

TEZĂ
INTEGRITATEA STRUCTURALĂ A
COMPONENTELOR DIN MATERIALE
TERMOPLASTICE ÎMBINATE PRIN SUDARE
- REZUMAT -

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

1. Obiectivele și structura tezei de doctorat

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

Se menționează faptul că polimerii și în mod special materialele termoplastice sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații, incluzând industria aerospațială, electronică și cea de automobile, construcțiile civile și industriale, etc.

Având în vedere creșterea în continuare a interesului față de utilizarea materialelor polimerice, devine deosebit de importantă cunoașterea comportării acestora în diferite condiții de solicitare.

Conform informațiilor din literatura de specialitate, aspectele legate de comportarea materialelor termoplastice în diferite condiții de solicitare sunt parțial cunoscute și soluționate, domeniul fiind într-o continuă dezvoltare.

Datorită cerințelor de siguranță în exploatare și durată de viață ridicate a sistemelor tehnice ce includ structuri din materiale termoplastice, aspectele legate de îmbinarea prin sudare a acestor componente au o importanță însemnată.

Se evidențiază faptul că prezența unor imperfecțiuni în structura materialului de bază și respectiv în îmbinările sudate din materiale termoplastice, asociată cu o serie de condiții legate de temperatură, mediu de lucru și anumite condiții de solicitare au condus în ultima perioadă la apariția unor avarii în cadrul sistemelor de conducte destinate vehiculării apei și gazelor naturale, în diferite țări.

În acest context, se consideră că tematica propusă spre a fi abordată în cadrul tezei este una actuală și de un real interes, atât la nivel național cât și internațional.

Obiectivul principal al tezei îl constituie creșterea fiabilității sistemelor tehnice, ce includ componente din materiale termoplastice, prin îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate și optimizarea proceselor de sudare. În acest scop s-au urmărit o serie de obiective specifice:

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

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

În acest sens a fost conceput și dezvoltat un program experimental specific, care să includă aspecte legate de sudare și examinare nedistructivă, comportare la solicitări statice și încercări de mecanica ruperii polimerilor, utilizare a unor programe de calcul cu element finit și respectiv de planificare și calcul statistic destinate optimizării sistemelor tehnice.

2. Materiale termoplastice

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

Statisticile arată că materialele plastice s-au dezvoltat continuu, având aplicații în diverse domenii, producția acestora cunoscând o creștere permanentă. Astfel dacă în anul 1960 la nivel mondial au fost produse 7 milioane tone materiale plastice, pe perioada 2000 - 2020 se estimează o rată medie de creștere anuală de 6,25 % pe an, astfel încât în anul 2020 se preconizează o producție de 538 milioane tone.

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

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

Materialele plastice, în funcție de particularitățile lor, se pot grupa astfel în: termoplastice, termorigide și elastomeri. Materialele termoplastice se caracterizează prin următoarele: sunt sudabile, proporția de stare cristalină din structura lor determină densitatea și proprietățile mecanice.

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

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

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

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

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

Comportarea vâscoelastică a polimerilor poate fi descrisă cu ajutorul unor modele combinate, formate din elemente cu o comportare elastică și respectiv vâscoasă.

Astfel, un prim pas în descrierea comportării polimerilor se poate obține prin modele combinate de două elemente legate în serie (modelul Maxwell) - prin care se consideră că la aplicarea tensiunii are loc mai întâi o deformare elastică instantanee, urmată de o deformare vâscoasă de tip newtonian, sau două elemente legate în paralel (modelul Voigt) - prin care se descrie, cu o anumită aproximație, comportarea la fluaj.

În scopul obținerii unor rezultate mai bune, referitor la descrierea comportării polimerilor de tipul celor termoplastici se folosesc modele cu patru elemente, cum ar fi de exemplu două modele Maxwell legate în paralel.

3. Procedee de sudare pentru materiale termoplastice

Capitolul 3 prezintă câteva din principalele modalități de îmbinare specifice produselor din materiale termoplastice. De asemenea, sunt detaliate aspectele tehnologice la procedeele de sudare utilizate în cadrul analizelor și cercetărilor experimentale efectuate:

- sudarea cap la cap cu element încălzitor și prin electrofuziune, destinate sudării țevelor și fittingurilor,
- sudarea cu pană încălzitoare a geomembranelor.

În scopul punerii în evidență a imperfecțiunilor se prezintă unele aspecte referitoare la metoda de examinarea nedistructivă ultrasonică.

