

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**  
**Școala doctorală de inginerie mecanică**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL SOLICITĂRILOR LA IMPACT  
ALE COMPOZITELOR CU MATRICE EPOXIDICĂ ARMATE  
CU ȚESĂTURI**

**CONTRIBUTIONS TO STUDY OF FABRIC REINFORCED  
EPOXY MATRIX COMPOSITES SUBJECT OF IMPACT  
LOADINGS**

**Conducător științific:**

**Prof. Dr. Ing. Iulian Gabriel BÎRSAN**

**Doctorand:**

**Ing. Marina SCHIȚANU (BUNEA)**

**Seria I 6: Inginerie mecanică Nr. 27**

**GALAȚI**

**2015**

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**  
**Școala doctorală de inginerie mecanică**



**CONTRIBUȚII LA STUDIUL SOLICITĂRILOR LA IMPACT  
ALE COMPOZITELOR CU MATRICE EPOXIDICĂ ARMATE  
CU ȚESĂTURI**

**CONTRIBUTIONS TO STUDY OF FABRIC REINFORCED  
EPOXY MATRIX COMPOSITES SUBJECT OF IMPACT  
LOADINGS**

**Conducător științific:**

**Prof. Dr. Ing. Iulian-Gabriel BÎRSAN**

**Doctorand:**

**Ing. Marina SCHIȚANU (BUNEA)**

**Președinte:**

Prof. univ. dr. ing. Gabriel ANDREI

**Referenți oficiali:**

Prof. univ. dr. ing. Anton HADĂR

Prof. univ. dr. ing. Ioan PĂRĂUȘANU

Conf. univ. dr. fiz. Adrian CÎRCIUMARU

**Seria I 6: Inginerie mecanică Nr. 27**

**GALAȚI**

**2015**

Seriile tezelor de doctorat sustinute 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**

**ROMÂNIA**  
**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE**  
**UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**



*20729/15.06.2015*

**C ă t r e**

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați vă face cunoscut că, în data de **02.07.2015**, ora **17.00**, în **sala D 12 a Facultății de Inginerie**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: **„CONTRIBUȚII LA STUDIUL SOLICITĂRILOR LA IMPACT ALE COMPOZITELOR CU MATRICE EPOXIDICĂ ARMATE CU ȚESĂTURI”**, elaborată de doamna/domnul **SCHIȚANU MARINA (BUNEA)**, în vederea conferirii titlului științific de doctor în domeniul de doctorat **Inginerie mecanică**.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>1. Președinte</b>             | <b>Prof. dr. ing. Gabriel ANDREI</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați                 |
| <b>2. Conducător de doctorat</b> | <b>Prof. dr. ing. Iulian-Gabriel BÎRSAN</b><br>Rector - Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați |
| <b>3. Referent oficial</b>       | <b>Prof. dr. ing. Anton HADĂR</b><br>Universitatea POLITEHNICA din București                      |
| <b>4. Referent oficial</b>       | <b>Prof. dr. ing. Ioan PĂRĂUȘANU</b><br>Universitatea POLITEHNICA din București                   |
| <b>5. Referent oficial</b>       | <b>Conf. dr. fiz. Adrian CÎRCIUMARU</b><br>Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați              |

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat, și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa universității, str. Domnească nr. 47, 800008 Galați, Fax 0236 / 461353, e-mail rectorat@ugal.ro.

**Rector,**

Prof. dr. ing. **Iulian Gabriel BÎRSAN**



# Cuprins

<b>Cuprins</b> .....	<b>5</b>
<b>Introducere</b> .....	<b>7</b>
<b>Capitolul 1.</b> .....	<b>11</b>
<b>Stadiul actual al cercetării comportamentului materialelor compozite supuse la sollicitări de impact.</b> .....	<b>11</b>
1.1. Generalități .....	11
1.3. Sollicitări de impact cu masă mare și timp lung.....	16
<b>Capitolul 2.</b> .....	<b>20</b>
<b>Obiectivele studiului</b> .....	<b>20</b>
<b>Capitolul 3.</b> .....	<b>21</b>
<b>Formarea materialelor compozite</b> .....	<b>21</b>
3.1. Pregătirea țesăturilor.....	21
3.2. Rășina epoxidică utilizată.....	22
3.5. Formarea materialelor.....	24
<b>Capitolul 4.</b> .....	<b>32</b>
<b>Analiza comportamentului la impact al compozitelor armate cu țesături și matrice epoxidică.</b> .....	<b>32</b>
4.1. Metoda experimentală de determinare a caracteristicilor la impact a materialelor compozite. ....	32
4.2. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură omogenă supuse la sollicitări de impact cu energia de 90J.....	34
4.3. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0° supuse la sollicitări de impact cu energiile de 45 J și 90 J. ....	44
4.4. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la sollicitări de impact cu energia de 45J și 90J.....	46
4.5. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA supuse la sollicitări de impact cu energia de 90J.....	50
4.6. Concluzii.....	52
<b>Capitolul 5</b> .....	<b>54</b>
<b>Analiza proprietăților termomecanice ale materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică.</b> .....	<b>54</b>
5.1. Metoda de determinare a coeficientului de dilatare liniară. ....	54
5.2. Analiza coeficientului de dilatare liniară al materialelor compozite formate. ....	54

5.3. Concluzii.....	57
<b>Capitolul 6. ....</b>	<b>59</b>
<b>Analiza conductivității electrice a materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică. ....</b>	<b>59</b>
6.1. Metoda experimentală de determinare a conductivității electrice a materialelor compozite. ....	59
6.2. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură omogenă. ....	59
6.3. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0°. ....	60
6.4. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri. ....	61
6.5. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA. ....	62
6.6. Concluzii.....	63
<b>Capitolul 7. ....</b>	<b>65</b>
<b>Concluzii finale și direcții de cercetare .....</b>	<b>65</b>
<b>Referințe bibliografice.....</b>	<b>72</b>
<b>Activitate științifică.....</b>	<b>77</b>
<b>Conferințe .....</b>	<b>77</b>
<b>Publicații .....</b>	<b>77</b>

## Introducere

Materialele compozite sunt aprofundat studiate de oamenii de știință în ultimele decenii datorită proprietăților lor speciale și, în general, se urmărește înlocuirea, treptată, a materialele metalice cu aceste compozite, deoarece acestea sunt mai ușoare, sunt rezistente la coroziune și la diverși agenți chimici, au durată de exploatare mai mare, sunt ușor de reparat și ușor de înlocuit datorită costurilor reduse etc. Proprietățile mecanice, electromagnetice și termice ale materialelor compozite pot fi proiectate în funcție de obiectivele urmărite, deoarece proprietățile lor depind de tipurile de armătură, de natura rășinii, de tipurile de aditivi, de calitatea interfețelor matrice-armătură și matrice-aditiv, de orientarea fibrelor, de dimensiunile pieselor care urmează a fi realizate, etc.

Compozitele pot fi armate cu fibre scurte, fibre lungi, fibre continue și/sau țesături pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, fiindcă fibrele preiau o mare parte din solicitări măbind astfel rezistența acestora. Cel mai des utilizate pentru ranforsarea materialelor compozite sunt fibrele minerale (sticlă, carbon, grafit, bor, metalice și ceramice) și organice sintetice (aramide și zylon):

Pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale compozitelor, de obicei, acestea sunt armate cu țesături bidirecționale, care sunt formate din fibre în direcția urzelii și în direcția bătaii aranjate perpendicular. Țesăturile plane reprezintă o alternanță simplă a fibrelor, astfel încât fibrele urzeală trec succesiv deasupra și dedesubtul fiecărei fibră bătaie și invers, atribuind stabilitate fibrelor, dar draping slab. Acest tip de țesătură din cauza nivelului ridicat de ondulare ale fibrelor au proprietăți mecanice mai mici comparativ cu celelalte tipuri de țesături descrise mai jos, dar rezistență mai bună la impact.

Țesăturile hibride (carbon-aramidă, carbon-sticlă și alte tipuri) sunt realizate cu scopul de a îmbunătăți unele proprietăți mecanice, electrice și/sau termice conform obiectivelor propuse, dar având în considerație că pot fi afectate alte proprietăți. Cunoscând proprietățile fiecărei țesături în parte și proprietățile pulberilor utilizate în compoziția matricelor se poate manipula crearea noilor materiale compozite hibride

armate cu diferite tipuri de țesături, cu orientări ale fibrelor sub unghiuri diferite, diverse matrici aditivate, având proprietățile conform scopurilor urmărite. Pentru obținerea materialelor compozite polimerice cu proprietăți electromagnetice ridicate, țesăturile de sticlă sau aramidice pot fi modificate, prin adaugarea firelor de cupru și carbon, iar în matrici putem utiliza ca aditivi nanotuburi de carbon, ferită, negru de fum, grafit, pentru obținerea materialelor cu proprietati dielectrice, se pot utiliza țesături aramidice sau de sticlă și matrici epoxidice neaditivate sau aditivate cu amidon de porumb sau de cartof, cu argilă cosmetică și/sau talc, care oferă distribuție uniformă a aditivilor în compoziția matricilor și evitarea sedimentării.

În construcția avioanelor militare compozitele sunt utilizate și pentru formarea elementelor secundare ale structurilor primare, ca carcasa interioară, uși, scaune, rezervoare auxiliare, podea, etc. și în comparație cu avioanele comerciale cele militare utilizează în cantitate mai mare compozitele armate cu țesătură aramidică. În ceea ce privește elicopterele, compozitele CFRP și GFRP sunt utilizate în construcția carcasei și paletelor. Utilizarea compozitelor în construcția paletelor au mare importanță pentru controlul vibrațiilor acestora. Pentru construcția navelor spațiale se utilizează materialele compozite armate cu fibre de carbon și de bor și de tip sandwich a căror straturi exterioare prezintă CFRP, iar miezul din fagure de aluminiu. Utilizarea compozitelor în acest domeniu este foarte important pentru ca dimensiunile structurii sa fie stabile la variația foarte mare de temperatură.

Din cauza că materialele armate cu fibre reprezintă materiale anizotrope, proprietățile acestora încă nu sunt cunoscute foarte bine. Pentru a înțelege comportamentul materialelor compozite polimerice la solicitări și pentru a determina caracteristicile acestora, trebuie să fie supuse la solicitări de încovoiere, tracțiune, compresiune, abraziune, etc. și testate electric și termic atât perpendicular pe suprafață (flatwise) cât și paralel cu aceasta în ambele direcții (edgewise).

Scopul acestui studiu a fost de a forma materiale compozite polimerice hibride armate cu țesături și matrice epoxidică aditivată cu rezistență ridicată la solicitări de impact cu viteză ridicată, obiectivele urmărite fiind determinarea influenței a tipurilor de țesătură utilizate, a hibridizării laminatelor, orientării fibrelor la diferite unghiuri,



---

aditivării matricelor asupra rezistenței la impact, capacității de absorbție a energiei și proprietăților mecanice, termice și electromagnetice a laminatelor, compararea caracteristicilor de rezistență la impact a laminatelor impregnate cu rășină epoxidică neaditivată, cu rășină aditivată de primul tip și rășina aditivată de tipul al doilea și analiza suprafețelor dererierate.

Pentru a înțelege comportamentul materialelor compozite hibride au fost elaborate laminate formate din fiecare țesătură utilizată în această cercetare aparte. De asemenea, au fost formate grupe din laminate cu arhitecturi identice, dar cu matrice diferite (epoxidică și aditivată). Aditivii utilizați în componența matricilor au fost: amidonul de cartof (distribuire uniformă a aditivilor în compoziția matricii și evitarea sedimentării), negru de fum și fibre scurte de carbon (proprietăți electrice), ferita (proprietăți magnetice), pulbere aramidică (proprietăți antișoc) și fibre de sticlă scurte (proprietăți mecanice și dielectrice). Astfel, pulberea aramidică în compoziția matricii aditivate va contribui la mărirea tenacității materialelor compozite, respectiv la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență la impact și a proprietăților mecanice, deoarece se știe că materialele tenace au rezistență foarte bună comparativ cu materialele fragile.

Testarea compozitelor la impact cu viteză mică constă lovirea plăcii cu o greutate prin cădere liberă sau cu ajutorul pendulului, iar testele balistice reprezintă împușcarea plăcilor cu proiectile sau alte tipuri de impactori ca pietre sau gheață. Mașina de tipul cădere greutate poate fi utilizată și pentru testarea plăcilor compozite la solicitări de impact cu viteză ridicată, stabilind cantitatea de energie de impact similară cu cea în cazul testelor balistice prin împușcare. În acest caz există două metode de testare la impact în funcție de energie: impact cu energie mică și impact cu energie ridicată. Energia mică de impact produce deteriorări interne caracterizate de ruperea fibrelor, delaminare și crăparea matricii, iar energia ridicată de impact provoacă penetrarea parțială sau totală, sau perforarea laminatelor.

Pentru determinarea comportamentului plăcilor la impact, se analizează caracteristicile acestora pe baza rezultatelor culese din baza de achiziționare a datelor a mașinii. Parametrii cheie care caracterizează materialele după impact sunt: forța de contact maximă, timpul de contact, deplasarea, energia de impact și cantitatea de

energie absorbită. Pe baza rezultatelor obținute în decursul cercetărilor, s-a determinat că creșterea energiei de impact provoacă creșterea forței de contact, a deplasărilor și a energiei absorbite. Energia de impact este absorbită de material prin deformații plastice și elastice, dar în cazul materialelor compozite polimerice deformațiile plastice sunt neînsemnate. Energia absorbită este determinată prin scăderea energiei totale din energia forței de vârf. Altă caracteristică importantă de impact este energia excesivă reținută de impactor și utilizată pentru ricoșarea acestuia de la suprafața plăcii și care reprezintă diferența dintre energia forței maxime și energia absorbită.

În această lucrare sunt prezentate rezultatele cercetărilor privind determinarea comportamentului materialelor compozite hibride armate cu țesături și impregnate cu rășină epoxidică aditivată la solicitări de impact, cât și proprietățile termice ale acestora, proprietățile electromagnetice și proprietățile mecanice la încovoiere și compresiune, comparativ cu materialele hibride cu arhitectură similară, dar impregnate cu rășină epoxidică și materiale compozite nehibridizate formate din fiecare tip de țesătură în parte.

## Capitolul 1.

# Stadiul actual al cercetării comportamentului materialelor compozite supuse la solicitări de impact.

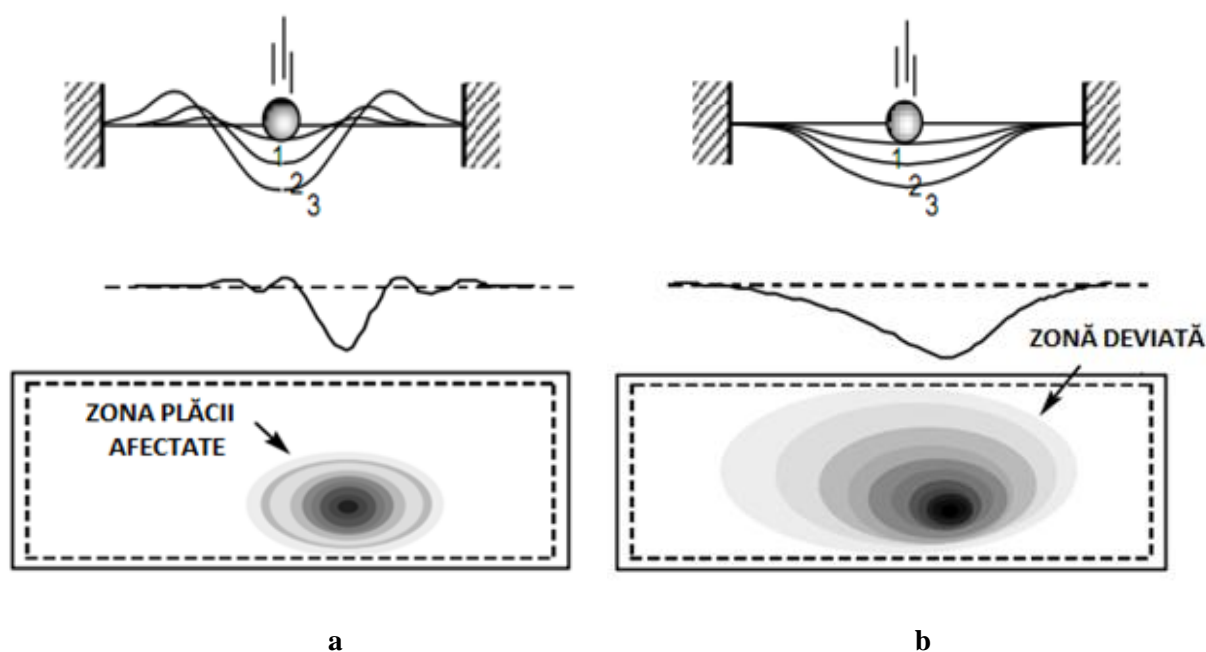
### 1.1. Generalități

În lumea de azi, materialele compozite au o deosebită importanță și o largă utilizare în toate domeniile: aeronautică, naval, auto, alimentar, construcții, utilaje casnice etc.

Comportamentul la impact este un aspect foarte important la proiectarea structurilor de aeronave. Fuzelajul trebuie să fie capabil să reziste la impact cu energie joasă și medie caracteristice ale utilizării curente, cum ar fi căderea instrumentelor, aterizări dure, grindina, manipularea în timpul întreținerii și încărcării, coliziuni cu păsări și impactul cu piatră la decolare/aterizare. Deteriorările interne ale materialelor compozite cauzate de acest tip de uzură și rupere sunt cunoscute ca daune abia vizibile cauzate de impact (BVID) [90], și reduc drastic integritatea structurală a componentei [1]. Materialele compozite armate cu fibre carbon, având densitate mai redusă, duritate și rigiditate mai ridicată decât compozitele de aluminiu, le înlocuiesc din ce în ce mai mult în aeronautică [66]. Deteriorarea cauzată de impact în metale este detectată cu ușurință sub forma unor deteriorări ce apar pe suprafața supusă la impact, însă deteriorarea compozitelor începe adesea pe suprafața nesupusă la impact sau sub forma unei delaminări interne [36].

Robin Olsson, analizând procesele de penetrare a materialelor compozite în urma impactului cu grindină și resturi de pe pistă în domeniul aeronautic [67], a determinat că dacă timpul de impact este scurt, masa de impact este mică, și invers, dacă timpul de impact este lung, masa de impact este mare (fig. 1.1). După cum se poate observa în fig. 1.1.a, în cazul impactului cu viteză ridicată, forța de vârf se manifestă înainte de deformarea de vârf și propagarea undelor elastice domină răspunsul structural. Solicitățile de impact cu viteză ridicată sunt dominate de unde deoarece durata forței de contact scade și placa nu poate răspunde suficient de repede

pentru a dezvolta un răspuns global. În cazul impactului cu viteză redusă, forța de vârf și deformarea apar în același timp pe durata încărcării. Cu o sollicitare de impact cu viteză redusă, influența condițiilor de frontieră asupra răspunsului structural global este semnificativ, deoarece există timp suficient pentru ca unda de impact să ajungă până la limită și să revină în locul de impact, formând echilibrul forță – deplasare (fig. 1.1.b) [67, 68, 70].



**Fig. 1.1.** Dependența masei de impact de timpul de impact: a) impact cu timp scurt și masă mică, b) impact cu timp lung și masă mare [67].

Există mai multe moduri de distingere a tipurilor de impact [70]:

- viteză redusă și viteză ridicată;
- viteza impactorului în raport cu viteza sunetului în direcția grosimii plăcii, provocând modul de cedare a materialului, care implică răspunsul dominat de undele ce trec prin grosimea plăcii;
  - în cazul tipului de impact drop weight, răspunsul este dominat de undele de propagare comun asociat tipului de impact cu viteză ridicată;
- tipul de răspuns la impact este determinat de rata masei dintre impactor și placă;
  - masă mică, masă intermediară și masă mare.

Tipul de răspuns la impact este determinat, mai degrabă, de raportul maselor

impactorului și plăcii decât viteza de impact, controlat de undele la încovoiere în cazul solicitărilor de impact cu impactor, având masa mai mică de o cincime decât masa zonei plăcii afectate de impact [70]. Dacă un material compozit este lovit de un impactor cu o masă suficient de mică, atunci după impact, undele de încovoiere se vor propaga de la punctul de impact pînă la marginile compozitului [35]. La solicitări de impact cu viteze diferite, tensiunea maximă în placă variază cu viteza de impact [16]. În ref. [45] au fost testate, la impact cu vitezi mici și mari, compozite hibride groase și, pentru ambele cazuri a fost utilizat același tip de impactor de 16 mm semisferic din oțel. În aplicațiile care implică solicitări de impact se utilizează și materiale compozite sandwich, care pot avea miez de spumă [9, 44, 45, 48, 92], fagure [41, 50], lemn [11, 91], policlorură de vinil (PVC) [47, 89], ceramică [87] și straturile exterioare fiind armate cu fibre și matrice polimerice. Abrate a studiat viteza necesară pentru pătrunderea unui proiectil în materialele compozite și sandwich testate la impact cu viteză balistică, modele pentru determinarea limitelor vitezei balistice și gradul de afectare a acestor materiale [2]. Ori Ishai și Clement Hiel [48] au testat la impact cu viteză mică și viteză mare un compozite sandwich cu straturile exterioare armate cu fibre de carbon și matrice epoxidică, iar miezul format din spumă. Schemele de testare la impact sunt reprezentate în figura 1.3. Rezistența reziduală a compozitelor a fost determinată prin analiza ruperii materialelor la încovoierea în patru puncte.

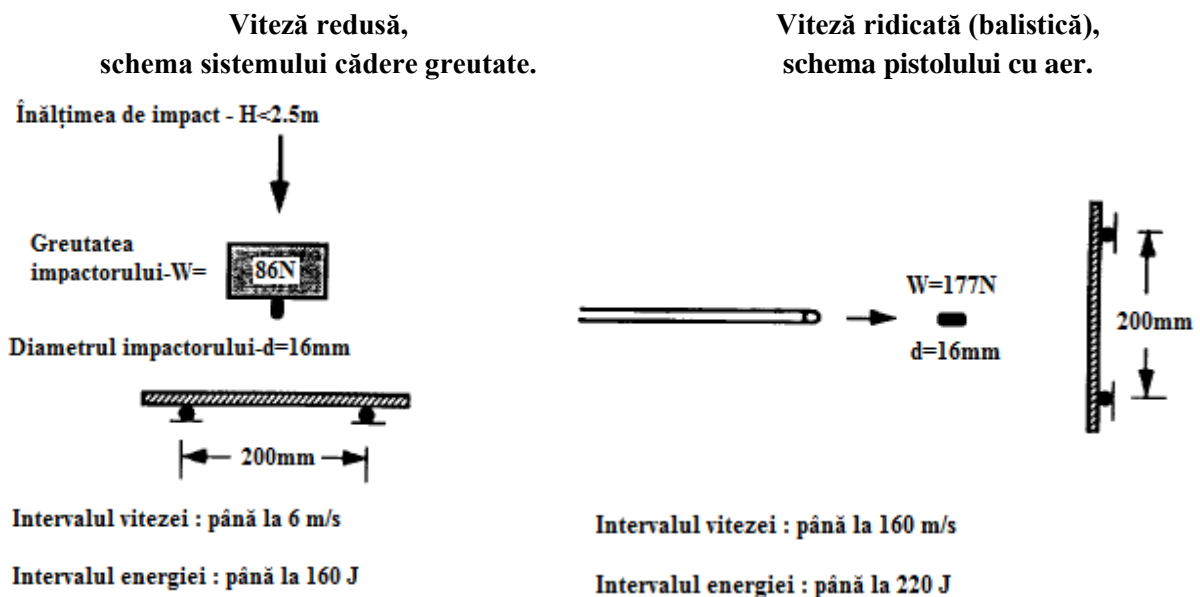


Fig. 1.3. Schemele celor două tipuri de teste de impact [48].

Daunele cauzate de impact reduc integritatea structurală și capacitatea de încărcare a structurii compozitului [91]. Cele mai multe studii privind daunele cauzate de impactul cu viteză ridicată au fost limitate la o singură solicitare de impact, cu foarte puțină atenție acordată efectului de deteriorare cumulat de la impacturi multiple. Fiind supus la mai multe solicitări de impact, un compozit sandwich prezintă deteriorări sinergice și cumulative provocând ruperea extinsă a fibrelor, fisurarea matricei și delaminare. Răspunsurile plăcilor la impact pot fi împărțite în două categorii: răspuns dominat de propagarea undelor (impact cu masă mică) și răspuns dominat de limite fixe (impact cu masă mare). Răspunsurile controlate de unde pot fi subdivizate în unde de dilatare/forfecare și unde de încovoiere [71]. Astfel, limitele regimului de impact sunt definite de răspunsurile plăcilor supuse la solicitări de impact [15], care depind de orientarea fibrelor [6], secvența straturilor, geometria compozitelor, forma impactorului și energia de impact [78].

Deterioararea materialelor compozite la impact provoacă reducerea rezistenței și rigidității structurii acestora [72]. În cazul solicitărilor de impact cu viteză mică sau viteză mare domină modul de cedare prin solicitare la tracțiune și modul de cedare prin forfecare [95]. Cedarea unui strat poate să nu conducă la cedarea laminatului, dacă celelalte straturi pot să redistribuie sarcina de încărcare din stratul care a cedat. În compozitele armate cu țesături, fisura delaminării atinge, în timpul propagării sale, regiunile adiacente ale matricei și ale fibrelor întrețesute și, ca rezultat, determina variații ale rezistenței [4].

