultatele obținute au subliniat posibilitatea de îmbinare a celor două materiale termoplastice prin cele două metode de sudare utilizate, în cazul celei de sudare cu element încălzitor înregistrându-se valori ale rezistenței la rupere mai ridicate pentru ambele materiale decât la sudarea prin vibrații. De asemenea s-a constatat că valorile parametrilor de sudare cu element încălzitor pot varia în limite relativ largi, metoda de proiectare a experimentelor (DOE) fiind una adecvată pentru stabilirea condițiilor optime de sudare [131].

Park și Liddy au efectuat o serie de cercetări privind evaluarea sudabilității unor materiale termoplastice (TPO) destinate utilizării în industria de automobile. Experimentele efectuate pentru sudarea cu ultrasunete și prin vibrații au avut la bază utilizarea metodei de proiectare a experimentelor - DOE (Design of Experiments) ([132], [133]).

În cadrul acestui capitol se prezintă aspecte legate de optimizarea proceselor de sudare specifice pentru materiale termoplastice.

Procesele de sudare fac parte din categoria sistemelor tehnologice complexe, caracterizate printr-un număr mare de variabile independente, având intrări, factori de influență (controlabili, perturbatori) și ieșiri (funcții de răspuns).

Optimizarea proceselor de sudare, presupune un volum mare de muncă și resurse cu atât mai mari cu cât numărul de variabile este mai mare. O alternativă modernă a modului clasic de realizare a optimizării proceselor industriale, o reprezintă planificarea experimentelor asistată de calculator [134].

Una dintre cele mai moderne modalități de planificare a experimentelor și optimizare a proceselor industriale o reprezintă metoda Response Surface Design (RSD).

Planificarea experimentelor, cu ajutorul acestei metode, presupune în primul rând stabilirea și realizarea unei serii de teste, al căror scop de a urmări influența factorilor controlabili asupra modificărilor care vor rezulta în răspunsul procesului.

Prin planificarea experimentelor s-au stabilit pentru fiecare caz în parte un anumit număr de variante tehnologice de sudare, urmând ca pe baza rezultatelor obținute, să se realizeze modelarea matematică a procesului de sudare și astfel, să se stabilească în final varianta de sudare optimă, prin care să fie îndeplinite condițiile impuse funcțiilor obiectiv.

Având în vedere că dintre materialele termoplastice utilizate pentru realizarea conductelor de presiune, o pondere importantă o au cele din polietilenă, în cadrul cercetărilor experimentale au fost folosite două tipuri de materiale reprezentative: polietilenă de tip PE 80 și polietilenă de tip PE 100, destinate vehiculării gazelor naturale.

Totodată datorită faptului că la lucrările de construcții apar tot mai des și lucrări specifice de etanșare utilizându-se materiale termoplastice, în cadrul cercetărilor experimentale au fost folosite și componente de tipul geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) care se pot îmbina prin sudare, cu ajutorul procedurii de sudare cu pană încălzitoare ([135], [136]).

Astfel, metoda de planificare a experimentelor Response Surface Design (RSD) a fost aplicată pe de-o parte pentru optimizarea proceselor de sudare cap la cap cu element încălzitor a țevilor din polietilenă de tip PE 80 și PE 100, respectiv pentru optimizarea procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

În cele trei cazuri de optimizare, prezentate în continuare, pentru fiecare combinație de material și procedeu de sudare utilizat, planificarea experimentelor s-a realizat folosind programul de planificare și calcul statistic MINITAB 15, considerându-se după caz, un experiment RSD de tip central-compus întreg sau fracționat (pe jumătate).

Optimizarea procesului de sudare pentru cele trei situații considerate a constat în:

- obținerea unei valori individuale a nivelului de optimizare pentru fiecare răspuns (d), cât mai apropiată de optimul complet ($d=1$);
- combinarea valorilor individuale ale nivelurilor de optimizare, în vederea obținerii unei valori compuse - D cât mai apropiate de $D=1$, care reprezintă optimul complet;
- identificarea valorilor optime pentru factorii controlabili.

6.2. Optimizarea procesului de sudare pentru țevi PE80

Problematika sudării țevilor din polietilenă este una din direcțiile de interes pentru toți factorii implicați în proiectarea, execuția și exploatarea rețelelor de distribuție a fluidelor sub presiune (apă potabilă, gaze naturale, etc.).

În cadrul acestui prim set de experimente, din categoria materiale termoplastice au fost utilizate țevi din polietilenă de tip PE 80, destinate distribuției gazelor naturale.

Unul dintre procedeele cele mai utilizate pentru îmbinarea prin sudare a țevelor din materiale termoplastice este cel de sudare cap la cap cu element încălzitor.

În cadrul cercetărilor experimentale desfășurate, utilizând acest procedeu de sudare, pe țevi cu: diametrul 110 mm, grosime de perete de 10 mm și raport dimensional standard SRD 11, s-a urmărit modelarea și optimizarea procesului de sudare.

În acest sens s-a urmărit ca printr-un număr relativ redus de experimente să se studieze influența principalilor parametri de sudare: presiune, temperatură și timp asupra calității îmbinării sudate. Pe baza rezultatelor obținute a fost stabilit procesul de sudare optim, care să îndeplinească condițiile impuse funcțiilor obiectiv (Figura 6.1).

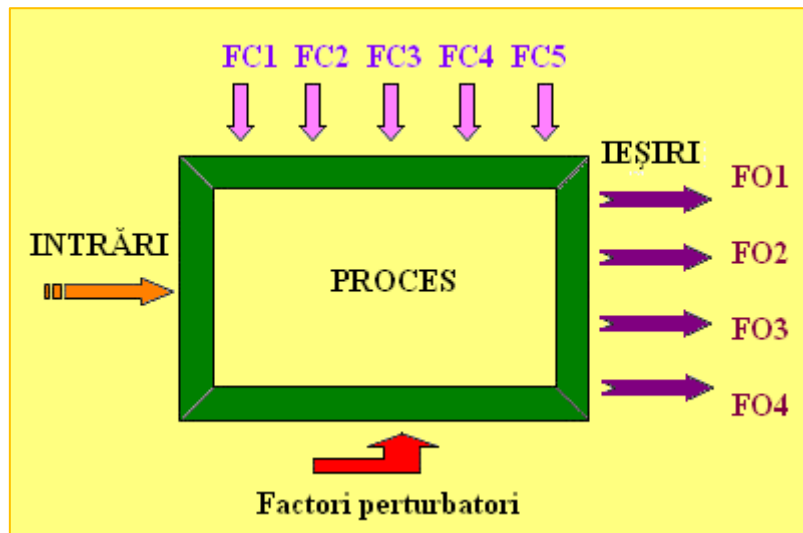


Figura 6.1 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru țevi PE 80

Planificarea experimentelor s-a realizat folosind programul de planificare și calcul statistic MINITAB 15, considerându-se un experiment RSD de tip central-compus fracționat (pe jumătate).

6.2.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru țevi PE80

Tabelul 6.1 prezintă, conform standardului SR EN 1555-1, valoarea rezistenței minim necesare (MRS) pentru materialul de tip PE 80 care a fost utilizat în cadrul cercetărilor experimentale [137].

Tabelul 6.1 MRS pentru țevile din polietilenă tip PE 80

Denumire	MRS (MPa)
PE 80	8,0

În funcție de tipul granulei din care este fabricată țeava de polietilenă, aceasta va prezenta o anumită valoare a indicelui de fluiditate la cald (MFR), specifică materialului respectiv. Utilizarea unui set oarecare de parametri de sudare recomandat de către producătorii de echipamente de sudare poate conduce la obținerea unor suduri cu mărimi și forme diferite ale bavurilor, respectiv chiar se pot înregistra diferențe importante în ceea ce privesc valorile caracteristicilor mecanice ale îmbinărilor sudate astfel realizate.

În aceste condiții, pentru un anumit material de tip PE 80 dat, utilizarea unor parametri de sudare fără o verificare atentă prealabilă, poate conduce în anumite condiții de solicitare la apariția unor avarii în exploatare.

Din acest motiv, pentru a se obține un nivel corespunzător de siguranță în exploatare a sistemului de conducte este necesară stabilirea unor valori optime ale parametrilor de sudare.

Aceste considerente subliniază necesitatea optimizării proceselor de sudare, astfel încât îmbinările sudate să corespundă condițiilor de calitate cerute.

Un prim pas necesar a fi realizat pentru planificarea și realizarea experimentelor este acela de stabilire a factorilor controlabili și a funcțiilor obiectiv:

- factorii controlabili FC1, FC2, FC3, FC4 și FC5, reprezintă
 - FC1 - temperatura elementului încălzitor (T)
 - FC2 - timpul de încălzire (t_1)
 - FC3 - timpul de menținere (t_2)
 - FC4 - timpul de sudare (t_5)
 - FC5 - presiunea de încălzire (P1)
- funcțiile obiectiv FO1, FO2, FO3 și FO4, reprezintă
 - FO1 - rezistența la rupere prin tracțiune a îmbinării sudate (R)
 - FO2 - unghiul de încovoiere pe dorn (U)
 - FO3 - lățimea medie a bavurii (bmed)
 - FO4 - înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed)

Sudarea cap la cap cu element încălzitor s-a realizat cu un echipament de sudare semimecanizat cu acționare hidraulică RITMO DELTA 250, conform diagramei de sudare presiune-timp (Figura 6.2).

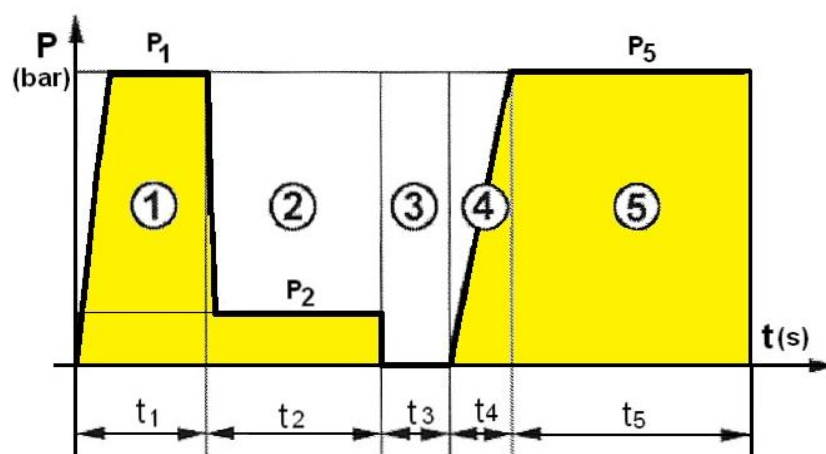


Figura 6.2 Diagrama de sudare pentru țevi PE 80

Limitele de variație ale factorilor controlabili: temperatură, presiune și timp au fost stabilite pe baza recomandărilor producătorului echipamentului de sudare și a experienței autorului în domeniul sudării materialelor termoplastice.

Astfel, cu ajutorul programului MINITAB 15 a fost stabilită matricea program a experimentului (Tabelul 6.2).

Tabelul 6.2 Programul experimental pentru sudarea țevilor PE 80

Nr. crt.	Presiunea de încălzire P1 (bar)	Timp de încălzire t1 (s)	Timp de menținere t2 (s)	Timp de sudare t5 (s)	Temperatură element încălzitor T (°C)
1	6	10	140	900	220
2	20	30	80	900	180
3	13	20	110	455	200
4	20	30	140	900	220
5	6	10	80	900	180
6	20	10	80	900	220
7	13	20	110	455	200
8	6	30	140	900	180
9	20	30	140	10	180
10	13	20	110	455	200
11	13	20	110	455	200
12	13	20	110	455	200
13	6	10	140	10	180
14	6	30	80	900	220
15	20	30	80	10	220
16	6	30	140	10	220
17	20	10	80	10	180
18	20	10	140	900	180
19	6	10	80	10	220
20	6	30	80	10	180
21	13	20	110	455	200
22	20	10	140	10	220
23	13	20	140	455	200
24	13	20	80	455	200
25	13	20	110	900	200
26	13	20	110	455	180
27	20	20	110	455	200
28	13	10	110	455	200
29	13	20	110	455	220
30	13	30	110	455	200
31	13	20	110	455	200
32	13	20	110	10	200
33	6	20	110	455	200

Pe baza acestor regimuri de sudare au fost realizate probe sudate din țevi din polietilenă de tip PE 80, Ø 110 x 10 mm, SDR 11. La toate cele 32 de probe au fost parcurse în mod riguros, etapele necesare pregătirii și cele corespunzătoare

sudării cap la cap cu element încălzitor, respectiv s-a efectuat examinarea vizuală în etapele specifice realizării îmbinărilor sudate [39].

6.2.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale

În vederea evaluării calității îmbinărilor sudate realizate s-a recurs la încercări și examinări prin metode distructive și nedistructive. Astfel s-au realizat încercări la tracțiune conform SR EN 12814-2 [96] și încovoiere conform SR EN 12814-1 [138], respectiv examinare vizuală după sudare și examinare microscopică conform standardului SR EN 12814-5 [139], folosindu-se mașini și echipamente din cadrul Laboratorului LIEA - ISIM Timișoara.

Din fiecare probă sudată au fost prelevate câte cinci epruvete pentru încercarea la tracțiune și cinci pentru încovoiere, respectiv câte o epruvetă pentru examinare microscopică, marcajele epruvetelor fiind realizate corespunzător probelor de la 1-33.

În cazul examinării vizuale, completată de examinarea microscopică s-a urmărit pe de-o parte punerea în evidență a imperfecțiunilor specifice sudării cap la cap cu element încălzitor conform indicațiilor standardelor SR EN 14728 [68] și DVS 2202-1 [69], iar pe alta modul de configurare a bavurilor la partea interioară și exterioară.

Din rezultatele analizei macroscopice s-a constatat că la îmbinările sudate: 1, 5, 8, 13, 16, 19, 20, 26 și 33 forma bavurii atât la interior cât și la exterior a prezentat un aspect ascuțit, cu dimensiuni relativ mici, fiind în general insuficient formată.

Acesta subliniază faptul că la aceste variante tehnologice presiunea de încălzire și/sau timpul de încălzire au avut valori prea mici, respectiv posibil o temperatură de încălzire neadecvată.

Spre deosebire de lucrările de cercetare anterioare efectuate pe un material de tip PE 80 la care s-au înregistrat o serie de ruperi în sudură atât la încercarea la tracțiune cât și la cea de încovoiere [140], în acest caz utilizând un material PE80 de ultimă generație, urmare a încercării la tracțiune ruperea s-a produs în materialul de bază [141]. În ambele perioade de desfășurare a cercetărilor, încercările atât la tracțiune cât și la încovoiere s-au realizat pe o mașină de tip EDZ 40, la o temperatură de referință de 23 °C.

Conform cerințelor standardului SR EN 12814-1 acest tip de îmbinare fiind considerată una de tip simetric, încercările la încovoiere au fost efectuate cu dornul așezat pe partea exterioară a țevii, neînregistrându-se ruperi în sudură până la un unghi de 160 °.

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul programului experimental a fost posibilă modelarea matematică a procesului de sudare.

6.2.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevile PE 80

Prin prelucrarea pe calculator a datelor, softul realizează astfel un model matematic neliniar, prin intermediul căruia se stabilesc ponderile factorilor controlabili și interacțiunile acestora.

Influența semnificativă a factorilor controlabili este evidențiată prin probabilitatea p (pragul cel mai frecvent utilizat de statisticieni fiind de 0,05, respectiv 5%). Valorile $p < 0,05$ evidențiază o influență semnificativă a factorului sau a interacțiunilor dintre factorii controlabili.

În cazul analizei realizate, de exemplu pentru funcțiile obiectiv - lățimea medie a bavurii și înălțimea medie a vârfului bavurii, s-a obținut o aproximare foarte bună a procesului de sudare, valoarea indicelui R^2 fiind de 98% pentru prima funcție, respectiv de 96% pentru cea de - a doua funcție obiectiv.

Prelucrarea statistică a datelor experimentale a condus la obținerea unor valori ale probabilității $p < 0,05$ în cazul următorilor factori controlabili și interacțiuni:

- presiunea P1 pentru funcția obiectiv rezistența la tracțiune;
- presiunea P1 și interacțiunile P1*P1, t1*t2 și t1*t5, în cazul funcției obiectiv lățimea medie a bavurii;
- interacțiunile P1*t2, t1*t5 și t1*T pentru funcția obiectiv înălțimea medie a vârfului bavurii.

Existența interacțiunilor dintre factori impune o atenție deosebită la stabilirea concluziilor finale privind optimizarea procesului de sudare.

Influențele exercitate de către factorii controlabili pot fi evidențiate și sub forma unor grafice tridimensionale pe suprafețe.

Astfel în cazul funcției obiectiv rezistența la tracțiune (R) aceste influențe au fost analizate în situația în care variază doi dintre factori, valorile celorlalți trei factorii controlabili fiind păstrate constante (Figura 6.3, Figura 6.4, Figura 6.5).

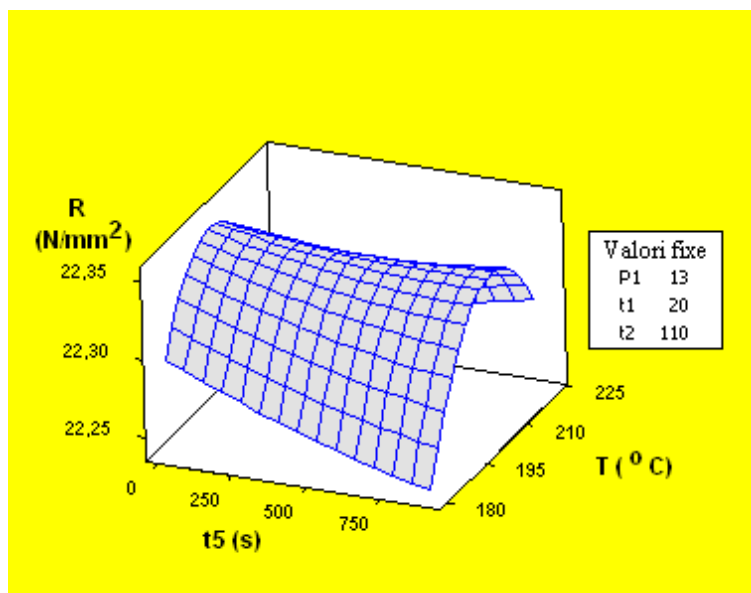


Figura 6.3 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t5 și temperatura T

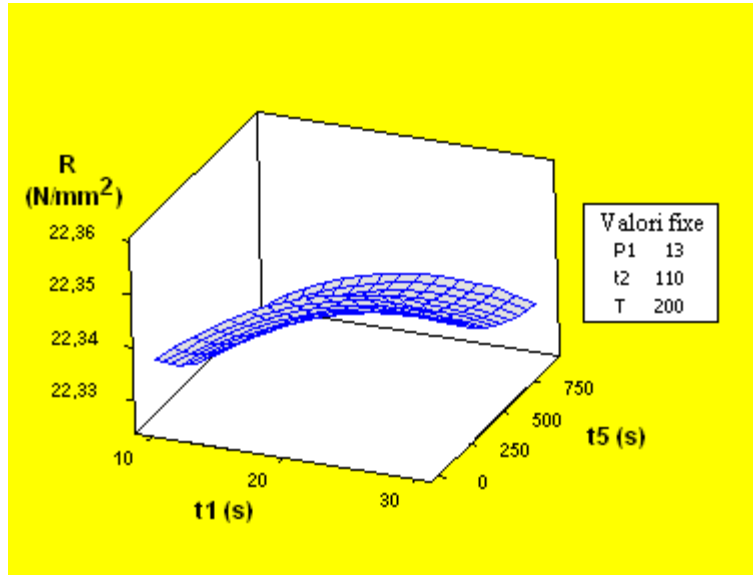


Figura 6.4 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t_1 și timpul t_5

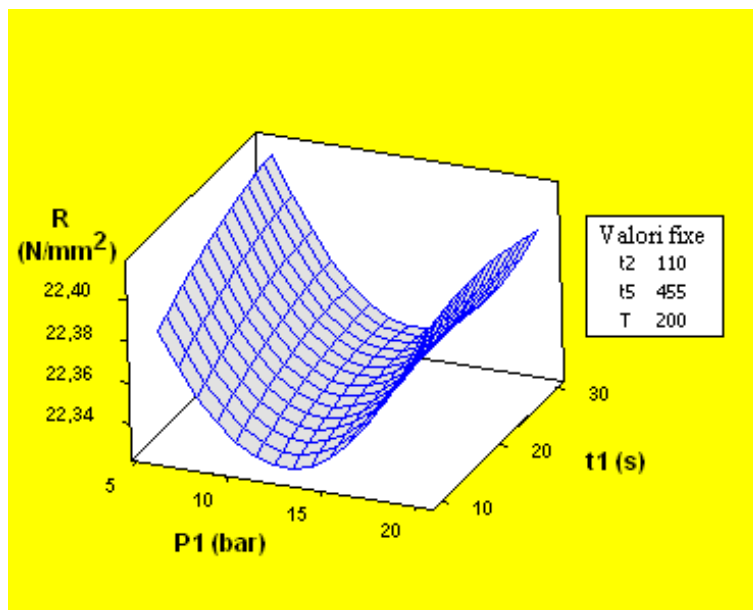


Figura 6.5 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P_1 și timpul t_1

Analiza influenței perechilor de factori t_1 - T , t_1 - t_2 , P_1 - T asupra funcției obiectiv lățimea medie a bavurii (b_{med}), a evidențiat o creștere importantă a valorii acesteia odată cu creșterea presiunii P_1 , a timpului de încălzire t_1 și a temperaturii

T, respectiv o influență relativ mică exercitată de variația timpului t_2 între limitele stabilite inițial (Figura 6.6, Figura 6.7, Figura 6.8).

