



Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala Doctorală de
Inginerie Mecanică și Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL
PROPRIETĂȚILOR MATERIALELOR
COMPOZITE ARMATE CU ȚESĂTURI ȘI A
EFECTULUI SOLICITĂRILOR CICLICE
ASUPRA ACESTOR PROPRIETĂȚI**

Doctorand,
Ana BOBOC (CĂPĂȚÎNĂ)

Conducător științific,
Prof univ.dr.ing. Iulian Gabriel BÎRSAN

Seria I6: Inginerie Mecanică Nr 47

GALAȚI
2019

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT
REZUMAT

CONTRIBUȚII LA STUDIUL PROPRIETĂȚILOR
MATERIALELOR COMPOZITE ARMATE CU
ȚESĂTURI ȘI A EFECTULUI SOLICITĂRILOR
CICLICE ASUPRA ACESTOR PROPRIETĂȚI

Conducător științific,

Prof univ.dr.ing. Iulian Gabriel BÎRSAN

Președinte:

Referenți oficiali:

Doctorand,

Ana BOBOC (CĂPĂȚÎNĂ)

Prof. univ. dr. ing. Elena MEREUȚĂ

Prof. univ. dr. ing. Ilare BORDEAȘU

Șl. univ. dr. ing. Gabriel NĂSTASE

Prof. univ. dr. fiz. Adrian CÎRCIUMARU

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul **ȘTIINȚE INGINEREȘTI**

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

Seria I 6: **Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8: **Ingineria sistemelor**

Domeniul **ȘTIINȚE ECONOMICE**

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul **ȘTIINȚE UMANISTE**

Seria U 1: **Filologie- Engleză**

Seria U 2: **Filologie- Română**

Seria U 3: **Istorie**

Cuprins

Introducere	6
Capitolul 1. Stadiul actual.....	8
Capitolul 2. Obiectivele studiului	10
Capitolul 3. Materiale și metode experimentale	12
3.1. Pregătirea țesăturilor.....	Error! Bookmark not defined.
3.2. Rășini epoxidice utilizate pentru studiul laminelor	Error! Bookmark not defined.
3.3. Formarea materialelor compozite: lamine, laminate	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 4. Proprietăți termice ale laminelor	17
4.1. Căldura specifică a laminelor	17
4.2. Coeficientul de dilatare termică	18
4.3. Concluzii	18
Capitolul 5. Proprietăți mecanice ale laminelor.....	20
5.1. Lamine.....	20
5.2. Teste de tracțiune – încărcare axială	22
5.3. Teste de tracțiune – încărcare oblică	30
5.4. Concluzii	31
Capitolul 6. Proprietăți mecanice ale laminatelor	33
6.1. Teste de tracțiune	33
6.2. Solicitări ciclice	35
Capitolul 7. Concluzii și propuneri pentru dezvoltarea studiului.....	40
BIBLIOGRAFIE.....	43
Lista lucrărilor publicate și prezentate la conferințe naționale și internaționale	Error!
Bookmark not defined.	

Introducere

Evoluția realizărilor în domeniul materialelor compozite, crește progresiv, odată cu necesitatea utilizării acestora în diverse domenii ca: industria aerospațială, industria autovehiculelor, industria navală, industria materialului sportiv, energetică, construcții, medicină. Utilizarea ascendentă în domeniile enumerate mai sus a materialelor compozite se datorează caracteristicilor lor, superioare (de cele mai multe ori) celor ale materialelor clasice, reducerii consumului de energie necesar obținerii lor, rezistenței sporite la coroziune, rezistenței la rupere, rezistenței la uzură, rezistenței la temperaturi înalte, densității reduse, conductivității termice controlabile, deformabilității bune, stabilității dimensionale remarcabile, dilatării termice reduse, rezistenței la impact și multor altor caracteristici care, spre deosebire de materialele clasice, sunt proiectabile [1].

Spre deosebire de materialele tradiționale, materialele compozite sunt create astfel încât, proprietățile lor să fie perfecționate, proiectarea acestora făcându-se pe baza caracteristicilor materialelor componente utilizate în noul material compozit. Astfel, în funcție de domeniul în care se dorește utilizarea lor, materialele compozite trebuie să întrunească anumite calități (proprietăți) impuse de aplicația intenționată.

Cele mai importante proprietăți ale materialelor tradiționale (metale, ceramice, polimeri) pot fi îmbunătățite prin armarea cu fibre. Compozitele pot fi armate cu fibre scurte, fibre lungi, fibre continue și/sau țesături pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, deoarece fibrele preiau o mare parte din solicitări măbind astfel rezistența materialului sau a structurii. Tipul de țesătură utilizat în materialul compozit este foarte important, deoarece, fiecare țesătură are proprietăți diferite, de exemplu, țesătura din fibră de carbon are proprietăți electrice excelente și este utilizată în industria construcțiilor de avioane civile și militare, țesătura din fibră de sticlă, având proprietăți anticorozive bune și rezistență la umiditate, este utilizată în construcția navelor maritime, țesătura aramidică având proprietăți antișoc este utilizată în aplicații militare. Astfel de materiale compozite armate cu fibre au înlocuit materialele structurale convenționale, cum ar fi lemnul și oțelul într-o multitudine de aplicații, mai ales datorită unui raport bun între rezistența mecanică și densitate, datorită rezistenței chimice și unui design versatil.

Matricea reprezintă al doilea element de bază al materialelor compozite, datorită caracteristicilor mecanice, chimice și electrice foarte bune, sistemele epoxidice sunt cele mai utilizate materiale din clasa materialelor polimerice termorigide [2]. Proprietățile polimerului solid - mecanice, electrice, termice - depind în mare măsură de agentul de întărire utilizat, deoarece tipul acestuia și raportul volumic de amestec între rășină și întăritor afectează vâscozitatea în starea de pre-polimer și, deci, afectează prelucrabilitatea sau manevrabilitatea în etapa de plasare efectivă a componentelor în matrice, pe calapoade sau în formele în care urmează a fi formate materialele sau structurile compozite.

Fiind un domeniu încă nou, mai ales privit prin prisma dezvoltării sale explozive, domeniul materialelor compozite este marcat de deficiențele modelelor matematice asociate descrierii proprietăților acestor materiale. Cercetătorul sau inginerul din domeniul materialelor compozite se confruntă cu dificultățile implicate de numărul, practic nelimitat, al combinațiilor matrice-elemente de armare, al rețetelor de formare și al tehnicilor de formare, fiecare dintre aceste elemente având un impact major asupra proprietăților finale ale materialelor formate.

În acest context, prezentul studiu a fost proiectat pe două direcții – oarecum diferite – pe de o parte, testarea modelului laminatului pentru compozite cu matrice polimerică armate cu țesături folosind ca date de intrare proprietățile laminelor și, pe de altă parte, testarea dinamică a materialelor formate pentru a identifica comportamentul acestora la oboseală. Ideea studiului a fost influențată, într-o mare măsură, de rezultatele unor studii anterioare făcute la Centrul de Cercetare-Dezvoltare pentru Compozite cu Matrice Termorigide de la Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați de către colegii dr. Vasile Bria, dr. Marina Bunea, dr. Igor Roman și dr. Victor Ungureanu.

Studiul a fost proiectat astfel încât să asigure repetabilitatea rezultatelor, principalele aspecte fiind cele legate de formarea (în condiții identice) a materialelor destinate testării (fie că este vorba de lamine sau de laminat). Au fost formate lamine (armate cu țesături) cu matrice epoxidică pentru optsprezece tipuri de țesături și trei rășini epoxidice diferite. Materialele laminate au fost formate cu nouă straturi de țesătură pentru una dintre cele trei rășini epoxidice.

Primul capitol al tezei prezintă generalități din sfera materialelor compozite ce țin de importanța lor în diferite aplicații, de asemenea ținând cont de importanța acestui capitol, s-au analizat cercetările la ora actuală în ceea ce privește studiile teoretice și experimentale ale proprietăților mecanice, termice, electrice ale materialelor compozite polimerice.

În al doilea capitol au fost menționate obiectivele principale ce s-au urmărit în elaborarea cercetării.

Al treilea capitol reflectă metodele de pregătire și formare a materialelor compozite (lamine și laminate) armate cu țesături și matrice epoxidică. Sunt prezentate, de asemenea, caracteristicile materialelor utilizate – țesături și polimeri – pentru formarea materialelor compozite supuse studiului.

Următorul capitol se referă la analiza proprietăților termice ale materialelor formate – sunt vizate căldura specifică și coeficientul de dilatare termică liniară – dat fiind faptul că aceste proprietăți, în special în cazul materialelor compozite cu matrice polimerică, reprezintă un criteriu definitoriu în ceea ce privește aplicarea lor.

Capitolul cinci cuprinde aspecte legate de proprietățile mecanice ale laminelor cu o analiză a influenței tipului de țesătură și a tipului de matrice utilizate. Datele prezentate reprezentând o bază pentru analiza proprietăților mecanice ale laminatelor.

Capitolul șase cuprinde rezultatele obținute în urma testelor mecanice (stative și dinamice) efectuate asupra laminatelor alături de o analiză comparativă a datelor experimentale cu cele date de aplicarea modelului laminatului.

Ultimul capitol cuprinde concluziile generale ale studiului însoțite de o serie de extinderi ale acestuia în cercetările viitoare.

Capitolul 1. Stadiul actual

Materialele compozite sunt formate din două sau mai multe materiale care împreună produc proprietățile dorite, care nu pot fi realizate cu oricare elemente constitutive [3,4, 5]. Materialele compozite sunt ansambluri din cel puțin două materiale cu individualitate și care trebuie să asigure stabilirea unor legături de interfață și uneori chiar cristalografice [6, 7, 8, 9]. Unul dintre componenți, ductil, denumit *matrice* asigură transferul de sarcină cu care este solicitat înspre al doilea denumit *fibră*, cel mai adesea dur. Fenomenul are la bază diferența de elasticitate a componenților [10, 11, 12].

Materialele polimerice au fost folosite din timpuri preistorice. Polimerii sunt găsiți în natură, în toate sistemele vii, și materiale cum ar fi lemn, hârtie, piele, fibre naturale [13,14,15]. În timp ce polimerii naturali păstrează importanța lor intrinsecă, materialele sintetice de astăzi sunt utilizate în cea mai mare parte. Primii polimeri produși de om, au fost produși în a doua jumătate a secolului al XIX-lea, formați prin modificarea chimică a materialelor naturale [16, 17, 18].

Polimerii și materialele plastice armate sunt utilizate în diverse aplicații importante, de la obiecte de uz casnic la produse aerospațiale [19,20]. Polimerii au o gamă largă de proprietăți fizice și mecanice care se potrivesc unui număr mare de aplicații tehnice. Structura chimică, masa molară relativă medie și de distribuție, conformație de lanț, morfologie, aditivi și materiale de umplură de ranforsare definesc atât proprietățile materialului individual cât și hibrid și permit croielii sofisticate de material la aplicații specifice [21].

Aceste materiale sunt ușoare, puternice și relativ ieftine, dar poate fi dificil de format în geometrii complexe [22]. Designul ușor devine din ce în ce mai important în diverse industrii, în special în industria aerospațială, energia eoliană și aplicațiile auto [23, 24, 25].

Polimerii armați cu fibre au devenit unele dintre cele mai importante materiale pentru aplicații de inginerie, datorită rigidității specifice ridicate, performanțelor la oboseală, bunei rezistențe chimice și termice, precum și costurilor reduse [26, 27, 28]. Alte proprietăți care le fac aplicabile în toate domeniile industriale sunt: densitatea scăzută și rezistența ridicată. Datorită avantajelor lor, materiale compozite armate cu fibre sunt, acum, din ce în ce mai utilizate pentru înlocuirea materialelor metalice tradiționale și utilizate pe scară largă în aeronave, domeniul marin, industria de apărare, structuri auto, echipamente sportive, transport terestru, construcții și așa mai departe. Spre deosebire de materialele metalice monolit, compozite fibroase sunt de obicei folosite ca produse laminate cu diferite orientări în straturi și fiecare strat este compus din constituenți de fibre și matrice [29, 30, 31]. De aceea, modurile în care eșuează compozitele fibroase sunt mult mai complicate. În scopul de a explora potențialul materialelor compozite în proiectarea structurală, devine extrem de important să se înțeleagă mecanismele lor de eșec [32, 33, 34, 35]. În aceste materiale compozite, fibrele sunt principalul component din punct de vedere mecanic, iar materialul matricei păstrează fibrele împreună, acționează ca un mediu de transfer de sarcină între fibre, și protejează fibrele de mediu (de exemplu, umiditate, etc.) [36, 37, 38].

Comportamentul mecanic al unui laminat depinde în mare măsură de direcțiile fibrelor. În consecință, laminatul trebuie să fie proiectat pentru a îndeplini cerințele specifice pentru fiecare aplicație în parte, în scopul de a obține avantajele maxime ale acestor materiale. Analiza structurală și de optimizare a procedurilor corecte și eficiente sunt esențiale pentru realizarea acestei sarcini [39, 40]. Obiectivul comun al proiectării optime a structurilor compozite laminate [41] este de a determina grosimea stratului, orientările și numărul de straturi ce dau masa minimă a

structurii și care să corespundă, atât constrângerilor impuse [42, 43] cât și criteriului de eșec adoptat [44]. Un model integrat pentru proiectarea optimă a masei plăcilor compozite laminate sub încărcare dinamică este prezentat în figura 1.

Cercetările realizate pe plan internațional și național pentru diferite structuri din materiale compozite stratificate armate cu fibre de sticlă, carbon, kevlar s-au axat pe studiul efectelor orientării fibrelor și ale poziționării laminelor asupra caracteristicilor mecanice ale acestor materiale, pentru diferite combinații de încărcare [45, 46]. De asemenea au fost realizate studii referitoare la comportarea materialelor compozite polimerice la încercările de tracțiune și încovoiere pentru determinarea rigidităților acestora, modulului de elasticitate, dar și a altor proprietăți mecanice ale acestor materiale [47, 48].

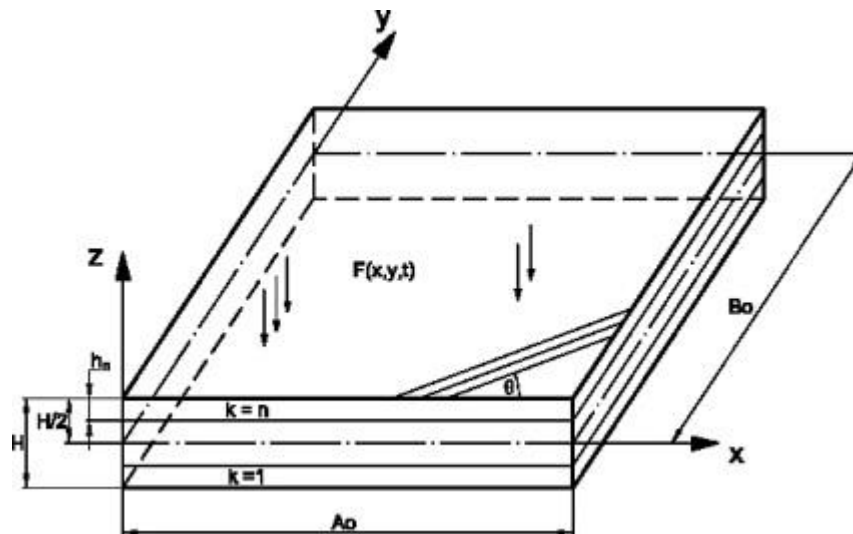


Figura 1. Geometria și încărcarea plăcii compozite stratificate [49].

Compozitele armate cu fibre de carbon posedă proprietăți mecanice excelente, dar suferă la fragilitate. Hibridizarea cu polipropilenă auto-armată (APRS) [50] este o strategie promițătoare de a îmbunătăți ductilitatea polipropilenei armată cu fibre de carbon (CFRPP) [51].

În compozitele hibride, straturile pot include două sau pot fi mai multe tipuri de fibre, de exemplu, fibre de carbon și fibre de sticlă sau fibre de sticlă și fibre aramidice și așa mai departe [52]. Compozitele hibride furnizează posibilități extinse de control asupra rigidității materialelor, asupra rezistenței și, nu în ultimul rând, asupra costurilor. O aplicație extrem de promițătoare a acestor materiale este asociată cu așa-numitele structuri termostabile ale căror dimensiuni nu se modifică la schimburile termice (încălzire sau răcire) [53].

Trecerea la o masă redusă a structurilor conjugată cu o rigiditate înaltă și care au o bună durabilitate la oboseală și rezistență la coroziune a condus la trecerea de la structuri metalice la structuri compozite. Acest lucru aduce o nouă preocupare legată de certificarea noilor componente ca mecanisme de eșec și cerințe de durabilitate ale materialelor compozite [54] care diferă semnificativ față de cele ale materialelor clasice (metale) [55].

După cum este bine cunoscut, unul dintre cele mai mari dezavantaje ale produselor laminate compozite armate cu fibre este discontinuitatea proprietăților materialului între straturile adiacente [56], acest defect este critic pentru durata de viață a produselor laminate compozite, deoarece discontinuitatea acestor proprietăți ale materialului ar putea duce la o concentrații severe de stres și la stări complexe de stres la nivelul interfețelor chiar și în condițiile unei simple încărcări plane [57].

Capitolul 2. Obiectivele studiului

În urma studiului surselor bibliografice cu privire la formarea, caracterizarea și testarea materialelor compozite cu matrice epoxidice și armate cu țesături au fost decelate câteva concluzii extrem de importante. Între acestea, poate cea mai importantă, este legată de faptul că obținerea unui material compozit valoros este un proces amplu care începe cu proiectarea, continuă cu alegerea materialelor și a tehnologiei de formare și se încheie cu caracterizarea și testarea materialului. Scopul acestei lucrări de cercetare este acela de a analiza proprietățile unor compozite polimerice armate cu țesături și de a determina modul în care utilizarea unei rășini sau a alteia produce schimbări în comportamentul (mecanic, termic sau electromagnetic) al materialului format. În egală măsură, un alt obiectiv al studiului, a fost legat de a verifica funcționarea modelului laminatului pentru compozite armate cu țesături pornind de la studiul laminelor armate cu țesături (adică al unei țesături plasate într-o matrice polimerică).

Pentru atingerea scopului au fost stabilite următoarele obiective:

- identificarea modalității optime de formare a laminelor astfel încât să se asigure existența unui număr suficient de epruvete;
- găsirea modalităților de demulare a materialelor astfel încât să se poată refolosi matricele (dat fiind faptul că rășinile epoxidice sunt extrem de aderente);
- stabilirea condițiilor de formare pentru fiecare tip de rășină (cu accent special pe timpul de gel);
- pregătirea țesăturilor care trebuie să cuprindă teste de adeziune a polimerului pentru a putea evidenția eventuala necesitate a pregătirii suprafețelor;
- extragerea epruvetelor necesare testelor de tracțiune asupra laminelor;
 - teste efectuate atât pe direcția urzelii (pretensionată) cât și bătăii pentru eventuala identificare a diferențelor de valori ale constantelor elastice;
 - teste efectuate pentru lamine orientate la alte unghiuri (30° și 45°) pentru verificarea aplicabilității modelului de calcul al constantelor elastice ale laminelor orientate sub diverse unghiuri în cazul laminelor armate cu țesături;
- realizarea efectivă a testelor de tracțiune asupra laminelor pentru determinarea parametrilor elastici ai acestora;
- analiza statistică a rezultatelor testelor de tracțiune;
- analiza comparativă a rezultatelor testelor de tracțiune aplicate laminelor pentru a identifica contribuția fiecărui tip de matrice;
- analiza comparativă a rezultatelor testelor de tracțiune aplicate laminelor pentru a identifica contribuția fiecărui tip de țesătură;
- analiza electromagnetică a laminelor – determinarea conductivității electrice;
- analiza termo-mecanică a laminelor – determinarea coeficientului de dilatare liniară pe direcție perpendiculară pe planul de armare;
- formarea plăcilor compozite armate cu nouă straturi de țesătură;
 - alegerea rășinii (bazat pe rezultatele obținute pentru lamine);
 - alegerea metodei de formare;
 - pregătirea țesăturilor;
- extragerea epruvetelor necesare testării mecanice a materialelor;
- efectuarea testelor la tracțiune, în regim static, asupra materialelor laminate armate cu țesături;

- analiza statistică a rezultatelor testelor la tracțiune și determinarea constantelor elastice de interes;
- determinarea, din calcul, prin aplicarea modelului laminatului, a constantelor elastice ale materialelor laminate;
- compararea rezultatelor obținute cu rezultatele calculate cu ajutorul modelului laminatului având ca date de intrare constantele elastice determinate experimental ale laminelor;
- efectuarea testelor dinamice asupra materialelor laminate;
- stabilirea condițiilor ciclice de încărcare și determinarea experimentală a constantelor elastice ale materialelor după încheierea solicitărilor ciclice;
- efectuarea testelor pentru determinarea proprietăților electromagnetice ale materialelor;
- analiza proprietăților electromagnetice ale laminelor pentru a decela influența armăturii și, respectiv, influența matricei;
- efectuarea testelor pentru determinarea proprietăților termice ale materialelor;
- analiza proprietăților termice ale materialelor pentru a decela influența armăturii și, respectiv, influența matricei.