Analiza suprafețelor deteriorate la impact poate fi efectuată prin: compresiune după impact [18, 39, 41], laser [51], termografic [37, 61], investigație optică [58, 59, 77], tomografică [75], radiografie [53], scanare cu ultrasunete C [53], etc. Metoda de scanare cu ultrasunete C este mai sigură în determinarea deteriorărilor interne decât metoda cu laser [51], acest rezultat fiind obținut în urma studiului deteriorărilor interne provocate de impact ale laminatelor armate cu fibre de sticlă și matrice polimerică. Extinderea delaminărilor interne poate fi văzută ca fiind mult mai mare decât deteriorarea vizibilă a suprafeței superioare prin metoda de analiză cu scanare cu ultrasunete C (fig. 1.5) [57]. Toate delaminările au fost observate nu numai în apropierea fisurilor matricei, ale suprafeței inferioare, dar, de asemenea, și în apropierea suprafeței superioare a laminatelor armate cu fibre de grafit unidirecționale

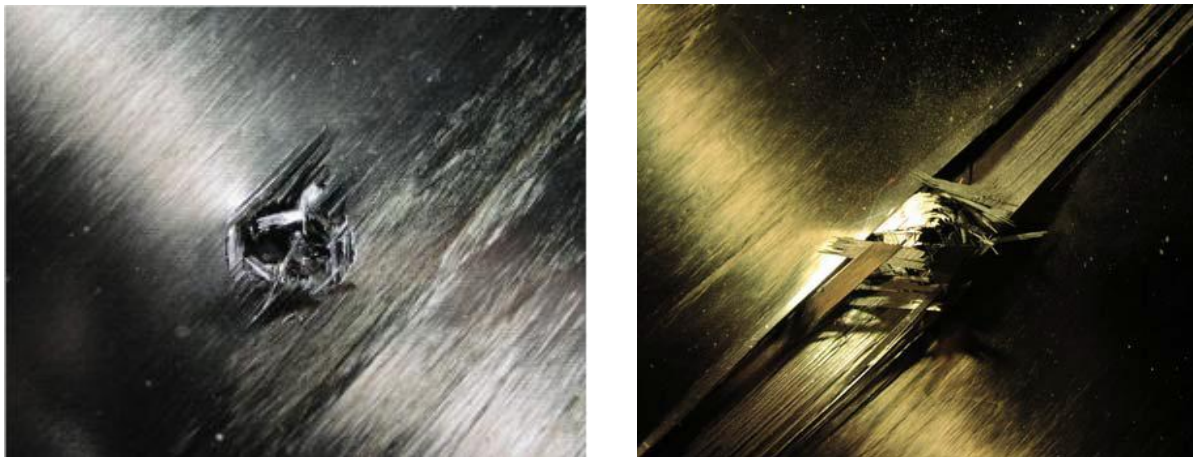
și matrice epoxidică [57].

R. Olsson [69] a studiat delaminarea laminatelor qvasi-izotropice armate cu fibre de carbon și matrice epoxidică, având grosimi de 2 și 4 mm supuse la impact cu masă mică și viteze de impact de la 20 m/s la 100 m/s.

În [37] testele balistice la impact au arătat că pentru aceeași masă a proiectilului limita vitezei balistice se mărește odată cu mărirea diametrului proiectilului. Dacă se păstrează același diametru al proiectilului, iar masa proiectilului crește, limita vitezei balistice scade. Dacă nu se modifică masa și diametrul proiectilului, iar grosimea plăcii se mărește, se mărește și limita vitezei balistice.

Modul în care cedează materialul și tipul deteriorării depind de masa, geometria și structura materialului, de viteza și energia proiectilului [20, 52]. În [79] au fost studiate relațiile fizice pentru stabilirea intercondiționărilor dintre caracteristicile vâsco-elastice și vâsco-plastice ale laminatelor supuse la impact cu viteze reduse, până la 200 m/s, și deformațiile instabile.

Gaura din suprafața de intrare a proiectilului este întotdeauna mai curată decât gaura din suprafața de ieșire (fig. 1.14) [60]. Partea de ieșire prezintă întotdeauna o exfoliere vizibilă, care apare, în mare parte, pe ultimile straturi ale laminatului și se extinde pe o distanță de câțiva centimetri, de la orificiul principal, în direcția de fibrele. Energia disipată este aproximativ constantă pentru fiecare grosime a plăcii în intervalul considerat de viteze. Energia disipată pe fiecare strat se mărește cu creșterea numărului de straturi.



**Fig. 1.14.** Deteriorarea la impact cu proiectil sferic: suprafața de intrare a proiectilului (stânga) și suprafața de ieșire a proiectilului (dreapta) [60].

Pentru îmbunătățirea performanței la impact a materialelor compozite se utilizează hibridizarea acestor compozite, deoarece prin hibridizare, o parte din energia proiectilului este transferată la componenta cu deformări ridicate, reducând cantitatea de energie a deteriorării compozitului de bază [29]. Astfel, Roger Ellis a utilizat hibridizarea compozitelor armate cu fibre de grafit cu fibre superelastice de nitinol (aliaj de nichel titan) numite SMA (Shape Memory Alloy), care erau formate din 56% nichel și 44% titan.

Complexitatea relativ ridicată a problemelor de impact este cauzată de numărul mare de parametri care intervin, cum ar fi viteza relativă a proiectilului și a plăcii, forma obiectelor, rigiditatea și masele relative, suprafața dependentă de timp a contactului, geometria condițiilor la limită și caracteristicile materialului [38]. Dificultățile cresc atunci când sunt implicate materiale compozite, și anume plăci armate cu fibre, din cauza ortotropiei, varietatea ridicată a modurilor de eșec și incertitudinile privind legile constitutive, numărul mare de date experimentale, care sunt consumatoare de timp și costisitoare. Descoperirile recente privind înțelegerea mecanismelor de deteriorare a laminatelor, oferă posibilitatea de a evita multe dintre testele experimentale prin utilizarea simulării computaționale, având în vedere că rezultatele numerice ar trebui folosite cu precauție și să fie certificate mereu de încercări experimentale.

În cazul solicitărilor de impact cu viteză ridicată cu jet de lichid, deteriorarea laminatului depinde atât de viteza și mărimea jetului cât și de unghiul de impact [63]. Acest tip de impact are aplicații industriale importante în mașinile de debitat cu jet de apă de înaltă presiune.

### **1.3. Solicitări de impact cu masă mare și timp lung**

Și la solicitări de impact cu energie redusă cu impactor de dimensiuni mici se pot deteriora semnificativ suprafețele supuse la impact. Aceste deteriorări se concretizează în fisuri ale matricei, delaminare și fracturi ale fibrelor, care pot reduce rezistența la compresiune și la forfecare ale laminatului valori mai mari de 60% [30, 40, 82], mai mare pentru unele laminate cu Barely Visible Impact Damage (BVID). Rezistența la impact depinde atât de proprietățile geometrice ale impactorului cât și de particularitățile plăcii [26, 55, 61, 73], iar masa impactorului joacă un rol determinant



în deteriorarea la impact a compozitelor polimerice. Efectul descrește cu creșterea energiei incidente [88].

Forma impactorului afectează mecanismul de cedare și capacitatea de disipare a energiei a plăcii. Zona deteriorată descrește cu creșterea mărimii impactorului pentru aceeași energie incidentă de impact. Impactorul conic prezintă penetrare locală rezultând în disiparea scăzută a energiei de impact. Impactorii plați și semisferici prezintă mecanisme de cedare și nivele similare de disipare a energiei, dar deteriorările interioare cauzate de impactorul plat sunt mai mici comparativ [73] cu cele produse de impactorul semisferic la aceleași nivele de viteză [33, 34].

Hibridizarea compozitelor prezintă o alternativă de îmbunătățire a proprietăților la impact și pentru formarea materialelor hibride se utilizează fibre cu modul ridicat/cost ridicat ca fibre de carbon sau bor și fibre cu modul redus/cost redus ca fibre de sticlă sau kevlar, pentru a asigura echilibrul rezistenței și rigidității, reducând greutatea și costul, îmbunătățind rezistența la oboseală, tenacitatea la fracturare și rezistența la impact [85].

Pentru testarea materialelor hibride la impact a fost utilizată mașina drop weight Instrop – Dynatup 9250 HV impactor semisferic de diametru 12.5 mm. Variația nivelului de energie depindea de variația înălțimii, păstrând constantă masa totală de impact 6.32 kg. Cu scopul de a examina răspunsul la impact atât al suprafeței armate cu fibre de sticlă cât și al suprafeței armate cu fibre de carbon, două tipuri de plăci compozite hibride au fost supuse la impact prin creșterea energiei de impact până la perforarea acestora (fig. 1.22).

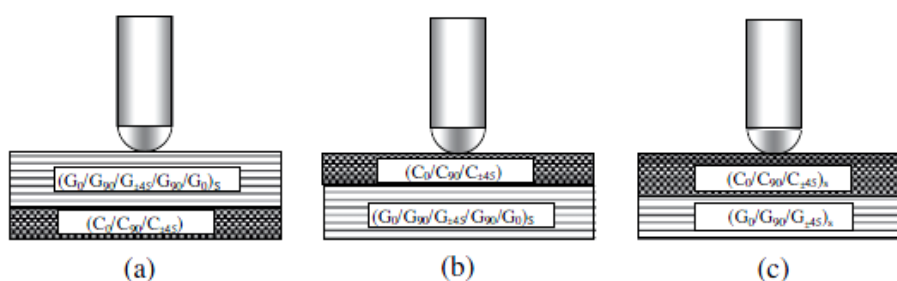


Fig. 1.22. Suprafețele supuse solicitărilor de impact ale laminatelor GC (a), CG (b) și CG1 (c) [83].

Conform rezultatelor obținute, capacitatea de absorbție a energiei a compozitului hibrid CG a fost mai mică decât cea a compozitului hibrid GC, respectiv

pragul de perforare al materialului hibrid CG a fost mai mare decât cel al materialului hibrid GC.

Ercan Sevkat și alții [86] au testat la impact patru tipuri de materiale compozite armate cu țesături simple din fibră de sticlă și cu țesături simple din fibră de grafit (fig. 1.24). Toate plăcile aveau grosimea aproximativ de 6.35 mm. Primul tip de compozit era format din 37 straturi din țesătură de sticlă și a fost numit GL (fig. 1.24a), iar al doilea tip de material compozit prezintă un compozit hibrid format din 34 straturi, ale cărui nouă straturi exterioare de fiecare parte erau armate cu țesătură din fibre de sticlă, iar miezul prezenta 18 straturi armate cu țesătură din fibre de grafit, numindu-se GL/GR/GL (Fig. 1.24b). Al treilea tip de material compozit GR/GL/GR, de asemenea, prezenta un laminat hibrid format din 32 de straturi, ale cărui opt straturi exterioare de fiecare parte erau armate cu țesătură din fibre de grafit, iar miezul a fost format din 16 straturi armate cu țesătură din fibră de sticlă (Fig. 1.24c). Cel de-al patrulea compozit GR a fost armat cu 28 straturi țesătură din fibre de grafit (Fig. 1.24d). Numărul de straturi pentru fiecare material variază datorită diferenței grosimilor țesăturilor din fibre de sticlă și fibre de grafit. Plăcile au fost testate la impact cu mașina drop weight Instrop-Dynatup 8520, al cărui impactor avea cap semisferic și diametru de 16 mm. Masa totală a impactorului a fost păstrată constantă cu 6.15 kg pe parcursul testelor. Pentru a determina caracteristicile la impact ale laminatelor au fost utilizate nivele de energie de 47 J, 60 J, 71 J și 122 J, respectiv vitezele de impact 3.9 m/s, 4.4 m/s, 4.8 m/s și 6.3 m/s.

Rezultatele obținute au arătat că materialul compozit GL a prezentat rezistența la impact cea mai ridicată, iar materialul compozit GR cea mai redusă (fig. 1.25). Plăcile hibride GL/GR/GL și GR/GL/GR au prezentat caracteristici la impact cu valori cuprinse între cele ale compozitelor GL și GR. Materialul compozit hibrid GL/GR/GL prezintă rezistență la solicitări de impact mai ridicată comparativ cu materialul compozit hibrid GR/GL/GR. Rezultă că procesul de hibridizare permite controlarea anumitor parametri de impact ca: forța de impact, energia absorbită și deteriorarea suprafețelor.

Procesul de inițiere a delaminărilor se poate bine observa prin reducerea rapidă a forței la o valoare de repaus datorită reducerii rigidității transversale a laminatului,

iar o fază de reîncărcare la o valoare de repaus a plăcii poate apărea dacă impactorul a stocat energie potențială reziduală suficientă [14, 18]. Pragul de inițiere a deteriorărilor în zona de impact poate fi determinat cu ajutorul curbelor forță-deplasare și forță-timp [84]. Deteriorarea la impact poate reduce semnificativ rezistența și stabilitatea structurii compozitelor [68], care apar prin fisurarea matricii, ce se extinde până la interfața a două lamine progresând ca delaminare. Extinderea delaminării va continua în funcție de cantitatea de energie necesară pentru fracturarea interfeței [46].

Energia de impact este absorbită de material prin deformații elastice, deformații plastice și prin crearea noilor suprafețe ca efect al fracturilor matricii [46]. În cazul materialelor compozite cu matrice termorigide deformațiile plastice sunt foarte mici sau nu există. Inițial energia este absorbită prin deformații elastice până la valoarea limită a energiei. La valoarea limită a energiei și după această valoare energia de impact este absorbită în continuare de deformațiile plastice (și, mai puțin de deformațiile elastice în zone depărtate de zona de impact) datorită apariției deformațiilor prin mecanisme de cedare.

## **Capitolul 2.**

### **Obiectivele studiului**

Luând în considerație rezultatele testelor de impact obținute de oamenii de știință în domeniul materialelor compozite armate cu țesături și matrice polimerică, posibilitatea de îmbunătățire a caracteristicilor la impact, a proprietăților termomecanice și a conductivității electrice este reprezentată utilizarea aditivilor în compoziția rășinii epoxidice de impregnare. Scopul studiului constă în formarea materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă, care să aibă proprietăți multifuncționale și, cel mai important, rezistență ridicată la impact. Obiectivele studiului propuse sunt următoarele:

1. Formarea materialelor compozite;
2. Testarea și determinarea caracteristicilor de impact, termomecanice și electrice ale materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică omogenă/stratificată.
3. Analiza și compararea caracteristicilor de impact, coeficienților de dilatare termică și a conductivității electrice ale materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică omogenă/stratificată.

## Capitolul 3.

### Formarea materialelor compozite

#### 3.1. Pregătirea țesăturilor

Pentru formarea materialelor au fost alese țesăturile bidirecționale cu împletitură simplă, deoarece oferă stabilitate structurală [43, 75, 81], asigurând rezistență mecanică în ambele direcții [7, 19, 27, 54] și rezistență la delaminare [12], prezentând avantaje considerabile în cazul rezistenței la impact [25].

Performanța la impact a fibrelor de carbon este redusă, dar au avantajul de a fi utilizate în construcții hibride [64], deoarece prezintă rigiditate ridicată, proprietăți mecanice excelente, conductivitate bună termică și electrică, dilatare termică negativă (pe direcție transversală) în intervale de temperatură scăzută, aderență foarte bună cu toate tipurile de matrice, rezistență chimică și la coroziune, dar în contact cu metalele sau aliajele metalice pot fi afectate de coroziune galvanică și sunt sensibile la șoc [21].

Țesăturile de sticlă prezintă rezistență ridicată la coroziune, bune proprietăți mecanice, proprietăți dielectrice, capacitate de absorbție a energiei de impact mai redusă în comparație cu țesătura aramidică și cost redus.

Fibrele de kevlar au o combinație unică de rezistență ridicată, modul ridicat, tenacitate și stabilitate termică [56], iar comportamentul nelinier la compresiune al țesăturii din fibre aramidice, combinat cu capacitatea de deformare ridicată sub tensiune reprezintă un avantaj important de utilizare a acestora în aplicații, în care este necesară rezistența la solicitări mecanice severe de contact sau penetrare [12]. Țesătura aramidică prezintă rezistență excelentă la impact și oboseală, dilatare termică redusă, rezistență excelentă la tracțiune, capacitate ridicată de absorbție a energiei, dar sunt sensibile la razele UV, capacitate de absorbție ridicată a umidității, rezistență redusă la compresiune și aderență redusă cu rășinile de impregnare. Fibrele aramidice mai prezintă rezistență la foc, aceasta fiind o proprietate importantă, deoarece performanța mecanică a compozitelor în foc se degradează [65].

Prin utilizarea diferitor tipuri de fibre într-o armătură rezultă o țesătură, care prezintă combinația avantajelor fiecărei fibre constituate și reducerea (într-o

oparecare măsură) a dezavantajelor [23].

Pentru formarea țesăturii hibride M a fost aleasă țesătura mixtă formată din fibre de carbon și fibre aramidice cu geometria  $2 \times 1$  în direcția urzelii (două fascicule de carbon în alternanță cu un fascicul aramidic) și  $1 \times 2$  în direcția bății (două fascicule aramidice în alternanță cu un fascicul de carbon).

În procesul de fabricație a țesăturilor, producătorul utilizează lubrifiant silan (hidrură de siliciu) pentru a ușura tehnologia de prelucrare, deoarece fibrele sunt instabile, micșorându-se aderența fibrelor la rășinile epoxidice, și din această cauză, țesăturile trebuie să fie tratate pentru înlăturarea lubrifiantului și mărirea aderenței țesăturilor, în special a țesăturii aramidice, la rășina epoxidică de impregnare, îmbunătățind calitatea interfazelor matrice - țesătură, prin curățarea de praf, micșorarea riscului de provocare a reacțiilor chimice pe suprafețele largi ale țesăturilor. Înainte de a fi tratată țesătura trebuie să fie montată astfel, încât să se păstreze stabilitatea structurală, deoarece se urmărește ca materialele care vor fi formate, să aibă fibrele distribuite regulat (fig. 3.2), iar tratarea țesăturilor cu rășină epoxidică oferă stabilitatea dimensională fibrelor țesăturilor și posibilitatea de utilizare mai eficientă a acestor tipuri de țesături în timpul decupării laminelor.

Calitatea interfazelor condiționează eficiența propagării sarcinilor de la matrice la fibre prin interfață, mecanismul fracturării și morfologia suprafețelor fracturate [22]. Un factor important care influențează energia de impact este rezistența interfezei matrice-fibră la forfecare [62], astfel din această cauză trebuie îmbunătățită calitatea interfezei matrice-fibră prin tratarea țesăturii [24].

### **3.2. Rășina epoxidică utilizată**

Funcțiile mecanice ale matricii sunt de a asigura legătura între fibre, de crea rigiditatea și coeziunea materialului și de a transmite armăturii efortul exercitat asupra structurii [80]. Sistemele de rășini dure sunt deosebit de importante pentru a fi utilizate în multe aplicații cu structuri compuse, deoarece acestea pot reduce semnificativ probabilitatea de eșec catastrofal provocate de daunele de impact, comparativ cu rășinile fragile [74]. Rășinile epoxidice au proprietăți mecanice și electrice superioare în comparație cu alte rășini și rezistență chimică și termică bună [28], dar având reticulare ridicată uneori suferă de fragilitate [76] și prezintă proprietăți reduse la

impact, care pot fi îmbunătățite prin armarea cu țesături. Pentru formarea materialelor a fost aleasă matricea polimerică epoxidică, datorită rezistenței chimice, rezistenței mecanice, aderenței ridicate și stabilității dimensionale, aceste avantaje contribuind la utilizarea rășinilor epoxidice pentru compozitele de performanță înaltă. Din categoria rășinilor epoxidice a fost utilizat sistemul bicomponent EIPHEN: componenta de bază EIPHEN RE 4020 (bisfenol A) și întăritor EIPHEN DE 4020 (amină alifatică modificată). Această rășină se polimerizează la temperatura camerei 14 zile și are proprietăți ridicate de aderență cu toate tipurile de fibre și aditivi. Deoarece matricea, țesăturile și aditivii reprezintă medii cu densități diferite, poate fi redusă aderența acestora în dependență de compatibilitatea chimică și poate afecta calitatea interfazelor matrice – fibră și matrice – aditiv.

### 3.3. Aditivii utilizați

Rezistența și rigiditatea materialelor compozite sunt foarte mult influențate de materialele de aditivare. În cele mai multe cazuri se observă reducerea deformației finale printr-o mică scădere a rezistenței la tracțiune și a rezistenței la impact, în funcție de adeziunea materialelor de umplură cu matricea polimerică contribuind la calitatea interfeței aditiv-matrice, când tensiunea ridicată la forfecare nu permite înmuierea interfeței oferind posibilitatea de inițiere a fisurilor, excepție făcând negrul de fum, care contribuie la îmbunătățirea rezistenței având în vedere efectul negrului de fum asupra cauciucului [10, 49, 93] și în special are un efect enorm asupra rezistenței la abraziune [93]. Negrul de fum furnizează conductivitate electrică și termică materialelor compozite și reduce sau elimină efectul de fotodegradare după expunerea la lumina soarelui sau la radiație UV, întrucât mulți polimeri sunt susceptibili la acest efect. Pentru fiecare aplicație trebuie să se selecteze cu atenție calitatea și producătorul pentru a obține performanța optimă [75].

Alt aditiv utilizat la formarea materialelor a fost amidonul de cartof, care are capacitatea de a forma o rețea proprie atunci când este dispersat într-un lichid, fiind posibil ca acesta să creeze propria rețea în interiorul rețelei polimerului, astfel asigurând mediul de dispersie al celorlalte pulberi [17]. Granulele amidonului de cartof

prezintă o distribuție a dimensiunilor unimodale [96] și având proprietatea de a se umfla în lichide oferă posibilitatea de evitare a sedimentării.

Pentru îmbunătățirea performanței la solicitările de impact s-a utilizat pulberea aramidică Twaron Pentru modificarea proprietăților magnetice materialelor compozite se utilizează ferita [75], în cazul materialelor compozite formate a fost folosită ferita barică.

Influența fibrelor scurte asupra rezistenței la impact variază: uneori este pozitivă, uneori negativă. Având în vedere polimerii cu rezistență la impact scăzută și polimerii duri la temperaturi joase proprietățile acestora pot fi îmbunătățite prin adăugarea fibrelor scurte, dar poate fi invers dacă pentru polimerii duri se vor utiliza adaosuri din fibre de sticlă (în funcție de cantitate acestea pot fi chiar distructive) [93], care oferă o rigiditate sporită și stabilitate dimensională a materialelor plastice, dar rezistență minimă [94]. Fibrele scurte sunt utilizate nu numai pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, dar și pentru îmbunătățirea proprietăților electrice [93]. Este de așteptat, de asemenea, ca în cazul adăugării fibrelor scurte de sticlă să crească rezistența la uzură prin frecare sau rezistența la uzură prin abraziune.

### **3.5. Formarea materialelor**

După tratarea țesăturilor și stabilirea arhitecturilor materialelor compozite, din țesături au fost decupate lamine cu dimensiunile 201×287 mm și orientarea fibrelor la 0°, -15°, 15°, -30°, 30° și 45° în funcție de configurația straturilor.

Materialele compozite au fost formate prin metoda wet lay-up, deoarece permite controlarea raportului fibră-matrice, adăugarea mai eficientă de straturi noi în laminat [7] și asigură calitate înaltă a probelor cu defecte minime [42], iar producția automatizată folosind autoclave mari este încă un nou proces și ca urmare apar probleme de calitate [90]. Pentru formarea materialelor au fost utilizate două plăci de sticlă cu dimensiuni de 250×305 mm și garnitură de etanșare de cauciuc sintetic alveolar EPDM (etilenă-propilenă-dienă modificată) cu profil D 8×10 mm. Pentru scoaterea mai eficientă a compozitelor polimerice din matriță, între plăcile de sticlă și material au fost utilizate folii de polipropilenă (rășina epoxidică nu aderă la suprafața acestora). În cazul materialelor cu matrice stratificată a fost pregătit amestecul de



aditivi și apoi acesta a fost dispersat în amestecul pre-polimeric. Laminele au fost aranjate în matrită strat cu strat prin îmbibarea și înglobarea directă a acestora în matrice. După introducerea tuturor straturilor matrita a fost închisă, fixată cu cleme metalice și așezată în poziție verticală pentru a permite evacuarea gazelor și pentru a asigura calitatea structurii și suprafețelor materialelor formate. Surplusul de rășină a fost eliminat prin orificiile de 3 mm aflate în două capete opuse pe diagonală. De asemenea pentru analiza influenței aditivării rășinii epoxidice asupra coeficientului de dilatare termică și asupra conductivității electrice au fost formate și toate tipurile de matrice descrise mai jos în acest capitol utilizate la formarea laminatelor prin aceeași metodă, dar cu închiderea orificiilor de 3 mm.

Avantajul principal al laminatelor fiind libertatea aranjamentului fibrelor, pentru îndeplinirea obiectivelor studiului au fost formate 44 laminate, dintre care cinci laminate cu armătură și matrice omogenă, numite HCH, HKH, H1SH, H2SH și HDH (tabelul 3.13), sunt considerate materialele de bază în raport cu care se vor analiza proprietățile celorlalte laminate pentru a determina influența tipurilor de țesături utilizate, orientării fibrelor laminelor la diferite unghiuri, hibridizării laminatelor, și aditivării matricei epoxidice asupra performanței la impact. Toate laminatele au fost formate din 17 straturi, iar al nouălea strat (stratul median) din structura fiecărui laminat a fost format din țesătura hibridă M cu orientarea fibrelor din direcția bății la 90°.

În general, în funcție de armătură, au fost formate 12 materiale compozite cu armătură omogenă, dintre care patru materiale au orientarea fibrelor la 0°, două materiale au orientarea fibrelor la 90° și șase materiale au orientarea fibrelor la diferite unghiuri (tabelul 3.13) și 32 materiale cu armătură hibridă, dintre care 18 laminate hibride au orientarea fibrelor la 0° și restul laminatelor hibride au orientarea fibrelor la diferite unghiuri (tabelele 3.14 – 3.16).

În ceea ce privește tipul de matrice utilizat, din categoria materialelor compozite cu armătură omogenă, opt materiale compozite au fost formate cu rășină epoxidică, iar patru materiale compozite au fost realizate cu matrice stratificată MF (același tip de rășină epoxidică aditivată în mod diferit), iar din categoria materialelor compozite hibride 14 materiale au fost formate cu rășină epoxidică, 14 materiale au fost formate cu matrice stratificată MF (tabelele 3.14 și 3.15) și 4 cu matrice stratificată MA

(tabelul 3.16). În denumirea materialelor compozite formate ultima literă semnifică tipul de matrice utilizat, unde cu litera H a fost notată matricea epoxidică, cu litera F – matricea stratificată MF și cu litera A - matricea stratificată MA.

Materialele de bază au fost armate cu fiecare tip de țesătură și se consideră a avea armătură omogenă, fără a lua în considerație stratul din mijloc M, fiecare având orientarea fibrelor laminelor la 0°, cu excepția materialului HDH care are orientarea fibrelor din direcția bătăii la 90°. În compoziția matricei epoxidice aditivate MF1 a fost utilizată combinația din 10% pulbere de aramidică, 10% negru de fum și 10% amidon de cartof, toate în fracție volumică. În compoziția matricii epoxidice aditivate MF2 au fost utilizate 10% negru de fum, 10% ferită barică și 10% amidon de cartof, în fracții volumice.