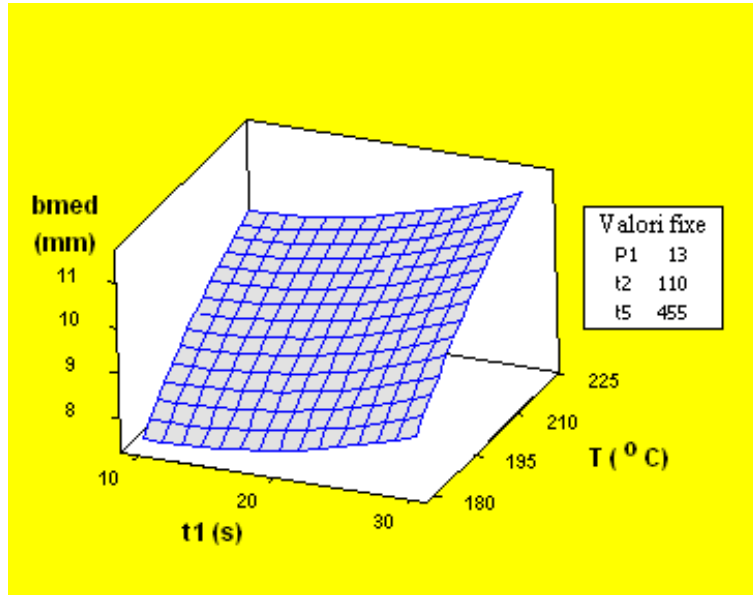


Figura 6.6 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_1 și temperatura T

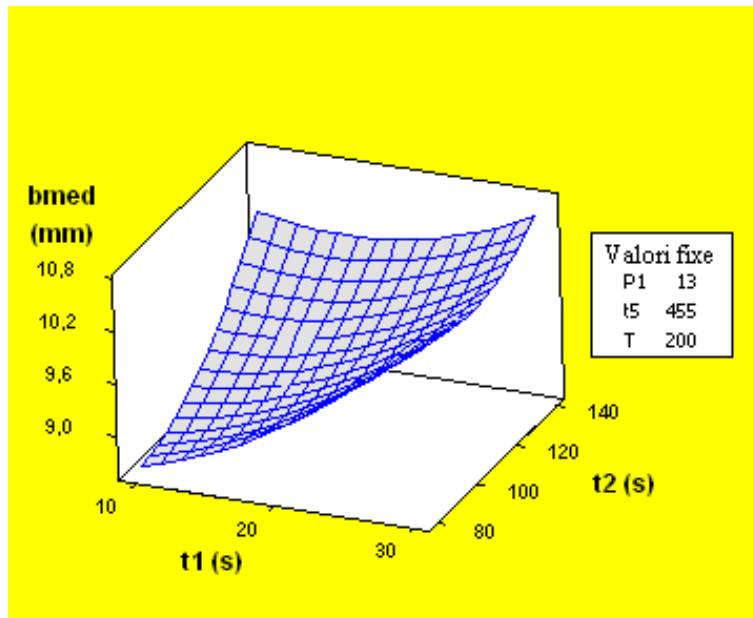


Figura 6.7 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_1 și timpul t_2

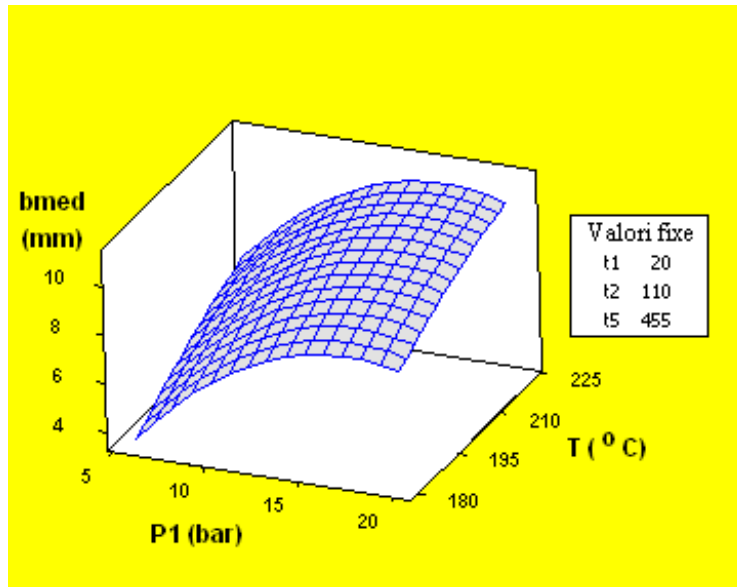


Figura 6.8 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de presiunea P_1 și temperatura T

Pe de altă parte influența perechilor de factori t_2 - T , t_1 - t_2 și P_1 - t_2 asupra funcției obiectiv înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) arată efecte favorabile la reducerea timpului de încălzire t_2 spre valori apropiate de limita minimă aleasă de 80 s, respectiv necesitatea ca valoarea presiunii P_1 să fie situată în jurul valorii maxime pentru a se atinge cerințele impuse acestei funcții obiectiv (Figura 6.9, Figura 6.10, Figura 6.11).

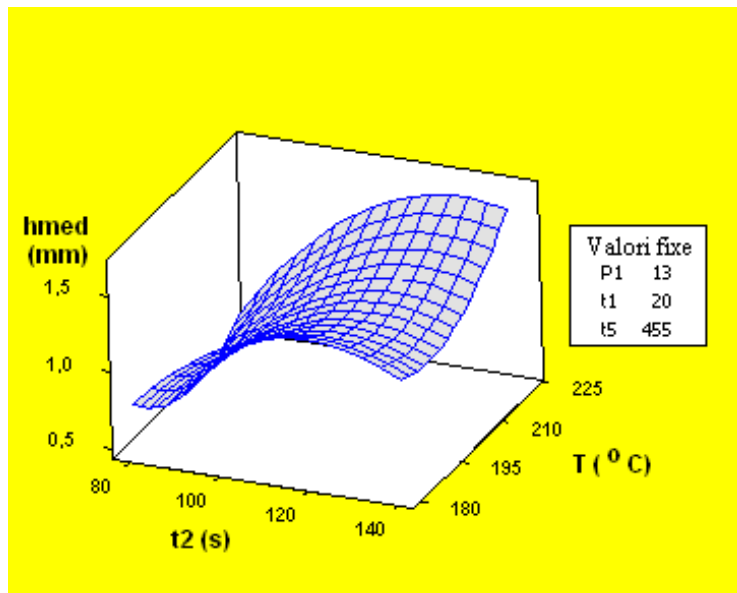


Figura 6.9 Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul t_2 și temperatura T

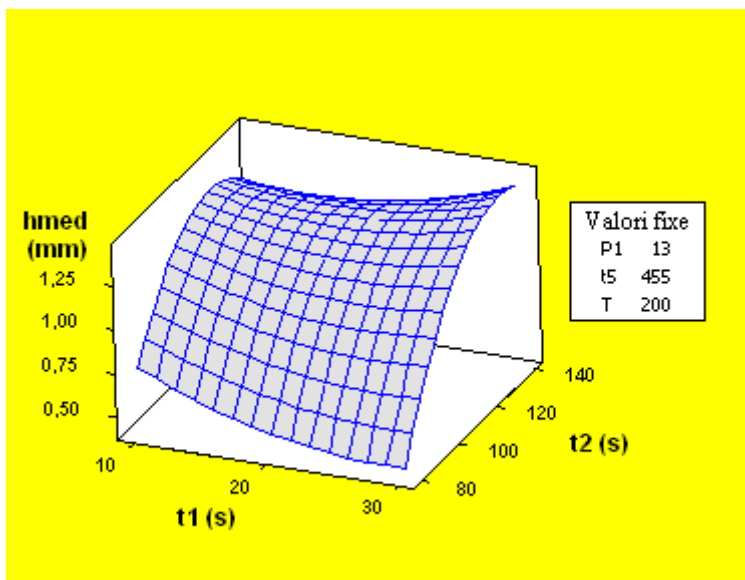


Figura 6.10 Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t_1 și timpul t_2

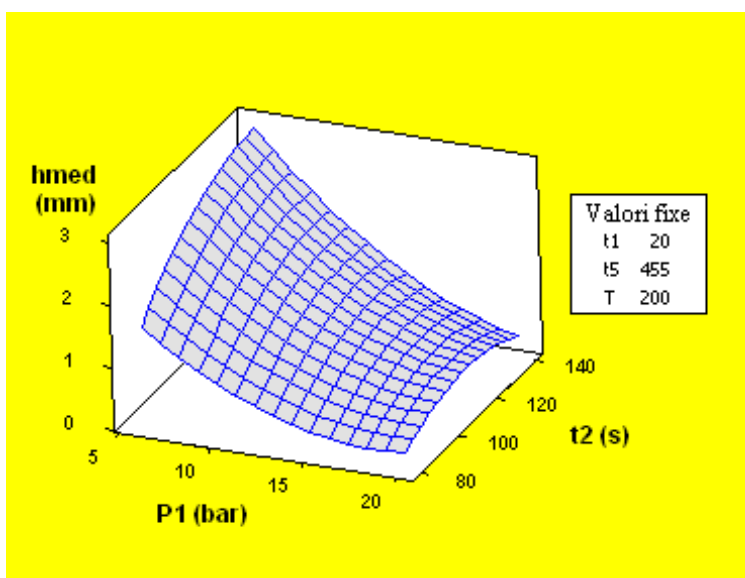


Figura 6.11 Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de presiunea P_1 și timpul t_2

De asemenea se pot reprezenta grafic și dependențele reciproce sub forma curbelor de nivel. Spre exemplificare se prezintă în continuare trei dintre acestea.

Aceste curbe de nivel au fost trasate pentru câte o singură funcție obiectiv, menținându-se constante valorile următorilor parametri de sudare: $t_2 = 110$ s, $t_5 = 455$ și $T = 200$ °C (Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14).

Curbele de nivel permit sesizarea direcției de optimizare, dar numai pentru cei doi parametri considerați. Optimizarea finală s-a realizat cu ajutorul programului MINITAB 15, luând în considerare toți parametrii de sudare analizați.

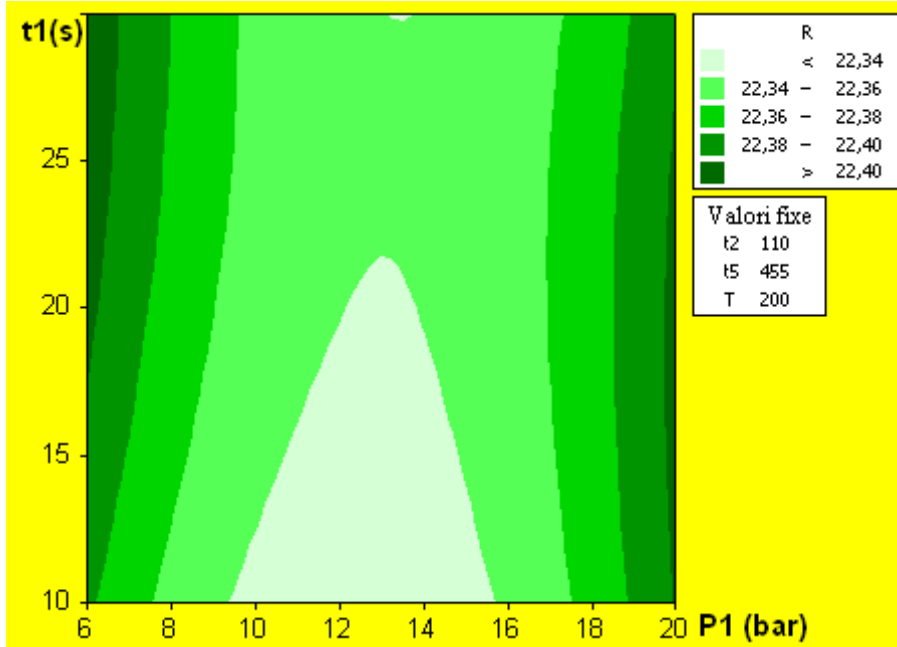


Figura 6.12 Curbe de nivel: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t1 și presiunea P1

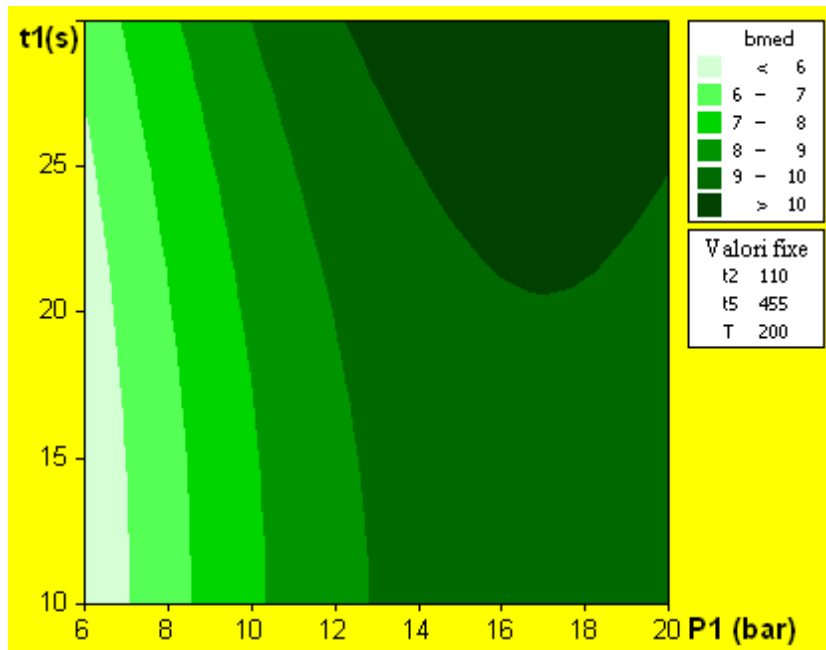


Figura 6.13 Curbe de nivel: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1

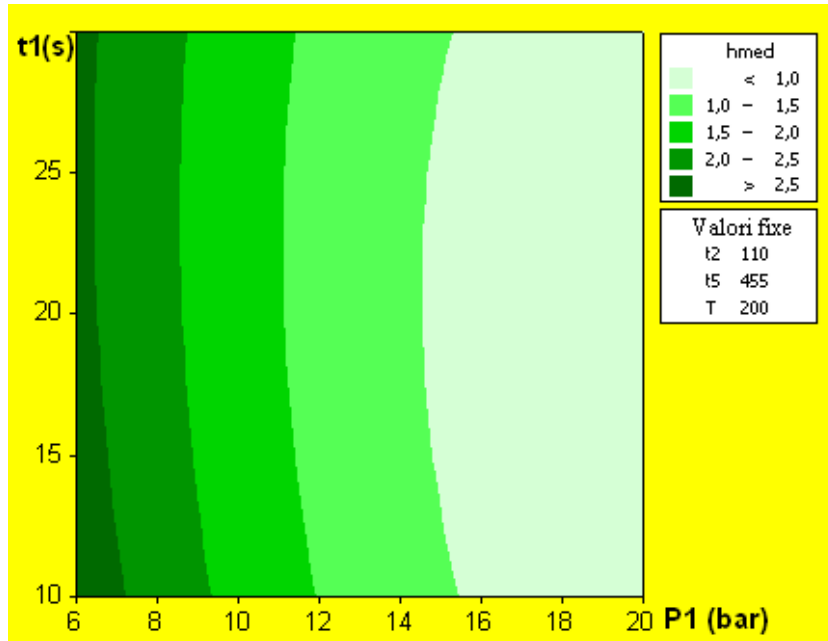


Figura 6.14 Curbe de nivel: Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1

În figurile următoarele se prezintă rezultatul suprapunerii graficele curbelor de nivel pentru funcțiile obiectiv analizate (Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17).

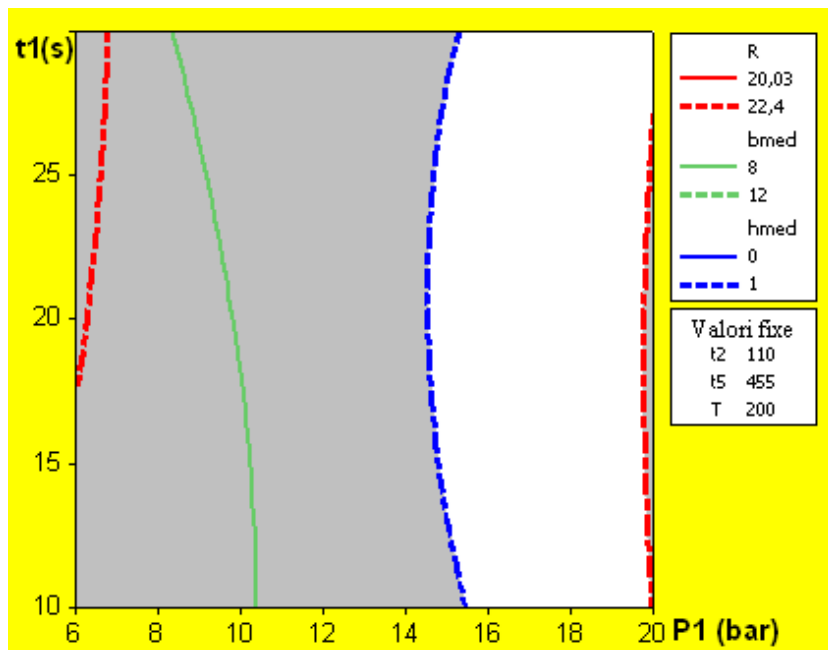


Figura 6.15 Dependența: Funcții obiectiv = f (t1, P1)

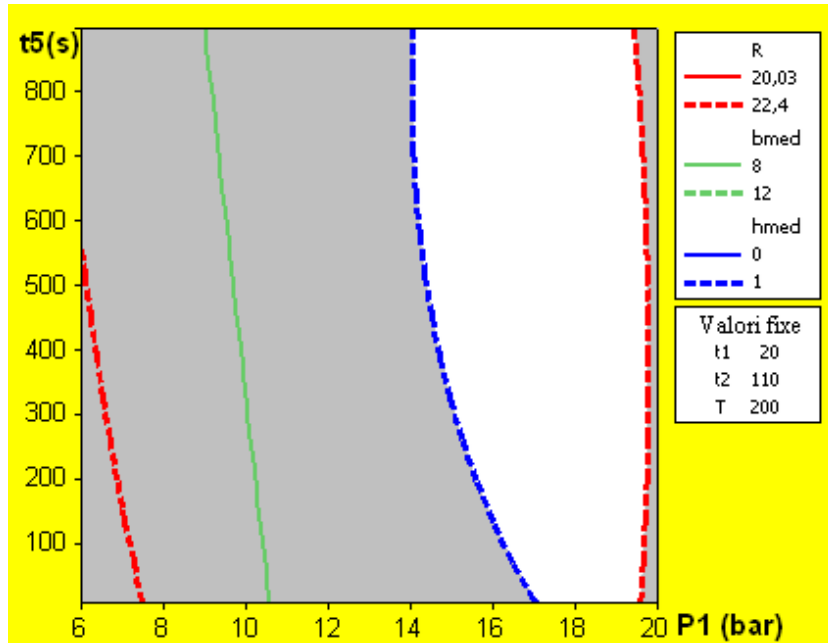


Figura 6.16 Dependența: Funcții obiectiv = $f(t_5, P_1)$

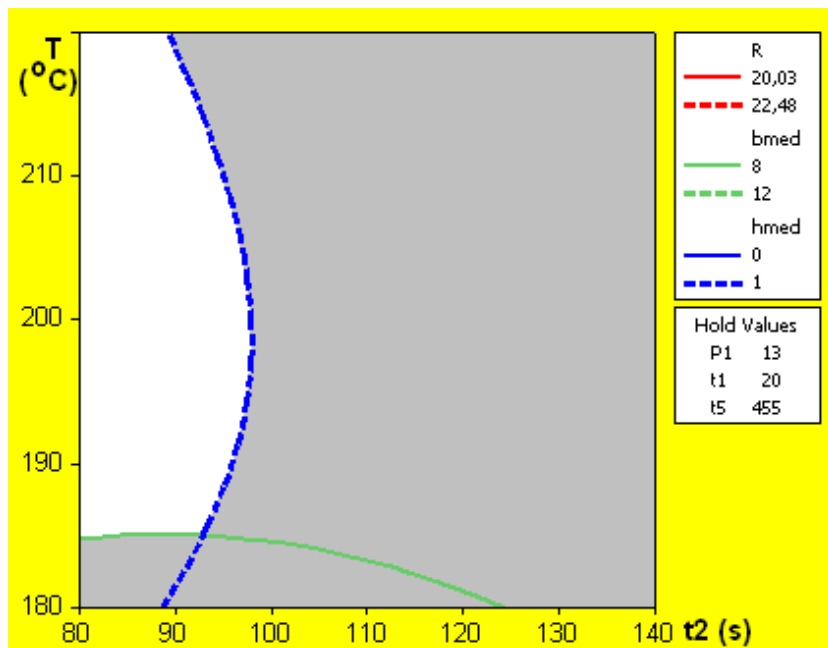


Figura 6.17 Dependența: Funcții obiectiv = $f(T, t_2)$

Se poate observa că s-a atins un moment important al procesului de optimizare, în sensul că zonele albe din aceste figuri reprezintă domenii cu indicii preliminară pentru valorile optime ale factorilor controlabili analizați.

În vederea optimizării răspunsurilor, s-au avut în vedere următoarele cerințe [142]:

- rezistența la tracțiune (maximizare) - valoare minimă de 20,03 N/mm² (reprezentând 0,90 R_{MB}) și o valoare țintă de 22,48 N/mm²;
- lățimea medie a bavurii (valoare țintă) - valoare minimă de 8 mm, respectiv valoarea maximă de 12 mm și o țintă de 10 mm;
- înălțimea medie a vârfului bavurii (minimizare) - valoarea maximă admisă a înălțimii vârfului bavurii față de nivelul suprafeței materialului de bază a fost considerată de 1 mm.

Pentru cazul experimentului central-compus analizat, valoarea obținută pentru nivelul de optimizare al procesului de sudare este D=0,99, față de D=1 care reprezintă optimul complet.