Capitolul 3. Materiale și metode experimentale

De obicei, materialele noi apar din cauza necesității de a îmbunătăți eficiența structurii și a performanței, și ca o regulă, materiale noi, la rândul lor oferă noi oportunități de a se dezvolta. Materiale structurale ar trebui să aibă un număr mare de caracteristici fizice, chimice și alte tipuri de proprietăți, dar există cel puțin două caracteristici principale care sunt de o importanță primordială și aceste caracteristici sunt rigiditatea și rezistența, care imprimă structurii capacitatea de a menține forma și dimensiunile acesteia sub încărcare sau orice altă acțiune externă [58].

Materiale polimerice armate cu fibre (FRP) sunt utilizate din ce în ce mai mult în aplicații din cele mai diverse de la infrastructura metropolitană până la industria aerospațială. Avantajele materialelor compozite polimerice armate sunt:

- densitatea redusă;
- rezistența la coroziune;
- durata de viață mai lungă și costuri reduse de întreținere;
- rezistență mecanică ridicată [59].

Pentru a valorifica rezistența ridicată și rigiditatea fibrelor într-un material compozit monolit, potrivit pentru ingineri, fibrele trebuie legate cu ajutorul unui material ale cărui rezistență și rigiditate sunt, în mod natural, mult mai mici decât cele din fibre, numit matrice. Matricele furnizează forma finală a structurii din materiale compozite și guvernează parametrii procesului de fabricație. Combinația optimă de proprietăți de fibre și matrice trebuie să îndeplinească un set de cerințe operaționale și de producție, care, uneori, sunt contradictorii. Aceste cerințe au fost îndeplinite pentru toate compozitele deja formate (și aplicate) chiar dacă acest ansamblu de condiții nu a fost explicitat [60].

Performanța unui material este, în general, evaluată prin intermediul unei mărimi a cărei valoare este variabilă, cum ar fi deplasarea unui punct, tensiunea maximă, etc., sau prin intermediul unui set de mărimi variabile (ne referim la valoare variabilă a mărimii). În cazul materialelor compozite variabilitatea anumitor parametri apare din variabilitatea proprietăților constituenților, din variabilitatea distribuției acestora, din geometria structurală, din variabilitatea condițiilor de încărcare și, nu în ultimul rând, din variabilitatea condițiilor de formare (de fabricație). Ca un material ortotrop, această variabilitate poate duce la un eșec catastrofal, în principal, atunci când inexactitate apare în direcția de încărcare sau de orientare a fibrei, în timp ce abordarea tradițională a factorilor de siguranță ar putea avea ca rezultat un conservatorism costisitor și inutilă, ceea ce reprezintă un dezavantaj serios pentru a face compozite competitive și durabile [61].

Materiale compozite armate cu fibre sunt utilizate în diverse aplicații în sectoare industriale cu nivel înalt de tehnologie, cum ar fi industria aerospațială, industria auto și industria energetică (energie eoliană). Cererea foarte mare a pieței mare determină creșterea permanentă a producției de materiale sau structuri compozite, puternic susținută de rezistența mecanică foarte mare, de densitatea redusă dar și de cadența de formare și de complexitatea structurilor de formare specifică – comparativ cu metalele – și fără a lua în considerare faptul că, în cazul structurilor compozite, nu sunt necesare lucrări complexe de finisaj sau acoperire [62].

În ultima perioadă o atenție deosebită este acordată compozitelor hibride și aici este vorba de compozite cu aceeași matrice dar cu tipuri diferite de fibre de armare sau de matrice armate cu același tip de țesătură dar cu gradient al unei proprietăți sau de compozite complexe armate cu diferite tipuri de fibre, modificate cu diverși agenți și cu matrice realizate din doi sau mai mulți

polimeri. Atunci când se analizează proprietățile mecanice ale compozitelor hibride [63], regula generală a amestecurilor poate fi utilizată pentru descrierea unei anumite proprietăți a materialului bazat pe cunoașterea fracțiilor volumice ale componentelor sale și pe proprietățile acestor componente [64]. Un efect pozitiv sau negativ, în cazul unui compozit hibrid, este definit ca o abatere, pozitivă sau negativă, a unei anumite proprietăți mecanice față de un material de referință (de obicei un compozit cu două faze). În plus, în ceea ce privește compozitele ortotrope, un studiu recent privind materialele compozite hibride realizate din fibre de carbon și țesături de fibre de sticlă a arătat că atât la tracțiune cât și la compresiune compozitul hibrid a prezentat efecte pozitive (creșteri ale valorilor parametrilor mășurați – rezistența) [65]. În cazul materialelor compozite (simple sau hibride) se manifestă o largă variabilitate a rezultatelor obținute iar această variabilitate este indusă, în primul rând, de variabilitatea proprietăților componentelor, din variabilitatea distribuției fibrelor de armare, din geometria structurală, din procesul de formare sau din condițiile de testare [66].

Studiile efectuate în ultimii douăzeci de ani au relevat faptul că materialele compozite cu matrice epoxidică armate cu fibre sunt dintre cele mai performante în ceea ce privește proprietățile mecanice. În cazul acestor materiale trebuie evidențiate două aspecte fundamentale: pe de o parte faptul că rășinile epoxidice nu se încadrează în categoria substanțelor ecologice (environmental friendly) și, pe de altă parte faptul că, fiind materiale polimerice termorigide [67], nu pot fi realizate structuri compozite prin presarea unor pre-preguri (ci numai prin eventuala lipire a acestora). Astfel se pierde unul dintre avantajele determinante ale matricelor termoplastice armate cu fibre – cadența mare de formare [68]. O soluție tehnică există însă – formarea lay-up care permite folosirea diferitelor tipuri de fibre, pe de o parte și, pe de altă parte, permite modificarea matricei de la un strat la altul al materialului dar asigurând stabilirea unor legături polimerice inter- și translaminare care permit materialului să se comporte ca un întreg atunci când este supus diferitelor tipuri de încărcări.

O altă problemă este legată de dificultatea menținerii distribuției regulate a fibrelor în timpul formării, cu atât mai mult cu cât lay-up-ul presupune întinderea mecanică a polimerului (amestecului pre-polimeric) peste fibre utilizând pensule sau spatule. Pentru rezolvarea acestei probleme o soluție extrem de atractivă este aceea de a utiliza țesături bidirecționale în loc de pre-preguri ortotrope orientate sub diverse unghiuri (pentru a reduce anizotropia). Și în acest caz se poate vorbi de un dezavantaj – faptul că țesăturile utilizate în general ca elemente de armare (realizate din fibre de carbon, fibre de sticlă sau fibre aramidice) sunt instabile, distribuția regulată a fibrelor fiind deranjată de orice mic efort determinat de mișcarea pensulei sau spatulei. Marele avantaj al utilizării țesăturilor este tot legat de faptul că utilizarea acestora permite obținerea unor structuri cu suprafețe sinuoase și complexe în care densitatea transversală a fibrelor este constantă. În general, proprietățile mecanice ale unui compozit armat obținut prin laminare pot fi evaluate (într-o primă abordare) folosind bine cunoscutul model al laminatului în care lamina este considerată element constitutiv. În cazul compozitelor armate cu țesături există însă o problemă și aceasta este legată de modul în care ar putea fi descrise proprietățile elastice ale laminei – în termeni de proprietăți elastice ale fibrelor, proprietăți mecanice ale matricei și parametrii geometrici și ingineresti ai țesăturii [69].

Prezentul studiu a pornit de la ideea testării la oboseală a materialelor compozite armate cu țesături pentru a înțelege efectele acesteia asupra proprietăților de ansamblu ale acestor materiale și a fost extins la verificarea pe cale experimentală a două modele matematice foarte utilizate în analiza compozitelor: pe de o parte modelul laminatului atunci când se cunosc parametri elastici ai laminelor și, pe de altă parte, verificarea modelului constantelor elastice ale laminelor într-un sistem

oarecare de referință atunci când sunt cunoscute valorile parametrilor respectivi într-un alt sistem de referință (acesta fiind, de fapt, o componentă semnificativă a modelului laminatului). Elementul de noutate este acela al analizei laminelor armate cu țesături (straturi de țesătură imersate în polimer) efectuat pentru trei tipuri de rășini epoxidice și pentru 18 tipuri diferite de țesături.

Pentru început au fost realizate materiale armate cu un singur strat de țesătură (lamine) și având ca matrice fiecare dintre cei trei polimeri descriși mai sus. Astfel au fost formate 57 de asemenea materiale (câte trei pentru fiecare tip de țesătură din cele descrise anterior, câte unul pentru fiecare tip de rășină și, în plus, pentru țesătura mixtă carbon-aramidică, pentru fiecare rășină a mai fost format un material pentru a pune în evidență diferențele dintre bătaie și urzeală). Toate aceste materiale au fost formate pentru a determina parametrii elastici ai laminelor ce ar putea fi folosiți pentru descrierea unui laminat și, procurând în acest mod datele de intrare necesare simulării unui material stratificat.

Pentru fiecare tip de țesătură au fost formate materiale armate cu un singur strat de țesătură (lamină) având ca matrice fiecare dintre sistemele epoxidice prezentate mai sus. Pentru a asigura un număr suficient de epruvete, în fapt, pentru fiecare pereche țesătură-sistem epoxidic, au fost formate câte două foi armate cu câte un singur strat de țesătură. În toate cazurile țesăturile au fost decupate în lungul urzelii, respectiv, bății.

Pentru formarea materialelor au fost utilizate două plăci de sticlă cu dimensiuni de 650×650mm. Pentru scoaterea mai eficientă a compozitelor polimerice din matrită, între plăcile de sticlă și material au fost utilizate folii de polipropilenă ca agent de demulare. Matricea epoxidică nu aderă la foliile de polipropilenă. Foliile au o calitate a suprafeței foarte bună și o rigiditate suficientă pentru a menține forma dorită. După așezarea stratului matrită este închisă și prin aplicarea unei presiuni este eliminat surplusul de rășină și, în egală măsură, gazele emise în timpul reacțiilor chimice sau introduse odată cu amestecul celor două componente ale sistemului epoxidic.

După polimerizarea matricei epoxidice din lamine, au fost decupate epruvete pentru mai multe tipuri de teste, caracteristice pentru determinarea proprietăților mecanice, termice, electrice (figura 5).

Un laminat este o colecție de lamine stivuite pentru a obține rigiditatea și grosimea dorită. De exemplu, laminele unidirecționale armate cu fibre pot fi aranjate astfel încât fibrele din fiecare lamină sunt orientate în direcții identice sau diferite [70]. Secvența orientării straturilor într-un laminat ale unui compozit armat cu fibre este denumit schema de laminare sau a secvenței de stivuire [71]. Straturile sunt, de obicei, legate între ele cu același material ca și matricea (cea utilizată pentru formarea laminelor) dar acest sistem este valabil în cazul utilizării polimerilor termoplastici. În acest caz laminele (ele însele materiale compozite) sunt mai întâi stivuite în ordinea și sub orientările proiectate și apoi pachetul este introdus într-o presă și încălzit la temperatura care corespunde topirii polimerului. După răcire, repolimerizarea, asigură legăturile inter și intralaminare asigurând integritatea structurală a laminatului. Schema de laminare și proprietățile individuale ale unei lamine a materialului compozit oferă o excelentă flexibilitate pentru designer, pentru a adapta rigiditatea și rezistența laminatului pentru a se potrivi cerințele de rigiditate și de rezistență structurală impuse [1].

Un laminat compozit tipic este format din straturi individuale, care sunt de obicei realizate din straturi unidirecționale cu aceeași sau orientare alternantă regulată [72]. Un strat poate fi, de asemenea, realizat din metale, polimeri termorigizi sau termoplastici și țesături sau poate avea o structură spațială tridimensională armată [73]. O structură compozită tipică constă dintr-un sistem de straturi lipite împreună. Straturile pot fi realizate din diferite materiale izotrope sau anizotrope, și pot avea diferite structuri, grosimi și proprietăți mecanice. În contrast cu straturile tipice ale căror

proprietăți de bază sunt determinate experimental, caracteristicile laminatelor sunt de obicei calculate folosind informațiile referitoare la numărul de straturi, succesiunea lor de stivuire, geometria și proprietățile mecanice ale laminelor care trebuie să fie cunoscute [74].

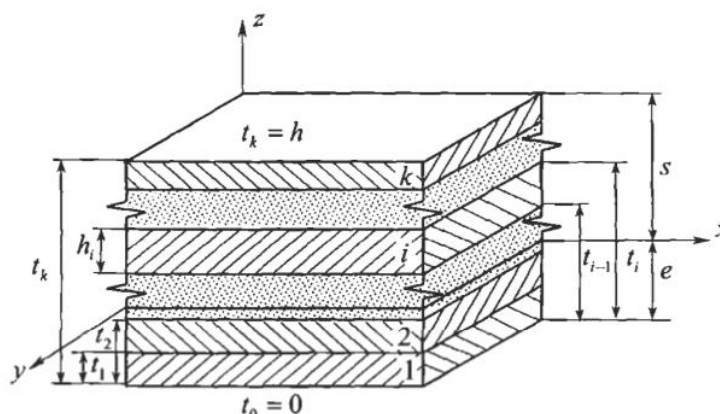


Figura 6. Structura laminatului [38]

În urma concluziilor formulate după o serie de teste mecanice, termice și electrice efectuate pe lamine armate cu țesături, au fost stabilite etapele de formare și arhitectura compozitelor laminate [75]. Pentru formarea laminatelor au fost decupate țesături cu dimensiunile de 650×650mm și orientarea fibrelor la 0°.

Pornind de la experiența acumulată la formarea laminelor, metoda rămâne aceeași dar, în acest caz, pentru a asigura o fracție volumică mai mare a armăturii, mai multe straturi de țesătură vor fi introduse în matrice. La formarea laminatului, laminele unidirecționale au fost suprapuse una după alta, astfel încât fibrele din lamine să fie orientate identic pentru toate laminele, țesăturile fiind îmbibate cu rășină aditivată. Laminele sunt lipite cu același tip de material cu cel din care este constituită matricea laminelor. Matricea s-a format prin utilizarea unui mixer mecanic pentru omogenizarea rășinii cu întăritorul. În ceea ce privește tipul de matrice utilizat, toate materialele compozite au fost formate cu rășină epoxidică de tip EPIPHEN RE 4020 și întăritor EPIPHEN DE 4020 deoarece, din analiza datelor experimentale obținute în urma testelor efectuate asupra laminelor, am constatat că acest sistem epoxidic asigură cele mai bune proprietăți și se manevrează cel mai facil datorită timpului de gel mai lung. Trebuie menționat faptul că, din fericire, acest sistem epoxidic este și cel mai ieftin dintre cele trei folosite în prima parte a studiului.

Metoda de formare a fost aceeași ca în cazul formării laminelor și a constat în așezarea, strat după strat, a țesăturilor îmbibate cu amestec pre-polimeric ceea ce asigură legăturile intra și interlaminare. Materialele, cu dimensiuni generoase, din fiecare câte două plăci, au fost extrase din matrițe și au fost lăsate, pentru a avea loc polimerizarea completă, timp de două săptămâni. După această perioadă, înainte de a extrage epruvetele necesare testelor mecanice, au fost evaluate proprietățile electromagnetice ale materialelor.

Au fost proiectate, conform dimensiunilor plăcilor (în special grosimea acestora – diferită pentru fiecare material datorită diferențelor de grosime ale țesăturilor) epruvetele necesare testelor mecanice statice și dinamice. Ca și în cazul laminelor au fost extrase epruvete atât pe direcția urzelii și, respectiv, bătăii cât și epruvete orientate la 30° și, respectiv, 45° față de direcția urzelii. Pentru că dimensiunile inițiale ale plăcilor laminate formate nu permiteau introducerea acestora în etuvă, tratamentele termice ale acestor materiale au fost aplicate direct epruvetelor, după extragerea acestora prin debitare cu jet de apă de înaltă presiune.

Ana BOBOC (CĂPĂȚÎNĂ)

Au fost formate 16 materiale laminate cu câte 9 straturi (fiecare sub forma a două plăci) în care toate straturile de armătură (lamine) au aceeași orientare a fasciculelor de fibre și, în mod evident, grosimile acestor materiale sunt mai mici decât de nouă ori grosimea laminei obținute cu aceeași țesătură și cu aceeași matrice epoxidică.

Capitolul 4. Proprietăți termice ale laminelor

4.1. Căldura specifică a laminelor

Calorimetria de scanare diferențială (DSC) este o tehnică termo-analitică utilizată pe scară largă pentru a determina procesele active termic care apar în materiale în timpul unui program de schimb de energie sub formă de căldură bine definit. [76]. Tehnica de calorimetrie cu scanare diferențială este utilizată pentru a detecta și cuantifica evenimentele termice într-un material. Aceste evenimente termice includ topiri, cristalizări, reacții chimice și volatilizare [77].

Unul dintre cei mai importanți parametri ce pot fi evaluați folosind aceasta tehnică este căldura specifică a unui material [78]. În plus această tehnică, prin controlul foarte precis al variației valorii temperaturii permite decelarea unor valori critice pentru materiale – punctul de fierbere, punctul de topire, temperatura tranziției sticloase (în cazul polimerilor) sau, în unele cazuri, puterea calorică (atunci când poate avea loc combustia probei) și valoarea temperaturii de igniție. DSC are avantajul de a măsura în mod direct și precis căldura exotermă și endotermă cu rata de scanare constantă [79].

Pentru a obține măsurători precise, probele testate au fost depozitate în aceleași condiții. Aplicația soft STARe permite evaluarea directă a căldurii specifice pe curbele de încălzire și respectiv răcire ale materialului studiat. Pentru a asigura acuratețea determinărilor, epruvetele au fost cântărite înainte și după determinarea căldurii specifice, acestea cântărind între 1,3 mg și maxim 5,8 mg.

Curbele prezentate în figura 8 reprezintă fluxul de căldură pentru o probă (lamină) armată cu țesătură din fibre de carbon și rășină epoxidică HT2 la încălzire și răcire și constituie fundamentarea alegerii intervalelor de temperatură pentru studiul căldurii specifice pentru materialele formate fără a lua în calcul temperaturile înalte atât timp cât producătorul rășinii recomandă utilizarea materialului la temperaturi sub 200°C. Pentru fiecare material a fost folosit un program termic ciclic (încălzire-răcire) aplicat de două ori și, pentru toate probele se poate constata existența unui peak pe prima încălzire, peak ce poate corespunde consolidării compozitului. Cu siguranță, noțiunea de peak, în acest caz, nu este cea mai indicată (peak-urile fiind în sus) însă, în reprezentarea grafică de mai jos pe axa ordonatelor este indicată pierderea de energie din fluxul generat de mașină ceea ce, din punctul de vedere al probei reprezintă absorbție de energie.

