



**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND CARACTERISTICILE DE EXPLOATARE
ALE CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ UTILIZATE
LA DISTRIBUȚIA GAZELOR NATURALE**

**Conducător științific:
PROF.DR.ING.Vlad ULMANU**

**Doctorand :
ING.Virgil ALUCHI**

Ploiesti 2013



MINISTERUL EDUCATIEI NATIONALE
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIESTI

Bvd. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon 0244 573171 Fax 0244 575 847



DOCTORATE

Vă aducem la cunoștință că, în data de _____, la ora _____,
în sala _____ din incinta Universității, va avea loc **susținerea publică a tezei de doctorat**
intitulată: **„CERCETARI PRIVIND CARACTERISTICILE DE EXPLOATARE ALE**
CONDUCTELOR DIN POLIETILENA UTILIZATE LA DISTRIBUTIA GAZELOR
NATURALE”, elaborată de doctorand ALUCHI VIRGIL, în vederea obținerii titlului
științific de **DOCTOR în domeniul fundamental „ȘTIINȚE INGINEREȘTI”, domeniul**
de doctorat: INGINERIE MECANICĂ.

Teza de doctorat va fi evaluată de **comisia pentru susținerea publică** aprobată prin
Decizia Rectorului U.P.G., emisă cu nr. 1905/12.11.2011, având următoarea componență:

Președinte: prof.univ.dr.ing., MINESCU MIHAIL, decn-Fac.I.M.E., U.P.G. Ploiești

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. ULMANU VLAD, U.P.G. Ploiești

Referent oficial: prof.univ.dr.ing. JINESCU VALERIU, Universitatea Politehnica Bucuresti

Referent oficial: prof.univ.dr.ing. HADĂR ANTON, Universitatea Politehnica Bucuresti

Referent oficial: prof.univ.dr.ing. ZECHERU GHEORGHE, U.P.G. Ploiesti.

Odată cu prezenta, vă transmitem și un exemplar din **rezumatul tezei de doctorat**,
adresându-vă invitația de a participa la susținerea publică.

Vă rugăm ca eventualele observații și aprecieri să le transmiteți - pe adresa
universității (în două exemplare) - cu cel puțin două zile înainte de data susținerii.

R E C T O R,

SECRETAR SEF UNIVERSITATE,

Prof.univ.dr.ing. Pascu Mihail G. Iloja

Maria Camelia Bodea



DOCTORATE - AP

CUPRINS

Terminologie.....	5
1. Introducere.....	7
2. Stadiul actual al utilizării conductelor din polietilenă la transportul și distribuția gazelor naturale	11
2.1. Concepția structurii rețelelor de distribuție a gazului metan.....	14
2.1.1. Structura rețelelor	14
2.1.2. Sistematizarea rețelelor existente.....	15
2.1.3. Condițiile de amplasare a vanelor într-o rețea de tranzit MP interconectată în zona urbană...	16
2.1.4. Condițiile de amplasare a vanelor într-o rețea de tranzit MP neinterconectată în zona urbană	17
2.1.5. Cerințe privind siguranța în exploatare a conductelor pentru distribuția gazelor naturale.....	18
2.1.5.1. Obiective și scheme de perspectivă.....	18
2.1.5.2. Închiderea rapidă a rețelei, depresurizarea ei, proiectarea acesteia.....	19
2.1.5.3. Actualizarea schemelor de perspectivă.....	19
2.2. Metode și utilaje folosite în intervențiile speciale în rețelele din polietilenă pentru distribuția a gazelor sub presiune,.....	20
2.2.1. Tipuri de intervenții.....	20
2.2.1.1. Obturarea unei conducte de PE cu dispozitivul special pentru prelungirea acesteia cu mufa de electrofuziune	20
2.2.1.2. Executarea unei derivații de rețea din PE.....	22
2.2.1.3. Obturarea unei conducte de derivație din polietilenă aflată în exploatare.....	24
2.2.1.4. Ștrangularea cu dispozitive de obturat a conductelor de PE având diametrul mai mic sau egal cu 125mm.....	24
2.3. Controlul umidității gazului natural în rețelele de distribuție din polietilenă.....	28
2.4. Concluzii.....	31
3. Caracteristici constructive, materiale și tehnologii de fabricație ale conductelor din polietilenă de înaltă densitate	32
3.1. Materiale plastice utilizate la fabricarea țevelor pentru transportul și distribuția fluidelor .	32
3.1.1. Clasificarea materialelor plastice.....	32
3.1.2. Caracteristicile polimerilor.....	34
3.1.3. Caracterizarea polietilenei.....	38
3.1.4. Tipuri de polietilenă.....	44
3.1.5. Justificarea tehnico-economică a utilizării polietilenei.....	45
3.2. Țevi de polietilenă.....	54
3.2.1. Forme constructive.....	54
3.2.2. Caracteristicile țevelor de polietilenă.....	56
3.2.3. Avantajele utilizării țevelor de polietilenă	57
3.2.4. Fabricarea țevelor și fittingurilor de polietilenă.....	57
3.3. Conducte de polietilenă.....	60
3.3.1. Regimuri de presiune ale conductelor de polietilenă.....	60
3.3.2. Domenii de utilizare a conductelor din polietilenă.....	60
3.3.3. Cerințele de exploatare ale conductelor din polietilenă.....	61
3.3.4. Practici de instalare a conductelor din polietilenă.....	61
3.3.5. Tehnologii de asamblare ale țevelor și fittingurilor din polietilenă.....	62
3.3.5.1. Sudarea cu jet de aer cald	62
3.3.5.2. Sudarea cu extruder portabil.....	62

3.3.5.3. Sudarea cap la cap cu element încălzitor.....	63
3.3.5.4. Sudarea prin electrofuziune	72
3.3.5.5. Sudarea prin polifuziune	74
3.4. Principiile proiectării conductelor pentru transportul și distribuția gazelor naturale.....	76
3.4.1. Principiile proiectării conductelor pentru transportul gazelor naturale. Calculul hidraulic al conductelor de transport gaze naturale.....	76
3.4.1.1. Regimul de curgere al gazelor prin conducte și calculul coeficientului de rezistență hidraulică	77
3.4.1.2. Relații practice de calcul hidraulic al conductelor magistrale	78
3.4.1.3. Curgerea gazelor în conducte înclinate	79
3.4.1.4. Particularități ale calculului hidraulic al conductelor de transport	79
3.4.1.5. Variația parametrilor gazelor naturale de-a lungul conductei de transport	81
3.4.2. Principiile proiectării conductelor pentru distribuția gazelor naturale.....	84
3.4.2.1. Calculul hidraulic al conductelor de distribuție gaze naturale.....	84
3.4.2.2. Regimul de curgere al gazelor prin conducte și calculul coeficientului de rezistență hidraulică.....	84
3.4.2.3. Metode practice de calcul hidraulic al conductelor de distribuție.....	85
3.4.2.4. Calculul conductelor de distribuție care funcționează în regim de presiune medie sau presiune redusă.....	86
3.4.2.5. Calculul conductelor de distribuție care funcționează în regim de presiune joasă.....	87
3.4.2.6. Particularități ale calculului hidraulic al conductelor de distribuție.....	89
3.4.2.7. Calculul grosimii de perete a țevii conductelor de distribuție gaze naturale.....	90
3.5. Concluzii.....	92
4. Evaluarea teoretică și experimentală a comportării conductelor din polietilenă de înalta densitate.....	93
4.1. Încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice.	93
4.1.1. Încercarea la tracțiune.....	93
4.1.2. Încercarea de duritate	97
4.1.3. Încercarea la compresie	98
4.1.4. Încercarea la șoc mecanic	99
4.1.5. Încercarea la sfâșiere.....	100
4.1.6. Determinarea contracției longitudinale la cald.....	101
4.2. Încercări tehnologice ale conductelor din polietilenă.....	102
4.2.1. Determinarea indicelui de fluiditate la cald.....	104
4.2.2. Determinarea temperaturii de încovoiere sub sarcină.....	106
4.2.3. Comportarea la uzare.....	107
4.3. Comportarea în prezența mediilor de lucru a polietilenei.....	108
4.3.1. Determinarea stabilității termice.....	109
4.3.2. Încercarea de fluaj la tracțiune în medii apoase pe epruvete cu creștătură pe contur.....	110
4.3.3. Încercarea la fisurare sub tensiune prin comprimarea unui inel, ESCR	112
4.3.4. Tenacitatea la rupere pentru starea plană de deformare și viteza de eliberare a energiei de deformare	115
4.4. Încercări pentru determinarea comportării țevelor din polietilenă la propagarea fisurilor..	118
4.4.1. Încercarea PENT (Pennsylvania notch test).....	118
4.4.2. Încercarea FNCT (Full-notch creep test).....	120
4.4.3. Rezistența la propagarea rapidă a unei fisuri	121
4.4.4. Încercarea de determinare a propagării lente a fisurii într-o țevă crestată.....	125
4.4.5. Încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor.....	127
4.4.5.1. Încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor utilizând epruvete tip CT...	127

4.4.5.2. Încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor utilizând epruvete cilindrice crestate	129
4.4.5.3. Încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor pentru diferite viteze de solicitare și diferite temperaturi.....	131
4.4.5.4. Evaluarea comportării de durată a țevelor din PE, prin analiza creșterii fisurii la oboseală, pe epruvete tip bara precrestată	136
4.4.5.5. Influența parametrilor structurali asupra comportamentului la rupere al PEHD.....	139
4.4.5.6. Influența rezistenței la creșterea lentă a fisurii asupra performanțelor pe termen lung, la îmbinările sudate ale țevelor din polietilenă	142
4.4.5.7. Încercări pentru determinarea rezistenței la presiune hidrostatică și la temperatură constantă.....	148
4.5. Evaluarea rezistenței polietilenei de înaltă densitate în prezența defectelor.....	149
4.6 Concluzii.....	154
5. Estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă.....	156
5.1. Modelul lui Arrhenius – aprecieri privind determinarea duratei de viață a materialelor polimerice	156
5.2. Metoda aplicării regulii lui Miner.	160
5.3. Cercetarea duratei de viață a țevelor din polietilenă prin încercarea la presiune interioară.....	161
5.3.1. Metode de extrapolare a încercărilor de rupere sub presiune pentru determinarea rezistenței pe termen lung a materialelor termoplastice pentru țevi SR ISO/TR 9080:1992, ISO/DIS 9080:1999 și ISO 9080:2003(E).....	161
5.3.2 Aparatura și metodologia cercetărilor experimentale.....	165
5.3.3 Rezultatele experimentale și interpolarea acestora.....	169
5.4. Estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă de înaltă densitate prin aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor.....	170
5.4.1. Analiza stării de tensiuni din conductele din polietilenă cu defecte de material.....	171
5.4.2. Cercetarea experimentală a caracteristicilor de material specifice aplicării mecanicii ruperii materialelor.....	172
5.4.2.1. Determinarea factorului critic de intensitate a tensiunilor, K_I	172
5.4.2.2. Determinarea vitezei de propagare a fisurilor, utilizând epruvete de mecanica ruperii de tip compact (CT).	175
5.4.2.3. Cercetarea vitezei de propagare a fisurilor în îmbinările sudate ale țevelor din polietilenă	189
5.4.2.4. Cercetări privind determinarea curbei de durabilitate tensiune/factor de intensitate a tensiunilor - număr de cicluri până la rupere/durabilitate, pe epruvete tip bară cilindrică crestată (Cracked Round Bar, CRB)	197
5.4.3. Cercetări privind elaborarea unui model de calcul pentru evaluarea durabilității conductelor din polietilenă	200
5.5. Comportarea la presiunea interioară.....	208
5.6. Interpretarea rezultatelor experimentale obținute în urma încercării la presiune interioară.....	208
5.7. Concluzii.....	213
6. Concluziile lucrării de doctorat.....	216
6.1. Concluzii finale.....	216
6.2. Contribuțiile originale în lucrare.....	219
6.3. Direcții noi de studiu și cercetare	220
Bibliografie.....	221
Anexa A.....	231
Anexa B.....	251

1. INTRODUCERE

Eficiența unui sistem de conducte depinde, pe lângă costul țevelor și armăturilor, de costul instalării, de costul mentenanței și de durata de viață. Avantajele utilizării conductelor din polietilenă pentru transportul și distribuția gazelor naturale, față de conductele din oțel, pot fi evidențiate prin numeroase caracteristici.

Creșterea rezistenței mecanice a țevelor din polietilenă și implicit a presiunii interioare de exploatare, are următoarele consecințe:

- reducerea grosimii de perete, cu efecte economice importante;
- creșterea productivității operației de extrudare a țevelor;
- reducerea tensiunilor reziduale determinate de operația de sudare;
- posibilitatea instalării conductelor în soluri moi fără pat de nisip.

Modul uzual de deteriorare a conductelor sub presiune din polietilenă de înaltă densitate, îl reprezintă inițierea și apoi creșterea/propagarea fisurilor, în domeniul de comportare fragilă a materialului. Proiectarea conductelor de polietilenă nu se poate baza pe rezultatele încercărilor de scurtă durată, datorită influenței factorilor de exploatare de durată, în principal al fluajului și fluctuațiilor presiunii. De aceea pentru estimarea duratei totale de viață a conductelor din polietilenă utilizate la transportul și distribuția gazelor naturale sub presiune, s-au propus mai multe concepte diferite, care urmăresc să ia în considerare influențele menționate mai sus:

a. încercarea standardizată a țevelor, care constă în solicitarea țevii la presiune interioară, în condiții de temperatură și durată standardizate, cu determinarea duratei până la cedare și extrapolarea rezultatelor încercării pentru durata de exploatare avută în vedere;

b. extrapolarea rezultatelor încercărilor mecanice statice de scurtă durată, efectuate la temperaturi ridicate și/sau în medii agresive cu scopul accelerării proceselor de degradare, prin aplicarea legii lui Arrhenius;

c. aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor pentru determinarea legiților inițierii fisurilor și ale propagării acestora, la temperaturi corespunzătoare condițiilor de exploatare, pe baza încercărilor la solicitări statice și variabile, cu și fără influența mediilor de lucru.

Teza de doctorat își propune să realizeze o analiză critică a principalelor metode de estimare a duratei de viață a conductelor de polietilenă de înaltă densitate pentru transportul și distribuția gazelor naturale, cu elaborarea unei metodologii teoretico-experimentale de estimare a duratei de viață pe baza încercărilor experimentale de scurtă durată.

2. STADIUL ACTUAL AL UTILIZĂRII CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ LA TRANSPORTUL ȘI DISTRIBUȚIA GAZELOR NATURALE

Karl Ziegler și Erhard Holzkamp au inventat în 1953 polietilena de înaltă densitate (PEHD), iar primul a primit premiul Nobel pentru chimie în 1963 pentru inventarea tehnologiei de producere al PEHD.

În România s-au montat țevi/conducte din polietilenă de înaltă densitate (PEHD) cu diametre începând de la 40mm până la 630mm în timp ce pe plan mondial se fabrică țevi cu diametre maxime de 1400mm.

Regimurile de presiune în care se folosesc conductele de mai sus în România sunt prezentate în tabelul 2.1 .

Tabelul 2.1. Regimuri de presiuni si materialele de țevi folosite[2]

Nr.crt.	Presiunea	Valoarea	Material	Obs.
1.	Înaltă	În stațiile de comprimare din instalațiile de utilizare cu presiunea nominală mai mare de $6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (6 bar)	PE100+ PE125	-
2.	Medie	$6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (6 bar) $\div$ $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (2 bar)	Oțel PE100	$4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (4 bar) $\div$ $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (2 bar) – PE80
3.	Redusă	$2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (2 bar) $\div$ $0,05 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (0,05 bar)	Oțel PE80 PE100	-
4.	Joasă	$< 0,05 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (0,05 bar)	Oțel PE80 PE100	-

Evoluția performanțelor țevelor de polietilenă este prezentată în fig. 2.2., conform [124].