Tabelul 6.3 prezintă valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv.


Tabelul 6.3 Parametrii de sudare optimi pentru țevile PE 80

Variantă tehnologică	Nivel optimizare D	Presiunea P1(bar)	Timp t1(s)	Timp t2(s)	Timp t5(s)	Temperatura T (°C)
Optim PE 80	0,99	20	19	80	900	208

Rezultatele evidențiază că procesul de sudare este robust, ceea ce înseamnă că modificările relativ mici ale parametrilor de sudare în jurul optimului nu influențează semnificativ calitatea îmbinării sudate.

Încercările și măsurătorile efectuate pe epruvetele prelevate din proba sudată la care s-au folosit parametrii de sudare optimi, au condus la rezultate corespunzătoare (Tabelul 6.4).

Tabelul 6.4 Rezultate experimentale la varianta tehnologică optimă PE 80

Epruvetă analiză macroscopică Optim PE 80	bmed (mm)	hmed (mm)	Imperfecțiuni, conform SR EN 14728	R (N/mm²)	U (°)
	9,75	0,24	Nu se observă	22,53	160

unde notațiile reprezintă:

bmed, hmed - lățimea medie, respectiv înălțimea medie a vârfului celor două bavuri ale sudurii, dispuse la exterior și interior;

R- rezistența la rupere prin tracțiune; U - unghiul de încovoiere pe dorn.

În concluzie, utilizând parametrii de sudare ai variantei optime, au fost obținute atât o rezistență la nivelul celei a materialului de bază, dar și dimensiuni și forme corespunzătoare ale bavurilor interioare și exterioare.

6.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevi PE100

Cercetările experimentale realizate și prezentate în cadrul acestui subcapitol au urmărit modelarea și optimizarea procesului de sudare a țevelor din polietilenă tip PE100, destinate distribuției gazelor naturale.

Îmbinarea componentelor s-a realizat prin sudare cap la cap cu element încălzitor, utilizându-se țevi cu diametru 110 mm și grosime de perete 10 mm, raport dimensional standard SRD 11.

Analiza influenței celor cinci factori controlabili de tip presiune, temperatură și timp asupra funcțiilor obiectiv s-a realizat prin planificarea experimentelor cu ajutorul programului de planificare și calcul statistic MINITAB 15. În acest sens s-a considerat un experiment RSD de tip central-compus fracționar (pe jumătate), care poate modela cu suficientă precizie procesul de sudare (Figura 6.18).

Factorii controlabili și funcțiile obiectiv avute în vedere sunt:

- factorii controlabili FC1, FC2, FC3, FC4 și FC5, reprezintă
 - FC1 - temperatura elementului încălzitor (T)
 - FC2 - timpul de încălzire (t1)
 - FC3 - timpul de menținere (t2)
 - FC4 - timpul de sudare (t5)
 - FC5 - presiunea de încălzire (P1).
- funcțiile obiectiv FO1, FO2, FO3 și FO4, reprezintă
 - FO1 - rezistența la rupere prin tracțiune a îmbinării sudate (R)
 - FO2 - unghiul de încovoiere pe dorn (U)
 - FO3 - lățimea medie a bavurii (bmed)
 - FO4 - înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed).

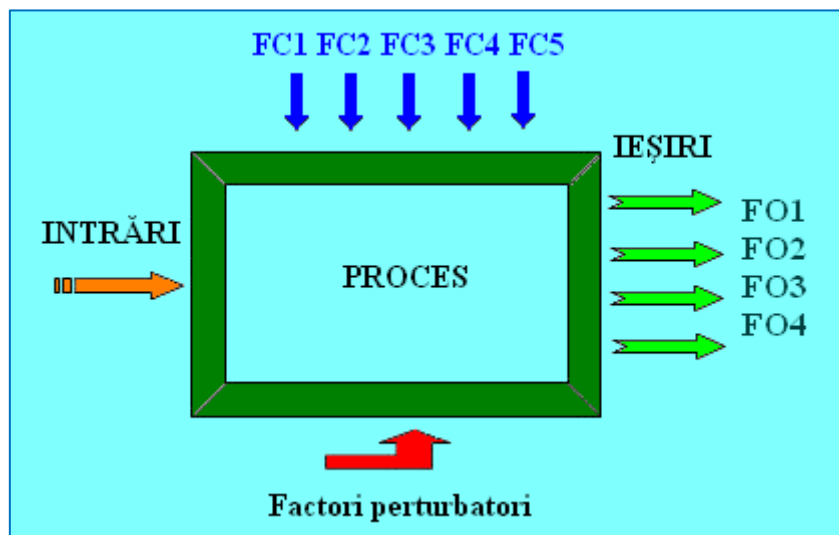


Figura 6.18 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru țevi PE100

În vederea evaluării calității îmbinărilor sudate cap la cap cu element încălzitor realizate din materiale termoplastice, standardul SR EN 12814-1 recomandă utilizarea unor metode de încercare complementare: tracțiune, încovoiere, examinare macroscopică, etc. În cazul în care se urmărește optimizarea procesului de sudare, se indică a se utiliza condiții de încercare nestructurizate, cum ar fi de exemplu scăderea temperaturii de încercare [138].

Astfel pentru un anumit tip de material PE100, având o valoare a indicelui de fluiditate la cald dată, utilizarea unor parametri de sudare recomandați de către producătorii echipamentelor de sudare, poate conduce la modificări în limite relativ largi ale caracteristicilor geometrice și de rezistență mecanică a sudurii, astfel încât în anumite situații de solicitare să fie posibilă chiar apariția unor fenomene de rupere în zona îmbinării sudate. Din acest motiv este necesară stabilirea unor valori corespunzătoare ale parametrilor utilizați și optimizarea procesului de sudare.

6.3.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru țevi PE100

Standardul SR EN 1555-1 [137] indică modul simbolizare și valoarea rezistenței minim necesare (MRS) pentru materialul de tip PE 100 care a fost utilizat în cadrul prezentelor cercetări experimentale (Tabelul 6.5).

Tabelul 6.5 MRS pentru țevile din polietilenă tip PE100

Denumire	MRS (MPa)
PE 100	10,0

Sudarea cap la cap cu element încălzitor s-a realizat cu un echipament de sudare semimecanizat cu acționare hidraulică de tip RITMO DELTA 250, conform unei diagrame de sudare specifice presiune - timp (Figura 6.19).

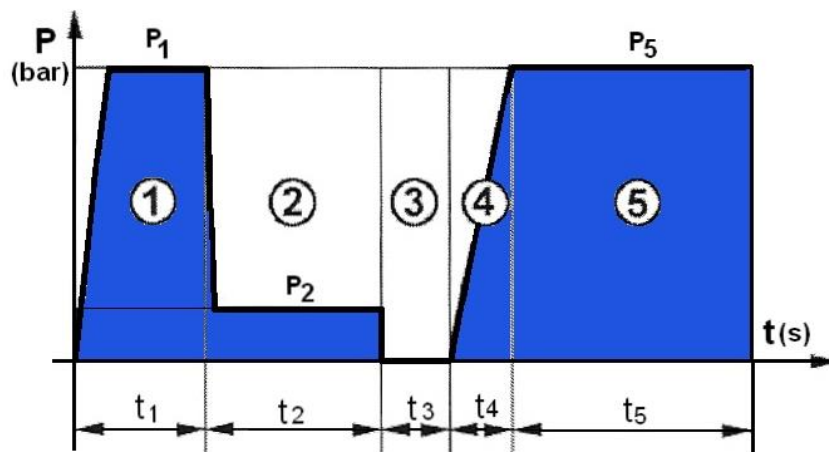


Figura 6.19 Diagrama de sudare pentru țevi PE100

Intervalele de variație ale parametrilor de sudare s-au stabilit pe baza experienței dobândite în cadrul cercetărilor experimentale anterioare și în concordanță cu îndeplinirea obiectivelor impuse funcțiilor obiectiv.

În aceste condiții prestabilite, s-a procedat la determinarea matricii program a experimentului utilizându-se programul de planificare MINITAB 15 (Tabelul 6.6).

Tabelul 6.6 Programul experimental pentru sudarea țevilor PE 100

Nr. crt.	Presiunea de încălzire P1 (bar)	Timp de încălzire t1 (s)	Timp de menținere t2 (s)	Timp de sudare t5 (s)	Temperatură element încălzitor T (°C)
1	5	30	110	455	210
2	17,5	30	110	455	230
3	30	50	140	900	230
4	5	50	140	10	230
5	17,5	30	110	10	210
6	30	30	110	455	210
7	17,5	30	110	455	190
8	5	50	140	900	190
9	17,5	10	110	455	210
10	5	10	80	10	230
11	17,5	30	110	455	210
12	17,5	30	110	455	210
13	30	50	80	10	230
14	17,5	30	110	455	210
15	5	10	80	900	190
16	5	10	140	10	190
17	17,5	30	110	455	210
18	5	10	140	900	230
19	30	50	80	900	190
20	17,5	30	140	455	210
21	17,5	30	80	455	210
22	17,5	30	110	900	210
23	30	10	80	10	190
24	5	50	80	900	230
25	30	10	140	10	230
26	30	10	80	900	230
27	17,5	30	110	455	210
28	30	50	140	10	190
29	30	10	140	900	190
30	5	50	80	10	190
31	17,5	50	110	455	210
32	17,5	30	110	455	210

În continuare, utilizând variantele tehnologice stabilite în cadrul programului experimental s-au realizate îmbinările sudate aferente acestora, pe țevi din polietilenă de tip PE 100, Ø 110 x 10 mm, SDR 11. În toate aceste cazuri, mai înaintea sudării s-a realizat o pregătire și poziționare corespunzătoare a componentelor în vederea sudării cap la cap cu element încălzitor.

6.3.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale

Verificarea îmbinărilor sudate s-a realizat conform cerințelor standardelor europene destinate încercărilor specifice produselor din materiale termoplastice, epruvetele prelevate din îmbinările sudate fiind supuse încercărilor mecanice și analizei macroscopice, marcajul acestora corespunzând probelor de la 1-32.

Din fiecare probă sudată au fost prelevate câte șase epruvete care au fost supuse încercării la tracțiune conform SR EN 12814-2 (marcaj T), câte cinci epruvete care au fost supuse încercării la încovoiere conform SR EN 12814-1 (marcaj I) și respectiv câte o epruvetă a fost utilizată pentru examinare macroscopică (marcaj M) conform cerințelor SR EN 12814-5.

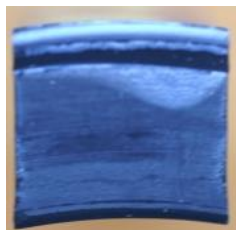
În scopul efectuării încercărilor la tracțiune s-a utilizat o mașină de tip Zwick/Roell Z005 din cadrul Laboratorului LIEA - ISIM Timișoara (Figura 6.20).



Figura 6.20 Mașină de încercare la tracțiune Zwick/Roell Z005

În prima etapă, încercările la tracțiune s-au realizat la o temperatură de referință de 23 ° C.

În acest caz, la încercările la tracțiune efectuate pe epruvete prelevate din îmbinările sudate s-au obținut în cele mai multe cazuri rezultate corespunzătoare la variantele tehnologice analizate (ruperea realizându-se în general în materialul de bază). Doar la epruvetele nr.T15.1 și nr.T15.3, din proba nr.15, ruperea s-a produs în sudură, în timpul încălzirii epruvetei și respectiv în cazul al doilea după atingerea valorii maxime a forței (Figura 6.21).



Epruveta T15.1 a



Epruveta T15.3 a

Figura 6.21 Suprafețe de rupere, rezultate prin încercarea la tracțiune

În scopul efectuării încercărilor la încovoiere s-a utilizat o mașină universală de tip EDZ 40. La acest prim set de încercări, efectuate la o temperatură de referință de 23 ° C, s-au înregistrat rezultate necorespunzătoare, cu rupere în ZIT sau în sudură, la un număr de 6 variante tehnologice - 10, 15, 16, 18, 24 și 30, în cazul epruvetelor: 10I2, 10I3, 15I2, 15I3, 16I2, 18I1-3, 24I1-3 și 30I1-3.

Examinarea macroscopică s-a realizat conform standardului SR EN 12814-5, urmărindu-se să se evidențieze aspectele specifice care apar în secțiunea transversală a îmbinării sudate.

Figura 6.22 prezintă principalele patru forme ale bavurii, considerate a fi reprezentative pentru probele sudate realizate în cadrul programului experimental.

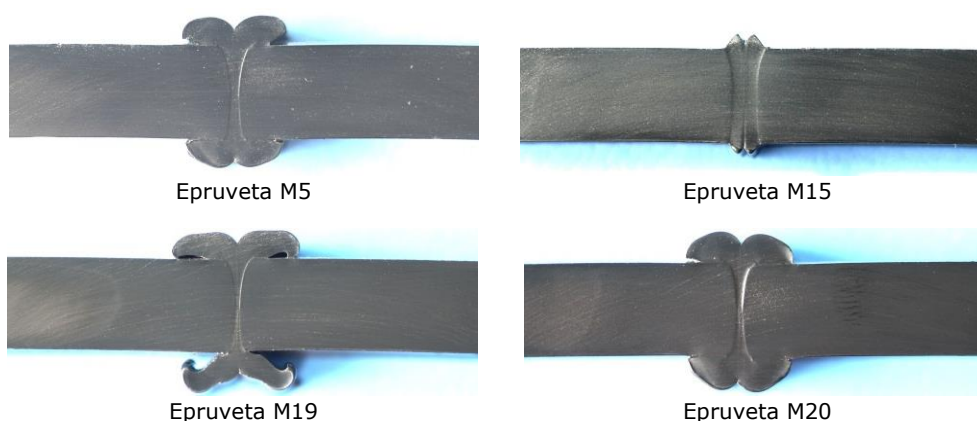


Figura 6.22 Aspectul macroscopic al unor epruvete din cadrul programului experimental PE100

Analiza macroscopică a evidențiat faptul că la unele îmbinări sudate (probele 1, 4, 8, 10, 15, 16, 18, 24 și 30) forma bavurii atât la interior cât și la exterior prezintă un aspect ascuțit cu dimensiuni relativ mici, fiind insuficient formată.

Acesta subliniază faptul că la aceste variante tehnologice valorile presiunii de încălzire și/sau timpul de încălzire au fost necorespunzătoare, având valori mici, ceea ce a condus la îmbinări sudate cu o ductilitate relativ scăzută.

6.3.2.1. Încercări mecanice efectuate la temperaturi negative

Având în vedere rezultatele încercărilor efectuate anterior, s-a considerat necesar a se efectua complementar încercări mecanice la tracțiune și încovoiere la temperaturi negative.

Echipamentul experimental a constat din mașina Zwick/Roell Z005 pentru încercare la tracțiune, o cameră climatică Discovery DY 110 și o cameră termografică cu infraroșu (IR) tip FLIR System A40, aflate într-o incintă climatizată (Figura 6.23).

Asociat încercării la tracțiune statică a epruvetelor din PE100, în vederea urmării evoluției degradării materialului și a evidențierii modificării temperaturii epruvetei în timpul încercării, s-a utilizat metoda termografiei.

Această metodă de examinare nedistructivă (NDT) se bazează pe analiza repartizării temperaturii pe suprafața unui corp, permițând vizualizarea și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes ([143], [144]).

Prin această metodă s-a analizat imaginea termică a epruvetelor testate, urmărindu-se astfel modificarea temperaturii în zona de cedare a epruvetei, ca urmare a căldurii degajate în timpul solicitării axiale de tracțiune statică.



Figura 6.23 Laborator cu echipamentul experimental: LIEA – ISIM Timișoara

Încercările la tracțiune efectuate și la temperaturi negative (-10°C) au urmărit să determine pe de-o parte valorile rezistenței la tracțiune a epruvetelor prelevate din îmbinările sudate, respectiv să evidențieze caracterul și poziția ruperii, în condiții de încercare controlate de temperatură și viteză de solicitare.

Figura 6.24 prezintă imaginea termică a epruvetei TS9 încercată la tracțiune, la o temperatură de referință de -10°C .

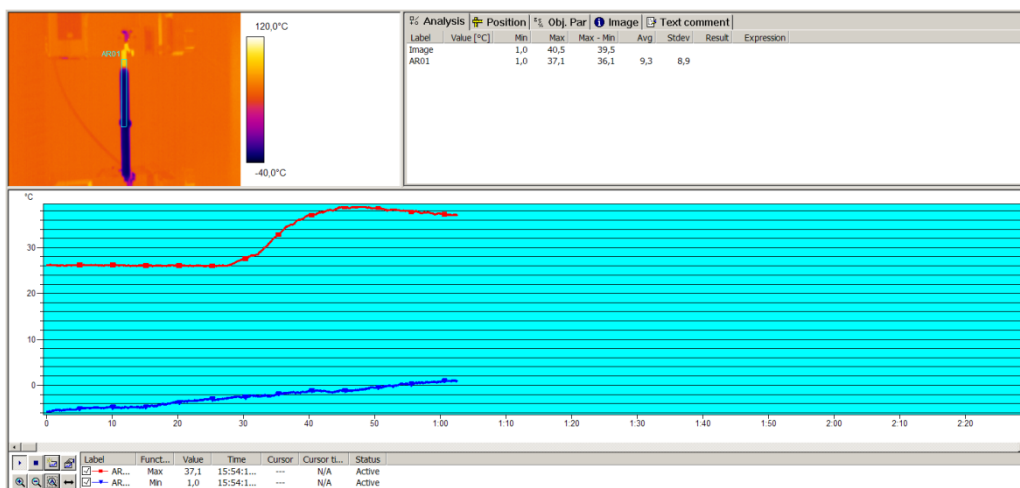


Figura 6.24 Variația temperaturii epruvetei TS9 – PE100 pe parcursul încercării la tracțiune, la o temperatură de referință de -10°C

Se constatat că, în general, la aceste epruvete care au fost supuse încercărilor la tracțiune efectuate la -10°C , datorită efectului de concentrare a tensiunii, cedarea a avut loc în zona de prindere a epruvetei în bacurile mașinii, unde s-a înregistrat și valoarea maximă a temperaturii din timpul încercării.

De asemenea au fost efectuate și încercări la încovoiere la temperaturi de referință de -10°C și respectiv -20°C . S-a constatat că la un număr însemnat dintre acestea ruperea s-a produs în sudură sau în zona influențată termic, la unghiuri de îndoire inferioare valorii impuse de 160° (Figura 6.25).



Figura 6.25 Epruvetă fisurată în zona ZIT – încercare la încovoiere la o temperatură de referință de -20°C

6.3.3. Optimizarea procesului de sudare pentru țevile PE100

Pe baza rezultatelor obținute, prin experimentele și verificările efectuate, a fost posibilă modelarea matematică a procesului de sudare.

Prin prelucrarea pe calculator a acestor date, programul MINITAB 15 realizează astfel un model matematic neliniar, prin intermediul căruia se stabilesc ponderile factorilor controlabili și interacțiunile acestora.

Spre exemplu, analiza efectuată pentru funcțiile obiectiv - lățimea medie a bavurii și înălțimea medie a vârfului bavurii a evidențiat o aproximare foarte bună a procesului de sudare, valoarea indicelui R^2 fiind de 99,7 % și respectiv de 97,3 %.

Influența semnificativă a factorilor controlabili și/sau a interacțiunilor dintre aceștia este evidențiată prin probabilitatea p la valori $p < 0,05$.

Prelucrarea statistică a datelor experimentale a condus la obținerea unor valori ale probabilității $p < 0,05$, în cazul următorilor factori controlabili și interacțiuni:

- presiunea $P1$ și interacțiunile $P1*t1$, $t1*T$, pentru funcția obiectiv rezistența la tracțiune;
- interacțiunile $P1*P1$, $P1*t1$, $P1*T$, în cazul funcției obiectiv lățimea medie a bavurii;
- interacțiunile $P1*P1$, $P1*t2$, pentru funcția obiectiv înălțimea medie a vârfului bavurii.

Influențele a câte doi dintre factorii controlabili asupra unei funcții obiectiv se pot prezenta sub forma unor grafice tridimensionale pe suprafețe.

Astfel, în cazul funcției obiectiv rezistența la rupere (R) aceste influențe au fost analizate pentru cazurile în care valorile celorlalți trei factorii controlabili au fost

păstrate constante, la mediile intervalelor de variație considerate (Figura 6.26, Figura 6.27, Figura 6.28).