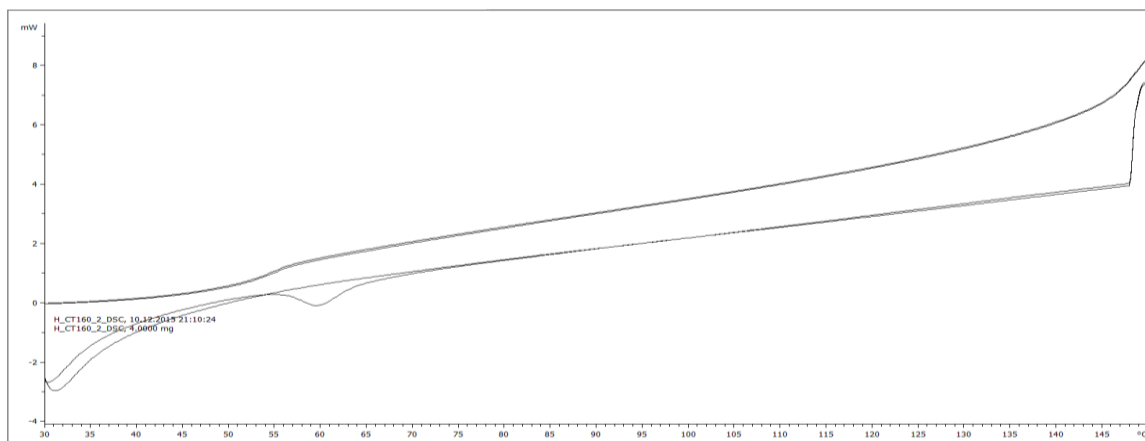


Figura 8. Curba DSC caracteristică pentru o lamină armată cu țesătură din fibre de carbon și rășină epoxidică HT2.

Fiind dată, ca parametru de intrare, valoarea masei probei, aplicația soft-ware, poate afișa ca parametru de ieșire valoarea căldurii specifice a materialului (cantitatea de energie pe care trebuie să o schimbe proba cu exteriorul, pentru ca valoarea temperaturii unității de masă a probei să se modifice cu o unitate). În fapt, aplicația generează o curbă (valoarea căldurii specifice în funcție de valoarea temperaturii) știut fiind faptul că, pentru orice material, căldura specifică are o slabă dependență de temperatură. Modalitatea de analiză a datelor pe care am abordat-o este aceea de a evalua căldura specifică medie pe anumite intervale de temperatură, și anume acelea pe care curba căldurii specifice păstrează aceeași pantă.

4.2 Coeficientul de dilatare termică

Stabilitatea dimensională a materialelor compozite este una dintre cele mai importante calități impuse dată fiind aria extrem de largă a aplicațiilor acestor materiale. În general, polimerii sunt substanțe ale căror stabilități dimensionale sunt destul de scăzute (datorită structurii lor chimice bazată pe legături covalente) în limitele de temperatură care nu afectează structura acestora (oxidări, în cazul polimerilor termorigizi și topire urmată, eventual de oxidare, în cazul polimerilor termoplastici). Ca și în cazul proprietăților mecanice, armarea polimerilor poate avea efecte benefice asupra stabilității dimensionale sau poate avea efecte negative. Este evident faptul că dilatarea materialului compozit este determinată atât dilatarea polimerului (matrice) cât și a fibrelor (armătură) efectul lor mediat (exprimat în coeficientul de dilatare liniară al compozitului) depinzând puternic de natura și calitatea interfeței matrice-fibre. În cazul laminelor, totuși, efectele termomecanice ale încălzirii materialului sunt mai puțin dependente de gradientul de temperatură coroborat cu eforturile intralaminare, dat fiind faptul că grosimea laminei este extrem de redusă în raport cu grosimea laminatului. Aceste efecte pot apărea (dar nu din cauza gradientului de temperatură) la zonele de material în care fibrele de urzeală trec sub sau peste fibrele de urzeală).

Măsurarea coeficientului de dilatare a fost realizată, pentru fiecare tip de lamină în parte, cu analizatorul termomecanic TMA-SDTA 840 (Mettler-Toledo) și aplicația Stare (Mettler-Toledo). În esență, determinarea coeficientului de dilatare liniară este realizată prin măsurarea permanentă a grosimii materialului supus analizei (presat prin intermediul unui ponson pe masa aparatului) la diferite valori ale temperaturii (regimul de temperatură fiind controlat prin intermediul aplicației soft-ware). În acest context o sursă importantă de erori este generată de poziționarea ponsonului pe probă deoarece acesta poate fi așezat, de exemplu, în zona în care fibrele de urzeală trec de deasupra fibrelor de bătaie sub acestea. În acest caz rezultatele vor fi puternic influențate de o poziție oblică a ponsonului față de suprafața ideală de măsurare (care ar trebui să fie perfect plană). Deoarece ponsonul este apăsat pe probă (o încărcare de 0.02N) și datorită faptului că la măsurare se folosește un cap emisferic al ponsonului, acesta poate aluneca necontrolat în timpul măsurărilor.

4.3. Concluzii

Analiza termică a laminelor armate cu țesături relevă o dependență puternică a parametrilor analizați (căldura specifică și coeficientul de dilatare termică liniară) de natura țesăturii și de tipul de matrice utilizată. În același timp, pentru ambii parametri, se observă o slabă dependență de temperatură (creșterea a valorilor odată cu creșterea valorii temperaturii).

Aparent, rășina de tip E are nevoie de un tratament termic mai îndelungat pentru obținerea celor mai bune caracteristici și, în același timp, se poate observa că este cea mai puțin rigidă dintre cele trei sisteme epoxidice utilizate. Și mai important este faptul că, se pare, în ceea ce privește stabilitatea dimensională materialele armate cu țesături realizate din același tip de fibre au

aproximativ același comportament de dilatare, diferențele dintre comportamente putând fi explicate prin diferențele dintre fracțiile volumice ale fibrelor.

În cazul țesăturilor luate ca referință pentru studiul căldurii specifice se poate observa că profilurile de variație ale acestui parametru, pe intervalele de temperatură analizate, pentru laminele cu matrice de tip C sau HT sunt aproape identice ceea ce poate semnaliza variații foarte mici ale formulelor rășinilor utilizate.

În toate cazurile analizate (perechi țesătură – rășină) se poate observa că valorile căldurii specifice pe a doua încălzire și, respectiv, pe a doua răcire, sunt mai mici decât cele înregistrate pe primul ciclu de analiză semnalizând consolidarea materialului (ca etapă fundamentală, precizată de unii autori, în formarea unui compozit) deși toate materialele au fost supuse tratamentelor termice recomandate de producătorii rășinilor.

Capitolul 5. Proprietăți mecanice ale laminelor

5.1. Lamine

Modelul laminatului, așa cum este acesta prezentat și argumentat de un număr extrem de mare de autori din domeniul materialelor compozite, permite predicția valorilor parametrilor mecanici ai unui material laminat atunci când sunt cunoscute valorile acestor parametri pentru elementele constitutive ale acestora – straturile sau laminatele. În cadrul aceluiași model dar ca parte a demonstrației proprietăților laminelor, se regăsește modelul determinării valorilor parametrilor elastici ai laminei într-un sistem de referință rotit față de cel pentru care sunt făcute determinările experimentale (considerat fundamental și având una dintre axe în lungul fibrelor de armare). Scopul declarat al acestui studiu a fost acela de a verifica posibilitatea de utilizare a modelului laminatului pentru lamine armate cu țesături.

Trebuie făcută o distincție extrem de severă între materialele cu matrice polimerică termoplastică și cele cu matrice polimerică termorigidă. În cazul matricelor termoplastice se pot obține foarte ușor lamine ortotrope adică fibre uniforme distribuite și paralele introduse în material polimeric (polietilenă, polipropilenă). Tehnologia nu este foarte complicată și constă în desfășurarea fibrelor pe valțurile pe care se formează de obicei foliile de material termoplastic. Aceste folii armate pot fi ulterior stivuite (la diferite orientări în plan ale fibrelor) și pachetele astfel obținute pot fi consolidate în prese cu temperaturi controlate. În aceste condiții polimerul se topește și se reorganizează conducând la formarea unui material compozit care poate fi (unidirecțional, simetric, asimetric, echilibrat sau neechilibrat și alte clasificări care se regăsesc totdeauna în cadrul unei tratări exhaustive a laminatelor compozite).

În cazul polimerilor termorigizi situația este diferită deoarece acești polimeri au condiții speciale de declanșare a reacțiilor de polimerizare (expunere UV, amestec de substanțe, stropirea cu agent care declanșează polimerizarea, utilizarea unor catalizatori, expunerea la lumină și, uneori, chiar încălzirea) astfel încât condițiile de formare ale laminelor ortotrope sunt mai dificile. Odată obținute laminele ortotrope acestea nu pot fi împachetate în laminate doar prin simpla presare și încălzire ci trebuie lipite între ele folosind adezivi. Folosirea adezivilor însă generează o serie de probleme care nu apar în cazul laminatelor cu matrice termoplastică – rezistența adezivului (adăugată rezistenței polimerului și rezistenței elementelor de armare), rezistența legăturii dintre matrice și adeziv (o joncțiune polimerică), influența prezenței adezivului asupra proprietăților generale ale laminatului (nu numai mecanice ci și termice). Dacă în cazul laminatelor vorbim de eforturi intra- și inter-laminare termoiduse, în cazul laminatelor cu matrice termorigide va trebui să luăm în calcul și eforturile interlaminare termoiduse între polimer și adeziv. Sigur că o serie dintre aceste probleme se pot rezolva folosind, acolo unde este posibil, un adeziv de aceeași natură cu matricea (ceea ce nu este posibil – din testele efectuate de noi – pentru rășinile epoxidice).

Utilizarea țesăturilor ar ușura, într-o oarecare măsură, demersul de obținere a laminelor cu matrice termorigidă care, totuși, nu ar rezolva și problema adezivului. Metoda wet lay-up permite, din fericire, obținerea unor materiale ce pot fi încadrate între laminate și este și mult mai ofertantă decât metodele utilizate în cazul polimerilor termoplastici deoarece în cazul polimerilor termorigizi aceștia ar putea fi modificați prin dispersia unor agenți cu efect cunoscut – nano tuburi de carbon, amidon, nano-ferite, alți agenți organici sau anorganici (lista poate fi continuată numai amintind cercetările colegilor mei de la Centrul de Cercetare-Dezvoltare pentru Compozite cu Matrice

Termorigide) – care, în final contribuie la modificarea proprietăților laminatelor (și, de ce nu, la controlul proprietăților acestora).

Deși este simplă și nu impune utilizarea unor echipamente sofisticate, metoda wet lay-up nu poate fi folosită pentru formarea laminatelor cu lamine ortotrope (din cauza imposibilității menținerii distribuției elementelor de armare în timpul procesului) și de aceea, în acest caz, țesăturile sunt mai ușor de folosit. În același timp metoda asigură (după încheierea polimerizării) prezența aceluiași tip de matrice în tot volumul materialului. Dacă și interfaza matrice-agent de armare este de bună calitate materialul obținut este de bună calitate.

Acesta este momentul în care apar problemele. Este posibilă descrierea proprietăților mecanice ale unui material laminat armat cu țesături în termeni de proprietăți mecanice ale laminelor sale. În mod cert, așa după cum am arătat în capitolul referitor la formarea materialelor, atât laminele, cât și laminatele au fost formate utilizând aceeași tehnică de formare (wet lay-up) dar nu există garanția faptului că toate elementele ce pot influența proprietățile induse de formarea materialului au fost controlate (în special alunecarea straturilor de țesătură atunci când acestea au fost depuse, unul după altul, în matriță sau alunecarea – aproape imposibil de evitat, la nivel microscopic – a fasciculelor de fibre de urzeală sau bătaie ale țesăturilor în timpul impregnării țesăturilor cu amestec pre-polimeric).

Există în literatură câteva încercări de descriere a unei lamine armate cu țesături, tendința cea mai actuală este aceea de a lua în considerare *ondulația* fasciculelor de fibre care alcătuiesc țesătura sau (un model anterior) descrierea unei astfel de lamine ca superpoziție a două lamine ortotrope (model în care apare problema deformațiilor fasciculelor de fibre fără, însă, a introduce noțiunea de *ondulație*). Ceea ce este intuitiv este faptul că o lamină armată cu țesătură va răspunde altfel decât o lamină ortotropă la aplicarea unui test de tracțiune, de exemplu. De ce este intuitiv? Simplu! Țesătura înseamnă (pe) trecerea fasciculelor de fibre de bătaie peste și pe sub fasciculele de fibre de urzeală. În momentul aplicării unui efort pe direcția urzelii (de exemplu) fasciculele de pe această direcție se vor îndrepta fără a putea evita deformarea mai accentuată a fasciculelor din bătaie. Dacă țesătura este rigidizată prin introducerea într-o matrice (fără a avea prea mare importanță natura acesteia) atunci când fasciculele din urzeală se vor întinde fasciculele din bătaie (fiind mai rigide) se vor fractura în loc să se deformeze mai mult. Acesta este doar o prezentare intuitivă. Analiza poate merge mai departe deoarece prezența polimerului între fibrele fasciculele din urzeală sau dintre fibrele de bătaie, ca să nu vorbim despre polimerul care asigură legarea fibrelor din ambele tipuri de fascicule produce efecte micro-mecanice care sunt greu de descris și care nu sunt luate în considerare în cazul analizei laminei ortotrope. Luând în calcul aceste aspecte este aproape natural faptul că proprietățile laminelor armate cu țesături sunt foarte greu de descris în termeni de proprietăți ale fibrelor și proprietăți ale matricei. Modul în care se va comporta o lamină aramată cu țesături ar putea fi descris (în termeni de analiză numerică) ca și o plasă sudată în care totuși sârmele ar fi (pe) trecute unele peste altele (pe cele două direcții) înainte de a fi sudate. Chiar și în acest caz ar trebui să presupunem (pentru simplificarea problemei) că sârmele și punctele sau punctele de sudură sunt identice și perfecte. Probabil că unele rezultate valoroase ar putea fi obținute empiric deși nu se pot asigura condiții identice de testare (orice eforturi s-ar putea face) pentru lamina armată cu țesătură, țesătura însăși și matrice (sub forma unui film a cărui grosime să fie egală cu grosimea țesăturii și, care de obicei este sub-milimetrică).

În acest context studiul de față a pornit de la ideea de a forma lamine dintr-un număr cât mai mare de țesături și folosind mai mulți polimeri ca matrice pentru a forma aceste lamine. Testând aceste lamine se obțin date care ar putea fi utilizate pentru a verifica cele două ipoteze menționate

la începutul acestui capitol. Pe de o parte, verificarea modelului pentru evaluarea proprietăților laminelor încărcate sub diverse unghiuri și, pe de altă parte, compararea rezultatelor obținute pentru lamine cu cele obținute pentru laminate formate din același tip de țesătură.

5.2. Teste de tracțiune – încărcare axială

Încercarea la tracțiune este una dintre cele mai importante analize care vizează determinarea proprietăți mecanice ale materialelor acestea fiind, în primă instanță cele mai importante atunci când materialele sunt folosite pentru realizarea unor repere [80]. În același timp, aceste teste sunt, probabil (alături de cele de compresiune) cele mai bine studiate din puncte de vedere teoretic. Sigur această prezentare se referă la materiale omogene și izotrope dar nu este de neglijat nici pentru materialele compozite armate (care nu îndeplinesc niciun criteriu de omogenitate sau izotropie, aceasta fiind și principala dificultate atunci când este intenționată analiza numerică a acestor materiale din pricina dificultății discretizării). Orice tentativă de descriere numerică a unui material armat cu țesături va întâmpina dificultăți în ceea ce privește discretizarea (pentru motivele expuse mai sus) chiar și în cazul în care materialul este supus unei încărcări foarte simple axiale.

Testele efectuate asupra laminelor sunt necesare pentru determinarea proprietăților mecanice ale acestora în vederea utilizării acestor parametri la luarea deciziilor corecte în designul compozitelor laminate. Proprietățile vizate la testarea laminelor sunt [81, 82, 83]:

- modulul de elasticitate longitudinal și transversal;
- coeficienții Poisson;
- rezistența la tracțiune longitudinală și transversală.

Pentru obținerea unor rezultate corecte, trebuie să se țină seama de o serie de factori care influențează în mod direct rezistența la tracțiune, și anume: forma și dimensiunea epruvetei, viteza de încărcare și temperatura de lucru (fără a neglija, în cazul compozitelor cu matrice polimerice, umiditatea). Tehnica de testare a materialelor compozite polimerice este [84]: epruveta (figura 9) este alungită în lungul axei sale principale cu o viteză constantă, până la rupere sau până când tensiunea (sarcina) sau deformarea (alungirea) ating o valoare prestabilită. În timpul încercării sunt măsurate încărcarea (forța) suportată de către epruvetă și alungirea ei [85].

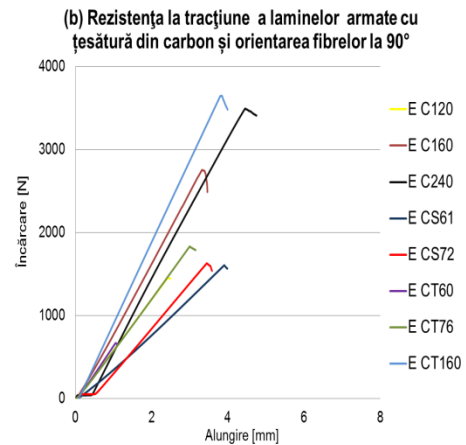
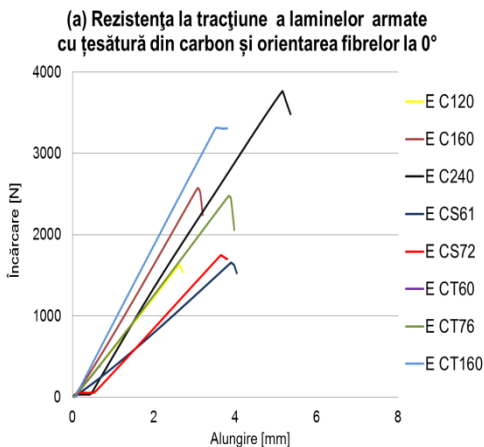
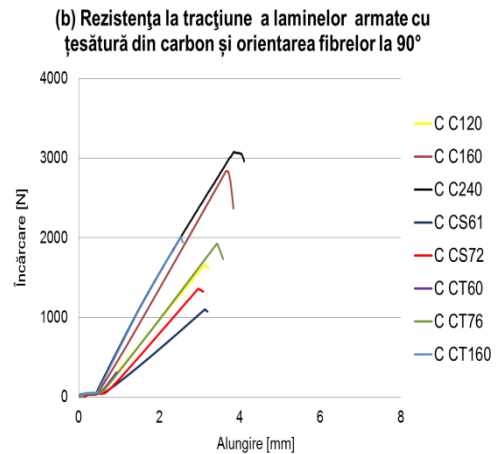
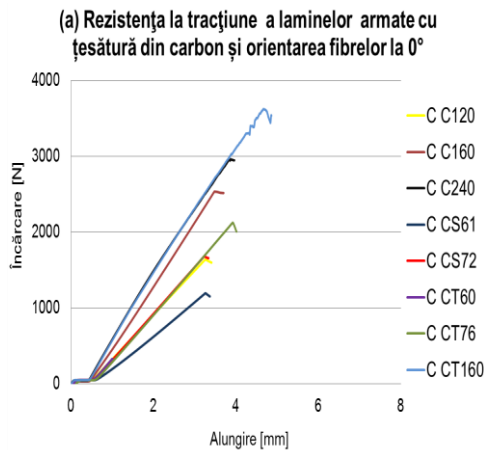
Ceea ce trebuie menționat este faptul că epruveta standard, prezentată mai jos, nu poate fi folosită pentru testarea laminelor armate cu țesături și nici pentru laminatele armate cu țesături. În cazul laminelor problema cea mai importantă este legată de grosimea materialului (care urmează a fi prinsă în bacuri) în plus, zona de angajare nu va avea niciun fel de siguranță și nici nu va asigura concentrarea efortului în lungul fibrelor. Decuparea unor astfel de epruvete ar afecta, în mod direct, integritatea materialului analizat procesul determinând, în mod cert, microfisuri ale matricei în imediata vecinătate a tăieturii (cu deosebire în zonele racordărilor) datorită rigidităților combinate ale materialului și, respectiv, instrumentului de tăiere.