**Tabelul 3.13.** Configurația straturilor ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

Straturi	Material							
	HCH	HKH	H1SH	H2SH	HDH, HDF	HC1H, HC1F	HK1H, HK1F	H1S1H, H1S1F
01	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K 0	1S 45
02	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 45	K 45	1S 30
03	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K 30	1S 15
04	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 30	K 15	1S -30
05	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 15	K -30	1S 45
06	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C -30	K -15	1S 30
07	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K 30	1S -15
08	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 30	K 45	1S 45
09	M 90	M 90	M 90	M 90	M 90	M 90	M 90	M 90
10	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C -30	K 45	1S 45
11	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K -30	1S 15
12	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 30	K 15	1S -30
13	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C -15	K 30	1S 45
14	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C -30	K -15	1S 30
15	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K -30	1S -15
16	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 45	K 45	1S -30
17	C 0	K 0	1S 0	2S 0	M 90	C 0	K 0	1S 45

Ca efect al formării laminatelor cu matrice heterogenă MF, straturile exterioare 1-5 și 13-17 sunt imersate în rășina epoxidică aditivată MF1, iar straturile din mijloc 6-12 sunt imersate în rășina epoxidică aditivată MF2. Din punct de vedere structural matricea globală este epoxidică adică, prin țesături și la nivelul interfeței dintre două

tipuri de matrice aditivă adiacente polimerizarea se face în urma aceluiași mecanism asigurând integritatea matricei la nivelul compozitului.

Pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice și a performanței la impact au fost formate laminate – simetrice și antisimetrice - cu orientarea fibrelor laminelor la diferite unghiuri, dar echilibrate. Pentru determinarea efectului orientării fibrelor la diferite unghiuri asupra caracteristicilor la impact au fost formate laminate cu armătură omogenă cu configurația straturilor prezentată în tabelul 3.13, ale căror proprietăți urmează a fi comparate cu cele ale materialelor compozite de bază, iar pentru a determina efectul aditivării matricei polimerice asupra caracteristicilor de impact a mai fost formată o grupă de laminate cu armătură omogenă și matrice heterogenă MF, având aceeași configurație a straturilor cu cea a materialelor cu matrice omogenă.

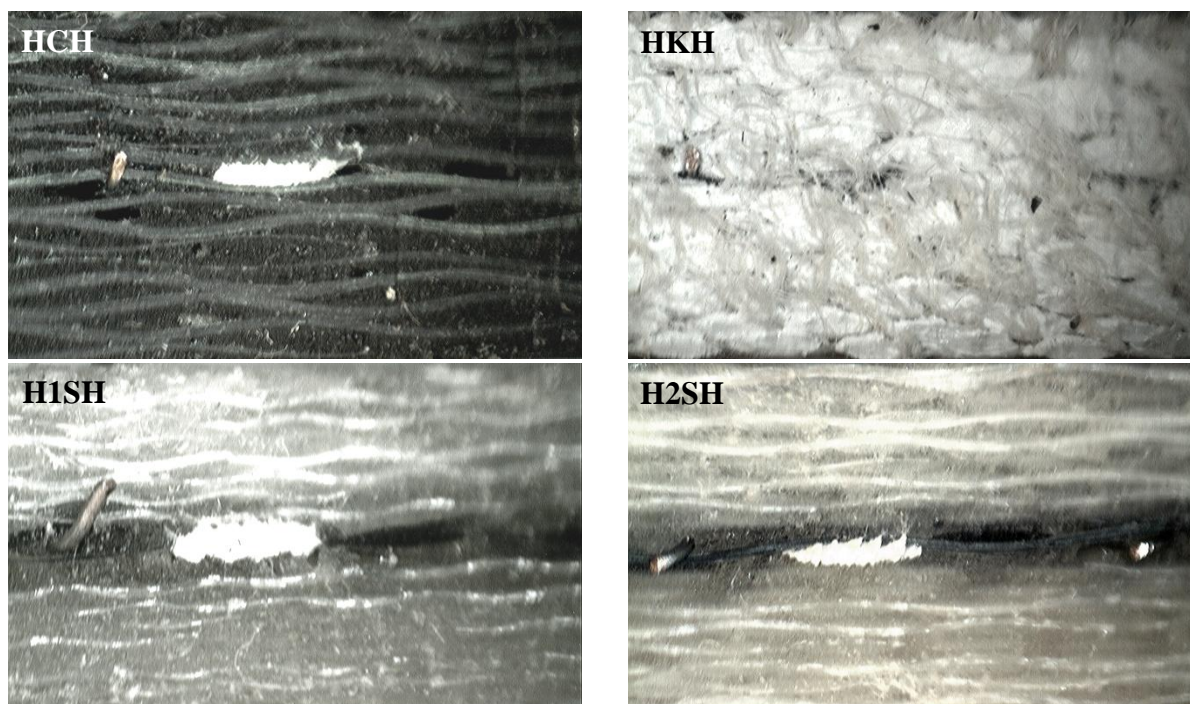
Luând în considerație tipurile de țesături cu care au fost armate materialele compozite de bază, au fost formate materiale compozite cu armătură hibridă și matrice epoxidică omogenă și materiale compozite hibride cu configurația straturilor identică cu cea a materialelor compozite hibride cu matrice omogenă, dar acestea din urmă au fost realizate cu matrice heterogenă MF (tabelul 3.14), toate aceste materiale hibride având orientarea fibrelor la 0°.

Structura laminatelor hibride N1 se diferențiază de structura laminatelor hibride N2 prin tipul de țesătură din fibre de sticlă utilizat, adică în structura armăturii laminatelor hibride N1 s-a utilizat doar țesătura 1S având în vedere țesăturile din fibre de sticlă, iar în structura armăturii laminatelor hibride N2 s-a utilizat țesătura 2S.

Ceea ce este de observat și reprezintă un argument în favoarea modificării matricelor epoxidice prin utilizarea aditivilor este faptul că în urma debitării fibrele aramidice (în secțiune) prezintă aspect de smulgere – au aparența unor împâsliri, în timp ce în cazul utilizării matricelor modificate acest aspect este puternic atenuat ceea ce înseamnă o creștere a eficienței (prin fixarea mai rigidă a acestor fibre în matrice). Din punctul de vedere al rezistenței la impact, pe de altă parte, aditivarea matricei conduce la o mărire semnificativă a densității materialului compozit cu consecințe în capacitatea acestuia de a disipa energia, alături, bineînțeles, de multiplicarea mecanismelor de distrugere prin impact prin introducerea fazelor granulare (cu excepția amidonului) în matricea epoxidică.

**Tabelul 3.14.** Configurația straturilor ale materialelor compozite simetrice cu armătură hibridă.

Material	Configurația straturilor
N11H, N11F	$[0_{3C}/0_{3K}/0_{21S}/\overline{90_M}]_S$
N12H, N12F	$[0_{3K}/0_{31S}/0_{2C}/\overline{90_M}]_S$
N13H, N13F	$[0_{31S}/0_{3C}/0_{2K}/\overline{90_M}]_S$
N14H, N14F	$[0_{31S}/0_{3K}/0_{2C}/\overline{90_M}]_S$
N21H, N21F	$[0_{3C}/0_{3K}/0_{22S}/\overline{90_M}]_S$
N22H, N22F	$[0_{3K}/0_{32S}/0_{2C}/\overline{90_M}]_S$
N23H, N23F	$[0_{32S}/0_{3C}/0_{2K}/\overline{90_M}]_S$
N24H, N24F	$[0_{32S}/0_{3K}/0_{2C}/\overline{90_M}]_S$

**Fig. 3.5.** Imaginile microscopice ale suprafețelor transversale ale materialelor compozite cu armătură omogenă cu orientare a fibrelor la  $0^\circ$  și matrice omogenă.**Fig. 3.6.** Imaginile microscopice ale suprafețelor transversale ale materialelor armate cu țesătură hibridă.

În cazul studiului acestei grupe de materiale hibride se urmărește îmbunătățirea caracteristicilor la impact atât prin hibridizarea armăturii cât și prin aditivarea rășinii

epoxidice, dar și analiza efectului tipului de țesătură din fibre de sticlă și efectului tipului de țesătură utilizată la armarea straturilor exterioare asupra capacității de absorbție a energiei de impact și deteriorării suprafețelor, luând în considerație că țesătura de carbon îmbunătățește rigiditatea materialelor, dar în același timp este sensibilă la șoc, iar țesătura de kevlar are capacitatea de absorbție ridicată a energiei de impact contribuind la îmbunătățirea rezistenței la impact.

Astfel, țesătura straturilor exterioare prezintă un rol esențial în ceea ce privește performanța materialelor compozite hibride, prin prevenirea perforării compozitelor, reducerea suprafeței deteriorate și mărirea rezistenței la impact.

**Tabelul 3.15.** Configurația straturilor ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor laminelor la diferite unghiuri.

Straturi	Material					
	M1H, M1F	M2H, M2F	M3H, M3F	M4H, M4F	M5H, M5F	M6H, M6F
01	K 30	K 15	K 30	1S 30	C 45	C 0
02	K -30	K 30	K 15	C -30	C -30	C -30
03	C 45	C -15	C 0	K 0	1S 15	C 45
04	C 0	C -30	1S 45	1S 45	1S 30	K 0
05	C 45	1S 45	1S -30	C 30	C -30	K -30
06	C 0	C 15	C -15	K 15	C 0	K 45
07	K 15	K 30	K 30	K -30	1S 30	1S 30
08	K 30	K 45	K 45	1S 30	1S 45	1S 45
09	M	M	M	M	M	M
10	K -30	K 45	K 45	1S 30	1S 45	1S 45
11	K -15	K -30	K -30	K 45	1S -30	1S -30
12	C 0	C -15	C 15	K -15	C 0	K 45
13	C 45	1S 45	1S 30	C -30	C 30	K 30
14	C 0	C 30	1S 45	1S 45	1S -30	K 0
15	C 45	C 15	C 0	K 0	1S -15	C 45
16	K 30	K -30	K -15	C 30	C 30	C -30
17	K -30	K -15	K -30	1S 30	C 45	C 0

Utilizând țesăturile din fibre carbon C, fibre de kevlar K și fibre de sticlă 1S, în categoria materialelor cu orientarea fibrelor la diferite unghiuri antisimetric echilibrate, au fost formate șase materiale compozite hibride impregnate cu rășină epoxidică omogenă și șase materiale compozite hibride impregnate cu rășină epoxidică heterogenă MF, având configurația straturilor identică, dată în tabelul 3.15. Aceste

lamine hibride, după cum se poate observa din configurația straturilor, au straturile aranjate simetric față de stratul din mijloc M din punctul de vedere al tipurilor de țesături utilizate și aranjate antisimetric dar echilibrate din punctul de vedere al orientării unghiurilor fibrelor față de direcția urzelii.

Aceste lamine hibride au straturile aranjate simetric față de stratul din mijloc M format din țesătură hibridă, în funcție de tipurile de țesături utilizate, însă laminatele 2A și 4A sunt antisimetrice și echilibrate în funcție de valorile unghiurilor orientărilor fibrelor. În cadrul studiului acestui grup de materiale hibride se va analiza atât influența orientării unghiurilor fibrelor cât și influența variației numărului de straturi din țesătură aramidică. Materialele din această clasă prezintă, de asemenea, o altă densitate a matricei decât cele din clasele MF din perspectiva faptului că în acest caz fracția volumică totală a aditivilor este de 20% în timp ce în cazul matricelor MF1 și MF2 fracția volumică totală este de 30%.

**Tabelul 3.16.** Arhitectura materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.

Straturi	Matrice aditivată		Material			
	Cod	Tipuri de aditivi	1A	2A	3A	4A
01	MA1	Amidon de cartof + negru de fum (total 20 %)	C 0°	C 0°	C 0°	C 0°
02			K 0°	K -15°	C 0°	C -15°
03			K 0°	K 15°	K 0°	K 15°
04	MA2	Amidon de cartof + pulbere de kevlar + fibre scurte de sticlă + fibre scurte de carbon (total 20 %)	1S 0°	1S -30°	1S 0°	1S -30°
05			G2 0°	G2 0°	G2 0°	G2 0°
06			1S 0°	1S 30°	1S 0°	1S 30°
07			C 0°	C -45°	K 0°	K -45°
08	MA3	Pulbere de kevlar + ferită (total 20 %)	K 0°	K 0°	C 0°	C 0°
09			M 90°	M 90°	M 90°	M 90°
10			K 0°	K 0°	C 0°	C 0°

11			C 0°	C 45°	K 0°	K 45°
12	MA2	Amidon de cartof + pulbere de kevlar + fibre scurte de sticlă + fibre scurte de carbon (total 20 %)	1S 0°	1S -45°	1S 0°	1S -45°
13			G2 0°	G2 0°	G2 0°	G2 0°
14			1S 0°	1S 45°	1S 0°	1S 45°
15			K 0°	K 15°	K 0°	K 15°
16	MA1	Amidon de cartof + negru de fum (total 20 %)	K 0°	K -15°	C 0°	C -15°
17			C 0°	C 0°	C 0°	C 0°

În cazul utilizării sistemului epoxidic, pentru finalizarea polimerizării matricei epoxidice și îmbunătățirea proprietăților mecanice, se recomandă tratarea termică a materialelor formate, astfel după 14 zile laminatele au fost tratate termic în etuvă 8 ore la 60°C, 4 ore la 80°C și 2 ore la 90°C.

După scoaterea plăcilor din matriță, au fost măsurați – prin metode recomandate de standardele electrotehnice - parametrii electrici ai tuturor materialelor compozite formate, după care din fiecare material au fost extrase cu ajutorul mașinii cu jet de apă epruvetele pentru testele de impact și pentru determinarea coeficientului de dilatare termică.

## Capitolul 4.

# Analiza comportamentului la impact al compozitelor armate cu țesături și matrice epoxidică.

### 4.1. Metoda experimentală de determinare a caracteristicilor la impact a materialelor compozite.

Testele de impact au fost realizate pe parcursul a trei luni de practică în Portugalia, Guimaraes, Universitatea de Minho, Departamentul de Inginerie Mecanică. Pentru determinarea și analiza caracteristicilor rezistenței la impact ale materialelor compozite formate a fost utilizat sistemul de testare la impact cu viteză redusă Drop Weight, care este format din mașina de testare CEAST Fractovis Plus 9350 și software-ul de achiziționare și prelucrare a datelor VisualIMPACT (fig. 4.1).

Instalațiile Drop Weight pot fi utilizate cu succes, pentru a investiga comportamentul la impact a materialelor [13]. Mașina de testare este compusă dintr-un turn prin care cade greutatea cu viteza de impact, ale cărei valori pot fi cuprinse în intervalul  $0.77 \div 4.65$  m/s. Turnul este echipat cu un sistem de eliberare – recuperare a impactorului, asigurând poziționarea acestuia la înălțimea de impact ce poate varia în intervalul  $0.03 \div 1.10$  m, și un impactor cu cap semisferic de diametru 20 mm, în interiorul căruia este montat un traductor cu capacitatea de 22.24 kN, care transmite datele pe toată durata testului către sistemul de achiziție și prelucrare a datelor prin împărțirea suprafeței de contact într-un număr mai mare de 10000 de puncte, iar în partea superioară a impactorului se află un suport pe care se aranjează greutatea cu variația masei de la 2 kg la 70 kg. Pentru prevenirea impactului repetat instalația este echipată cu un sistem, care reține impactorul în momentul când dispare contactul dintre impactor și placă.

Toate plăcile destinate solicitărilor de impact au fost extrase din materialele compozite cu dimensiunile de  $190 \times 190$  mm și au fost testate la impact în patru puncte. Toate materialele acestui studiu au fost supuse la solicitări de impact cu viteza constantă de 4.248 m/s și energia de impact 90.629J. Energia de impact în cazul solicitărilor de impact cu viteză redusă și realizate cu instalația Drop Weight variază în funcție de

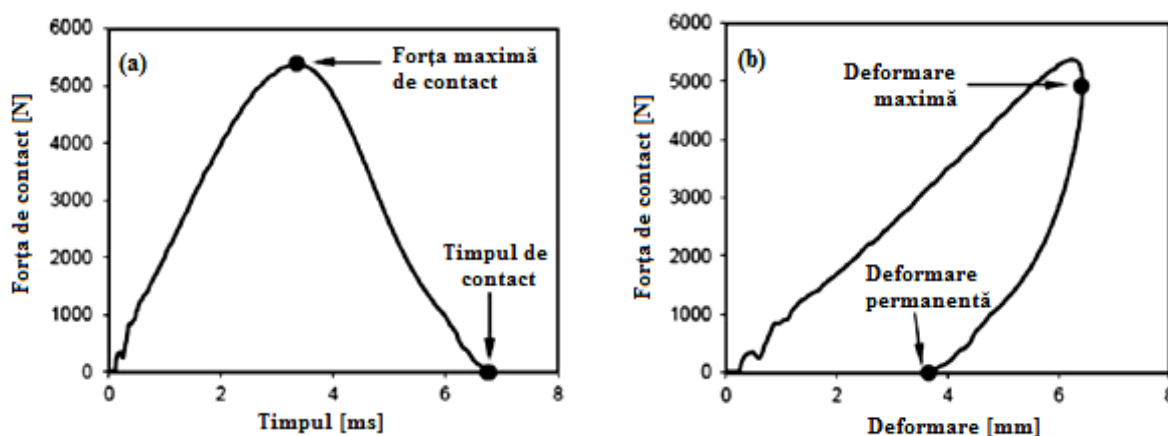


înălțimea de impact și masa totală de impact. În cazul acestui studiu pentru energia de impact valorile au fost funcție de masa totală de impact, iar înălțimea a fost păstrată constantă de 920 mm. Pentru realizarea testelor de impact cu energia de 90.629J masa totală de impact a fost 10.044kg. Însă cele 16 materiale cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la  $0^\circ$  și cinci materiale cu armătură hibridă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri și matrice epoxidică heterogenă MF au fost supuse și la solicitări impact cu energia de 45.515J determinată cu masa totală de impact 5.045 kg, pentru a înțelege mai bine comportamentul materialelor compozite cu armătură hibridă.

Toate testele de impact au fost realizate conform standardului EN ISO 6603 [31, 32], conform căruia parametrii cheie de impact evaluați de sistemul de achiziție și prelucrare a datelor conectat la mașina de testare la impact sunt forța maximă, energia la forța maximă, deformarea la forța maximă și forța de penetrare, care prezintă o jumătate din forța maximă, energia la forța de penetrare și deformarea la forța de deformare.

Dacă se cunosc forța de impact și deformarea plăcii pentru momente de timp identice pe parcursul testului de impact, atunci energia degajată  $E_i$  până în momentul timpului specific  $t_j$  se calculează prin determinarea ariei curbei forță – deformare.

Pe baza datelor extrase din sistemul de achiziție și prelucrare a datelor se pot determina caracteristicile materialelor compozite la impact: forța maximă de contact, timpul de contact, deformarea maximă, deformarea permanentă, energia de impact și energia absorbită (fig. 4.2) [8]. După cum se poate observa în fig. 4.2a, forța maximă de contact este valoarea maximă a curbei forță de contact – timp și timpul de contact maxim este valoarea punctului, unde curba forță de contact – timp intersectează axa timpului.



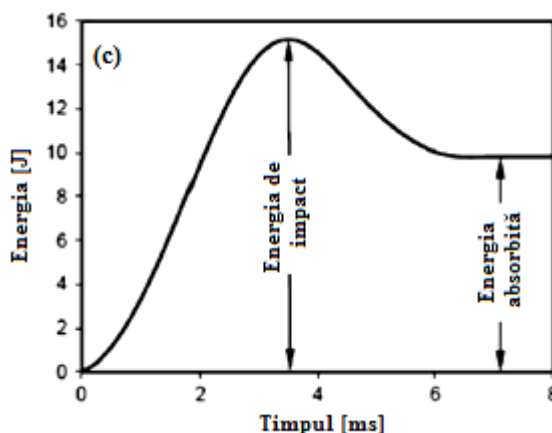


Fig. 4.2. Graficele de determinare a caracteristicilor de impact: forța maximă de contact, timpul de contact, deformarea maximă, deformarea permanentă, energia de impact și energia absorbită [8].

#### 4.2. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură omogenă supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Analizând curbele forță de impact vs. deformare reprezentate în fig. 4.3 se observă că din grupa materialelor compozite de bază cu armătură omogenă, materialele compozite armate cu țesătură din fibre de sticlă și matrice epoxidică omogenă H2SH (fig. 4.3a), materialele compozite armate cu țesătura hibridă și matrice epoxidică omogenă HDH și matrice epoxidică heterogenă HDF (fig. 4.3b) și materialele compozite armate cu țesătură aramidică HK1F (fig. 4.3d) nu au fost perforate de impactor, fiind penetrate parțial.

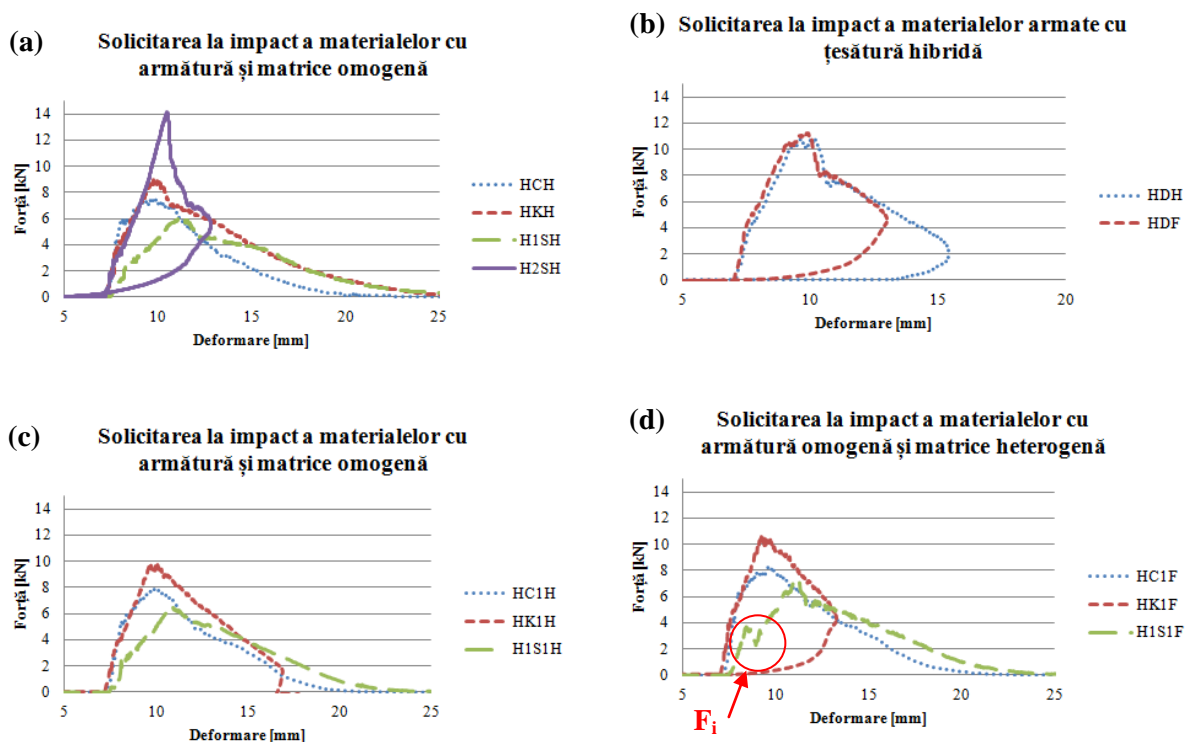


Fig. 4.3. Curbele forță - deformare la impact ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

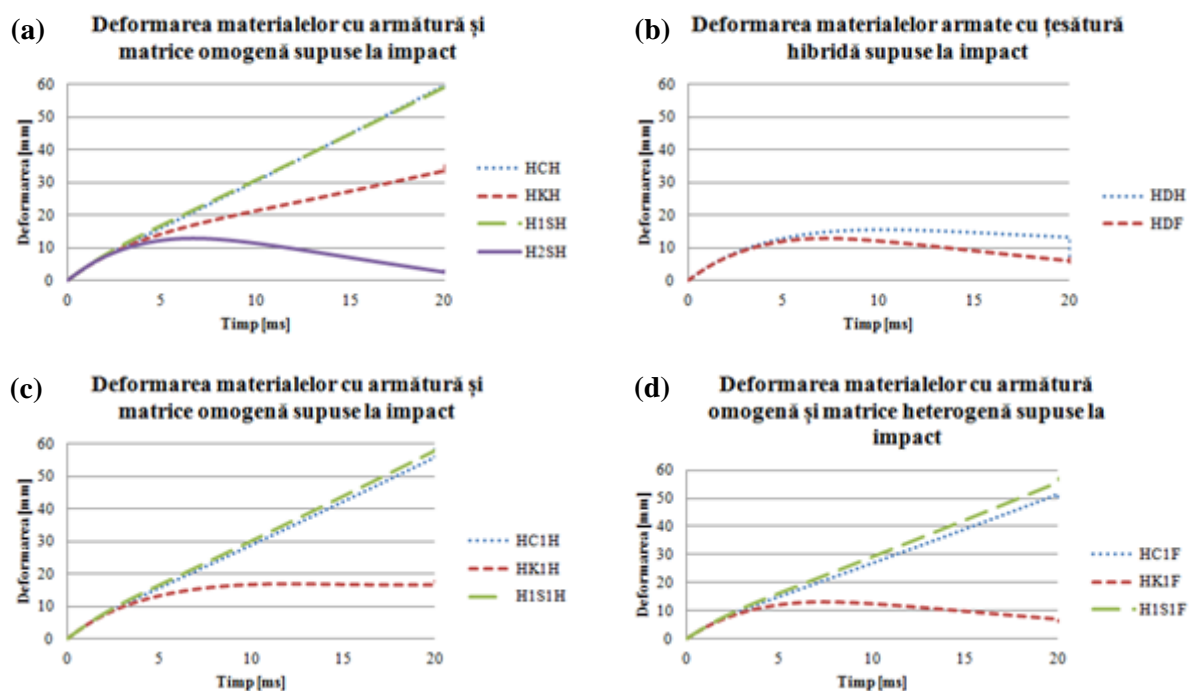
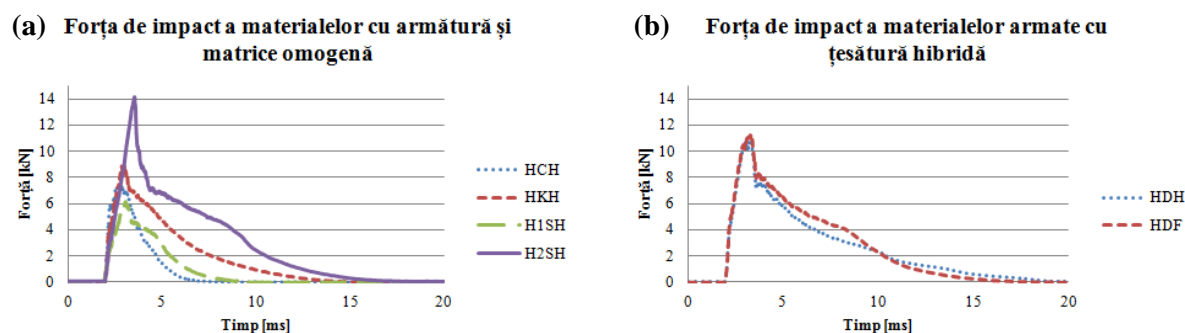


Fig. 4.4. Curbele deformare - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

Deformările maxime și cele permanente ale materialelor supuse la impact pot fi determinate și cu ajutorul curbelor deformare-timp de impact, unde valorile materialelor perforate reprezintă o ascendență liniară, iar cele neperforate prezintă o curbă, unde deformarea maximă prezintă valoarea maximă a curbei deformare-timp și deformarea permanentă prezintă ultima valoare a acestei curbe (fig. 4.4).