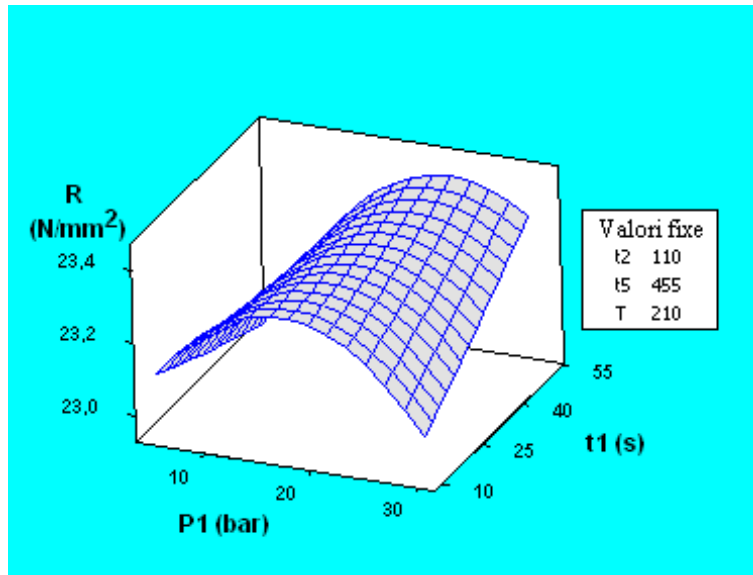


Figura 6.26 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t1

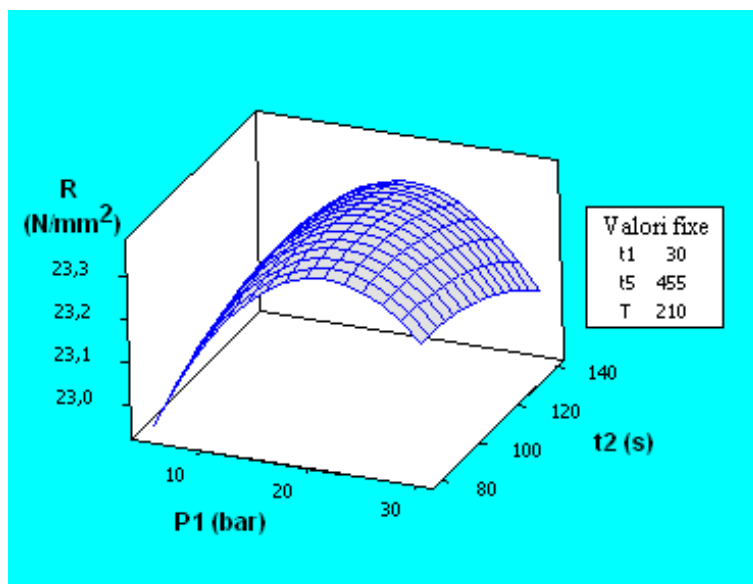


Figura 6.27 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea P1 și timpul t2

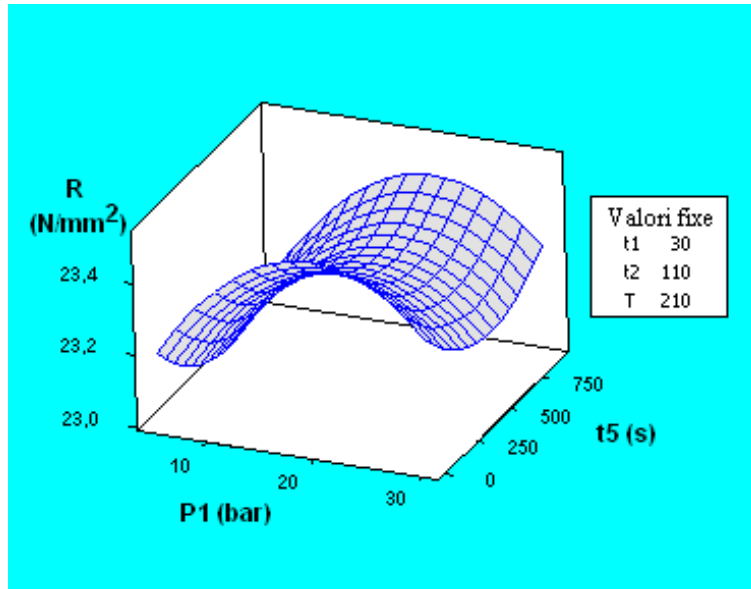


Figura 6.28 Dependența: Rezistența la rupere (R) funcție de presiunea $P1$ și timpul $t5$

Următoarele trei grafice prezintă influențele a câte doi din factorii controlabili: $t1$ - $t5$, $P1$ - T și $t5$ - T , asupra funcției obiectiv unghiul de încovoiere (U), cu păstrarea constantă a valorilor celorlalți trei factorii controlabili (Figura 6.29, Figura 6.30, Figura 6.31).

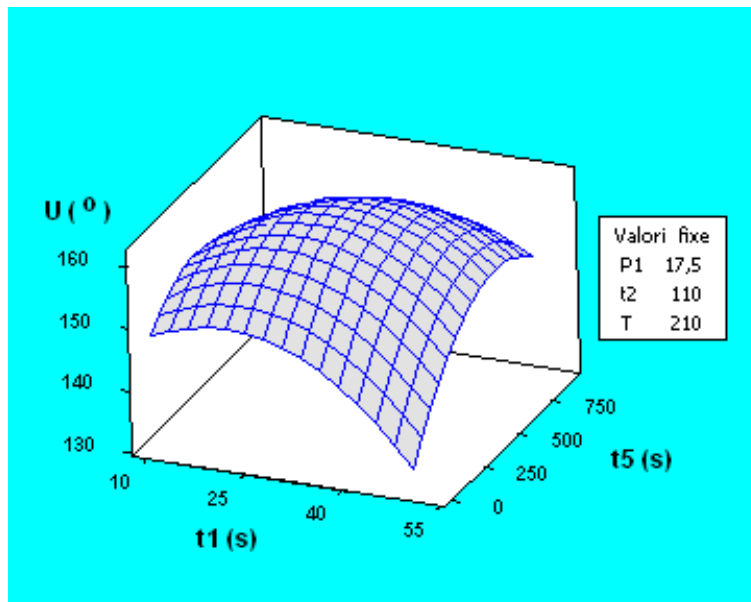


Figura 6.29 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul $t1$ și timpul $t5$

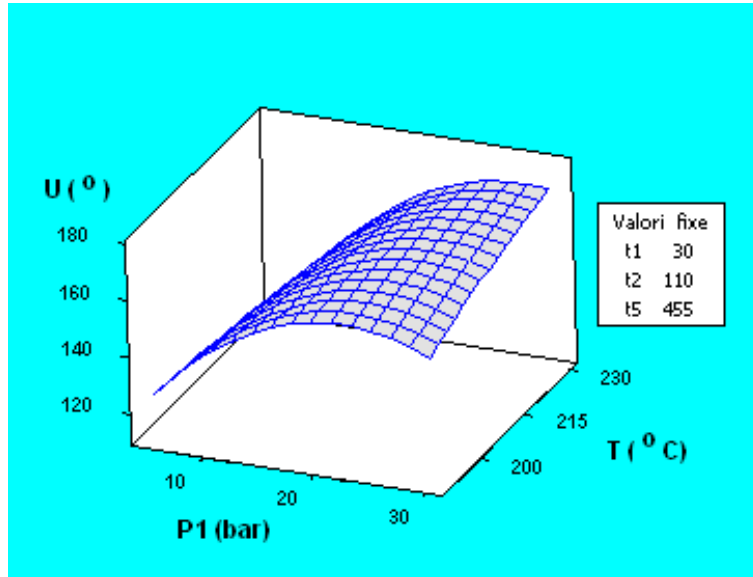


Figura 6.30 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de presiunea $P1$ și temperatura T

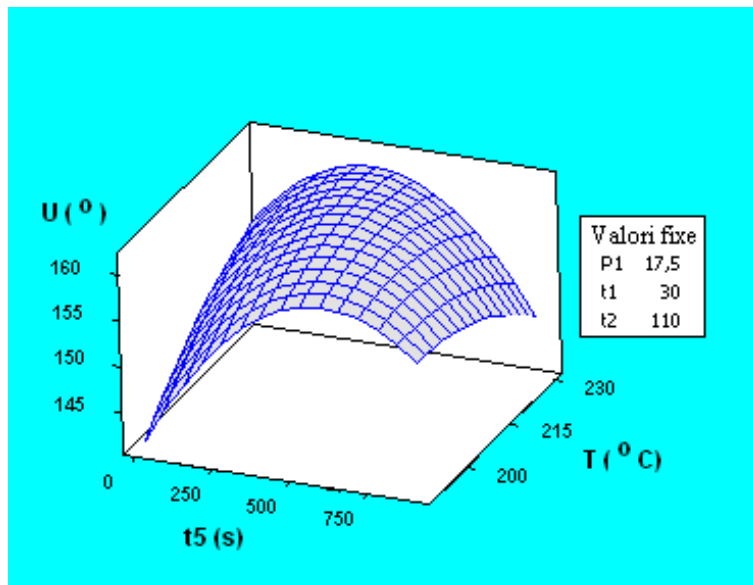


Figura 6.31 Dependența: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul $t5$ și temperatura T

În continuare se prezintă modul în care factorii controlabili își exercită influența asupra funcțiilor obiectiv lățimea medie a bavurii (Figura 6.32, Figura 6.33, Figura 6.34) și respectiv înălțimea medie a vârfului bavurii (Figura 6.35, Figura 6.36, Figura 6.37).

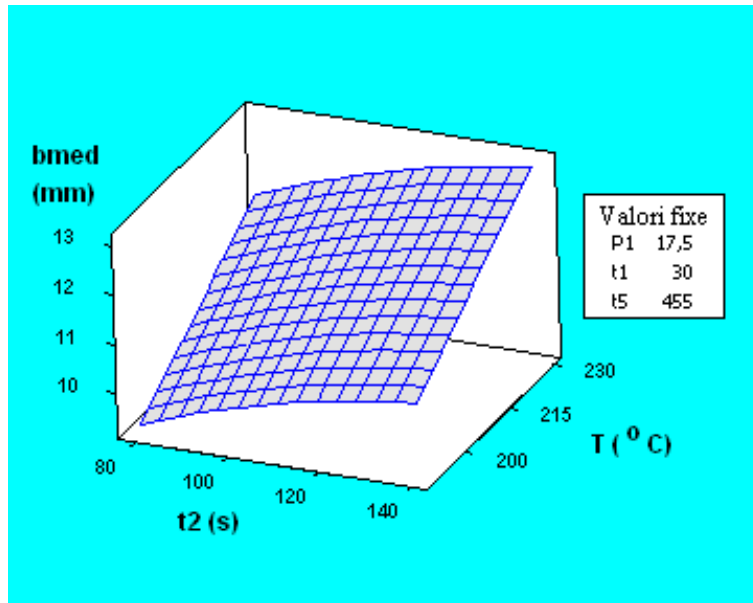


Figura 6.32 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_2 și temperatura T

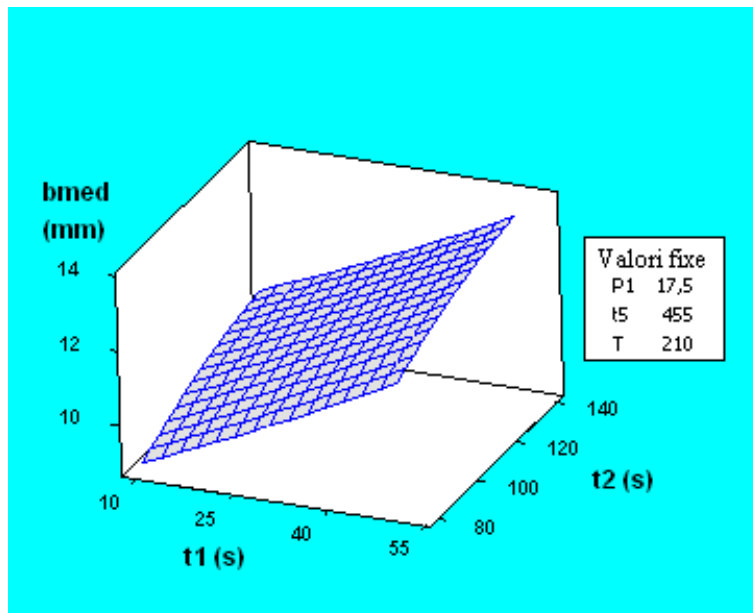


Figura 6.33 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de timpul t_1 și timpul t_2

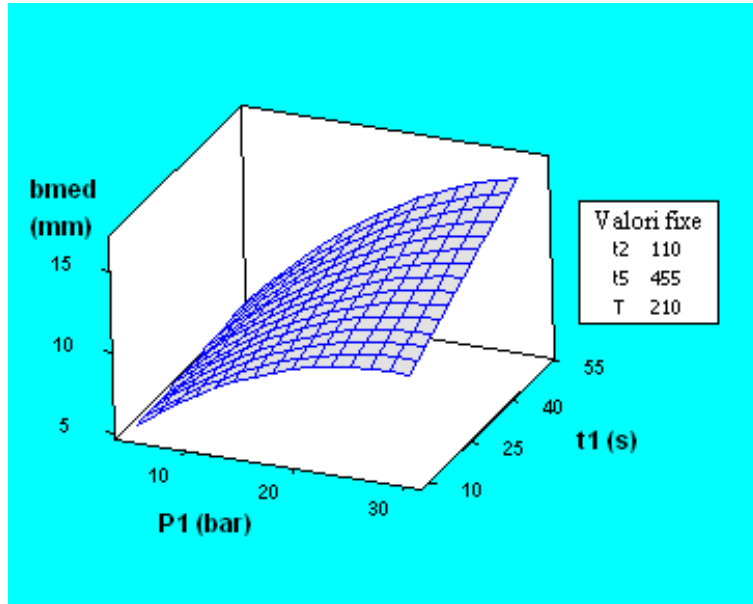


Figura 6.34 Dependența: Lățimea medie a bavurii (b_{med}) funcție de presiunea $P1$ și timpul $t1$

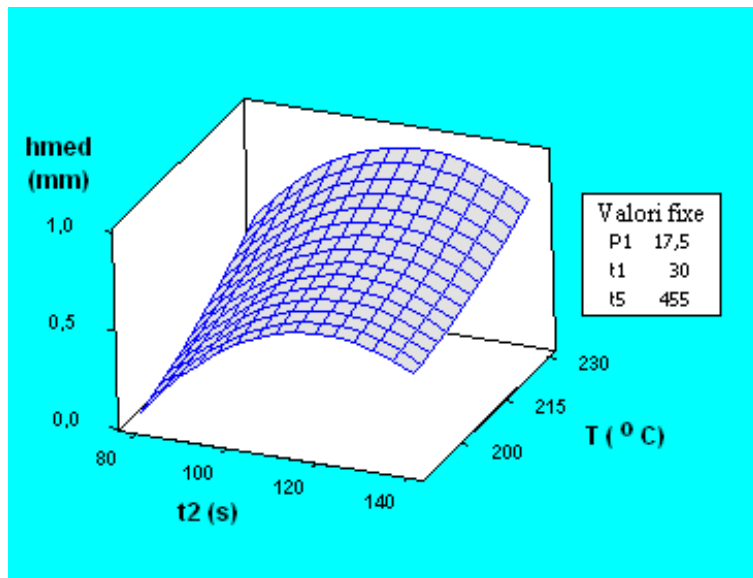


Figura 6.35 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul $t2$ și temperatura T

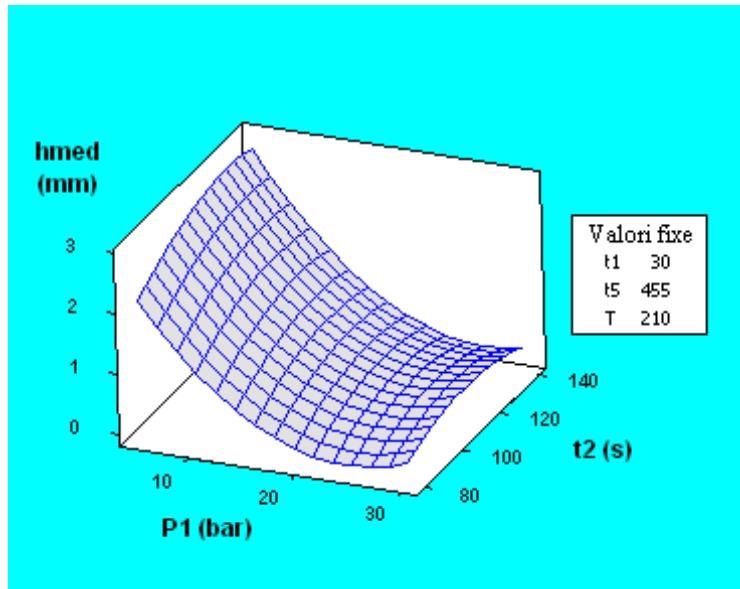


Figura 6.36 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de presiunea $P1$ și timpul $t2$

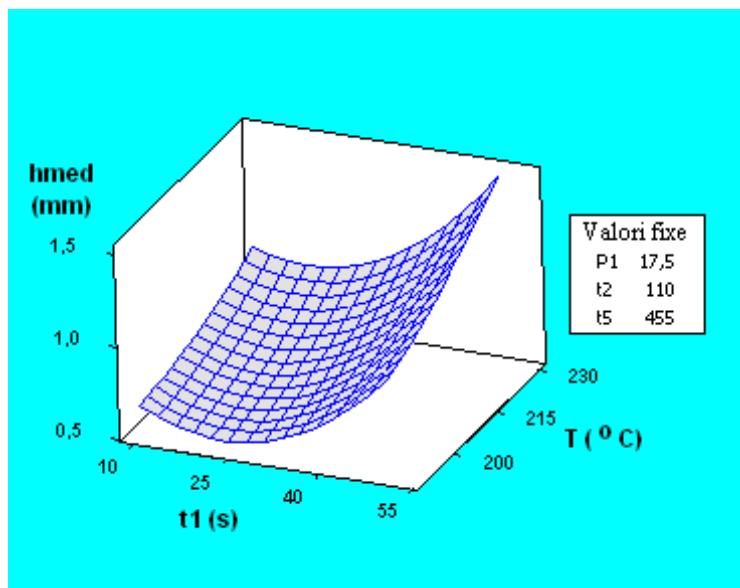


Figura 6.37 Dependența: Înălțimea medie a vârfului bavurii (h_{med}) funcție de timpul $t1$ și temperatura T

De asemenea, se pot reprezenta grafic și dependențele reciproce sub forma curbelor de nivel. Spre exemplificare, se prezintă în continuare câte un astfel de grafic pentru fiecare dintre funcțiile obiectiv.

Aceste curbe au fost trasate prin menținerea constantă a valorilor următorilor parametri de sudare: $t2 = 110$ sec, $t5 = 455$ sec și $T = 210$ °C (Figura 6.38, Figura 6.39, Figura 6.40, Figura 6.41).

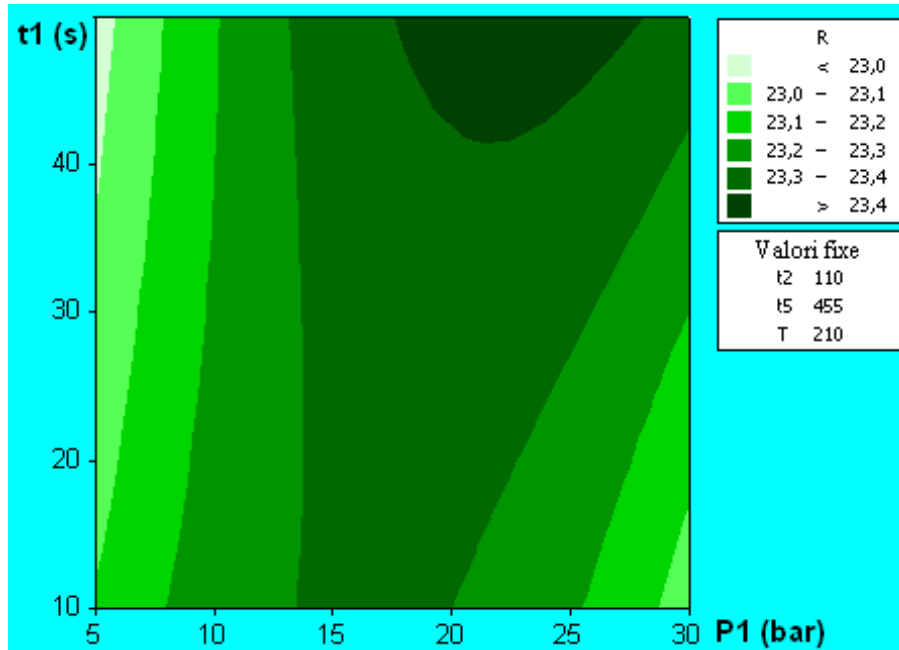


Figura 6.38 Curbe de nivel: Rezistența la rupere (R) funcție de timpul t1 și presiunea P1

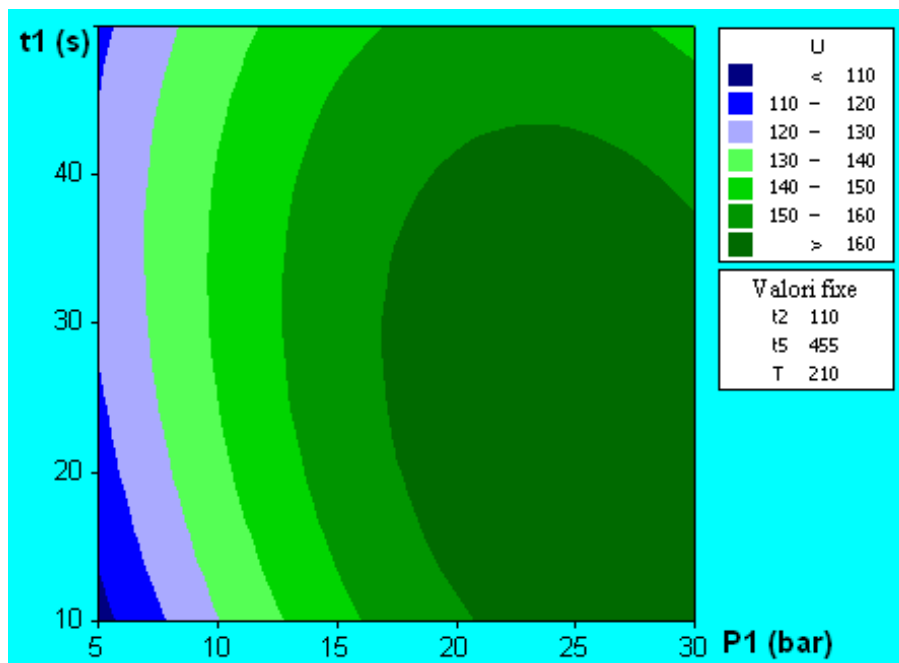


Figura 6.39 Curbe de nivel: Unghiul de încovoiere (U) funcție de timpul t1 și presiunea P1