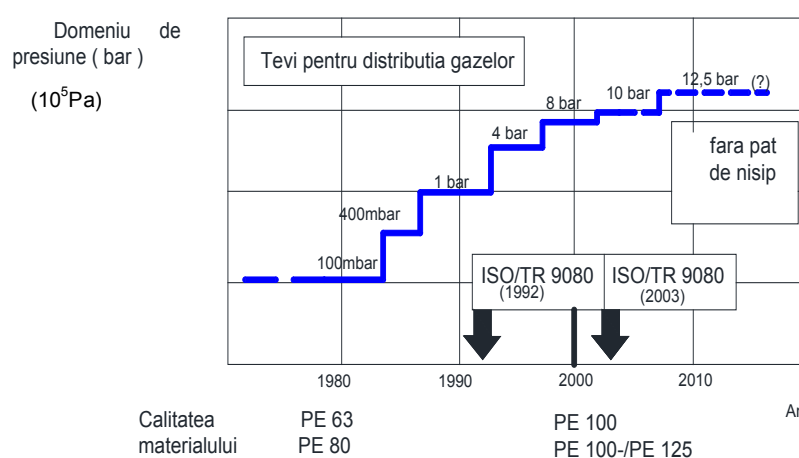


Fig. 2.2. Evoluția performanțelor țevelor din polietilenă destinate distribuției gazelor naturale, [125]

Dezvoltarea clasei de țevi din polietilenă cu rezistența la tracțiune minim garantată de 10 MPa (PE100) a permis utilizarea țevelor din polietilenă la transportul și distribuția gazelor naturale cu presiuni până la 8 bar.

Creșterea presiunii de la 4 bar la 8 bar (soluția 8 bar), în zonele noi de distribuție are în vedere limitarea costurilor cât și a numărului de elemente componente ale rețelei, (reglatoare de presiune, țevi de diferite diametre și fittingurile respective).

Astfel, soluția propusă a redus montarea stațiilor de reglare numai la ramificațiile de legătură de la rețeaua principală de distribuție, la intrarea în zona de distribuție alegându-se un singur diametru Dn=160mm.

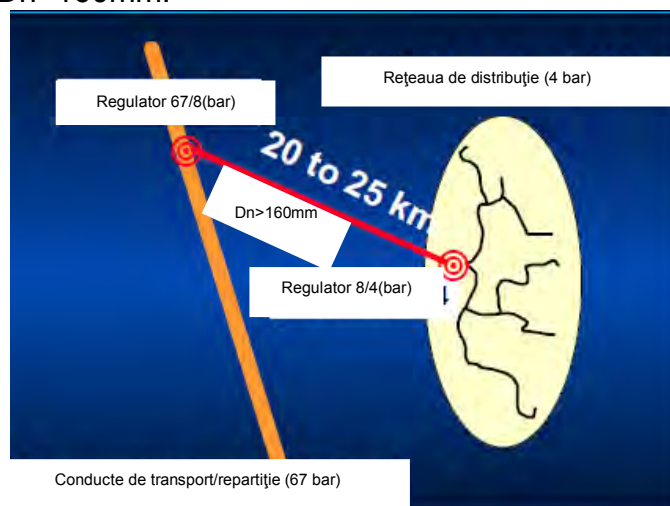


Fig. 2.3. Ramificațiile de legătură ale rețelei de transport/repartiție la rețeaua de distribuție, [135]

Proba hidrostatică a conductei din PE se efectuează pe durata a 2 ore la valoarea de 1,5 x MOP, unde MOP este presiunea maximă de exploatare (maximum operating pressure) (8 bar/4 bar).

Structura rețelelor de tranzit, secundare, terțiare și regimul de presiuni din acestea sunt prezentate în tab. 2.2.

Tabel 2.2 Structura rețelelor

Tip rețea	Regim de presiune	Structura	Rol	Material	Presiune maximă de exploatare	Presiune minimă de exploatare	Diametr u minim (mm)	Risc climatic	Închidere rapidă Depresurizare
TRANZIT	MP 6>p>2bar RP 2>p>0,05bar	Ramificată sau Interconectată	Tranzit	PE 100 PE 80 Oțel PE 100 PE 80 Oțel durabil* Oțel cu risc**	MP: 6 bar MP: 4 bar RP: 2bar RP: 0,6bar	MP: 0,5 bar RP: 0,02bar	160	R 2% R 50%	Închidere vane (max.2km în zona urbană/4km în zona rurală) și purjare prin branșamente, posturi de reglare sau dispozitive de purjare în maxim 15 min.
SECUNDARĂ	MP 6>p>2bar RP 2>p>0,05bar	Ramificată sau Interconectată	Tranzit și Distribuție către clienți	PE 100 PE 80 Oțel PE 100 PE 80 Oțel durabil* Oțel cu risc**	MP: 6 bar MP: 4 bar RP: 2bar RP: 0,6bar	MP: 0,5 bar RP: 0,02bar	90	R 2% R 50%	Închidere vane(o vană pentru cca. 1500 puncte de măsură) și purjare prin branșamente, posturi de reglare sau dispozitive de purjare în maxim 15 min.
TERTIARĂ	MP 6>p>2bar RP 2>p>0,05bar JP P<0,05bar	Ramificată sau Interconectată	Distribuție către clienți	PE 100 PE 80 Oțel PE 100 PE 80 Oțel durabil* Oțel cu risc**	MP: 6 bar MP: 4 bar RP: 2bar RP: 0,6bar JP:0,05bar	MP: 0,5 bar RP: 0,02bar JP:0,015bar	63	R 2% R 50%	Închidere vane (o vană pentru cca. 1500 puncte de măsură în zona urbană respectiv o vană pentru 250 de puncte în zona rurală) și purjare prin branșamente, posturi de reglare sau dispozitive de purjare în maxim 15 min.

2.1.5.1. Obiective și scheme de perspectivă

Schema de perspectivă este un document ce descrie pe termen lung de un deceniu următoarele aspecte:

- zonele potențiale de dezvoltare;
- etapizarea lucrărilor de dezvoltare;
- rețeaua vizată și etapele intermediare.

- **Obiectivele pot fi clasificate astfel:**

Garantarea securității persoanelor și bunurilor prin:

- îmbunătățirea cunoașterii rețelelor de către operator (puncte tari și puncte slabe ale rețelei, structura actuală și viitoare) ;
- alegerea ansamblului de vane strategice (de manevrat în caz de incident) ;

Consolidarea calității actuale și viitoare a serviciului de distribuție prin:

- anticiparea dezvoltărilor viitoare în dimensionarea rețelelor de distribuție;
- localizarea și favorizarea dezvoltărilor cunoscute și potențiale;
- mărirea capacității de distribuție prin creșterea presiunii.

Existența unei viziuni pe termen lung a structurii rețelelor este necesară pentru :

- stabilirea unei planificări a lucrărilor de reabilitare, cu o evaluare financiară corespunzătoare;
- optimizarea investițiilor, opțiune justificată între investiții și mentenanță;
- eficientizarea comunicării interne, (coordonarea și urmărirea lucrărilor).

3. CARACTERISTICI CONSTRUCTIVE, MATERIALE ȘI TEHNOLOGII DE FABRICAȚIE ALE CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ DE ÎNALTĂ DENSITATE

3.1. Materiale plastice utilizate la fabricarea țevelor pentru transportul și distribuția fluidelor

3.1.1. Clasificarea materialelor plastice

a) După origine:

- semi-sintetice;
- sintetice.

b) După comportarea la încălzire:

- termoplaste
- termorigide.

c) După modul de formare:

- polimeri de adiție (completare) – se formează prin adiții de molecule de monomer de la unele la altele într-o succesiune rapidă printr-un mecanism înlățuit, care se numește polimerizare de adiție sau piliadiție. Exemple: polietilena (PE), polipropilena (PP), polistirenul (PS) .

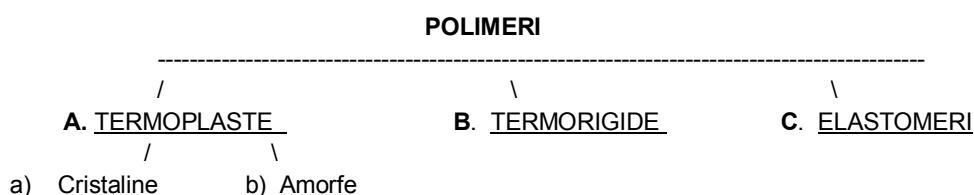
- polimeri de condensare – sunt formați prin reacțiile intermoleculare dintre moleculele monomerului bifuncționale și polifuncționale care au grupurile funcționale reactive.

d) După tipurile de unități de monomer:

- Homopolimer – conține lanțuri cu legături identice la fiecare unitate de monomer. Polimerul are toate moleculele monomerice identice. $-[A-A-A-A-A]-$

- Copolimer – conține lanțuri cu două sau mai multe legături care implică, de obicei, două sau mai multe tipuri de unități de monomer. $-[A-B-A-B-A-B]-$

Clasificarea consacrată a polimerilor este: termoplaste, termoseturi (termorigide) și elastomeri. Termoplastele pot fi împărțite în două tipuri: cristaline și amorf.



3.1.2. Caracteristicile polimerilor

- a) *vâscoelasticitatea polimerilor*
- b) *rigiditatea*
- c) *tenacitatea*
- d) *relaxarea și fluajul polimerilor*
- e) *duritatea*
- f) *gradul de polimerizare*
- g) *cristalinitatea*
- h) *gradul de ramificare:*

- i) *densitatea*: - PE LLD, $d = 0,900 - 0,910 \text{ g/cm}^3$;
 - PELD, $d = 0,910 - 0,930 \text{ g/cm}^3$;
 - PEMD, $d = 0,930 - 0,940 \text{ g/cm}^3$;
 - PEHD, $d = 0,940 - 0,965 \text{ g/cm}^3$.

j) *vâscozitatea*

k) *distribuția maselor moleculare*

l) *proprietăți termice*

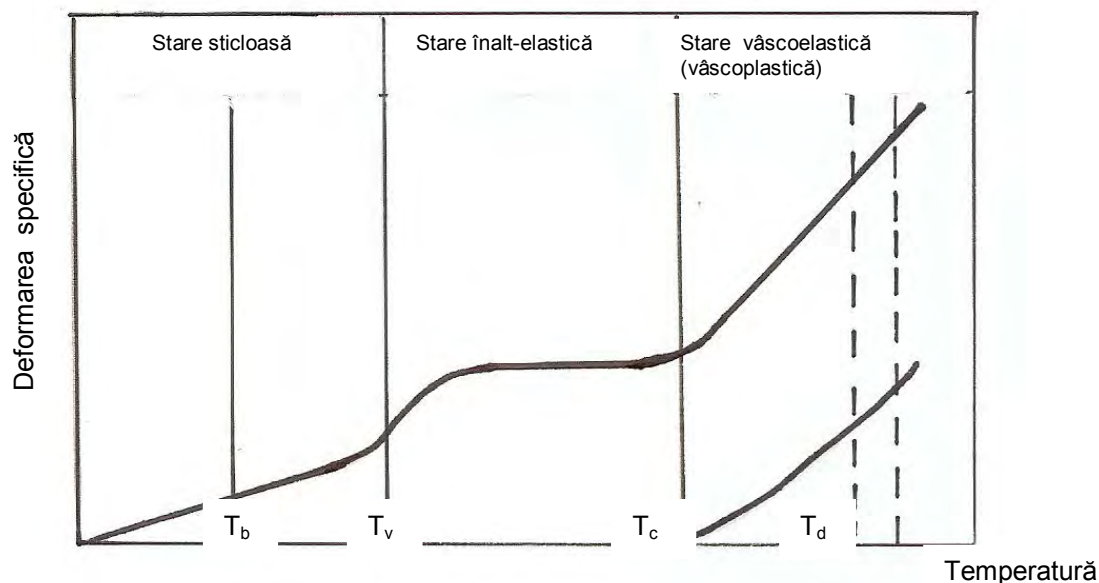


Fig. 3.3. Diagrama de stare termodinamică pentru un polimer liniar amorf,[112].

- *temperatura de vitrifiere a fazei amorfe* (T_v)

- *temperatura de fragilizare* (T_b) – reprezintă temperatura minimă până la care materialul nu este casant.

- *temperatura de curgere* (T_c) – marchează apariția alături de deformația elastică reversibilă a deformației ireversibile provocată de curgerea vâscoasă.

- *temperatura de topire* (T_t) – este caracteristica polimerilor cristalini și marchează trecerea de la starea solidă la starea lichidă;

- *temperatura de degradare termică* (T_d) – este temperatura la care începe degradarea polimerului sub influența căldurii.

- *stabilitatea termică* ;

- *contractia și dilatarea* .

m) *proprietăți electrice*;

n) *proprietăți optice*;

o) *rezistența chimică*;

p) *rezistența la abraziune*;

q) *rezistența la intemperii și modificări de temperatură*;

r) *degradarea la radiații ultraviolete (UV)*;

s) *proprietăți hidraulice*.

3.1.3. Caracterizarea polietilenei

Trecerea monomerului în polimer se efectuează prin două procedee:

1. *Polimerizarea în lanț*, care este o reacție între molecule identice pentru a forma macromolecule fără eliminarea altor compuși;
2. *Policondensarea*, care este o reacție lentă în care moleculele se assemblează, eliminând molecule mici (apa, CO_2).

Criteriile care caracterizează structura macromoleculelor de polietilenă și care determină proprietățile materialului sunt densitatea și fluiditatea care variază în funcție de cristalinitate și de masa moleculară. Polietilena este o substanță macromoleculară parțial cristalină.

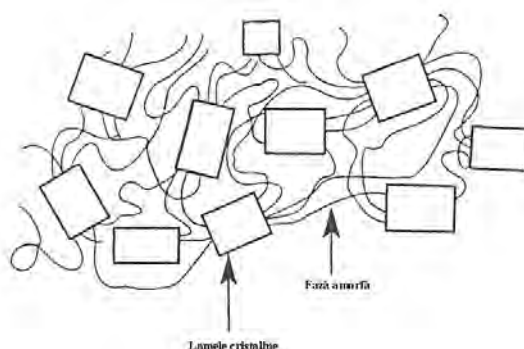


Fig. 3.7. Structura catenei liniare, [224].

3.1.4. Tipuri de polietilenă

Polietilena se clasifică în categorii bazate în general pe valoarea densității și felului ramificațiilor. Proprietățile mecanice ale polietilenei depind semnificativ de gradul și tipul ramificației, de structura cristalină și de greutatea moleculară.

- UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene) – polietilenă cu masă moleculară extrem de mare ;
- ULMWPE (PE-WAX), (Ultra low molecular weight polyethylene) – polietilenă cu masă moleculară extrem de mică ;
- HMWPE (High molecular weight polyethylene) – polietilenă cu masa moleculară mare ;
- HDPE (High density polyethylene) – polietilenă de înaltă densitate ;
- HDXLPE (High density cross-linked polyethylene) – polietilenă reticulară de înaltă densitate ;
- XLPE (Cross-linked polyethylene) – polietilenă reticulată;
- MDPE (Medium density polyethylene) – polietilenă de densitate medie;
- LDPE (Low density polyethylene) – polietilenă de densitate joasă ;
- LLDPE (Linear low density polyethylene) – polietilenă liniară de joasă densitate
- VLDPE (Very low density polyethylene) – polietilenă de densitate foarte joasă .

Tab. 3.13. Calitatile țevilor de PE în comparație cu țevile de OL

Presiunea de exploatare	PE 80	PE 100	Material economisit, greutate (%)	Creșterea în secțiune transversală, (%)	Creșterea în volum de polietilenă datorită grosimii peretelui, (%)
Apa 10 bar	SDR 11	SDR 17	33	16	35
Gaz ≤ 4 bar	SDR 11	SDR 17	35	17	24

Tab. 3.14. Proprietățile și efectele acestora, asupra țevilor din PE, pe durata de viață.

Durată	Proprietate	Efect
Scurtă	Ductilitate	Rezistența la șoc Rezistența la creșterea rapidă a fisurii (RCP)
	Rezistența la tracțiune	Rezistența la presiunea internă
Lungă	Rigiditate	Rezistența la încărcare
	Flexibilitate	Deformarea sub sarcină
Scurtă și lungă	Rezistența chimică (ESCR)	Rezistența la creșterea lentă a fisurii

Țevile din polietilenă prezintă atât o comportare ductilă cât și o comportare fragilă în funcție de factorii de exploatare.

3.3.5. Tehnologii de asamblare a țevilor și fittingurilor din polietilenă

• Clasificarea asamblărilor

Asamblările sunt împărțite în două categorii fundamentale:

- asamblări nedemontabile,
- asamblări demontabile.