În ceea ce privește forța de impact aceleași rezultate sunt prezentate și de curbele forță-timp de impact (fig. 4.5), însă având în vedere timpul de contact, cea mai lungă durată a timpului de contact la impact a fost obținută pe curba forță-timp a materialului compozit HDH (fig. 4.5b) și cea mai scurtă durată a timpului de contact pe curba forță-timp a materialului compozit H2SH (fig. 4.5a).



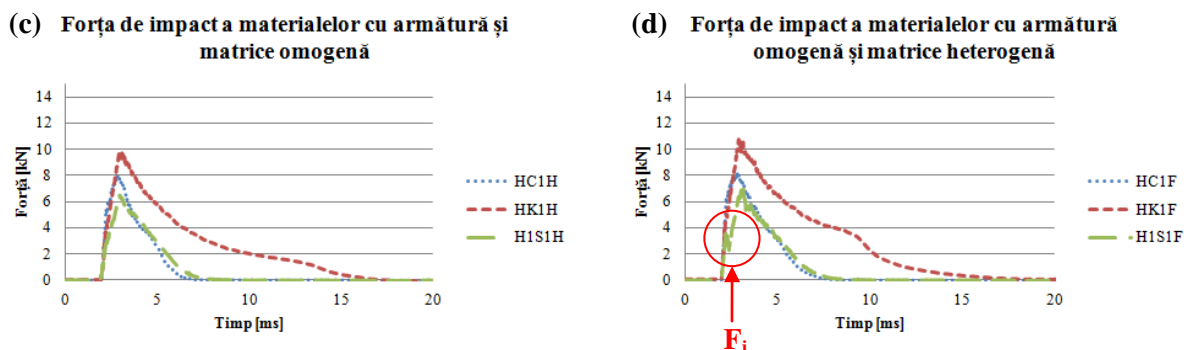


Fig. 4.5. Curbele forță - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

De asemenea, comportamentul materialelor compozite supuse la impact poate fi analizat și pe baza reprezentării grafice a vitezei de impact în funcție de timpul de impact, unde valorile negative ale vitezei indică ricoșarea impactorului la suprafața plăcii la sfârșitul contactului de impact, iar valorile pozitive indică perforarea plăcii la sfârșitul contactului de impact (fig. 4.6). Prin examinarea curbelor energie-timp de impact reprezentate în fig. 4.7 se poate observa că cu cât rezistența la impact a materialelor compozite este mai ridicată, se mărește și energia de impact a acestora. Din acest punct de vedere cel mai bun comportament este cel al materialelor armate cu țesătură din fascicule de fibre aramidice.

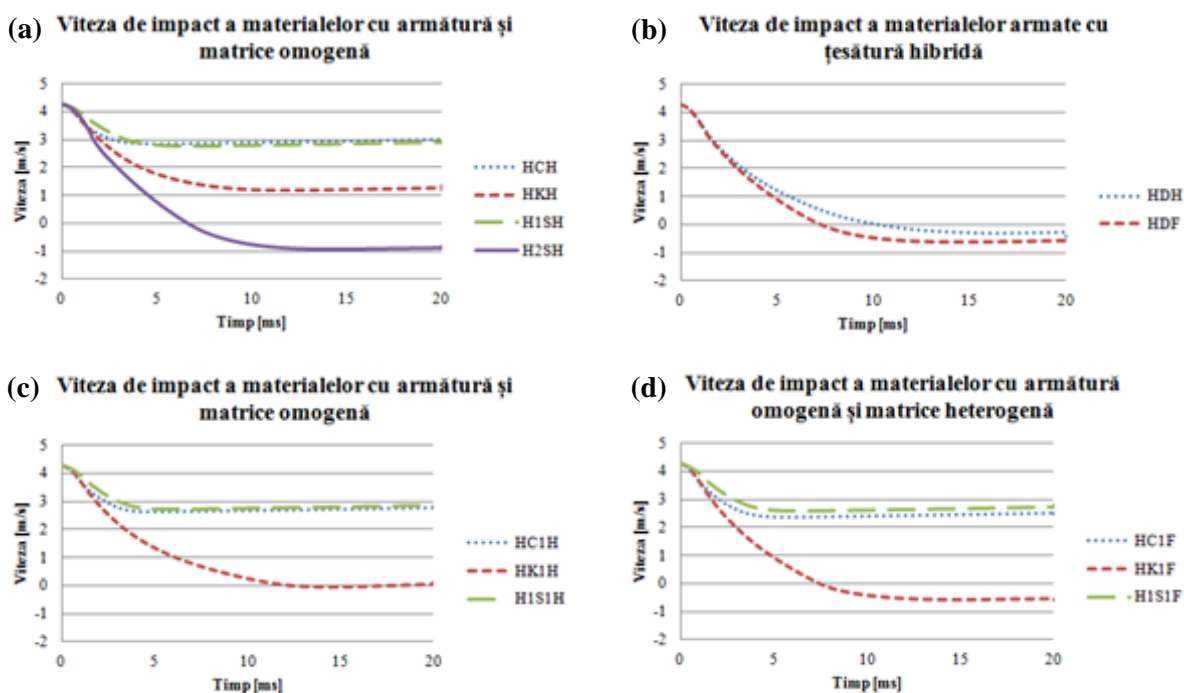


Fig. 4.6. Curbele viteză - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

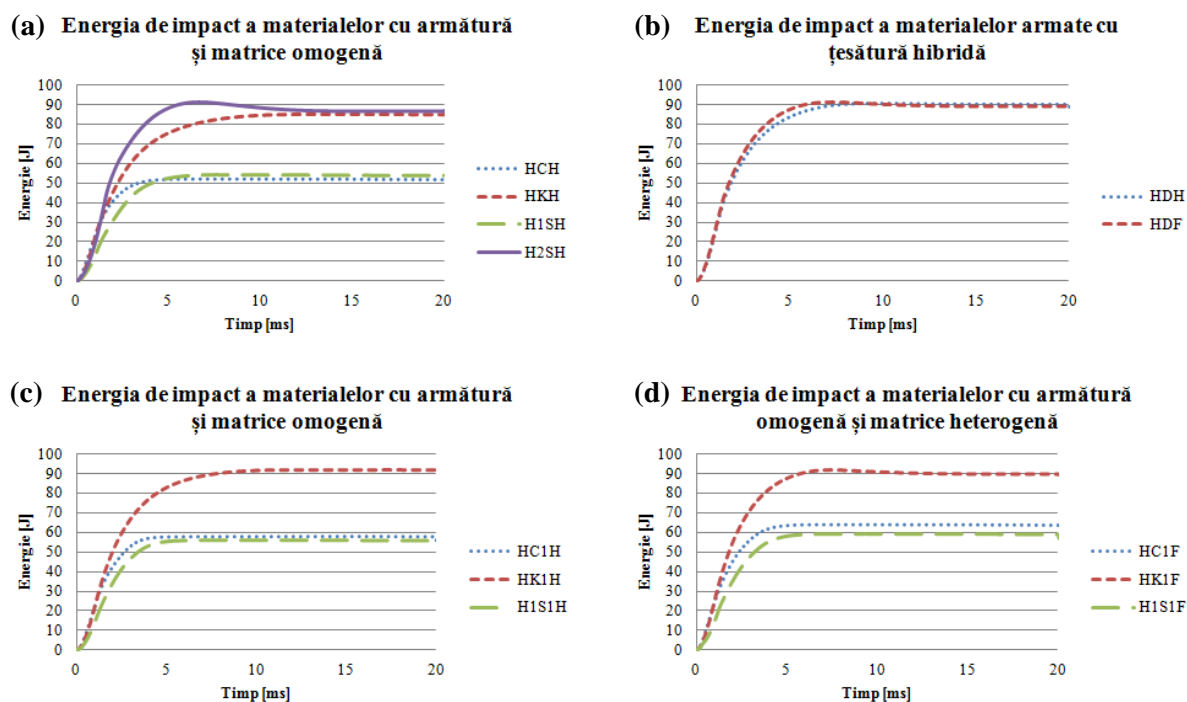


Fig. 4.7. Curbele energie - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură omogenă.

În general, materialul compozit armat cu țesătură de sticlă 2S și matrice epoxidică omogenă cu orientarea fibrelor la 0° (H2SH) a prezentat cea mai ridicată rezistență la impact comparativ cu celelalte materiale compozite cu armătură omogenă. Materialele compozite armate cu țesătură din fibre de carbon au capacitatea de absorbție a energiei de impact cea mai redusă, deoarece fibrele de carbon sunt mai rigide în comparație cu fibrele de sticlă.

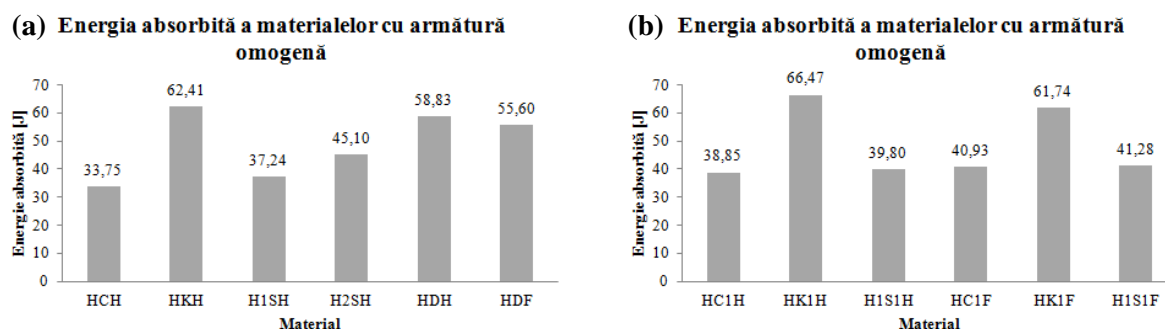
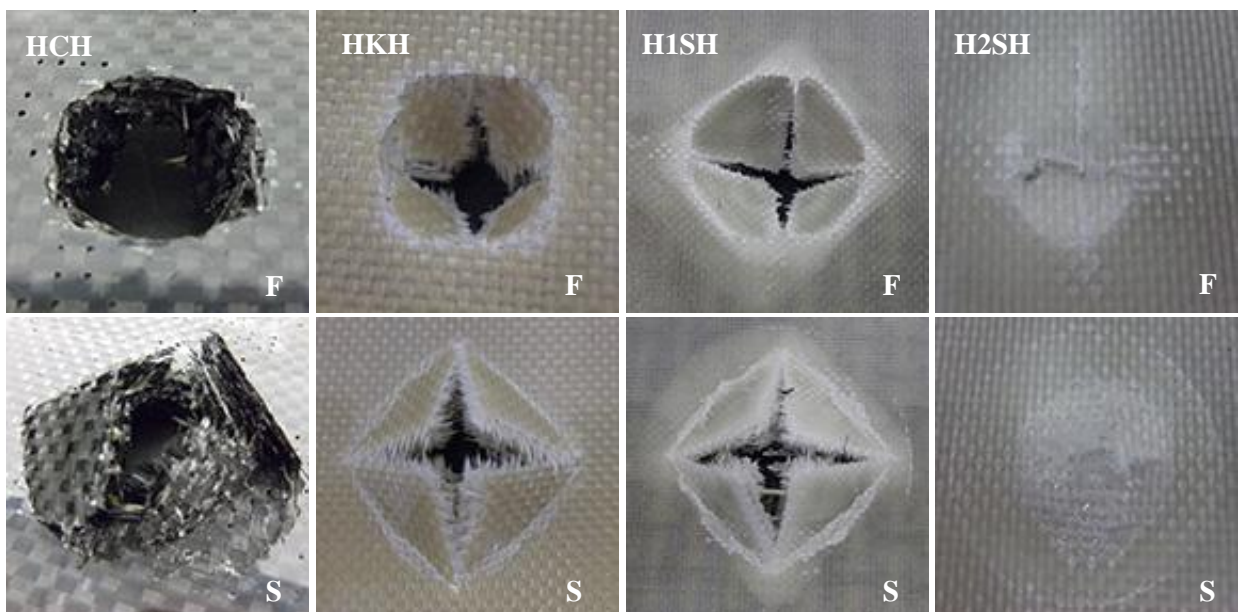


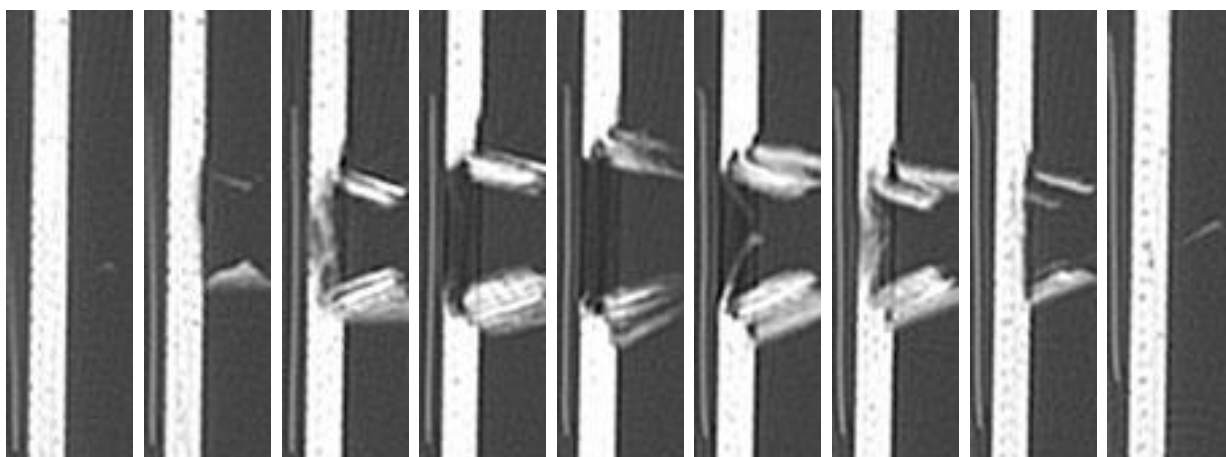
Fig. 4.8. Energia absorbită a materialelor compozite cu armătură omogenă supuse la solicitări de impact.

Deteriorarea materialelor compozite supuse la impact depinde de rezistențele la tracțiune și compresiune, unde rezistența la tracțiune se referă la întinderea fibrelor până la rupere, iar rezistența la compresiune se referă la cedarea prin delaminarea indusă de instabilitatea locală a provocată de fenomenul buckling (încrêțire) datorită fracturării prin forfecare interlaminară și intralaminară [73]. Pragul energiei cinetice depinde puternic de proprietățile matricei și este esențial independent de proprietățile fibrelor, tipul de lay-up și dacă s-au folosit straturi țesute sau nețesute [3], deoarece inițierea deteriorării laminatelor începe cu fracturarea matricei, care contribuie la apariția și extinderea delaminării.

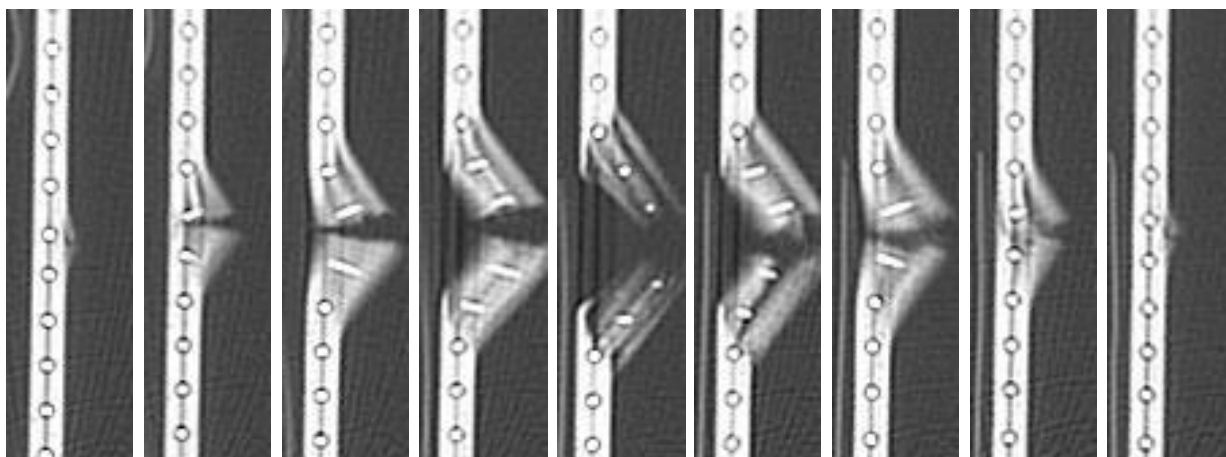
Prin investigația zonelor deteriorate la solicitările de impact cu energia de 90 J ale materialelor compozite de bază (cu armătură omogenă) neperforate și a caracteristicilor reprezentate grafic, se poate concluziona că materialul H2SH a prezentat cea mai bună performanță la impact comparativ cu celelalte materiale. În fig. 4.9. se poate observa comportamentul monobloc al fibrelor de carbon – toate cele trei straturi cedează în același timp prin mecanisme de forfecare după fracturarea matricei (practic cele două margini ale unei fracturi a matricei acționează ca o ghilotină asupra fibrelor de carbon imersate în zona respectivă, secționându-le) același comportament fiind observat la analiza proprietăților mecanice la tracțiune ale laminelor armate cu fibre de cabon.



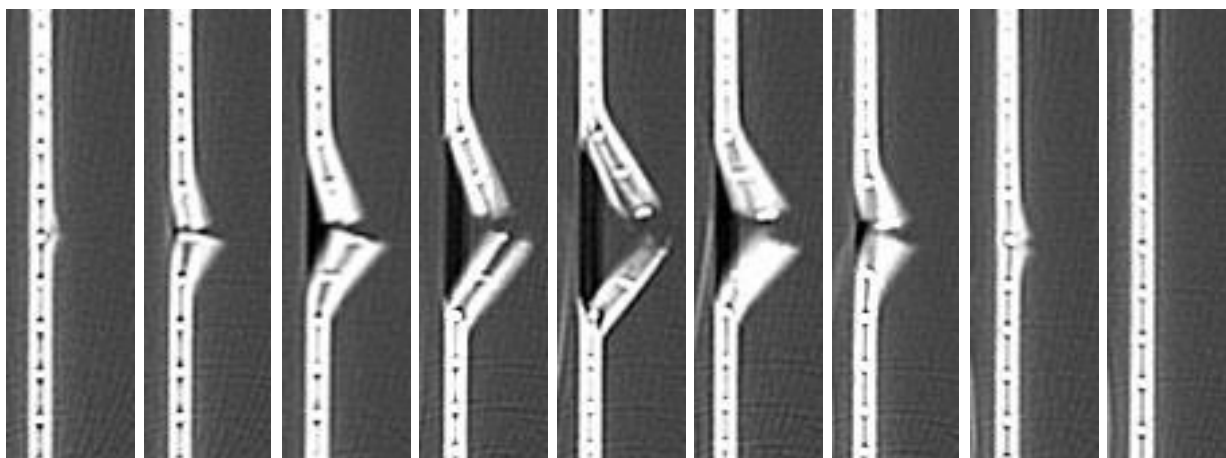
**Fig. 4.9.** Imaginile suprafețelor plăcilor supuse la solicitări de impact cu energia de 90J ( suprafața frontală supusă la impact – F și suprafața din spate nesupusă la impact – S) ale compozitelor cu armătură și matrice epoxidică omogenă cu orientarea fibrelor la 0°.



**Fig. 4.10.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă HCH.

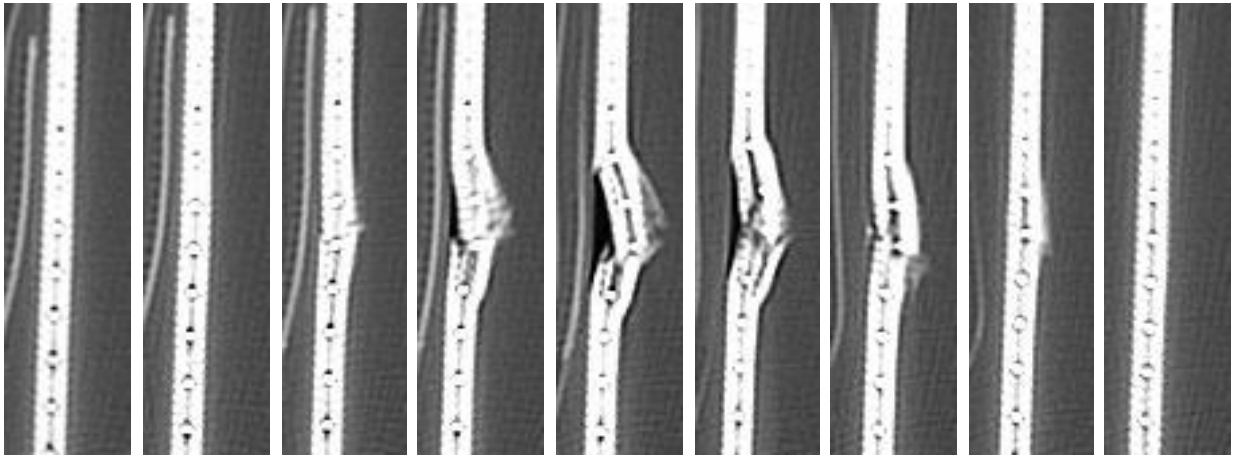


**Fig. 4.11.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă HKH.



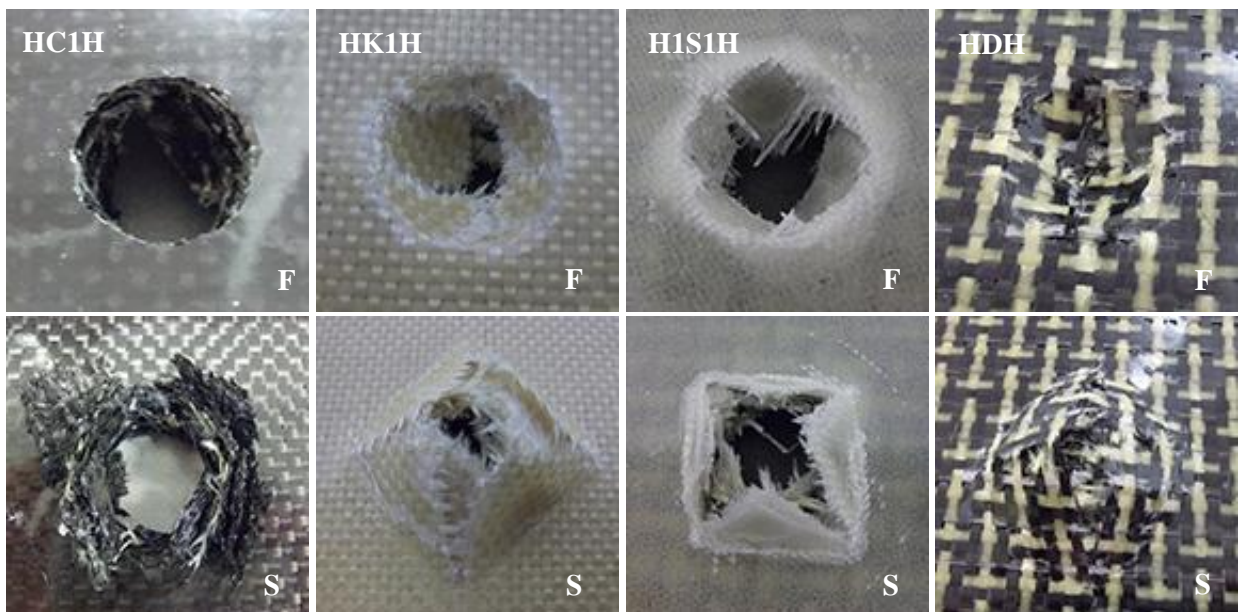
**Fig. 4.12.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă H1SH.

În figura 4.10 este observabilă fracturarea tuturor straturilor de armătură care are ca efect perforarea materialului. În fig. 4.11 situația este diferită și se pot observa două mici delaminări interioare alături de deformarea firelor metalice inserate în stratul median.



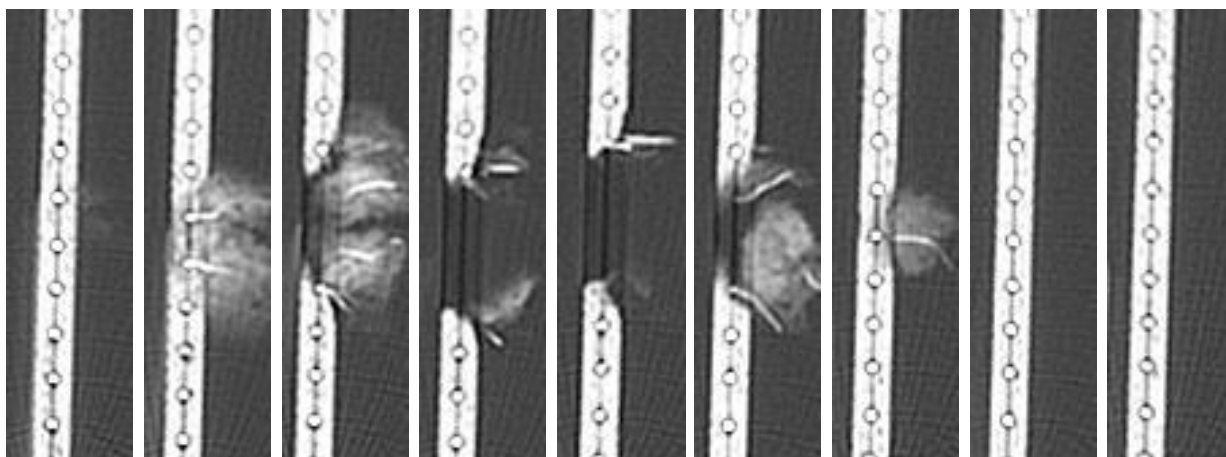
**Fig. 4.13.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă H2SH.

În fig. 4.11 și, mai ales, 4.12 se observă că materialele armate cu fibre de sticlă rezistă mai bine, din punct de vedere structural, solicitărilor la impact fiind mai puțin vizibile delaminări. Forfecarea translaminară produce fracturarea straturilor de armătură fără însă a produce delaminări extinse.