Examinarea cu ultrasunete este bine cunoscută ca o metodă de evaluare a integrității structurilor sudate din materiale metalice, compozite, dar și a celor din materiale termoplastice, oferind posibilități de identificare a imperfecțiunilor de tip: fisuri, cavități, pătrundere incompletă, incluziuni, lipsă de topire.

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

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

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

4. Comportarea la solicitări mecanice a materialelor de bază

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

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

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

Având în vedere faptul că majoritatea materialelor se încălzesc urmare a unor solicitări la tracțiune, în cadrul programului experimental s-a utilizat și metoda termografiei pentru evidențierea emisiei de energie termică a epruvetei. Astfel, prin această modalitate s-a urmărit, cu ajutorul unei camere termografice de tip FLIR System A40, vizualizarea și cuantificarea prin măsurători non-contact a temperaturii în zonele de interes.

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

De asemenea în cadrul acestui capitol se prezintă și încercările de mecanica ruperii realizate pe epruvete prelevate din țeavă de tip PE100.

În acest scop s-a utilizat metoda integralei J, care permite analiza propagării fisurii în cursul unei încărcări lente. Standardul ASTM D 6068 prezintă metodologia de încercare pentru determinarea rezistenței la fisurare a materialului cu ajutorul curbilor J-R. Încercările la încovoiere în trei puncte au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C.

Epruvetele cu marcajele PE100 - MB de la 1 la 10 au fost încărcate la diferite sarcini, corespunzătoare anumitor valori ale deplasărilor punctului de aplicare a forței: de la 1,25 mm până la 3,50 mm, cu o creștere constantă de 0,25 mm.

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

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

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

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

5. Comportarea la solicitări mecanice a îmbinărilor sudate

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

Astfel, cercetările experimentale au fost efectuate pe epruvete prelevate din îmbinări sudate realizate din țevi de tip PE80 și PE100, urmărindu-se determinarea

caracteristicilor mecanice și variația acestora la modificarea valorii temperaturii de încercare între 23 ° C și -10 ° C.

Țevile PE80 și PE100, SRD 11, destinate vehiculării gazelor naturale, cu dimensiuni $\varnothing$ 110 x 10 mm au fost mai întâi îmbinate prin procedeul de sudare cap la cap cu element încălzitor. Epruvetele prelevate din îmbinările sudate au fost supuse încercării la tracțiune cu o viteză de 50 mm/min, la diferite temperaturi de încercare: 23 ° C, 10 ° C, 0 ° C și -10 ° C.

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

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

În al doilea rând, în cadrul acestui capitol, au fost realizate două serii de epruvete (S1, S2) prelevate din îmbinări sudate din țevi PE 100, având diametrul de 110 mm și grosimea de perete 10 mm, destinate încercărilor specifice de mecanica ruperii.

În cazul seriei S1 creștătura epruvetelor s-a realizat prin prelucrare mecanică în zona influențată termic a epruvetei (simbolizată ZIT), respectiv la cele din seria S2 creștătura au fost realizată centrat în axa sudurii (simbolizată SUD).

În vederea efectuării încercărilor la încovoiere în trei puncte, după prelucrarea mecanică a epruvetelor, acestea au fost prefisurate conform cerințelor standardului ASTM D 6068. Încercările la încovoiere au fost efectuate cu o viteză de 1 mm/min, la o temperatură de referință de 23 ° C.

Epruvetele cu creștătura dispusă în (ZIT) din seria S1, respectiv în sudură din seria S2 au fost încărcate la diferite sarcini, respectiv deplasări ale punctului de aplicare a forței: de la 1,25 mm - 3,50 mm.

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

6. Creșterea fiabilității componentelor sudate

În capitolul 6 se prezintă modalități moderne de optimizare prin planificarea experimentelor, folosind programul de planificare și calcul statistic MINITAB. Utilizând metoda Response Surface Design (RSD), în cadrul prezentului capitol sunt descrise cercetările experimentale și rezultatele obținute la optimizarea proceselor de sudare.

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

Metoda de planificare a experimentelor Response Surface Design (RSD) a fost aplicată pentru optimizarea:

- proceselor de sudare cap la cap cu element încălzitor a țevelor din polietilenă de tip PE 80 și respectiv PE 100;
- procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD).

În cele trei cazuri de optimizare, planificarea experimentelor s-a realizat cu ajutorul programului de planificare și calcul statistic MINITAB, considerându-se după caz, un experiment RSD de tip central-compus întreg sau fracționat (pe jumătate).

Un prim pas necesar a fi realizat pentru planificarea și realizarea experimentelor este acela de stabilire a factorilor controlabili și a funcțiilor obiectiv.