• Asamblări nedemonatabile

Asamblările nedemontabile se realizează utilizând unul dintre următoarele procedee de sudare:

- 1) sudarea cu jet de aer cald;
- 2) sudarea cu extruder portabil;
- 3) sudarea cap la cap cu element încălzitor;
- 4) sudarea prin electrofuziune (sudarea cu mufă , teu, șa, fittinguri, toate electrosudabile);
- 5) sudarea prin polifuziune .

c. Calculul de proiectare al conductelor din polimeri solicitate la presiune interioară

Se înregistrează pentru fiecare epruvetă durata solicitării până la apariția unui fenomen de cedare (rupere ductilă, rupere fragilă, pierderea etanșeității). Rezultatele se interpretează statistic obținându-se valorile rezistenței la presiune în funcție de timp și temperatură, $\sigma_{(T,lg,t,\alpha)}$, definită ca fiind mărimea tensiunii circumferențiale (produsă de acțiunea presiunii fluidului din interiorul țevii) la care țeava rezistă, la o temperatura (T), o durata (t), cu probabilitatea (α).

Valorile utile uzuale ale caracteristicii $\sigma_{(T,lg,t,\alpha)}$ sunt:

- rezistența la presiune pe termen lung : $\sigma_{LTHS} = \sigma_{(T,lg,t,\alpha=0,5)}$;
- limita inferioară de încredere (siguranță) a rezistenței pe termen lung:

$$\sigma_{LI} = \sigma_{(T,lg,t,\alpha=0,975)} = \sigma_{LPL}$$

determinate pentru T=20°C și t=50ani

Relația de bază utilizată la calculele de proiectare a conductelor de polietilenă este:

$$p = \frac{2\sigma_{LI}}{SDR-1} \cdot F \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (3.50)$$

unde:

- p este presiunea maximă de serviciu a conductei la temperatura de funcționare T(Mpa);
- SDR – raport dimensional standard, $SDR = D/s$;
- D - diametrul exterior al conductei (mm);
- S - grosimea peretelui conductei (mm);
- F – factorul de siguranță pentru condiții de proiectare standard ($T = 20^\circ\text{C}$ și $t = 50\text{ani}$);
- F_1 – factorul de corectare al F , în funcție de temperatura de funcționare a conductei ;
- F_2 – factorul de corectare al F, în funcție de durata de operare precisă a conductei ;
- $F_1 = 1,325 - 0.0137T$
- $F_2 = 1,547 - 0.097\lg t$

unde:

- T este temperatura ($^\circ\text{C}$);
- t – timp (h).

Asimilând produsul $p = \sigma_{LI} \cdot F \cdot F_1 \cdot F_2$ cu o rezistență admisibilă a materialului țevii, relația 3.50 este dedusă din expresia tensiunii circumferențiale pentru un înveliș cilindric cu grosimea (s), diametrul mediu $D_m = D - s$ și se justifică folosirea în calculele de proiectare a conductelor, a caracteristicilor obținute prin încercarea la presiunea interioară a țevelor.

4. EVALUAREA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A COMPORTĂRII CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ DE ÎNALTĂ DENSITATE

În prezentul capitol se prezintă o analiză critică a principalelor tipuri de încercări de scurtă durată propuse pe plan mondial pentru determinarea experimentală a unor caracteristici de material necesare estimării duratei de viață a conductelor din polietilenă. În acest scop încercările vor fi grupate sub următoarele aspecte:

- încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice;
- încercări tehnologice ale conductelor din polietilenă;
- comportarea în prezența mediilor de lucru;
- încercări pentru determinarea comportării țevelor din polietilenă la propagarea fisurilor;
- încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor la solicitări variabile folosind epruvete CT;
- încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor la solicitări variabile folosind epruvete cilindrice crestate;
- încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor pentru diferite viteze de solicitare și diferite temperaturi.

4.3.4. Tenacitatea la rupere pentru starea plană de deformare și viteza de eliberare a energiei de deformare

Tenacitatea este proprietatea care descrie performanța materialului care conține o fisură, să reziste la rupere. Aceasta reprezintă una din cele mai importante proprietăți ale fiecărui material pentru toate aplicațiile posibile de proiectare. Metodele de încercare, cum ar fi ASTM D 5045, sunt concepute pentru a caracteriza tenacitatea materialelor plastice din punct de vedere al factorului critic de intensitate a tensiunii, K_{IC} și a energiei pe unitatea de suprafață a fisurii sau viteza de eliberare a energiei deformării critice, G_{IC} , la inițierea rupturii.

Modul I de rupere este cel mai frecvent întâlnit și se produce într-un plan normal pe direcția solicitării, caracterizat de factorul K sub forma relației:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \beta}, \quad (4.22)$$

unde: K_I este factorul de intensitate a tensiunilor (tenacitate)

, (MPa·m^{1/2});

σ - solicitarea aplicată, (MPa);

a - lungimea fisurii, (mm);

β - factor geometric, în funcție de dimensiunile tipului de epruvetă folosită.

a) Determinarea tenacității la rupere la starea plană de deformare

Încercarea de tenacitate se face pe epruvete cu configurații de tipul cu o singură crestătură pe o latură sau solicitată (încovoiată) în trei puncte (single edge notch bend, SENB, sau three point bend), așa cum se prezintă în fig. 4.28. b).

Semnificația elementelor din figura este:

B este grosimea minimă care satisface condiția, ca la vârful fisurii, energia deformării plastice să fie minimă (mm);

$W = (B+2B)$, este lungimea totală a fisurii inclusiv zona de desfășurare, cu precrestare cu tot, (mm);

F - este forța la rupere a epruvetelor, (MPa);

A - lungimea prefisurii, (mm).

b) Etapele solicitărilor plane și de tranziție

Când condițiile stării plane de deformare nu există în toată configurația structurală a materialului și se folosește în calculele de proiectare valoarea factorului, K_{IC} , apare riscul creșterii greutateii, (exces de siguranță) produsului și implicit a creșterii costului produsului.

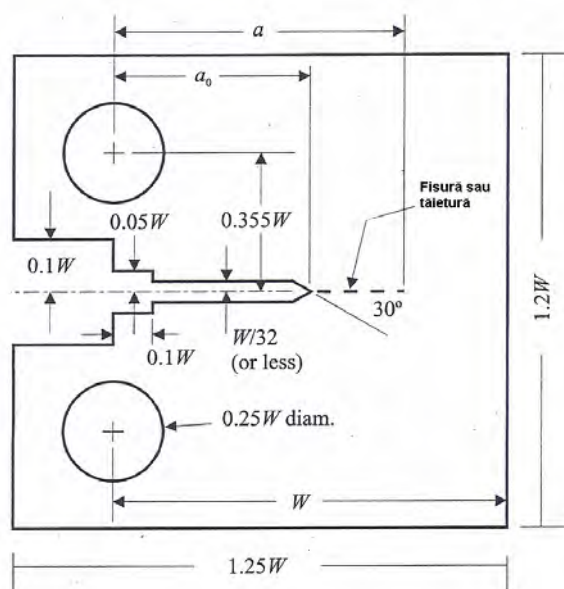


Fig. 4.28. Geometria epruvetelor folosite la încercarea de tenacitate .Epruveta de tip placă precomprimată (CT)

Factorul K_{IC} , (tenacitatea), este folosit pentru calculul lungimi critice a fisurii, datorată solicitării aplicate pe piesa respectivă:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma \cdot Y} \right)^2, \quad (4.23)$$

unde: σ_c este solicitarea critică aplicată care provoacă ruperea, (MPa);
 K_{IC} – deformația plană datorată tenacității, (MPa·m^{1/2});
 a – lungimea fisurii pentru prefisurarea externă sau internă a produsului din material polimeric (mm);
 Y – constanta de material care depinde de geometria epruvetei;
 ($Y = \beta$ din expresia 4.26).

De asemenea valoarea factorului critic de intensitate a tensiunilor, K_{IC} , folosește la calculul tensiunii critice, când lungimea fisurii se evidențiază în masa polimerică a componentului.

$$\sigma_c \leq \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}, \quad (4.24)$$

unde parametrii din expresie, au aceleași semnificații ca mai sus.

4.4.5.1. Încercări pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor utilizând epruvete tip CT

Pornind de la observația ca valoarea coeficientului de asimetrie a ciclului $R=1$ corespunde solicitării statice, echivalentă solicitării la fluaj, în lucrările [145÷150], s-a propus cercetarea comportării simultane la oboseală și fluaj prin încercări la solicitări variabile cu diferite valori ale coeficientului de asimetrie a ciclului R , cu determinarea vitezei de creștere a fisurii. Prin descreșterea sistematică a componentei dinamice a solicitărilor la oboseală, variind coeficientul de asimetrie al ciclului de la valoarea $R=0,1$ la $R=1$ (fluaj-solicitare statică), se realizează extrapolarea durabilităților obținute în cazul încercărilor la oboseală, de scurtă durată, obținându-se durabilitatea în cazul fluajului-solicitare statică.

Câmpul de tensiuni de la frontul fisurii este evidențiat prin factorul de intensitate a tensiunilor, K_I , a carei expresie ia în considerație atât nivelul tensiunii exterioare în zona de amplasare a fisurii, cât și lungimea fisurii, a , precum și un factor geometric, conform expresiei:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \quad (4.29)$$

unde : K_I este factorul de intensitate a tensiunilor pentru modul I, de propagare prin deschidere a fisurii, (MPa·m^{1/2});
 σ – tensiunea în zona de amplasare a fisurii, (MPa);
 a – lungimea fisurii, (mm);
 Y – factor geometric.

Literatura de specialitate oferă numeroase expresii pentru factorul de intensitate a tensiunilor, pentru diferite geometrii ale fisurilor și cazuri de solicitare.

Utilizând epruvete de tip CT prelevate din corpul unei țevi din polietilenă de medie și înaltă densitate, supuse unor solicitări variabile cu coeficientul de asimetrie al ciclului cuprins între 0,1 și 0,6, autorii cercetărilor au evidențiat dependența dintre viteza de creștere a fisurilor, da/dt și factorul de intensitate a tensiunilor de forma, [148] :

$$\frac{da}{dt} = B \cdot K_{I, \max}^4 (1 + R)^{-0,5} \quad (4.30)$$

unde : $R = F_{\min} / F_{\max}$, este coeficientul de asimetrie al ciclului;
 K_I – factorul de intensitate a tensiunilor, (MPa·m^{1/2});
 a – lungimea fisurii, (mm);
 t – timp, (s);
 B – constantă.

Încercările s-au efectuat la diferite temperaturi, evidențiindu-se pentru toate temperaturile, că dependența dintre viteza de creștere a fisurii și variația factorului de intensitate a tensiunilor verifică relația lui Paris, așa cum se vede în fig.4.41. [147]

4.4.5.4. Evaluarea comportării de durată a țevelor din PE, prin analiza creșterii fisurii la oboseală, pe epruvete tip bară precrestată.

Utilizând mecanica ruperii și folosind epruvetele tip bară rotundă precrestată CRB (cracked round bar), încercate la oboseală s-a observat ca în modul de cedare fragilă sunt prezente suprafețele fibrilizate tipice rupturii, precum și faptul că timpul de cedare este dependent de viteza de creștere lente a fisurii, [151].

Creșterea fisurii este influențată de parametrii structurii moleculare, care sunt:

- masa molară medie;
- distribuția masei molare;
- tipul ramificațiilor scurte de lanț, (short-chain branching-SCB);
- distribuția SCB-urilor.

De asemenea, epruvete de tip CRB s-au utilizat pentru încercări la oboseală folosind o mașină de încercare servo-hidraulică, cu o încărcare sinusoidală la frecvența $f=5\text{Hz}$ și cu coeficient de asimetrie $R=0,1$, prezentate în fig.4.55, [155,159] .

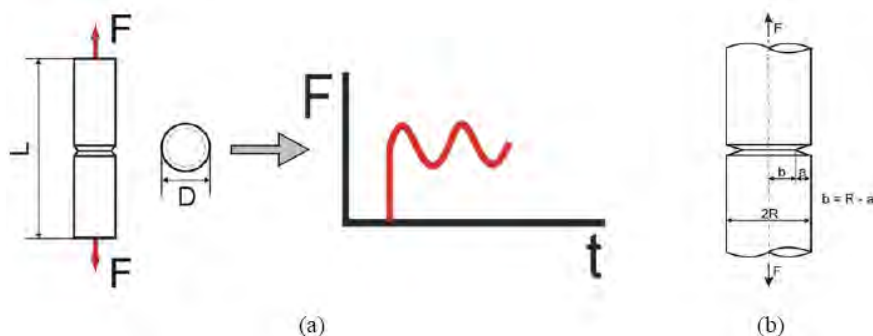


Fig.4.55 a) Epruveta CRB și condițiile de încărcare la oboseală;
b) Geometria și dimensiunile epruvetei CRB.

Încercările s-au efectuat la temperaturile de 23°C și de 80°C . Determinarea factorului de intensitate a tensiunilor s-a efectuat cu relațiile :

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{\pi b^2} \sqrt{\frac{\pi a b}{r}} f(b/r) \quad (4.35)$$

$$f(b/r) = 0,5 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{r} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{b}{r} \right)^2 - 0,363 \left(\frac{b}{r} \right)^3 + 0,731 \left(\frac{b}{r} \right)^4 \right] \quad (4.36)$$

unde : ΔF este diferența dintre $F_{\max}$ și $F_{\min}$,(N);
 r – raza epruvetei, (mm);
 b – raza ligamentului remanent, (mm);
 a – lungimea fisurii, (mm).

Încercările au permis măsurarea lungimilor fisurilor și a deplasării deschiderii fisurilor, (crack opening displacement - COD), iar rezultatele sunt prezentate în coordonate dublu logaritmice, din fig 4.56.

Încercarea FCG s-a efectuat pe epruvete din materiale PE80 și PE100 cu caracteristicile de material prezentate în tab. 4.10. S-a evidențiat faptul că duratele până la rupere sunt mai mari pentru PE100 față de PE 80 (fig. 4.56).

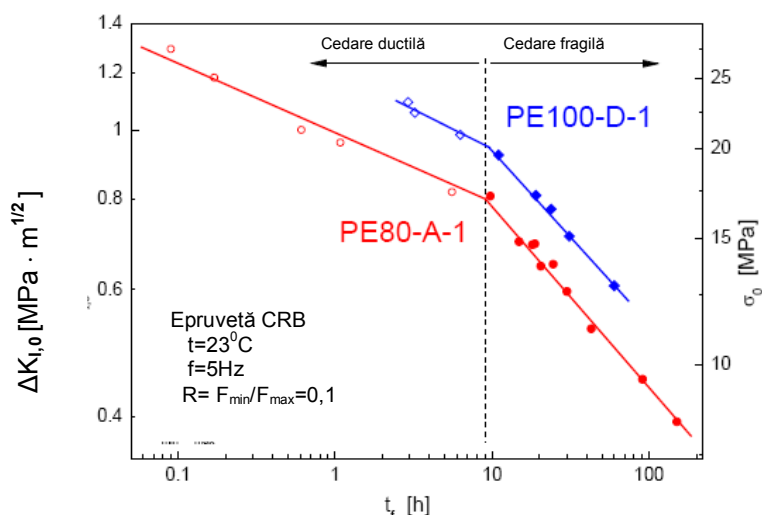


Fig.4.56. Încercările FCG pe epruvetele CRB din PE80 și PE100

Tranziția ductil-fragil pentru PE80 a fost în jurul valorii de $\Delta K_{I,0} \approx 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ iar pentru PE100 în jurul valorii de $\Delta K_{I,0} \approx 0,95 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Suprafețele tipice rupturii pentru ambele moduri de cedare sunt prezentate în fig. 4.57.

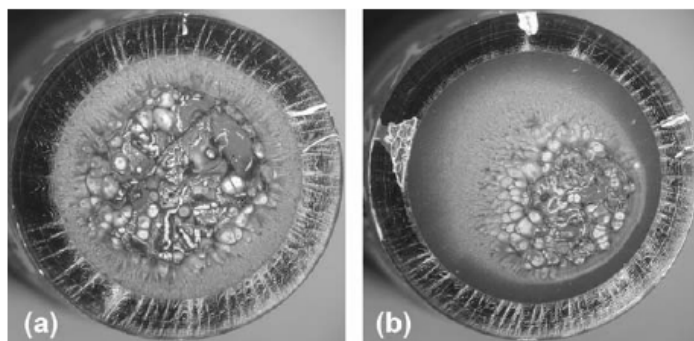


Fig.4.57. Suprafețele rupturii pentru PE100 după încercarea la oboseală pe epruvete CRB ($t=23^\circ\text{C}$, $f=5\text{Hz}$, $R=0,1$)

- a) cedare ductilă $\Delta K_{I,0} \approx 1,09 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
- b) cedare fragilă cauzată de inițierea și propagarea fisurii la $\Delta K_{I,0} \approx 0,61 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.
- c)

5. ESTIMAREA DURATEI DE VIAȚĂ A CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ

Deoarece încercările de lungă durată ale țevelor din polietilenă implică costuri ridicate și perioade mari de timp, a fost necesară dezvoltarea unor metode de încercare accelerate a materialului sau a țevelor din polietilenă, care să permită extrapolarea rezultatelor privind durata de viață obținută prin încercări accelerate, la condițiile reale de exploatare (presiune, temperatură și mediu de lucru) pe termen lung a conductei.