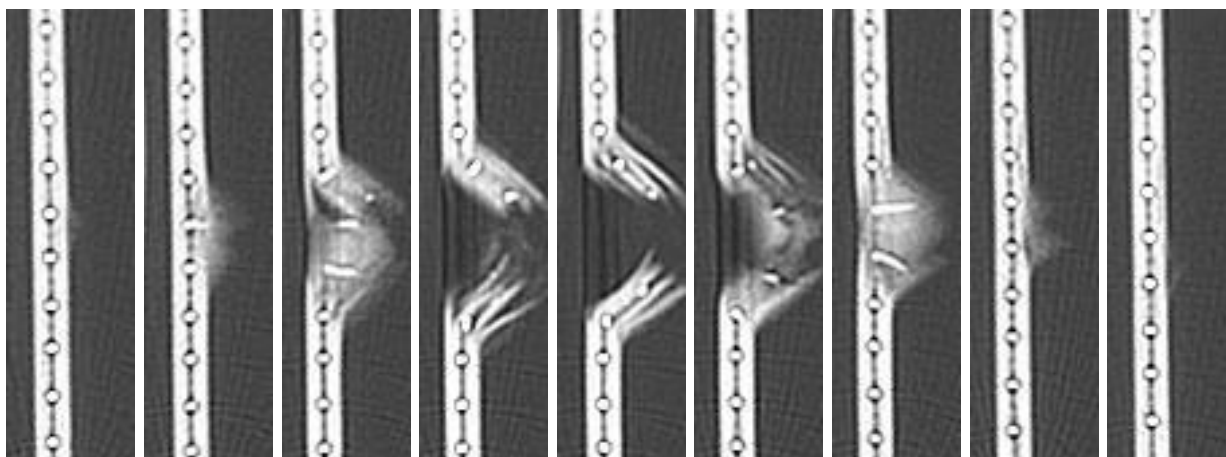


**Fig. 4.14.** Imaginile suprafețelor plăcilor supuse la solicitări de impact cu energia de 90J ( suprafața frontală supusă la impact – F și suprafața din spate nesupusă la impact – S) ale compozitelor cu armătură și matrice epoxidică omogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri.

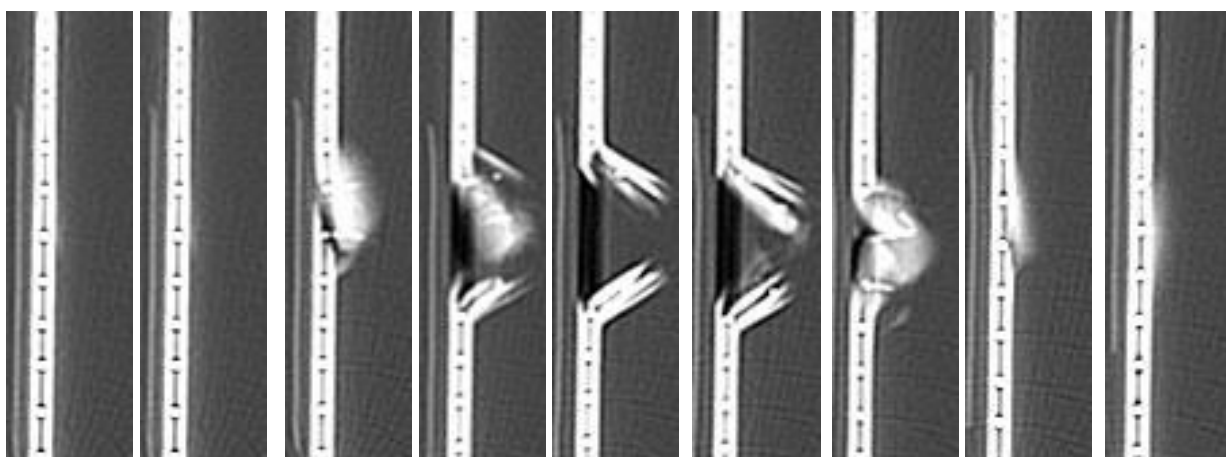




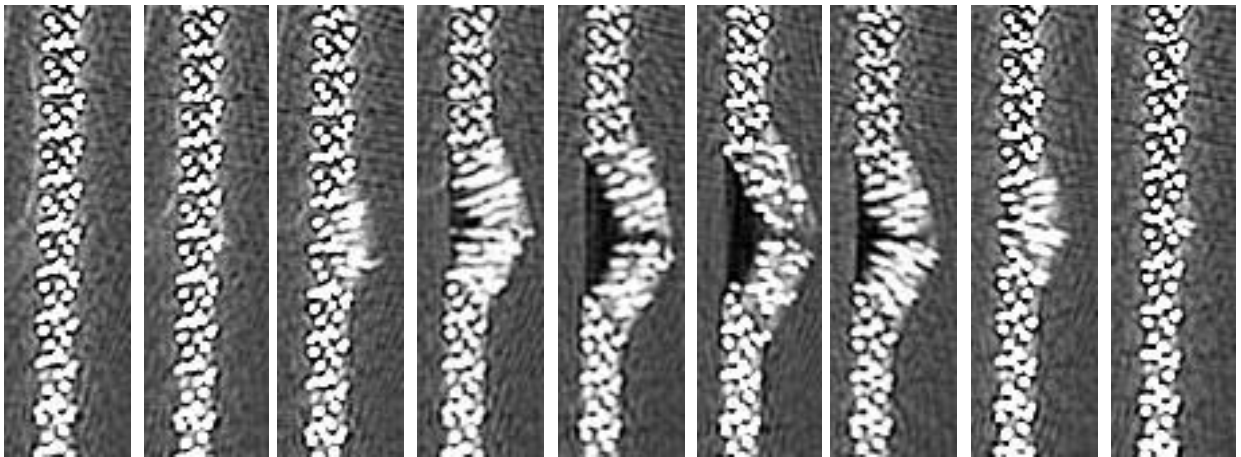
**Fig. 4.15.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă HC1H.



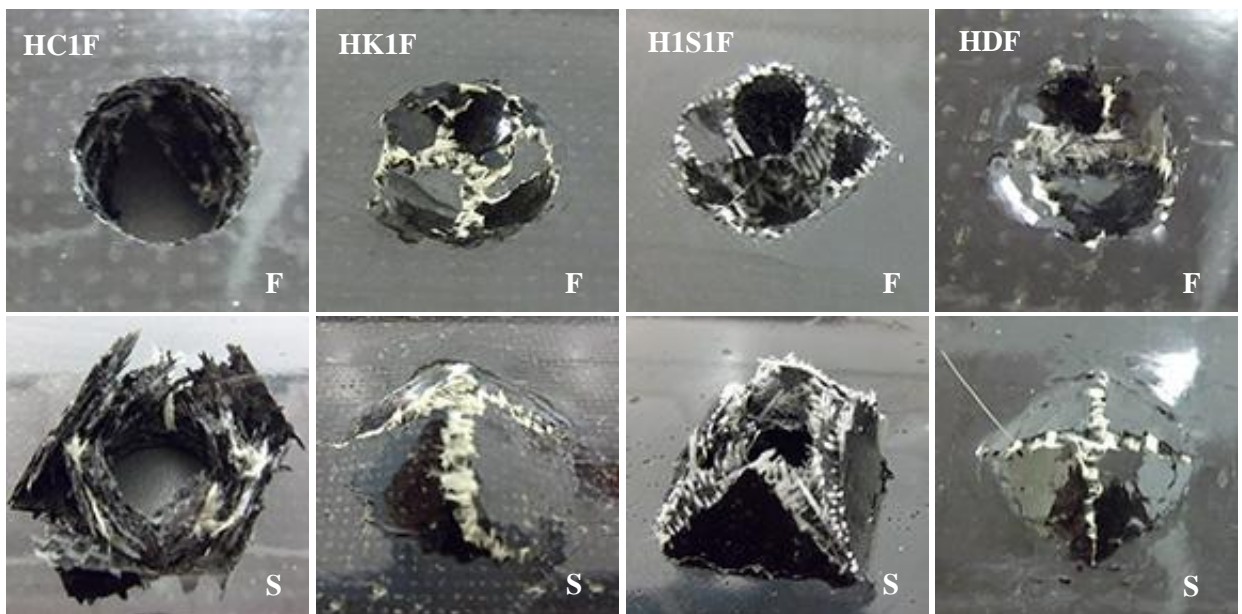
**Fig. 4.16.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă HK1H.



**Fig. 4.17.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură și matrice epoxidică omogenă H1S1H.



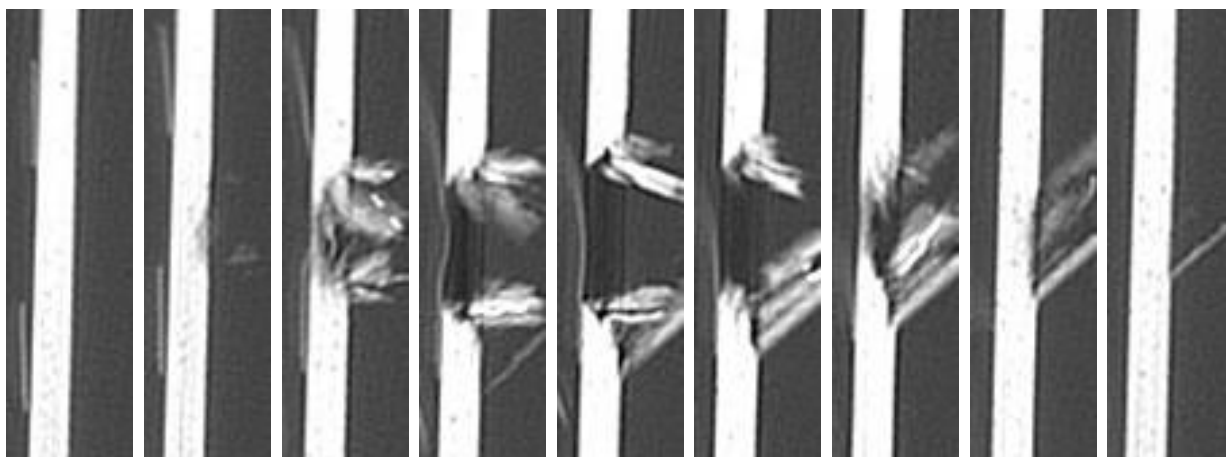
**Fig. 4.18.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură din țesătură hibridă și matrice epoxidică omogenă HDH.



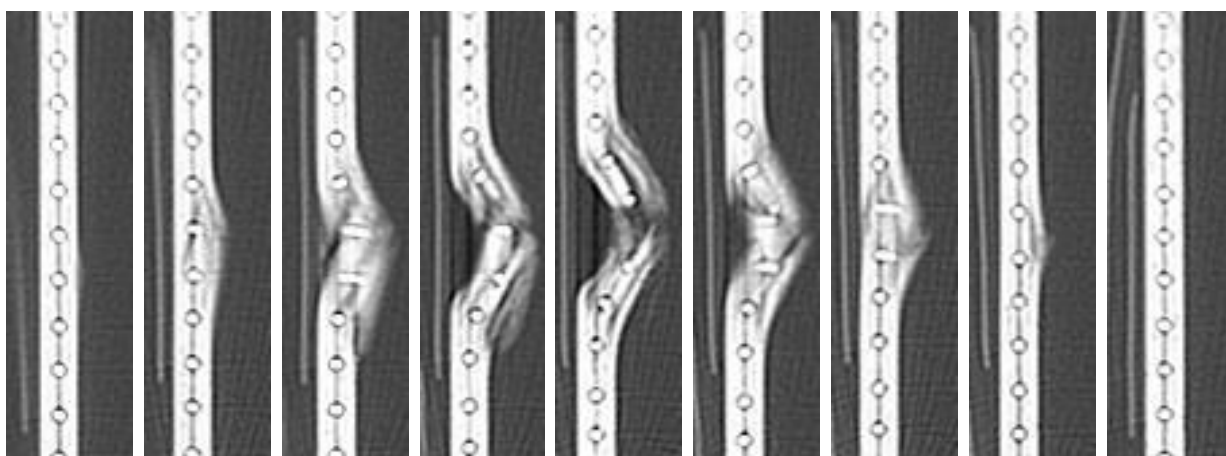
**Fig. 4.19.** Imaginile suprafețelor plăcilor supuse la solicitări de impact cu energia de 90J ( suprafața frontală supusă la impact – F și suprafața din spate nesupusă la impact – S) ale compozitelor cu armătură omogenă și matrice epoxidică heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri.

În fig. 4.15-4.17 este vizibil efectul orientării diferite a straturilor de armătură – fracturi generalizate ale armăturilor și penetrarea totală a compozitului armat cu fibre aramidice, perforarea compozitelor armate cu fibre de carbon și fibre de sticlă. În fig. 4-18 comoprntamentul diferit al compozitului armat cu țesătură hibridă – penetrat parțial și, datorită firelor metalice, sunt vizibile deplasările straturilor.

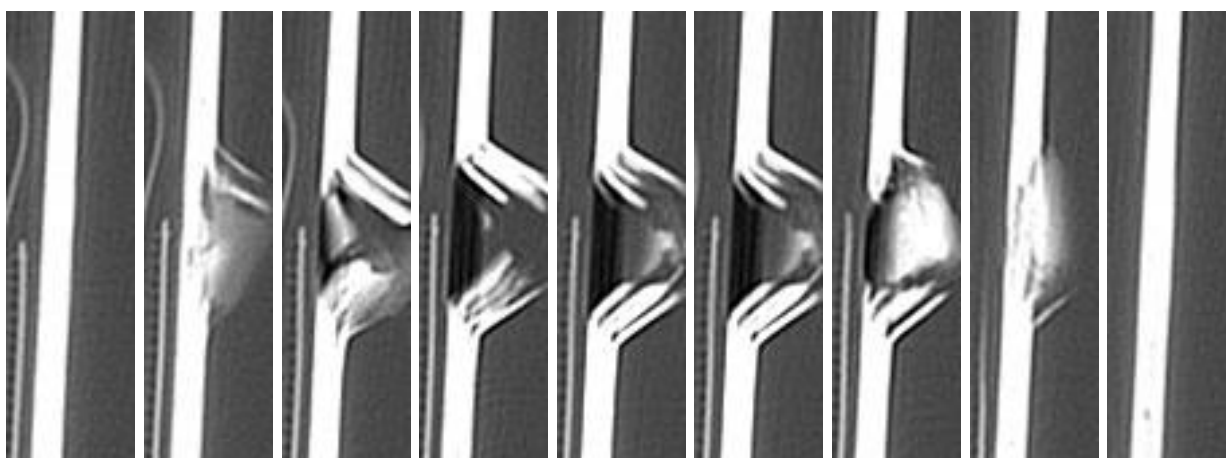
În fig. 4.19 sunt prezentate imaginile zonelor de impact și imaginile fețelor opuse zonelor de contact pentru materiale care au aceeași armătură ca cele din fig. 4.14 dar cu matrice stratificată (MF). Sunt vizibile efectele rigidizării matricei.



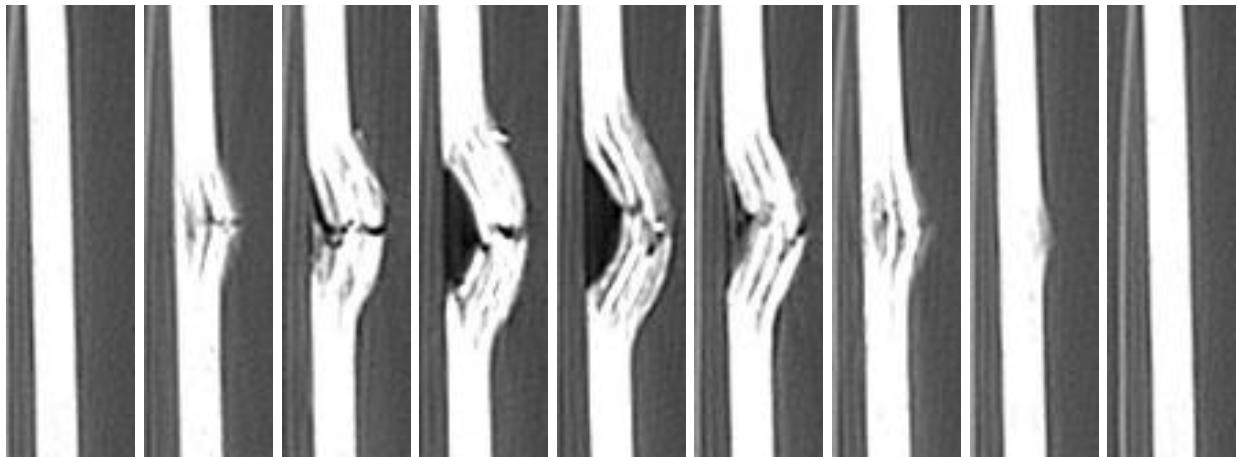
**Fig. 4.20.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură omogenă și matrice epoxidică heterogenă HC1F.



**Fig. 4.21.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură omogenă și matrice epoxidică heterogenă HK1F.



**Fig. 4.22.** Imaginele tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură omogenă și matrice epoxidică heterogenă H1S1F.

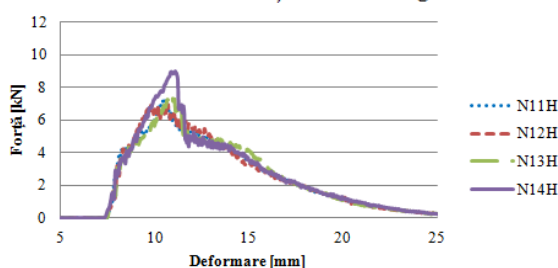


**Fig. 4.23.** Imaginile tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ale zonei deteriorate la impact a materialului compozit cu armătură omogenă și matrice epoxidică heterogenă HDF.

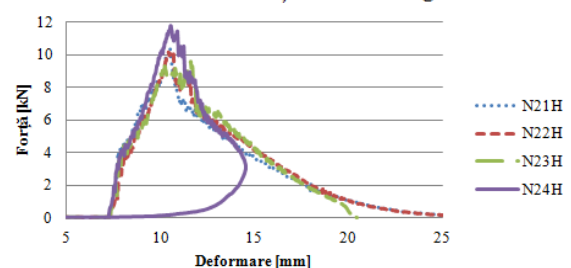
### 4.3. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0° supuse la solicitări de impact cu energiile de 45 J și 90 J.

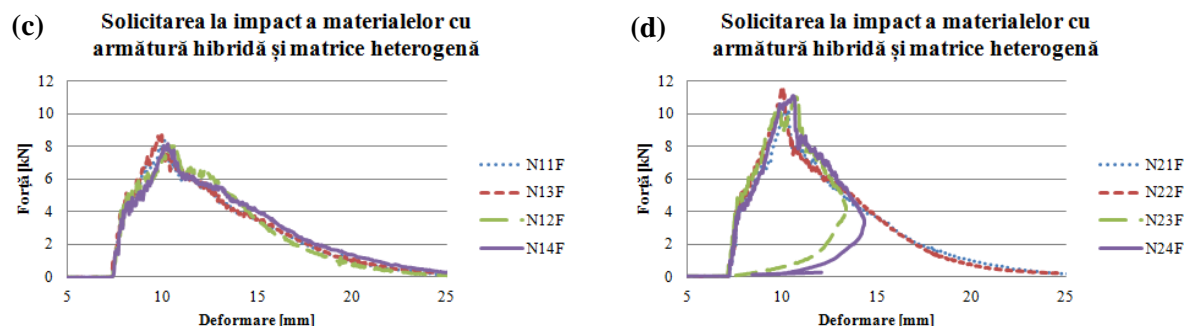
Rezistența la impact a materialelor compozite cu armătură hibridă depinde foarte mult de proprietățile țesăturilor straturilor exterioare, astfel că materialele hibride cu straturile exterioare armate cu țesătură de sticlă 2S au prezentat proprietățile cele mai bune de rezistență la impact cu energia de 90J, nefiind perforate comparativ cu celelalte materiale hibride din această grupă, având în considerație și rezultatele obținute pentru materialele cu armătură și matrice omogenă (materiale martor), dintre care materialul compozit armat cu țesătură 2S nu a fost perforat. Pentru studiul mai detaliat al comportamentului la impact al acestor tipuri de materiale compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă, toate materialele din această categorie au fost supuse și la solicitări de impact cu energia de 45J.

**(a)** Solicitarea la impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice omogenă



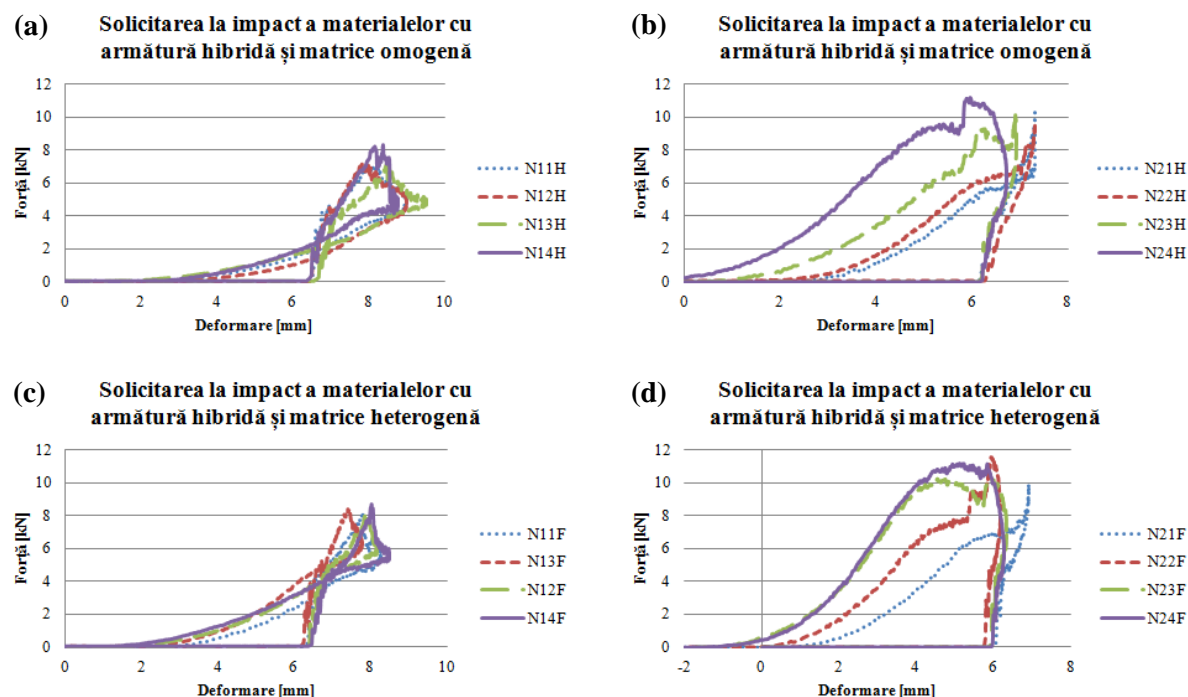
**(b)** Solicitarea la impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice omogenă





**Fig. 4.24.** Curbele forță - deformare ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0° supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Cele de mai sus justifică demersul modificării matricelor epoxidice prin adăugarea de substanțe pulverulente, mai ales în cazul în care materialele sau structurile formate sunt supuse unor solicitări de impact. În plus, demersul de a stratifica armătura materialelor are efecte asupra proprietăților materialelor când acestea sunt supuse solicitărilor la impact fiind observabilă necesitatea plasării straturilor de fibre de carbon cât mai aproape de planul median al materialului.



**Fig. 4.25.** Curbele forță - deformare ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0° supuse la solicitări de impact cu energia de 45J.

În cazul compozitelor hibride cu matrice epoxidică omogenă, având straturi armate cu țesătură din fibre de sticlă 1S solicitate la impact cu energia de 45J,

materialul compozit hibrid N13H a suferit cea mai mare deformare maximă, deoarece acest compozit hibrid are un număr mai mic de straturi armate cu țesătură aramidică, formând straturile din mijloc al materialului (fig. 4.25a).

Curba forță-deformare a materialului hibrid N14H prezintă cea mai mică valoare de deformării maxime și cea mai mare valoare a forței de impact datorită celor trei straturi exterioare ale armăturii (realizate din țesătură din fibre sticlă) urmate de trei straturi armate cu țesătură aramidică, iar straturile armate cu țesătură din fibre de carbon îmbunătățind rigiditatea straturilor de mijloc. Materialele compozite hibride N11H și N12H prezintă comportament asemănător la solicitări de impact. Rezultatele acestor materiale hibride armate cu țesătură din fibre de sticlă 1S și matrice omogenă prezintă valori asemănătoare ale deformării permanente.

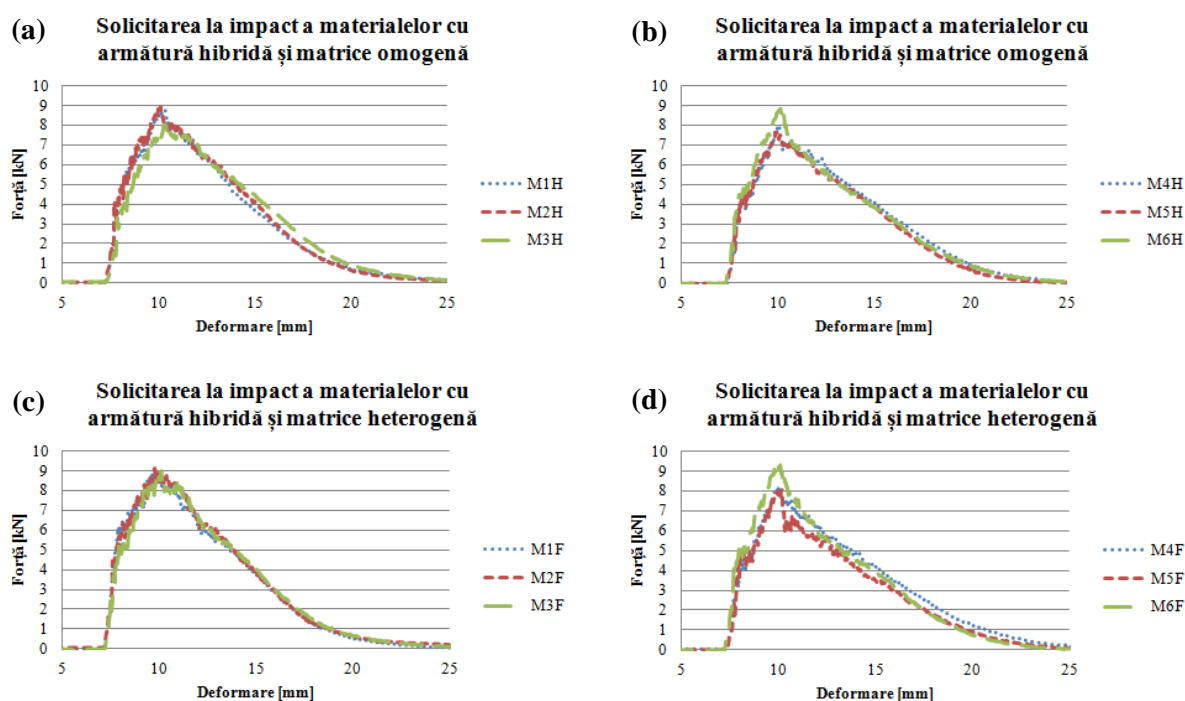
Păstrând arhitectura compozitelor hibride armate cu țesătură din fibre de sticlă 1S și înlocuind țesătura din fibre de sticlă a acestora cu țesătura din fibre de sticlă 2S (cu densitate mai mare), proprietățile acestor materiale cu armătură hibridă au fost îmbunătățite semnificativ. Însă din cauza straturilor armate cu țesătură din fibre de carbon, compozitul cu armătură hibridă N21H prezintă rezistență mai redusă la impact comparativ cu celelalte trei tipuri de compozite cu armătură hibridă, având în vedere poziționarea straturilor din țesătură de fibre de carbon).