Acestea sunt principalele motive pentru care toate testele de tracțiune realizate în cadrul studiului (lamine și laminate) au fost desfășurate pe epruvete rectangulare. Aceste epruvete sunt, din punctul nostru de vedere, mai indicate în cazul materialelor compozite armate cu țesături ordonat distribuite în matrice.

Pentru fiecare epruvetă testată a fost obținută o curbă încărcare/deformare alături de un set de valori ale unor parametri elastici de mai mare sau mai mic interes pentru acest studiu. Desigur au fost analizate cu mare atenție valoarea modulului de elasticitate și valoarea rezistenței la rupere prin tracțiune. În urma acestei etape a fost realizată analiza statistică a datelor obținute pentru serii de zece epruvete (pentru încărcările aplicate în lungul urzelii – 0° sau bătăii – 90°), respectiv serii

de câte cinci epruvete (pentru încărcările aplicate sub unghiuri de 30° și, respectiv, 45° față de direcția urzelii).

De ce și în lungul urzelii și în lungul bății? Pentru că realizarea țesăturii presupune pretensionarea urzelii pentru a asigura stabilitatea bății în timpul procesului. În plus, după realizarea țesăturii, pentru asigurarea acesteia din punctul de vedere al stabilității fibrelor individuale și a fasciculelor de fibre, țesăturile sunt acoperite cu un film polimeric foarte subțire (despre a cărui natură nu se pot afla amănunte la niciun producător) și care reprezintă, în fapt, o pre-matrice care, din păcate, asigură și păstrarea unor eforturi interne – toate aceste eforturi putând determina mici diferențe între parametri elastici măsurați în lungul urzelii și cei măsurați în lungul bății. Este foarte adevărat că majoritatea producătorilor de țesături de armare asigură utilizatorii că orice polimer poate fi utilizat ca matrice a unui material compozit armat cu țesături, fiind garantată adeziunea respectivului polimer la țesătură (în fapt la un alt polimer). După cum am amintit în capitolul introductiv, înainte de formarea laminelor am realizat teste de adeziune și teste de îmbibare a țesăturilor cu fiecare dintre cei trei polimeri utilizați ca matrice în timpul studiului și, pentru nicio țesătură, nu am constatat dificultăți.



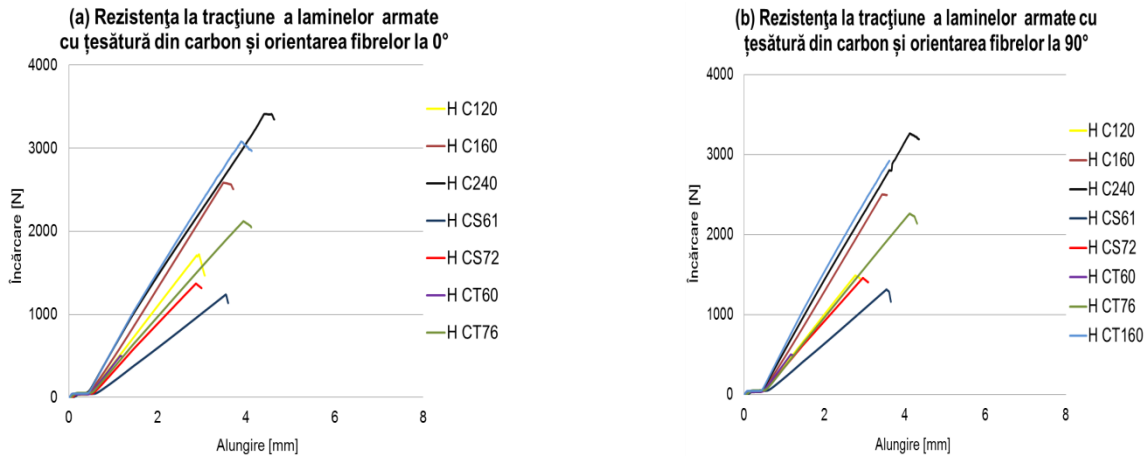


Figura 24. Curbele încărcare/alungire (mediate pe zece epruvete) pentru laminele armate cu țesăturile realizate din fibre de carbon și matrice diferite. Stânga – în lungul urzelii; Dreapta – în lungul bății.

Analizând curbele prezentate în **figura 24** se poate observa că pentru laminele angajate pe direcția bății încărcările maxime sunt ușor mai mari decât încărcările maxime ale laminelor angajate pe direcția urzelii (ceea ce, într-o oarecare măsură, justifică presupunerea existenței unor eforturi încastrate prezentată în deschiderea acestui capitol). În ceea ce privește pantele curbelor, acestea nu par a fi modificate semnificativ dar pot fi observate câteva diferențe generate de tipul de rășină utilizată ca matrice. În toate curbele de mai sus se pot distinge curbele corespunzătoare țesăturii C240 care pare a fi cea mai rezistentă la tracțiunea analizată în acest moment iar explicația nu poate consta în altceva decât numărul foarte mare de fibre pe unitatea de lungime și explică, în același timp rezultatele redată în **figurile 25-27** pentru laminele cu matrice de tip C și, respectiv, HT în care se observă un comportament foarte dispers și aleator al ruperii ce poate fi explicat prin aceea că, la început, se fracturează fibrele aflate în contact direct cu matricea (forfecare datorată fracturării matricei) după care, pe măsura desfășurării testelor se rup și fibrele care nu erau prinse în matrice (cele din interiorul fasciculelor de fibre la care, foarte probabil, amestecul pre-polimeric utilizat pentru îmbibare nu ajuns – datorită vâscozității mari a lichidului și datorită grosimii fasciculelor). Comportamentul nu se regăsește în cazul țesăturii de tip C160 (fascicule subțiri) și nici în cazul rășinii de tip E (o rășină mai fluidă și cu timp de gel mai mare decât timpul de gel al celorlalte două rășini).

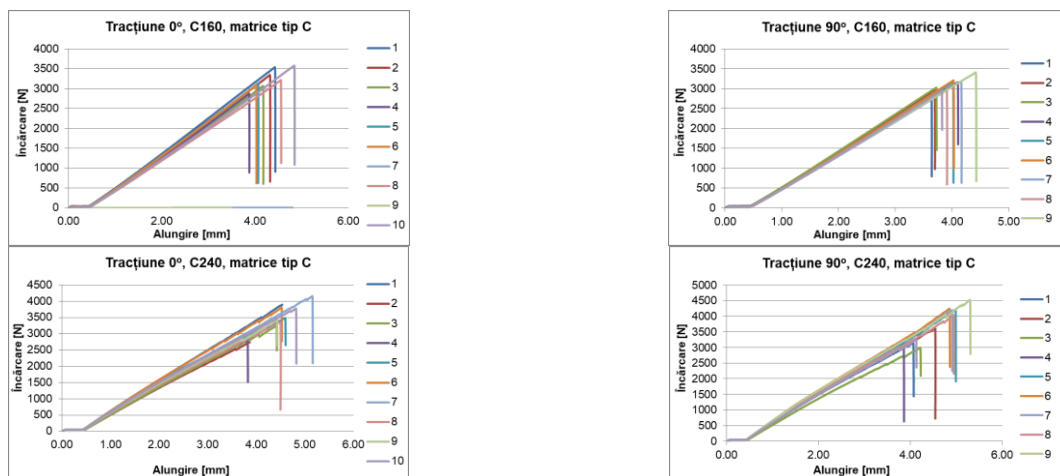


Figura 25. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de carbon și matrice realizată din rășină de tip C.

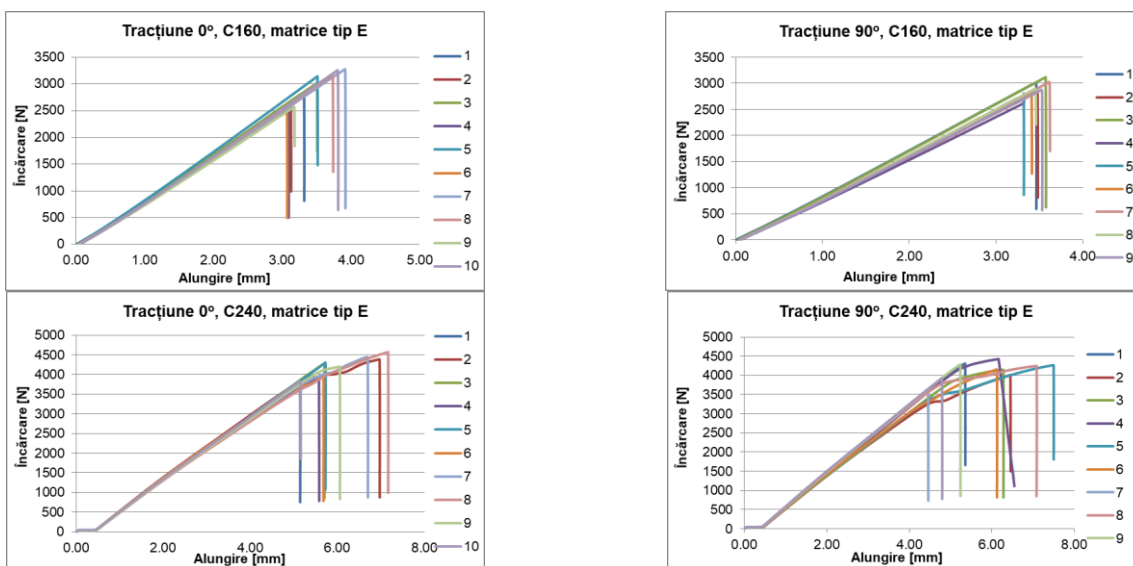


Figura 26. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de carbon și matrice realizată din rășină de tip E

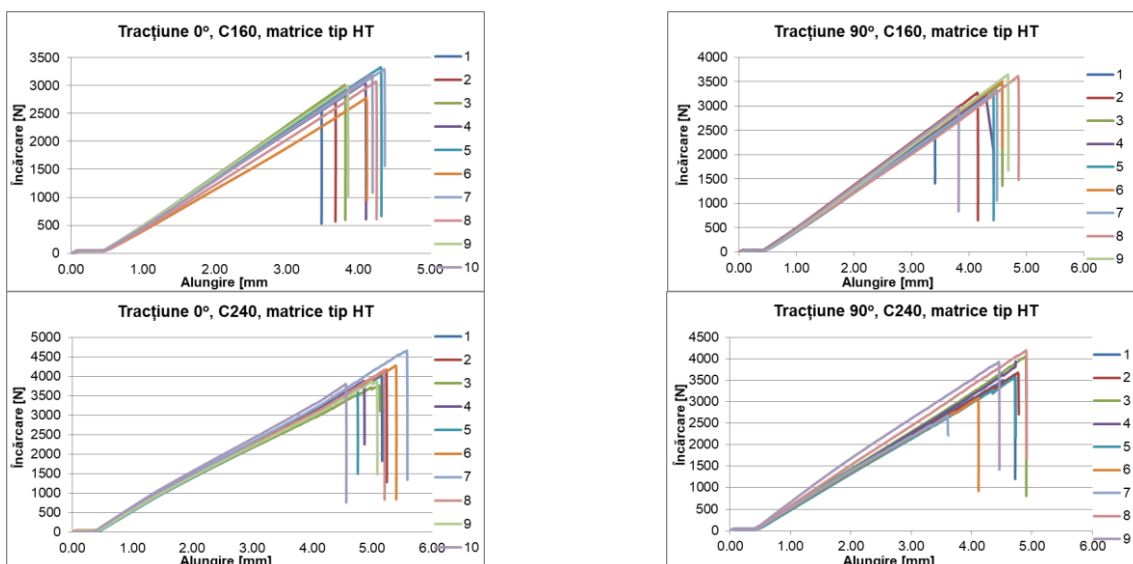
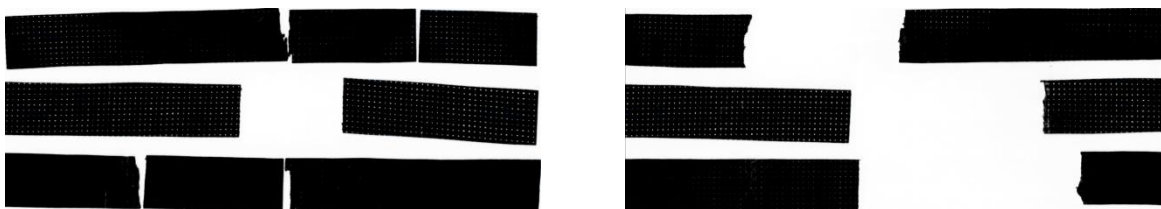
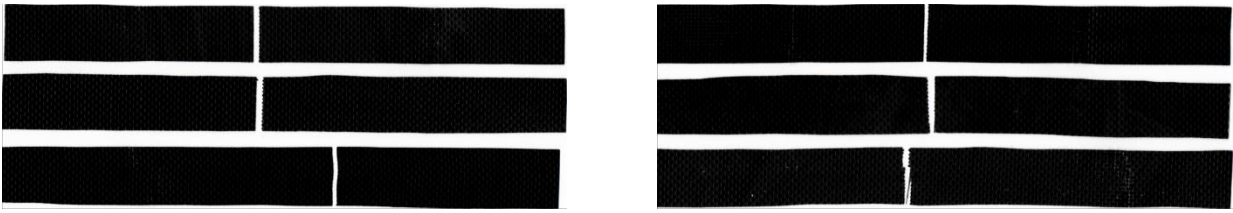


Figura 27. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de carbon și matrice realizată din rășină de tip HT.

Analiza vizuală a laminelor testate este, de asemenea, o sursă de informații interesante așa cum se poate observa în figura 28.



Epruvete rupte prin tracțiune: sus – rășină E, mijloc – rășină C, jos – rășină HT. Țesătură C160



Epruvete rupte prin tracțiune: sus – rășină E, mijloc – rășină C, jos – rășină HT. Țesătură C240

Figura 28. Epruvete testate la tracțiune

Sunt ușor observabile diferențele dintre efectele tracțiunii asupra laminelor armate cu țesătură de tip C160 (linia superioară) și, respectiv, C240 (linia inferioară). Imaginile reprezintă epruvetele angajate pe direcția urzelii (coloana din stânga) și, respectiv, epruvetele angajate pe direcția bății (coloana din dreapta). Se pot observa (mai ales în cazul țesăturii de tip C160) fracturi ale epruvetelor la nivelul prinderii acestora în bacuri. Mai mult decât atât, se poate constata că, în cazul acestui tip de țesătură epruvetele sunt fracturate multiplu și, în general, fracturile sunt perpendiculare pe direcția de angajare.

În cazul laminelor armate cu țesătură de tip C240 fracturile la nivelul bacurilor nu mai sunt vizibile, materialele se fracturează în zona de angajare și, uneori sunt observabile fibre extrase din material în urma fracturării. În mod cert mecanismul de fracturare a materialului este unul generat de fracturarea matricei (într-o zonă sensibilă – de-a lungul unui fascicul de fibre) care, prin forfecare, produce retezarea fibrelor.

Un alt material cu comportament remarcabil este cel armat cu țesătura CT160 (o țesătură realizată pe o tehnologie specială – după cum este precizat pe site-ul producătorului – numită Textreem) și care constă din expandarea unui fascicul 3K de filamente de carbon urmată realizarea țesăturii. În fapt, în **figura 24** nu sunt reprezentate în exclusivitate curbele ridicate pentru țesături clasice de fibre de carbon – țesăturile codate CT (realizate toate prin tehnica amintită mai sus) sunt realizate din fascicule 1K, 2K sau 3K expandate, țesăturile CS (Samurai – denumire comercială) sunt de, asemenea realizate din fascicule expandate (fără a fi putut găsi o descriere a tehnicii utilizate).

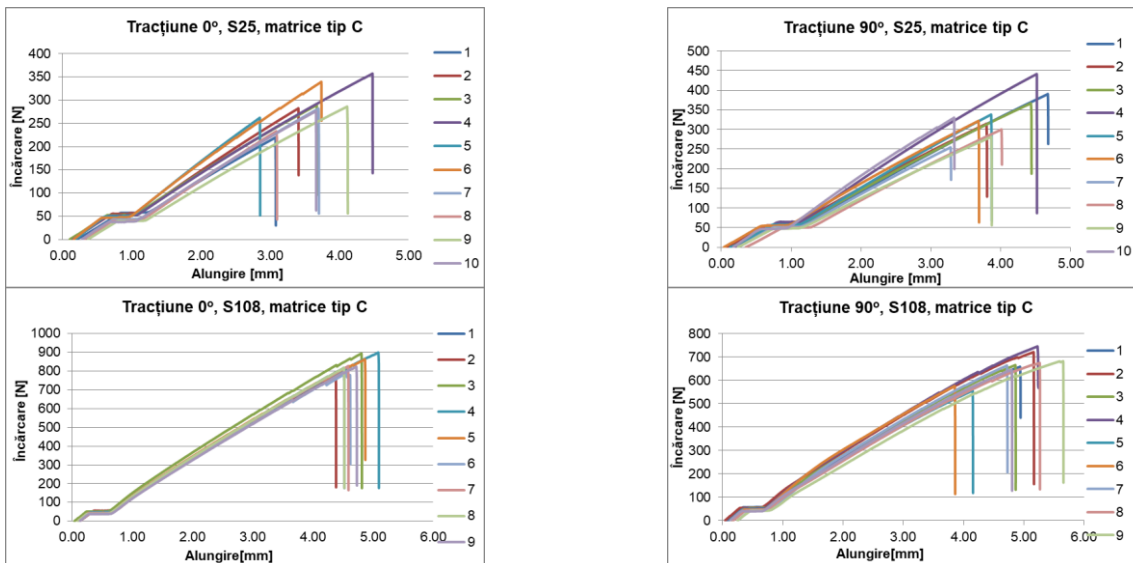


Figura 30. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de sticlă și matrice realizată din rășină de tip C.

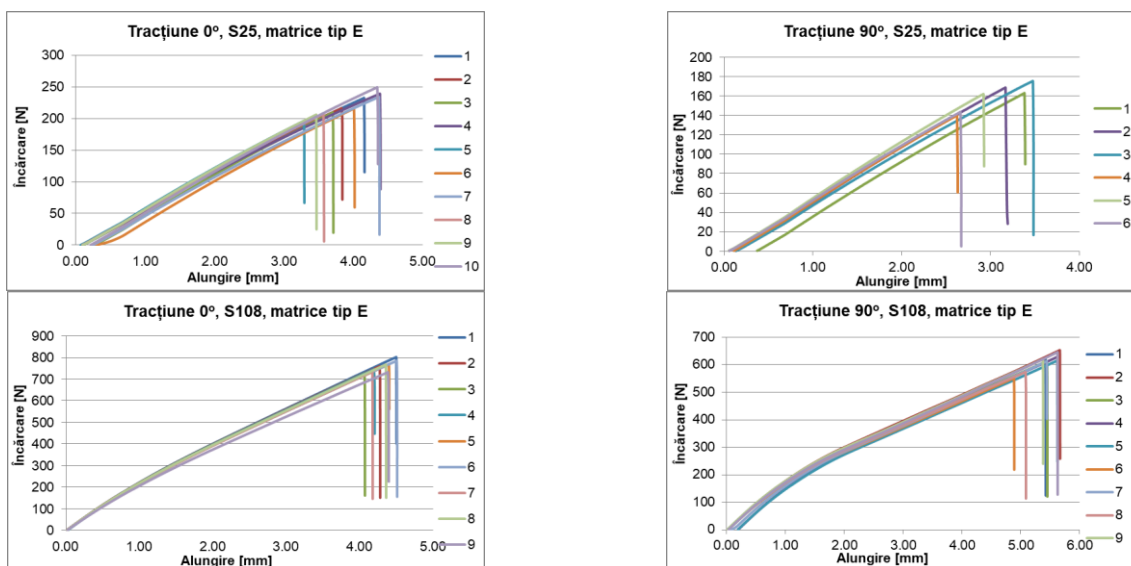


Figura 31. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de sticlă și matrice realizată din rășină de tip E.