Pentru estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă se pot utiliza următoarele metode/modele:

- metoda Arrhenius, care ia în considerație numai influența temperaturii asupra comportării de durată;
- metoda aplicării regulii lui Miner;
- metoda standardizată de extrapolare a rezultatelor încercării la presiune interioară și temperatură a țevelor, conform SR ISO/TR 9080:1992 și ISO/DIS 9080:1999;
- metoda bazată pe aplicarea principiilor mecanicii ruperii materialelor.

5.4. Estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă de înaltă densitate prin aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor

Conductele din polietilenă pot prezenta diferite defecte de material, imperfecțiuni geometrice și defecte determinate de tehnologiile de asamblare și montaj. Efectul acestora asupra duratei de viață a conductei se manifesta în timp, sub acțiunea solicitărilor mecanice, uneori asociate și cu fenomene de degradare în prezența mediilor agresive (coroziunea sub tensiune) prin inițierea și propagarea unor fisuri, de la baza unui defect.

În general, conductele din polietilenă pot ceda ca urmare a dezvoltării unei fisuri, generată de una din următoarele cauze :

1. Deteriorarea produsă de către o terță parte.
2. Cedarea îmbinărilor elementelor de conductă, ca urmare a unei tehnologii de asamblare, sudare, necorespunzătoare.
3. Cedarea materialului , ca urmare a modificării în timp a caracteristicilor acestuia, a proiectării necorespunzătoare a conductei sau datorită unei tehnologii de fabricare a țevii neconformă.

5.4.2.2. Determinarea vitezei de propagare a fisurilor, utilizând epruvete de mecanica ruperii de tip compact (CT)

Cunoscând valoarea forței, lungimea fisurii și dimensiunile epruvetei s-a calculat valoarea factorului de intensitate a tensiunilor la vârful fisurii, K_I , folosind modelele expuse în ASTM E 399, ASTM 1820, ASTM E 647-05 și NACE TM 0177/90.

a) – conform ASTM E 647-05 :

$$K_I = \frac{F_Q}{\sqrt{B \cdot B_n \cdot W}} \cdot \frac{2 + \alpha_Q}{(1 - \alpha_Q)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha_Q - 13,32\alpha_Q^2 + 14,72\alpha_Q^3 - 5,60\alpha_Q^4), [K_{I,1}] \quad (5.35)$$

în care : F_Q este forța care se determina din graficul dependenței $F=f_Q(\sigma)$, așa cum se prezintă în fig. 5.3.;
 $\alpha_Q = a_Q/W$, a_Q – lungimea fisurii la sfârșitul încercării.

b) – conform NACE TM 0177/90 :

$$K_I = \frac{F \cdot a \left(2\sqrt{3} + 2,38 \cdot \frac{h}{a} \right) \left(\frac{b}{b_n} \right)^{1/\sqrt{3}}}{b \cdot h^{3/2}}, [K_{I,2}]. \quad (5.36)$$

unde: F este forța de solicitare ,(N);
 a – lungimea fisurii,(mm);
 h – distanța între vârful precrestării și axa de aplicare a forței, (mm);
 b – grosimea epruvetei, (mm);
 b_n – distanța dintre vârfurile precrestărilor laterale ale epruvetei, (mm).

S-au folosit epruvete din polietilenă de tip PEHD100 , decupate din țevă cu Dn355mm, s=33mm, SDR11.

Încercările preliminare au arătat ca pentru a asigura propagarea fisurii în planul creștăturii epruvetei, este necesară prelucrarea pe ambele fețe ale epruvetei a două creștături laterale, în lungul creștăturii inițiale.

Epruvetele tip CT, sunt prelucrate prin frezare și au geometria și dimensiunile prezentate în fig.5.7. . După prelucrare, creștătura s-a adâncit cu o prefisură realizată cu o lamă de ras pentru ca raza la vârful acestei creștături să fie cât mai mică.

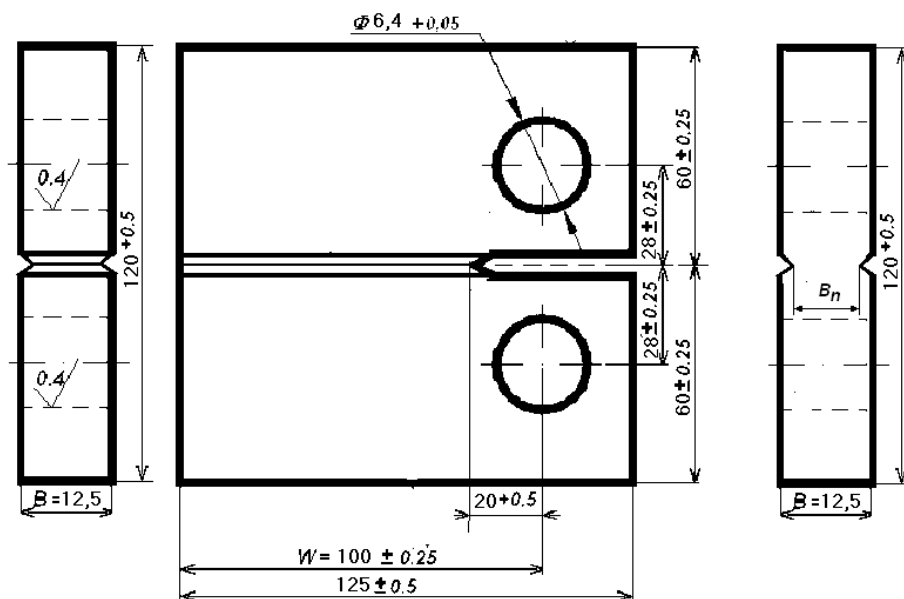


Fig.5.13. Epruveta CT cu creștătura și prefisurată

Tabelele A.1.÷ A.6. din anexa A conțin toate datele numerice necesare trasării graficelor de dependență forța – deplasare, forța – creșterea fisurii, forța – lungimea fisurii, lungimea fisurii – timp, pentru ca apoi să se calculeze dependențele K_I – timp, K_I – viteza de creștere a fisurii și $da/dt - K_I$, prezentate în fig. 5.16 ÷ 5.23 și în fig. 5.25.

În fig.5.16 se prezintă suprapunerea a șase grafice corespunzătoare vitezelor de solicitare, constante.

În fig.5.16 se prezintă dependențele forță-deplasarea bacurilor pentru șase viteze de solicitare.

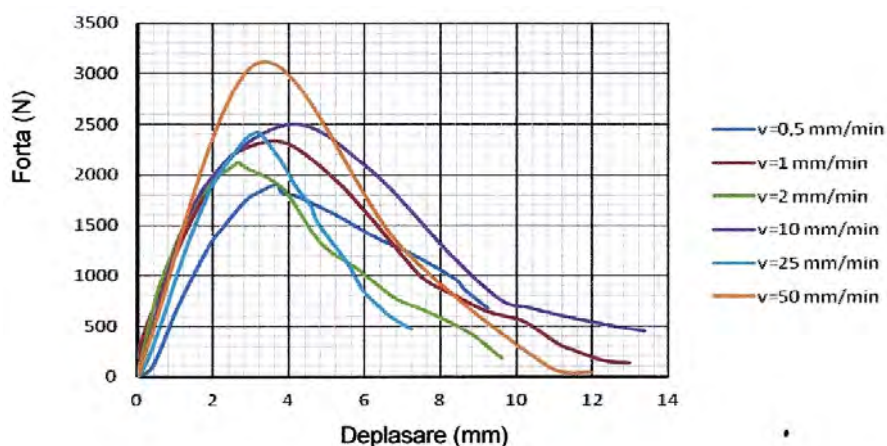


Fig.5.16. Dependența, forță - deplasare, cu valori obținute pe epruvete tip CT, la $t=23^{\circ}\text{C}$, pentru șase viteze diferite de solicitare

În fig.5.17, sunt prezentate graficele dependenței forță-creșterea fisurii Δa , la temperatura ambiantă și diferite viteze de solicitare.

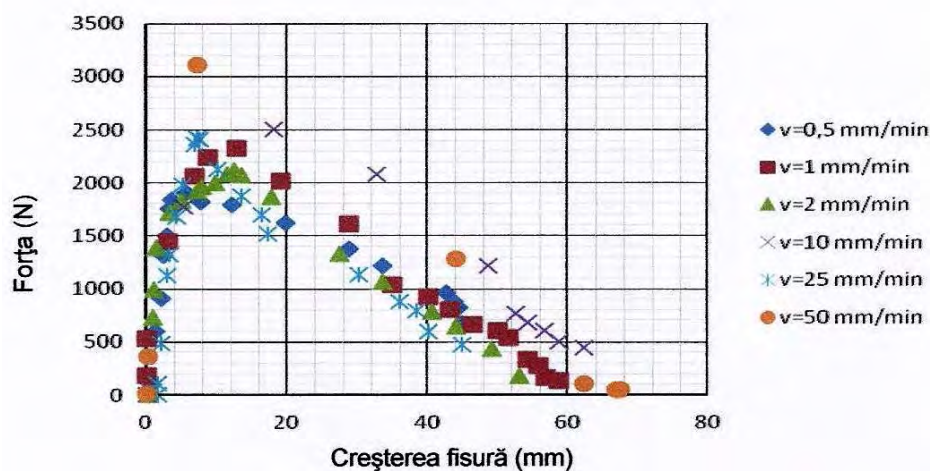


Fig.5.17. Rezultatele experimentale obținute pe epruvete tip CT, care sub forma grafică evidențiază influența solicitării (forței), asupra inițierii și dezvoltării (creșterii) fisurii.

Valoarea inițială de pe axa orizontală (20mm), corespunde distanței de la vârful creștăturii epruvetei până la dreapta care unește centrele alezajelor bacurilor de fixare ale epruvetelor, prezentată în fig. 5.19.

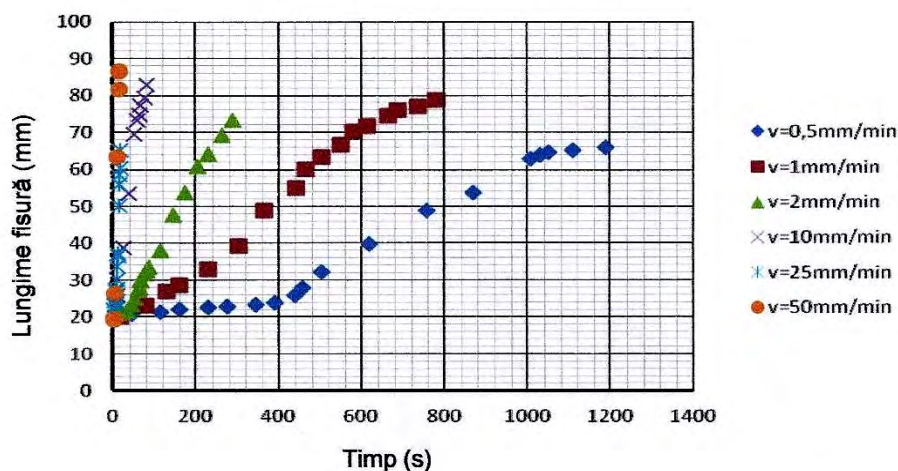


Fig.5.19. Influența timpului asupra valorii lungimii fisurii, pe epruvete tip CT din PEHD

Pentru determinarea valorilor factorului de intensitate a tensiunilor, K_I , s-a utilizat expresia propusă în ASTM E 647-05/2008 (relația 5.35), valorile obținute fiind simbolizate $K_{I,1}$.

Variația în timp a valorii factorului de intensitate a tensiunilor este reprezentată în fig. 5.20., pentru cele șase viteze de încercare.

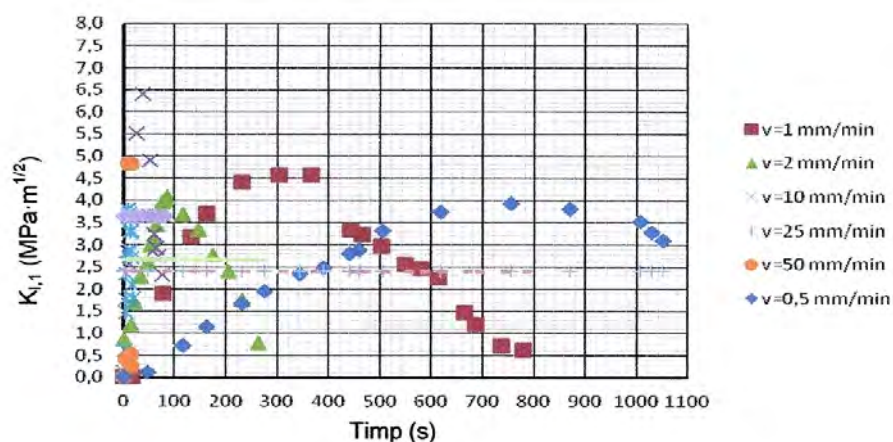


Fig.5.20 Influența timpului asupra valorilor factorului de intensitate a tensiunilor $K_{I,1}$.

În fig. 5.21 sunt prezentate graficele dependenței lui $K_{I,1}$ de viteza de creștere a fisurii, în aceleași condiții de temperatură și cu aceleași viteze constante de solicitare.

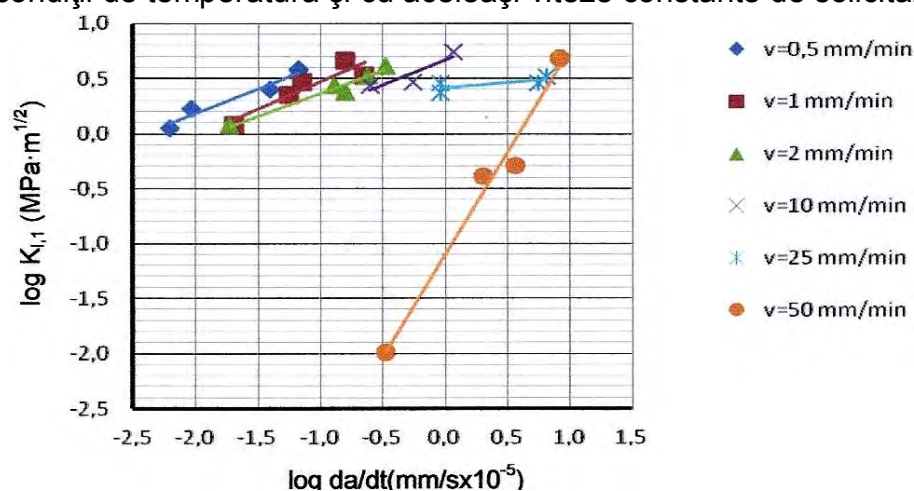


Fig.5.21 Dependența factorului de intensitate a tensiunilor $K_{I,1}$, de valorile vitezei de creștere a fisurii.

Dependența vitezei de creștere a fisurii față de $K_{I,1}$, în condițiile de temperatură ambiantă și diferite viteze de solicitare, este prezentată în fig. 5.22.

Reprezentată în coordonatele dublu logaritmice dependența liniară dintre factorul de intensitate a tensiunilor și viteza de propagare a fisurilor conduce la o expresie de tipul celei propuse de Paris.

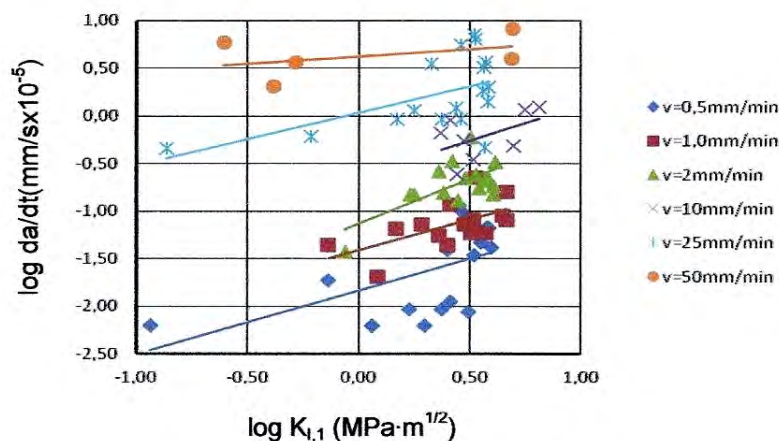


Fig.5.22 Viteza de creștere a fisurii în funcție de valoarea factorului de intensitate a tensiunilor, pentru viteze de solicitare de valori diferite.

