

EVALUAREA INTEGRITĂȚII ȘI DURABILITĂȚII MATERIALELOR PLASTICE DIN INDUSTRIA AUTOMOTIVE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor ing. Tamas KRAUSZ

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA

luna 10 anul 2023

Teza de doctorat are ca obiectiv studiul influenței armării cu fibre de sticlă a policarbonatului, asupra proprietăților mecanice statice și dinamice.

Investigațiile definite în cadrul tezei de doctorat pornesc de la stadiul actual în caracterizarea materialelor polimerice și își propun completările investigațiilor deja existente, dar restrânse, respectiv punerea unor baze pentru ariile legate de mecanica și rezistența materialelor unde disponibilitatea datelor este limitată.

Pentru atingerea scopului enunțat s-a propus, pe de o parte, un program experimental extins, iar pe de altă parte, elaborarea unor modele de material pentru evaluarea numerică a comportamentului policarbonatelor în condiții diferite de încărcări mecanice.

Prin rezultatele obținute în cadrul încercărilor experimentale, efectuate pe mașini de încercat dedicate, respectând o serie de standarde internaționale, și prin elaborarea unor modele de material validate cu scopul evaluării integrității componentelor din materiale polimerice, teza de doctorat prezintă un potențial ridicat în domeniul proiectării mecanice din industria automotive.

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole, cinci dintre acestea fiind de conținut, prezentând metodele de determinări experimentale și numerice, iar unul de concluzii și contribuții personale.

Capitolul 1, intitulat “**Materiale polimerice utilizate în industria automotive**”, prezintă, în general, materialele polimerice, dezvoltarea și caracteristicile acestora, procesul injecției maselor plastice, respectiv aspecte generale despre policarbonat și despre clasele selectate pentru investigațiile propuse din gama Makrolon.

În industria automotive asimilarea materialelor polimerice a înregistrat un ritm foarte mare. Evoluția folosirii materialelor plastice, în volum, în această industrie a trecut printr-o creștere de la 2%, în anul 1962, la o medie de 50%, în zilele de astăzi. Procentajul materialelor plastice din greutatea medie totală a unui autovehicul ajungând astfel la aproximativ 10-13%.

Principalele beneficii aduse de folosirea materialelor plastice în industria automotive includ reducerea greutății unor subansamble, îmbunătățirea condițiilor de siguranță, reducerea costurilor de fabricație, respectiv, ca un alt beneficiu important, îmbunătățirea aspectelor unor piese, care prin metode convenționale de prelucrare și folosind materiale metalice, ar fi fost aproape imposibile de realizat, astfel oferind însă o libertate mai mare creativității inginerilor proiectanți.

În figura 1 sunt prezentate câteva dintre componentele fabricate din materiale plastice din componența unui autovehicul.

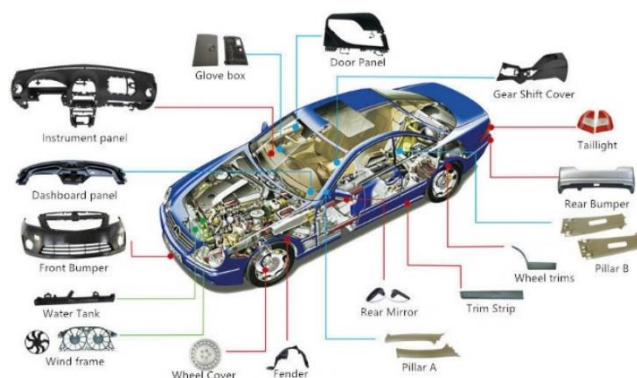


Fig. 1. Exemple de componente plastice din componența unui autovehicul.

Comportamentul mecanic al materialului ales aplicației specifice este însă influențat și de procesul de fabricație al piesei finale, pe lângă tipul sau combinația de materiale selectate.

Cea mai comună metodă de fabricație în cazul materialelor plastice este turnarea prin injecție, care vine însă cu o serie de parametri care trebuie cunoscuți și controlați pentru a asigura calitatea dorită a pieselor produse. Modul de curgere al topiturii sau efectele transferului de căldură, pot a avea o influență majoră asupra omogenității materialului sau asupra orientării fibrelor, dacă procesul nu este controlat într-un mod corespunzător.

Parametri optimi de injecție pot fi determinați prin analize numerice specifice de curgere al materialului topit în interiorul matriței, însă mitigarea riscurilor în cazul unor piese injectate poate fi atinsă și prin urmărirea unor reguli de proiectare, specifice materialelor și formelor geometrice necesare. Toate aceste acțiuni la comun pot minimiza apariția unor defecte, care la rândul lor pot fi doar vizuale sau de aspect (urmele de surpare), dar la fel de bine pot fi și defecte care vor influența rezistența materialului (liniile de sudură, tensiunile reziduale).

Policarbonatele sunt materiale termoplastice natural transparente, fiind caracterizate printr-o rigiditate mare, rezistență relativ bună la variații de temperatură sau vâscozitate scăzută în timpul procesării materialului.