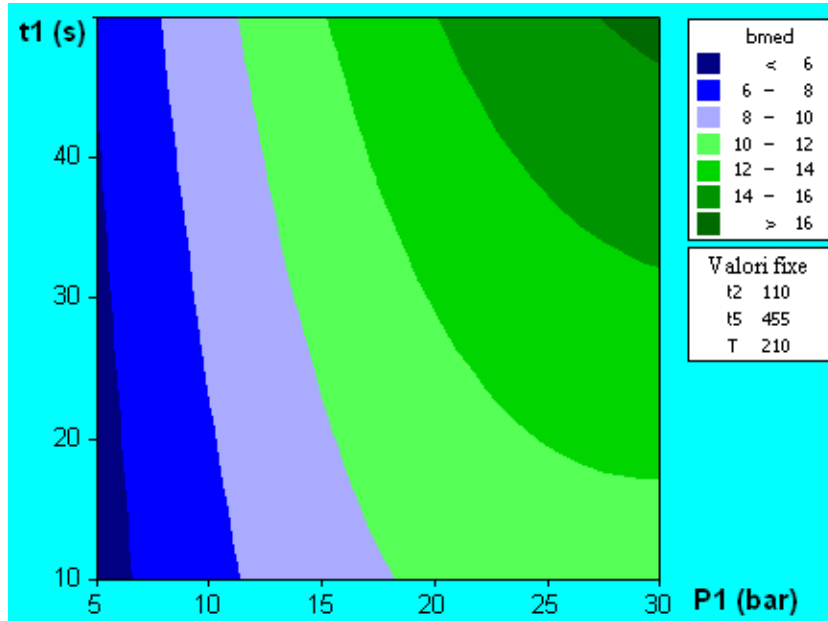


Figura 6.40 Curbe de nivel: Lățimea medie a bavurii (bmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1

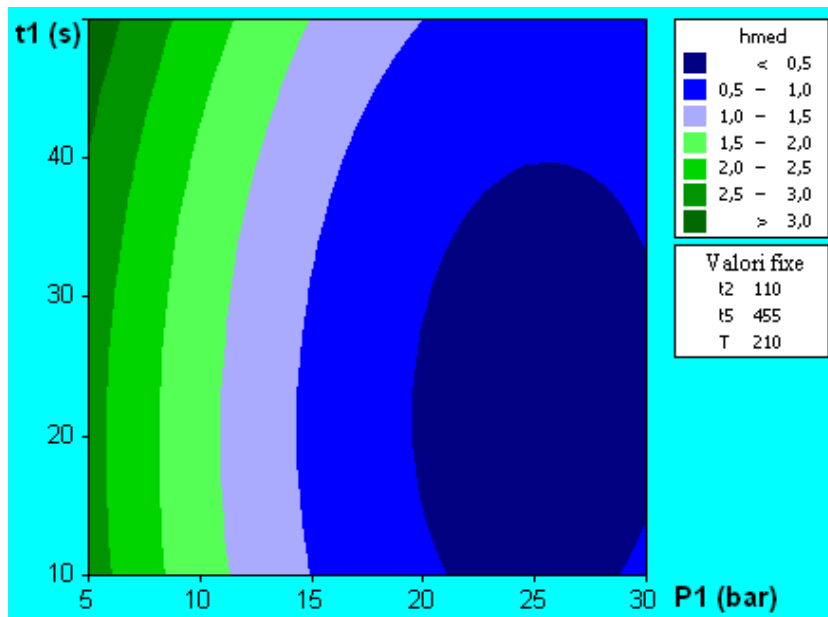


Figura 6.41 Curbe de nivel: Înălțimea medie a vârfului bavurii (hmed) funcție de timpul t1 și presiunea P1

Din analiza curbelor de nivel se poate face o primă apreciere a valorilor favorabile pentru perechile de factori considerați, care să conducă la îndeplinirea cerințelor impuse funcțiilor obiectiv.

Prin suprapunerea graficelor curbelor de nivel pentru toate funcțiile obiectiv, spre exemplu, în cazul parametrilor t_1 - P_1 și respectiv T - P_1 , pe baza rezultatelor experimentale se pot obține indicii referitoare la valorile optime ale factorilor controlabili analizați - zonele albe din cele două figuri (Figura 6.42 și Figura 6.43).

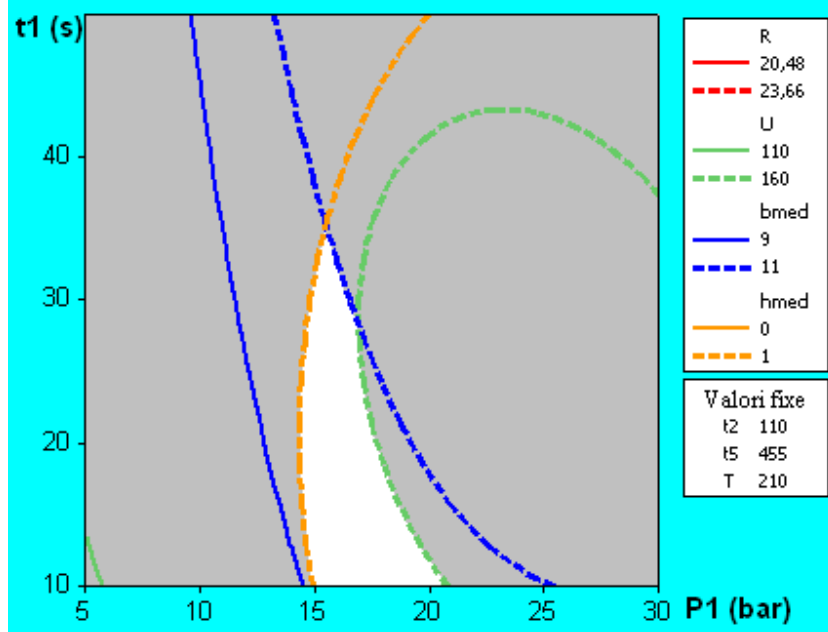


Figura 6.42 Dependenta: Funcții obiectiv = $f(t_1, P_1)$

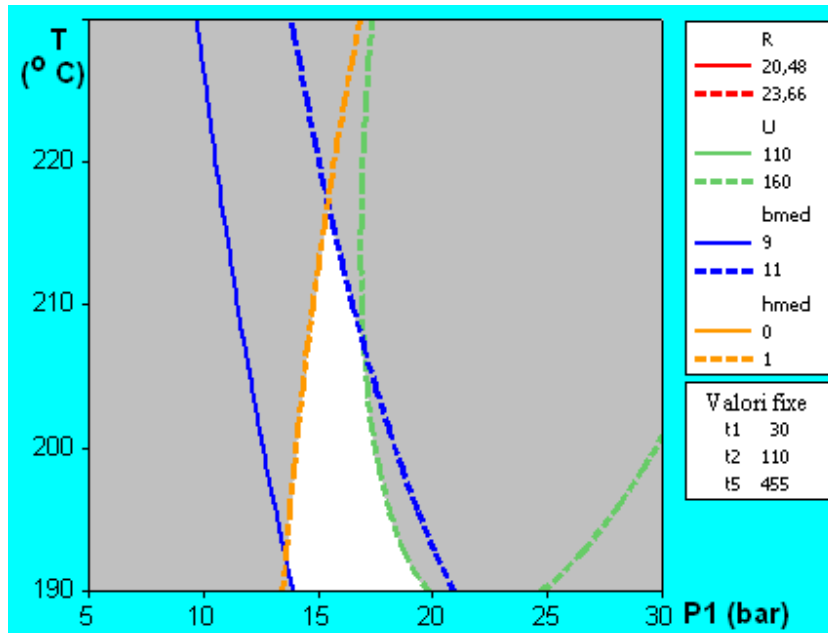


Figura 6.43 Dependenta: Funcții obiectiv = $f(T, P_1)$

Cu ajutorul programului MINITAB 15, printr-un efect de sinergie, analizându-se influența tuturor factorilor asupra răspunsurilor sistemului, a fost posibilă optimizarea finală, care s-a realizat pe baza modelelor matematice obținute pentru fiecare funcție obiectiv.

În vederea optimizării răspunsurilor, pentru funcțiile obiectiv considerate au fost impuse următoarele cerințe [142]:

- rezistența la tracțiune (maximizare) - valoare minimă de 20,48 N/mm² (reprezentând 0,90 R_{MB}) și o valoare țintă de 23,66 N/mm²;
- unghiul de încovoiere (maximizare) - valoare minimă admisă fiind de 110 °
- lățimea medie a bavurii (valoare țintă) - valoare minimă de 9 mm, respectiv valoarea maximă de 11 mm și o țintă de 10 mm;
- înălțimea medie a vârfului bavurii (minimizare) – valoarea maximă admisă a înălțimii vârfului bavurii, față de nivelul suprafeței materialului de bază, a fost considerată de 1 mm.

Pentru cazul experimentului central-compus analizat, valoarea obținută pentru nivelul de optimizare al procesului de sudare este D=0,97, față de D=1 care reprezintă optimul complet.


Tabelul 6.7 prezintă valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv.

Tabelul 6.7 Parametrii de sudare optimi pentru țevile PE 100

Variantă tehnologică	Nivel optimizare D	Presiunea P1(bar)	Timp t1(s)	Timp t2(s)	Timp t5(s)	Temperatura T (°C)
Optim PE 100	0,97	28	18	82	630	195

Tabelul 6.8 prezintă rezultatele obținute la încercările și măsurările efectuate pe o îmbinare sudată la care s-a utilizat varianta tehnologică optimă. Astfel, pentru o evaluare cât mai severă a calității îmbinării sudate, încercările la tracțiune și încovoiere s-au realizat la temperaturi de -10 °C și respectiv -20 °C.

Tabelul 6.8 Rezultate experimentale la varianta tehnologică optimă PE 100

Epruvetă analiză macroscopică Optim PE 100	bmed (mm)	hmed (mm)	Imperfecțiuni conform SR EN 14728	R (N/mm ²)	U (°)
	10,06	0,1	Nu se observă	31,5	160

unde notațiile reprezintă:

bmed, hmed - lățimea medie, respectiv înălțimea medie a celor două bavuri ale sudurii, dispuse la exterior și interior;

R- rezistența la rupere prin tracțiune; U - unghiul de încovoiere pe dorn.

Prin verificările astfel efectuate, pe proba sudată cu parametrii optimi, s-a demonstrat practic validarea rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor de optimizare a procesului de sudare a țevelor PE100.

6.4. Optimizarea procesului de sudare pentru geomembrane

Materialele geosintetice, numite și „engineering materials”, reprezintă materiale care înglobează cercetări avansate, de top, care de multe ori sunt însoțite de tehnologii special dezvoltate - „integrated solutions”.

Utilizarea materialelor geosintetice pentru lucrările de construcții este recunoscută ca o soluție performantă și mai ieftină față de tehnicile de construcție clasice.

Existența și utilizarea materialelor geosintetice nu numai că lărgeste gama materialelor tradiționale folosite în domeniul construcțiilor și pentru protecția mediului, dar conduce și la modificarea modului de concepție a unor astfel de lucrări [145].

Utilizarea materialelor geosintetice este foarte largă, fiind astfel utilizate în diverse aplicații: geotextilele pentru filtrare și drenare, geomembranele pentru impermeabilizare, geogriile pentru armare, georețelele pentru drenaj și protecție contra eroziunii, respectiv materialele cele mai noi de tip geocompozite sunt folosite cu diverse funcții.

Geomembranele sunt folii sintetice subțiri, cu permeabilitate extrem de scăzută, care se utilizează pentru lucrări de etanșare. Sunt realizate în general ca materiale polimerice continue, dar pot fi obținute și prin impregnarea geotextilelor cu elastomeri sau bitum. Principalii polimeri termoplastici utilizați pentru fabricarea geomembranelor sunt policlorura de vinil (PVC) și diferitele tipuri de polietilene, dintre care cea mai utilizată este polietilena de înaltă densitate (PE-HD) [146].

Geomembranele sunt utilizate cu succes la:

- impermeabilizarea bazinelor de stocare, tratare și epurare a apelor reziduale;
- impermeabilizarea acumulărilor de apă, lacuri artificiale;
- protecția elementelor de construcții din beton subterane sau supraterane;
- impermeabilizarea depozitelor de deșeuri industriale, agricole și menajere;
- impermeabilizarea canalelor, tunelurilor, barajelor de pământ;
- protecția construcțiilor metalice din industria petrochimică;
- construcții hidrotehnice și de gospodărire a apelor.

Materiile prime de calitate superioară din categoria polietilenei sunt fabricate pentru a răspunde exigențelor severe impuse geomembranelor. Astfel, geomembranele din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) au o rezistență mecanică și chimică foarte bună, rezistență la factorii de mediu și durată de viață ridicată. Producerea lor se face într-o gamă de grosimi cuprinsă între 1 ÷ 5 mm.

Necesitatea îmbinării unor componente din materiale termoplastice de tipul geomembranelor, în cadrul diferitelor aplicații industriale, favorizează promovarea dezvoltării procedeelelor de sudare în vederea creșterii fiabilității sistemelor tehnice care le includ.

Din aceste considerente, în cadrul cercetărilor experimentale avute în vedere au fost abordate și aceste aspecte de real interes, privind optimizarea procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor.

6.4.1. Stabilirea și realizarea programului experimental pentru geomembrane

În majoritatea cazurilor, urmare a necesității de a fi îmbinate diferite tipodimensiuni de materiale termoplastice, au fost create și dezvoltate modalități de îmbinare cu ajutorul unor procedee de sudare specifice.

Geomembranele fiind alcătuite în general din materiale termoplastice, prezintă bune aptitudini de a putea fi îmbinate prin sudare. Unul din procedeele cele mai utilizate pentru îmbinarea prin suprapunere a componentelor de tip membrană este sudarea cu pană încălzitoare.

Echipamente de sudare cu pană încălzitoare permit reglarea și menținerea constantă a vitezei de sudare a componentelor, prin intermediul roletelor presoare.

În cadrul cercetărilor experimentale s-a utilizat un echipament de sudare cu pană încălzită electric de tip HERZ - MION care oferă posibilitatea reglării între anumite limite a următorilor parametri de sudare: viteza de sudare, forța de presare și temperatura penei încălzitoare (Figura 6.44).



Figura 6.44 Echipament de sudare cu pană încălzită electric

Stabilirea unor parametri adecvați pentru sudarea unui anumit tip de componente, în condiții de mediu date, este un factor deosebit de important pentru obținerea unor caracteristici de rezistență mecanică corespunzătoare a îmbinărilor sudate.

Cercetările efectuate de Ehrenstein au arătat că și în cazul sudării cu pană încălzitoare morfologia și caracteristicile de rezistență mecanică a îmbinării sunt influențate semnificativ de alegerea parametrilor de sudare. Luând în considerare aspectele legate de creșterea duratei de viață a sistemelor realizate din geomembrane, este imperios a se determina parametrii de sudare optimi care să confere durabilitate ridicată sub acțiunea diferitelor solicitări mecanice, termice și a efectelor de mediu [147].

Procesul de sudare cu pană încălzitoare se înscrie în categoria proceselor tehnologice cu un număr relativ ridicat de variabile independente, având intrări, factori de influență (controlabili, perturbatori) și ieșiri (funcții de răspuns).

În vederea optimizării procesului de sudare s-a utilizat planificarea experimentelor asistată de calculator, astfel încât să se poată urmări influența variației factorilor controlabili asupra funcțiilor obiectiv.

Cercetările experimentale au vizat optimizarea sudării geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), având o grosime de 2 mm.

Datorită influenței anumitor factori care pot interveni în cadrul procesului de sudare, este posibil ca valorile caracteristicilor mecanice și geometrice ale îmbinării sudate să fie situate în afara limitelor admise [148]. Din acest motiv este necesară determinarea unor valori optime ale parametrilor de sudare cu pană încălzitoare, pentru geomembranele PE-HD.

Optimizarea procesului de sudare presupune practic setarea factorilor controlabili la acele valori care oferă cele mai bune răspunsuri ale sistemului, pentru anumite obiective prestabilite (Figura 6.45).

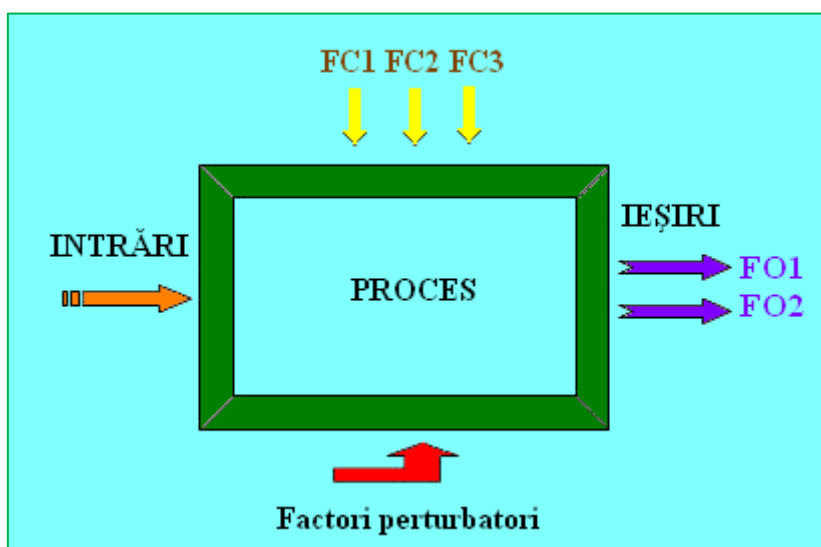


Figura 6.45 Schema cauză-efect a procesului de sudare pentru geomembrane din PE-HD

Programul de cercetare experimentală a fost realizat prin planificarea experimentelor neliniare de tip Response Surface Design (RSD) urmărindu-se modelarea matematică a procesului de sudare și determinarea valorilor optime ale parametrilor de sudare [149].

Planificarea experimentelor s-a realizat folosind programul de planificare și calcul statistic MINITAB 15, considerându-se un experiment RSD de tip central - compus întreg, cu trei factori de influență și două funcții obiectiv, care să poată caracteriza cât mai bine procesul de sudare.

În acest sens, pentru planificarea experimentelor au fost stabiliți următorii factori controlabili și funcții obiectiv:

- Factorii controlabili FC1, FC 2 și FC 3, reprezintă
 - FC1 - viteza de sudare (v)
 - FC2 - forța de presare (F)
 - FC3 - temperatura penei încălzitoare (T)

- Funcțiile obiectiv FO1 și FO2, reprezintă
 - FO1 - rezistența la desprindere a îmbinării sudate (P)
 - FO2 - reducerea grosimii (RG)

Limitele de variație ale parametrilor de sudare (factorii controlabili): viteză, forță și temperatură au fost stabilite pe baza experienței autorului în domeniul sudării cu pană încălzitoare a geomembranelor.

Astfel, cu ajutorul programului MINITAB 15 a fost stabilită matricea program a experimentului, caracterizată printr-o distribuție aleatoare a nivelelor factorilor controlabili și a ordinii de efectuare a probelor sudate (Tabelul 6.9).

Tabelul 6.9 Programul experimental pentru sudarea geomembranelor PE-HD

Nr. crt.	Viteza de sudare v (m/min)	Forța de presare F (N)	Temperatura penei încălzitoare T (°C)
1	1	300	380
2	1,6	900	320
3	1,3	600	350
4	1	900	380
5	1,6	300	320
6	1	900	320
7	1,3	600	350
8	1,6	300	380
9	1	300	320
10	1,6	900	380
11	1,3	600	350
12	1,3	600	350
13	1,3	600	320
14	1,3	600	350
15	1,3	900	350
16	1,3	600	380
17	1,6	600	350
18	1,3	600	350
19	1	600	350
20	1,3	300	350

Pe baza variantelor tehnologice astfel stabilite s-au realizat 20 de probe sudate, utilizându-se geomembrane din PE-HD, cu o grosime de 2 mm. De asemenea, în prealabil, s-a avut în vedere realizarea unei pregătiri atențe și respectiv a unei poziționări corespunzătoare a componentelor în vederea sudării cu pană încălzitoare.

6.4.2. Realizarea încercărilor și analiza rezultatelor experimentale

Probele sudate au fost marcate corespunzător regimurilor de sudare utilizate, cu numere de la 1 la 20. Încercările au fost efectuate în Laboratorul LIEA - ISIM Timișoara.

Din fiecare probă sudată au fost prelevate câte 5 epruvete care au fost supuse încercării la desprindere ("peel test" de tip T) conform cerințelor standardului SR EN 12814-4, la o temperatură de referință de 23 ° C [150].

De asemenea, au fost efectuate măsurători privind reducerea grosimii epruvetelor în porțiunea sudată, urmare a acțiunii de presare exercitată de rolele echipamentului de sudare din timpul sudării.

În urma încercărilor efectuate au fost înregistrate ruperi atât în materialul de bază la o parte din probe, cât și în sudură la probele nr. 3, 5, 16, respectiv ruperi mixte în sudură/material de bază la probele nr. 2, 7, 8, 9, 12, 13 și 15 (Figura 6.46 și Figura 6.47).



Figura 6.46 Suprafață de rupere epruveta 3.1 - rupere în sudură [149]

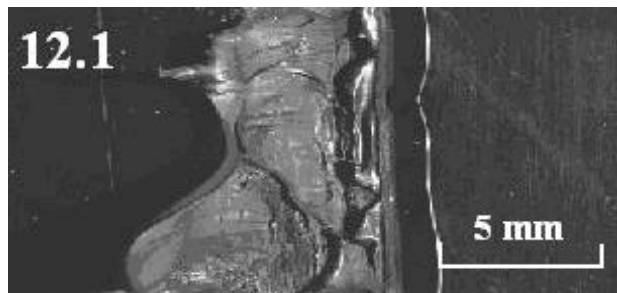


Figura 6.47 Suprafață de rupere epruveta 12.1 - rupere mixta sudură/material de bază [149]

În cazul epruvetelor la care ruperea s-a produs în sudură, analizându-se suprafețele de rupere, se pot observa aspecte specifice ruperii fragile, evidențiindu-se așa numitele "suduri reci", cu imperfecțiuni specifice de tip lipsă de topire. Acest fapt subliniază că regimurile de sudare la care valorile temperaturii și/sau forței de presare au avut valori prea mici, respectiv a existat o necorelare a acestora cu valorile vitezei de sudare, au determinat reducerea rezistenței la desprindere a îmbinărilor sudate.