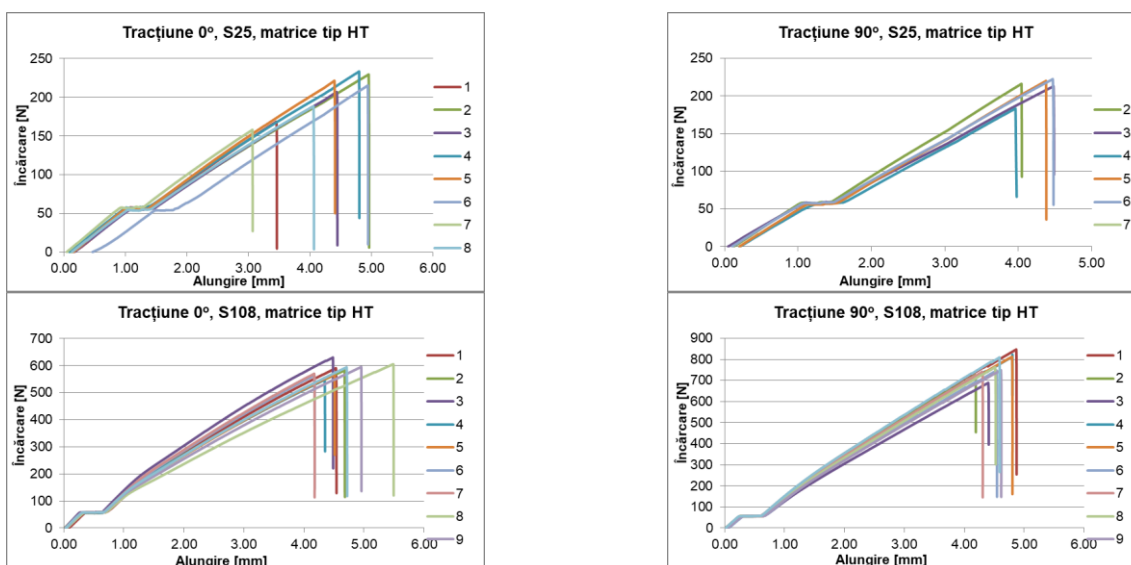
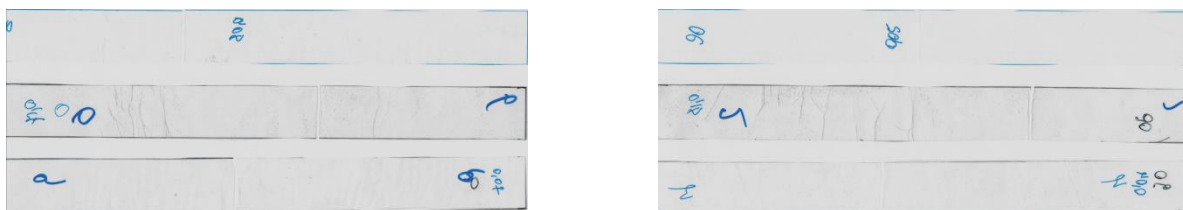
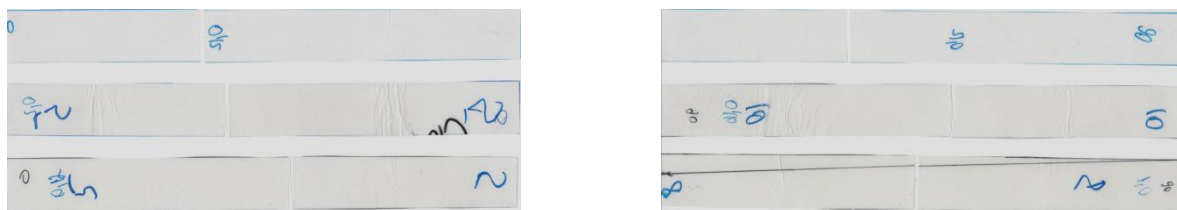


Figura 32. Curbele încărcare/alungire pentru țesăturile realizate din fibre identice de fibre de sticlă și matrice realizată din rășină de tip HT.

Ca și în cazul analizei termo-dimensionale a laminelor (prezentată în capitolul anterior) analiza mai detaliată a rezultatelor obținute în urma testelor de tracțiune este făcută pentru laminele armate cu țesături realizate din același tip de fibre pentru a facilita înțelegerea contribuției fiecărui constituent (matrice sau țesătură) la mecanismul de rupere prin tracțiune. În figura 33 sunt prezentate laminele amintite mai sus rupte prin tracțiune.



Epruvete rupte prin tracțiune: sus – rășină E, mijloc – rășină C, jos – rășină HT. Țesătură S25



Epruvete rupte prin tracțiune: sus – rășină E, mijloc – rășină C, jos – rășină HT. Țesătură S108

Figura 33. Epruvete testate la tracțiune

Ca și în cazul celor două tipuri de țesături realizate din același tip de fibre de carbon, se poate observa că laminele se fracturează pe direcție perpendiculară pe direcția de angajare (indiferent de alegerea acestei direcții). Se poate observa, de asemenea, că în cazul matricelor de tip C și HT pe curbele încărcare/alungire, imediat după începerea încărcării, apare un palier orizontal (spre deosebire de cazul matricei de tip E) acest palier corespunde tensionării fibrelor deoarece cele două matrice fiind rigide se fracturează la valori mici ale încărcării datorită interfezei matrice-fibre (interfază de foarte bună calitate datorată adeziunii rășinilor epoxidice la sticlă). Pentru aceleași două rășini poate fi remarcată cu ușurință o dispersie foarte largă a comportamentelor la tracțiune pentru laminele armate cu țesătura S25 – dată fiind densitatea extrem de redusă a țesăturii nu există suficiente fibre care să medieze răspunsul la încărcare și, practic, epruvetele se rup acolo unde există un defect, chiar dacă acesta este greu sau imposibil de detectat, o variație insesizabilă a grosimii laminei sau absența continuității unui număr foarte mic de filamente într-un fascicul de fibre pe direcția de angajare. Această dispersie a comportamentelor (naturală pentru orice serie statistică) deși există și pentru laminele armate cu țesătura S108, nu este atât de largă. Se observă (de asemenea din curbele prezentate în **figurile 30-32**, că în cazul laminelor cu matrice de tip E apare o concavitate destul de evidentă a curbelor de încărcare și care corespunde trecerii de la comportamentul la tracțiune de tip matrice la comportamentul de tip fibre (comportamente descrise adesea în literatura de specialitate și care sunt amintite ca mecanisme de eșuare ale unui compozit). Această schimbare de comportament (care la celelalte două tipuri de matrice este bruscă) se datorează faptului că matricea este mai puțin rigidă. Din acest punct de vedere laminele realizate cu matricea de tip E sunt mai aproape de ceea ce, în principiu, se așteaptă de la un compozit (curba încărcare/alungire este, practic liniară pe tot domeniul de încărcare). În celelalte două cazuri, deși, după palierul orizontal și înainte de acesta, comportamentele sunt liniare materialele sunt compozite numai pe prima regiune, dincolo de palierul orizontal este vorba strict de comportamentul fibrelor (matrice deja a cedat) și, în aceste condiții, este ca și cum materialul ar fi format doar din fibre (dar acestea nu pot fi menținute într-un material fără suportul matricei). Cu alte cuvinte, un material realizat prin stratificarea unui număr oarecare de țesături înglobate într-o matrice de tip C sau HT ar fi bun de testat pentru o anumită aplicație, numai după fracturarea matricei dar atunci nu mai poate fi garantată integritatea geometrică a structurii. Nu se poate preciza însă care ar fi efectul alternării (în același material) al celor trei tipuri de rășini deoarece este de așteptat ca matricele de tip C sau HT să răspundă mai bine la solicitări transversale pe planul de armare.

În cazul armării cu cele două țesături realizate din același tip de fibre de sticlă este vizibilă diferența dintre testele de tracțiune efectuate pe direcția urzelii și, respectiv, pe direcția bătăii (fibrele de sticlă au densitate mai mare și, în consecință, menținerea într-o anumită poziție a fasciculelor necesită eforturi mai mari). Ceea ce este cu adevărat și mai interesant este faptul că în cazul rășinii de tip E solicitarea în lungul bătăii duce mai repede la distrugerea laminei în timp ce pentru celelalte două rășini solicitarea în lungul urzelii duce mai repede la distrugerea materialului (lucru explicabil

prin aceea că pe această direcție fibrele nefiind tensionate la aplicarea încărcării și după fracturarea rășinii, fibrele vor fi tensionate până la nivelul tensionării impuse urzelii pentru realizarea țesăturii).

Pe lângă fibrele de carbon, fibrele aramidice sunt fibre cu densitate mică și proprietăți remarcabile ce pot fi utilizate cu succes pentru armarea polimerilor. Spre deosebire de fibrele de carbon, fibrele aramidice au module de forfecare foarte mari ceea ce le face foarte valoroase pentru proiectarea și formarea unor materiale capabile să reziste la încercări transversale pe direcția de armare (în special teste de șoc – și aici nu este cazul să mai insistăm pe principala aplicație a acestor fibre – armuri personale). Fibrele aramidice, însă, nu reprezintă cel mai bun candidat pentru proprietățile longitudinale și atunci au fost realizate țesături din fascicule alcătuite din aceste două tipuri de fibre. Deși există două țesături realizate din aceleași tipuri de fibre de carbon și, respectiv, fibre aramidice, o comparație între acestea (așa cum sunt prezentate cele două comparații de mai sus) deoarece una dintre țesături deși este tot o țesătură simplă (fiecare fascicul din bătaie este trecut alternativ pe sub un fascicul de urzeală, apoi peste următorul fascicul din urzeală și, din nou, pe sub următorul fascicul din urzeală, etc) această țesătură este realizată cu o urzeală ce are ca unitate repetitivă două fascicule de fibre de carbon urmate de un fascicul de fibre aramidice, în timp ce, în urzeală unitatea repetitivă este alcătuită din două fascicule de fibre aramidice urmate de un fascicul de fibre de carbon.

Toate măsurătorile efectuate au permis determinarea unor constante elastice ce ar putea fi folosite pentru descrierea unui laminat realizat din tipurile de lamine analizate. În acest caz o problemă foarte sensibilă a fost legată de determinarea coeficienților Poisson pentru aceste lamine, dat fiind faptul că extensometrul mecanic nu poate fi fixat nici pe grosimea laminei (prea mică) și nici pe lățimea acesteia. În condițiile desfășurării experimentelor ar fi fost aproape imposibilă determinarea coeficienților Poisson prin metoda analizei de imagine deoarece pregătirea epruvetelor (realizarea unui caroiaj de puncte pe fiecare probă în parte) ar fi durat, probabil, mai mult de un an. Oricum, pornind de la relațiile de definiție ale coeficienților Poisson și ținând cont de faptul că aplicația software care permite determinarea constantelor elastice în urma testelor mecanice nu face nicio corecție legată de contracțiile transversale pe încărcare, am evaluat valorile coeficienților Poisson pe baza datelor obținute pentru modulul de elasticitate pe direcția urzelii și, respectiv, modulul de elasticitate pe direcția bătaii.

După cum este foarte bine cunoscut, în cazul încărcării plane a unei lamine (considerând neglijabilă grosimea acesteia) relațiile deformare-efort (pe cele două direcții semnificative ale analizei) pot fi scrise în forma:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E_x} \sigma_{xx} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_{yy} \text{ și } \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E_y} \sigma_{yy} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_{xx}.$$

Aplicația software care permite evaluarea constantelor elastice ale laminei în urma testului de tracțiune evaluează modulul de elasticitate și, în același timp, permite citirea valorilor deformației și eforturilor. În acest caz valoarea evaluată pentru modulul de elasticitate (pe direcția de încărcare - direcția urzelii sau 0°) nu este corectată cu contribuția de pe direcția transversală, ceea ce este valabil și pentru direcția perpendiculară (atunci când testul este efectuat pe direcția bătaii sau 90°), adică evaluările sunt făcute conform relațiilor:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E_x} \sigma_{xx} \text{ și } \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E_y} \sigma_{yy}$$

Având în vedere că au fost efectuate teste pe direcții perpendiculare (deși se știe că anumite diferențe pot apărea, după cum a fost precizat anterior, din pretensionarea urzelii) seturile de date obținute pot fi utilizate pentru determinarea coeficienților Poisson (ale căror valori – teoretic – nu ar trebui să fie egale pentru un material). Ultimele două relații pot fi folosite pentru a determina (din curbele efort-deformare) modulele de elasticitate ale materialelor pe direcția urzelii (E_x sau E_{xx})

și pe direcția bătăii (E_y sau E_{yy}), ca pante ale graficelor apoi aceste valori sunt utilizate pentru un punct aflat pe curbă (la mijlocul acesteia) pentru determinarea coeficienților Poisson. Trebuie menționat faptul că toate evaluările au fost făcute pe curbele efort-deformare mediate pe cele zece epruvete testate.

Mai sus a fost discutată situația celor două tipuri de matrice casante (C și HT) în cazul cărora se pot distinge paliere separate ale curbei efort-deformare. Din acest punct de vedere s-ar putea vorbi de material compozit numai pe prima parte a testului (palierul orizontal, constituind – după cum a fost precizat – zona de întindere a fibrelor eliberate din matrice, în timp ce în partea finală comportamentul ar fi cel al fibrelor. Pentru laminele angajate pe direcția urzelii și, respectiv, bătăii sunt prezentate mai jos curbele efort-deformare – **figurile 44-52** (anterior au fost reprezentate curbele încărcare-alungire) pentru țesăturile analizate în detaliu, adică țesăturile realizate din aceleași tipuri de fibre. Pe baza acestor curbe au fost determinate valorile modului de elasticitate pe cele două paliere (în cazul matricelor de tip C și HT). De asemenea, pentru aceste materiale (evident, exceptând laminele realizate cu matrice de tip E) au fost evaluate valorile coeficienților Poisson. În plus este important de remarcat faptul că există diferențe între valorile modulelor de elasticitate măsurate, în mod automat, de aplicația software care controlează mașina de teste și permite determinarea valorilor parametrilor elastici și valorile modulelor de elasticitate determinate din curbele efort-deformare. Pentru comparație aceste valori sunt prezentate în **tabelele 28-30**.

5.3. Teste de tracțiune – încărcare oblică

Întregul demers al analizei referitoare la determinarea valorilor modulelor de elasticitate și valorilor coeficienților Poisson este legat de obiectivul de a determina valorile constantelor elastice ale laminelor orientate la diferite unghiuri. Modelul laminatului cuprinde, ca o parte esențială, o rețetă de determinare a acestor valori, bazat pe cunoașterea valorilor modulelor de elasticitate și a valorilor coeficienților Poisson pe două direcții cunoscute. În acest moment, fie măsurate, fie calculate pe baza raționamentelor expuse anterior, sunt disponibile valorile acestor parametri și s-ar putea evalua valorile modulelor de elasticitate pentru o lamină încărcată la 30° sau 45° față de direcția urzelii. Din nefericire, lucrurile nu sunt atât de simple deoarece lipsește încă un parametru important și anume modulul de forfecare G_{12} . În relația de mai jos se pot folosi valorile $E_x = E_{30^\circ}$, $E_1 = E_{xx}$, $E_2 = E_{yy}$, $\nu_{12} = \nu_{xy}$, $\nu_{21} = \nu_{yx}$ cu valorile corespunzătoare preluate din **tabelele 28-30** pentru determinarea valorii parametrului G_{12} cu care ar putea fi verificată relația pentru E_{45° .

$$\frac{1}{E_x} = \frac{m^2}{E_1} (m^2 - n^2 \nu_{12}) + \frac{n^2}{E_2} (n^2 - m^2 \nu_{21}) + \frac{m^2 n^2}{G_{12}}$$

După cum a fost menționat anterior au fost efectuate teste și cu încărcarea laminelor sub unghiurile de 30° și, respectiv, 45° fiind extrase lamine înclinate față de direcția urzelii la unghiurile menționate. Cele mai importante rezultate sunt legate de faptul că a fost observată – în marea majoritate a cazurilor – curgerea materialelor, curgere care nu poate fi explicată pe baza modelelor utilizate pentru descrierea curgerii epruvetelor metalice atunci când acestea sunt supuse testelor de tracțiune.

Ca și în cazul laminelor angajate pe direcția urzelii și, respectiv, bătăii vor fi prezentate toate rezultatele obținute pentru categoriile de țesături (fibre de carbon, fibre de sticlă, fibre aramidice și mixte) dar va fi respectat algoritmul de prezentare al materialelor realizate din aceleași tipuri de fibre (C160 și C240, S25 și S108, CA68 și CA188, ultima cu cele două variante 1C2A și 2C1A). Ca și în cazul anterior această ultimă analiză ar putea conduce la concluzii semnificative privind natura și calitatea interfazei matrice-fibră și permite și o analiză a modului în care densitatea fibrelor

influențează proprietățile mecanice ale compozitului (dincolo de modelul amestecurilor) cu deosebire curgerea acestor materiale.

5.4 Concluzii

- au fost identificate diferențe calitative în ceea ce privește fracturarea laminelor armate cu țesături în funcție de tipul de matrice utilizată; laminele realizate cu matrice epoxidice mai rigide, adică cele de tip C și HT (care au și timp de gel mai mic) par a fi elastice într-un domeniu foarte îngust al deformărilor; această observație se referă la angajările pe direcția urzelii și, respective, bății țesăturii utilizate ca armătură;
- modulele de elasticitate determinate pe zonele foarte scurte de la începerea angajării (în cazul matricelor de tip C și HT), înaintea palierelor orizontale, au valori diferite pentru fiecare țesătură ceea ce se poate explica numai considerând că există diferențe de calitate a interfeței țesătură-matrice;
- același argument poate fi folosit și pentru existența valorilor diferite ale modulelor de elasticitate pentru laminele armate cu același tip de țesătură dar cu matrice de tip C sau HT, după eventuala rupere a matricei (sfârșitul primei zone liniare); dacă după fracturarea inițială a matricei urmează zona de palier orizontal (tensionarea țesăturii) răspunsul de după zona de palier ar trebui să fie același (indiferent de natura matricei) ceea ce nu este adevărat pentru testele efectuate;
- valorile diferite ale modulelor de elasticitate, de după palierele orizontale, înseamnă că tensionarea fibrelor este diferită în funcție de tipul de matrice utilizată și, în acest caz este aproape general valabilă afirmația că rășina de tip HT asigură o interfață de mai bună calitate cu țesăturile;
- în cazul laminelor armate cu țesături și cu matrice de tip E nu sunt observabile palierele (de pe curbele încărcare-alungire sau efort-deformare) ceea ce înseamnă că transferul încărcărilor între cele două faze (matrice și armătură) este mult mai eficient decât în cazul celorlalte două tipuri de matrice, comportamentul liniar fiind observabil de la angajare până la rupere;
- în general, laminele se fracturează de-a lungul unei fibre sau unui fascicul de fibre perpendicular pe direcția angajării (din bătaie în cazul angajării pe direcția urzelii și, respectiv, din urzeală în cazul angajării pe direcția bății; mecanismul de fracturare poate fi explicat prin aceea că, într-o primă etapă, se fracturează matricea și, într-o fază subsecventă, forfecarea celor două părți (provenite din fracturare) determină tăierea fibrelor; un studiu cu o cameră de mare viteză ar putea aduce mai multă claritate asupra acestui aspect;
- testele de tracțiune au fost realizate atât pe direcția urzelii cât și pe direcția bății pentru a pune în evidență o eventuală diferență de comportament dată de pretensionarea urzelii (absolut necesară pentru realizarea țesăturii), pretensionare care ar putea avea o componentă remanentă după aplicarea filmului polimeric (despre a cărui natură nu se cunoaște nimic) de către producătorul țesăturii cu scopul de a păstra integritatea acesteia și a favoriza adeziunea rășinilor epoxidice;
- au fost observate diferențe (dar nu semnificative) între modulele de elasticitate ale laminelor cu aceeași armătură și cu aceeași matrice angajate pe direcția urzelii și, respectiv, bății deși toate țesăturile (cu excepția celei notate CA188) sunt țesături echilibrate – aceeași densitate a fasciculelor din urzeală și din bătaie; analiza acestor rezultate nu permite decelarea unei concluzii ferme cu privire la ipoteza enunțată;
- au fost analizate, comparativ, rezultatele obținute pentru țesături realizate din același tip de fibre (conform datelor tehnice furnizate de producătorii țesăturilor), presupunând că din aceste rezultate s-ar putea extrage informații legate de dependența valorilor constantelor elastice de structura țesăturii; rezultatele obținute nu sunt însă de natură să permită acest lucru (și datorită faptului că există erori de prelucrare a epruvetelor cu efecte directe asupra rezultatelor testelor);