Spre exemplu, pentru $K_{I,1}=3,26439 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $da/dt=0,03401\text{mm/s}$ (vezi anexa A: tab. A1) și pentru viteza de solicitare $v=0,5\text{mm/min}$, relația lui Paris are următoarea expresie:

$$\frac{da}{dt} = 5,32 \cdot 10^{-8} \cdot K_{I,1}^{4,1}, \quad (5.38)$$

În cazul solicitării $v=2\text{mm/min}$ din graficul prezentat în fig. 5.22. relația lui Paris se poate scrie sub forma:

Pentru celelalte viteze de solicitare se pot scrie relații similare care verifică aceeași lege empirică.

În fig.5.23., sunt prezentate graficele de dependență a vitezelor de creștere a fisurii, față de factorul $K_{I,1}$, pentru șase viteze de valori diferite de solicitare, în condițiile temperaturii ambiante $t=23^\circ\text{C}$.

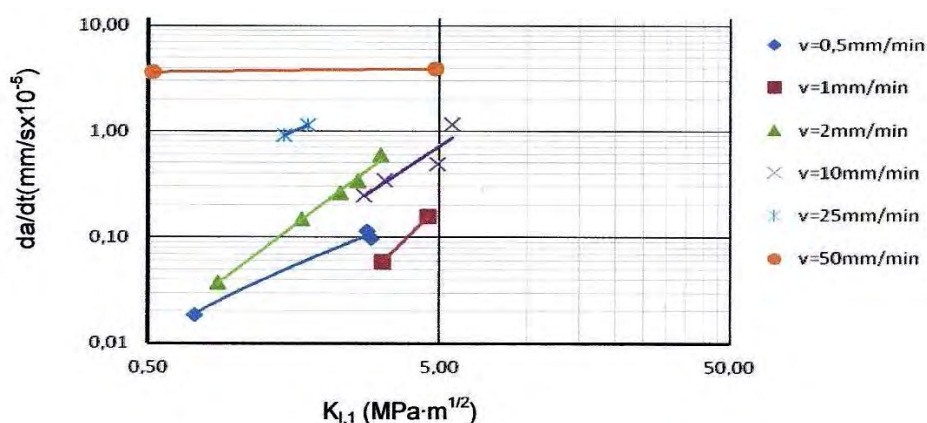


Fig.5.23. Influența factorului $K_{I,1}$ asupra vitezei de creștere a fisurii.

Graficul dependenței lungimii fisurii, de factorul $K_{I,1}$, la temperatura ambiantă și la diferite viteze de solicitare, este prezentat în fig.5.25.

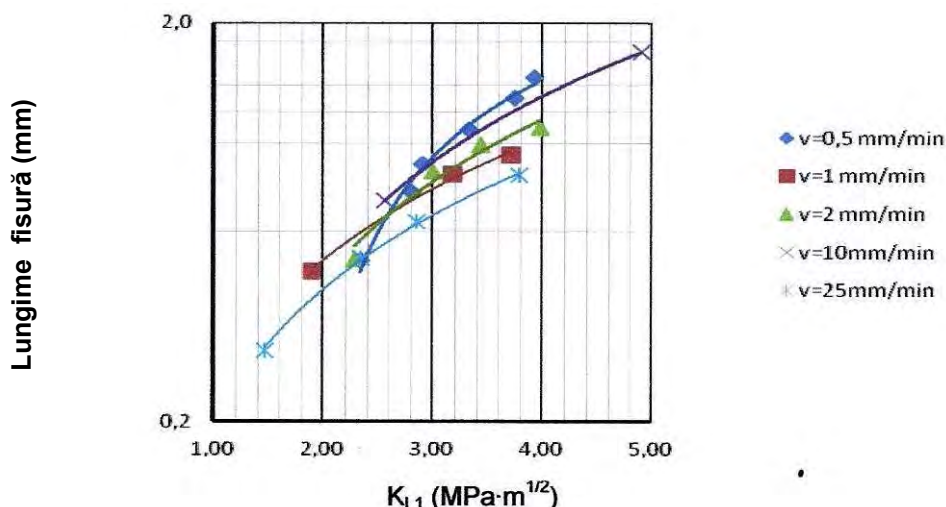


Fig.5.25. Dependența lungimii fisurii de factorul $K_{I,1}$ la epruvetele tip CT la temperatura 23°C și la viteze de solicitare diferite

Valorile lui $K_{I,1}$ influențează relativ puțin creșterea fisurii în polietilene, indiferent de vitezele de solicitare.

În fig. 5.26. sunt prezentate graficele dependenței lui $K_{I,2}$, în funcție de timp, la temperatura ambiantă și la diferite viteze de solicitare.

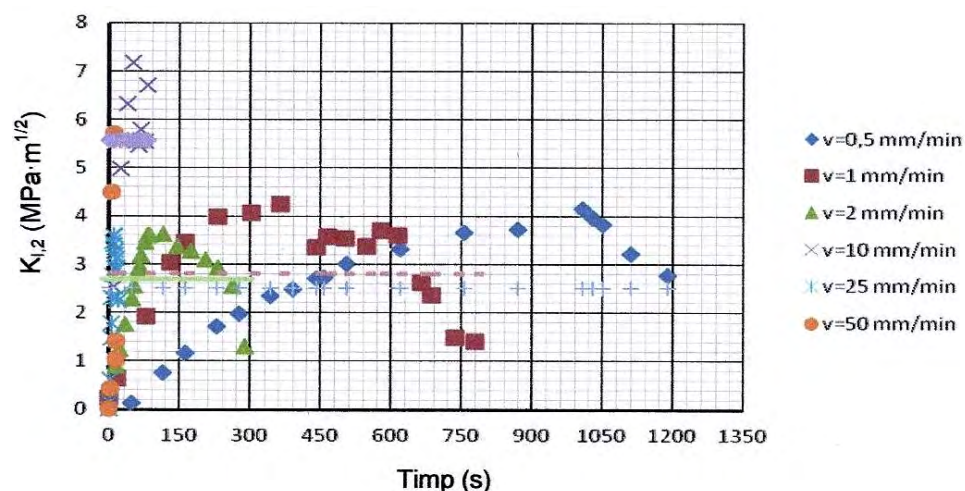


Fig.5.27. Variația lui $K_{I,2}$ în funcție de timp, obținută cu rezultatele pe epruvetele tip CT din PE100 la temperatura 23°C

Graficele dependenței $K_{I,2}$, în funcție de viteza de creștere a fisurii, pentru $t=23^{\circ}\text{C}$ și diferite viteze de solicitare, sunt prezentate în fig. 5.28

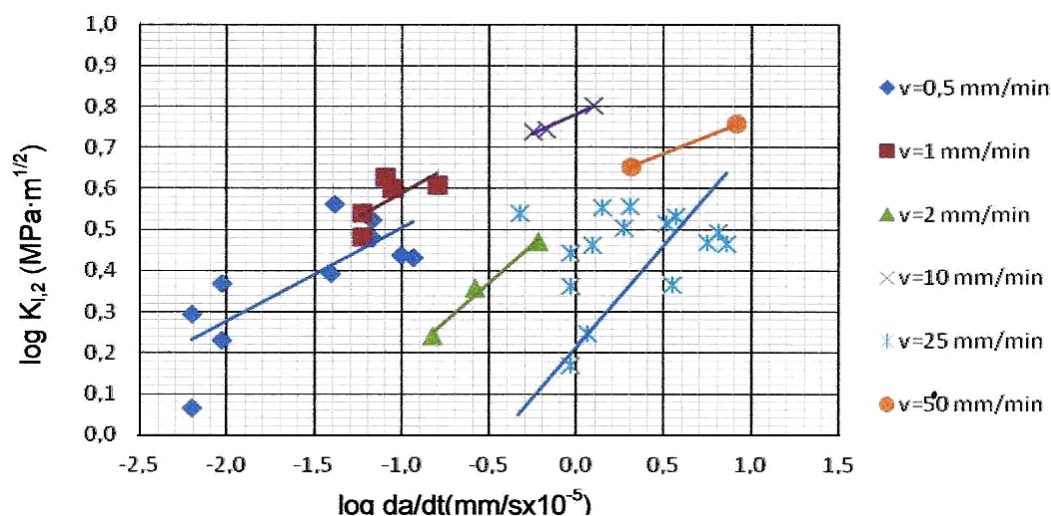


Fig.5.28. Rezultatele obținute pe epruvetele tip CT, prezentate grafic sub forma dependenței lui $K_{I,2}$, de viteza de creștere a fisurii.

În fig. 5.29 este prezentat graficul vitezei de creștere al fisurii, în funcție de $K_{I,2}$, pentru temperatura de 23°C și diferite viteze de solicitare.

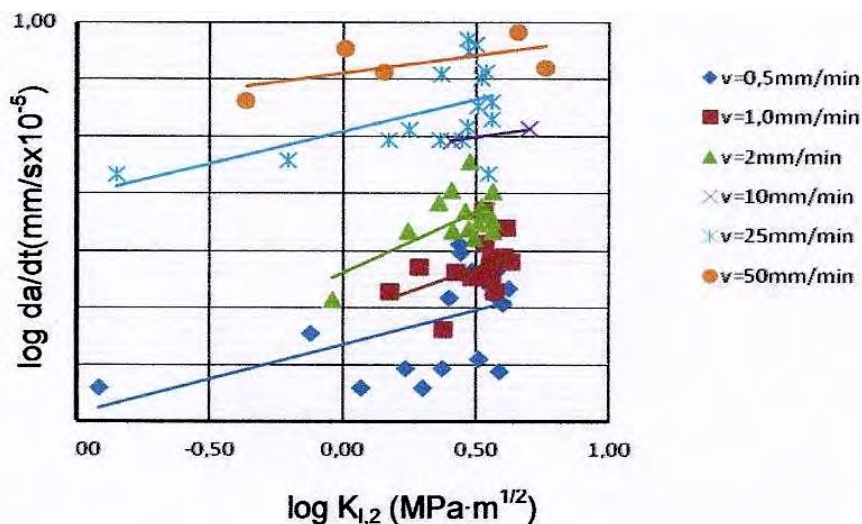


Fig.5.29. Viteza de creștere a fisurii în funcție de valoarea factorului de intensitate a tensiunilor pentru diferite viteze de sollicitare

Reprezentată în coordonate dublu logaritmice, dependența liniară dintre factorul de intensitate al tensiunilor și viteza de propagare a fisurilor conduce la o expresie de tipul celei propuse de Paris.

Spre exemplu, pentru viteza de sollicitare $v=0,5\text{mm/min}$, $K_{I,2}=3,95934\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ și $da/dt=0,03401\text{mm/s}$ (conform anexa A, tab. A.1), relația lui Paris are următoarea expresie :

$$\frac{da}{dt} = 2,76 \cdot 10^{-8} \cdot K_{I,2}^{4,1} \quad (5.41)$$

Graficul de creștere a fisurii în funcție de factorul $K_{I,2}$, este prezentat în fig. 5.30, în condițiile $t=23^\circ\text{C}$ și pentru diferite viteze de sollicitare.

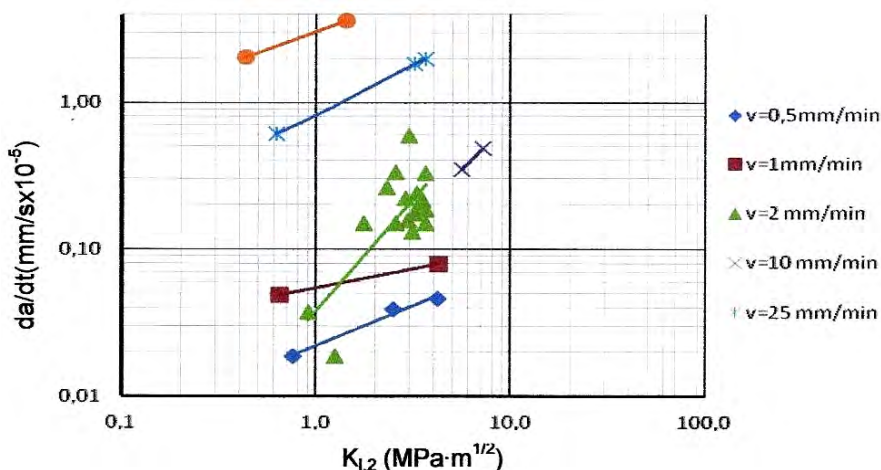


Fig.5.30. Dependența vitezei de creștere a fisurii, în funcție $K_{I,2}$, la temperatura 23°C și viteze de sollicitare diferite

În fig. 5.31. este prezentat graficul dependenței lungimii fisurii, în funcție de $K_{I,2}$, pentru temperatura de 23°C și diferite viteze de sollicitare.

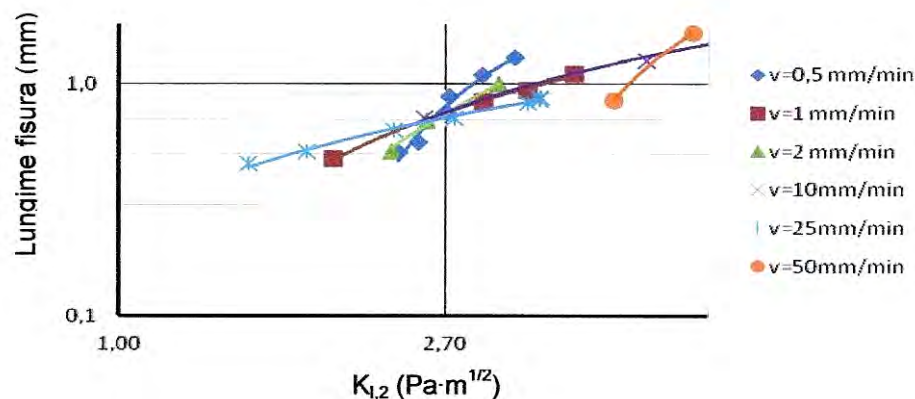


Fig.5.31. Lungimea fisurii în funcție de $K_{I,2}$ la epruvete din PE la temperatura 23°C și la viteze diferite de solicitare

Se observă că, independent de viteza de solicitare, dependența dintre lungimea fisurii și factorul de intensitate al tensiunilor poate fi considerată cu o bună aproximație ca fiind liniară, în acest fel se confirmă relația lui Paris.

În timpul experimentelor s-au observat instabilități în propagarea fisurilor până la rupere, manifestate în aspectul neregulat al curbelor de tip forță-deplasare și forță-lungimea fisurii.

5.4.2.4. Cercetări privind determinarea curbei de durabilitate tensiune/factor de intensitate a tensiunilor - număr de cicluri până la rupere/durabilitate, pe epruvete tip bară cilindrică crestată (Cracked Round Bar, CRB).

Încercările s-au efectuat pe epruvete din PE100, SDR11 prelevate din peretele unei țevi cu Dn 355 și cu grosime de perete egală cu $s=33\text{mm}$. Epruvetele au fost de tip bară rotundă, prefisurată, CRB, (cracked round bar), care au fost prelucrate prin strunjire, după care au fost crestate circumferențial, apoi crestătura a fost adâncită cu lama de ras nouă realizându-se astfel un concentrator circular de tensiuni așa cum se prezintă în fig. 5.36.

Încercarea s-a efectuat pe mașina universală INSTRON Model 8801 și a constat în supunerea epruvetelor la solicitări variabile prin cicluri oscilante de tracțiune cu $R = F_{\min} / F_{\max} = 0,1$ și frecvența $f = 1\text{Hz}$, în aer. Epruvetele au fost solicitate până la rupere, înregistrându-se pentru fiecare nivel al solicitării numărul de cicluri până la rupere respectiv durata până la rupere în ore. Au fost supuse experimentărilor un număr de nouă epruvete.

