

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



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

COMPORTAMENTUL COMPOZITELOR CU ȚESĂTURI MULTIAXIALE DIN FIBRE DE STICLĂ LA IMPACT DE VITEZĂ MICĂ

Doctorand Iulian PĂDURARU

Coordonator științific
prof. dr. ing. Lorena DELEANU

Seria I 6: Inginerie Mecanică nr. 69

Galați
2023

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



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

COMPORTAMENTUL COMPOZITELOR CU ȚESĂTURI MULTIAXIALE DIN FIBRE DE STICLĂ LA IMPACT DE VITEZĂ MICĂ

Doctorand Iulian Păduraru

| | |
|-------------------------------|--|
| Președinte | Prof. univ. dr. fiz. Luminița MORARU Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați |
| Conducător științific, | Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați |
| Referent Oficial | Prof. univ. dr. ing. Anton HADĂR Universitatea POLITEHNICA București |
| Referent Oficial | Prof. univ. dr. ing. Simion HARAGĂȘ Universitatea TEHNICĂ din ClujNapoca |
| Referent Oficial | Prof. univ. dr. fiz. Gabriel MURARIU Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați |

Seria I 6: Inginerie Mecanică nr. 69
Galați
2023

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**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agicultură și dezvoltare rurală**

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**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

MULȚUMIRI

Doresc să exprim sincere mulțumiri celor care m-au sprijinit și îndrumat pe parcursul elaborării tezei mele de doctorat.

În momentul în care am pornit în această călătorie academică a realizării tezei de doctorat cu tema „Comportamentul compozitelor cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă la impact de viteză mică”, nu aș fi putut anticipa că voi avea privilegiul de a lucra sub îndrumarea doamnei profesor doctor inginer Lorena Deleanu. Astăzi, în momentul încheierii acestei etape remarcabile a vieții mele, doresc să vă adresez cele mai sincere mulțumiri.

În mod special, vreau să exprim recunoștința mea pentru sprijinul constant, înțelepciunea și îndrumarea dumneavoastră profesionistă. Cu pasiunea și devotamentul dumneavoastră față de domeniul de cercetare, ați reușit să mă inspirați și să mă ghidați pe întregul parcurs al acestei teze de doctorat. Cu răbdare și încredere, ați înțeles direcția în care doream să merg cu acest studiu și ați fost mereu acolo pentru a-mi oferi sfaturi neprețuite și încurajări motivaționale. Reușita finalizării acestei teze într-un an se datorează în mare măsură susținerii dumneavoastră, și pentru asta vă sunt profund recunoscător.

În egală măsură, doresc să adresez sincere mulțumiri distinșilor referenți oficiali prof. dr. ing. Anton Hadăr, prof. dr. ing. Simion Haragâș, prof. dr. fiz. Gabriel Murariu, prof. dr. fiz. Luminița Moraru, precum și tuturor membrilor comisiei de îndrumare, a căror expertiză și sfaturi au contribuit în mod semnificativ la dezvoltarea acestei teze de doctorat: conf. dr. ing. Constantin Georgescu și conf. dr.ing. Daniel Ganea.

Vreau să menționez colaborarea și sprijinul oferit de Universitatea Politehnica din București prin intermediul domnului șef de lucrări dr. ing. Horia Petrescu, Institutul Național de Cercetări Aerospațiale "Elie Carafoli" - INCAS București și INAS Craiova pentru recomandările privind modelarea în Ansys Explicit Dynamics. Fără susținerea și resursele oferite de aceste instituții de învățământ și cercetare, acest studiu nu ar fi fost posibil.

De asemenea, aș dori să transmit sincere mulțumiri și către dr. ing. George Ghiocel Ojoc pentru ajutorul și sprijinul său neîntrerupt pe parcursul întregului proiect. Colaborarea noastră a contribuit esențial la succesul acestei cercetări, iar prezența sa a fost o sursă importantă de inspirație. Mulțumesc doamnei șef de lucrări dr. fiz. Alina Cantaragiu Ceoromila pentru imagini deosebite, obținute cu ajutorul microscopului electronic din cadrul Universității "Dunărea de Jos".

Nu pot încheia fără a menționa și susținerea familiei mele, care mi-a fost alături pe tot parcursul acestei călătorii academice și m-a încurajat să merg mai departe în momentele dificile.

Sper că rezultatele acestui studiu vor aduce contribuții semnificative în domeniul cercetării materialelor compozite.

*Galați,
Septembrie 2023*

Iulian Păduraru

Cuprins

| | |
|---|-----------|
| Mulțumiri | 5 |
| Cuprins | 6 |
| Capitolul 1 Tendințe recente în aplicarea și testarea compozitelor cu fibră de sticlă solicitate la impact de viteză mică | 7 |
| 1.1. Compozite destinate impactului de viteză mică..... | 7 |
| 1.2. Clasificarea fibrelor și tipuri de țesături..... | 8 |
| 1.3. Aspecte ale compozitelor cu fibră de sticlă la impact de viteză mică..... | 9 |
| 1.4. Aplicații ale compozitelor cu fibre de sticlă | 11 |
| 1.5. Concluzii privind compozitele pe bază de fibră de sticlă..... | 11 |
| 1.6. Direcții de cercetare..... | 12 |
| Capitolul 2. Structura tezei | 13 |
| Capitolul 3. Simularea comportării unui compozit la impact de viteză mică | 14 |
| 3.1. Introducere..... | 14 |
| 3.2. Conceptele de modele constitutive ale materialelor..... | 14 |
| 3.3. Aspecte-cheie pentru simularea în Ansys Explicit Dynamics..... | 14 |
| 3.4. Modelul impactului panou stratificat – impactor semisferic..... | 15 |
| 3.5. Rezultate ale simulării și discuții..... | 17 |
| 3.5.1. Analiza distribuției de tensiuni echivalente pe panoul cu două straturi | 17 |
| 3.5.2. Analiza comparativă a cedării firelor principale cu ajutorul imaginilor din simulare și a distribuției de tensiuni echivalente pentru cele două impactoare folosite în testele experimentale | 18 |
| 3.6. Concluzii privind evaluarea simulării impactului de viteză mică..... | 21 |
| 3.7 Concluzii asupra rezultatelor simulării impactului..... | 30 |
| Capitolul 4. Procesul de fabricație al compozitelor multiaxiale din fibră de sticlă..... | 31 |
| 4.1. Planul de teste destinat încercării compozitelor cu țesătură cuadriaxială și rășină epoxidică..... | 31 |
| 4.2. Materialele utilizate în realizarea probelor de compozit | 31 |
| 4.2.1. Țesătura de fibre de sticlă | 31 |
| 4.2.2. Matricea de rășină epoxidică | 33 |
| 4.3. Tehnologia de laborator pentru obținerea de panouri..... | 34 |
| 4.4. Caracterizarea panourilor elaborate | 36 |
| 4.5. Proceduri de testare și mașina de testare | 36 |
| 4.6. Concluzii privind realizarea panourilor..... | 38 |
| Capitolul 5. Interpretarea rezultatelor obținute experimental și investigația mecanismelor de cedare..... | 39 |
| 5.1. Parametrii mășurați la testul de impact la viteză mică..... | 39 |
| 5.2. Rezultate experimentale pe mașina de impact INSTRON CEAST 9340..... | 41 |
| 5.2.1. Influența numărului de straturi asupra parametrilor impactului | 41 |
| 5.2.2. Influența energiei și a vitezei de impact asupra parametrilor impactului | 42 |
| 5.3. Investigarea mecanismelor de cedare | 44 |
| 5.4. Sinteza rezultatelor experimentale și concluzii | 49 |
| Capitolul 6. Contribuții personale și concluzii | 53 |
| 6.1. Importanța tezei..... | 53 |
| 6.2. Concluzii finale asupra rezistenței la impact de viteză mică a panourilor realizate de autor | 53 |
| 6.3. Contribuții personale..... | 56 |
| 6.4. Perspective de cercetare..... | 57 |
| | |
| Lista lucrărilor științifice ale autorului..... | 58 |
| Bibliografie | 60 |