- în cazul angajărilor oblice, la 30° și, respectiv, 45° față de direcția urzelii, se poate observa curgerea materialelor, redată, într-o oarecare măsură, prin intermediul fotografiilor; în principiu, curgerea este mai accentuată în cazul angajărilor la 30° ;
- aspectele curbelor efort-deformare (sau încărcare-alungire) pe zonele de curgere prezintă variații aleatorii care pot fi puse pe seama desprinderii fibrelor din matrice sau a curgerii matricei (fracturarea acesteia fiind împiedicată de prezența fibrelor); s-ar putea spune, în această ipoteză, că prezența fibrelor reduce rigiditatea matricei;
- a fost testat modelul matematic al valorilor constantelor elastice ale laminei într-un sistem oarecare de referință dar rezultatele aplicării acestui model (pentru determinarea valorilor modulelor de elasticitate ale laminelor angajate la 45°) nu dă rezultate mult diferite de un model empiric propus;
- rezultatele evaluărilor sunt relativ depărtate de valorile măsurate pentru modulul de elasticitate al laminelor cu matrice de tip C sau HT; este foarte important de precizat faptul că, în cazul angajărilor oblice, există mai multe surse de erori decât în cazul angajărilor în lungul urzelii sau bătăii (unele dintre ele fiind date de decupajul epruvetelor, altele de prinderile acestora în bacurile mașinii de testare);
- în cazul laminelor armate cu țesătura CA188 și prezentate în cursul expunerii sub forma 1C2A sau 2C1A se observă rezultate diferite la angajarea pe direcția urzelii și, respective, pe direcția bătăii pentru matricele de tip C și HT semnalizând că, probabil, adeziunea acestor rășini la fibrele de carbon este diferită față de cea la fibrele aramidice; aceste rezultate sunt vizibile și în cazul angajărilor oblice ale laminelor; în cazul matricei de tip E valorile obținute sunt mai apropiate;
- atât matricea de tip C, cât și matricea de tip HT sunt rășini epoxidice cu timp de gel relativ scurt și acest aspect poate fi folosit pentru a explica, într-o oarecare măsură, nivelul mai scăzut al calității interfazelor, amestecul pre-polimeric neavând timp suficient pentru a pătrunde în și a ocupa toate interstițiile dintre fibre;
- studiul actual nu poate fi considerat mai mult decât un început în ceea ce privește analiza proprietăților mecanice ale laminelor armate cu țesături; orice studiu ulterior va trebui să ia în considerare metoda de obținere a epruvetelor astfel încât decuparea acestora să fie făcută cât mai precis evitând, astfel, neuniformități de margine și, mai ales, deformări ale acestora;
- date fiind aceste rezultate a fost luată decizia de a forma plăci compozite numai cu matricea de tip E având în vedere că, pentru acest tip de matrice, indiferent de tipul de armătură, răspunsul la încărcare este strict liniar (până la rupere, în mod evident).

Capitolul 6. Proprietăți mecanice ale laminatelor

6.1. Teste de tracțiune

Materialele formate în această etapă sunt materiale laminate (în fapt pseudo-laminate) având o armătură realizată din nouă straturi de țesătură toate orientate în același mod (toate fasciculele din urzeală fiind paralele). În acest caz, modelul laminatului oferă posibilitatea de a determina constantele elastice ale materialului format plecând de la constantele elastice ale laminelor. Problema este chiar mai simplă decât în cazurile studiate în literatură unde teoria generală este simplificată pentru diferite tipuri de laminate (simetrice, cu lamine orientate sub diverse unghiuri etc). S-ar putea spune că aplicarea modelului laminatului ar trebui să ofere o valoare a modulului de elasticitate (de exemplu) foarte apropiată de cea măsurată în timpul testelor.

Aici, însă, trebuie făcute câteva comentarii. Primul este legat de faptul că materialul nu este tocmai laminat și aceasta se regăsește în modul în care acesta răspunde la solicitări. Astfel, prin modul de formare, materialul este practic constituit din nouă straturi de țesătură prinse într-un bloc polimeric unic (în cazul laminatelor laminele sunt lipite între ele prin utilizarea unor adezivi).

În modelul laminatului se face referire la grosimea laminei – complicând și mai mult abordarea propusă – deoarece, așezarea țesăturilor îmbibate în matriță, aduce (în mod natural) o alunecare a acestora astfel încât, cu siguranță, fasciculele din urzeală și bătaie nu vor putea fi niciodată perfect suprapuse. Astfel, grosimea fiecărui material este mai mică decât suma grosimilor laminelor din care este alcătuit. În mod evident acest fapt va genera o abatere de la modelul matematic al laminatului, abatere ce ar putea fi corectată, probabil, prin introducerea unui coeficient de compactare a materialului. În **tabelul 33** sunt prezentate grosimile țesăturilor, grosimile laminelor și grosimile materialelor laminate (toate pseudo-laminatele sunt realizate din câte nouă straturi de țesătură, toate cu fasciculele de fibre din urzeală și, respectiv, din bătaie respectiv paralele și toate cu sistemul epoxidic Epiphen RE4020 – DE4020 ca matrice) realizate cu 14 dintre țesăturile studiate anterior.

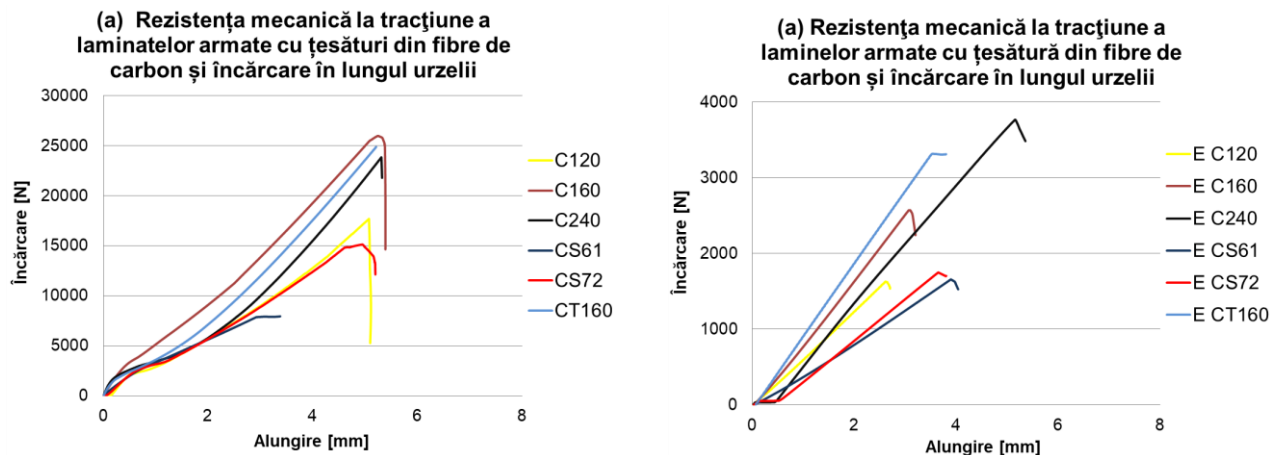


Figura 80. Rezistența la tracțiune cu angajare în lungul urzelii pentru laminate și lamine armate cu țesături din fibre de carbon (matrice E)

Laminatul realizat cu țesătura CT160 nu s-a rupt în timpul testării. Se poate observa că, în general, încărcarea maximă a laminatelor este de aproximativ nouă ori mai mare decât cea a laminelor corespunzătoare, excepțiile fiind materialul armat cu CT160 și cel armat cu C240. În

cazul acestui din urmă material o explicație ar putea fi aceea că fiind cea mai mare densitate a fibrelor de carbon, în timpul formării laminatului nu toate fibrele au fost prinse în matrice (fasciculele de fibre din care este realizată țesătura fiind groase, rășina nu a ajuns în mijlocul acestora).

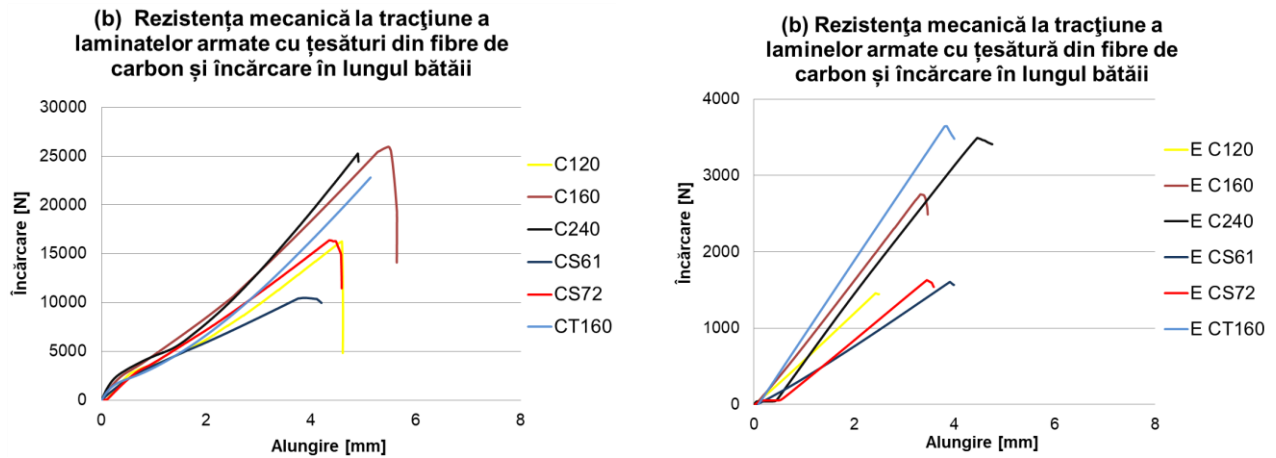


Figura 81. Rezistența la tracțiune cu angajare în lungul bății pentru laminate și lamine armate cu țesături din fibre de carbon (matrice E)

Ca și în cazul angajării în lungul urzelii se poate observa că, atât în cazul laminelor, cât și în cazul laminatelor, răspunsurile cele mai slabe le dau materialele armate cu CS61 și CS72. Aceste țesături sunt realizate din benzi de fibre de carbon obținute prin expandarea fasciculelor din fibre de carbon și densitatea redusă a fibrelor determină rezistența scăzută, răspunsul acestor materiale fiind dominat de comportamentul metricei.

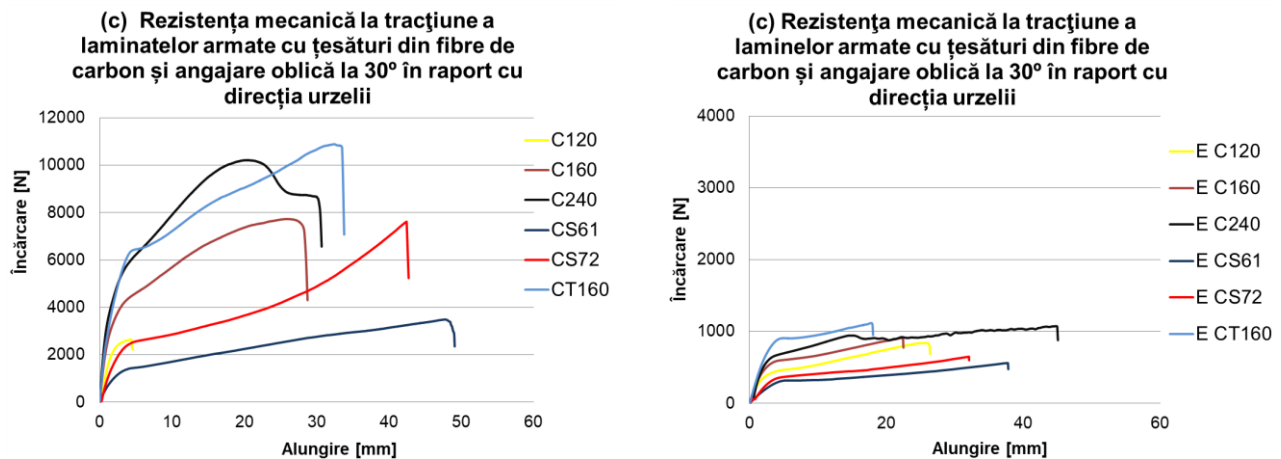


Figura 82. Rezistența la tracțiune cu angajare oblică la 30° în raport cu direcția urzelii pentru laminate și lamine armate cu țesături din fibre de carbon (matrice E)

În cazul angajării oblice prezentate mai sus se poate observa că cele mai bune răspunsuri le au materialele laminate armate cu C240, CT160 și C160 rezistențele la tracțiune ale acestora fiind de zece ori mai mari decât cele ale laminelor corespunzătoare. Remarcabilă este și liniaritatea răspunsurilor țesăturii CS61 (atât în ceea ce privește lamina cât și în ceea ce privește laminatul).

Este interesant faptul că laminele și laminatele armate cu țesăturile C160 și CT160 (adică aceeași densitate a țesăturii) au comportamente diferite. Această diferență poate fi explicată fie prin aceea că fibrele de carbon folosite sunt diferite, fie prin aceea că modul de realizare al țesăturilor este diferit – în cazul țesăturii C160 fasciculele de fibre sunt compacte (elipsoidale în secțiune) în

timp ce, în cazul țesăturii CT160 fasciculele de fibre sunt expandate fiind aproape plane ceea ce ar fi în concordanță cu presupunerea că, în cazul fasciculelor compacte, probabilitatea ca rășină să ajungă în miezul fasciculelor de fibre este mai mică. Ca și în cazul celor două angajări drepte (în lungul urzelii și în lungul bății) se poate observa că, în general, rezistența la tracțiune a laminatelor armate cu țesături din fibre de carbon, este de aproximativ nouă-zece ori mai mare decât rezistența laminei corespunzătoare ceea ce ar corespunde, conform principiului suprapunerii efectelor cu un test efectuat pe un pachet de nouă lamine fără legătură între ele. Comparând cu rezultatele prezentate pentru proprietățile mecanice ale laminelor se poate constata că nu există corespondent laminat pentru țesăturile CS61 și CS72, cele care au avut cel mai slab comportament.

Au fost analizate 16 materiale compozite de tip pseudolaminat realizate prin metoda wet lay-up, în matrițe de sticlă, din 9 straturi de țesătură așezate toate astfel încât fasciculele de fibre din urzeala țesăturilor să fie paralele. Rășina epoxidică EIPHEN (sistemul RE4020-DE4020) a fost aleasă ca matrice în urma analizelor efectuate pe lamine fiind mai puțin casantă și asigurând un transfer mai bun al încărcărilor.

Au fost realizate teste de tracțiune axială (încărcări drepte în lungul urzelii și, respectiv, bății) și teste în afara axelor (angajări oblice la 30° și, respectiv, 45° față de direcția urzelii). Numărul epruvetelor testate (mic în condițiile exigențelor analizei statistice) a fost de cinci pentru angajările drepte și două pentru angajările oblice. Rezultatele obținute relevă faptul că există două materiale cu comportament cavsi-izotrop (cele armate cu CAVS și, respectiv, CVS) în timp ce cel mai bun răspuns (din punctul de vedere al elasticității) îl au materialele armate cu țesături din fibre de carbon.

Încercările de evaluare ale parametrilor elastici ai laminatelor în funcție de parametrii elastici ai laminelor nu au dus la concluzii foarte clare. De regulă încărcarea maximă a unui laminat este de aproximativ nouă ori mai mare decât cea corespunzătoare unei lamine. Se constată, de asemenea, pentru angajările oblice, o curgere semnificativă a laminatelor (asemănătoare curgerii laminelor cu matrice de tip E).

Mecanismele de eșuare ale laminatelor sunt mai complexe decât cele corespunzătoare laminelor în primul rând datorită apariției interacțiunilor interlaminare generate de modul în care se așează țesăturile, în mod natural, în urma matrițării. Un alt aspect interesant este legat de faptul că, de cele mai multe ori, grosimea laminatelor este mai mică decât suma grosimilor laminelor ceea ce ar trebui să conducă, în mod normal, la valori ale eforturilor maxime pentru laminate mai mari decât de nouă ori valorile eforturilor maxime corespunzătoare laminelor. Datorită modului de formare a materialelor este posibil un mecanism de eșuare datorat forfecării interlaminare.

6.2. Solicitări ciclice

Pentru toate laminatele formate au fost prevăzute epruvete pentru analiza evoluției proprietăților elastice după solicitări ciclice. Rezistența la oboseală este cel mai ridicat nivel amplitudinal sau/și numeric de solicitări ciclice dinamice la care rezistă o probă materială, în condiții convenționale cunoscute, fără ca să apară (survină) deteriorări/distrugeri considerate neacceptabile pentru calitatea materialului în cauză [86]. Deteriorările care pot surveni sunt provocate de oboseala fizică creată prin repetarea aceluiași fel de solicitare [87].

Comparativ cu solicitările statice, solicitările variabile repetate de un număr mare de ori, au un efect nefavorabil asupra capacității de rezistență a materialului din care sunt confecționate elementele de rezistență. Așa au apărut ruperi neașteptate la multe organe de mașini cum ar fi: arbori cotiți, roți dințate, bolturi de piston, arcuri de supapă etc, cu toate că din punct de vedere al rezistenței materialelor au fost calculate corect. Ruperile au avut loc la valori mult mai mici ale

tensiunii corespunzătoare stărilor limită pentru solicitarea statică. Acest fenomen de rupere prematură, la tensiuni sub cele limită, este cunoscut sub numele de *oboseala materialelor* [88].

În urma testelor efectuate și analizate atât pentru lamine cât și pentru laminate, au fost stabilite etapele și parametri de testare a materialelor compozite laminate la proprietatea mecanică – tracțiune dinamică. Etapele de testare la tracțiune dinamică a laminatelor au fost realizate în trei pași importanți, așa cum este prezentat și în **figura 100**:

a. pasul 1 se testează până când forța de încărcare ajunge la jumătate din media valorii forțelor stabilită la tracțiunea statică a laminatelor cu aceeași arhitectură, setându-se pentru fiecare laminat valoarea corespunzătoare a încărcării;

b. pasul 2 constă în parcurgerea a 1000 de cicluri și, iarăși, cu parametrii corespunzători laminatului, viteza setată pentru fiecare tip de laminat și fiecare unghi de angajare a epruvetelor laminatelor; în timpul unui ciclu de solicitare, tensiunea variază între o valoare maximă și una minimă - ele constituind valorile extreme ale ciclului de solicitare. Cu cât tensiunea maximă din piesă este mai mare, cu atât ruperea prin oboseală are loc la un număr mai mic de cicluri. Dacă tensiunea are valori mici, nu se mai produce ruperea prin oboseală oricât de multe cicluri de solicitare ar exista în piesă.

c. pasul 3 după efectuarea celor 1000 de cicluri de încărcare epruveta este solicitată static pentru determinarea constantelor elastice și pentru a pune în evidență efectul încărcărilor ciclice.