Nivelul solicitărilor este apreciat prin mărimea variației factorului critic de intensitate a tensiunilor ΔK , determinată cu relația, [71],[158] :

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{\pi b^2} \sqrt{\frac{\pi a b}{R}} f\left(\frac{b}{R}\right) \quad (5.44)$$

unde:

$$\Delta F = F_{\max} - F_{\min}, (\text{N});$$

a , b și R mărimi geometrice conform schiței epruvetei, (mm);

$f\left(\frac{b}{R}\right)$ se determină cu relația:

$$f\left(\frac{b}{R}\right) = 0,5 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{R} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{b}{R} \right)^2 - 0,363 \left(\frac{b}{R} \right)^3 + 0,731 \left(\frac{b}{R} \right)^4 \right] \quad (5.45)$$

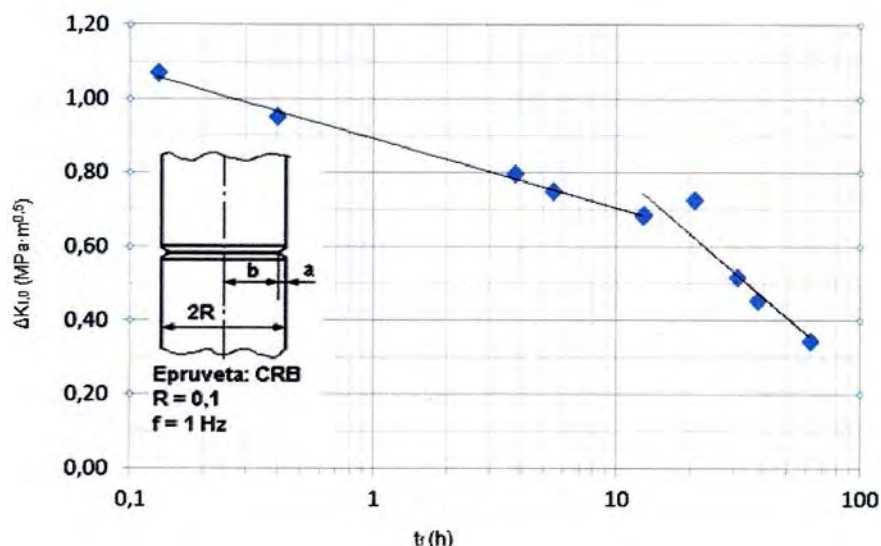


Fig. 5.42 Geometria epruvetei și rezultatele încercărilor la oboseală

În coordonate dublu logaritmice dependența tensiune-număr de cicluri până la rupere este liniară.

Rezultatele cercetărilor prezentate în tab. 5.3. și fig. 5.42. au evidențiat faptul că odată cu scăderea solicitării, crește durata până la rupere. Spre deosebire însă de oțeluri, unde aceasta dependență este liniară, la polietilenă se constată două domenii distincte privind comportarea la oboseală:

- peste o anumită valoare a solicitării comportarea este ductilă;
- sub aceasta valoare comportare este cvasifragilă.

Trecerea de la comportarea ductilă la cea cvasifragilă s-a produs aproximativ la valoarea $\Delta K_I = 0,8$ MPa.

Încercarea reprezintă o metodă de evaluare a comportării PEHD la ruperea sub acțiunea solicitărilor variabile, precum și a comportării la propagarea fisurilor.

Încercarea permite compararea diferitelor calități de polietilenă, clasificându-le.

Avantajul metodei este acela că permite reducerea substanțială a duratei încercărilor pentru caracterizarea diferitelor sorturi de materiale.

Defectele îmbinărilor sudate constituie zone de inițiere a proceselor de rupere. De aceea, s-au analizat discontinuitățile și defectele îmbinărilor sudate, [158],[71].

La *ruperea ductilă*, epruvetele prezintă o suprafață de rupere la care practic lipsește aria corespunzătoare propagării fisurii, spre deosebire de epruvetele cu *rupere cvasifragilă*, la care după inițierea fisurii, aceasta se propagă cu formarea unei suprafețe netede. După atingerea unei anumite adâncimi a fisurii, tensiunea din ligament crescând, are loc ruperea finală cu caracter ductil. Fisurile nu au evoluat simetric pentru toate epruvetele, având drept cauze probabile excentricități ale aparatului de încercare sau neomogenități ale materialului.

5.4.3. Cercetări privind elaborarea unui model de calcul pentru evaluarea durabilității conductelor din polietilenă

Estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă de înaltă densitate în domeniul de solicitări corespunzător presiunilor uzual utilizate în distribuția gazelor naturale, are la bază faptul că în acest domeniu rupturile se produc prin inițierea fisurilor de la defecte locale și propagarea lor lentă, comportarea materialului având caracter cvasifragil (domeniul II al diagramei din fig. 4.11.). Acest mecanism de rupere este bine descris pe baza principiilor și conceptelor mecanicii ruperii materialelor, dezvoltată și larg aplicată pentru structurile metalice.

Pentru elaborarea unui model de estimare a duratei de viață a unei conducte din polietilenă solicitată la presiune interioară, s-a considerat că aceasta prezintă un defect exterior sub forma unei fisuri longitudinale eliptice cu adâncimea „a” și lungimea la nivelul suprafeței exterioare de „2c”, fig. 5.44.

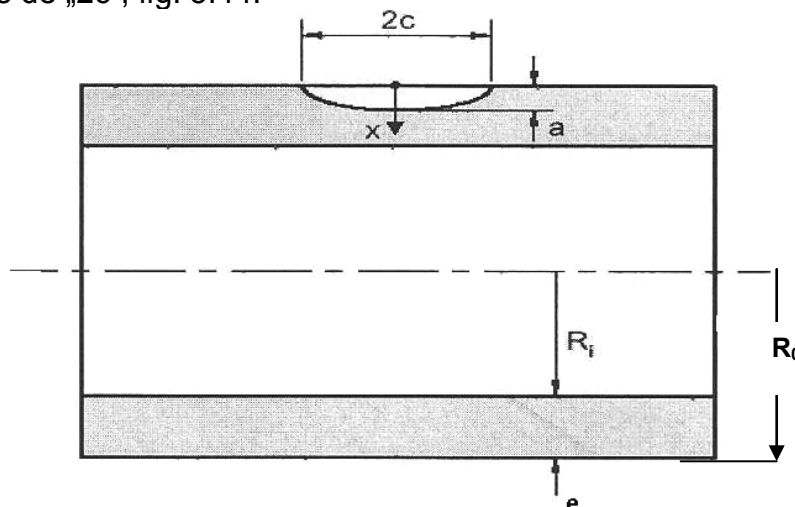


Fig.5.44. Geometria fisurii nepătrunse în peretele (grosimea) țevii din polietilenă solicitată hidrostatic la interior.

Durata de viață a conductei, considerată până la momentul propagării fisurii pe toată grosimea peretelui țevii, s-a determinat prin integrarea expresiei vitezei de propagare a fisurilor (relația 5.40). Limitele de integrare sunt adâncimea inițială a defectului, fisurii, a_0 , și grosimea de perete a conductei, e , (notatii conform API 579, [220]).

Relația (5.40), poate fi scrisă sub forma:

$$dt = \frac{da}{A \cdot K(a)^{m_p}}, \quad (5.47)$$

care prin integrare conduce la determinarea duratei de viață a conductei:

$$\tau = \int dt = \int_{a_0}^e \frac{da}{A \cdot K(a)^{m_p}} = \int_{a_0}^e \frac{da}{5,54 \cdot 10^{-8} \cdot K_I^{4,66}}, \quad (5.48)$$

Expresia evidențiază faptul că erori mici în determinarea factorului de intensitate a tensiunilor sunt amplificate de faptul că exponentul m_p , are valori importante (pentru cazul cercetat $m=4.66$). Ca urmare, este foarte importantă determinarea cât mai exactă a factorului de intensitate a tensiunilor și a variației acestuia, odată cu creșterea adâncimii fisurii, pe parcursul propagării acesteia, $K(a)$.

În literatura de specialitate s-au propus diferite proceduri pentru determinarea factorului de intensitate a tensiunilor, unele dintre cele mai utilizate expresii fiind prezentate în BS 7910, [218], R6, [219], și API 579, [220]. În paralel există și posibilitatea să se obțină o

expresie a factorului de intensitate a tensiunilor utilizând metode aproximative, ca metoda elementului finit.

Conform standardului britanic BS 7910, [218], Anexa M, factorul de intensitate a tensiunilor se calculează utilizând expresia generală (relația 5.51), în care σ caracterizează starea de tensiuni, iar Y ia în considerație dimensiunea finită a piesei, forma fisurii, poziția frontului fisurii, efectul de concentrare a tensiunilor s.a.m.d.

Pentru factorul Y_σ , se utilizează expresia :

$$Y_\sigma = (Y_\sigma)_p + (Y_\sigma)_s, \quad (5.49)$$

în care: $(Y_\sigma)_p$ și $(Y_\sigma)_s$, reprezintă contribuțiile tensiunii primare (de membrană) și ale tensiunii secundare (de încovoiere, care în cazul solicitării conductei numai la presiune interioară, este nulă).

Pentru calculul lui $(Y_\sigma)_p$, se propune relația:

$$(Y_\sigma)_p = M \cdot f_W \cdot [k_{tm} \cdot M_{km} \cdot M_m \cdot P_m + k_{tb} \cdot M_{kb} \cdot M_b \cdot \{P_b + (k_m - 1)P_m\}] \quad (5.50)$$

Rezultatele prezentate în fig.5.34 ; (FITNET FFS-MK7, fig.5.1.), arată că practic nu există diferențe între rezultatele celor trei metode, (considerând de exemplu $a/2c=0,1$; B reprezentând grosimea de perete a conductei). Ca urmare, pentru estimarea duratei de viață a unei conducte din polietilenă cu defecte la calculul factorului de intensitate a tensiunilor, s-a optat pentru metoda propusă în API 579, [220], unde expresia de calcul a factorului de intensitate a tensiunilor este :

$$K_I = \frac{p \cdot R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \cdot \left[2G_0 + 2G_1 \left(\frac{a}{R_0} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_0} \right)^2 + 4G_3 \left(\frac{a}{R_0} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_0} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}}, \quad (5.52)$$

unde : p este presiunea interioară, (MPa);

elementele geometrice sunt prezentate în fig.5.35.;

R_i – raza interioară a țevii, (mm);

$R_0 = R_i + t$, raza exterioră a țevii, (mm);

t – grosimea peretelui țevii, (mm);

a – adâncimea fisurii, (mm);

$2c$ – lungimea fisurii, (mm);

Q – factor de formă care se calculează în funcție de raportul $x=a/c$ cu

relația :

$$Q = 1 + 1,464 \cdot x^{1,65}, \quad (5.53)$$

G_0 și G_1 , se calculează pentru un punct de la vârful fisurii cu relația :

$$G_0 = \sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 A_{ij} \beta^i$$

$$G_1 = \sum_{i=0}^6 \sum_{j=1}^6 A_{ij} \beta^i \quad (5.54)$$

unde : coeficienții A_{ij} , se dau sub formă tabelară în funcție de raportul t/R , al țevii și de rapoartele a/c și a/t ale defectului de tip fisură.

Coeficienții G_2 , G_3 , G_4 se calculează în funcție de G_0 și G_1 cu ajutorul relațiilor :

$$G_2 = q \cdot \left(\frac{16}{15} + \frac{M_1}{3} + 16 \cdot \frac{M_2}{105} + \frac{M_3}{12} \right), \quad (5.55)$$

$$G_3 = q \cdot \left(\frac{32}{35} + \frac{M_1}{4} + 32 \cdot \frac{M_2}{315} + \frac{M_3}{20} \right), \quad (5.56)$$

$$G_4 = q \cdot \left(\frac{256}{315} + \frac{M_1}{5} + 256 \cdot \frac{M_2}{3465} + \frac{M_3}{30} \right), \quad (5.57)$$

$$\text{unde : } q = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi}; \quad M_1 = \frac{2}{q}(3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}; \quad M_2 = 3; \quad M_3 = \frac{6}{q}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}. \quad (5.58)$$

Duratele de viață obținute prin integrarea numerică a ecuației 4.49. pentru mai multe situații privind presiunea de lucru și dimensiunile defectului sunt prezentate în tab. 5.3. S-au considerat trei valori ale adâncimii fisurii și trei valori ale presiunii interioare din conductă.

Tab.5.3. Duratele până la rupere ale unei conducte din PEHD100, SDR11.

A	mp	a/s (a,mm)	p bar	τ (min)	τ (ani)
$5,54 \times 10^{-8}$	4,66	0,02(0,68)	1	7,566E+7	143,956
			2	2,993E+6	5,694
			4	1,184E+5	0,225
		0,05(1,7)	1	1,958E+7	37,244
			2	7,743E+5	1,473
			4	3,063E+4	0,058
		0,1(3,4)	1	6,222E+6	11,837
			2	2,461E+5	0,468
			4	9,734E+3	0,019

Se observă că valorile estimate ale duratei de viață ale conductei din polietilenă PE100 (diametru 355mm, SDR11 și grosimea de perete 34mm) care prezintă defecte exterioare asimilabile cu defecte de tip fisură cu diferite adâncimi, solicitate cu presiuni interioare diferite, prezintă o reducere drastică odată cu creșterea adâncimii defectului și a presiunii interioare.

Totodată rezultatele calculului durabilității arată că este mult mai periculoasă creșterea presiunii interioare decât creșterea adâncimii defectului.

Astfel o creștere de patru ori a presiunii interioare (de la 1 bar la 4 bar) conduce la reducerea de cca. 640 ori a duratei de viață a conductei, în timp ce o creștere de 5 ori a defectului (de la 0,68mm la 3,4mm) conduce la o reducere a duratei de viață de cca. 12 ori. Această observație conferă un argument științific pentru care conductele din polietilenă sunt utilizate în principal pentru distribuția (nu transportul) gazelor naturale la presiuni relativ mici. Totodată având în vedere influența mai redusă a adâncimii defectului asupra duratei de viață, aceasta poate reprezenta un argument pentru acceptarea instalării conductelor din polietilenă fără pat de nisip.

5.6. Interpretarea rezultatelor experimentale obținute în urma încercării la presiune interioară

În cadrul tezei de doctorat s-a cercetat comportarea la presiunea interioară de apă a țevelor de polietilenă de înaltă densitate. Pentru accelerarea efectelor tensiunilor, cercetările s-au efectuat la temperatura de 80°C.

În experimentele de verificare a rezistenței hidrostatice, din laboratoare UPG Ploiești, s-au folosit epruvete din țeavă de fabricație românească PEHD 100, SDR 11, Dn 125 x 11,4mm și Dn 90 x 8,2mm, solicitate la presiuni interioare ce corespund tensiunilor circumferențiale (σ) cu valorile din tab. 5.5.

Încercarea s-a efectuat conform SR EN ISO 1167/1996/E.

Într-o primă etapă, s-au efectuat cercetări privind verificarea calității țevelor și fittingurilor dintr-o lungă gamă cu tipodimensiuni aparținând unui producător de elemente de conductă din polietilenă în condiții impuse de temperatură și presiune.

Rezultatele determinărilor și măsurărilor obținute pentru țevi și fittinguri folosite pentru transportul și distribuția gazelor naturale (SDR11; SDR17,6) și a apei (SDR17,6; SDR 26) sunt prezentate în tab. 5.4.

În tab. 5.6., cu verde sunt marcate valorile experimentale ale tensiunilor circumferențiale și a duratelor până la cedare care caracterizează comportamentul cvasifragil/tenace pentru țevile din polietilenă similare sortului PEHD 100, în timp ce cu portocaliu sunt marcate același tip de valori experimentale, corespunzătoare unui comportament ductil pentru același tip de polietilenă din care sunt extrudate conductele. Valorile marcate cu negru sunt valori ce au fost neglijate în reprezentarea grafică din fig. 5.51. deoarece acestea nu caracterizau nici unul din cele două comportamente ale polietilenei, ductil respectiv cvasifragil/tenace.

După eliminarea punctelor de intersecție a valorilor tensiunii circumferențiale cu valorile perioadelor de cedare, care nu corespund din punct de vedere statistic alurii graficului de anduranță experimentală, s-au putut ordona punctele rămase, pe un grafic a cărui alură poate fi comparată cu alura graficului etalon al anduranței, conform fig. 5.52.