Capitolul 1. Tendințe recente în aplicarea și testarea compozitelor cu fibră de sticlă, solicitate la impact de viteză mică

1.1. Compozite destinate impactului de viteză mică

Materialele compozite sunt larg utilizate în diverse industrii datorită avantajelor lor remarcabile, cum ar fi rigiditatea ridicată și greutatea relativ redusă. Aceste materiale inovatoare oferă o combinație unică de proprietăți care le fac alegerea preferată într-o varietate de aplicații [13]. Materialele compozite sunt materiale obținute prin combinarea a două sau mai multe materiale componente, pentru a crea noi materiale cu proprietăți îmbunătățite. În aplicații de impact cu viteză mică, cum ar fi barele de protecție auto și echipamentele sportive, compozitele oferă avantaje suplimentare față de materialele tradiționale, cum ar fi aliajele metalice sau materialele plastice.

Impactul cu viteză mică variază, de obicei, între 1 m/s și 10 m/s, în funcție de masa elementului de lovire și rigiditatea țintei. Când viteza de impact este sub 5 m/s, răspunsul este controlat de elementul de lovire, mai degrabă decât viteza de impact. Distrugerile cauzate de viteza mică de impact sunt adesea nedetectabile prin inspecție vizuală, ceea ce compromite stabilitatea structurii. Modurile de deteriorare comune ale compozitelor ranforsate cu fire lungi includ fisuri ale matricei, delaminare și ruperea fibrelor/firelor. Au fost dezvoltate diverse observații experimentale și modele numerice pentru a înțelege răspunsul compozitelor la acest tip de impact [38].

Deteriorările ce apar ca urmare a impactului depind de mulți factori, cum ar fi forma elementului de lovire, viteza de impact și arhitectura straturilor unui material compozit [9]. Mai mult, materialele compozite armate cu fibre au diferite moduri de deteriorare, cum ar fi ruperea fibrelor, fisurarea matricei, delaminarea, exfolierea etc.. Aceste moduri diferite de deteriorare (fragmente de compozit) apar simultan sub sarcina de impact [26]. La impact se formează deteriorări interne în laminate și se extind în jurul zonei de impact [44], reducând rigiditatea și rezistența compozitelor. Cea mai mare parte a energiei cinetice a impactorului este consumată în deformarea plastică a materialului țintă, înainte de perforare, datorită rigidității plăcii țintă.

Hosseini et al. [21] au discutat despre dezvoltarea unui material compozit hibrid, din fibră de sticlă E, fibră de bazalt și nanoparticule de grafen, pentru utilizare în industria aviației. Adăugarea de grafen îmbunătățește semnificativ rezistența materialului și rezistența la impact, reducând, în același timp, greutatea acestuia. Testul de impact a fost realizat cu o masă a percutorului de 1,926 kg, iar elementul de lovire cântărește în total 9,34 kg, cu formă semisferică, cu diametrul de 12,7 mm. Testul de impact a dovedit o rezistență mai bună a materialelor cu 2% grafen. Testarea probelor s-a făcut la o viteză de încărcare de 2 mm/min la temperatura camerei. Studiul arată că adăugarea de nanoparticule de grafen îmbunătățește legarea fibrelor în matrice și limitarea deteriorării prin microfisurare.

Lucrarea [49] discută despre utilizarea fibrelor de sticlă ca fibre ductile în compozitele hibride din polimer ranforsat, pentru a le îmbunătăți rezistența la deteriorarea prin impact. Autorii au descoperit că introducerea straturilor de fibră de sticlă în compozite poate îmbunătăți semnificativ rezistența la impact a acestora.

Studiul prezentat de Lei et al. [27] explorează rezistența la impact a laminatelor compozite armate cu fibră de carbon în țesătură twill, fibră de sticlă și hibrid, fibră de

carbon/fibră de sticlă, supuse la impact de viteză redusă. Autorii au studiat, de asemenea, efectele încorporării fibrelor de sticlă în laminatele compozite din fibră de carbon țesute pentru a le spori rezistența la impact. Autorii au folosit țesături preimpregnate din fibră de sticlă twill cu un conținut de fibre de 55% pentru a fabrica laminate din fibră de sticlă cu rășină epoxidică. Compozitul armat cu fibră de sticlă a fost stabilizat (tratat termic) la o temperatură de 160°C și o presiune de 0,6 MPa, pentru un timp de întărire de 70 minute. Testele la impact de viteză redusă au fost efectuate utilizând o mașină de testare Instron 9340, conform standardului ASTM D7136/D7136M-15 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event (Metodă standardizată pentru măsurarea rezistenței la deteriorare a compozitelor polimerice armate cu fibre prin impact prin cădere). A fost utilizat un element de lovire semisferic, cu un diametru de 16 mm. Comportamentul la impact de viteză mică al laminatelor a fost studiat prin efectuarea de teste de impact cu energie incidentă cuprinsă între 2,5 J și 30 J.