Aditivarea rășinii epoxidice, de asemenea, a condus la îmbunătățirea proprietăților compozitelor cu armătură hibridă. Au fost observate reduceri ale deformației și creșteri ale forței de impact. Această îmbunătățire poate fi evidențiată și prin analiza curbelor forță-timp de impact redată în fig. 4.26 și 4.27, care demonstrează că odată cu creșterea forței de impact se micșorează durata contactului dintre impactor și placă în timpul solicitărilor de impact. Aditivarea rășinii epoxidice a contribuit la reducerea acestei durate.

#### **4.4. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 45J și 90J.**

Toate materialele compozite din această grupă cu armătură hibridă și matrice epoxidică omogenă/heterogenă MF cu orientarea fibrelor la diferite unghiuri supuse la

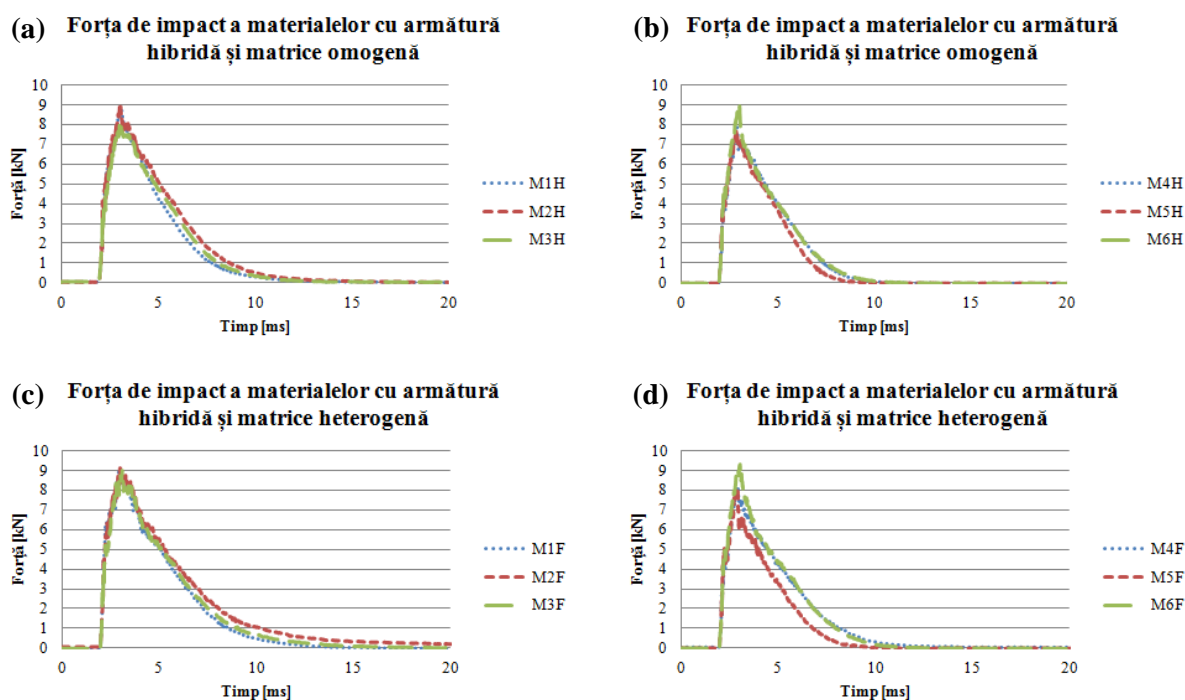
solicitări de impact cu energia de 90J au fost perforate, deoarece în arhitectura acestora dintre cele două țesături din fibre de sticlă s-a utilizat doar țesătura 1S, dar din analiza curbelor forță-deformare, forță-timp și energie-timp reprezentate grafic în fig. 4.72-4.74, se poate observa că toate materialele au comportament asemănător la impact, cu excepția materialului hibrid cu matrice omogenă M5H și materialului hibrid cu matrice heterogenă M5F, care au durata de timp a contactului dintre impactor și placă mai scurt în comparație cu celelalte materiale compozite hibride (fig. 4.73) și energia de impact mai mică (fig. 4.74) datorită lipsei țesăturii aramidice în structura acestor materiale. Aditivarea rășinii epoxidice a influențat neesențial aceste caracteristici ale rezistenței de impact prezentate de aceste materiale.



**Fig. 4.72.** Curbele forță - deformare ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diferite unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Pentru a determina comportamentul la impact al materialelor cu armătură hibridă cu orientarea fibrelor la diferite unghiuri antisimetrică, dar echilibrată, și cu matrice heterogenă acestea au fost solicitate și la impact cu energia de 45 J, cu excepția materialului hibrid M6F. Curbele forță-deformare și forță-timp reprezentate grafic în fig. 4.75 și 4.76 dovedesc că materialele hibride cu straturile exterioare formate din țesătură aramidică au comportament mai bun la solicitările de impact, având valori ale forței de contact mai ridicate și valori mai mici ale deformației maxime,

deformației permanente și duratei contactului impactor – placă, în comparație cu celelalte două materiale hibride. În ceea ce privește energia de impact și energia absorbită, conform reprezentărilor grafice din fig. 4.78-4.79, au fost obținute rezultate, care prezintă o situație inversă celei din cazul solicitărilor de impact cu energia de 90J (fig. 4.77), unde aceleași materiale hibride cu straturi exterioare formate din țesătură aramidică prezintă cea mai ridicată capacitate de absorbție a energiei de impact, iar materialul hibrid M5F prezintă cea mai redusă valoare a acestui parametru.



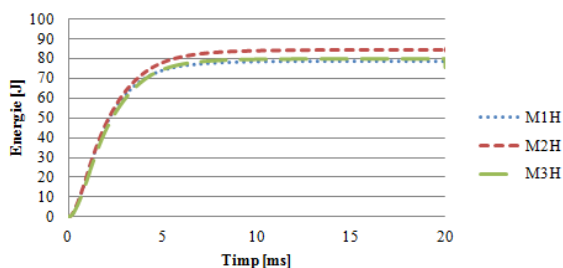
**Fig. 4.73.** Curbele forță - timp ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diferite unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Din analiza cantității de energie absorbită a fiecărui material compozit cu armătură hibridă și matrice omogenă din această grupă, având în vedere cantitatea de energie absorbită de materialele compozite cu armătură omogenă și orientarea fibrelor la unghiuri diferite, influența tipului de țesătură a straturilor exterioare asupra capacității de absorbție a energiei de impact studiată în cazul materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0° cât și, de asemenea, influența unghiurilor orientării fibrelor, s-a determinat că creșterea mărimii unghiurilor contribuie la îmbunătățirea acestei caracteristici, astfel din această grupă de materiale

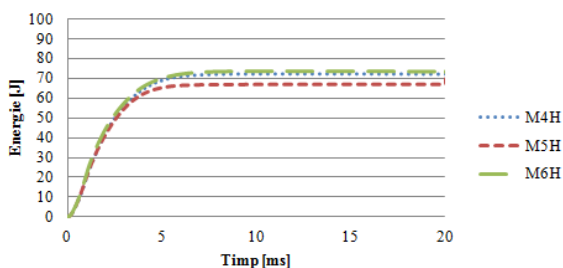


hibride compozitul M2H a prezentat capacitatea de absorbție a energiei de impact cea mai ridicată, iar compozitul M5H a prezentat capacitatea cea mai redusă.

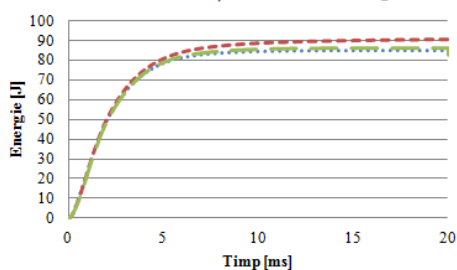
(a) Energia de impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice omogenă



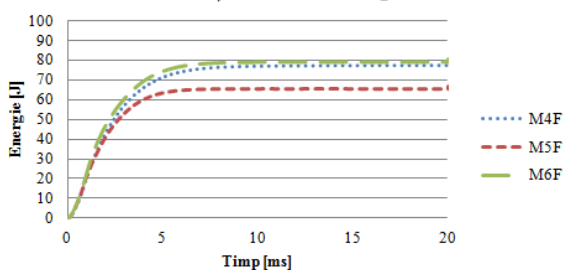
(b) Energia de impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice omogenă



(c) Energia de impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă



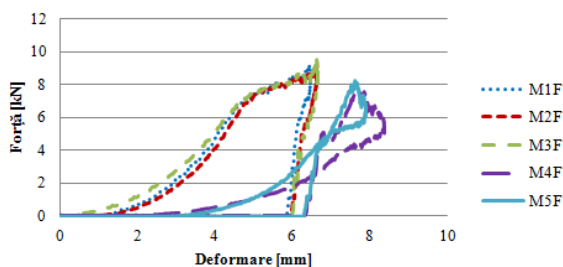
(d) Energia de impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă



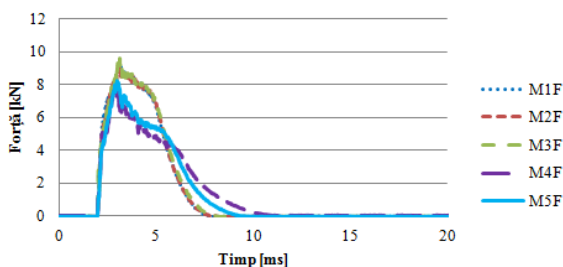
**Fig. 4.74.** Curbele energie - timp ale materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diferite unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Din graficele de mai sus se poate decela efectul modificării rășinii epoxidice asupra energiei de impact – materialele slabe cedează la valori mai mici ale energiei decât valoarea maximă (90 J).

Solicitarea la impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă



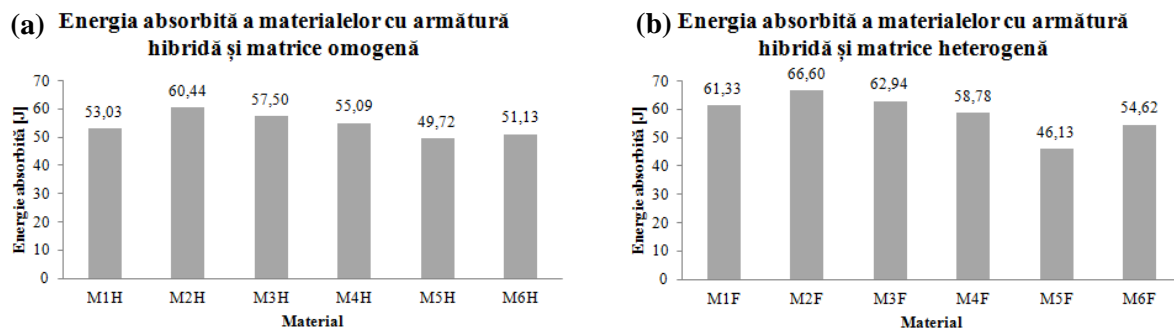
Forța de impact a materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă



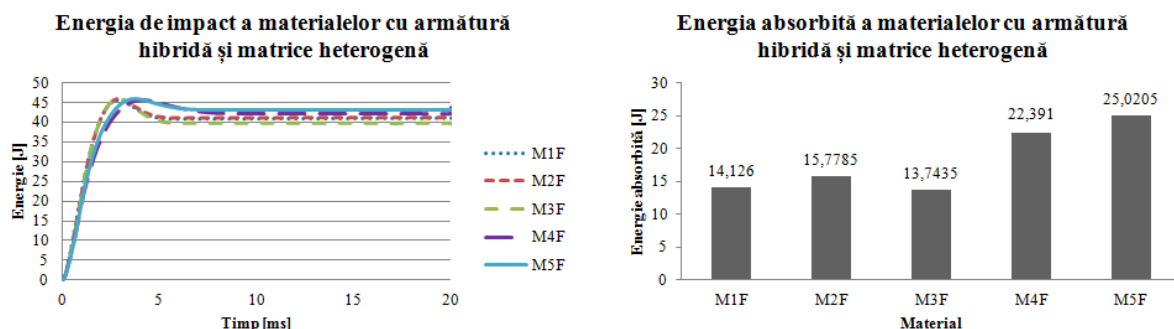
**Fig. 4.75.** Curbele forță - deformare ale compozitelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 45J.

**Fig. 4.76.** Curbele forță - timp ale compozitelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 45J.

Aditivarea matricii epoxidice a contribuit la mărirea capacității de absorbție a energiei de impact a materialelor solicitate la impact cu energia de 90J, cu excepția materialelor hibride M5F și M6F, a căror capacitate a fost redusă (fig. 4.77b).



**Fig. 4.77.** Energia absorbită a materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diferite unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.



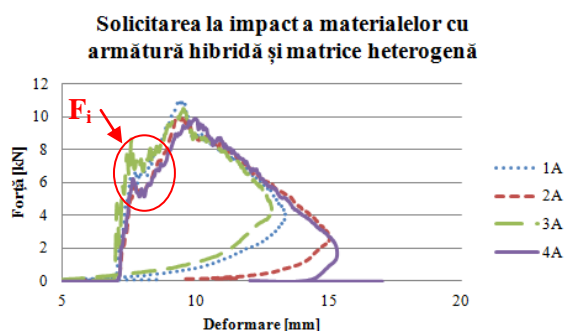
**Fig. 4.78.** Curbele energie - timp ale compozitelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 45J.

**Fig. 4.79.** Energia absorbită a compozitelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri supuse la solicitări de impact cu energia de 45J.

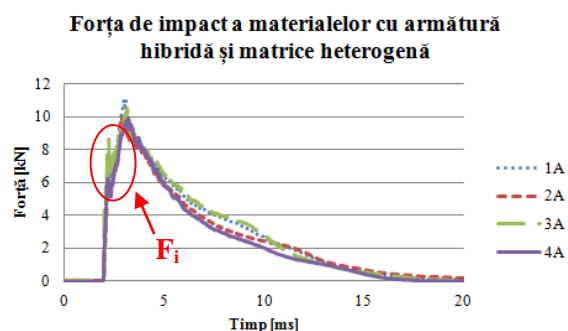
#### 4.5. Analiza comportamentului materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA supuse la solicitări de impact cu energia de 90J.

Datorită unui număr mai mare de straturi armate cu țesătură aramidică, datele curbelor forță-deformare și forță-timp reprezentate grafic în fig. 4.101 și 4.102, prezintă valori mult mai mici ale deformației maxime și ale deformației permanente suferite de materialele hibride 1A și 2A comparativ cu cele ale materialelor hibride 3A și 4A, care conțin un număr mai mare de straturi din țesătură de carbon. Datele privind forța maximă de impact și timpul de contact ale tuturor materialelor hibride din această grupă nu se diferențiază semnificativ. Comparând, în general, rezultatele materialelor

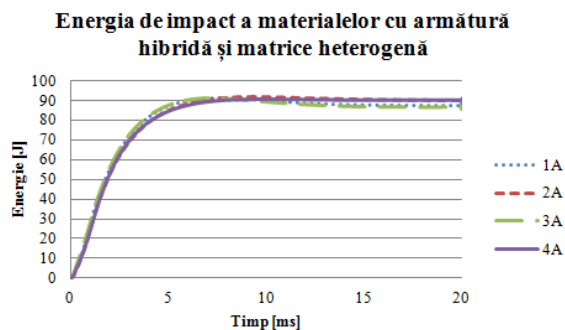
cu armătură hibridă și matrice heterogenă MF cu rezultatele materialelor din această grupă, se poate constata că matricea heterogenă de tip MA este mai eficientă în ceea ce privește caracteristicile rezistenței la impact cu energia de 90J, deoarece nici un material din această grupă nu a fost perforat, însă se poate observa că proprietățile matricii epoxidice heterogene domină în acest caz datorită deteriorărilor detectabile în structura acestora cum ar fi fisurarea matricii și delaminarea, începându-se înainte ca forța de contact să atingă valoarea maximă, care poate fi identificată în secțiunea forței incipiente  $F_i$  a curbelor forță-deformare și forță-timp. În ceea ce privește energia de impact și energia absorbită reprezentate grafic în fig. 4.103 și 4.104, se poate observa că orientarea fibrelor la diverse unghiuri mărește capacitatea de absorbție a energiei de impact, iar cu mărirea numărului de straturi formate din țesătură de carbon se poate reduce această cantitate.



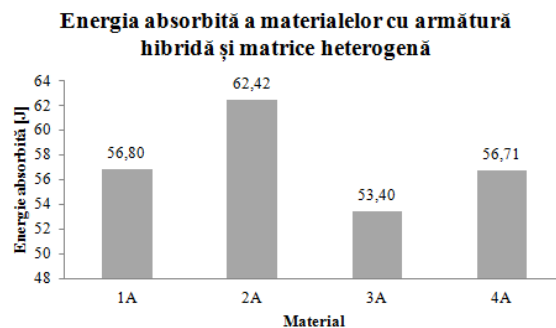
**Fig. 4.101.** Curbele forță - deformare de impact ale materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.



**Fig. 4.102.** Curbele forță - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.



**Fig. 4.103.** Curbele energie - timp de impact ale materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.



**Fig. 4.104.** Energia absorbită a materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.

## 4.6. Concluzii

1. Din toate cele 44 materialele compozite solicitate la impact cu energia de 90J, doar 11 materiale nu au fost perforate de impactor, acestea fiind materialele cu armătură omogenă H2SH, HDH, HDF, HK1F și materialele cu armătură hibridă H24H, H23F, H24F, 1A,2A,3A și 4A.

2. Cele mai bune caracteristici ale rezistenței la impact se regăsesc în cazul materialului compozit armat cu țesătură din fibre de sticlă 2S și matrice omogenă H2SH, dar și în cazul materialelor cu armătură hibridă cu straturile exterioare formate din țesătură din fibre de sticlă 2S au fost înregistrate rezultate bune în ceea ce privește impactul cu energia de 90J.

3. Materialele compozite cu matrice epoxidică omogenă și armătură omogenă din țesătură aramidică și cele cu armătură hibridă ale căror straturi exterioare sunt formate din această țesătură, prezintă o capacitate mai mare de absorbție a energiei de impact comparativ cu celelalte materiale compozite.

4. Compozitele cu armătură omogenă din țesătură de carbon și cele hibride cu straturi din țesătură de carbon la exterior au suferit cele mai multe deteriorări.

5. Orientarea fibrelor la diferite unghiuri influențează rezistența la impact a materialelor compozite, în special produce creșterea capacității de absorbție a energiei de impact.

6. Matricea heterogenă MF a îmbunătățit semnificativ valorile parametrilor ce caracterizează rezistența la impact, îndeosebi cele ale materialului cu armătură hibridă N23F, astfel încât acest material a prezentat o rezistență mai ridicată la impact decât materialul cu armătură hibridă N24F, suferind deformații mai mici. De asemenea, acest tip de matrice heterogenă a îmbunătățit esențial și proprietățile materialului cu armătură omogenă aramidică HK1F solicitat la impact cu energia de 90J, evitându-se perforarea acestuia de către impactor.

7. Matricea heterogenă MA a condus la proprietăți mai eficiente în ceea ce privește rezistența la impact, comparând rezultatele obținute pentru materialele hibride armate cu țesătură din fibre de sticlă 1S, deoarece toate materialele compozite hibride

armate cu țesătură din fibre de sticlă 1S și matrice heterogenă MF au fost perforate la impact cu energia de 90J.

**8.** În ceea ce privește capacitatea de absorbție a energiei de impact la 90J, materialele hibride armate cu țesătură din fibre de sticlă 2S absorb mai multă energie în comparație cu cele hibride armate din fibre de sticlă 1S, invers fiind în cazul solicitărilor de impact cu energie de 45J. De asemenea, și materialele cu armătură hibridă și matrice heterogenă M1F, M2F și M3F cu straturile exterioare formate din țesătură aramidică au absorbit cea mai mică cantitate de energie din grupa respectivă, fiind solicitate la impact cu energia de 45 J.

**9.** Tipul de matrice heterogenă MA provoacă apariția deteriorărilor detectabile înainte ca forța de impact să atingă valoarea maximă, ceea ce s-a observat și în cazul materialului cu armătură omogenă și matrice heterogenă H1S1F.

**10.** Materialele compozite cu armătură hibridă prezintă, în general, valori ale parametrilor ce caracterizează rezistența la impact intermediare, cuprinse între valorile maxime și minime prezentate de materialele compozite cu armătură omogenă.

**11.** Cele mai bune rezultate la impact cu energia de 90J, privind materialele compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă, au fost prezentate de materialele N23F, N24F, HDF, 1A, și 3A. Între acestea, materialul N23F a prezentat cele mai bune rezultate și în cazul solicitărilor de impact cu energia de 45J.

**12.** Suprafețele materialelor neperforate la impact cu energia de 90J prezintă moduri de deteriorare caracterizate de ruperea matricii, ruperea și ieșirea fibrelor din matrice și desplicarea țesăturii în cele două direcții privilegiate ale fibrelor (urzeală și bătaie), datorită forfecării transversale.

**13.** Suprafețele materialelor cu armătură hibridă supuse la impact cu energie de 45J prezintă deteriorări ca fisuri ale matricii și delaminare prin tracțiune și ruperea fibrelor, desplicarea țesăturii în cele două direcții ale țesăturii, debonding.

**14.** Suprafețele materialului cu armătură hibridă și matrice heterogenă N23F au suferit deteriorări nesemnificative ca fisuri ale matricii, provocând apariția delaminării.

**15.** Rezultatele acestui studiu au demonstrat că grosimea plăcilor nu a influențat caracteristicile rezistenței la impact.

## Capitolul 5.

### **Analiza proprietăților termomecanice ale materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică.**

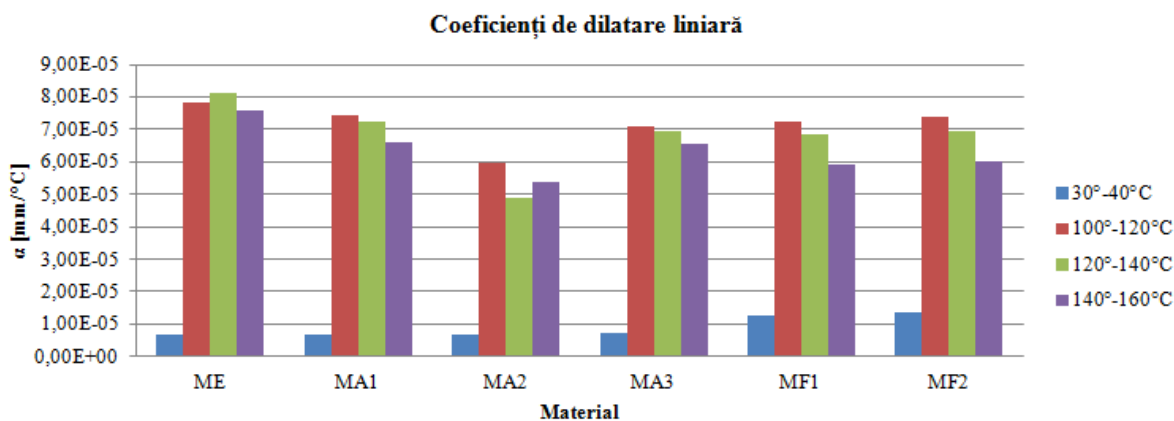
#### **5.1. Metoda de determinare a coeficientului de dilatare liniară.**

Materialele compozite armate cu țesături sunt utilizate în domenii care implică solicitări de impact la diferențe mari de temperatură și este necesar să se determine comportamentul termomecanic al acestora, deoarece la diferențe mari de temperatură pot apărea, în interiorul materialelor, tensiuni de dilatare sau comprimare afectând stabilitatea structurală. Cu creșterea vitezei de impact în zona de impact se îndeplinesc condițiile de creștere a temperaturii până la topirea sau evaporarea componentilor și din această cauză materialele metalice omogene nu sunt întotdeauna eficiente [5]. Materialele compozite armate cu țesături, studiate în această lucrare, au fost supuse testelor termice pentru evaluarea coeficientului de dilatare liniară pe direcție perpendiculară pe planul de armare.

#### **5.2. Analiza coeficientului de dilatare liniară al materialelor compozite formate.**

Rezultatele obținute prezintă valori ne semnificative ale dilatării termice a materialelor compozite pe toate intervale de temperatură, dar conform rezultatelor obținute există diferențe semnificative între valorile coeficienților de dilatare evaluați pe intervalul 30°-40°C și cele evaluate pe intervalele 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C. Pentru a înțelege comportamentul termomecanic al materialelor compozite au fost testate și matricile epoxidice utilizate la formarea materialelor în intervalele de lucru 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C, a căror rezultate sunt reprezentate grafic în fig. 5.3. După cum se poate observa din datele grafice, în intervalul de temperatură 30°-40°C matricile aditivă de tip MF1 și MF2 au suferit cele mai mari dilatări, pe când comportamentul celorlalte matrice este asemănător, iar pe intervalele 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C coeficienții de dilatare ai matricii epoxidice omogene au prezentat cele mai mari valori, în timp ce, cele mai mici

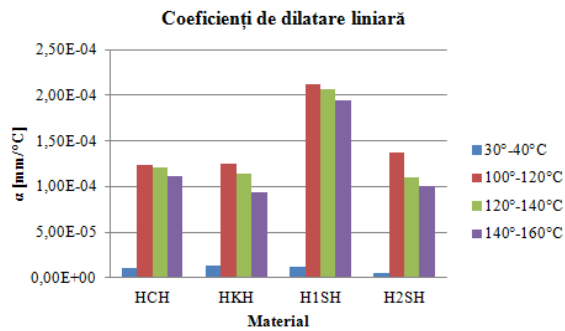
corespund coeficienților matricei aditivată MA2, datorită fibrelor scurte de sticlă și de carbon utilizate în componența matricii. Coeficienții celorlalte tipuri de matrice au prezentat valori descendente cu creșterea temperaturii.