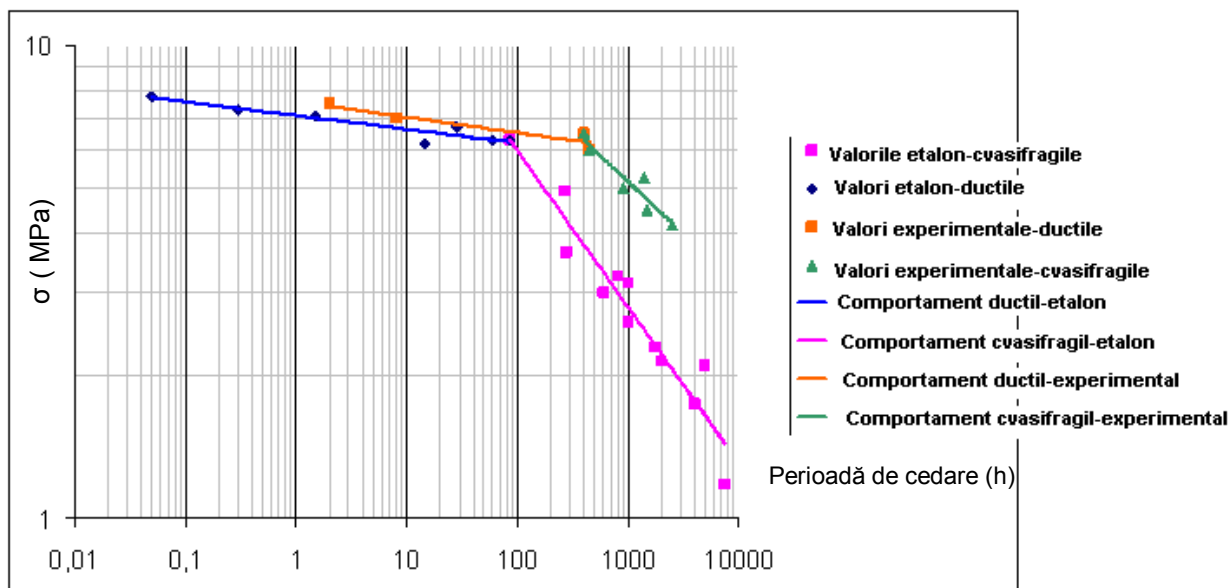


Fig. 5.51. Curba durabilității cu valorile tensiunilor circumferențiale și a duratelor de cedare determinate experimental în laboratoarele UPG Ploiești, vs curba etalon a durabilității.

Rezultatele experimentale reținute sunt comparabile cu cele din literatura de specialitate, fapt important, deoarece cu ajutorul unui model analogic de extrapolare prezentat în SR EN ISO 9080:2012, se poate genera alura graficului anduranței, la temperatura de 20°C, pentru care perioada de cedare este egală sau mai mare de 50 de ani. Perioada de cedare de 50 de ani este certificată de producătorii de țevi ca perioadă minimă de siguranță în exploatare, vezi fig. 5.52.

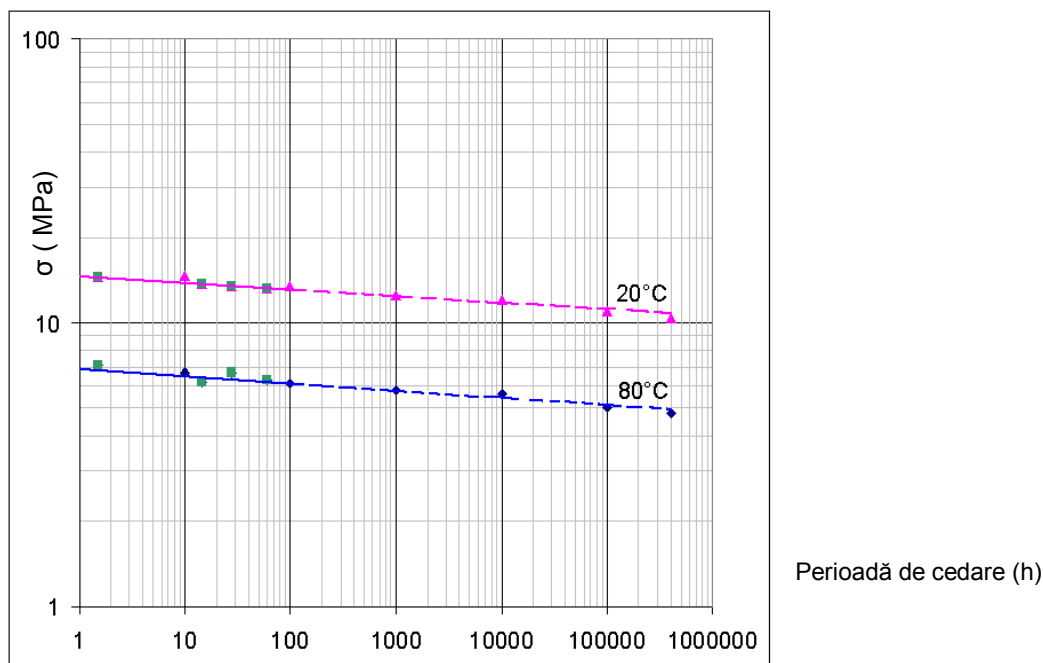


Fig. 5.52. Curba durabilității cu valorile tensiunilor circumferențiale și a duratelor de cedare, extrapolate, determinate experimental la 80°C, în laboratoarele UPG Ploiești; curba durabilității cu valorile tensiunilor circumferențiale și a duratelor de cedare, extrapolate, calculate la 20°C prin metoda SR EN ISO 9080:2012.

6. CONCLUZIILE FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRIILOR

6.1. Concluzii finale

1. Teza de doctorat cu tema „CERCETĂRI PRIVIND CARACTERISTICILE DE EXPLOATARE ALE CONDUCTELOR DIN POLIETILENĂ UTILIZATE LA DISTRIBUȚIA GAZELOR NATURALE „ a avut ca obiectiv cercetarea factorilor care caracterizează comportarea țevelor din polietilenă de înaltă densitate sub acțiunea solicitărilor din exploatare – mecanice, termice și datorate mediilor de lucru, cu scopul elaborării unor modele pentru estimarea cât mai exactă a duratei de viață a conductelor din polietilenă pentru transportul și distribuția gazelor naturale.

2. Analiza stadiului actual al utilizării conductelor din polietilenă la transportul și distribuția gazelor naturale, a evidențiat următoarele:

2.1. Performanțele țevelor din polietilenă de înaltă densitate au cunoscut o continuă îmbunătățire, în prezent fiind exploatate atât în țară cât și în străinătate, la presiuni de până la 8 bari, cu durate de viață cuprinse între 50 și 100 de ani.

2.2. În prezent în România se desfășoară o activitate de sistematizare a rețelelor din oțel pentru transportul și distribuția gazelor naturale în scopul asigurării continuității alimentării cu gaze, cu înlocuirea sistematică a țevelor din oțel cu țevi din polietilenă de înaltă densitate. În SUA peste 97% din totalul conductelor de distribuție nou instalate, în fiecare an, sunt conducte din polietilenă.

2.3. Rețelele de gaze naturale din țevi de polietilenă comportă metode și echipamente specifice, pentru obturarea prin ștrangulare și pentru operațiile de sudare, destinate extinderii, izolării și înlocuirii unui tronson, executării de derivații ș.a.

3. Analiza caracteristicilor constructive, a materialelor și tehnologiilor de fabricație ale conductelor din polietilenă a avut ca obiectiv sintetizarea caracteristicilor principalelor tipuri de polietilenă utilizate la fabricarea țevelor de conductă, evidențierea particularităților atât ale tehnologiei de fabricare a țevelor, cât și ale tehnologiei de realizare a conductelor și analiza aspectelor specifice calculului de proiectare a conductelor pentru transportul și distribuția gazelor naturale. Principalele concluzii cuprinse pe baza analizei efectuate sunt următoarele:

3.1. Diferitele sorturi de polietilenă se diferențiază în funcție de densitate, de felul ramificațiilor moleculare, de gradul de cristalinitate și de greutatea moleculară. Aceaste caracteristici determină proprietățile polietilenei: vâscoelasticitatea, duritatea, tenacitatea, relaxarea și fluajul, stabilitatea termică, contracția și dilatarea ș.a. După comportarea la încălzire și răcire polietilenele se clasifică în: termoplaste, din care face parte polietilena de înaltă densitate și termorigide.

3.2. Utilizarea țevelor din polietilenă la transportul și distribuția gazelor naturale, a apei, a fluidelor industriale, la irigații, canalizări ș.a. se justifică tehnico-economic prin următoarele proprietăți:

- densitatea redusă conduce la ușurarea transportului și a punerii în operă;
- flexibilitatea mare permite realizarea curbelor cu rază mare și înfășurarea pe tamburi, reducând semnificativ numărul sudurilor la realizarea conductelor;
- rezistență ridicată la șoc (tenacitate);
- gama largă de temperaturi (-40°C ... $+60^{\circ}\text{C}$) în care polietilena își păstrează caracteristicile;
- stabilitatea chimică;

- rezistența la uzură abrazivă; reducerea pierderilor de presiune interioară datorate rugozității foarte reduse;
- asamblarea prin procedee simple de sudare;
- productivitate ridicată la realizarea conductelor și activități de mentenanță reduse.

3.3. Țevile din polietilenă au dimensiunile și caracteristicile mecanice standardizate, definindu-se diametrul exterior, grosimea de perete, raportul dimensional standard SDR (Standard Dimensional Ratio), presiunea nominală și rezistența la tracțiune minim garantată MRS (Minimum Required Strength).

3.4. Conductele din polietilenă se realizează din țevi din polietilenă asamblate prin sudare folosind unul din următoarele procedee: sudarea cu jet de aer cald, sudarea cu extruder portabil, sudarea cap la cap cu element încălzitor, sudarea prin electrofuziune și sudarea prin polifuziune. Îmbinările sudate pot prezenta imperfecțiuni ce se constituie în zona de inițiere a proceselor de rupere. Pentru cercetarea comportării în exploatare a îmbinărilor sudate cu imperfecțiuni s-au propus metode de realizare a diferitelor tipuri de defecte cum sunt: simularea lipsei de topire cu foițe de aluminiu sau implanturi din teflon, executarea unor imperfecțiuni prin prelucrarea mecanică ș.a.

3.5. Calculul hidraulic al conductelor pentru transportul și distribuția gazelor naturale prezintă particularități determinate de structura conductei: cu ramificații în serie, în paralel și inelare precum și de destinația acesteia: sistem de distribuție, rețea de distribuție, branșament și instalație de utilizare.

4. Cercetarea abordărilor teoretice și în special experimentale practicate pe plan mondial pentru evaluarea comportării în exploatare a conductelor din polietilenă de înaltă densitate a condus la următoarele concluzii:

4.1. Cercetările teoretice și experimentale asupra comportării în exploatare a conductelor din polietilenă desfășurate pe plan mondial au urmărit două obiective:

- estimarea duratei de viață în condițiile specifice de solicitare în exploatare;
- determinarea tensiunii circumferențiale admisibile pentru realizarea unei durate de viață prescrise.

Rezolvarea ambelor obiective se bazează pe realizarea unor programe experimentale complexe, în general cu încercări de scurtă durată, standardizate, sau propuse de institute de cercetări și elaborarea unor modele de calcul pentru extrapolarea rezultatelor experimentale și estimarea duratei de viață a conductei, uzual cuprinsă între 50 și 100 de ani.

4.2. Principalele încercări de scurtă durată pentru determinarea caracteristicilor materialului necesare estimării duratei de viață a conductelor pot fi grupate în încercări efectuate pe epruvete prelevate din țevă sau obținute prin presarea materiei prime în matrițe și încercări efectuate pe țevi de dimensiuni reale. De asemenea. Încercările se efectuează la temperatura ambiantă sau la temperaturi ridicate (până la 80-100°C) pentru accelerarea proceselor de deteriorare.

Încercările pot fi grupate sub următoarele aspecte:

- încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice (încercarea la tracțiune, încercarea la compresiune, încercarea la tracțiune prin șoc, încercarea la sfâșiere și determinarea contracției longitudinale la cald);
- încercări tehnologice, pentru determinarea comportării materialului în diferite condiții de solicitare, temperatură și mediu (determinarea indicelui de fluiditate la cald, determinarea temperaturii de încovoiere sub sarcină, determinarea comportării la uzare, determinarea comportării în mediu de lucru , determinarea stabilității termice la oxidare, încercarea la fluaj în medii apoase pe epruvete crestate, încercarea la fisurare sub tensiune în diferite medii);

- încercări pentru determinarea comportării țevelor din polietilenă la propagarea fisurilor;
- încercări pentru determinarea caracteristicilor de material specifice mecanicii ruperii materialelor (factorul critic de intensitate a tensiunilor, viteza de propagare a fisurilor) utilizând diferite tipuri de epruvete și diferite condiții de solicitări statice și variabile. Se menționează faptul că pe lângă încercările standardizate în literatura de specialitate se propun un număr foarte mare de încercări experimentale originale, care oferă informații asupra comportării țevelor din polietilenă în condiții specifice de solicitare.

5. Cercetările desfășurate pentru elaborarea unui model teoretico-experimental de estimare a duratei de viață a conductelor din polietilenă pentru transportul și distribuția gazelor naturale, care fac obiectul capitolului al cincilea al lucrării, au condus la formularea următoarelor concluzii:

5.1. Analiza stadiului cunoașterii în domeniu a evidențiat faptul că pe plan mondial estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă se bazează, în principal, pe următoarele concepte:

- Modelul lui Arrhenius;
- Aplicarea regulii lui Miner;
- Extrapolarea rezultatelor încercării la presiune interioară a țevelor din polietilenă;
- Aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor.

5.2. Modelul lui Arrhenius ia în considerație procesele ireversibile de îmbătrânire sub acțiunea solicitărilor mecanice, termice, radiațiilor luminoase și ultraviolete și acțiunii mediilor agresive, a căror viteză de desfășurare determină durata de viață a conductelor.

5.3. Aplicarea regulii lui Miner pentru determinarea degradării cumulative a materialului sub acțiunea diferitelor secvențe de solicitare consideră că durata de viață corespunde valorii unitare a degradării cumulative.

5.4. Extrapolarea rezultatelor încercării la presiune interioară a țevelor din polietilenă efectuate în condiții de temperatură ridicată reprezintă una dintre cele mai recomandate metode de cercetare experimentală a comportării de durată a țevelor din polietilenă deoarece ia în considerație factorii de material, factorii de mediu și condițiile de solicitare la diferite presiuni și temperaturi.

Programul experimental din cadrul tezei de doctorat a urmărit comportarea țevelor din polietilenă la diferite valori ale presiunii interioare la temperatura de 80°C pe 16 epruvete/tronsoane de țeavă PE100 de fabricație românească. Încercările s-au efectuat utilizând aparatură specializată din dotarea Universității Petrol-Gaze din Ploiești, epruvetele fiind imersate într-o baie de apă deionizată la temperatura de 80°C. Prin aplicarea procedurii prezentate în standardul ISO 9080:2003(E), rezultatele încercărilor au fost extrapolate pentru temperatura de exploatare de 20°C.

S-a constatat o foarte bună concordanță între comportamentul țevelor din polietilenă românești experimentate și cele fabricate și utilizate pe plan internațional, atât în domeniul cedărilor ductile, cât și în domeniul cedărilor cvasifragile.

5.5. Evaluările moderne ale duratei de viață se bazează pe aplicarea metodelor teoretico-experimentale ale mecanicii ruperii materialelor care realizează estimarea durabilității pieselor prin analiza condițiilor de inițiere și de propagare a fisurilor în zonele critice ale acestora – concentratorii de tensiuni de tip mecanic sau discontinuități ale materialului.

În cadrul tezei de doctorat s-a elaborat un model de estimare a duratei de viață a conductelor din polietilenă pe baza conceptelor mecanicii ruperii materialelor, realizându-se următoarele etape ale unei cercetări teoretico-experimentale complexe.

5.5.1 Organizarea unui program experimental pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor și a factorului critic de intensitate a tensiunilor, pentru caracterizarea materialului PE 100 din fabricația conductelor în țara noastră.

Viteza de propagare a fisurilor s-a determinat utilizând epruvete de tip bară cilindrică crestată (CRB) și epruvete de tip CT (Compact Tension) prelevate atât din peretele unei țevi PE 100, SDR 11, Dn 355 și s=34mm de fabricație românească, cât și din zona unui cordon de sudură a acestei țevi.

Determinarea vitezei de propagare a fisurilor prin încercarea la solicitări variabile a epruvetelor cilindrice crestate (CRB) nu a condus la rezultate concludente în absența unei aparaturi performante de monitorizare a lungimii fisurii. Rezultatele încercării s-au finalizat în stabilirea dependenței dintre factorul de intensitate a tensiunilor și numărul de cicluri până la rupere, cu evidențierea domeniilor de rupere ductilă și cvasifragilă și a mecanismelor de rupere.

Viteza de propagare a fisurilor s-a determinat printr-o metodă experimentală originală solicitând epruvete de tip CT cu diferite viteze de deplasare a flancurilor fisurii (bacurilor mașinii), cu înregistrarea nivelului solicitării și lungimii fisurii. Dependența dintre viteza de propagare a fisurii și factorul de intensitate a tensiunilor a condus la o expresie de tip Paris, în foarte bună concordanță cu rezultatele altor cercetări efectuate pe plan mondial.