1.2. Clasificarea fibrelor și tipuri de țesături

Armăturile pentru compozite pot fi fibre lungi, în țesături diverse, particule sau whiskers (fibre scurte). Rolul fibrelor într-o structură compozită este extrem de important, deoarece acestea preiau un procent semnificativ din sarcina aplicată. Fibrele pot fi realizate din sticlă, carbon, polimeri, aliaje metalice sau ceramice. Rășinile termorigide sunt potrivite ca baze de matrice pentru compozitele avansate armate cu fibre. Fibrele sunt principalul element constitutiv portant, asigurând compozitului rezistență și rigiditate. Cele mai frecvent utilizate fibre sunt cele de sticlă, de carbon, și polimerice, reprezentative fiind fibrele aramidice. Carbonul este utilizat pe scară largă în industria aeronavelor și în multe aplicații structurale, deoarece are cele mai mari valori ale rezistenței și rigidității. Cu toate acestea, este și cel mai fragil, cu o deformație la rupere de 0,5% până la 2,4%. Fibrele de sticlă au rezistență și rigiditate mai mici, dar sunt mai puțin costisitoare decât fibrele de carbon. Proprietățile mecanice ale fibrei aramidice se află între cele ale fibrei de carbon și a fibrei de sticlă.

Fibrele pot fi clasificate în două categorii [20]: fibre sintetice și fibre naturale.

Fibrele de sticlă. Sticla are o istorie lungă de utilizare în diferite forme. Ca material structural, sticla a fost introdusă în secolul al XVII-lea și a câștigat popularitate pe scară largă în secolul al XX-lea, odată cu progresele în tehnologia geamurilor plate. Fibrele de sticlă au fost dezvoltate ulterior ca înlocuitor pentru metale, ceea ce a condus la utilizarea lor atât în aplicații comerciale, cât și militare. Dezvoltarea formulărilor cu proprietăți controlate și capacitatea de a trage sticla topită în filamente continue, prin procese de filare au deschis calea pentru utilizarea fibrelor de sticlă ca armătură. Această descoperire a deschis o gamă largă de aplicații în industria aerospațială și în industriile structurale de înaltă performanță. Astăzi, sticla continuă să fie utilizată în numeroase aplicații aerospațiale și comerciale, datorită caracteristicilor ei de înaltă performanță. Versatilitatea și fiabilitatea fibrei de sticlă ca material structural au făcut din aceasta o alegere preferată în diverse industrii.

Pentru aplicații structurale, cele mai frecvent utilizate forme de produse din sticlă sunt țesături, fire, cabluri și benzi unidireționale, realizate prin răsucirea firelor Sticla „E”, concepută inițial pentru aplicații electrice, este cel mai versatil tip de fibră de sticlă în ceea ce privește diversitatea aplicațiilor. Oferă o gamă largă de diametre de filament, variind de la 3,5

μm până la 13 μm, permițând producerea de componente cu forme complexe, foarte subțiri. Pe de altă parte, fibrele de sticlă S-2, sunt cunoscute pentru rezistența lor ridicată, sunt disponibile cu un singur diametru de filament.

Deși rovingurile țesute ar putea fi considerate o formă de produs textil, ele au o importanță semnificativă în aplicațiile militare. În plus, există și alte forme de produse din sticlă care servesc ca produse complementare pentru structuri avansate, inclusiv fibre măcinate și fire scurte. Compozitele din fibră de sticlă au rezistență și rigiditate ridicate și o bună rezistență la coroziune și la oboseală.

O altă clasificare a diferitelor fibre utilizate în aplicații de impact este făcută [2] astfel:

Fibrele de sticlă au fost grupate în funcție de caracteristicile lor și de utilizările specifice în materiale compozite. Există mai multe tipuri de fibre de sticlă, cum ar:

E-Glass: este cea mai comună și este utilizată într-o gamă largă de aplicații. Este cunoscută pentru rezistența mecanică, rezistența la coroziune și stabilitatea chimică.

S-Glass: este un tip de fibră de sticlă cu proprietăți superioare în comparație cu tipul E-Glass. Are o rezistență la tracțiune mai mare și este utilizată în aplicații care necesită performanțe deosebite, cum ar fi protecția balistică și protecția la impact.

C-Glass: această fibră de sticlă conține mai mult calciu și are proprietăți chimice și termice îmbunătățite. Este utilizată în special în aplicații industriale care implică rezistență la coroziune și izolație termică.

A-Glass: are un conținut mai mare de aluminiu și este utilizată, în principal, în aplicații care necesită o rezistență mecanică ridicată și o conductivitate termică scăzută,

D-Glass: este utilizată în aplicații speciale, cum ar fi protecția împotriva incendiilor. Are proprietăți de rezistență la temperaturi ridicate și rezistență la flacără.

Aceste tipuri de fibre de sticlă oferă opțiuni variate pentru materialele compozite, permițând dezvoltarea de produse adaptate nevoilor specifice din diverse industrii, cum ar fi construcții, automobile, aviație și de apărare.

Pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale compozitelor, de obicei, acestea sunt armate în țesături sau semifabricate cu fire unidirecționale, care sunt formate din fibre în direcția urzelii și în direcția bății aranjate perpendicular. Caracteristicile țesăturilor, țesute sau nu, sunt tipul arhitecturii firelor (2D sau 3D), natura fibrei, numărul de filamente dintr-un fir, numărul de fire urzeală și bățatură pe cm², densitatea specifică (densitatea pe unitatea de suprafață) și grosimea țesăturii [7].

Există mai multe tipuri de țesături utilizate în materiale compozite supuse impactului de mică viteză. Aceste tipuri de țesături sunt utilizate în materiale compozite pentru a obține proprietăți specifice în ceea ce privește rezistența la impact și performanța generală a materialului.

1.3. Aspecte particulare ale compozitelor cu fibră de sticlă la impact de viteză mică

În structurile compozite, impactul creează distrugereri interne care de multe ori nu pot fi detectate prin inspecție vizuală. Această deteriorare internă poate provoca reduceri severe ale rezistenței. Prin urmare, efectele impactului obiectelor asupra structurilor compozite trebuie să fie înțelese și trebuie luate măsuri adecvate în procesul de proiectare și de fabricare [1].