Acesta reprezintă unul dintre cele mai folosite materiale termoplastice din domeniile ingineriei, datorită avantajelor pe care le oferă cum ar fi: rezistența excelentă la impact, stabilitatea dimensională, stabilitatea termică, greutatea redusă, izolarea electrică etc [1].

Precum alte termoplastice din categoria lui, policarbonatul vine și cu o serie de dezavantaje. Cele mai importante minusuri ale materialului ar fi: rezistența scăzută față de chimicale, sensibilitatea la zgărieturi [2], [3] sau la lumina UV.

În ciuda dezavantajelor policarbonatul a devenit materialul ideal într-o serie mare de aplicații din diferite industrii, pentru produse de securitate și de protecție, precum scuturi, parbrize [4], [5] sau carcase pentru produse electronice și electrocasnice etc.

Tehnologiile de ultima generație din injecția maselor plastice au condus la calități superioare ale suprafețelor obținute din policarbonat, permițând policarbonatelor răspândirea la scară largă în industria automotive, într-o varietate mare de produse, cu accent pe produsele de habitacul, precum ceasuri de bord, Head-Up Display-uri, navigații multimedia etc.

Clasele de material considerate în teza de doctorat sunt trei tipuri de policarbonat din familia produselor Makrolon, aparținând Covestro AG. Clasele de Makrolon obținute prin ranforsări cu fibre de sticlă posedă caracteristici speciale cum ar fi rezistență la flacără, rezistență ridicată la impact, rigiditate mare sau stabilitate dimensională.

Materialele pentru investigații au fost selectate în funcție de utilizarea lor în diferite aplicații de habitacul, și sunt următoarele: Makrolon 2405 – PC neranforsat, Makrolon 9415 – PC armat cu 10% fibră de sticlă, respectiv Makrolon 8035 – PC ranforsat cu 30% fibră de sticlă.

Capitolul 2, intitulat “**Stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate**”, precum sugerează numele, tratează stadiul actual al cercetării privind policarbonatul și compozitele derivate, concentrându-se atât pe studii experimentale, cât și pe studii numerice din literatura de specialitate.

Policarbonatul ranforsat cu fibră de sticlă și-a găsit aplicabilitatea într-o mare varietate de industrii, cu prilejul înlocuirii materialelor metalice din diverse considerente.

Mulți autori au studiat comportamentul policarbonatului, în contextul mai multor domenii de utilizare, precum aplicații mecanice (ex. carcase pentru diferite produse), aplicații optice (ex. faruri ale autovehiculelor), aplicații care necesită o rezistență și o durabilitate crescută a policarbonatului ales ca material de bază.

Stabilitatea culorii, rezistență scăzută la zgârieturi, respectiv efectele negative îndelungate ale razelor ultraviolete și cele ale condițiilor meteo asupra policarbonatului au reprezentat subiectul pentru mulți cercetători [6].

În ceea ce privește tema tezei de doctorat, cele mai importante studii care s-au făcut și care au reprezentat punctul de plecare al investigațiilor experimentale și numerice sunt legate de comportamentul static, de comportamentul dinamic și de mecanismele de rupere ale policarbonatului sau ale derivatelor ranforsate.

Efectele vitezei de încărcare și ale temperaturii asupra răspunsului tensiune – deformație specifică al policarbonatului narmat au fost investigate experimental peste o plajă mare de viteze de încărcare și temperaturi, de mai mulți autori [7], [8], [9], [10]. Numeroși autori din domeniu au studiat în detaliu, de asemenea, comportamentul la impact al policarbonatului și al compozitelor de policarbonat [11], [4], [12], [13], [14], [15], [5].

Din perspectiva analizelor numerice utilizând metoda elementelor finite, cele mai comune modele matematice bazate pe investigațiile experimentale uniaxiale sunt modelele elastoplastice constitutive și tridimensionale, propuse de mai mulți autori, precum de Cao et al. [16], Mulliken et al. [17], Richeton et al. [18] sau Yu et al. [19], pentru a replica comportamentul materialului dinainte și după curgere, în funcție de viteza de încărcare și de temperatură, când acesta se supune încărcării de tracțiune.

Pe de altă parte, pentru studiul numeric al încărcărilor dinamice de impact, numeroase lucrări științifice abordează modele de material, cum ar fi modelul MAT_024 sau MAT_081, modele de plasticitate, din programul de analize cu elemente finite ANSYS LS-DYNA, însoțite de diferiți parametri de cedare, cum ar fi deformația specifică admisibilă sau parametri rezultați din curbe de triaxialitate [14], [13].

Puține studii din literatura de specialitate consultată s-au concentrat însă asupra unor comparații de-o mai mare anvergură între comportamentul static și dinamic al policarbonatului narmat față de una sau mai multe clase armate ale acestuia, cu diferite procentaje de fibră de sticlă. Mai puține studii și-au propus investigația la încărcarea de impact a unor probe crestate din gama policarbonatelor armate și narmate cu fibră de sticlă. La fel se poate spune și despre oboseala policarbonatelor, despre care puține informații sunt disponibile în literatură.

Capitolul 3, intitulat “**Caracterizarea mecanică prin încercări statice a materialelor pe bază de policarbonat**”, are ca obiectiv descrierea încercărilor statice efectuate pentru

determinarea influenței unor parametri asupra răspunsului cvasistatic al celor trei clase de Makrolon supuse investigațiilor.