Factorul critic de intensitate a tensiunilor s-a determinat experimental utilizând epruvete de tip CT, obținând valoarea $K_{Ic} = 0,743 \text{ MPam}^{1/2}$

5.5.2. Analiza stării de tensiuni la baza unui defect/discontinuitate din conductele din polietilenă s-a efectuat utilizând soluțiile dezvoltate în mecanica ruperii pentru cazul unui defect de tip fisură longitudinală semieliptică nepătrunsă. Din analiza critică a diferitelor modele de calcul a factorului de intensitate a tensiunilor, s-a optat pentru o expresie polinomială propusă în standardul API 579.

5.5.3. Elaborarea unui algoritm și a unui produs informatic dedicat calculului factorului de intensitate a tensiunilor pe parcursul propagării fisurii în peretele conductei și determinării duratei până la cedare a condus la determinarea duratei de viață a unei conducte de polietilenă PE 100 cu $De=355\text{mm}$, $SDR=11$ și $s=34\text{mm}$ considerând diferite presiuni interioare.

5.5.4. Modelul de calcul a durabilității a arătat că la conductele din polietilenă influența creșterii presiunii interioare asupra reducerii duratei de viață este mult mai pronunțată decât creșterea dimensiunii defectului. Această observație conferă un argument științific pentru care conductele din polietilenă sunt utilizate în principal la distribuția gazelor naturale, la presiuni relativ reduse, nu la transport.

6.2. Contribuții originale

Prin soluționarea problematicei tezei de doctorat, autorul acesteia a adus o serie de contribuții originale prezentate în continuare.

1. Realizarea unei sinteze documentare bazată pe analiza și sistematizarea datelor din literatura de specialitate privind construcția și comportarea în exploatare a conductelor din polietilenă pentru transportul și distribuția gazelor naturale.
2. Analiza critică a încercărilor mecanice, tehnologice și a modelelor experimentale utilizate pe plan mondial pentru caracterizarea comportării polietilenei la încercări de scurtă durată, ale căror condiții de încercare și rezultate să permită prin extrapolare estimarea duratei de viață a conductelor cuprinsă uzual între 50 și 100 de ani.
3. Analiza critică a principalelor modele de estimare a duratei de viață a conductelor din polietilenă, cu evidențierea metodei de extrapolare a rezultatelor încercării la presiune interioară la cald a țevelor și a metodei bazate pe aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor ca cele mai indicate modele, cercetate și în cadrul tezei de doctorat.

4. Elaborarea unui model teoretico-experimental de estimare a duratei de viață a conductelor din polietilenă solicitate la presiune interioară bazat pe aplicarea conceptelor mecanicii ruperii materialelor.

5. Realizarea unui amplu program experimental pentru determinarea durabilității țevelor din polietilenă solicitate la presiune interioară la temperatura de 80°C și pentru determinarea caracteristicilor de material specifice mecanicii ruperii materialelor; factorul critic de intensitate a tensiunilor, viteza de propagare a fisurilor și dependența dintre factorul critic de intensitate a tensiunilor și numărul ciclurilor de solicitare la oboseală. Rezultatele obținute experimental se constituie într-o bază de date utile calculelor de estimare a duratei de viață a conductelor din polietilenă.

6. Elaborarea unui algoritm și a unui produs informatic aplicat la estimarea duratei de viață a conductelor din polietilenă, cu utilitate și la determinarea durabilității remanente a unei conducte aflate în exploatare.

6.3. Direcții de continuare a cercetărilor

Pe parcursul rezolvării problematicei extrem de complexe a tezei de doctorat s-au desprins o serie de direcții de continuare a cercetărilor, dintre care menționăm următoarele:

- Realizarea unor programe experimentale de cercetare a comportării polietilenei la solicitări variabile cu valori ale coeficientului de asimetrie a ciclurilor (R), diferite, la diferite temperaturi, pentru extrapolarea rezultatelor la situația solicitării statice (R=1).
- Continuarea cercetării durabilității țevelor solicitate la presiune interioară la cald, pentru completarea bazei de date necesare extrapolării rezultatelor la o durată de exploatare de 50 de ani.
- Cercetarea mecanismelor de rupere ductilă și cvasifragilă a țevelor din polietilenă prin utilizarea imaginilor fractografice oferite de microscopia electronică.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

1. Abbes F. and Piques R. (2000). Fissuration rapide des polyéthylènes, effet de cloche des essais S4. CDM de l'EMP . Rapport interne n°1193.
2. * * * Agentia Nationala de Reglementare in domeniul energiei, Norme tehnice pentru proiectarea, executarea si exploatarea sistemelor de alimentare cu gaze naturale, NTPEE - 2008.
3. Andena L., Marta Rink, Roberto Frassine, Applicazione della meccanica della frattura viscoelastica alla previsione della vita di tubi in polibutene, Frattura ed Integrità Strutturale, nr.2, 2007, p.17-24.
4. Andersson U., Which factors control the lifetime of plastic pipes and how the life can be extrapolated, Bodycote Polymer AB, Sweden, 2005.
19. Brown N., Lu X. The fracture mechanics of slow crack growth in polyethylene. Int.J Fract 1995, 69, p.371-7.
20. Brown N., S.K Bhattacharya, The initiation of slow crack growth in linear polyethylene under single edge notch tension and plane strain. J Mater Sci 1985, 20, p.4553-60.
21. Brown N., Slow crack growth notches pressurized polyethylene pipes, Polymer Engineering and Science, vol.47, Issue 11, nov.2007, p.1951-1955.
28. Cazenave J., These: Sur le compromise rigide/durabilite du Polyethylene Haute Densite en relation avec la structure de chaine, la microstructure et la topologie moleculaire issues de la cristallisation, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, 2005.

32. Cioclov D.D., Mecanica ruperii materialelor, ed.Academiei, Bucuresti, 1977, cap.2, p.47-51.
59. Favier V., E. Giroud, E.Strijko, J.M.Hiver, C. G'Sell S.Hellinckx., A.Goldberg, S low crack propagation in polyethylene under fatigue at controlled stress intensity, Polymers 43 (2002), p.1375-1382.
61. Fleissner M.: Langsames Risswachstum und Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyeten, Kunststoffe 77 (1987) Nr. 1, S. 45/50.
69. Goins M., B.Cole, E.Laurent, Recent developments in high-performance polyethylene piping materials, North American Society for Trenchless Technology (NASTT), 2003, Orlando, Florida.
70. Grellmann W., S. Seidler, Deformation and fracture behaviour of polymers, Springer +Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
71. Haager M., G.Pinter, R.W.Lang - Ranking of PE-HD pipe grades by fatigue crack growth performance, Plastics Pipes XIII, Washington, 2006.growth performance, Plastics Pipes XIII, Washington, 2006.
74. Haager, M., A.Lueghamer, K.Bohaty, G.Pinter, R.W. Lang, Influence of slow crack growth resistance of polyethylene pipe on the long-term performance of welds made by electro socket fusion, Plastic Pressure Pipes 2007, Dusseldorf, Germany.
80. Ifwarson M., H.Leijstrom, What controls the lifetime of plastic pipes and who can the lifetime be e xtrapolated, Studsvik Material AB, Polymer Materials: Nykoping, Sweden,1999, p.16.
111. Janssen R.P.M., L.E.Govaert, H.E.H.Meijer, An analytical method to predict fatigue life of thermoplastics in uniaxial loading: Sensitivity to wave type, frequency and stress amplitude, American Chiminal Society, Macromolecules, 2008, vol.41, p.25-31, 25-40.
119. Krishnaswamy, Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes, Polymers 46 (25), 2005, p.11664-11672.
124. Lang R.W., G.Pinter, W.Balika, Konzept zur Nachweisfuehrung fur Nutzungsdauer und sicherheit von PE-Druckrohren bei beliebiger Einbausituation, 3R International (44) Heft 1-2/2005.
125. Lang, Stern, Doerner, Applicability and limitations of current lifetime prediction models for thermoplastics pipes under internal pressure, Die angewandte makromolekulare Chemie, 247(1997) 131-137.
131. Merah N., Z.Khan, A.Bazoune, Temperature and loading frequency effects on fatigue crack growth in HDPE pipe material, The Arabian Journal for Science and Engineering, vol.31, nr.2C, 2006.
146. Palermo G. et al., Rapid crack propagation increasingly important in gas applications: a status report, Pipeline & gas journal/ december 2008.
147. Parson, M., Stepanov, E.V., Hiltner, A., Baer, E., Correlation of stepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene Journal of Materials Science 34 (1999) Kluwer Academic Publishers.
148. Parson, M., Stepanov, E.V., Hiltner, A., Baer, E., Effect of strain rate on s tepwise fatigue and creep slow crack growth in high density polyethylene Journal of Materials Science 35 (2000) Kluwer Academic Publishers.
151. Pinter G and R.W.Lang: in Temperature – fatigue interaction (ed. L. Remy and J. Petit), 267; 2002, ESIS Publication 29, Amsterdam, Elsevier
154. Pinter G., Markus Haager, Werner Balika, Reinhold W.Lang, Cyclic crack growth tests with CRB specimens the evaluation of the long term performance of PE pipe grades, Polymer Testing 26, 2007, p.180-188.
156. Pinter G., Reinhold W.Lang, Markus Haager, A test concept for lifetime prediction of polyethylene pressure pipes, Monatshefte fur Chemie 138, p.347-355, 2007.

158. Pinter, Haager, Balika, Lang, Cyclic crack growth tests with CRB specimens for the evaluation of the term performance of PE pipe grades, *Polymer Testing*, 26 (2007) p.180-188.
168. Ramsteiner F., T. Armbrust, Fatigue crack growth in polymers, Elsevier LTd. *Polymer Testing* 20, 2001, p.321-327.
202. Ulmanu V., Gh. Draghici, **V. Aluchi**, Fatigue test on high density polyethylene PE100 using cracked round bar specimens, *Bulletin UPG*, LXIII, Nr.1, 2011, p. 61-65.
203. Ulmanu V., Gh. Draghici, **V. Aluchi**, Fracture mechanics testing of high density polyethylene (HDPE) pipe material with compact tension (CT) specimens, *Jurnal of Engineering studies and research - Volume 17*, nr.3, 2011, p.98-103.
204. Ulmanu V., Gh. Draghici, **V. Aluchi**, Lifetime Estimation of High Density Polyethylene Pipelines Based on fracture Mechanics Principles - Petroleum – Gas University of Ploiești BULLETIN, Technical Series, vol LXIV No. 4/2012
205. Ulmanu Vlad, Material tubular petrolier, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992.
210. Yoshikiyo T., T. Hattori, High performance PE100 resin with extraordinary resistance to slow crack growth, Japan Polyethylene Corp., *Plastics Pipes XIII*, 2006.
211. Zecheru Gh., Al. Pupazescu, Particularitati privind evaluarea calitatilor tevilor si conductelor de polietilena, *Buletin Univ. "Petrol-gaze"*, vol. XLVII-L (1995-1998), Nr.9, Ploiesti, 1998.
216. Ulmanu, V. si Gh. Zecheru. Determinarea durabilității prăjinilor de foraj pe baza conceptelor mecanicii ruperii materialelor. *St. Cesc. Mec. Apl. Tom 48*, Nr. 3, 1989, p. 315-332.

RESEARCH ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF POLYETHYLENE PIPES FOR NATURAL GAS DISTRIBUTION

Doctoral adviser:
Prof.Dr.Ing. Vlad ULMANU

Doctoral student:
Dipl.Eng. Virgil ALUCHI

ABSTRACT

The activities of gas distribution and transmission through pipelines (steel and polyethylene) are major components of any country economical sustainability.

The use of polymeric materials – mainly polyethylene and polypropylene - which have successfully replaced predictional materials (steel, cast iron and concrete) in distribution networks for gas and other fluids required in industry and for households, has a growing trend both internationally and domestically.

Lots of information regarding the behavior of these materials under various operating conditions has been accumulated since their introduction into service and very little damage has been reported, especially due to external accidental causes.

The PhD thesis aims to develop a critical analysis of the main methods for estimating high-density polyethylene pipes lifetime for gas transmission and distribution, and to propose a theoretical-experimental methodology for lifetime estimation based on short term experimental tests and fracture mechanics principles.

This doctoral thesis is divided into six chapters as follows:

Chapter 1: Foreword, presents the advantages of using high-density polyethylene pipes (HDPE) for transport and distribution of natural gas versus use of steel pipes and also presents concepts regarding the pipefailure by initiation and propagation of cracks in cvasi-brittle material.

Chapter 2 entitled **Actual situation of Polyethylene Pipes Use in the Transport and Distribution of Natural Gas**, presents general considerations on the use of High Density Polyethylene (HDPE) pipes in Romania, the leading manufacturers of pipes, pressure fields of use (PJ, PR, PM, PI), the number of kilometers of HDPE that have been replaced and also the prospect on the method used for the distribution of natural gas through pipelines PEHD100 with a maximum operating pressure of 8 bar which has been applied by GDF SUEZ since 2000.

Chapter 3 entitled **Design Characteristics, Materials and Manufacturing Technologies of High-Density Polyethylene Pipes** makes a critical analysis of the most important polymers, particularly polyethylene types. It highlights the most important characteristics of polymers, showing the superiority of polyethylene due to the mechanical properties and especially those of pipes made of HDPE. It examines structural forms and types of polyethylene and presents manufacture and welding technologies for polyethylene pipes and fittings, and notes possible flaws and imperfections. Considerations are made regarding the strength and durability of polyethylene pipes.

Manufacturers of high-density polyethylene pipes also made important technological advances by achieving a new generation of bimodal polyethylene, which led to increased mechanical strength and improved operational behavior, all of which led to increased nominal operating pressure of pipes of approx. 1 bar in 1990, to 10 bar for natural gas transport pipelines and to 16 bar for water pipes in 2010, which guarantees a life of 50 to 100 years. The purpose of HDPE pipes manufacturers is to produce a new generation of polyethylene with the strength of 12.5 MPa.

The efficiency of a piping system apart from the cost of pipes and fittings, depends on the installation cost, maintenance cost and lifetime.

Increased mechanical strength of polyethylene pipes and thus of the the internal pressure of operation has the following consequences:

- reduction of the wall thickness, with significant economic effects;
- reduction of residual stress caused by welding;
- possibility mechanism of installing pipes in soft soils without sand bed;

Recommendations on the design principles for transport and gas distribution pipelines are also made.

Chapter 4, entitled Theoretical and experimental assessment of the behavior of high density polyethylene pipes presents the most important standardized tests mechanical and technological tests performed in order to determine the HDPE behavior in various loading modes and environments.

Chapter 5 entitled Estimation the lifetime of polyethylene pipes analyzes different models used to determine the lifetime of polymeric materials .

To estimate the total lifetime of polyethylene pipes used to transport and distribute natural gas under pressure, different approaches that aim to consider the influences mentioned above have been proposed:

- a. **The standard hydrostatic testing of pipes**, which consists in applying internal pressure to pipe under standard conditions of temperature and duration, and in determining the duration to failure followed by test results extrapolation for lifespan envisaged;
- b. **Extrapolation of results** from short-term static mechanical tests performed at high temperatures and / or aggressive to accelerate the degradation processes by applying Arrhenius law;
- c. **Applying the concepts of the fracture mechanics** to determine crack initiation and propagation laws under temperature corresponding to operating conditions, based on static and variable loading tests with and without the influence of environment.

The usual damage process in the pressure pipes of high density polyethylene, is cracking in the material with brittle behavior cracks initiation, and propagation.

Fracture mechanics offers a modern approach for life time estimation of polyethylene pipes en analyzing the crack initiation and propagation at flaws. In order to determine the fracture mechanics characteristics of a PE100 romanian HDPE, an experimental research was performed on CT specimens and Crack Round Bar specimens. A lifetime estimation model was proposed based on experimentally determined fracture mechanics material characteristics and on a software elaborated for integration of the crack growth rate equation.

The results were compared to those obtained by applying the hydrostatic test method.

Chapter 6 entitled Conclusions. Original Contributions. Directions for Further Research presents the most important conclusions on the proposed model to study the behavior of polyethylene in static and dynamic tests by means of novelty tests, held for short periods of time, for tens and hundreds of hours, and which led to estimate life in real operating conditions.

There are listed the original contributions of the present doctoral thesis recommending new vectors for research in the field of polyethylene behavior under special operating conditions.