Preocupări cu privire la efectul impactului asupra performanței structurilor compozite au fost un factor în limitarea utilizării materialelor compozite

Energia de impact, E_i , și energia absorbită de compozit, E_a , sunt doi parametri importanți pentru a evalua răspunsul la impact și rezistența structurilor compozite. *Energia de impact* este definită ca fiind cantitatea totală de energie introdusă într-un eșantion de material compozit. *Energia absorbită* este energia absorbită de epruveta materialului compozit prin deteriorarea interiorului acesteia [3].

Impacturile de viteză redusă pot genera delaminări ascunse în laminele compozite, ceea ce duce la o rigiditate redusă și la potențiale probleme de integritate structurală în timp. Deteriorările prin impact, în special delaminările, diminuează foarte mult rezistența la compresiune și la oboseală a structurilor compozite. În consecință, investigații experimentale și analitice extinse s-au concentrat asupra comportamentului la impact de viteză redusă al laminatelor compozite armate cu fibră de sticlă. Diverse studii au examinat comportamentul la impact al laminatelor de sticlă/rășină epoxidică, luând în considerare factori precum orientarea fibrelor, grosimea laminatului și temperatura [43].

Răspunsul materialelor compozite la impact depinde de materialele componente, geometria, viteza și masa elementului de lovire. Acest lucru sugerează că tipul de fibră utilizat în materialul compozit ar putea juca un rol important în răspunsul acestuia la impact [24].

Autorii Mathivanan, [33] au efectuat teste de impact pe lamine compozite cu matrice epoxidică, cu ranforsare din fibre de sticlă, țesute, folosind o mașină de testare la impact conform standardelor. Testele de impact au fost efectuate pentru a observa tipul și amploarea deteriorării laminatelor pentru diferite grosimi și viteze de impact. Pe măsură ce energia de impact a crescut, probele au suferit unul dintre cele două tipuri de distrugerii: o fisurare de la centrul laminatului până la margine sau o deteriorare semnificativă constând într-o adâncitură localizată în regiunea contactului direct cu impactorul.

Prin suprapunerea curbelor forță – deplasare se poate observa cum se modifică răspunsul materialului la impact cu viteze diferite. Această tehnică permite o analiză comparativă a relației forță-deplasare și oferă perspective asupra comportamentului materialului în diferite condiții de impact. Examinând curbele suprapuse (Fig.1.1), se pot identifica tendințele și modelele care dezvăluie răspunsul materialului la viteze în creștere.

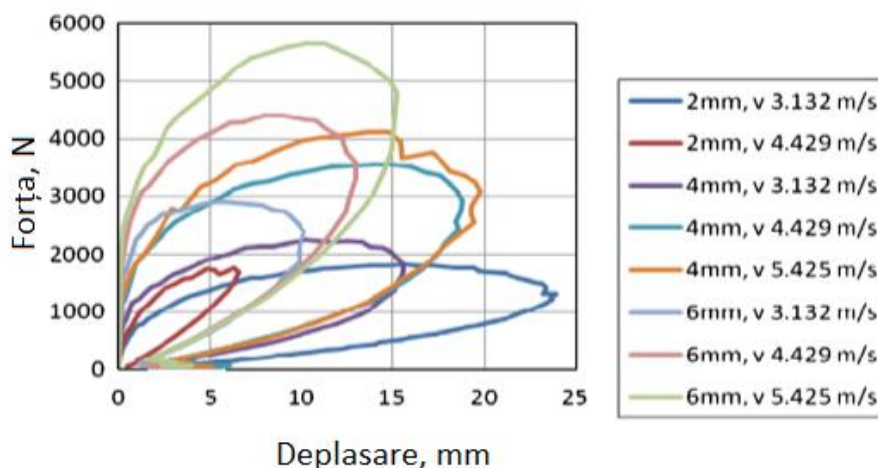


Fig. 1.1. Suprapunerea curbelor forță-deplasare, pentru diferite viteze de impact și grosimi ale compozitului [33]

1.4. Aplicații ale compozitelor cu fibre de sticlă

Materialele compozite armate cu fibre sunt utilizate în diverse aplicații în sectoare industriale cu nivel înalt de tehnologie, cum ar fi industria aerospațială, industria auto și industria energetică (energie eoliană, în special). Cererea foarte mare a pieței determină creșterea permanentă a producției de materiale sau structuri compozite, puternic susținută de rezistența mecanică foarte mare, de densitatea redusă, dar și productivitate și de complexitatea structurilor de formare specifică, comparativ cu materialele metalice [8].

Materialele compozite au o utilizare extinsă în industria autovehiculelor, pentru aplicații de impact de viteză redusă. Lucrarea [22] se concentrează pe performanța la impact de viteză redusă a structurilor auto, care poate afecta puternic siguranța structurii și poate scurta ciclul de service al componentelor.

Materialele compozite, în special cu fibre de sticlă, sunt utilizate în industria navală pentru aplicații de impact cu viteză redusă, cum ar fi corpurile de bărci, punțile și suprastructurile. Compozitele oferă rezistență la impactul cu resturi plutitoare, coliziunile cu docuri oferind în același timp rezistență la coroziune și reducerea greutateii specifice.

Compozitele cu fibre de sticlă și matrice de rășină epoxidică sunt utilizate într-o mare diversitate de aplicații, inclusiv în industria aeronautică, industria navală, industria auto și construcții. Sunt apreciate pentru proprietățile lor mecanice superioare, cum ar fi rezistența la tracțiune, rigiditatea și durabilitatea, precum și pentru greutatea specifică redusă și rezistența la coroziune. [24] menționează că materialele compozite cu fibre de sticlă, în general, au un potențial mare de integrare în infrastructura autostrăzilor și sunt deja utilizate la tablurile podurilor, balustrade și alte componente structurale.

1.5. Concluzii privind compozitele pe bază de fibră de sticlă

Compozitele cu fibre de sticlă și matrice de rășină epoxidică prezintă o rezistență și o durabilitate semnificativ mai mare la impact decât materialele monolitice, dar comportamentul lor sub impact depinde de mai mulți factori, cum ar fi geometria și orientarea fibrelor, densitatea și distribuția lor, viteza și energia impactului. S-a constatat că simulările numerice pot fi utilizate cu succes pentru a evalua comportamentul compozitelor sub impact și pentru a optimiza proiectarea acestora [31], mai ales când modelele de material sunt determinate experimental.