Scopul investigațiilor a fost evaluarea influenței vitezei de încărcare și a temperaturii - atât la încălzire constantă, cât și la îmbătrânirea materialului – asupra proprietăților mecanice ale celor trei clase din gama Makrolon la încercări de tracțiune, respectiv evaluarea tenacității statice la rupere a materialelor selectate.

În cadrul încercărilor la tracțiune s-a putut observa că viteza de încărcare are o influență scăzută asupra modulului de elasticitate, porțiunea liniară a curbelor caracteristice fiind aproape identică pentru toate vitezele de încărcare. Rezultate similare au fost prezentate în literatura de specialitate pentru alte tipuri de polimeri [20]. Influența majoră asupra creșterii modulului de elasticitate o are creșterea raportului conținutului de fibră de sticlă.

Trebuie menționată însă o rezistență maximă crescută a tuturor materialelor cu creșterea vitezei de încărcare (Fig. 2).

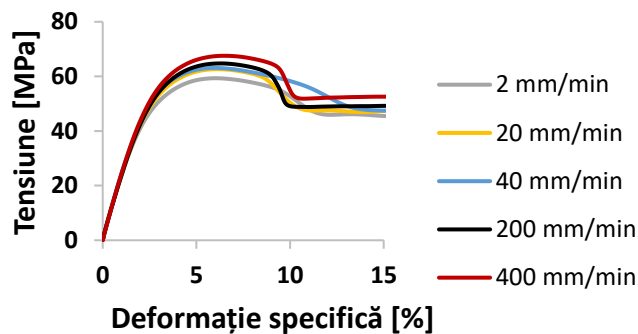


Fig. 2. Curbe caracteristice ingineresti la diferite regimuri de încărcare pentru Makrolon 2405.

Pentru încercările la tracțiune bazate pe încălzirea constantă, prealabilă a probelor, o observație comună pentru toate clasele de material studiate este dependența strictă a rezistenței maxime de temperatură.

La toate materialele investigate o scădere a rezistenței maxime poate fi observată cu creșterea temperaturii de la 22°C până la 80°C, cu 43,61% pentru Makrolon 2405 (Fig. 3.a), 51,45% pentru Makrolon 9415 și 36,20% pentru Makrolon 8035. Precum rezistența la rupere, modulul de elasticitate este de asemenea mult influențat de temperatură. Acesta suferă o descreștere de până la 13% pentru Makrolon 2405 și pentru Makrolon 9415, respectiv o scădere puțin mai mică de 7,5% pentru Makrolon 8035.

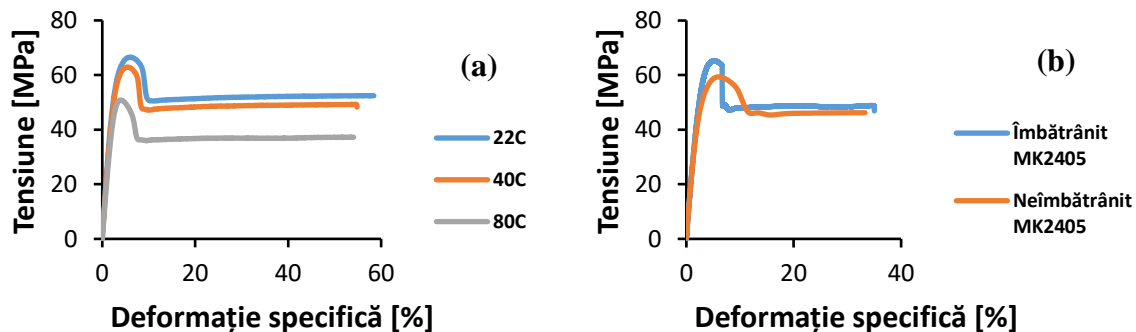


Fig. 3. Curbe tensiune – deformație specifică pentru Makrolon 2405: (a) în funcție de temperatură și b) probe îmbătrânite și neîmbătrânite

Referitor la coeficientul de contracție transversală, sau coeficientul lui Poisson, s-a putut observa că toate cele trei materiale arată stabilitate în ciuda creșterii temperaturii. Există o variație de aproximativ 3% pentru fiecare clasă, însă nu este nicio indicație clară asupra impactului negativ al temperaturii.

Curbele aparținând probelor îmbătrânite respectă aceeași tendință ca și cele pentru probele neîmbătrânite, însă un grad ridicat de similitudine poate fi observată doar până la limita de curgere. Dincolo de acest punct epruvetele îmbătrânite prezintă o scădere bruscă (Fig. 3.b), referitoare la tensiuni, în contrast cu materialele neîmbătrânite unde înmuierea materialului se întâmplă mult mai încet.

Cu toate că comportamentul manifestat de epruvetele îmbătrânite este diferit de cel observat de Sonja et al. [21], scăderea bruscă a tensiunilor, în comparație cu probele neîmbătrânite, este așteptată să fie datorită îmbătrânirii fizice și chimice a materialelor la nivel microscopic, rezultând ruperi de legături și făcând astfel loc degradărilor.