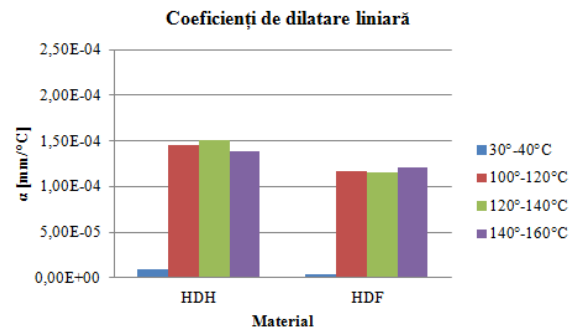
**Fig. 5.3.** Coeficienții de dilatare termică ai matricilor epoxidice, măsurați pe intervalele de temperatură 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.

În general, din analiza valorilor coeficientului de dilatare termică liniară al materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice omogenă cu orientarea fibrelor la 0° reprezentate grafic în fig. 5.8, se poate observa că laminatele hibride ce conțin în structura lor țesătură din fibră de sticlă 2S în combinație cu alte tipuri de țesături prezintă creșteri ale valorilor coeficienților comparativ cu laminatele hibride ce conțin în structura lor țesătură din fibră de sticlă 1S. Materialul compozit N24H face excepție, având straturi exterioare armate cu țesătură de sticlă 2S și alternate de trei straturi aramidice, se constată îmbunătățirea proprietăților termomecanice pe intervalele de lucru 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C, în condițiile în care, pentru materialele cu straturile exterioare formate din țesătură aramidică au fost înregistrate cele mai mici valori ale coeficientului de dilatare liniară.

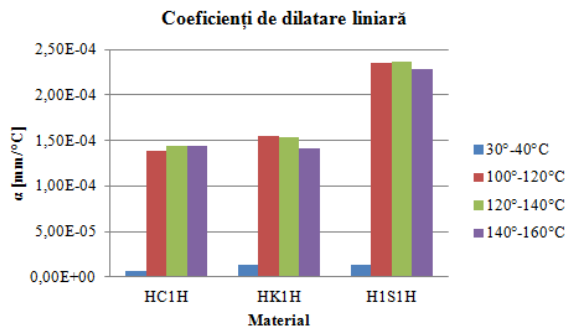
Comparativ cu rezultatele evaluate pentru materialele compozite de referință (cu armătură și matrice omogene și cu orientarea fibrelor la 0°), prin hibridizarea armăturii laminatelor au fost obținute performanțe superioare (stabilitate termo-dimensională crescută) pentru materialul hibrid N12H pe intervalele de lucru 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C și pentru materialul hibrid N13H pe intervalele de lucru 100°-120°C și 120°-140°C.



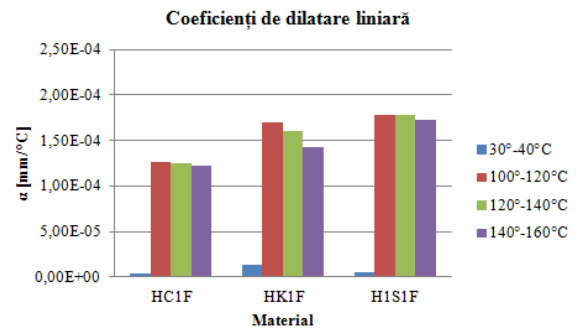
**Fig. 5.4.** Coeficienții de dilatare al compozitelor cu armătură și matrice omogenă cu orientarea fibrelor la 0° măsurați pe intervalele de lucru 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.



**Fig. 5.5.** Coeficienții de dilatare termică al compozitelor armate cu țesătură hibridă măsurați pe intervalele de temperatură 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.



**Fig. 5.6.** Coeficienții de dilatare termică al compozitelor cu armătură și matrice omogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri măsurați pe intervalele de temperatură 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.



**Fig. 5.7.** Coeficienții de dilatare termică al compozitelor cu armătură și matrice heterogenă cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri măsurați pe intervalele de temperatură 30°-40°C, 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.

Analizând valorile coeficienților de dilatare termică ai materialelor compozite hibride cu matrice omogenă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri, reprezentate grafic în fig. 5.10 și comparându-le cu valorile coeficienților de dilatare termică ai materialelor compozite cu armătură și matrice omogenă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri reprezentate grafic în fig. 5.6, se poate constata că materialul hibrid M6H a prezentat cele mai bune proprietăți termomecanice pe toate intervalele de lucru, materialul hibrid M2H pe intervalele de lucru 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C și materialul hibrid M1H pe intervalele 120°-140°C și 140°-160°C, având valorile coeficienților de dilatare termică cu mult mai reduse decât valorile minime evaluate pentru materialul cu armătură omogenă din țesătură de carbon HC1H.



Aditivarea rășinii epoxidice a provocat procesul de contractare a structurii materialelor hibride M5H și M6H în intervalul de lucru 30°-40°C, obținându-se coeficienți de dilatare termică negativi cu valoarea de  $-3.09E-06$  pentru materialul hibrid M5F și  $-1.30E-06$  pentru materialul hibrid M6F, iar în intervalele de lucru 120°-140°C și 140°-160°C s-a înregistrat o reducere a valorilor coeficienților materialului M5F, însă pentru materialul M6F s-au înregistrat valori ascendente. Matricea epoxidică heterogenă MF a îmbunătățit semnificativ proprietățile termomecanice ale materialului hibrid M3F pe toate intervalele de temperatură, dar materialul hibrid M4F a fost afectat cel mai mult prezentând cele mai ridicate valori ale coeficientului de dilatare liniară din această grupă de materiale hibride. Având în vedere că arhitectura materialelor compozite cu armătură hibridă N11H și M6H este asemănătoare, diferențiindu-se prin orientarea fibrelor straturilor, se observă că orientarea fibrelor straturilor la diverse unghiuri și aditivarea rășinii sunt eficiente.

### 5.3. Concluzii.

Pe baza proprietăților termomecanice ale materialelor, analizate în acest capitol, se pot spune următoarele:

- În cazul materialelor compozite de referință (cu armătură și matrice omogenă) se observă că prin mărirea densității țesăturii cu același tip de fibre se poate reduce coeficientul de dilatare termică pe toate intervalele de lucru;
- Orientarea fibrelor straturilor la diverse unghiuri afectează proprietățile termomecanice ale compozitelor cu armătură omogenă, rezultând reducerea valorilor coeficientului de dilatare termică în intervalul de temperatură 30°-40°C, dar conduce la creșterea valorilor în intervalele de temperatură 100°-120°C, 120°-140°C și 140°-160°C.
- Analizând rezultatele obținute pentru materialele cu armătură hibridă N11H și M6H, formarea laminatelor cu orientarea fibrelor straturilor la diverse unghiuri este eficientă pe toate intervalele de lucru din punctul de vedere al stabilității dimensionale;
- Prin hibridizarea armăturii materialelor compozite se pot obține laminate cu valori ale coeficienților de dilatare termică liniară mai reduse comparativ cu cele

minime ale materialelor compozite de bază cu armătură omogenă pe toate intervalele de temperatură, cum ar fi materialele hibride N12H și M6H;

- Prin aditivarea rășinii epoxidice pot fi formate materiale cu matrice stratificate care prezintă coeficienți de dilatare termică liniară negativi. Astfel materialele compozite heterogene cu orientarea fibrelor straturilor la diverse unghiuri M6F și M5F prezintă valori negative ale coeficienților pe intervalul de temperatură 30°-40°C, unde pentru materialul M6F a fost înregistrat coeficientul de dilatare termică cu valoarea -3,09E-06 și pentru materialul hibrid M5H valoarea -1,30E-06, datorită negrului de fum din componența matricii heterogene și a straturilor exterioare formate din țesătura de carbon.

- Matricea heterogenă MF a îmbunătățit semnificativ proprietățile termomecanice ale materialului hibrid M3F și ale materialului cu armătură omogenă H1S1F pe toate intervalele de lucru.

## Capitolul 6.

### **Analiza conductivității electrice a materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică.**

#### **6.1. Metoda experimentală de determinare a conductivității electrice a materialelor compozite.**

Deoarece materialele compozite armate cu țesături sunt utilizate în domeniul construcțiilor de aeronave, unde proprietăților electrice ale acestor tipuri de materiale sunt importante, a fost evaluată conductivitatea electrică materialelor compozite armate cu țesături și matrice epoxidică.

LCR-metrul oferă patru moduri de măsurare a parametrilor: R+Q (rezistența + factorul de calitate), L+Q (inductanța + factorul de calitate), C+D (capacitatea + 1/Q) și C+R (capacitatea + rezistența), care pot fi evaluați în timp alegând rata de măsurare și în funcție de frecvență (pe cele cinci frecvențe pre-setate ale aparatului - 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz și 100 kHz).

#### **6.2. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură omogenă.**

Materialele compozite armate cu țesătură de carbon au prezentat conductivitatea electrică cea mai ridicată comparativ cu celelalte materiale compozite și matrice epoxidice (atât pentru conductivitatea de suprafață cât și pentru cea de volum). Valorile parametrilor sunt, și în acest caz, dependente de frecvența semnalului de măsurare) - fig. 6.4. Materialele armate cu țesături aramidică și de sticlă au prezentat valori ale conductivității electrice similare cu cele ale matricei epoxidice, având în vedere că fibrele aramidice și cele de sticlă au o rezistență electrică foarte ridicată, aceste tipuri de fibre sunt utilizate în domeniul electrotehnic în calitate de izolatoare.

În cazul materialelor compozite armate cu țesătura hibridă, după cum se poate vedea în fig. 6.5, materialul cu matricea omogenă este un conducător de electricitate mai bun decât cel cu matricea heterogenă, prezentând valori constante pe tot domeniul

frecvențelor de măsurare, dar conductivitatea acestuia este mai redusă în comparație cu materialul HCH, datorită prezenței fibrelor aramidice și de sticlă în structura sa. Rezultă că aditivarea rășinii epoxidice a provocat creșterea semnificativă rezistivității electrice a compozitului armat cu țesătura modificată în special la frecvența de 1 kHz.

Orientarea fibrelor la diverse unghiuri nu afectează conductivitatea electrică a materialelor compozite armate cu țesătură aramidică și țesătură de sticlă, iar cea a compozitului armat cu țesătura de carbon s-a redus nesemnificativ. Aditivarea rășinii epoxidice cu scopul îmbunătățirii proprietăților electrice a contribuit la o reducere neînsemnată a valorilor conductivității electrice a tuturor materialelor cu armătură omogenă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri la valorile prezentate de matricile MF1 și MF2, doar materialul HC1H a suferit o descreștere mai accentuată a conductivității la frecvențele de 1 și 10 kHz (fig. 6.7).

### **6.3. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la 0°.**

Având în vedere conductivitatea ridicată a compozitelor cu armătură omogenă de carbon, proprietățile electrice ale materialelor compozite cu armătură hibridă depind de tipul țesăturilor straturilor exterioare, de numărul de straturi din țesătură de fibre de carbon cât și de amplasarea acestora în structura compozitelor.

În ceea ce privește proprietățile electrice de volum ale acestor materiale hibride conductivitatea electrică este influențată cel mai mult de numărul de straturi de carbon și tipul de țesătură de sticlă. Conform reprezentării grafice a datelor conductivității electrice se observă variația valorilor în funcție de frecvența de măsurare, astfel că, la frecvența de 1 kHz materialele N11H și N21H au conductivitatea electrică cea mai ridicată, la frecvența de 10 kHz compozitul N13H are conductivitatea electrică cea mai ridicată. Materialele N21H și N23H au comportament dielectric din cauza efectului produs de țesătura de sticlă 2S, iar la frecvența de 100 kHz toate materialele hibride cu matrice omogenă prezintă aceleași valori ale conductivității electrice.

Făcând o comparație cu rezultatele electrice obținute pentru materialele compozite cu armătură și matrice omogenă se poate concluziona că materialele hibride prezintă valori încadrate în intervalul de valori prezentate de materialele cu armătură

omogenă. Aditivarea rășinii epoxidice, ca și în cazul materialelor cu armătură omogenă, nu a influențat semnificativ proprietățile electrice ale compozitelor hibride, măbind puțin conductivitatea electrică de suprafață a materialelor hibride N13F și N23F, egalându-se valorile prezentate de aceste materiale cu materialele N12F, N22F, N14F și N24F, iar conductivitatea electrică de suprafață a materialului hibrid N21F prezentând valori invariabile pe întregul interval al frecvențelor de măsurare.

Analizând conductivitatea electrică de volum a materialelor hibride se observă același efect al aditivării rășinii ca și cazul conductivității electrice de suprafață și stabilizarea comportamentului electric al materialelor hibride N11F, N13F, N21F și N23F, caracterizat de creșterea liniară a valorilor prezentate de conductivitatea acestora pe întregul interval al frecvențelor de măsurare.

#### **6.4. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri.**

Ca și în cazul materialelor compozite hibride cu orientarea fibrelor la  $0^\circ$  ale căror proprietăți electrice au fost analizate mai sus, materialele hibride cu armătură omogenă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri cu straturile exterioare formate din lamine de carbon sau cu un număr mai mare straturi de carbon sunt mai bune conducătoare electric. Conductivitatea electrică de suprafață a materialelor M6H și M5H prezintă valori constante pe întregul interval de frecvențe, iar conductivitatea electrică de suprafață a celorlalte materiale hibride prezintă o creștere liniară a valorilor odată cu creșterea frecvenței de măsurare. Astfel cele mai bune din punctul de vedere al conducției electrice de suprafață, din această categorie de materiale hibride, sunt M6H la toate frecvențele și M4H la frecvența de 100 kHz. Dintre celelalte materiale hibride M5H la frecvențele de 1 și 10 kHz prezintă valori îmbunătățite, în timp ce, la frecvența de 100 kHz prezintă valori similare ale conductivității electrice cu cele ale materialelor hibride cu straturi exterioare formate din țesătură aramidică. Diferența dintre comportamentul electric ale materialelor hibride M5H și M6H se datorează numărului de straturi exterioare din țesătură de carbon, unde straturile exterioare ale materialului M6H conțin un număr mai mare de lamine din țesătură de carbon.

În ceea ce privește conductivitatea electrică determinată pe volum a materialelor hibride cu matrice omogenă și orientarea fibrelor la diverse unghiuri, cele mai mari valori au fost prezentate de materialul hibrid M6H, iar celelalte materiale hibride comportându-se electric asemănător. Toate materialele din această categorie prezintă conductivitate electrică de volum ascendentă cu creșterea frecvenței de măsurare. Comparând comportamentul electric al materialelor hibride cu matrice omogenă și orientarea fibrelor la unghiuri diferite cu cel al materialelor cu armătură și matrice omogenă, materialul hibrid M6H a prezentat o conductivitate electrică de suprafață mai bună decât cea a materialului cu armătură omogenă din țesătură de carbon HC1H și, de asemenea, conductivitatea electrică, atât de suprafață cât și de volum, a materialelor hibride cu straturile exterioare formate din țesătură aramidică sau din fibre de sticlă au prezentat valori mai ridicate decât cele ale materialelor cu armătură omogenă formate din aceleași tipuri de țesături.

Modificarea matricei epoxidice prin utilizarea combinațiilor de aditivi a redus semnificativ conductivitatea electrică a materialelor hibride M5F și M6F, astfel toate materialele hibride din această categorie comportându-se electric asemănător.

### **6.5. Conductivitatea electrică a materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice heterogenă MA.**

Pentru a înțelege comportamentul electric al materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă, au fost testate electric și matricele aditivate utilizate în structura acestor materiale. În fig. 6.14 sunt reprezentate grafic valorile conductivității electrice de suprafață și de volum ale matricii epoxidice omogene și ale matricelor epoxidice modificate, conform cărora se observă că toate matricele aditivate testate electric pe suprafață au comportament asemănător cu cel al matricei epoxidice nemodificate. Măsurătorile efectuate pe volum au prezentat valori ale conductivității electrice cele mai ridicate pentru matricea epoxidică omogenă la frecvența de 1 kHz, iar la frecvențele de 10 și 100 kHz au prezentat valorile cele mai ridicate pentru matricea omogenă împreună cu matricea modificată MA2, datorită prezenței fibrelor scurte de carbon în combinația de aditivi utilizată.

Ca și în cazul materialelor hibride studiate mai sus, straturile exterioare formate din țesătura de carbon și numărul acestor straturi influențează conductivitatea electrică a compozitelor și din această cauză materialele hibride 3A și 4A sunt mai bune conducătoare de electricitate decât materialele hibride 1A și 2A, datorită numărului mai mare de lamine din țesătura de carbon ale straturilor exterioare, cu excepția conductivității electrice de suprafață ale materialului 3A, care prezintă valori mai mici decât cele prezentate de materialul 1A la frecvența de 1 kHz, iar la frecvența de 10 kHz ambele materiale având comportament asemănător.

Având în vedere că orientarea fibrelor nu afectează proprietăților electrice ale compozitelor și matricile heterogene MF1 și MF2 reduc conductivitatea electrică (conform celor de mai sus) în acest caz tipurile de matrice aditivate utilizate au îmbunătățit proprietățile electrice ale hibridelor cu un număr mai mare de straturi din țesătură de carbon, dar mai semnificativ conductivitatea electrică măsurată atât pe suprafață cât și pe volum a materialului hibrid 4A cu orientarea fibrelor la diverse unghiuri. Materialele cu orientarea fibrelor la unghiuri diferite prezintă valorile maxime (materialul 4A) și minime (materialul 2A) ale conductivității electrice, astfel valorile evaluate pe suprafața materialelor fiind constante pe întregul interval de frecvențe, iar valorile maxime evaluate pe volum nu variază la frecvențele 1 și 10 kHz după care cresc la 100 kHz și cele minime sunt ascendente liniar.

## 6.6. Concluzii.

- Valorile conductivității electrice, evaluate din măsurătorile efectuate pe suprafață, au fost mai mari (ca ordin de mărime) comparativ cu cele evaluate din măsurătorile efectuate pe volum.

- Utilizarea negrului de fum în combinația de aditivi a matricelor heterogene nu a contribuit la îmbunătățirea conductivității electrice a matricii epoxidice omogene, prezentând valori similare cu aceasta. Matricea omogenă are conductivitate electrică de volum superioară. Matricea aditivată MA2 a avut același comportament electric determinat pe volum ca al matricii epoxidice omogene, datorită fibrelor scurte de carbon la frecvențele de 10 și 100 kHz.

- Utilizarea matricelor heterogene în structura materialelor compozite îmbunătățește rezistivitatea electrică a acestora, cu excepția matricii heterogene MA, care a îmbunătățit conductivitatea electrică, atât de suprafață cât și de volum, a materialului hibrid 4A.

- Carbonul fiind un bun conducător de electricitate, materialele cu armătură omogenă din țesătură de carbon și materialele hibride cu straturile exterioare formate din acest tip de țesătură au prezentat conductivitatea electrică cea mai ridicată.

- Materialele cu armătură omogenă din țesătură aramidică sau țesătură de sticlă sau materialele hibride cu straturile exterioare formate din această țesătură având o rezistivitate electrică mai mare decât cele armate cu țesătură de carbon, au prezentat conductivitate electrică ascendentă pe întregul interval al frecvențelor de măsurare.

- Orientarea fibrelor la unghiuri diferite nu afectează proprietățile electrice ale materialelor compozite.



## Capitolul 7.

### Concluzii finale și direcții de cercetare

Scopul principal al acestui studiu a fost formarea materialelor compozite cu armătură hibridă și matrice epoxidică heterogenă cu performanță ridicată la solicitările de impact.

Problema răspunsului materialelor compozite solictate la impact este una dintre cele mai frecvent studiate probleme, în special în cazul în care materialele proiectate sunt destinate aplicațiilor din industria aerospațială, cea navală și, din ce în ce mai acut, în industria autovehiculelor. În acest din urmă caz se caută soluții pentru materiale compozite cu rigiditate controlată – pentru protejarea persoanelor în cazul impactului – rigiditate ce poate fi controlată fie prin distribuția armăturilor, fie prin modificarea proprietăților polimerilor.

Cercetarea de față, bazată pe analiza unui număr considerabil de studii desfășurate în această direcție și pe studiul unor lucrări fundamentale ale pionierilor domeniului, urmărește analiza comportamentului la impact al plăcilor compozite armate cu țesături. Prin proiectarea cercetării am vizat, în primul rând formarea și analiza comportamentului la impact al unor materiale martor – armate cu același tip de țesătură și cu matrice polimerică (rășină epoxidică).

În vederea studierii posibilității de a obține date relevante despre starea materialului testat, am proiectat și format toate materialele cu câte 16 straturi de țesătură (din țesăturile prevăzute prin proiectare) cel de-al 17-lea strat urmînd a fi cel care să permită culegerea datelor. Am imaginat și a pregătit un tip hibrid de armătură, bazat pe o țesătură mixtă (fibre de carbon – fibre aramidice) cu o structură 2:1 în urzeală și 1:2 în bătaie (prima cifră reprezentînd numărul fasciculelor de fibre de carbon și a doua numărul fasciculelor din fibre aramidice). În această țesătură am înlocuit fiecare al doilea fascicul de fibre aramidice cu un fascicul de fibre de sticlă în care am inserat un fir de cupru stanat cu diametrul de 0.2 mm. Acest tip de țesătură hibridă a fost folosit ca strat median (al 9-lea) pentru toate materialele pe care le-am format.

O problemă externă de importanță pe care am avut-o în vedere și care este una de mare interes în ceea ce privește obținerea unor interfațe de calitate între fibre și matrice. Pentru aceasta, bazat pe experiența colegilor, am elaborat o tehnică de pregătire, în mai multe etape, a țesăturilor. Această tehnică presupune două etape de atac chimic al suprafețelor fibrelor (care să asigure mărirea suprafeței specifice a acestora) și o etapă de depunere (prin pulverizare) a unui strat subțire de polimer pe suprafețele țesăturilor (același polimer ca și cel care urmează să fie folosit ca matrice la formarea materialului).

Etapa de pregătire a țesăturilor mai are o consecință – vizată și aceasta din proiectare – stabilizarea țesăturilor în vederea manevrelor ce urmează a fi efectuate în timpul formării compozitelor (decupare, îmbibare cu ameste pre-polimeric, plasare în matriță). Pentru decuparea țesăturilor pregătite am proiectat toată gama de materiale ce urmau a fi formate și am stabilit numărul straturilor necesare din fiecare tip de țesătură și la fiecare orientare a fasciculelor de fibre.

La decupajul țesăturilor am ținut cont de faptul că, prin proiectare, dimensiunile optime ale plăcilor formate trebuiau să fie egale cu cele ale unui format A4. La stabilirea dimensiunilor am ținut cont de tipul de teste ce urmau a fi efectuate – de la teste termice, la teste mecanice trecând prin cele electromagnetice. Astfel metoda utilizată pentru studiul proprietăților electromagnetice ale materialelor (aleasă din trei metode disponibile) impune utilizare unor plăci de dimensiuni mari (cel puțin 200x200 mm) urmând ca celula de măsurare să fie plasată în diferite zone ale materialului. Testele de impact impun, de asemenea, utilizarea unor plăci cu dimensiuni comparabile cu cele de la testele electromagnetice. În plus trebuiau asigurate epruvete pentru teste de încovoiere, compresiune, stabilitatea dimensională.

Luând în calcul toate aceste aspecte și utilizând aplicația AutoCAD am reușit să optimizez dimensiunile plăcilor formate și, în plus, am realizat, pentru fiecare material în parte, conturul de debitare la mașina de debitat cu jet de apă de înaltă presiune, dat fiind faptul că standardul pentru testele de încovoiere în trei puncte dimensionează epruvetele în funcție de grosimea acestora.

După decuparea țesăturilor am pregătit matrițele pentru formarea materialelor - pregătire necesară pentru evitarea adeziunilor rășinii epoxidice la sticlă și pentru

asigurarea unei calități superioare a suprafețelor materialului (impuse de standardul pentru determinarea proprietăților electromagnetice). Această pregătire constă în aplicarea (pe sticla foarte bine curățată) a unui strat de demodelare din polipropilenă, prin intermediul cerurilor organice (ceară de parchet, de exemplu) la care trebuie asigurată extracția golurilor de aer dintre sticlă și folie și din izolarea zonei în care urmează să fie format materialul compozit printr-o garnitură care să asigure etanșitatea matriței după închidere. După mai multe teste cu diferite materiale am stabilit că cea mai eficientă metodă este de a utiliza un cordon poliuretanic folosit în special ca element de izolație al ferestrelor.

Am format fiecare material în parte procedând la îmbibarea fiecărui strat de țesătură cu amestecul pre-polimeric necesar și plasarea în matriță, conform secvenței planificate în proiectare. După închiderea matrițelor acestea au fost lăsate (în poziție verticală) pentru polimerizare la temperatura camerei și, în final au fost tratate termic, conform recomandărilor producătorului rășinii epoxidice, înainte de extracția materialelor din matrițe.

Pe baza analizei surselor bibliografice am hotărât, încă din etapa de proiectare a cercetării, formarea materialelor compozite armate cu țesături și cu matrice epoxidice modificate. Pentru aceasta am stabilit natura substanțelor ce urmau a fi utilizate (amidon - pentru evitarea formării aglomerărilor celorlalte substanțe, negru de fum – pentru ridicarea performanțelor electrice ale materialelor, ferită – pentru îmbunătățirea proprietăților electromagnetice, alături de firele de cupru din stratul median, pulbere aramidică – pentru îmbunătățirea comportamentului la impact, fibre scurte de carbon și de sticlă – pentru creșterea densității matricei cu efect în disiparea energiei).

În proiectarea materialelor am ținut cont de experiența altor autori în ceea ce privește secvențele de armare (cu diferite țesături și diferite matrice modificate) dar am decis nu numai secvențializarea armăturilor ci și secvențializarea matricelor (care au la bază același polimer) pentru a identifica eventualele posibilități de control al proprietăților materialelor, mai ales în ceea ce privește comportamentul la impact.

Pentru testele de impact am făcut teste preliminare pentru în vederea stabilirii valorii energiei impactorului cu scopul de a obține rezultate relevante pentru cercetare. Astfel, am decis ca testele – pentru toate materialele să fie efectuate la o valoare de 90

J a energiei impactorului deși, pentru unele materiale, am realizat și teste la o valoare de 45 J a energiei (în acest ultim caz rezultatele testelor nu erau totdeauna relevante). Pentru analiza zonelor de impact am folosit tehnica tomografică ceea ce a permis identificarea modurilor de eșec (pentru fiecare material în parte) și relevarea efectului schimbării orientării fibrelor sau efectul modificării matricei.