Compozitele din fibră de sticlă prezintă o rezistență excelentă la impact, făcându-le ideale pentru aplicații în care este necesară protecție la impact de viteză redusă. Ele pot absorbi și distribui energia din impact, ajutând la prevenirea distrugerilor și la menținerea integrității structurale. Lucrarea [32] concluzionează că comportamentul compozitelor poliamidice armate cu fibră de sticlă la impact de viteză mică este influențat de fracția de volum a fibrei de sticlă și de energia de impact. Autorii au descoperit că includerea fibrei de sticlă în poliamidă scade energia absorbită în plăcile compozite atunci când sunt supuse unui impact de viteză mică.

Khan Z. Et al. [24] sugerează faptul că materialele compozitele din fibră de sticlă în general au multe avantaje față de materialele tradiționale, cum ar fi raportul mare rezistență-greutate, rezistența excelentă la coroziune și durabilitatea. Au fost observate două răspunsuri distincte la impact: deformarea elastică fără deteriorare semnificativă și inițierea și propagarea distrugerilor majore sub deformare elastică și plastică (Fig. 1.2).

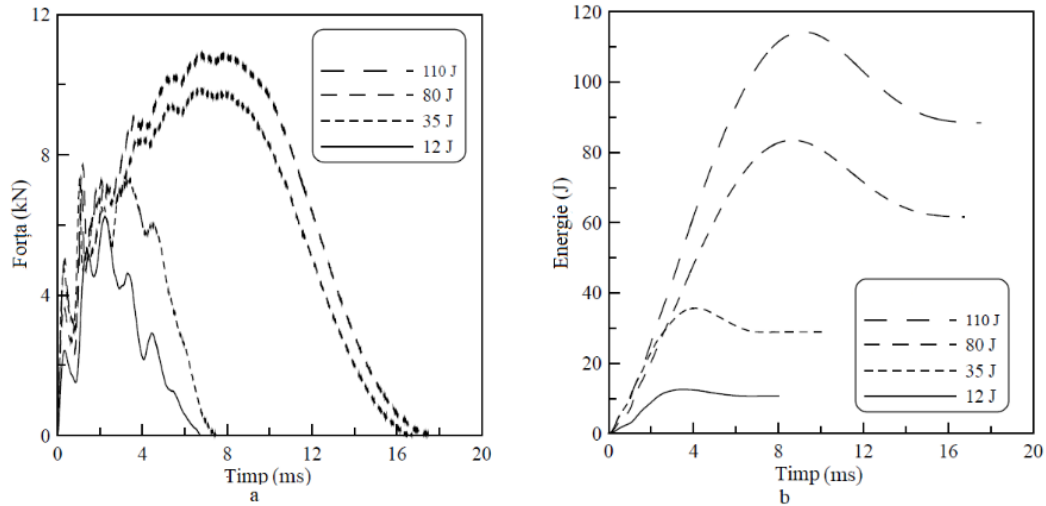


Fig. 1.2. Analiza comparativă a performanței laminatului compozitelor ranforsate cu fibre de sticlă la diferite energii de impact [24]: a) curbe forță – timp, b) curbe energie – timp

1.6. Direcții de cercetare

Cercetarea compozitelor din fibră de sticlă poate implica pe viitor o analiză la scară multiplă, luând în considerare comportamentul compozitelor la diferite scări dimensionale. Aceasta include studierea microstructurii compozitului, a fibrelor și a matricei și de asemenea a răspunsului macroscopic general la impact de viteză mică. Modelarea pe mai multe nivele (micro, mezo sau macro) și tehnicile experimentale ar putea permite o înțelegere cuprinzătoare a comportamentului compozitelor și vor oferi soluții pentru îmbunătățirea performanței acestor materiale.

Pentru acest studiu de cercetare, direcțiile de cercetare sunt:

- o documentare recentă și critică în domeniul compozitelor rezistente la impact de viteză mică și pe bază de țesături de fibre de sticlă,
- formularea unei tehnologii și rețete de laborator pentru obținerea de panouri compozite,
- proiectarea unui plan de teste care să evidențieze influența unor factori asupra rezistenței la impact (viteza de impact, grosimea panoului, forma și mărimea impactorului etc.),
- modelarea și simularea unui impact de viteză mică dintre un impactor și un compozit, cu ajutorul metodei elementelor finite și corelarea modelului cu date experimentale, folosind criterii de validare, și aplicând modelul pentru alte componente care trebuie să facă față unor condiții similare de impact,
- obținerea unor date experimentale pe panouri compozite astfel încât să se determine influența impactorului, vitezei de impact și grosimii panoului pentru aceiași țesătură de fibră de sticlă și aceiași matrice,
- investigarea mecanismelor de cedare a compozitelor în acest proces de impact, pentru că se obțin informații utile pentru optimizarea compozitului și/sau a componentei executate din compozit.

Capitolul 2. Structura tezei

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat este de a investiga și caracteriza răspunsul unor compozite cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă, la impact de viteză mică. Acesta implică efectuarea de teste experimentale pentru a măsura și analiza parametri precum forța maximă la impact, energia absorbită de compozit, modelarea și simularea răspunsului la impact și mecanismele de deteriorare. Figura 2.1 prezintă structura tezei și aspectele principale ale modelării și testării acestei familii de compozite.