Din valorile prezentate se poate observa o creștere foarte mică (1,2%) pentru modulul de elasticitate și pentru rezistența maximă (10%) în favoarea probelor îmbătrânite, dar numai în cazul materialului neranforsat.

În cazul materialelor ranforsate cu fibră de sticlă tendința se va modifica, făcând materialele neîmbătrânite mult mai stabile în cazul încărcărilor cu magnitudini apropiate de rezistența maximă.

Se poate afirma că efectul îmbătrânirii asupra coeficientului de contracție transversală este minim, aceștia păstrându-se aproape constanți.

Ca și concluzii, în cazul încercărilor la tracțiune, investigațiile curente subliniază faptul că rigiditatea materialului este puțin afectată de viteza de încărcare. Cu toate acestea, atunci când rezistența maximă este factorul decisiv, variația acesteia cu viteza de încărcare și cu condițiile de temperatură trebuie să fie luată în considerare pe parcursul proiectării componentelor.

În cazul tenacității la rupere, pentru toate materialele, o repetabilitate foarte bună a valorilor măsurate s-a putut observa, fără o dispersie semnificativă a rezultatelor determinate în termeni de forță - deplasare.

Din analiza microscopică a zonei de rupere s-au putut trage concluzii importante: materialul de bază (neranforsat) a arătat un comportament fragil la rupere, însă, contrar acestei observații, cele două materiale ranforsate cu fibră de sticlă nu au suferit o rupere totală până la sfârșitul testelor. Probele supuse încărcărilor de încovoiere s-au deformat plastic, dar fisura generată prin prelucrări mecanice nu s-a propagat prin toată secțiunea transversală a epruvetei.

Valorile tenacității la rupere cresc odată cu creșterea volumului de fibră de sticlă, însă s-a putut identifica o aplatizare a valorilor, după care acestea încep să scadă dacă procentajul fibrelor de sticlă depășește un anumit prag.

Capitolul 4, intitulat “**Caracterizarea mecanică prin încercări dinamice a materialelor pe bază de policarbonat**”, se concentrează, în prima parte, asupra încercărilor dinamice de impact de tip Charpy, atât pentru probe crestate cât și pentru probe necrestate. A doua parte a capitolului prezintă încercările de oboseală efectuate pentru cele trei materiale, setările de test folosite și construirea curbelor de tip Wöhler cu scopul folosirii acestora în evaluarea durabilității pieselor mecanice folosite în industria automotive.

De-a lungul ciclurilor de viață a multor produse, acestea pot fi expuse la încărcări

externe specifice, precum șocuri, coliziuni sau căderi (drops), care pot necesita absorbției rapide ale energiei. Una dintre cele mai dificile sarcini este asigurarea proprietăților mecanice, cu precădere a rezistenței maxime la impact, având în vedere că acești parametri sunt foarte dependenți de efectele geometrice.

În figura 4 sunt reprezentate imaginile microscopice ale secțiunilor de rupere pentru probele crestate, pentru fiecare material în parte. În cazul lui Makrolon 2405 și Makrolon 9415 se pot diferenția într-un mod clar zonele ductile, cu deformații locale înaintea cedării materialului, proporționale cu procentajul fibrelor de sticlă din compoziție. În cazul lui Makrolon 8035 secțiunea transversală este caracterizată în cea mai mare măsură de o ruptură fragilă.

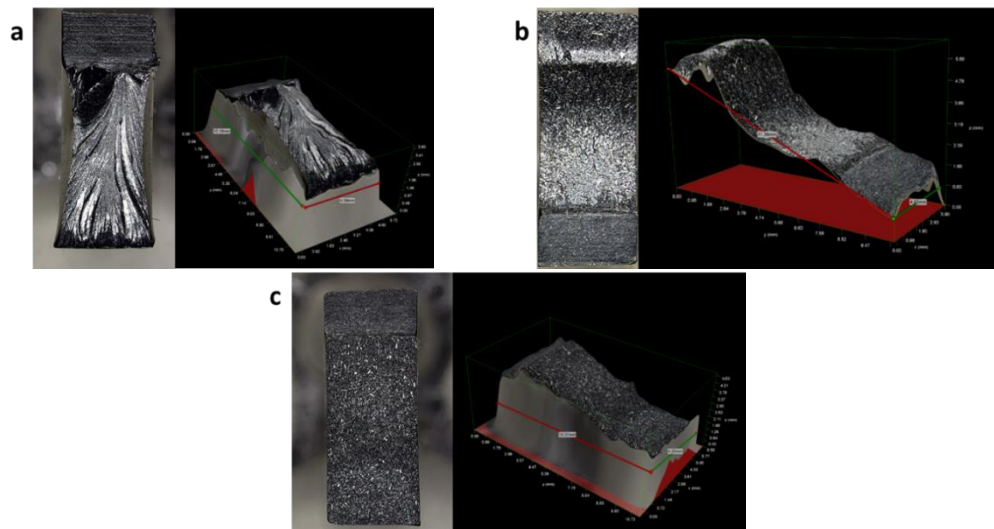


Fig. 4. Probe rupte în urma încercărilor dinamice de impact tip Charpy, folosind un ciocan de 5 [J]: (a) Makrolon 2405; (b) Makrolon 9415; (c) Makrolon 8035.