Comparând rezultatele obținute pentru materialele compozite supuse la impact cu energia de 90 J, se observă că din cele 44 de materiale armate cu țesături, 11 laminate (H2SH, HK1F, HDH, HDF, N24H, N23F, N24F, 1A, 2A, 3A și 4A) nu au fost perforate de către impactor și dintre aceste materiale 4 laminate (H2SH, N24H, N23F și N24F) au prezentat rezistență ridicată la impact datorită țesăturii din fibre de sticlă de tipul 2S, materialele HDH și HDF datorită țesăturii modificate, materialul HK1F datorită țesăturii aramidice a cărei performanță la impact a fost îmbunătățită prin aditivarea rășinii epoxidice și materialele 1A, 2A, 3A și 4A datorită combinațiilor de matrici aditivate din componența matricii heterogene MA.

Conform scopului propus pentru acest studiu dintre materialele cu armătură hibridă și matrice heterogenă, cea mai bună performanță la impact a fost prezentată de materialul N23F, care a prezentat și cel mai bun răspuns la solicitările de impact cu 45J. În ceea ce privește solicitările de impact cu energia de 45J nici unul dintre materialele testate nu a fost perforat.

Materialele armate cu țesătură de carbon și cele armate cu țesătură din fibre de sticlă de tipul 1S au prezentat rezistența la impact cea mai redusă, având un comportament asemănător. Performanța materialelor armate cu țesătură aramidică utilizată la formarea materialelor din acest studiu a fost îmbunătățită prin orientarea fibrelor la unghiuri diferite și utilizarea aditivilor în componența matricii epoxidice. Materialele armate cu țesătură din fibre de sticlă de tipul 2S au prezentat caracteristici de impact esențial mai bune decât materialele armate cu țesătură aramidică.

În ceea ce privește comportamentul la impact al materialelor cu armătură hibridă, s-a determinat că rezistența la impact depinde esențial de proprietățile straturilor exterioare. În cazul materialelor hibride studiate în această lucrare, cele cu straturi exterioare formate din țesătură de sticlă de tipul 2S au prezentat cele mai bune

rezultate, dar performanța acestora a depins semnificativ de proprietățile și aranjamentul straturilor interioare cât și de proprietățile matricii epoxidice utilizate.

Din grupa materialelor cu armătură hibridă și matrice epoxidică omogenă, materialul hibrid N23H a fost penetrat total datorită alternării straturilor exterioare din țesătura de sticlă 2S cu straturi din țesătură de carbon, iar materialul hibrid N24H a prezentat cel mai bun răspuns la impact datorită alternării straturilor exterioare din țesătura de sticlă 2S cu straturi din țesătură aramidică. Dar prin modificarea matricii epoxidice utilizând diferite combinații de aditivi, s-a observat că performanța la impact a materialului hibrid N23F a fost îmbunătățită esențial, acesta prezentând cele mai ridicate caracteristici de impact, în timp ce rezistența materialului hibrid N24F a fost redusă, această modificare a proprietăților identificându-se și în cazul solicitărilor de impact cu energia de 45J.

În general, analizând rezultatele obținute pentru materialele armate cu țesături și matrice stratificată, s-a determinat că utilizarea combinațiilor de aditivi în componența matricii epoxidice a fost benefică în privința rezistenței materialelor la impact, luând în considerație caracteristicile de impact cu energia de 90J ale materialelor HK1F, HDF, N23F, 1A, 2A, 3A și 4A și modurile de deteriorare ale materialelor hibride supuse la solicitările de impact cu energia de 45J. Comparând răspunsurile la impact cu energia de 90 J ale materialelor cu armătură hibridă și matrice heterogenă, s-a observat că materialele cu matrice epoxidică heterogenă MA a prezentat rezultate mai bune, doar că în timpul impactului proprietățile matricii domină provocând apariția deteriorărilor detectabile cum ar fi fisurarea matricii și delaminarea, începându-se înainte ca forța de contact să atingă valoarea maximă, fiind identificată în secțiunea forței incipiente  $F_i$  a curbelor forță-deformare și forță-timp.

În ceea ce privește orientarea fibrelor s-a determinat că materialele cu orientarea fibrelor la unghiuri diferite au prezentat o capacitate de absorbție a energiei de impact mai ridicată comparativ cu capacitatea materialelor cu orientarea fibrelor la  $0^\circ$ , ceea ce nu prezintă un avantaj în cazul solicitărilor de impact cu viteză mică, deoarece nu permite impactorului să păstreze cantitatea de energie necesară pentru ricoșarea acestuia de la suprafața plăcii, însă orientarea fibrelor la unghiuri diferite a fost

benefică doar în cazul materialului cu armătură aramidică omogenă și matrice heterogenă HK1F.

Cu ajutorul imaginilor tomografice efectuate în secțiune la fiecare 5 mm ai zonelor deteriorate la impact cu energia de 45J a materialelor hibride cu matrice heterogenă s-au identificat deteriorări mai grave în cazul materialelor cu orientarea fibrelor la unghiuri diferite datorită extinderii delaminărilor în direcția fibrelor, dar și materialele hibride cu matrice heterogenă 2A și 4A sollicitate la impact cu energia de 90J au prezentat rezistență mai redusă comparativ cu cea a materialelor hibride 1A și 3A datorită orientării fibrelor.

În cazul solicitărilor de impact cu energia de 90J toate materialele neperforate au fost deteriorate prin forfecare transversală, prezentând ruperea matricii, ruperea și scoaterea fibrelor și despicarea țesăturilor în cele două direcții ale fibrelor (urzeala și bătaia), iar în cazul solicitărilor de impact cu energia de 45J s-au identificat deformări ale materialelor hibride N22F, N23F, N24H și N24F prin tracțiune prezentând delaminare în direcție interlaminară, dintre care materialul N23F a suferit cele mai mici delaminări, iar celelalte materiale fiind deteriorate prin combinarea deformărilor la tracțiune și la forfecare sau doar forfecare transversală.

În privința proprietăților termomecanice ale materialelor studiate în această lucrare s-a determinat că prin utilizarea țesăturilor cu densități mai mari, având în vedere tipurile de țesături din fibre de sticlă utilizate, se mărește stabilitatea dimensională a materialelor compozite (dilatarea termică redusă). Valorilor coeficienților de dilatare termică fiind, în acest caz, mai mici pe toate intervalele de temperatură. Prin formarea materialelor cu armătură hibridă se pot obține materiale cu valori ale coeficienților termici mai mici comparativ cu valorile minime prezentate de coeficienții materialelor cu armătură omogenă, ca în cazul materialelor hibride N12H și M6H.

Orientarea fibrelor la diferite unghiuri afectează proprietățile termomecanice, astfel că în intervalul de lucru 30°-40°C s-a determinat reducerea valorilor prezentate de coeficienții de dilatare termică, iar pe celelalte intervale s-a determinat mărirea acestor valori, dar prin aditivarea matricii epoxidice s-au obținut valori negative pentru materialele hibride M5F (-1,30E-6) și M6F (-3,09E-6) datorită straturilor exterioare formate din țesătură de carbon și negrului de fum utilizat în componența matricii

heterogene, de asemenea, au fost îmbunătățite semnificativ proprietățile termomecanice ale materialelor M3F și H1S1F.

Conductivitatea electrică a materialelor este dependentă foarte mult de straturile din țesătură de carbon, deoarece utilizarea negrului de fum și a feritei în combinațiile de aditivi ale matricelor heterogene cât și utilizarea firelor de cupru în stratul median al materialelor nu au îmbunătățit acest parametru electric, iar orientarea fibrelor la diferite unghiuri nu au influențat proprietățile electrice.

Direcțiile viitoare de cercetare:

- Testarea materialelor compozite armate cu țesături și matrice termorigide la solicitări de impact cu diferențe mari de temperatură, pentru a determina influența tensiunilor la comprimare și dilatare, care apar în structura materialelor la diferențele de temperatură, asupra rezistenței la impact;
- Realizarea încercărilor de identificare a zonelor deteriorate la impact pe baza proprietăților electrice ale materialelor compozite;
- Realizarea testelor mecanice de compresiune, încovoiere și tracțiune a plăcilor solicitate la impact pentru determinarea tensiunilor reziduale;
- Realizarea testelor la oboseală a plăcilor testate la impact pentru a analiza propagarea delaminării.
- Realizarea testelor de uzură, având în vedere că procesul de penetrare a impactorului în structura materialului implică apariția forțelor de frecare;
- Simularea prin metoda elementului finit a solicitării la impact a materialelor compozite, care urmează a fi studiate.

---

## Referințe bibliografice

- [1] **Aarthy, S., Velmurugan, T.,** *Investigation of Impact Performance of Glass/Epoxy Laminates*, International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET), Vol. 2, Issue 2, ISSN 2319-1058, 2013.
- [2] **Abrate, S.,** *Ballistic Impacts on Composite and Sandwich Structures*, Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures, Vol. IV, pp. 465-501, 2010.
- [3] **Abrate, S.,** *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 13 978-0-521-47389-7, 1998.
- [4] **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.
- [5] **Afanas'eva, S. A., Belov, N. N., Biryukov, Yu. A., Burkin, V. V., Zakharov, V. M., Ishchenko, A. N., Skosyrskii, A. V., Tabachenko, A. N., Khorev, I. E., Yugov, N. T.,** *Investigation of Shock-Wave Phenomena in Composite Materials*, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 84, No. 1, January, 2011.
- [6] **Akin, C., Şenel, M.,** *An Experimental Study of Low Velocity Impact Response for Composite Laminated Plates*, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 21, Nisan, 2010.
- [7] **Akovali, G., Uyanik, N.,** *Handbook of Composite Fabrication*, Rapra Technology Limited, ISBN 1-58957-263-4, 2001.
- [8] **Aktas, M., Balcioglu, H.E., Aktas, A., Turker, E., Deniz, M.E.,** *Impact and post impact behavior of layer fabric composites*, Composite Structures 94, pp. 2809-2818, 2012.
- [9] **Aktay, L., Johnson, A.F.,** *FEM/SPH Coupling Technique for High Velocity Impact Simulations*, Computational Methods in Applied Sciences, Vol. 5, Advances in Meshfree Techniques, pp. 147-167, 2007.
- [10] **Al-Hartomy, O.A., Al-Solamy, F., Al-Ghamdi, A., Dishovsky, N., Ivanov, M., Mihaylov, M., El-Tantawy, F.,** *Influence of Carbon Black Structure and Specific Surface Area on the Mechanical and Dielectric Properties of Filled Rubber Composites*, International Journal of Polymer Science, 2011.
- [11] **Atas, C., Sevim, C.,** *On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam*, Composite Structures 93, pp. 40-48, 2010.
- [12] **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.
- [13] **Banthia, N., Mindess, S., Bentur, A., Pigeon, M.,** *Impact Testing of Concrete Using a Drop-weight Impact Machine*, Experimental Mechanics, 1989.
- [14] **Belingardi, G., Vadori, R.,** *Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates*, International Journal of Impact Engineering 27, pp. 213-229, 2002.
- [15] **Bland, P., Chollacoop, N.,** *Experimental Observations of Mass and Velocity Parametric Sweeps of Impact Regime Boundaries*, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 18-20 October 2006.
- [16] **Breen, Ch., Guild, F., Pavier, M.,** *Impact of thick CFRP laminates: the effect of impact velocity*, Composites: Part A36, pp. 205-211, 2005.
- [17] **Bria, V.,** *Contribuții la Studiul Proprietăților Mecanice ale Materialelor Compozite Armate cu Țesături și Matrice Epoxidică Aditivată cu Amidon*, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, România, 2012.
- [18] **Cartie, D.D.R., Irving, P.E.,** *Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP*, Composites: Part A 33, pp. 483-493, 2002.
- [19] **Chawla, K. K.,** *Fibrous Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0-521-57079-4, 1998.
- [20] **Chelluru, S. K.,** *Finite Element Simulations of Ballistic Impact on Metal and Composite Plates*, Andhra University, India, 2007.
- [21] **Chretien, G.,** *Materiaux composites a matrice organique*, Technique et Documentation, France, 2008.



- 
- [22] **Cîrciumaru, A.**, *Contribuții la studiul proprietăților electrice și mecanice ale compozitelor armate cu țesături și matrice din epoxi aditivat*, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, România, 2009.
- [23] **Crystic**, *Composites Handbook*, Scott Bader Company Limited, 2005.
- [24] **Deborah, D.**, *Applied Material Science: Applications of Engineering Materials in Structural, Electronic, Thermal and Other Industries*, CRC Press LLC, USA, ISBN 0-8493-1073-3, 2001.
- [25] **Deborah, D.**, *Composite Materials: Science and Applications*, Second Edition, Elsevier, ISBN 978-1-84882-830-8, 2010.
- [26] **DeFrancisci, G. K.**, *High Energy Wide Area Blunt Impact on Composite Aircraft Structures*, A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Structural Engineering, University of California, San Diego, 2013.
- [27] **Dodu, Ar., Preda, C., Butnaru, R., Visileanu, E., Dan, D., Călin, L., Greavu, V., Grigoraș, V., Oceanu, V., Gherman, St.**, *Manualul inginerului textilist*, vol.1, Ed. AGIR, București, ISBN 973-8466-10-5, 2002.
- [28] **Ellis, B.**, *Chemistry and Technology of Epoxy Resin*, 1 edition, ISBN 0-7514-0092-5, Chapman & Hall, 1993.
- [29] **Ellis, R. L.**, *Ballistic impact resistance of graphite epoxy composites with shape memory alloy and extended, chain polyethylene spectra tm hybrid components*, Master of Science In Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, 1996.
- [30] **Esrail, F., Kassapoglou, Ch.**, *An efficient approach for damage quantification in quasi-isotropic composite laminates under low speed impact*, *Composites: Part B* 61, pp. 116-126, 2014.
- [31] **European Standard EN ISO 6603-1: 2000.**,
- [32] **European Standard EN ISO 6603-2: 2000.**,
- [33] **Farooq, U., Myler, P.**, *Efficient computational modelling of carbon fibre reinforced laminated composite panels subjected to low velocity drop-weight impact*, *Materials and Design* 54, pp. 43-56, 2014.
- [34] **Farooq, U., Myler, P.**, *Ply Level Failure Prediction of Carbon Fibre Reinforced Laminated Composite Panels Subjected to Low Velocity Drop-Weight Impact Using Adaptive Meshing Techniques*, University of Bolton, UK, 2014.
- [35] **Ferreira, R.T.L., Donadon, M.V., Hernandez, J.A.**, *Structural Optimization of a Composite Plate subjected to a Small Mass Impact*, Second International Conference on Engineering Optimization, Lisabona, Portugalia, 2010.
- [36] **Ganesh Babu, M., Velmurugan, R., Gupta, N. K.**, *Energy absorption and ballistic limit of targets struck by heavy projectile*, *Latin American Journal of Solids and Structures* 3, pp. 21-39, 2006.
- [37] **Garnier, Ch., Pastor, M.-L., Lorrain, B., Pantalé, O.**, *Fatigue behaviour of impacted composite structures*, *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 443-450, ISSN 0263-8223, 2013.
- [38] **Gonçalves da Silva, M.A., Chiorean, C.G., Cișmașiu, C.**, *Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates*, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 31, Issue 3, 2005.
- [39] **Gonzalez, E.V., Maimi, P. Camanho, P.P., Turon, A., Mayugo, J.A.**, *Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates*, *Composite Structures* 94, pp. 3364-3378, 2012.
- [40] **Guan, Zh., Yang, Ch.**, *Low-Velocity Impact and Damage Process of Composite Laminates*, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 07, 2002.
- [41] **Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J.**, *Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites*, *Composite Structures* 69, pp. 396-406, 2005.
- [42] **Gustin, J., Mahinfalah, M., Nakhaie Jazar, G., Aagaah, M.R.**, *Low-velocity Impact of Sandwich Composite Plates*, *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 6, 2004. Society for Experimental Mechanics, Vol. 44, No. 6, 2004.
- [43] **Hexcel**, *Technical Fabrics Handbook*, HexForce Reinforcements, U.S.A., FM 93570, 2010.
- [44] **Hiel, C., Dittman, D., Oshai, O.**, *Composite sandwich construction with syntactic foam core: A practical assessment of post-impact damage and residual strength*, *Composites*, Vol. 24, Nr. 5, pp. 447-450, 1993.
-

- 
- [45] **Hiel, C., Oshai, O.**, *Low and High Velocity Impact Response of Thick Hybrid Composites*, NASA Ames Research Center, N94-16837, pp. 1149-1159.
- [46] **Hosur, M.V., Abdullah, M., Jeelani, S.**, *Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites*, *Composite Structures* 67, pp. 253-262, 2005.
- [47] **Imielinska, K., Guillaumat, L., Wojtyra, R., Castaings, M.**, *Effects of manufacturing and face/core bonding on impact damage in glass/polyester-PVC foam core sandwich panels*, *Composites: Part B* 39, pp. 1034-1041, 2008.
- [48] **Ishai, O., Hiel, C.**, *Damage Tolerance of a Composite Sandwich with Interleaved Foam Core*, *Journal of Composites Technology & Research, JCTRER*, Vol. 14, Nr. 3, pp. 155-168, 1992.
- [49] **Ismail, H., Ahmad, Z.**, *Effect of a Multifunctional Additive on Curing Characteristics and Mechanical Properties of Carbon Blacks Filled Natural Rubber Compounds*, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 5, Nr. 3, 1996.
- [50] **Johnson, A.F., Pentecôte, N.**, *Modelling impact damage in double-walled composite structures*, VIII International Conference on Computational Plasticity, CIMNE, Barcelona, 2005.
- [51] **Kadlec, M., Růžek, R., A.**, *Comparison of Laser Shearography and C-Scan for Assessing a Glass/Epoxy Laminate Impact Damage*, *Applied Composite Materials*, Online First™, 15 July 2011.
- [52] **Kalay, Y. E.**, *Low Velocity Impact Characterization of Monolithic and Laminated AA 2024 Plates by Drop Weight Test*, Middle East Technical University, Turkish, 2003.
- [53] **Kar, R. J.**, *Composite Failure Analysis Handbook*, Volume II - Technical Handbook, Part 1 - Procedures and Techniques, California, USA, 1992.
- [54] **Karahan, M., Kuş, A., Eren, R.**, *An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics*, *International Journal of Impact Engineering* 35, pp. 499-510, 2008.
- [55] **Kaw, A. K.**, *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor&Francis Group, ISBN 0-8493-1343-0, 2006.
- [56] **Kevlar**, *Technical Guide. Kevlar. Aramid fiber*, DuPont, U.S.A., H-77848, 2000.
- [57] **Kim, I., Jang, M., Lee, S., Hah, S.**, *Detection and characterization of high-velocity impact damage in composite laminates using smart, sensor signals*, 17th International Conference on Composite Materials, ICCM-17, 2009.
- [58] **Lamberson, L. E.**, *Dynamic Optical Investigations of Hypervelocity Impact Damage*, California Institute of Technology, USA, 2010.
- [59] **Lamberson, L.E., Rosakis, A.J., Eliasson, V.**, *In-situ Optical Investigations of Hypervelocity Impact Induced Dynamic Fracture*, *Dynamic Behavior of Materials*, Vol. 1, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics, pp 31-37, 2011.
- [60] **Loikkanen, M., Powell, D.**, *Jet engine rotor fragment impact on composite panels*, *Journal of Structural Mechanics*, Vol. 40, Nr. 4, pp. 80 - 94, 2007.
- [61] **Maier, Al., Schmidt, R., Oswald-Tranta, B., Schledjewski, R.**, *Non-Destructive Thermography Analysis of Impact Damage on Large-Scale CFRP Automotive Parts*, *Materials* 7, pp. 413-429, 2014.
- [62] **Mallick, P. K.**, *Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-8493-4205-9, 2008.
- [63] **Matthewson, M.J., Gorham, D. A.**, *An investigation of the liquid impact properties of a GFRP radome material*, *Journal of Materials Science*, Vol. 16, Nr. 6, pp. 1616-1626, 1981.
- [64] **Morgan, M.**, *Carbon Fibers and Their Composites*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-8247-0983-9, 2005.
- [65] **Mouritz, A.P., Gibson, A.G.**, *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, The Netherlands, ISBN-13 978-1-4020-5356-6, 2006.
- [66] **Nilsson, E.**, *Residual Strength Prediction of Composite Laminates Containing Impact Damage*, Department of Mechanical Engineering, Master Thesis in Solid Mechanics, Linköping University, Sweden, 2005.
- [67] **Olsson, R.**, *Analytical models for small mass impact on plates considering delamination growth*, 20th International Annual SICOMP Conference Pitea, Suedia, 8 iunie 2009.
-

- 
- [68] **Olsson, R.**, *Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates*, Composites: Part A 32, pp. 1207-1215, 2001.
- [69] **Olsson, R.**, *Experimental validation of delamination criterion for small mass impact*, 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japonia, 2007.
- [70] **Olsson, R.**, *Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates*, Composites: Part A 31, pp. 879-887, 2000.
- [71] **Olsson, R.**, *Simplified Theory for Contact Indentation of Sandwich Panels*, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1994.
- [72] **Olsson, R., Donadon, M.V., Falzon, B.G.**, *Delamination threshold load for dynamic impact on plates*, International Journal of Solids and Structures 43, pp. 3124-3141, 2006.
- [73] **Padaki, N.V., Alagirusamy, R., Deopura, B.L., Sugun, B.S., Fangueiro, R.**, *Low velocity impact behavior of textile reinforced composites*, Indian Journal of Fibre&Textile Research, Vol. 33, pp. 189-202, 2008.
- [74] **Pascault, J.P., Williams, R.J.J.**, *Epoxy Polymers*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, ISBN: 978-3-527-32480-4, 2010.
- [75] **Peters, S. T.**, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, ISBN 0-412-54020-7, 1998.
- [76] **Pham, H. Q., Marks, M. J.**, *Epoxy resins, Encyclopedia Of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, pp. 678-804, ISBN 978-0-471-44026-0, 2002.
- [77] **Prentice, H.J., Proud, W.G., Walley, St.M., Field, J.E.**, *Optical techniques for the investigation of the ballistic impact of thin plates*, International Journal of Impact Engineering 38, pp. 849-863, 2011.
- [78] **Qiu, A., Fu, K., Lin, W., Zhao, C., Tang, Y.**, *Modelling low-speed drop-weight impact on composite laminates*, Materials and Design 60, pp. 520-531, 2014.
- [79] **Rastorguev, G.I., Snisarenko, S.I.**, *Physical relations for problems of impact loading and unsteady deformation of composite structures*, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 50, Nr. 1, pp. 155-162, 2009.
- [80] **Renard, J.**, *Elaboration, microstructure et comportement des materiaux composites a matrice polymere*, Lavoisier, France, ISBN 2-7462-0955-1, 2005.
- [81] **Reyne, M.**, *Technologie des composites*, 2-e edition, Edition Hermes, Paris, ISBN 2-86601-455-3, 1995.
- [82] **Santos, M.J., Santos, J.B., Amaro, A.M., Neto, M.A.**, *Low velocity impact damage evaluation in fiber glass composite plates using PZT sensors*, Composites: Part B 55, pp. 269-276, 2013.
- [83] **Sayer, M., Bektas, N.B., Sayman, O.**, *An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates*, Composite Structures 92, pp. 1256-1262, 2010.
- [84] **Schoeppner, G.A., Abrate, S.**, *Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates*, Composites: Part A 31, pp. 903-915, 2000.
- [85] **Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F.**, *Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries*, Materials and Design 52, pp. 67-77, 2013.
- [86] **Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., Raju, B.B.**, *Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites*, Composites, Part A, Nr. 40, pp. 1090-1110, 2009.
- [87] **Shukla, A., Grogan, J., Tekalur, S., Bogdanovich, A., Coffelt, R.**, *Ballistic Resistance of 2D & 3D Woven Sandwich Composites*, Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials, Part 6, pp. 625-634, 2005.
- [88] **Sugun, B.S., Rao, R.M.V.G.K.**, *Impactor Mass effects in polymer Matrix Composites under Low Velocity Conditions: A Repeated Drops Test Approach*, International Journal of Mechanical Engineering and Materials Sciences 2, pp. 49-56, 2009.
- [89] **Tagarielli, V.L., Deshpande, V.S., Fleck, N.A.**, *The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact*, International Journal of Solids and Structures 44, pp. 2442-2457, 2007.
- [90] **Taylor, R. P.**, *Fibre composite aircraft – capability and safety*, Australian Transport Safety Bureau, ISBN 978-1-921490-33-0, 2008.
- [91] **Vaidya, U.K., Deka, L.J.**, *Single and Multisite Impact Response of S2-Glass/Epoxy Balsa Wood Core Sandwich Composites*, Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures, Vol. IV, pp. 541-569, 2010.
-

- 
- [92] **Vaidya, U.K., Pillay, S., Magrini, M., Mantena P.R.,** *Ballistic Impact Testing of Balsa, PVC Foam, Glass Reinforced Polyurethane Core Sandwich Structures*, ICCM 17, Edinburgh, UK, 27-31 July 2009.
- [93] **Van der Vegt, A.K.,** *From polymers to plastics*, DUP Blue Print, The Netherlands, 2002.
- [94] **Wallenberger, F.T., Watson, J.C., Li, H.,** *ASM Handbook. Constituent Materials. Glass Fibers*, ASM International, Composites, Vol. 21, 2001.
- [95] **Wang, B., Xiong, J., Wanga, X., Maa, L., Zhang, G.Q., Wua, L.Z., Feng, J.C.,** *Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact*, *Materials and Design* 50, pp. 140-148, 2013.
- [96] **Wischmann, B., Ahmt, T., Bandsholm, O., Blennow, A., Young, N., Jeppesen, L., Thomsen, L.,** *Testing properties of potato starch from different scales of isolations—A ringtest*, *Journal of Food Engineering* 79, pp. 970-971, 2007.

### Conferințe

**1. Marina Bunea**, Iulian-Gabriel Bîrsan, Adrian Cîrciumaru, Vasile Bria, *Electromagnetic Behavior of Fabric Reinforced Filled Epoxy Plate*, Conferința Științifică a Școlilor Doctorale, ediția a II-a, Universitatea "Dunărea de Jos" Galați. 15-16 Mai 2014.

### Publicații

**1. Victorița Ștefănescu, Marina Bunea**, Adrian Cîrciumaru, *Impact Analysis of Fabric Reinforced Plates*, Materiale Plastice, Vol. 52, No. 2, pp. 198-203, 2015.

**2. Marina Bunea**, I. Bosoancă, R. Bosoancă, M. Bodor, Adrian Cîrciumaru, *Bending and Compressive Properties of Fabric Reinforced Composites*, acceptată spre publicare în Materiale Plastice, Vol. 52, No. 3, 10.06.2015.

**3. Marina Bunea**, Vasile Bria, Adrian Cîrciumaru, Iulian-Gabriel Bîrsan, *The unusual electromagnetic properties of fabric reinforced epoxy composites*, acceptată spre publicare în The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati, Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science, No. 1, ISSN 1453 – 083X.

**4. Iulian-Gabriel Bîrsan, Marina Bunea**, G. Miha, A. Cîrciumaru, *The electromagnetic properties of hybrid composites*, acceptată spre publicare în The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galati, Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science, No. 2, ISSN 1453 – 083X.