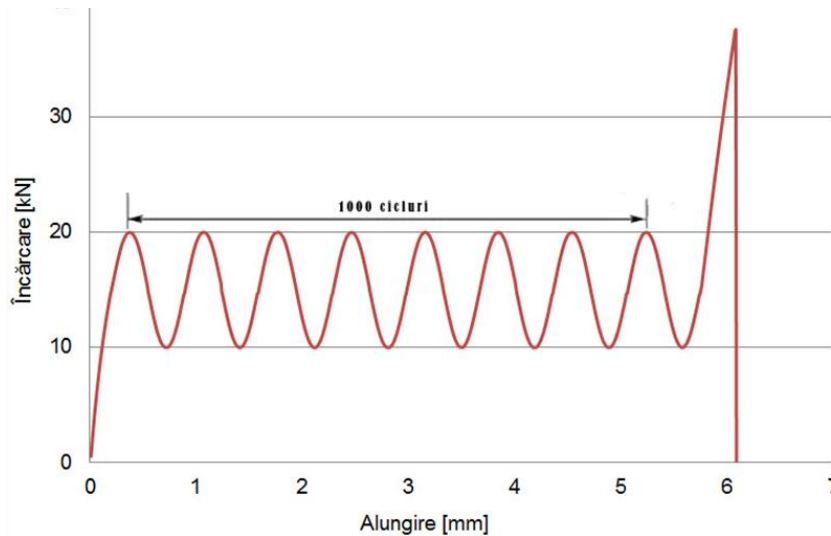
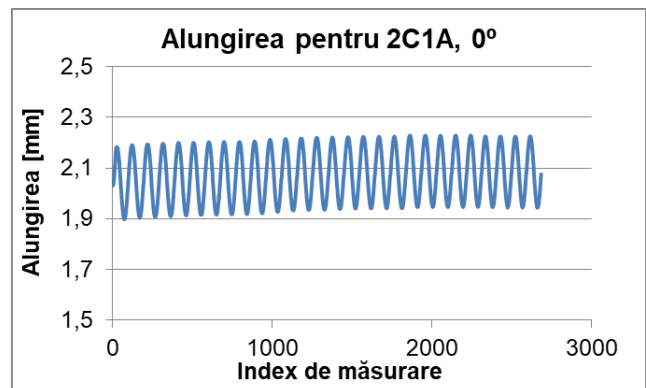
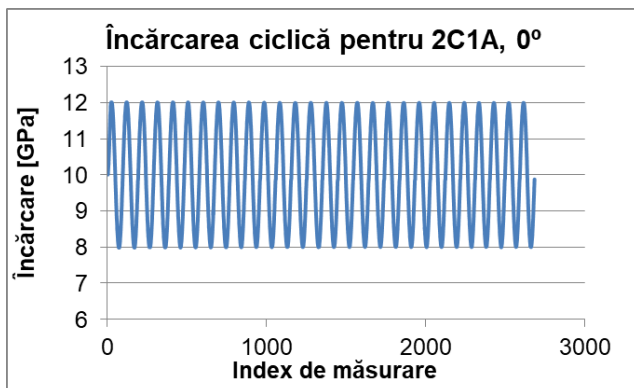


Figura 100. Reprezentarea celor trei etape ale procesului de testare la solicitări ciclice



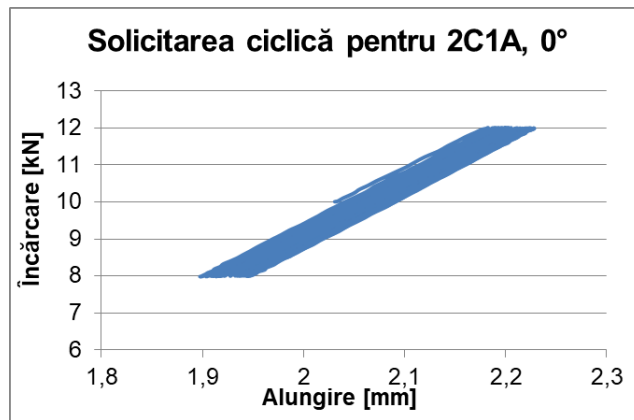
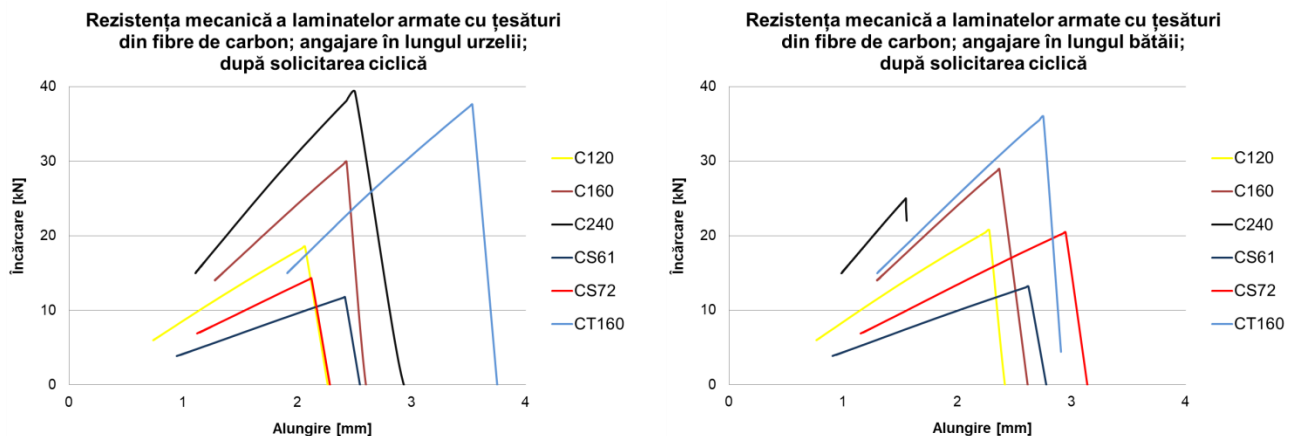


Figura 101. Încărcarea și alungirea în solicitarea ciclică (sus). Curba încărcare/alungire în solicitarea ciclică

Așa după cum se poate observa din datele prezentate în **tabelul 34** datele de setare pentru solicitările ciclice au fost stabilite pentru fiecare material și pentru fiecare orientare a angajării. Inițial – bazat pe datele oferite în mod automat de aplicația soft-ware a mașinii de teste – au fost fixate anumite limite ale încărcărilor și ulterior au fost impuse condiții de oprire ale mașinii bazate pe distanțele dintre bacuri. La primele teste realizate în acest fel unele dintre epruvete au eșuat înainte de realizarea numărului propus de cicluri de încărcare. În final, s-a ajuns la situația prezentată în **tabelul 34**, în care se poate observa că, în principiu valoarea maximă a solicitării pe ciclu este de aproximativ 50-60% din încărcarea maximă înregistrată la testele statice (pentru un material și o direcție de angajare), iar valoarea minimă este de aproximativ 25-30% din valoarea încărcării maxime de la testele statice.

Curbele prezentate în **figura 101** pot fi considerate reprezentative (bineînțeles la alte scări) pentru oricare dintre testele de solicitările ciclice realizate. Fiecare încărcare solicitare ciclică a fost realizată la ritmul de un ciclu pe secundă în timp ce rata de achiziție a datelor a fost de aproximativ 2,5Hz (de 2,5 ori pe secundă) iar testele au fost realizate, de această dată cu o celulă de forță de 100kN ceea ce a permis și determinarea unor valori mai mari ale încărcărilor așa după cum se va putea observa în cele ce urmează. Ceea ce a fost observat a fost faptul că în urma solicitărilor ciclice apare o alungire remanentă a materialelor – observabilă pe curbele de mai jos (punctele de start ale solicitărilor finale). Această alungire remanentă corespunde unei deformări plastice a epruvetelor ce s-ar putea datora unui mecanism analog celui de curgere constat în cazul testării laminatelor.



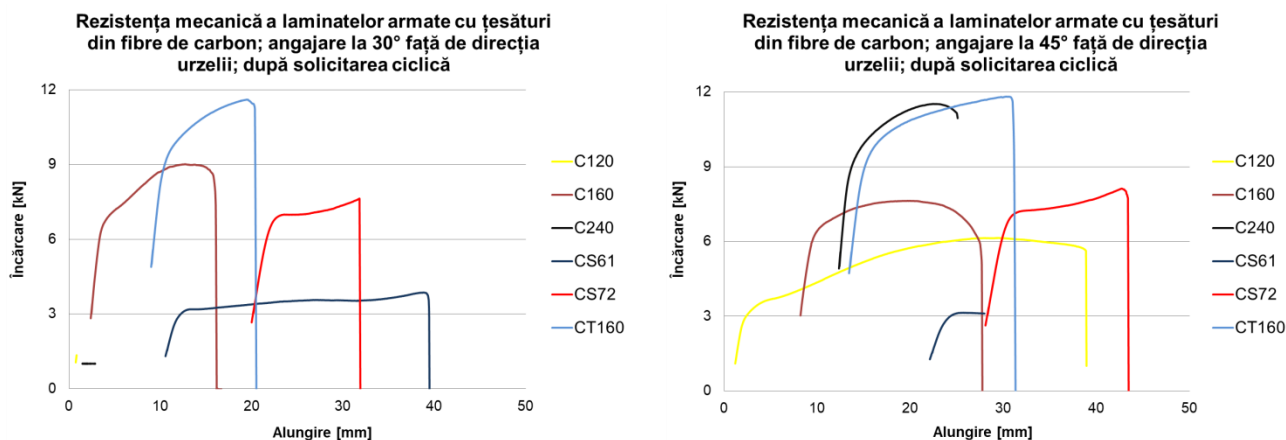


Figura 102. Curbele încărcare/alungire pentru materialele armate cu fibre de carbon testate (pasul 3)

Analiza datelor din **figura 102** indică faptul că singurul material care răspunde practic la fel după solicitările axiale și după cele oblice este cel armat cu CT160 (material cu aspect de țesătură realizat din benzi de fibre de carbon uniform distribuite – practic o țesătură de benzi ortotrope) diferențele observate în acest caz putând fi interpretate ca erori de testare. În ceea ce privește răspunsul materialelor se poate observa și faptul că materialul armat cu C160 are același tip de răspuns după cele două solicitări ciclice axiale – inclusiv în ceea ce privește alungirea remanentă. Surprinzător din punctul de vedere al proiectării este faptul că răspunsurile materialelor armate cu C240 și C120 sunt foarte diferite. Pentru cazul C240 la cele două angajări axiale se constată o diferență de încărcare de aproape 15kN (alungirile remanente fiind comparabile). Ceea ce este foarte interesant la aceste materiale este faptul că, practic, nu rezistă la încărcări ciclice oblice la 30° față de direcția urzelii dar rezistă suficient de bine în cazul solicitărilor ciclice la 45° față de direcția urzelii.

Din punctul de vedere al proiectării, interpretarea datelor obținute ar putea conduce la o rețetă de secvențiere a tipurilor de țesături utilizate la armarea materialelor care ar putea fi optimizată în sensul obținerii unor materiale mai rezistente la solicitări ciclice. Acest demers este totuși restricționat de faptul că nu există nicio analiză care să vizeze comportamentul mecanic al laminatelor realizate din două lamine (armate cu același tip de țesătură sau cu țesături diferite, cu aceeași orientare a fibrelor sau cu orientări diferite). Un astfel de studiu ar constitui un subiect extrem de interesant pentru continuarea studiului prezent, chiar dacă, din punctul de vedere al complexității demersului, ar fi o tentativă de lungă durată.

Materialele armate cu țesături echilibrate răspund diferit după solicitările ciclice deși, în mod normal nu ar trebui să existe diferențe între răspunsurile la angajările axiale (în lungul urzelii sau în lungul bății). În general răspunsul în lungul bății este mai mic decât cel în lungul urzelii ceea ce înseamnă că (în acord cu o ipoteză inițială) că există o diferență între proprietățile țesăturii în lungul urzelii și, respectiv, în lungul bății. Această diferență nu poate fi dată de proprietățile fibrelor sau fasciculelor de fibre ci doar de ipoteza că urzeala este pretensionată (pentru a asigura procesul de țesere) sau de ipoteza că o influență importantă asupra proprietăților o are modalitatea de aplicare a polimerului (niciodată precizat de producătorul țesăturii) care asigură, pe de o parte, stabilitatea țesăturii și, pe de altă parte, adeziunea polimerilor utilizați ca matrice (în general rășini epoxidice).

Se constată că încărcările maxime ale laminatelor au valori mai mari după solicitările ciclice decât înainte de acestea (condițiile de testare au fost identice – câte cinci epruvete pentru angajările drepte și câte două epruvete pentru angajările oblice). Acest lucru ar putea fi explicat prin aceea că, în urma solicitărilor ciclice, are loc o microfracturare masivă a matricei (echivalentă unei desprinderi

generalizate a fibrelor din matrice) astfel încât în timpul solicitării finale (pasul 3) eforturile sunt transmise numai de fibre. Cu alte cuvinte, după solicitările ciclice sunt excluse mecanismele de fracturare ale compozitului care depind de comportamentul matricei adică nemaifiind un continuum, fracturarea matricei nu mai poate produce secționarea (prin forfecare) a fibrelor.

Aceeași ipoteză poate fi utilizată și pentru a explica absența mecanismelor de fracturare interlaminară, transmiterea eforturilor în lungul straturilor de polimer dintre două straturi de armătură este blocată de microfisuri iar eforturile transmise de-a lungul fibrelor produc alte microfisuri.

Un răspuns interesant este cel dat de materialele armate cu CAVS la care angajările drepte conduc la încărcări mai mici ale materialului solicitat ciclic. Acest lucru este explicabil dacă, încă odată, se ia în considerare faptul că materialul de armare nu este, în fapt, o țesătură (așa cum a fost explicat anterior). În aceste condiții au loc desprinderi ale fibrelor din împâslire (în urma încărcărilor repetate) cu consecințe directe asupra modului în care încărcările sunt transmise prin material. În cazul solicitărilor oblice răspunsul materialului practic nu se modifică.

O situație interesantă este și cea a materialelor armate cu țesături realizate din fibre de sticlă, mai ales materialul armat cu S163 (despre care am discutat și la analiza parametrilor elastici ai laminatelor) al cărui răspuns este constant mai bun (din perspectiva încărcării maxime) după solicitarea ciclică fără însă a înregistra variații foarte mari ale valorilor. Se poate constata că materialele armate cu țesături simple foarte subțiri (A61 și S25) dau practic același răspuns (în limitele erorilor experimentale). În cazul acestor materiale, având în vedere densitatea mică a fibrelor, este posibil ca mecanismele de fracturare să fie identice (adică microfisurile matricei să determine fracturi ale unor fibre).

Capitolul 7. Concluzii și propuneri pentru dezvoltarea studiului

Scopul principal al acestui studiu a fost legat de tentativa de a descrie parametrii elastici ai unui laminat armat cu țesături atunci când se cunosc parametrii elastici ai laminelor, urmând modelul binecunoscut al laminatului. Acest demers nu a fost încununat de succes deoarece armarea cu țesături presupune apariția inerentă a unor defecte de distribuție a țesăturilor în interiorul materialului (abateri de la planeitatea laminelor) cu consecințe imediate asupra aplicării modelului care presupune absența forfecării interlaminare.

Cercetarea de față, bazată pe analiza unui număr considerabil de studii desfășurate în această direcție și pe studiul unor lucrări de specialitate în domeniu, a urmărit analiza proprietăților elastice ale laminelor armate cu 19 tipuri diferite de țesături și cu matrice realizate din trei tipuri de rășini epoxidice diferite.

Pornind de la scopul principal al studiului a fost urmărit un program de documentare, formare și testare a materialelor și interpretare a datelor experimentale. Acest program a fost stabilit de comun acord cu conducătorul de doctorat și cu membrii comisiei de îndrumare și are următoarele elemente de originalitate:

- realizarea unei documentații la zi asupra comportării mecanice a compozitelor polimerice;
- proiectarea, pe baza documentației studiate, cercetării pentru atingerea scopurilor;
- elaborarea unei metode originale de formare a materialelor compozite (lamine și laminate);
- realizarea efectivă a materialelor compozite (lamine și laminate);
- stabilirea programului de testare a materialelor;
- obținerea și analiza unui set de date experimentale referitoare la proprietățile mecanice, termice și electrice ale compozitelor formate (lamine și laminate);
- efectuarea testelor mecanice și termice;
- interpretarea rezultatelor în urma testelor efectuate;
- publicarea rezultatelor la conferințe internaționale și în reviste de specialitate.

Pentru a obține materiale cu proprietăți mecanice și termice îmbunătățite în cadrul acestui studiu au fost analizate caracteristicile fizico-chimice ale sistemelor epoxidice și proprietățile țesăturilor utilizate în formarea noilor materiale.

Au fost realizate teste mecanice de tracțiune pentru epruvete ale laminelor și laminatelor cu scopul achiziției de date care să permită atât analiza comparativă a proprietăților elastice ale acestora (atunci când sunt armate cu același tip de țesătură) cât și analiza comparativă a materialelor diferită. În ceea ce privește laminele, analiza experimentală a vizat și proprietățile termice ale acestora urmărind doi parametri esențiali în proiectarea materialelor compozite: căldura specifică și coeficientul de dilatare liniară în direcție perpendiculară pe planul de armare.

În cazul compozitelor armate cu țesături există multe abordări cu privire la determinarea teoretică a valorilor constantelor elastice majoritatea acestor ținând cont de anumite caracteristici geometrice ale țesăturilor: dimensiunile fasciculelor de fibre, forma fasciculelor de fibre, factorul de ondulație al fasciculului de fibre. În acest context au fost observate diferențe de comportare la tracțiune între materiale (lamine sau laminate) armate cu țesături realizate din același tip de fibre.

Testele de tracțiune pentru lamine au evidențiat următoarele aspecte:

- prin reprezentarea grafică a datelor obținute pentru solicitarea de tracțiune la rupere se observă că materialele armate cu țesături din carbon și rășină epoxidică prezintă cele mai bune rezultate;
- utilizarea fibrelor într-un compozit crește rezistența maximă la tracțiune, dar trebuie avută în vedere distribuția acestora în compozit;

- unghiul format între direcția firelor țesăturii și direcția angajării influențează caracteristicile mecanice ale compozitului. Valorile acestor unghiuri, 0° și 90° prezintă cele mai bune performanțe la rezistența ruperii materialului, diferențele mari dintre valorile rezultatelor experimentale ale materialelor compozite formate cu un singur strat (lamine), s-au obținut pentru unghiurile de 0° , 90° comparativ cu 30° , 45° . Acest lucru este datorat distribuției fibrelor în compozit;
- în urma rezultatelor experimentale, se observă o variație de valori a coeficientului lui Poisson în funcție de rășina epoxidică, țesătura utilizată și unghiul la care este decupată lamina, pentru calculul coeficientului lui Poisson pe epruvetele decupate din lamine, conform standardului SR EN ISO 527-4, este suficientă utilizarea unor date expuse de mașină la teste de tracțiune utilizând o metodă care ține cont de limitările mașinii în condițiile în care nu există posibilitatea monitorizării permanente (extensometre) a dimensiunilor transversale pe direcția de încărcare (mai ales în cazul laminelor);
- în ceea ce privește modulul de elasticitate al laminelor, analizând comportamentul valorilor modulului de elasticitate longitudinal din graficele referitoare la modulul de elasticitate, în ceea ce privește țesăturile utilizate în lamine, carbonul conferă acestora o bună comportare mecanică la tracțiune, în timp ce țesăturile din fibre de sticlă și fibre aramidice reduc proprietățile elastice la tracțiune. Dacă se compară valorile modulului de elasticitate pentru materialele armate cu țesături din punct de vedere al sistemelor epoxidice utilizate (E, C, HT2), în toate cele trei cazuri se poate observa o valoare aproximativ egală a modulului de elasticitate indiferent de tipul de rășină utilizat. Și totuși, se poate realiza o scară în funcție de valorile fiecărui sistem în urma încercării mecanice la tracțiune a laminelor. Materialele cu cele mai bune valori au fost acelea cu matrice epoxidice de tip E, urmate de materialele cu matrice epoxidice de tip HT2 și materialele cu matrice epoxidice de tip C. Condițiile de formare, decupare și testare au fost aceleași pentru toate sistemele, indiferent de sistemul epoxidic utilizat. În urma analizării graficelor rezultate după efectuarea testelor de tracțiune a laminelor, reiese că sistemele epoxidice utilizate pot influența proprietățile mecanice ale materialului.