Valorile rezistenței la desprindere au fost cuprinse între un minim de 10,16 N/mm² la epruveta 16.2 și un maxim de 26,63 N/mm² la epruveta 1.1.

În vederea analizării comportării la încercări mecanice a îmbinărilor sudate realizate, pe baza diferitelor regimuri de sudare, s-a utilizat tehnica analizei comparative a imaginilor termografice.

Încercările la desprindere au fost monitorizate folosind o cameră termografică cu infraroșu (IR) pentru urmărirea evoluției degradării epruvetei în timpul solicitării.

Camera IR, prin intermediul softului utilizat, a urmărit modificările de temperatură ale epruvetelor în timpul încercării. Această tehnică de examinare NDT a fost utilizată pentru o mai bună înțelegere a procesului de deformare și a mecanismului de rupere, în scopul optimizării procesului de sudare.

Echipamentul experimental utilizat a fost alcătuit din: mașina universală de tracțiune tip WPM și cameră termografică cu infraroșu tip FLIR System A40.

Spre exemplificare, se prezintă imaginile termice pentru trei epruvete reprezentative (marcaje 1.1, 3.1 și 12.1), înregistrate în timpul încercării la desprindere (Figura 6.48, Figura 6.49, Figura 6.50).

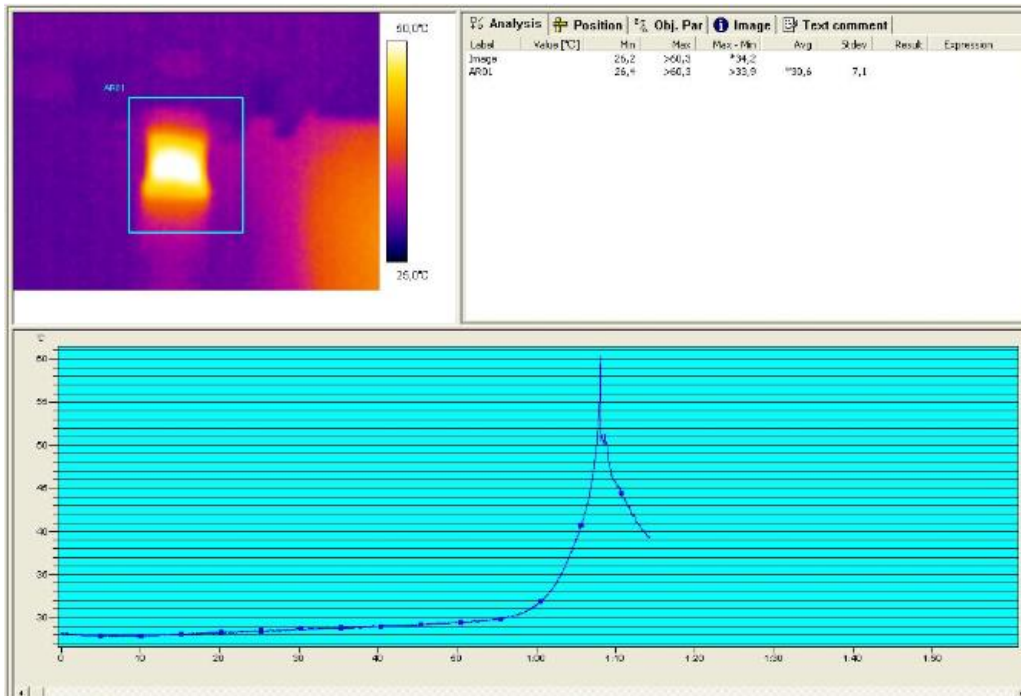


Figura 6.48 Variația temperaturii epruvetei 1.5 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere în materialul de bază)

Se poate observa că pe măsura desfășurării încercării are loc o creștere semnificativă a temperaturii epruvetei, în special în zona de rupere, acest fapt fiind în strânsă legătură cu rezistența la desprindere a îmbinării sudate.

De asemenea se constată că îmbinarea sudată nr. 1 a fost realizată cu un set de parametri favorabili obiectivelor urmărite, ruperea producându-se la nivelul materialului de bază, iar temperatura ridicată înregistrată este în concordanță cu o valoare foarte bună a rezistenței la desprindere $P_{1.5}=26,49 \text{ N/mm}^2$ (epruveta 1.5).

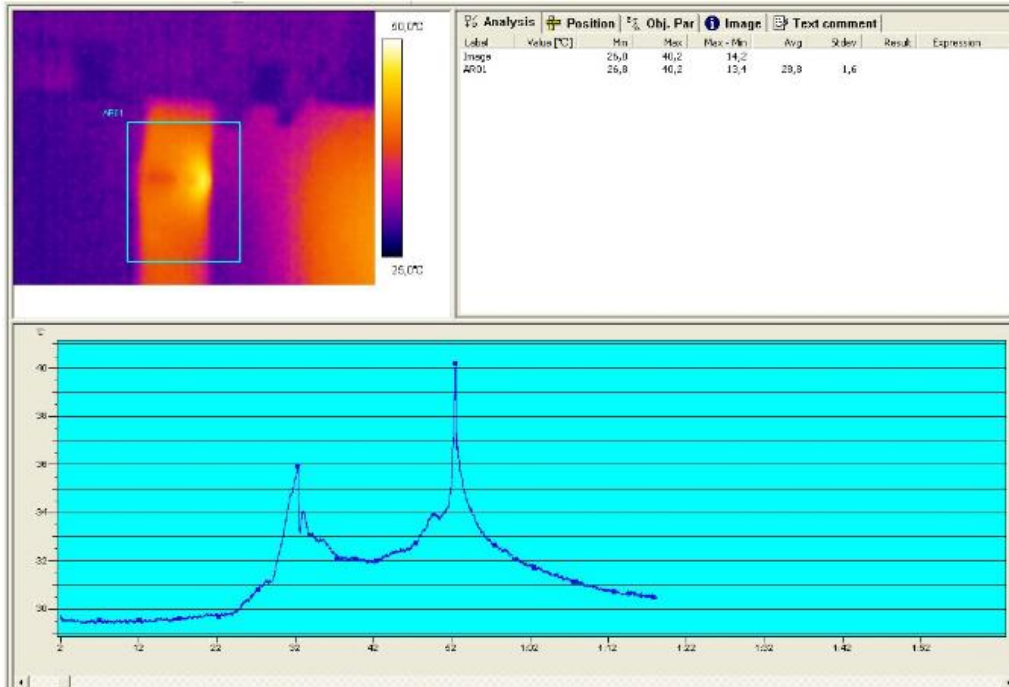


Figura 6.49 Variația temperaturii epruvetei 3.1 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere în sudură)

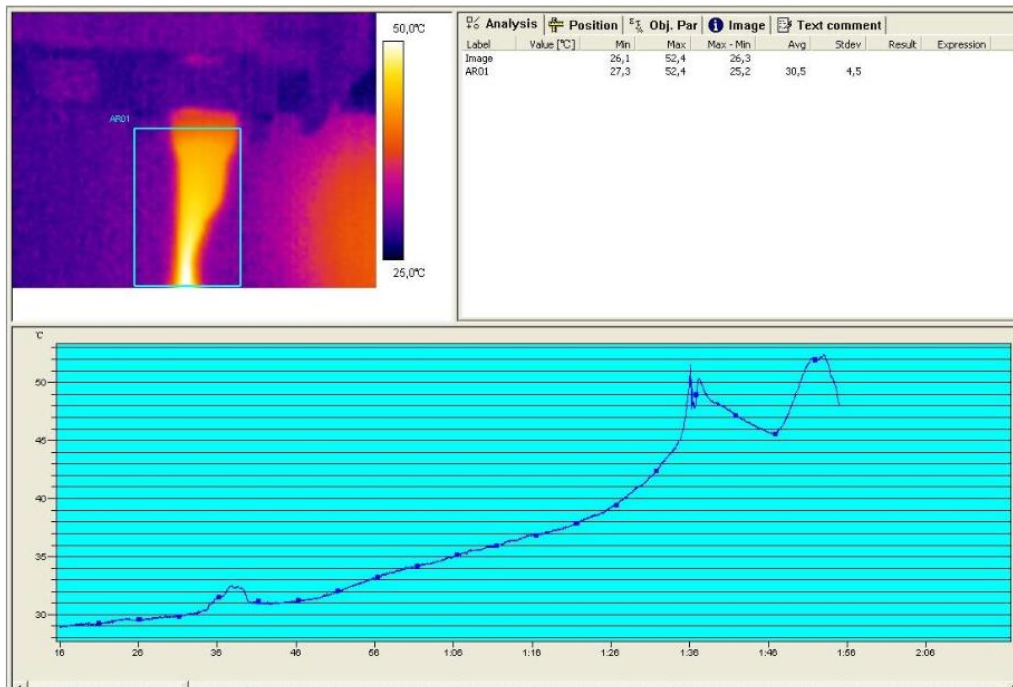


Figura 6.50 Variația temperaturii epruvetei 12.1 în zona sudurii, pe parcursul încercării la desprindere (rupere mixtă în sudură - material de bază)

În cel de-al doilea caz (epruveta 3.1), se observă două vârfuri distincte de creștere a temperaturii epruvetei, care sunt dispuse la un anumit interval de timp relativ mare, ceea ce înseamnă ca sudura prezintă zone cu neuniformități ale întrepătrunderii materialelor componentelor. Pe cea de-a doua porțiune din această îmbinare, în derularea încercării la desprindere, se constată o legătură mai bună între componente (potrivit celei de-a doua creșteri semnificative de temperatură), între cele două vârfuri de temperatură înregistrate existând un palier corespunzător unor porțiuni din îmbinare cu rezistența mai mică și imperfecțiuni de tip lipsă de topire ($P_{3.1}=18,02 \text{ N/mm}^2$).

În cazul al treilea (epruveta 12.1) ruperea este de tip mixt. Astfel, acest fapt realizându-se pe partea finală a desfășurării încercării s-a constatat o variație semnificativă a temperaturii epruvetei în zona analizată, ruperea fiind inițiată în sudură și propagându-se apoi în materialul de bază ($P_{12.1}=23,90 \text{ N/mm}^2$).

6.4.3. Optimizarea procesului de sudare pentru geomembrane

Utilizând rezultatele obținute, în cadrul experimentelor și verificărilor efectuate, a fost posibilă modelarea matematică a procesului de sudare.

Prin prelucrarea pe calculator a acestor date, softul realizează astfel un model matematic neliniar, prin intermediul căruia se stabilesc ponderile factorilor controlabili și interacțiunile acestora.

Influența semnificativă a factorilor controlabili este evidențiată prin probabilitatea p , care la valori $p < 0,05$ indică faptul că factorul respectiv, sau interacțiunile dintre factori au o influență semnificativă asupra funcțiilor obiectiv.

În urma prelucrării statistice a datelor experimentale au fost obținute valori ale probabilității $p < 0,05$, pentru următorii factori controlabili și interacțiuni:

- forța de presare F , respectiv interacțiunea $F \cdot F$ pentru funcția obiectiv reducerea secțiunii (RG).

Aceste influențe pot fi evidențiate sub forma unor grafice tridimensionale pe suprafețe. Astfel în cazul funcției obiectiv rezistența la desprindere (P) sunt prezentate influențele a doi dintre factorii controlabili - v și T , forța de presare având valoare constantă $F = 600 \text{ N}$.

Se poate observa, ca o primă remarcă, că pentru a avea valori cât mai ridicate ale rezistenței la desprindere, este necesar viteza de sudare să aibă valori relativ mici în jurul a 1 m/min , iar valoarea temperaturii să fie cuprinsă în intervalul $320-360 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 6.51).

În cel de-al doilea caz se prezintă influențele factorilor controlabili v și F asupra funcției obiectiv reducerea secțiunii (RG), temperatura penei încălzitoare fiind menținută constantă la valoarea $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 6.52).

Din această figură se desprinde o a doua remarcă importantă, aceea că pentru a avea valori ale reducerii secțiunii în limitele impuse este necesar ca forța de presare F să aibă valori cât mai ridicate, cuprinse în intervalul $800-900 \text{ N}$, iar valoarea vitezei de sudare să fie cât mai mică, în jurul valorii de 1 m/min .

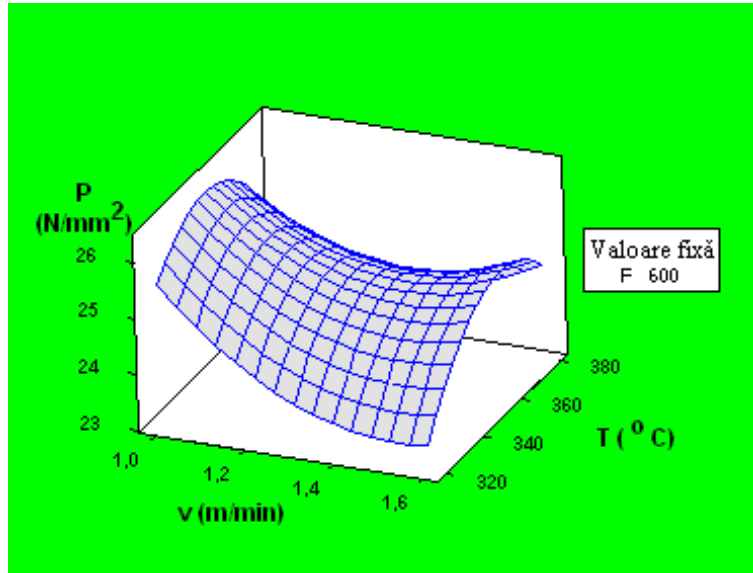


Figura 6.51 Dependența: Rezistența la desprindere (P) funcție de viteza v și temperatura T

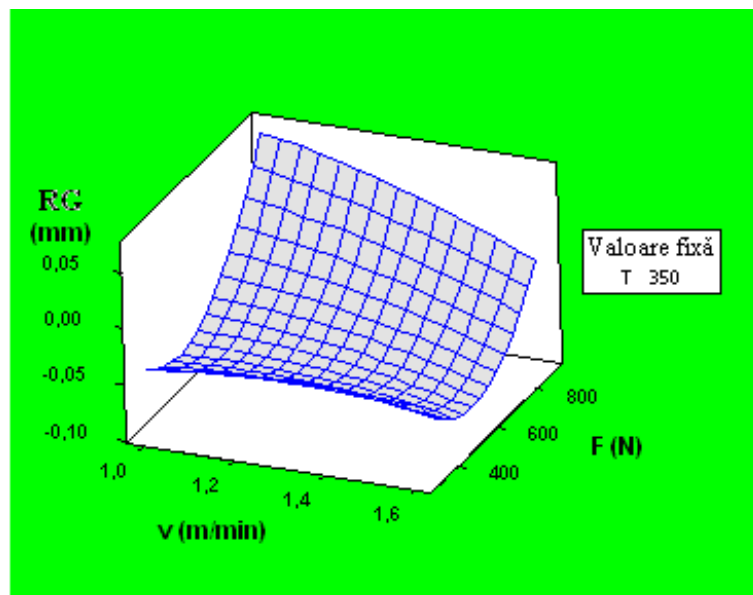


Figura 6.52 Dependența: Reducerea grosimii (RG) funcție de viteza v și forța de presare F

Reprezentarea grafică a dependențelor reciproce sub forma curbelor de nivel este exemplificată în următoarele două figuri. Aceste curbe au fost trasate prin menținerea constantă a valorii forței de presare $F = 600$ N, respectiv a temperaturii $T = 350$ $^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.53, Figura 6.54).

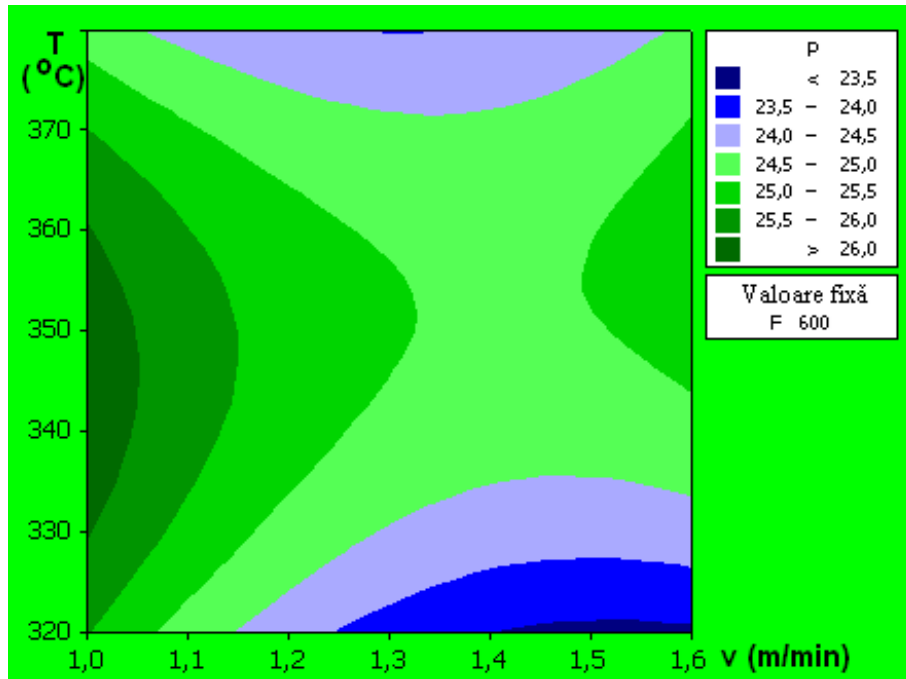


Figura 6.53 Curbe de nivel: Rezistența la desprindere (P) funcție de temperatura T și viteza v

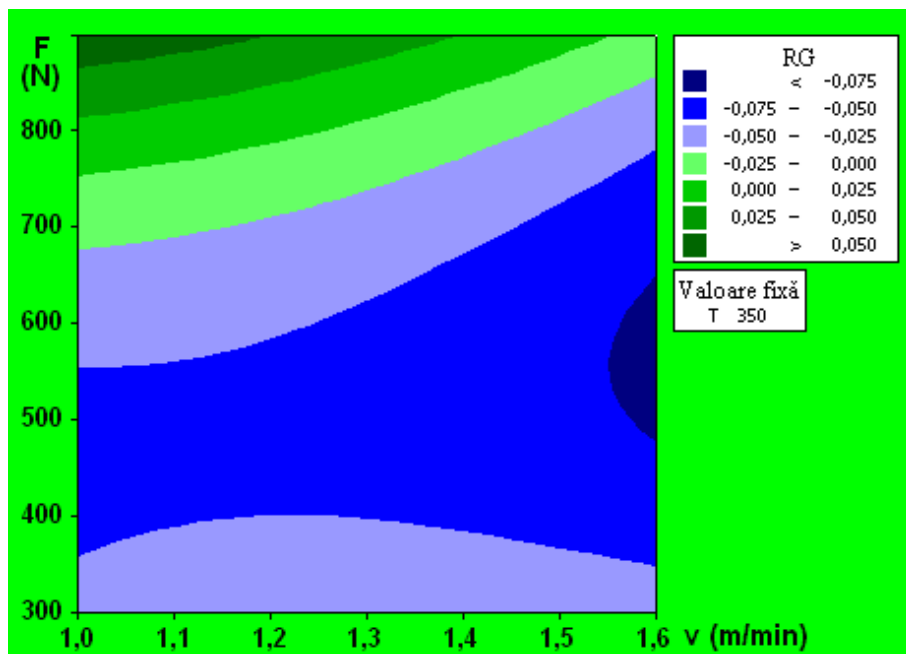


Figura 6.54 Curbe de nivel: Reducerea grosimii (RG) funcție de forța de presare F și viteza v

Suprapunând graficele curbilor de nivel pentru ambele funcții obiectiv, în cazul parametrilor T - F și respectiv v - F , se pot obține domeniile cu valorile optime

pentru parametrii analizați - zonele albe din cele două figuri (Figura 6.55, Figura 6.56).

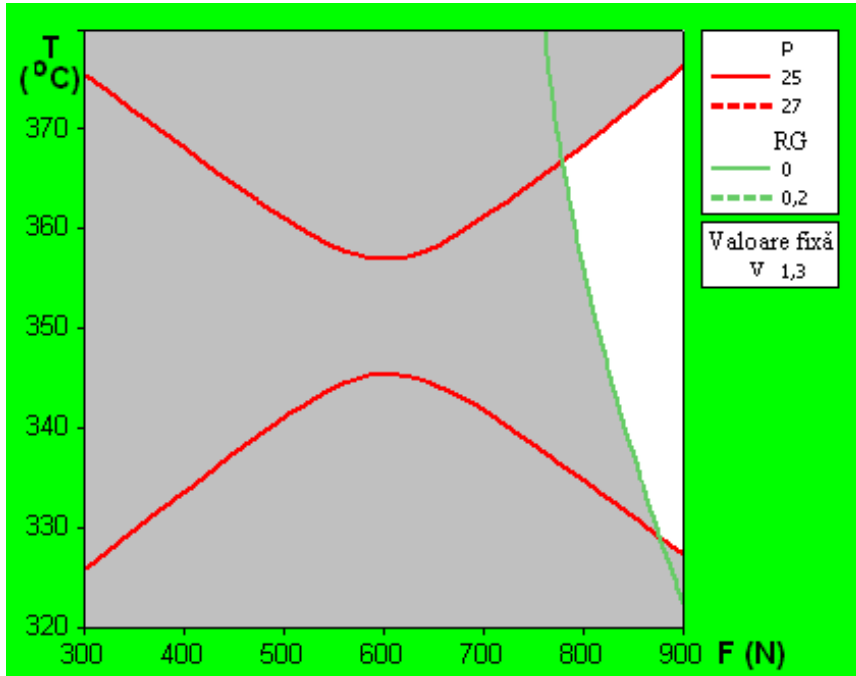


Figura 6.55 Zona albă - zonă de optim: Funcții obiectiv = $f(T, F)$

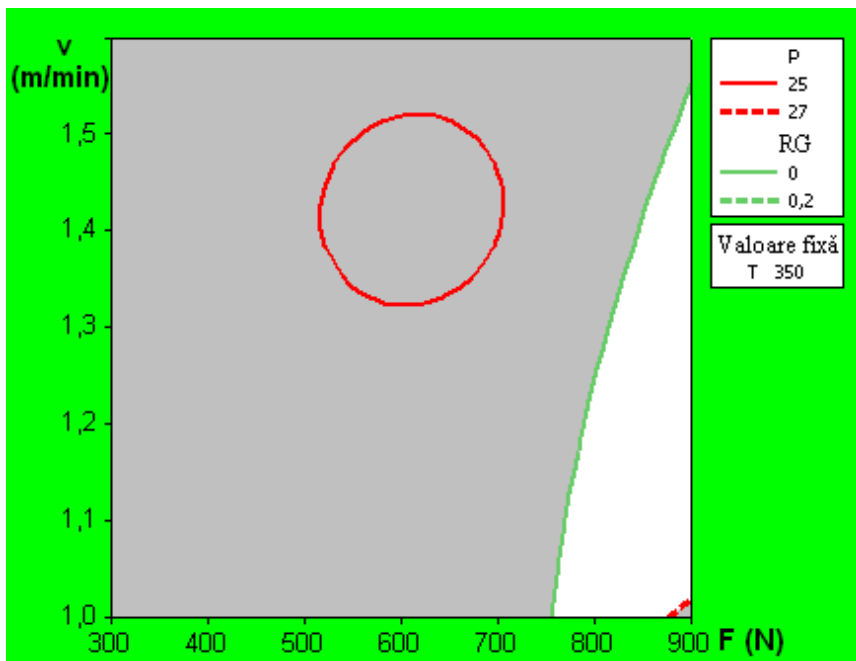


Figura 6.56 Zona albă - zonă de optim: Funcții obiectiv = $f(v, F)$

Optimizarea procesului de sudare a fost făcută pe baza modelelor matematice obținute pentru cele două funcții obiectiv.