Probele necrestate datorită plasticității materialului care precede ruperea, au absorbit niveluri de energii mult mai mari la impact.

Dincolo de diferențele dintre probele crestate și necrestate, s-a observat un delta semnificativ de mare, între capacitatea mare de absorbție a energiei de impact în cazul policarbonatului naranforsat față de materialele ranforsate. Energia absorbită de materialul naranforsat este cu un ordin de mărime mai mare decât energiile absorbite de materialele armate cu fibră de sticlă.

Bazat pe datele înregistrate valorile rezistenței maxime la impact au fost de asemenea calculate (Fig. 5).

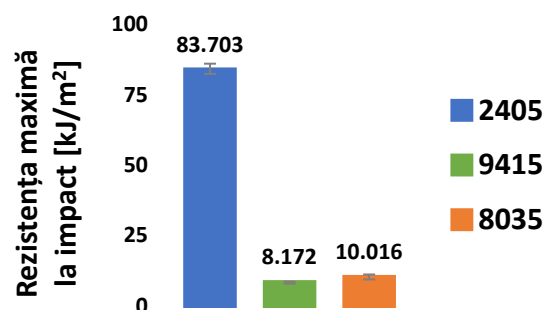


Fig. 5. Valorile rezistenței maxime la impact pentru toate cele trei materiale calculate din datele înregistrate.

Cu toate că în literatura de specialitate nu se găsesc foarte multe studii axate pe comportamentul la impact a policarbonatelor crestate, Allen et al. [11] menționează valori ale

rezistenței la impact pentru materialul narmat aproape identice cu cele obținute în cadrul acestor investigații dinamice.

Creșterea valorilor rezistenței maxime la impact invers proporțională cu creșterea fracției volumice a fibrei de sticlă a fost remarcată pentru ambele tipuri de probe supuse încercărilor. Bazat pe această remarcă, și pe observația anterioară, se poate trage concluzia că în cazul aplicațiilor care de-a lungul ciclului de viață vor fi supuse la condiții severe de impact și de șoc, este recomandată folosirea unui material cu o fracție volumică redusă de fibră de sticlă sau chiar folosirea unui material neranforsat pentru a asigura condițiile optime de rezistență și tenacitate.

În cazul încercărilor de oboseală pentru clasele de material propuse, studiul s-a concentrat asupra domeniului durabilităților mari, reprezentativ pentru piesele de automobile care se supun unor cicluri repetitive și variabile pe parcursul duratei de viață.

Acest studiu a fost propus în contextul în care numeroase investigații s-au făcut cu scopul determinării comportamentului și a rezistenței la oboseală a componentelor metalice, însă doar un număr redus s-a axat asupra caracteristicilor la oboseală a materialelor termoplastice, chiar dacă ele se regăsesc într-un număr foarte mare de aplicații în industrii diferite.

În urma măsurătorilor rezultate consistente, cu o dispersie redusă a datelor, au fost obținute, care mai apoi au fost prelucrate și reprezentate sub forma unor curbe Wöhler. În Figura 6 este prezentată curba de oboseală pentru materialul armat cu 30% fibră de sticlă, împreună cu ecuația dreptei obținută prin regresia liniară a punctelor, respectiv cu valorile coeficienților de determinare R^2 .

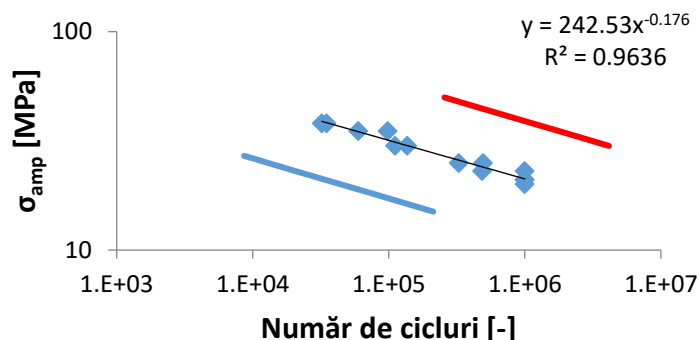


Fig. 6. Curba de oboseală și expresia dreptei obținută prin regresie liniară pentru Makrolon 8035.

Încercările de oboseală efectuate au reprezentat punctul de plecare pentru studiul durabilităților celor trei clase de Makrolon, având în vedere, că print-o documentare mai detaliată a datelor și a cunoștințelor disponibile în momentul de față, o metodă, sau o diagramă CFL, care să prezică cu o acuratețe crescută, durabilitate materialelor termoplastice, luând în calcul multiple efecte externe, precum temperatură și umiditate, respectiv mai mulți coeficienți de asimetrie (R), este doar tratată în cazuri particulare, astfel reprezentând o direcție care poate oferi multe posibilități pentru mediul academic și pentru cel industrial.

Capitolul 5, intitulat “**Modele de material pentru analize utilizând metoda elementelor finite**”, relatează elaborarea modelelor de material pentru analizele utilizând metoda elementelor finite pe baza datelor de material obținute, atât în cazul testelor statice, cât și în cel al testelor dinamice.