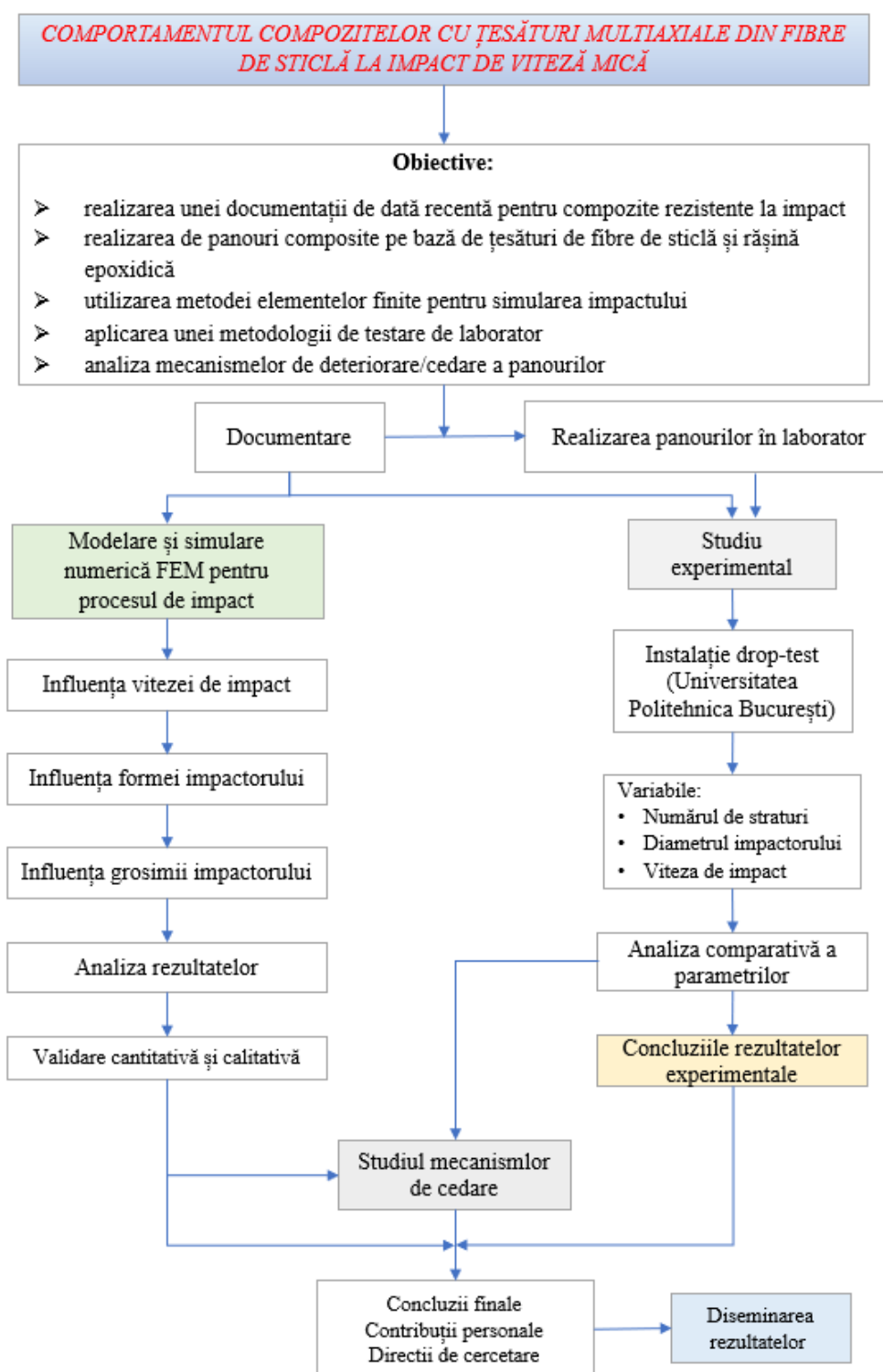


Fig. 2.1. Diagrama organizării generale a tezei de doctorat

Capitolul 3. Simularea comportării unui compozit cu țesătură cuadriaxială, la impact de viteză mică

3.1. Introducere

Materialele prezintă un comportament complex la solicitări dinamice, ceea ce impune modelarea mai multor procese specifice impactului [4], [18], [11]. Aceste procese includ răspunsul neliniar la solicitare, întărire (durificare) în timpul solicitării și influența vitezei de deformare, modificarea caracteristicilor mecanice din cauza înmuierii provocate de câmpul termic, modificarea volumului și masei prin compactare (pentru materiale poroase), răspunsul ortotrop (pentru compozite, în special cele cu fibre lungi), distrugerea prin strivire (de exemplu, în cazul ceramicilor), reacțiile ce implică energie chimică rezultată pe durata procesului (de exemplu, în cazul exploziilor), comportamentul la distrugere la tracțiune și modificările de fază (trecerea de la stadiul solid la lichid sau gaz și invers) [1], [5] [36].

Modelarea acestor procese caracteristice impactului are trei componente principale: ecuația de stare, modelele materialelor implicate și criteriile de distrugere (cedare) ale acestora)[50].

3.2. Conceptele de modele constitutive ale materialelor și criteriile de cedare

În simulările care utilizează coduri explicit dinamice, dependența proprietăților elastice și elasto-plastice de temperatură nu este disponibilă în mod direct. În aceste cazuri, o singură valoare este folosită pentru fiecare proprietate, fără a se lua în considerare variația în funcție de temperatură. Solverul va utiliza aceste valori fixe, definite pentru proprietăți în timpul rezolvării numerice [34].

Modelul biliniar izotrop cu durificare reprezintă o alegere adecvată în analizele ce implică deformații mari. Pentru utilizarea acestui model, sunt necesare două valori importante: limita de curgere și modulul tangent, specifice materialului în cauză. Modulul de elasticitate al materialului este corespunzător primei pante a curbei, în timp ce modulul tangent este asociat cu a doua pantă [46].

Modelul de impact placă - impactor semisferic, dezvoltat în acest studiu a fost realizat folosind software-ul Explicit Dynamics (Ansys) [50]. Pasul de timp utilizat este determinat de condiția de stabilitate și consistență, impusă de criteriul Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Acest criteriu este o măsură pentru a asigura că pasul de timp selectat este suficient de mic pentru a capta corect propagarea undelor și schimbările rapide în analiză [12]. În general, pașii de timp utilizați în simulări sunt de ordinul milisecundelor și este necesar să fie efectuate mii de cicluri de calcul (pași de timp) pentru a obține o soluție corespunzătoare.

3.3. Aspecte-cheie pentru simularea în Ansys Explicit Dynamics

În cadrul domeniului de impact la viteză mică, determinarea coeficientului de frecare poate fi mai simplă și mai ușor de realizat în comparație cu impactul la viteză mare sau balistic. La viteze reduse, influența frecării (ca dependență de solicitare și viteză relativă între corpuri) poate fi mai puțin semnificativă, ipoteză ce confirmă că acest coeficient de frecare poate fi considerat constant, în anumite condiții de simulare, deoarece vitezele de deformare și tensiunile de contact variază relativ mai lent. Pentru acest model s-a considerat $COF = \text{constant} = 0,1$.