În acest sens s-a urmărit ca printr-un număr relativ redus de experimente să se studieze influența principalilor parametri de sudare (factorii controlabili) asupra calității îmbinării sudate. Pe baza rezultatelor obținute a fost stabilit procesul de sudare optim, care să îndeplinească condițiile impuse funcțiilor obiectiv.

Unul dintre procedeele cele mai utilizate pentru îmbinarea prin sudare a țevelor din materiale termoplastice este cel de sudare cap la cap cu element încălzitor.

În primul caz, al țevelor de tip PE80, cercetările experimentale desfășurate, utilizând procedeul de sudare cap la cap cu element încălzitor, pe țevi cu: diametrul Ø 110 mm, grosime de perete de 10 mm și raport dimensional standard SRD 11, au urmărit modelarea și optimizarea procesului de sudare.

În vederea evaluării calității îmbinărilor sudate realizate s-a recurs la încercări și examinări prin metode distructive și nedistructive. Astfel s-au realizat încercări la tracțiune și încovoiere la o temperatură de referință de 23 ° C. Viteza de încercare la tracțiune a fost de 50 mm/min.

Influențele exercitate de către factorii controlabili asupra funcțiilor obiectiv au fost evidențiate sub forma unor grafice tridimensionale pe suprafețe.

Prin prelucrarea rezultatelor obținute s-au determinat valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv în cazul țevelor PE80.

În cel de-al doilea caz s-a procedat în mod similar, experimentele efectuate urmărind optimizarea procesului de sudare pentru țevile PE100, cu dimensiunile Ø 110 x 10 mm, raport dimensional standard SRD 11. Se menționează însă că în acest scop, pentru o evaluare cât mai severă a calității îmbinării sudate, încercările s-au realizat și la temperaturi negative de: -10 ° C în cazul celor la tracțiune și respectiv de -10 ° C și -20 ° C pentru cele de încovoiere.

În vederea urmăririi evoluției degradării materialului și a evidențierii modificării temperaturii epruvetei în timpul încercării, complementar încercării la tracțiune statică a epruvetelor din PE100 s-a utilizat și metoda termografiei.

Prin această metodă de examinare nedistructivă (NDT) s-a analizat imaginea termică a epruvetelor testate, urmărindu-se astfel modificarea temperaturii zonei de cedare a epruvetei, ca urmare a căldurii degajate în timpul solicitării axiale de tracțiune statică.

Influențele factorilor controlabili asupra funcțiilor obiectiv au fost analizate cu ajutorul graficelor tridimensionale pe suprafețe.

Astfel, prin prelucrarea rezultatelor obținute s-au determinat valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv în cazul țevelor PE100.

Prin verificările finale efectuate, pe probele sudate cu parametrii optimi astfel determinați, atât pentru țevile PE80 cât și cele de tip PE100, s-a demonstrat validarea rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor de optimizare a procesului de sudare a acestor componente.

În cazul al treilea, în cadrul cercetărilor experimentale avute în vedere au fost abordate și aspecte referitoare la optimizarea procesului de sudare cu pană încălzitoare a geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PEHD).

În scopul realizării îmbinărilor sudate s-a utilizat un echipament de sudare cu pană încălzită electric, care oferă posibilitatea reglării între anumite limite a următorilor parametri de sudare: viteza de sudare, forța de presare și temperatura penei încălzitoare.

În vederea optimizării procesului de sudare s-a utilizat planificarea experimentelor asistată de calculator, astfel încât să se poată urmări influența variației factorilor controlabili asupra funcțiilor obiectiv.

Cercetările experimentale au vizat optimizarea sudării geomembranelor din polietilenă de înaltă densitate (PE-HD), având o grosime de 2 mm.

Epruvetele prelevate din probele sudate au fost supuse încercării de desprindere (peel test de tip T) la o temperatură de referință de 23 ° C.

În vederea analizării comportării la încercări mecanice a îmbinărilor sudate realizate cu diferite regimuri de sudare, s-a utilizat tehnica analizei comparative a imaginilor termografice. Încercările de desprindere au fost monitorizate folosind o cameră termografică cu infraroșu de tip FLIR System A40, în vederea urmăririi evoluției degradării epruvetei în timpul solicitării.

Prin prelucrarea rezultatele obținute, în cadrul experimentelor și verificărilor efectuate, s-au analizat influențele factorilor controlabili asupra funcțiilor obiectiv cu ajutorul graficelor tridimensionale pe suprafețe și a curbelor de nivel.

În final au fost determinate valorile optime ale factorilor controlabili care satisfac cerințele impuse funcțiilor obiectiv pentru sudarea geomembranelor PE-HD.

7. Concluzii și contribuții personale

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