Principiul de bază care stă la bază modelării materialelor cu scopul folosirii acestora în diferite analize numerice, este că modelul de material trebuie selectat în funcție de obiectivul investigației. Acesta se selectează în funcție de tipul piesei de analizat, diferențind piesele ca fiind polimerice, elastomerice sau metalice, respectiv în funcție de tipul încărcării și de deformațiile produse de acel tip de încărcare. Se pot defini trei categorii mari de încărcări mecanice: încărcări cvasistatice, încărcări dinamice de vibrații și încărcări dinamice de impact.

Fiecare categorie de încărcare mecanică se caracterizează prin anumite particularități. Categoriei încărcărilor dinamice îi este specifică utilizarea modelelor liniar elastice, impuse mai ales de natura analizelor de vibrații dar și de deformațiile permise, reprezentând un procentaj considerat foarte mic. Categoriile de încărcări caracterizate de neliniarități, și astfel de modele de material mai complexe, sunt categoriile încărcărilor cvasistatice și a celor dinamice de impact.

În cadrul investigațiilor categoria încărcărilor cvasistatice a fost împărțită în două părți: prima parte având ca obiectiv găsirea unui model capabil să replice comportamentul elastoplastic al materialelor, până la începutul fenomenului de gătuire, respectiv a doua parte cu scopul găsirii unui model vâscoplastic, care să descrie atât răspunsul materialelor după începerea găturii acestora dar, în același timp, care să fie capabil să țină cont și de variația vitezelor de încărcare sau de încărcările ciclice.

Un model de ecruisare izotropică multiliniară a fost ales primei părți a încărcărilor cvasistatice. În urma analizelor numerice s-a putut observa o descriere perfectă a comportamentului elastoplastic al tuturor celor trei grade de policarbonat la încercarea de tracțiune. Astfel, se poate spune că atunci când se urmărește răspunsul materialului până la atingerea rezistenței maxime sau până la începutul fenomenului de gătuire, modelul de ecruisare izotropică multiliniară reprezintă o alegere perfectă.

Pentru cea de-a doua parte a încărcărilor cvasistatice, valabil însă, în același timp, și încărcărilor dinamice de impact, a fost ales modelul de material ANSYS Three Network Model (ANSYS TNM), dezvoltat de [22]. Acesta este caracteristic modelelor neliniare, vâscoplastice avansate, calibrate în mod special pentru materialele termoplastice, și se caracterizează prin capacitatea de-a considera dependența materialului atât de viteza de încărcare, cât și de variația temperaturii. Un astfel de model fiind necesar pentru descrierea comportamentului de după rezistența maximă, când materialul trece printr-o gătuire semnificativă.

Pentru validarea modelului de material obținut din programul MCalibration, a fost setată o analiză numerică în ANSYS Mechanical. Folosind modelul TNM s-a putut replica fenomenul de gătuire a porțiunii calibrate a epruvetei. În plus, modelul de material a redat, cu o acuratețe destul de ridicată, și zona în care s-ar produce ruperea materialului, după o extindere semnificativă a găturii acestuia.

Pentru modelarea numerică a încercărilor dinamice de impact de tip Charpy, analizele s-au efectuat cu programul comercial de analize explicite ANSYS LS-DYNA.

În cadrul studiului numeric, pentru epruvetele necrestate, similar încărcărilor cvasistatice, s-a folosit modelul de ecruisare izotropică multiliniară, însoțit de un criteriu de cedare, bazat pe deformația specifică plastică, cu scopul modelării răspunsului materialelor după apariția ruperii prin metoda eroziunii elementelor. O corelare foarte bună a fost observată în cazul lui Makrolon 2405 și 9415, în privința forței maxime și a pantei curbei în regiunea elastică.

Analizele numerice corespunzătoare pentru probele crestate au fost setate într-un mod asemănător primei analize, însă în termeni de model de material s-a folosit modelul *MAT_089 (*MAT_PLASTICITY_POLYMER), un model de material care permite definirea întregii curbe tensiune – deformație specifică, fără separarea perechilor de valori tensiune reală în

funcție de deformare specifică plastică, specific modelului de ecrusare izotropică folosit în cazurile anterioare. Cu scopul reproducerii ruperii observate în timpul încercărilor experimentale, parametri de tip *MAT_ADD_DAMAGE_DIEM au fost definiți, bazându-se pe dependența de viteza de încărcare a limitei admisibile deformației specifice.

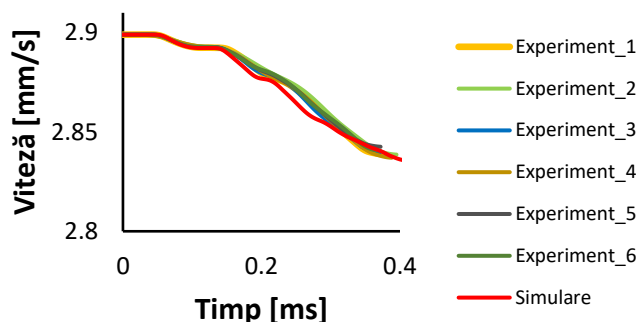


Fig. 7. Reprezentările grafice ale curbelor viteză – timp de la încercările de impact, respectiv din analizele numerice pentru Makrolon 8035.