Definirea conexiunilor. În documentația Ansys, interacțiunea suprafață pe suprafață este denumită și contact superficial. Pentru a minimiza sau evita hourglassing-ul în analizele cu elemente finite, sunt utilizate tehnici și algoritmi specifice, precum metode de re-discretizare, adaptare a rețelei sau erodare a elementelor cu deformări exagerate [30], [50].

Rețeaua de discretizare. În analize numerice, utilizarea rețelelor uniforme de discretizare este preferată deoarece aduce beneficii în ceea ce privește eficiența, precizia și stabilizarea soluției [28].

În ceea ce privește condițiile limită, solverul explicit Dynamics se bazează pe timp ca referință și, prin urmare, este sensibil la inerție. Aceasta permite detectarea („vizualizarea”) unor mecanisme de cedare care nu pot fi observate pe epruvete reale decât ca rezultat, la sfârșitul unui test [17].

3.4. Modelul impactului panou stratificat – impactor semisferic

În acest model, deși firele sunt din material izotrop, așa cum se vede în imaginile din simulare, din cauza aranjării fibrelor la 0° , $+45^{\circ}$, 90° și -45° , există un caracter anizotrop al panoului și distribuția de tensiuni și deformații în romb față de axa impactorului. Figura 3.1 prezintă fața și spatele unei plăci ($60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$), lovite de impactorul de 10 mm , cu $v_3=4\text{ m/s}$, în care se observă tensionarea fibrelor pe cele 4 direcții ale țesăturii

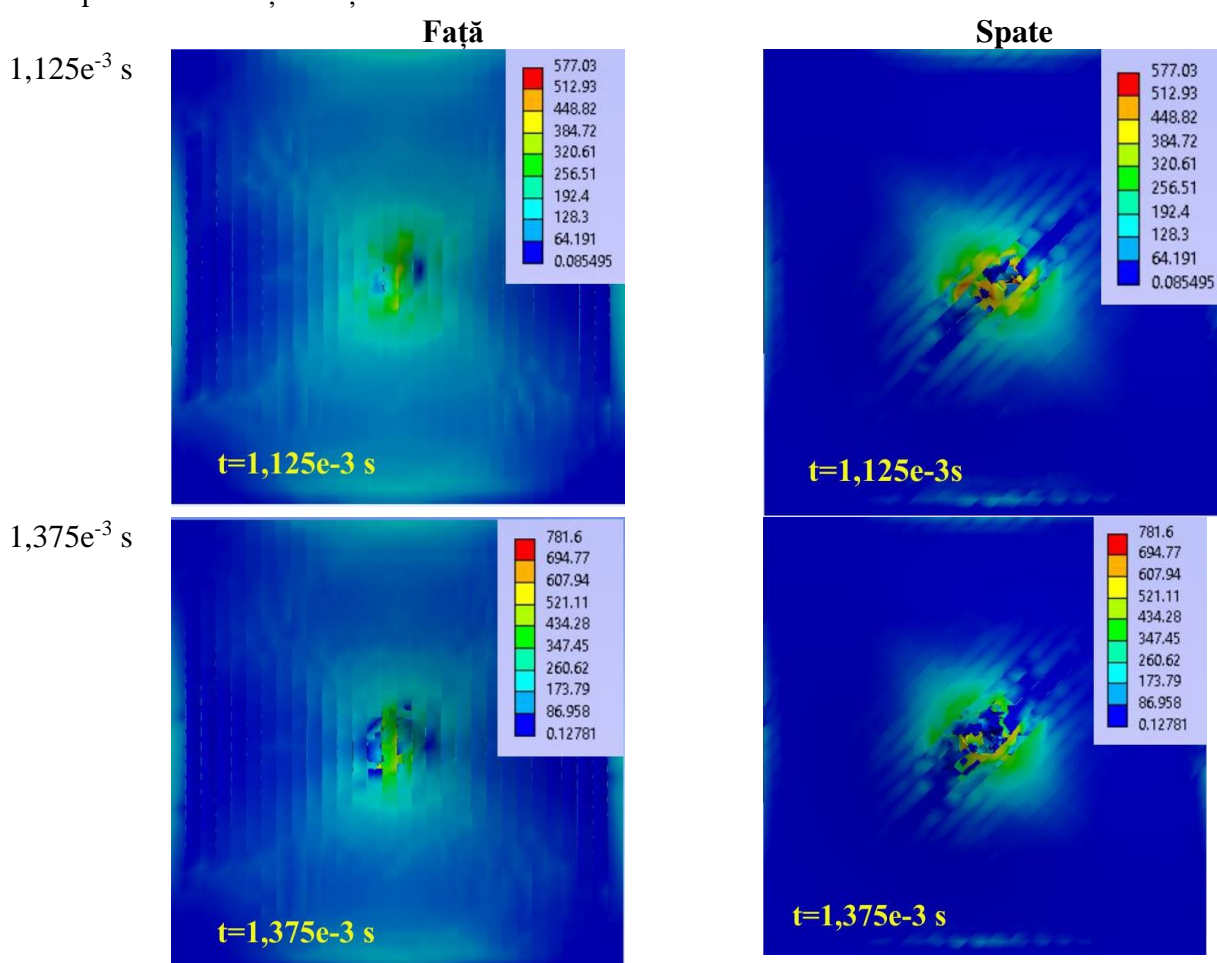


Fig. 3.1. Influența arhitecturii fibrelor (în 8 substraturi) asupra distribuției de tensiuni echivalente (în MPa)

Modelul este format din mai multe corpuri (265 de corpuri dintre care 264 sunt fire) și un impactor: substraturile cu orientarea fibrelor 0° și 90° au câte 30 de fire, iar substraturile cu orientarea fibrelor $+45^{\circ}$ și -45° au câte 36 fire.

Numărul nodurilor din acest model este 107017, iar numărul de elemente este 40496.

În Fig. 3.2a au fost lăsate vizibile câteva fire de pe fiecare strat astfel încât să se vadă arhitectura unui strat de țesătură, alcătuit, la rândul lui, din 4 substraturi de fire unidirecționale, orientate diferit.

În Fig. 3.2b este dată vederea de ansamblu a rețelei de discretizare a modelului. În Fig. 3.2c se prezintă rețeaua de discretizare pe un fir principal și pe impactor. Având în vedere mulțimea de fire, s-a optat pentru o rețea de discretizare formată din două elemente pe lățimea firului.

Modelul conține plane de simetrie, dar nu s-a optat pentru această reducere a modelului pentru că, indiferent de finețea rețelei de discretizare și de precizia modelului dinamic, ruperea firelor nu se face simetric, ca și în realitate.