În urma analizei datelor relevante despre starea materialului (lamine) testat, materialele la care se vede o îmbunătățire a proprietăților comparativ de sistemele epoxidice utilizate se observă pentru laminele cu rășină de tip E, de aceea au fost proiectate și formate laminate armate cu câte nouă straturi de țesătură și rășină epoxidică de tip E.

Proprietățile mecanice ale compozitelor laminate armate cu țesătură se pot estima prin aplicarea caracteristicilor mecanice pentru fiecare lamină utilizată în laminat, găsirea unei corelații între proprietățile mecanice ale laminei și rezultatele obținute ale laminatelor prin măsurarea directă, astfel încât rezultatele de simulare să fie apropiate de cele reale. În acest caz se poate observa o corelație de factor nouă (încărcarea maximă, energia) între valorile corespunzătoare laminelor și cele corespunzătoare laminatelor.

Un eventual algoritm propus pentru determinarea proprietăților laminai supuse la teste de tracțiune pentru determinarea proprietăților mecanice ale laminatului ar trebui să țină cont și de particularitățile țesăturilor, dar și de faptul că în condițiile așezării țesăturilor strat peste strat distanțele dintre planele mediane ale țesăturilor nu sunt constante.

Un aspect important este acela legat de analiza proprietăților mecanice (la tracțiune) ale laminatelor după ce acestea sunt supuse unei solicitări ciclice. În acest sens au fost realizate 1000 de cicluri de încărcare a fiecărui material limitele de încărcare variind între 40-60% pentru încărcarea maximă pe ciclu și 10-30% pentru încărcarea minimă pe ciclu, procentele referindu-și la valoarea încărcării maxime a laminatului în condițiile testării statice. Comportamentul materialelor după solicitările ciclice este superior (din punctul de vedere al încărcării maxime) celui al

materialelor testate în condiții statice ceea ce conduce la concluzia microfracturării masive a matricei în urma solicitărilor ciclice.

Aceste teste nu au fost teste de oboseală propriu-zise așa încât nu se pot desprinde concluzii cu privire la rezistența la oboseală a materialelor. În plus, testele de oboseală presupun solicitări ciclice în care valorile maxime și minime ale încărcărilor sunt raportate la încărcarea maximă corespunzătoare comportamentului elastic al materialului și nu la valoarea încărcării maxime a materialului, care, datorită particularităților armării cu țesături prezintă, după zona pseudoelastice, o valoare mai mare decât cea corespunzătoare răspunsului elastic. Astfel, testele ciclice efectuate, pot fi considerate ca solicitări care distrug treptat matricea și reorganizând distribuția fibrelor.

Cercetările în oboseala mecanică a compozitelor polimerice termorigide reprezintă un interes deosebit datorită domeniilor de aplicabilitate a materialelor. Rășina epoxidică, după cum găsim în literatura de specialitate, este cea mai utilizată în formarea compozitelor cu matrice termorigidă. În ceea ce privește țesăturile și influența lor asupra proprietăților compozitelor, cercetările sunt în continuă dezvoltare, acestea oferind posibilități nelimitate. Pentru o analiză eficientă a oboselii materialelor compozite armate cu țesături este necesară o creștere a grosimii acestor materiale fără însă a crește foarte mult densitatea specifică a țesăturilor deoarece comportamentele analizate ale materialelor armate cu țesături cu densitate mare relevă faptul că matricea nu poate ajunge în miezul fasciculelor de fibre. O alternativă ar fi utilizarea unor polimeri cu timpi de gel mai mari și cu fluiditate mai mare dar aceste demersuri ar putea conduce la obținerea unor materiale cu gradient de concentrație a fibrelor.

Pentru studii viitoare sunt interesante (din perspectiva completării informațiilor prezentate):

- testarea materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică (lamine) la comportament termic: căldura specifică (DSC) și determinarea gradului de dilatare termică (TMA);
- realizarea testelor mecanice ale laminatelor pentru determinarea proprietăților de încovoiere;
- formarea de noi materiale compozite armate cu aceleași țesături și alte tipuri de matrice epoxidice;
- analiza proprietăților elastice (la tracțiune) a unor compozite speciale realizate din doar două lamine (cu aceleași orientări ale fasciculelor de fibre sau cu orientări diferite ale acestora) pentru a înțelege mai bine mecanismele propuse pentru explicarea comportamentului diferit al materialelor realizate și testate în cadrul prezentului studiu;
- din perspectiva proiectării ar fi de asemenea interesant un studiu asupra comportamentului mecanic (la tracțiune) al unor compozite speciale realizate din două straturi de armătură (două lamine) armate cu țesături diferite;
- pentru testele de solicitări dinamice este necesară o analiză atentă a valorilor maxime și minime ale încărcării pe un ciclu astfel încât acestea să se încadreze în domeniul de răspuns elastic al materialului (foarte îngust după cum a fost arătat atât pentru lamine cât și pentru laminate);
- găsirea unei soluții soft-ware de identificare exactă a încărcării corespunzătoare ieșirii din primul palier de elasticitate pentru definirea corectă a condițiilor de testare la oboseală (în acest moment datele întoarse de mașină în urma testelor statice și celor dinamice sunt diferite datorită faptului ca sunt folosite două aplicații soft-ware diferite);
- găsirea unei soluții viabile în ceea ce privește monitorizarea video a testelor mecanice pentru identificarea momentelor critice;
- găsirea unei soluții tehnice de inspecție a calității materialelor înainte și după testare pentru validarea diferitelor ipoteze legate de mecanismele de eșuare.

BIBLIOGRAFIE

-
- [1] **Mihu, G.**, *Studiul sistemelor epoxidice modificate cu solvenți organici*, Teză de Doctorat.
- [2] http://www.resist.pub.ro/Cursuri_master/SMC/CAP.1.DOC
- [3] **Reddy, J.N.**, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells. Theory and Analysis*, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-1592-1, 2003.
- [4] **Barbero, E.J.**, *Introduction to Composite Materials Design*, Second Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, ISBN 978-1-4200-7915-9, 2011.
- [5] **Kellya, A., Mortensen, A.**, *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Elsevier, ISBN 978-0-08-045126-8, 2007.
- [6] **Matthews, F.L., Rawlings, R.D.**, *Composite Materials: Engineering and Science*, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-1-85573-473-9, 2008.
- [7] **Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W.**, *Composite Materials, Design and Applications*, CRC Press, ISBN 1-58716-084-6, 1942.
- [8] **Hubca, Gh., Iovu, H.**, *Materiale compozite*, Editura Tehnică, București, 1999.
- [9] **Munteniță, C.**, *Studii privind proprietățile sistemelor epoxidice modificate cu nano-ferite*, Teză de Doctorat.
- [10] **Suciu, V., Suciu, M.V.**, *Studiul Materialelor*, Editura Fair Partners, ISBN: 978-973-1877-01-3, București, 2007.
- [11] **Mikitaev, A.K., Ligidov, M.K., Zaikov, G.E.**, *Polymers, Polymer Blends, Polymer Composites and Filled Polymers: Synthesis, Properties and Applications*, Nova Science Publishers Inc., New York, 2006.
- [12] **Billoët J.L.**, *Introduction aux matériaux composites à hautes performances*, Edition Broché, 1993.
- [13] **Craver, Clara, D., Carraher, C.E.Jr.**, *Applied Polymer Science: 21st Century*, in *Introduction to polymer science and technology*, Elsevier, ISBN: 978-0-08-043417-9, pag: 21-22, 2000.
- [14] **Krevelen, D.W.V., Nijenhuis, K.T.**, *Properties of Polymers*, ISBN: 978-0-08-054819-7, 2009.
- [15] **Le Blanc J.**, *Filled Polymers. Science and Industrial Applications*, Taylor & Francis Group, 2010.
- [16] **Buggy, M.**, *Polymeric Materials*, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, ISBN: 978-0-12-803581-8.04104-7, 2016.
- [17] **Pascualt, J.P., Williams, R.J.J.**, *Epoxy Polymers, New Materials and Inovations*, ISBN 978-3-527-32480-4, 2010.
- [18] **Choo, V.K.S.**, *Fundamentals of Composite Materials*, Knowen Academic Press, New Mexico State University, New Mexico, USA, 1990.
- [19] **Jansson, A., Pejryd, L.**, *Characterisation of carbon fibre-reinforced polyamide manufactured by selective laser sintering*, Additive Manufacturing, Volume 9, January 2016.
- [20] **Pengfei, Z., Guoqiang, L.**, *Advances in healing-on-demand polymers and polymer composites*, Progress in Polymer Science, Volume 57, June 2016, Pages 32–63 ISBN: 978-0-12-803581-8.04104-7, 2016.
- [21] **Mc, Adams, L.V., Gannon, J.A.**, *Encyclopedia of polymer science and engineering*, Vol. 6. New York: Wiley–Interscience, pag: 322–348, 1986.
- [22] **Swolfs, Y., Gorbatikh, L., Verpoest, I.**, *Fibre hybridisation in polymer composites: A review*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 67, December, 2014.
- [23] **Hao, B., Ma, Q., Yang, S., Mäder, E., Ma, P.C.**, *Comparative study on monitoring structural damage in fiber-reinforced polymers using glass fibers with carbon nanotubes and graphene coating*, Composites Science and Technology, Volume 129, June, 2016.
- [24] **Ștefănescu F., Neagu G., Mihai A.**, *Materialele viitorului se fabrică azi. Materiale compozite*, Ed. Didactică și Pedagogică R.A., București, 1996.
- [25] **Campbell, F.C.**, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, 2004.
- [26] **Bao, H., Liu, G.**, *Progressive failure analysis on scaled open-hole tensile composite laminates*, Composite Structures, Volume 150, 15 August, 2016.

-
- [27] **Messler, R., W.**, *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*, Ed. Butterworth-Heinemann, UK, 2004.
- [28] **Frunză G., Spînu S.**, *Fundamentele teoriei plasticității. Aplicații în mecanica contactului elastoplastic*, Ed. Universității "Ștefan cel Mare", Suceava, 2010.
- [29] **Hull, D., Clyne, T.W.**, *An Introduction to Composite Materials*, Second Edition, ISBN 0-521-38190-8, 1996.
- [30] **Rothon, R., N.**, *Particulate-Filled Polymer Composites*, Ed., Rapra Technology Limited, 2003.
- [31] **Brandrup, J., Immergut, E.H., Grulke, E.A.**, *Polymer Handbook 4th Edition*, 1998.
- [32] **Huang, B., Heung, S.K., Wang, J., Du, J., Guo, Y.**, *Time-dependent stress variations in symmetrically viscoelastic composite laminates under uniaxial tensile load*, *Composite Structures*, Volume 142, Pages 278–285, 10 May 2016.
- [33] **Long, A.C.**, *Design and Manufacture of Textile Composites*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, ISBN-13: 978-1-85573-744-0, 2005.
- [34] **Assie, A.E., Kabeel, A.M., Mahmoud, F.F.**, *Optimum design of laminated composite plates under dynamic excitation*, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 36, Issue 2, Pages 668–682, February 2012.
- [35] **Curtu, I., Stanciu, Anca-Elena**, *Determinarea caracteristicilor mecanice ale epruvetelor realizate din material compozit de tip mat&roving*, *Buletinul AGIR nr. 1*, pp. 76-81, ianuarie-martie, 2011.
- [36] **Swolfs, Y., Meerten, Y., Hine, P., Ward, Y., Verpoest, I., Gorbatikh, Larissa**, *Introducing ductility in hybrid carbon fibre/self-reinforced composites through control of the damage mechanisms*, *Composite Structures*, Volume 131, Pages 259–265, 1 November 2015.
- [37] **Adams, F. A., Carlsson, L. A., Pipes, R. B.**, *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, Third Edition, CRC Press LLC, ISBN 1-58716-100-1, 2003.
- [38] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01635545/document>
- [39] **Chawla, K. K.**, *Fibrous Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0-521-57079-4, 1998.
- [40] **Hubca G., Tomescu, M., Novac, O.A., Iovu, H., Roșca, D., Ivănuș G.**, *Materiale compozite*, Ed. Tehnică, București, 1999.
- [41] **Kalamkarov, A.L., Kolpakov, A.G.**, *Analysis, design and optimization of composite structures*. Vol. 1. New York: Wiley, 1997.
- [42] **Reddy, Junuthula N.**, *A simple higher-order theory for laminated composite plates*, *Journal of applied mechanics* 51.4 (1984): 745-752.
- [43] **Miracle D.B., Donaldson S.L.**, *ASM Handbook, Volume 21 - Composites*, ASM International, ISBN 0-87170-703-9, 2001.
- [44] **Cîrciumaru, A.**, *Proiectarea, formarea și caracterizarea materialelor compozite cu matrice polimerică (Note de curs)*, Ed. Europlus, Galați, ISBN:978-606-628-060-0, 2013.
- [45] **Barbero, E. J.**, *Introduction to composite materials design*, CRC press, 2010.
- [46] **Miravete, A.**, ed. *3-D textile reinforcements in composite materials*, Woodhead Publishing, 1999.
- [47] **Khayal, O.M.S.**, *Literature Review on Imperfection of Composite Laminated Plates*, *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, Available online 1 February 2017, In Press, Accepted Manuscript — Note to users.
- [48] **Baker, A., Dutton, S., Kelly, D.**, *Composite Materials for Aircraft Structures*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia, USA, ISBN 1-56347-540-5, 2004.
- [49] **Chowdhury, N.M., Chiu, W.K., Wang, J., Chang, P.**, *Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures*, *Composites Part B: Engineering*, Volumes 91 - 100, 2016.
- [50] **Swolfs, Y.**, *Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 59, 2014.
- [51] **Cîrciumaru A.**, *Caracterizarea și testarea materialelor compozite cu matrice polimerică (ghid pentru lucrări practice)*, Editura Europlus, ISBN 978-606-628-058-7, Galați 2013.

-
- [52] **Deborah, D.**, *Composite Materials: Science and Applications*, Second Edition, Elsevier, ISBN 978-1-84882-830-8, 2010.
- [53] **Tripa, P.**, *Rezistența materialelor*, Editura MIRTON, Timișoara, 2001.
- [54] **Kenneth, B.G., Budinski, M.K.**, *Engineering materials*, Nature Vol. 25, 2009.
- [55] **Ratner, S., Pegoretti, A., Migliaresi, C., Weinberg, A., Marom, G.**, *Relaxation processes and fatigue behavior of crosslinked UHMWPE fiber compacts*, Composites Science and Technology, Volume 65, Issue 1, Pages 87–94, January 2005.
- [56] **Zafer, G., Haftka, R.T., Hajela, P.**, *Design and optimization of laminated composite materials*. John Wiley & Sons, 1999.
- [57] **Salekeen, S., Jones, D.L.**, *Fatigue response of thick section fiberglass/epoxy composites*, Composite Structures, Volume 79, Issue 1, June 2007.
- [58] **Kostopoulos, V., Kotrotsos, A., Tsantalis, S., Tsokanas, P., Loutas, T., Bosman, A.W.**, *Toughening and healing of continuous fibre reinforced composites by supramolecular polymers*, Composites Science and Technology, Vol. 128, 2016.
- [59] **Jihane, A., François, B.**, *Damage accumulation in a carbon fiber fabric reinforced cyanate ester composite subjected to mechanical loading and thermal cycling*, Composites Part B: Engineering, Vol. 90, 2016.
- [60] **Kakei, A., Epaarachchi, J.A., Mainul, I., Leng, J., Rajic, N.**, *Detection and characterisation of delamination damage propagation in Woven Glass Fibre Reinforced Polymer Composite using thermoelastic response mapping*, Composite Structures, Vol. 153, 2016.
- [61] **Bria, V.**, *Contribuții la studiul proprietăților mecanice ale materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică aditivată cu amidon (teză de doctorat)*, Galați, 2012.
- [62] **Bencomo-Cisneros, J.A., Tejada-Ochoa, A., García-Estrada, J.A., Herrera-Ramírez, C.A., Hurtado-Macías, A., Martínez-Sánchez, R., Herrera-Ramírez, J.M.**, *Characterization of Kevlar-29 fibers by tensile tests and nanoindentation*, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 536, 2012.
- [63] **Mishra, S.**, *Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites*, Composites Science and Technology, Vol. 63, 2003.
- [64] **Calame, J. P.**, *A dielectric mixing law for porous ceramics based on fractal boundaries*, Journal of applied physics, Vol. 80, 1996.
- [65] **Campo, M. A.**, *Frequency-dependent electrical mixing law behavior in spherical particle composites*, Journal of electroceramics, Vol.9, 2002.
- [66] **Monteiro, S.N., Milanezi, T.L., Louro, L.H., Lima Jr, E.P., Braga, F.O., Gomes, A.V., Drelich, J.W.**, *Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor*, Materials & Design, Vol.96, 2016.
- [67] **Debdatta Ratna**, *Handbook of Thermoset Resins*, ISBN: 978-1-84735-410-5, 2009.
- [68] **Vinson, J.R., Sierakowski, R.L.**, *The behavior of structures composed of composite materials*. Vol. 5. Springer Science & Business Media, 2012.
- [69] **Bin, Y., Zhenqing, W., Limin, Z., Jifeng, Z., Wenyan, L.**, *Experimental and numerical investigation of interply hybrid composites based on woven fabrics and PCBT resin subjected to low-velocity impact*, Composite Structures, Vol. 132, 2015.
- [70] **Mallick, P. K.**, *Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [71] **Gaudemaris, G.D., Rabilloud, G., Sillion, B.**, *Process for preparing polyimidazole resins and use thereof in forming laminates*, U.S. Patent No. 3,476,590. 4 Nov. 1969.
- [72] **Shyha, I.**, *Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites*, Journal of materials processing technology, Vol.210, 2010.
- [73] **Naik, N. K., Meduri, S.**, *Polymer-matrix composites subjected to low-velocity impact: effect of laminate configuration*, Composites science and technology, Vol.61, 2001.

- [74] **Karama, M., Afaq, K.S., Mistou, S.**, *Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity*, International Journal of solids and structures, Vol. 40, 2003.
- [75] **Boyce, J. S., Roland R. W. Jr, Bullock, D.**, *Composite structure reinforcement*, U.S. Patent No. 4,808,461. 28 Feb. 1989.
- [76] **Fallahi, A., Rajabi, L., Taromi, F.A.**, *DSC Analysis of Thermosetting Polyimides Based on Three Bismaleimide Resin Eutectic Mixtures*, Iranian Polymer Journal, Vol. 20, pag. 161-171, 2011.
- [77] **Warfield, R.W., Petree, M.C., Donovan, P.**, *The specific heat of thermosetting polymers*, Navord Report 6255, White Oak, Maryland, 1959.
- [78] **Bilyeu, B., Brostow, W., Menard, K.P.**, *Epoxy thermosets and their applications. II. Thermal analysis*, Journal of Materials Education, Vol. 22, pag. 107-129, 2000.
- [79] **Hill, J.O.**, *Better Thermal Analysis and Calorimetry*, 3rd Edition, CPC Reprographics, Portsmouth, U. K. 1991.
- [80] **Harding, J., Welsh, L. Mo.**, *A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain*, Journal of Materials Science, Vol. 18, 1983.
- [81] **Richardson, M. O. W., Wisheart, M.J.**, *Review of low-velocity impact properties of composite materials*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 27, 1996.
- [82] **Asmani, M.**, *Influence of porosity on Young's modulus and Poisson's ratio in alumina ceramics*, Journal of the European ceramic society, Vol.21, 2001.
- [83] **Aboudi, J.**, *Mechanics of composite materials: a unified micromechanical approach*. Vol. 29. Elsevier, 2013.
- [84] **Agarwal, B.D., Lawrence J. B., Chandrashekhara, K.**, *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, 2017.
- [85] **Soden, P. D., Hinton, M. J., Kaddour, A. S.**, *Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates*, Composites Science and Technology, Vol. 58, 1998.
- [86] https://ro.wikipedia.org/wiki/Rezisten%C8%9B%C4%83_la_oboseal%C4%83.
- [87] **Petit, P. H., Waddoups, M. E.**, *A method of predicting the nonlinear behavior of laminated composites*, Journal of Composite Materials, Vol. 3, 1969.
- [88] **Talreja, Ramesh**, *Fatigue of composite materials*. Technomic, 1987.