În cazul materialului Makrolon 8035 curba obținută este caracterizată de variații repetitive, atât pentru datele experimentale cât și pentru rezultatele numerice, dar având o coborâre puțin mai semnificativă în cazul modelului numeric decât cea observată în timpul măsurătorilor.

Având ca obiectiv determinarea celui mai potrivit model de material care să prezică cu o acuratețe cât mai ridicată modurile proprii de vibrații și frecvențele naturale aferente, pentru policarbonatul ranforsat cu 30% fibră de sticlă, s-au efectuat două analize numerice folosind abordări diferite.

Prima abordare, cea clasică, considera materialul ca fiind unul omogen, definind proprietățile acestuia doar prin parametri liniar elastici. A doua abordare implica modelarea materialului ca fiind unul anizotrop, neomogen, considerând diferențele de rigiditate datorate orientării fibrelor de sticlă, rezultate în urma procesului de injecție.

Considerând orientarea fibrelor, comparând rezultatele analizelor structurale se pot observa diferențele atât pentru valorile frecvențelor de rezonanță, cât și pentru modurile proprii, ca și consecință ale efectelor locale ale ranforsării prin fibrele de sticlă asupra comportamentului dinamic al materialului față de materialul omogen.

Pentru validarea concluziei anterioare a fost efectuată o măsurătoare de laborator. Conform validării devine clar faptul că atunci când se urmărește o evaluare cu un grad ridicat de acuratețe (aprox. 6%) este necesară considerarea orientării fibrelor din material. În cazul în care ele nu sunt considerate pentru scopul simulării, diferențele față de valorile reale pot ajunge și până la un procentaj de 27%.

Pe baza curbei de oboseală determinată în capitolul 4 al tezei de doctorat pentru policarbonatul ranforsat cu 30% fibră de sticlă, respectiv pe baza validării experimentale a modelului numeric, o analiză de oboseală pentru carcasa Head-Up Display-ului a fost efectuată.

Efectuând analiza de oboseală pe baza tensiunilor echivalente obținute aplicând forța în regim cvasistatic, a rezultat o durabilitate pentru materialul carcasei mai mare ca 10^6 cicluri, afirmându-se astfel ca în condițiile ideale ale unei încărcări sinusoidale ciclice materialul piesei va prezenta o durată de viață infinită.

Capitolul 6, intitulat “**Concluzii finale**”, prezintă concluziile generale ale investigațiilor efectuate.

Sunt evidențiate, de asemenea, contribuțiile personale ale autorului, dintre care se pot menționa:

- Studiul influenței armării cu fibre de sticlă a policarbonatului asupra proprietăților mecanice statice și dinamice.
- Analiza efectului temperaturii asupra coeficientului de contracție transversală pentru cele trei clase de policarbonat.
- Analiza efectului îmbătrânirii asupra comportamentului la tracțiune ale celor trei tipuri de Makrolon.
- Prelucrarea mecanică a unor probe de tracțiune pentru obținerea probelor specifice încercărilor de impact.
- Studiul sensibilității creștăturii, considerată ca una dintre cele mai mari probleme asociate cu materialele de tip policarbonat, prin încercări dinamice de impact a unor probe crestate, deoarece în literatura de specialitate și în informațiile furnizate de producători găsindu-se doar date pentru probe necrestate.
- Elaborarea unor modele de material validate experimental pentru evaluarea integrității componentelor din materiale polimerice.
- Determinarea rezistenței la oboseală și obținerea unor curbe Wöhler, pentru cele trei clase de Makrolon, în contextul în care numeroase investigații sunt disponibile pentru materiale metalice, însă doar un număr redus de studii se axează pe comportamentul materialelor termoplastice.
- Calibrarea modelului de material vâscoplastic ANSYS TNM pentru cele trei clase de material, considerând influența vitezei de încărcare.
- Maparea orientării fibrelor rezultate din analizele reologice pentru Makrolon 8035 și efectuarea analizei modale cu modelul obținut.
- Efectuarea validării experimentale a analizei de rezonanță pentru carcasa de Head-Up Display.
- Analiza de oboseală pentru carcasa de Head-Up Display validată.
- Din studiile experimentale și numerice pentru determinarea comportamentelor statice și dinamice ale celor trei clase de policarbonat, care au stat la baza elaborării tezei, au rezultat 4 articole științifice, publicate în jurnale și conferințe internaționale (2 ISI și 2 SCOPUS)

Capitolul se încheie cu prezentarea principalelor direcții viitoare de cercetare pe care autorul le are în vedere.

Teza de doctorat este de mare actualitate și relevanță științifică întrucât propune o metodologie completă de evaluare a proprietăților materialelor unei clase de materiale polimerice frecvent folosite în industria automotive.