În vederea optimizării răspunsurilor, pentru fiecare funcție obiectiv au fost stabilite următoarele cerințe:

- rezistența la desprindere P (maximizare) - valoare minimă de 25 N/mm² și o valoare țintă de 27 N/mm²

- reducerea grosimii RG (minimizare) - o valoare țintă de 0,1 și un maxim de 0,8 mm.

În contextul optimizării procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor din PE-HD s-a urmărit obținerea unor valori ale nivelului de optimizare, atât individuale cât pe ansamblul procesului analizat, cât mai apropiate de optimul complet ($d=1$, $D=1$).

Pentru cazul experimentului central-compus analizat, valoarea obținută pentru nivelul de optimizare al procesului de sudare este $D=1,0$.

Tabelul 6.10 prezintă valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv.

Tabelul 6.10 Parametrii de sudare optimi pentru geomembranele PE-HD

VARIANTĂ TEHNOLOGICĂ	VITEZA DE SUDARE v (m/min)	FORȚA DE PRESARE F (N)	TEMPERATURA PENEI ÎNCĂLZITOARE T (°C)
Optim PE-HD	1,0	900	335

Varianta de sudare tehnologică optimă se poate considera ca fiind validată prin prisma rezultatelor deja obținute la verificarea probei nr. 6, la sudarea căreia s-au utilizat valori ale parametrilor de sudare aproape identice cu cele optime.

6.5. Concluzii privind optimizarea proceselor de sudare

În cadrul acestui capitol au fost efectuate cercetări experimentale pentru optimizarea proceselor de sudare a unor componente din materiale termoplastice de tipul țevilor destinate transportului gazelor naturale sub presiune, respectiv a geomembranelor utilizate la lucrările de etanșare din domeniul construcțiilor civile și industriale.

În acest sens s-a avut în vedere utilizarea unor procedee de îmbinare prin sudare reprezentative pentru aplicațiile industriale, cu o largă utilizare pe plan mondial, în vederea creșterii calității îmbinărilor sudate și implicit a duratei de viață în exploatare a sistemelor tehnice astfel obținute.

Programul experimental, conceput și direcționat pe utilizarea a trei categorii de componente din materiale termoplastice, s-a realizat pe îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor a țevilor din polietilenă de tip PE 80 și PE 100 pentru conducte de gaze naturale, respectiv pe îmbinări sudate prin suprapunere cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

Unul din elementele de noutate utilizate în cadrul tezei, ca o alternativă a modului clasic de realizare a optimizării proceselor industriale, îl reprezintă planificarea experimentelor și optimizarea asistată de calculator printr-o metodă modernă denumită Response Surface Design (RSD).

Programele de planificare și calcul statistic constituie un element deosebit de util, prin care se pot diminua considerabil volumul de muncă și costurile necesare optimizării proceselor de sudare specifice materialelor termoplastice.

Planificarea experimentelor și prelucrarea statistică a rezultatelor utilizând experimente neliniare de tip Response Surface Design, conduce la stabilirea unor relații matematice privind dependența dintre funcțiile obiectiv, factorii de influență și interacțiunile acestora.

Rezultatele experimentale obținute în cadrul cercetărilor, în cazul sudării cap la cap cu element încălzitor pentru țevile din polietilenă de tip PE 80 analizate, au condus la optimizarea procesului de sudare, stabilindu-se următoarele valori pentru factorii controlabili: presiunea de încălzire $P_1 = 20$ bar, timpul de încălzire $t_1 = 19$ s, timpul de menținere $t_2 = 80$ s, timpul de sudare $t_5 = 900$ s și temperatura elementului încălzitor $T = 208$ °C.

Rezultatele cercetărilor experimentale obținute în cazul sudării cap la cap cu element încălzitor a țevilor din polietilenă de tip PE 100 au condus la optimizarea procesului de sudare, cu următoarele valori pentru factorii controlabili: presiunea de încălzire $P_1 = 28$ bar, timpul de încălzire $t_1 = 18$ s, timpul de menținere $t_2 = 82$ s, timpul de sudare $t_5 = 630$ s și temperatura elementului încălzitor $T = 195$ °C.

Un alt element de noutate îl constituie realizarea unor cercetări privind optimizarea procesului de sudare pentru componente din categoria materialelor geosintetice. Optimizarea procesului de sudare prin metoda Response Surface Design (RSD) s-a realizat utilizând geomembrane din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) și un echipament de sudare cu pană încălzită electric.

Rezultatele experimentale obținute în urma cercetărilor realizate la sudarea prin suprapunere cu pană încălzitoare, au condus la optimizarea procesului de sudare pentru geomembranele din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD) analizate, cu următorii parametri de sudare: viteza de sudare $v = 1,0$ m/min, forța de presare $F = 900$ N, și temperatura penei încălzitoare $T = 335$ °C.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

7.1. Concluzii

Pe tot parcursul derulării activității de pregătire și elaborare a tezei de doctorat, autorul a contribuit atât pe plan științific cât și al formării profesionale, la promovarea și implementarea în România a unui domeniu nou, de un real interes, privind utilizarea produselor din materiale termoplastice și îmbinarea acestora prin sudare.

Prezenta lucrare reprezintă o abordare originală, direcționată spre creșterea fiabilității sistemelor tehnice ce includ componente din materiale termoplastice, vizând în principal îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate.

Conform celor prezentate în primul capitol, referitor la justificarea alegerii temei, se constată și în prezent faptul că aspectele legate de comportarea materialelor termoplastice și a îmbinărilor sudate în diferite condiții de solicitare sunt parțial cunoscute și soluționate, domeniul fiind într-o continuă dezvoltare. Un motiv în plus, care subliniază importanța temei abordate, îl constituie înregistrarea și în ultima perioadă a unor avarii, în diferite țări.

În acest scop a fost conceput un amplu program de cercetare experimentală care să includă atât aspecte de cunoaștere teoretică a structurii polimerilor și a reologiei acestora, identificarea principalelor moduri și mecanisme specifice ruperii polimerilor, cât și investigații experimentale privind comportarea materialelor de bază și a îmbinărilor sudate la solicitări statice și încercări specifice de mecanica ruperii, respectiv aprofundarea particularităților legate de procedeele de sudare și utilizarea unor metode moderne de optimizare a proceselor de sudare pentru componente din materiale termoplastice.

În cadrul capitolului 3 s-au analizat o serie de îmbinări sudate reprezentative, care au fost supuse examinării macroscopice și încercărilor mecanice, în scopul evidențierii imperfecțiunilor și al stabilirii cauzelor care le-au determinat:

- Îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor, realizate din țevi de polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), cu diametre cuprinse între \varnothing 110 - 250 mm;
- Îmbinări sudate prin electrofuziune, utilizând țevi și fittinguri de polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), cu diametre cuprinse între \varnothing 32 - 180 mm.

Programul experimental prezentat în cadrul capitolelor 4 și 5 a urmărit determinarea caracteristicilor de rezistență statică și a tenacității materialelor unor componente de tipul țevilor din materiale termoplastice.

În acest sens, în cadrul acestor cercetări experimentale au fost utilizate țevi din polietilenă de înaltă densitate de tip PE80 și PE100, având diametre de 110 mm și grosimi de perete de 10 mm, raport dimensional standard SRD 11, ce se utilizează la realizarea conductelor destinate vehiculării gazelor naturale.

În vederea efectuării încercărilor, pe epruvete prelevate din materialele de bază și din îmbinările sudate cap la cap cu element încălzitor, s-a utilizat o metodă

combinată tracțiune – termografie, astfel încât concomitent cu realizarea încercării la tracțiune și evidențierea emisiei de energie termică a epruvetei, să fie posibilă vizualizarea și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes.

Analiza rezultatelor obținute a evidențiat că rezistența la rupere a celor două tipuri de materiale PE80 și PE100 (sudate, nesudate), pentru intervalul de temperatură cuprins între 23 ° C și -10 ° C, crește liniar cu scăderea temperaturii.

De asemenea, în cadrul capitolelor 4 și 5 au fost realizate încercări de mecanica ruperii pe epruvete prelevate din țevă de tip PE100. În acest scop s-a utilizat metoda integralei J, care permite analiza propagării fisurii în cursul unei încărcări lente, încercările la încovoiere în trei puncte fiind efectuate la o temperatură de referință de 23 ° C.

Cu ajutorul valorilor integralei J astfel determinate s-au trasat curbele J-R, ca funcții de putere, ce evidențiază dependența dintre integrala J și extensia fisurii Δa .

Prin modelarea și analiza cu elemente finite, folosind programul de calcul ABAQUS 6.10, a epruvetei MB2 supusă încercării la încovoiere - corespunzător unei deplasări de 1,5 mm a punctului de aplicare a forței, s-a urmărit determinarea parametrilor de mecanica ruperii.

Astfel, analiza comparativă privind valoarea integralei J pentru cazul acestei epruvete de tip PE100, determinată pe cale experimentală prin încercare la încovoiere în trei puncte și prin metoda elementelor finite, a indicat obținerea unor valori relativ apropiate de 3,67 N/mm și respectiv 3,02 N/mm.

Având în vedere valorile tenacității la rupere J_{IC} obținute pentru materialul de bază PE 100 analizat – $J_{IC MB} = 1,06$ N/mm, respectiv pentru zona influențată termic – $J_{IC ZIT} = 2,02$ N/mm și sudură – $J_{IC SUD} = 1,15$ N/mm, se poate concluziona că cele trei zone specifice ale îmbinării sudate prezintă omogenitate prin prisma rezultatelor obținute, referitoare la variația tenacității materialului.

Programul experimental prezentat în cadrul capitolului 6 a urmărit optimizarea proceselor de sudare pentru componente din materiale termoplastice. În acest sens s-au realizat cercetări experimentale pe îmbinări sudate cap la cap cu element încălzitor a țevelor din polietilenă de tip PE 80 și PE 100, respectiv pe îmbinări sudate prin suprapunere cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

Astfel, în vederea planificării experimentelor s-a utilizat programul de planificare și calcul statistic MINITAB 15, considerându-se după caz un experiment de tip central-compus întreg sau fracționat.

Prin planificarea experimentelor s-au stabilit pentru fiecare caz în parte un anumit număr de variante tehnologice de sudare, iar pe baza rezultatelor obținute, s-a urmărit modelarea matematică a proceselor de sudare și stabilirea variantelor de sudare optime, prin care să fie îndeplinite condițiile impuse funcțiilor obiectiv.

În final, folosind metoda de planificare a experimentelor Response Surface Design (RSD) s-a realizat optimizarea proceselor de sudare cap la cap cu element încălzitor a țevelor din polietilenă de tip PE 80 și PE 100, respectiv optimizarea procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

7.2. Contribuții personale

Teza a fost concepută și structurată pe șapte capitole, dintre care trei (capitolele 4, 5 și 6) au un pronunțat caracter practic de cercetare experimentală, respectiv aspectele prezentate în capitolele 1 și 3 au la bază o serie de lucrări și activități la care autorul a participat în calitate de colaborator sau responsabil de temă. Se menționează faptul că o bună parte din rezultatele cercetărilor obținute au fost publicate în lucrări prezentate la conferințe sau în reviste de specialitate.

Principalele contribuții ale autorului sunt următoarele:

- Sinteza bibliografică complexă privind stadiul actual al cunoașterii din domeniul materialelor termoplastice, axată pe mai multe direcții principale: structura și reologia polimerilor, comportarea materialelor de bază și a îmbinărilor sudate supuse la diferite tipuri de solicitări, cercetarea fenomenelor de cedare a sistemelor tehnice, moduri și mecanisme de cedare și determinarea parametrilor de mecanica ruperii, aspecte legate de sudare și evaluare a calității îmbinărilor sudate, modelare cu element finit, abordări moderne de concepere a programelor experimentale și optimizare a proceselor tehnologice.
- Analiza unor cazuri reprezentative de epruvete prelevate din îmbinări sudate cu imperfecțiuni și identificarea cauzelor care le-au produs;
- Determinarea experimentală a curbelor forță - deplasare pe materiale de bază PE80 și PE100 prin încercare la tracțiune statică, la diferite temperaturi cuprinse între 23 °C și -10 °C;
- Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice a materialelor de bază PE80 și PE100 prin încercare la tracțiune în diferite condiții de solicitare, prin modificarea valorii temperaturii între 23 °C și -10 °C;
- Utilizarea unei metode combinate tracțiune - termografie, ce oferă posibilitatea monitorizării încercării și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes;
- Determinarea experimentală a curbei J-R și a valorii integralei J_{IC} pe material de bază PE100, prin încercarea la încovoiere în trei puncte conform standardului ASTM D 6068;
- Modelarea și analiza cu elemente finite, utilizând programul ABAQUS 6.10, a unei epruvete de tip PE100 supusă încercării la încovoiere în trei puncte și determinarea valorii integralei J;
- Determinarea experimentală a curbelor forță - deplasare pe îmbinări sudate similare de tip PE80 și PE100 prin încercare la tracțiune statică, la diferite temperaturi cuprinse între 23 °C și -10 °C;
- Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice a îmbinărilor sudate PE80 și PE100 prin încercare la tracțiune, cu modificarea valorii temperaturii între 23 °C și -10 °C;
- Determinarea experimentală a curbelor J-R și a valorilor integralei J_{IC} pe îmbinare sudată de tip PE100, prin încercări la încovoiere în trei

puncte a epruvetelor cu creștătura dispusă în sudură și respectiv în zona influențată termic;

□ Analiza comparativă a alurii curbelor J-R și a valorilor J_{IC} obținute pe material de bază PE100 și respectiv pe epruvetele cu creștătură în zona influențată termic și în sudură;

□ Planificarea experimentelor și optimizarea asistată de calculator printr-o metodă modernă denumită Response Surface Design (RSD), cu ajutorul programului de planificare și calcul statistic MINITAB 15;

□ Conceperea și elaborarea programelor experimentale, respectiv optimizarea proceselor de sudare cap la cap cu element încălzitor a țevilor de tip PE80 și respectiv PE100;

□ Conceperea și elaborarea programului experimental, respectiv optimizarea procesului de sudare cu pană încălzitoare pentru geomembrane de tip PE-HD.

Se menționează faptul ca metodologia utilizată la realizarea optimizării proceselor de sudare are aplicabilitate imediată în industrie. De asemenea, cu toate că optimizarea proceselor de sudare s-a realizat pe anumite componente, materiale și dimensiuni, metodologia concepută și utilizată prin planificarea experimentelor și optimizarea - Response Surface Design (RSD) poate fi extinsă, adaptată și aplicată în mod corespunzător și la alte tipuri de componente, materiale, dimensiuni și procedee de sudare specifice materialelor termoplastice.

BIBLIOGRAFIE

- [1] H. S. Lai, S. H. Kil and K. B. Yoon, "Effects of defect size on failure of butt fusion welded MDPE pipe under tension," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 5, pp. 1973-1980, 2015.
- [2] M. Kutylowska și H. Hotłoś, „Failure analysis of water supply system in the Polish city of Głogów,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 41, pp. 23-29, 2014.
- [3] S. J. Gould and et al., "Failure analysis of a PVC sewer pipeline by fractography and materials characterization," *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 41-50, 2013.
- [4] Z. A. Majid, R. Mohsin , Z. Yaacob and Z. Hassan, "Failure analysis of natural gas pipes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 4, pp. 818-837, 2010.
- [5] M. Cocard, A. Murariu and et al., "Case Study on Failures of Thermoplastics Pipeline Systems," in *Structural Integrity of Welded Structures XI - Advanced Materials Research*, Pfäffikon, Switzerland, 2015.
- [6] C. Frederick și et al., „Ultrasonic phased array examination of butt-fusion joints in high-density polyethylene,” în *17th International Conference on Nuclear Engineering*, Brussels, Belgium, 2009.
- [7] LAROUSSE, Dicționar Inventatori și Invenții, București: Editura Tehnică București, 2001.
- [8] F. Pardos, „Plastics in the Twenties,” în *ANTEC 2004, 62nd annual technical conference*, Chicago, IL, 2004.
- [9] C. Cincu și G. Manea, Cartea operatorului din industria de prelucrare a materialelor plastice, București: Editura Tehnică, 1984.
- [10] M. Wilhelm, "New methods for the rheological characterization of materials," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 50, no. 5-6, pp. 486-488, 2011.
- [11] M. Gahleitner, "Melt rheology of polyolefins," *Progress in Polymer Science*, vol. 26, no. 6, pp. 895-944, 2001.
- [12] R. Tudose și ș.a., Reologia compușilor macromoleculari, București: Editura Tehnică, 1982.
- [13] "Polymer Rheology," in *Extrusion (Second Edition)*, Elsevier Inc., 2014, pp. 233-240.
- [14] I. Mândru și M. Leca, Chimia macromoleculilor și a coloizilor, București: Editura didactică și pedagogică, 1977.
- [15] J. Gao, C. Li și et al., „Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process,” *Materials & Design*, vol. 86, pp. 289-296, 2015.
- [16] M. Cocard, „Sudarea materialelor termoplastice,” *Revista "Sudura ASR"*, nr. 2, pp. 49-54, 2001.

- [17] B. Y. Lee, J. S. Kim și et al., „Butt-welding technology for double walled Polyethylene pipe,” *Materials & Design*, vol. 35, pp. 626-632, 2012.
- [18] M. Devrient, B. Knoll și R. Geiger, „Laser Transmission Welding of Thermoplastics With Dual Clamping Devices,” *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 70-80, 2013.
- [19] V. Mamuschkin, A. Roesner și M. Aden, „Laser Transmission Welding of White Thermoplastics with Adapted Wavelengths,” *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 172-179, 2013.
- [20] A. Mokhtarzadeh and et al., "Comparison of hot plate, vibration, infrared and combined infrared with vibration welding of ASA," in *69th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*, Boston, Massachusetts, USA, 2011.
- [21] P. Bates and et al., "Vibration welding polypropylene – effect of mfi on weld strength and microstructure," in *67th Annual Technical Conference of the Society Of Plastics Engineers*, Chicago, Illinois, USA, 2009.
- [22] A. Paoletti , F. Lambiase și A. Di Ilio, „Optimization of Friction Stir Welding of Thermoplastics,” *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 562-567, 2015.
- [23] V. Jaiganesh, B. Maruthu și E. Gopinath, „Optimization of Process Parameters on Friction Stir Welding of High Density Polypropylene Plate,” *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1957-1965, 2014.
- [24] M. K. Bilici and et al., "The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets," *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 4074-4079, 2011.
- [25] Y. Bozkurt, „The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets,” *Materials & Design*, vol. 35, pp. 440-445, 2012.
- [26] M. Popescu, C. Marta, M. Cocard și A. Căneparu, *Sudarea materialelor plastice. Aplicații*, Timișoara: Editura Politehnica, 2009.
- [27] ASRO, *SR EN 13067: Sudori pentru materiale plastice. Calificare sudori. Ansambluri sudate ale materialelor plastice*, 2013.
- [28] D. J. Hill , K. A. Wilson și A. L. Headford, „Butt fusion welding of large diameter/thick wall pipes,” în *Conference Proceedings Plastics Pipes XI*, Munich, Germany, 2001.
- [29] D. Duvall, „Observation on field fusion joining of larger diameter HDPE pipe,” în *Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers*, Boston, Massachusetts, 2005.
- [30] J. Schnieders, M. Büssing and H. Potente, "High speed hot plate welding," in *64th Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers*, Charlotte, North Carolina, USA , 2006.
- [31] R. Di Lucchio, G. Leone și G. Sanfilippo, „La pressione di esercizio delle reti gas in polietilene puo essere aumentata,” *Rivista Italiana della Saldatura*, nr. 5, pp. 581-589, 2000.
- [32] G. Leone, „La crescita del PE nelle reti di distribuzione gas ed acqua in pressione,” *Rivista Italiana della Saldatura*, nr. 4, 2003.