Bibliografie

- [1] D. Kyriacos, "Polycarbonates," *Brydson's Plastics Materials: Eighth Edition*, pp. 457–485, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00017-7.
- [2] W. Boentoro, A. Pflug, and B. Szyszka, "Scratch resistance analysis of coatings on glass and polycarbonate," *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 10, pp. 3121–3125, Mar. 2009, doi: 10.1016/J.TSF.2008.11.119.
- [3] M. Barletta, M. Puopolo, A. Gisario, and S. Vesco, "Smart coatings on thermoplastic polycarbonates: LEGO-Design (LD) for facile manufacturability," *Prog Org Coat*, vol. 101, pp. 161–177, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2016.08.002.
- [4] Q. H. Shah, "Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts," *Int J Impact Eng*, vol. 36, no. 9, pp. 1128–1135, Sep. 2009, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2008.12.005.
- [5] Z. Rosenberg and R. Kositski, "Deep indentation and terminal ballistics of polycarbonate," *Int J Impact Eng*, vol. 103, pp. 225–230, May 2017, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2017.01.018.
- [6] H. De Brouwer, J. Van Den Bogerd, and J. Hoover, "Color stability of polycarbonate for optical applications," *Eur Polym J*, vol. 71, pp. 558–566, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.08.031.
- [7] K. Cao, X. Ma, B. Zhang, Y. Wang, and Y. Wang, "Tensile behavior of polycarbonate over a wide range of strain rates," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 16–17, pp. 4056–4061, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.MSEA.2010.03.088.
- [8] K. Cao, Y. Wang, and Y. Wang, "Effects of strain rate and temperature on the tension behavior of polycarbonate," *Mater Des*, vol. 38, pp. 53–58, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.02.007.
- [9] P. G. Autade and D. S. Pawar, "Effect of Temperature and Strain Rate on the Mechanical Properties of Polycarbonate and Polycarbonate/Thermoplastic Polyurethane Blend," vol. 2, no. 3, pp. 60–65, 2015, doi: 10.9790/019X-0236065.
- [10] W. Zhang and Y. Xu, "Experimental Studies of Mechanical Properties of Polycarbonate," *Mechanical Properties of Polycarbonate*, pp. 1–28, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-1-78548-313-4.50001-7.
- [11] G. Allen, D. C. W. Morley, and T. Williams, "The impact strength of polycarbonate," *J Mater Sci*, vol. 8, no. 10, pp. 1449–1452, Oct. 1973, doi: 10.1007/BF00551669.
- [12] Y. Xu, H. Lu, T. Gao, and W. Zhang, "Predicting the low-velocity impact behavior of polycarbonate: Influence of thermal history during injection molding," *Int J Impact Eng*, vol. 86, pp. 265–273, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2015.08.013.
- [13] Y. H. Yau, S. N. Hua, and C. K. Kok, "Structural failure analysis of polycarbonate enclosures of electronic devices subjected to multiple ball impacts," *Polym Test*, vol. 65, pp. 374–386, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2017.12.013.
- [14] F. Mullaoglu, F. Usta, H. S. Türkmen, Z. Kazanci, D. Balkan, and E. Akay, "Deformation Behavior of the Polycarbonate Plates Subjected to Impact Loading," *Procedia Eng*, vol. 167, pp. 143–150, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.11.681.
- [15] A. Ahmed, N. Asija, H. Chauhan, Kartikeya, and N. Bhatnagar, "Study of Polycarbonate Based Nano-composites at High Strain Rate Impact," *Procedia Structural Integrity*, vol. 14, pp. 507–513, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR.2019.05.061.
- [16] K. Cao, Y. Wang, and Y. Wang, "Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates," *Int J Solids Struct*, vol. 51, no. 13, pp. 2539–2548, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2014.03.026.

- [17] A. D. Mulliken and M. C. Boyce, “Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates,” *Int J Solids Struct*, vol. 43, no. 5, pp. 1331–1356, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2005.04.016.
- [18] J. Richeton, S. Ahzi, K. S. Vecchio, F. C. Jiang, and A. Makradi, “Modeling and validation of the large deformation inelastic response of amorphous polymers over a wide range of temperatures and strain rates,” *Int J Solids Struct*, vol. 44, no. 24, pp. 7938–7954, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2007.05.018.
- [19] P. Yu, X. Yao, Q. Han, S. Zang, and Y. Gu, “A visco-elastoplastic constitutive model for large deformation response of polycarbonate over a wide range of strain rates and temperatures,” *Polymer (Guildf)*, vol. 55, no. 25, pp. 6577–6593, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.polymer.2014.09.071.
- [20] D. A. Şerban, G. Weber, L. Marşavina, V. V. Silberschmidt, and W. Hufenbach, “Tensile properties of semi-crystalline thermoplastic polymers: Effects of temperature and strain rates,” *Polym Test*, vol. 32, no. 2, pp. 413–425, Apr. 2013, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2012.12.002.
- [21] S. Redjala, R. Ferhoum, N. Aït Hocine, and S. Azem, “Degradation of Polycarbonate Properties Under Thermal Aging,” *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 19, no. 2, pp. 536–542, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00630-0.
- [22] J. S. Bergström and J. E. Bischoff, “An Advanced Thermomechanical Constitutive Model for UHMWPE,” *International Journal of Structural Changes in Solids*, vol. 2, no. 1, pp. 31–39, 2010.