- [33] K. Leskovics, M. Kollar și P. Barczy, „A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes,” *Materials Science and Engineering A* 419, p. 138–143, 2006.
- [34] C. Allcard și S. H. Beech, „The evaluation of factors governing long term performance of polyethylene electrofusion fittings,” în *Proceedings of Plastics pipes XI*, Munich, Germany, 2001.
- [35] Ritmo Plastic Welding Technology, *Carte tehnica echipament de sudare RITMO DELTA 250*.
- [36] J. Zhao, L. Daigle and D. Beaulieu, "Effect of joint contamination on the quality of butt-fused high-density polyethylene (HDPE) pipe joints," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 787-798, 2002.
- [37] B. Choi și et al., „Effect of Inclusion Size and Location on PE Pipe Lifetime,” în *Annual Technical Conference (ANTEC)*, Cincinnati, Ohio, 2007.
- [38] M. J. Troughton, *Handbook of plastics joining. A practical guide*, 2nd ed., Norwich, NY 13815: William Andrew Inc., 2008.
- [39] ASRO, *SR EN 13100-1: Încercarea nedistructivă a elementelor de legătura sudate a produselor semifinite de materiale termoplastice. Partea 1: Examinarea vizuală*, 2001.
- [40] F. Bresciani, M. Murgia și F. Rivara, „Controllo di qualita nella saldatura dei materiali termoplastici,” *Rivista Italiana della Saldatura*, nr. 6, pp. 765-771, 2003.
- [41] ASRO, *SR EN 13100-3: Examinări nedistructive ale îmbinărilor sudate pe semifabricatele de materiale termoplastice. Partea 3: Examinare cu ultrasunete*, 2005.
- [42] B. Messer, M. Yarmuch and P. den Boer, "Novel High Resolution Defect Detection For Thermoplastic Butt-Welds," *Pipeline & Gas Journal*, vol. 230, no. 3, 2003.
- [43] A. Leleux, P. Micheau and M. Castaings, "Long Range Detection of Defects in Composite Plates Using Lamb Waves Generated and Detected by Ultrasonic Phased Array Probes," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, no. 2, pp. 200-214, 2013.
- [44] Z. Wang, Y. Luo and et. al, "Design and optimization of an OPFC ultrasonic linear phased array transducer," *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, vol. 11, no. 41, 2015.
- [45] V. I. Safta și G. Grün, „Aspecte privind imagistica ultrasonică în sistemul phased array,” în *Conferința Internațională ASR „SUDURA 2007”*, Timișoara, 2007.
- [46] F. Hagglund, M. Spicer și M. Troughton, „Development of Phased Array Ultrasonic Inspection Techniques for Testing Welded Joints in Plastic (PE) Pipes,” în *18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, 2012.
- [47] F. Hagglund, M. Spicer și M. Troughton, „Phased Array Ultrasonic Testing of Welded Joints in Plastic (PE) Pipes,” în *6th Middle East Nondestructive Testing Conference*, Kingdom of Bahrain, 2012.

- [48] Eclipse Scientific, "Technique for Determining Polyethylene (PE 100) Butt Fusion Joint Quality," *The e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 14, no. 8, 2009.
- [49] M. Troughton, M. Spicer și F. Hagglun, „Development of ultrasonic phased array inspection of polyethylene pipe joints,” în *Pressure Vessel and Piping Conference, New Horizons in Pressure Vessel and Piping Technology*, Toronto, Canada, 2012.
- [50] E. Nastase, M. Cocard și et al., „Ultrasonic non-destructive examination of polyethylene pipelines using the phased array method,” în *The 8th International Conference - Structural integrity of welded structures*, Timișoara, România, 2010.
- [51] D. S. Caravaca, C. Bird și D. Kleiner, „Ultrasonic phased array inspection of electrofusion joints in polyethylene pipes,” în *NDT 2006 - the 45th Annual British Conference on NDT*, Stratford-upon-Avon, UK, 2006.
- [52] C. Bird, D. S. Caravaca și D. Kleiner, „The ultrasonic phased array inspection of electrofusion joints in polyethylene pipes,” în *ECNDT 2006, 9th European Conference on NDT*, Berlin, Germany, 2006.
- [53] H. J. Shin and et. al, "Nondestructive Testing of Fusion Joints of Polyethylene Piping by Real Time Ultrasonic Imaging," *NDT.net*, vol. 10, no. 3, 2005.
- [54] J. Mikula, P. Hutař, E. Nezbedová și et. al, „On crack propagation in the welded polyolefin pipes with and without the presence of weld beads,” *Materials & Design*, vol. 87, pp. 95-104, 2015.
- [55] M. Ševčík, P. Hutař, L. Náhlík și et. al, „Crack growth modelling in a specimen with polymer weld,” *Key Engineering Materials*, vol. 488, pp. 158-161, 2012.
- [56] T. Parenteau, G. Ausias, Y. Grohens and P. Pilvin, "Structure, mechanical properties and modelling of polypropylene for different degrees of crystallinity," *Polymer*, vol. 53, no. 25, pp. 5873-5884, 2012.
- [57] J. Poduška și et al., „Residual stress distribution in extruded polypropylene pipes,” *Polymer Testing*, vol. 40, pp. 88-98, 2014.
- [58] P. Hutař și et al., „The effect of residual stress on polymer pipe lifetime,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 108, pp. 98-108, 2013.
- [59] C. Vasiliu-Oprea, A. Constantinescu și P. Bârsănescu, *Ruperea polimerilor. Teorie și aplicații*, București: Tehnică, 1992.
- [60] W. Ghabeche și et al., „Degradation of Plastic Pipe Surfaces in Contact with an Aggressive Acidic Environment,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 351-364, 2015.
- [61] T. Zanasi, E. Fabbri and F. Pilati, "Qualification of pipe-grade HDPEs: Part I, development of a suitable accelerated ageing method," *Polymer Testing*, vol. 28, no. 1, pp. 96-102, 2009.
- [62] V. Kerlins și M. Douglas, *Modes of Fracture*, ASM International, 1992.
- [63] M. Farshad, *Plastic Pipe Systems. Failure Investigation and Diagnosis*, Elsevier Ltd. Kidlington, UK, 2006.
- [64] Y. Zhang și P.-Y. Ben Jar, „Quantitative assessment of deformation-induced damage in polyethylene pressure pipe,” *Polymer Testing*, vol. 47, pp. 42-50, 2015.

- [65] D. No și A. Benatar, „Development of flaw criteria for short-term performance of electro-fusion pipe welds,” în *ANTEC 2005, Annual Technical Conference*, Boston, Massachusetts, 2005.
- [66] V. Shah, *Handbook of plastics testing and failure analysis*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [67] V. Safta și V. Safta, *Defectoscopie nedistructivă industrială*, Timișoara: Sudura, 2001.
- [68] ASRO, *SR EN 14728: Defecte de sudură în materiale termoplastice. Clasificare*, 2005.
- [69] DVS, *DVS 2202-1: Fehler an Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen. Merkmale, Beschreibung, Bewertung. DVS Merkblätter und Richtlinien - Fügen von Kunststoffen*, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2006.
- [70] M. Cocard, „Imperfecțiuni în îmbinările sudate la țevi din polietilenă,” *Revista "BID-ISIM"*, nr. 2, pp. 15-20, 2004.
- [71] M. Cocard, „Strength assessment of polyethylene pipes,” în *The 5th International Conference, Structural integrity of welded structures - Testing & Risk assessment of advanced materials and joints*, Timișoara, România, 2007.
- [72] S. Syngellakis and J. Wu, "Evaluation of polymer fracture parameters by the boundary element method," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 5, pp. 1251-1265, 2008.
- [73] K. Hachour, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz, J. M. Gloaguen, M. Aberkane și J. M. Lefebvre, „Experiments and modeling of high-crystalline polyethylene yielding under different stress states,” *International Journal of Plasticity*, vol. 54, pp. 1-18, 2014.
- [74] V. Djokovic, D. M. Dramicanin, D. Kostoski și D. Dudic, „Viscoelastic Properties of Polyethylene at Elevated Temperatures on the Basis of Two-Process Model for Stress Relaxation,” vol. 352, pp. 195-200, 2000.
- [75] M. P. Kruijer, L. L. Warnet and R. Akkerman, "Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP)," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 2, p. 291-300, 2005.
- [76] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics. Fundamental and Applications*, 3rd ed., Taylor & Francis Group, 2005.
- [77] R. Lecht și E. Damm, *Langzeithalten und mechanische Eigenschaften von Röhren aus PE 100*, Essen: Vulkan - Verlag, 1998.
- [78] R. J. Crawford, *Plastics Engineering*, Third Edition ed., Butterworth-Heinemann, 1998.
- [79] ASRO, *SR EN ISO 6259-1: Țevi de materiale termoplastice. Determinarea caracteristicilor de tracțiune. Partea 1: Metodă generală de încercare*, 2002.
- [80] ISO, *ISO 6259-3: Thermoplastics pipes - Determination of tensile properties - Part 3: Polyolefin pipes*, 2011.
- [81] ASRO, *SR EN ISO 527-1: Materiale plastice. Determinarea proprietăților de tracțiune. Partea 1: Principii generale*, 2012.
- [82] ASTM, *D 6068: Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*, 2002.

- [83] M. Cocard and L. Marşavina, "Determination of the fracture toughness of thermoplastic materials using the J integral method," *MATERIALE PLASTICE*, vol. 51, no. 2, pp. 190-193, 2014.
- [84] ASTM, *E 1820: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, 2001.
- [85] N. Faur, *Elemente finite. Fundamente*, Timișoara: Editura Politehnica, 2002.
- [86] H. J. Kwon and P. -Y. Jar, "On the application of FEM to deformation of high-density polyethylene," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 11-12, p. 3521-3543, 2008.
- [87] A. Arriaga, J. M. Lazkano, R. Pagaldai, A. M. Zaldua, R. Hernandez, R. Atxurra and A. Chrysostomou, "Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS," *Polymer Testing*, vol. 26, no. 3, p. 284-305, 2007.
- [88] E. Lever, "Design and pressure rating of PE fittings: stress concentrations, slow crack growth and use of ISO 9080 regression coefficients in material choice," *Plastics Rubber and Composites*, vol. 34, no. 1, pp. 15-19, 2005.
- [89] A. Benhamena, B. Bachir Bouiadjra, A. Amrouche, G. Mesmacque, N. Benseddiq and M. Benguediab, "Three finite element analysis of semi-elliptical crack in high density poly-ethylene pipe subjected to internal pressure," *Materials and Design*, vol. 31, no. 6, p. 3038-3043, 2010.
- [90] A. Benhamena, L. Aminallah, B. Bachir Bouiadjra, M. Benguediab, A. Amrouche and N. Benseddiq, "J integral solution for semi-elliptical surface crack in high density poly-ethylene pipe under bending," *Materials & Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2561-2569, 2011.
- [91] G. Ayoub, F. Zaïri, M. Naït-Abdelaziz și J. M. Gloaguen, „Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene,” *International Journal of Plasticity* 26, p. 329-347, 2010.
- [92] I. Dumitru și L. Marşavina, *Introducere în mecanica ruperii*, Timișoara: Mirton, 2001.
- [93] D. Cioclov, *Mecanica ruperii materialelor*, București: Academiei RSR, 1977.
- [94] A. Frank and et al., "A fracture mechanics concept for the accelerated characterization of creep crack growth in PE-HD pipe grades," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, no. 18, pp. 2780-2787, 2009.
- [95] I. M. Ward și J. Sweeney, *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*, 2nd ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [96] ASRO, *SR EN 12814-2: Încercarea elementelor de legătură sudate a produselor semifinite din materiale termoplastice. Partea 2: Încercarea la tracțiune*, 2001.
- [97] A. Frank, G. Pinter și R. W. Lang, „Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use,” *Polymer Testing* 28, p. 737-745, 2009.
- [98] E. H. Hoang and D. Lowe, "Lifetime prediction of a blue PE100 water pipe," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, no. 8, p. 1496-1503, 2008.

- [99] W. Yu, B. Azhdar, D. Andersson, T. Reitberger, J. Hassinen, T. Hjertberg and U. W. Gedde, "Deterioration of polyethylene pipes exposed to water containing chlorine dioxide," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96, no. 5, pp. 790-797, 2011.
- [100] Y. Zhao și et al., „Characterization of the fatigue crack behavior of pipe grade polyethylene using circular notched specimens,” *International Journal of Fatigue*, vol. 51, pp. 26-35, 2013.
- [101] H. Brömstrup, *PE 100 Pipe systems*, 3rd ed., Essen: Vulkan Verlag, 2009.
- [102] P. Özbek, C. Argyrakis and P. Leever, "Fracture mechanics analysis of arc shaped specimens for pipe grade polymers," *Polymer Testing*, vol. 28, no. 3, pp. 357-361, 2009.
- [103] M. Guidara și et al., „Structural integrity assessment of defected high density poly-ethylene pipe: Burst test and finite element analysis based on J-integral criterion,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 57, pp. 282-295, 2015.
- [104] C. Bernal, H. López Montenegro and P. Frontini, "Failure prediction analysis for polyethylene flawed pipes," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, no. 15, pp. 2149-2162, 2003.
- [105] R. K. Krishnaswamy și M. J. Lamborn, „The influence of morfology on the failure of polyethylene pipes in hydrostatic pressure tests,” în *Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers*, Nashville, Tennessee, 2003.
- [106] P. Yayla and Y. Bilgin, "Squeeze-off of polyethylene pressure pipes: Experimental analysis," *Polymer Testing*, vol. 26, no. 1, pp. 132-141, 2007.
- [107] D. E. Duvall, „Analysis of large diameter polyethylene piping failures,” în *Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers*, San Francisco, 2002.
- [108] D. E. Duvall și D. B. Edwards, „Field Failure Mechanisms In HDPE Potable Water Pipe,” în *69th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*, Boston, Massachusetts, USA, 2011.
- [109] R. Schouwenaars, V. H. Jacobo, E. Ramos and A. Ortiz, "Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 6, pp. 1124-1134, 2007.
- [110] H. Nishimura și T. Kawaguchi, „Lifetime prediction for slow crack growth on polyethylene pipes for gas distribution,” în *ANTEC 2005, Annual Technical Conference*, Boston, Massachusetts, 2005.
- [111] A. Frank și G. Pinter, „Evaluation of the applicability of the cracked round bar test as standardized PE-pipe ranking tool,” *Polymer Testing*, vol. 33, pp. 161-171, 2014.
- [112] T. R. Kratochvilla, A. Frank și G. Pinter, „Determination of slow crack growth behaviour of polyethylene pressure pipes with cracked round bar test,” *Polymer Testing*, vol. 40, pp. 299-303, 2014.
- [113] R. A. Deblieck, D. van Beek, K. Remerie and I. M. Ward, "Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network," *Polymer*, vol. 52, no. 14, pp. 2979-2990, 2011.

- [114] Y. Zhang și P.-Y. Ben Jar, „Phenomenological modelling of tensile fracture in PE pipe by considering damage evolution,” *Materials & Design*, vol. 77, pp. 72-82, 2015.
- [115] S. Pyo, J. Woo, J. Park, M. Kim and S. Choi, "Measurement of rapid crack propagation in pressure pipes: A static S4 approach," *Polymer Testing*, vol. 31, no. 3, pp. 439-443, 2012.
- [116] N. Sun, M. Wenzel and A. Adams, "Morphology of high-density polyethylene pipes stored under hydrostatic pressure at elevated temperature," *Polymer*, vol. 55, no. 16, pp. 3792-3800, 2014.
- [117] R. Khelif, A. Chateaufneuf and K. Chaoui, "Reliability-based assessment of polyethylene pipe creep lifetime," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 84, no. 12, pp. 697-707, 2007.
- [118] R. Maria, K. Rode, T. Schuster și et al., „Ageing study of different types of long-term pressure tested PE pipes by IR-microscopy,” *Polymer*, vol. 61, pp. 131-139, 2015.
- [119] C. Rodríguez, M. L. Maspoch and F. J. Belzunce, "Fracture characterization of ductile polymers through methods based on load separation," *Polymer Testing*, vol. 28, no. 2, pp. 204-208, 2009.
- [120] R. G. Cocco, P. M. Frontini and J. E. Perez Ipiña, "Threshold toughness of polymers in the ductile to brittle transition region by different approaches," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 10, pp. 1561-1578, 2007.
- [121] J. Wainstein, L. A. Fasce, A. Cassanelli and P. M. Fron, "High rate toughness of ductile polymers," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, no. 13, pp. 2070-2083, 2007.
- [122] G. Romhány, T. Czigány and J. Karger-Kocsis, "Determination of J-R curves of thermoplastic starch composites containing crossed quasi-unidirectional flax fiber," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 16, pp. 3179-3187, 2006.
- [123] R. C. Wetherhold, D. E. Mouzakis and K. Friedrich, "Effects of testing speed and heat treatment on the fracture of kaolin-reinforced high density polyethylene," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 179-182, 2000.
- [124] P. M. Frontini, L. A. Fasce și F. Rueda, „Non linear fracture mechanics of polymers: Load Separation and Normalization methods,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 79, pp. 389-414, 2012.
- [125] T. M. EL-Bagory, H. E. Sallam și M. Y. Younan, „Effect of strain rate, thickness, welding on the J-R curve for polyethylene pipe materials,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 74, p. 164-180, 2014.
- [126] M. Cocard, I. Grozav și M. Iacob, „Optimizing the welding procedures of PE 100 polyethylene pipes through the factorial design of experiments method,” în *International Conference - Innovative technologies for joining advanced materials*, Timișoara, România, 2008.
- [127] A. Nichici, E. Cicală și R. Mee, *Prelucrarea datelor experimentale*, Timișoara: Editura Politehnica, 1999.
- [128] E. F. Cicală, *Metoda experimentelor factoriale. Proiectarea experimentelor, modelare, optimizare*, Timișoara: Editura Politehnica, 2005.

- [129] E. F. Cicală, Metode pe prelucrare statistică a datelor experimentale, Timișoara: Editura Politehnica, 1999.
- [130] C. Y. Wu și L. Trevino, „Vibration Welding of Thermoplastic Polyolefins,” în *ANTEC 2002, Annual Technical Conference*, San Francisco, CA, 2002.
- [131] C. Y. Wu, M. Rhew, A. Mokhtarzadeh și A. Benatar, „Heated Tool Welding of Thermoplastic Polyolefin (TPO), IIW Doc. XVI-817-03,” în *61th Annual Technical Conference (ANTEC)*, Nashville, Tennessee, 2003.
- [132] J. Park și J. Liddy, „Design of Experiments (DOE) procedure to evaluate ultrasonic weldability of materials,” în *53rd International Institute of Welding Annual Assembly*, Italy, 2000.
- [133] J. Park și J. Liddy, „Design of Experiments (DOE) procedures to evaluate vibration weldability of materials,” în *53rd International Institute of Welding Annual Assembly*, Italy, 2000.
- [134] M. Cocard, I. Grozav, M. Iacob și A. Căneparu, „Establishing the Optimum Welding Procedure for PE 100 Polyethylene Pipelines Using the Response Surface Design,” *MATERIALE PLASTICE*, vol. 46, nr. 4, pp. 101-107, 2009.
- [135] A. Ewais and R. Rowe, "Effect of aging on the stress crack resistance of an HDPE geomembrane," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 109, pp. 194-208, 2014.
- [136] F. B. Abdelaal and et al., "Effect of leachate composition on the long-term performance of a HDPE geomembrane," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 42, pp. 348-362, 2014.
- [137] ASRO, *SR EN 1555-1: Sisteme de canalizare de materiale plastice pentru distribuirea combustibililor gazoși. Polietilenă (PE). Partea 1: Generalități*, 2011.
- [138] ASRO, *SR EN 12814-1: Încercarea elementelor de legătură sudate a produselor semifinite de materiale termoplastice. Partea 1: Încercarea la încovoiere*, București: ASRO, 2001.
- [139] ASRO, *SR EN 12814-5: Încercarea elementelor de legătura sudate a produselor semifinite din materiale termoplastice. Partea 5: Examinarea macroscopică*, 2001.
- [140] M. Cocard și I. Grozav, „Optimizarea procedurilor de sudare a țevilor din polietilenă PE 80 prin metoda planificării experimentelor RSD (Response Surface Design),” *Revista "Sudura ASR"*, nr. 5, pp. 5-13, 2005.
- [141] M. Cocard, „Design of experiments and nonlinear modelling to determine optimum conditions for welding thermoplastic pipes,” în *The 5th International Conference, Innovative technologies for joining advanced materials*, Timișoara, 2011.
- [142] ASRO, *SR EN 12814-8: Încercarea elementelor de legătura sudată a produselor semifinite din materiale termoplastice. Partea 8: Cerințe*, 2003.
- [143] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan și et al., „Infrared thermography for condition monitoring – A review,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35-55, 2013.
- [144] R. Kafieh, T. Lotfia and R. Amirfattahi, "Automatic detection of defects on polyethylene pipe welding using thermal infrared imaging," *Infrared Physics & Technology*, vol. 54, no. 4, pp. 317-325, 2011.

- [145] A. Needham and et al., "The service life of polyethylene geomembrane barriers," *Engineering Geology*, vol. 85, no. 1-2, pp. 82-90, 2006.
- [146] E. Nefso and S. Burns, "Comparison of the equilibrium sorption of five organic compounds to HDPE, PP, and PVC geomembranes," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 6, pp. 360-365, 2007.
- [147] G. W. Ehrenstein and F. Rosenkranz, "Influence of the process parameters for the welding of geomembrans on the long-term strength," *Welding and Cutting*, vol. 55, no. 1, pp. 47-51, 2003.
- [148] DVS, *DVS 2225-4: Schweißen von Dichtungsbahnen aus Polyethylen (PE) für die Abdichtung von Deponien und Altlasten, DVS Merkblätter und Richtlinien - Fügen von Kunststoffen*, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2006.
- [149] M. Cocard and A. C. Murariu, "Modelling and Optimization of a Welding Procedure for Thermoplastic Lining Membrane using Response Surface Design Method," in *NANOCON 2012 - 4th International Conference*, Brno, Czech Republic, 2012.
- [150] ASRO, *SR EN 12814-4: Încercarea elementelor de legătura sudate a produselor semifinite din materiale termoplastice. Partea 4: Încercarea la jupuire*, 2003.