În model, interacțiunea între corpuri sau între fragmentele rezultate este cu frecare, coeficientul de frecare fiind considerat constant, setat la $COF=0,1$.

Modelul ales este izoterm din două considerente. În primul rând, softul Explicit Dynamics nu suportă modele adiabactice. În al doilea rând, literatura de specialitate a relevat că în domeniul de viteze de impact între 1 m/s și 400 m/s, influența câmpului termic poate fi considerată neglijabilă în simularea fenomenelor de distrugere.

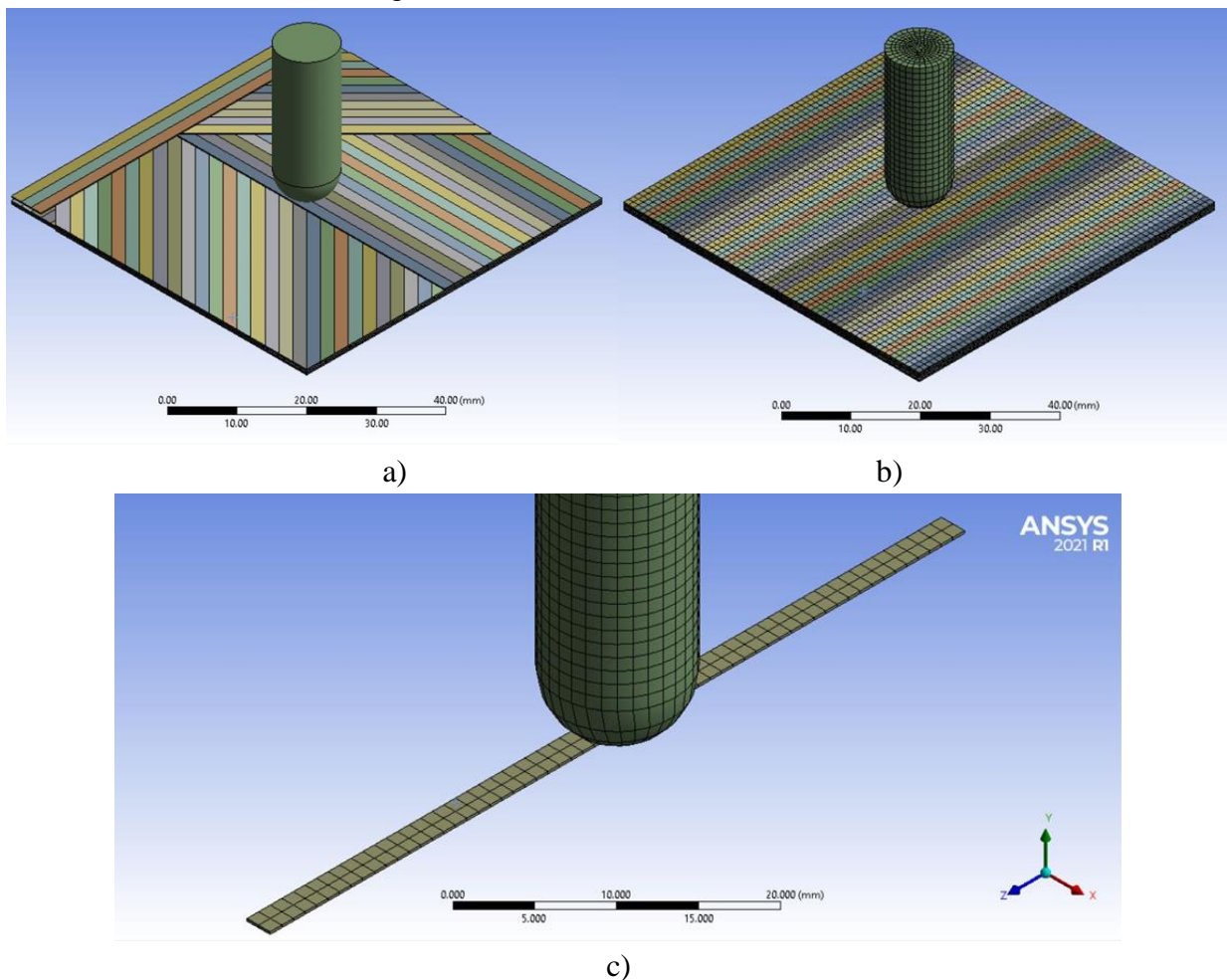


Fig. 3.2. Modelul geometric și rețeaua de discretizare pentru impactor și fir

Fiecare fir este încastrat pe marginea laterală a lui, pentru a nu se deplasa. Modelul este structurat astfel: 8 substraturi de fire unidirecționale, cu orientare 0° , $+45^{\circ}$, 90° și -45° . Firele au o grosime de 0,2 mm, iar lățimea fiecărui fir este de 2 mm. Lucrarea [14] analizează efectul formei secțiunii transversale a firului asupra curgerii rășinii prin golurile dintre fire în armăturile textile, una dintre variante fiind foarte apropiată de un dreptunghi.

Figura 3.3 prezintă modelul constitutiv de material utilizat pentru fir (limita de curgere la tracțiune și compresiune 400 MPa, modulul de elasticitate $E=10$ GPa, modulul tangent 4 GPa, coeficientul Poisson 0,306) impactorul fiind considerat rigid. [35] Matricea se consideră de grosime zero, ca și în cazul modelului zonei coezive de grosime zero [10], [19], dar desprinderea nodurilor de pe firele adiacente se face la anumite valori ale tensiunii de tracțiune și/sau de forfecare, caracteristice unei matrici epoxidice de calitate. Criteriul de distrugere al firului este deformația plastică echivalentă la rupere (maximum equivalent plastic strain, notată cu EPS) și având valoarea 0,06 (sau 6%), o valoare tipică pentru fibrele de sticlă.

Parametrii pentru desprinderea nodurilor, introduși cu comanda „stress criteria” și putând modela delaminarea, în acest caz, între firele de pe substraturile compozitului. Acești parametri sunt utilizați în simulări pentru a caracteriza

comportamentul materialelor compozite și delaminarea. Limita de rupere la tracțiune (normal stress limit) este 60 MPa iar limita de rupere, de desprindere a nodurilor, la forfecare (shear stress) este de 40 MPa, valori care sunt plauzibil de caracterizat o rășină epoxidică de calitate.

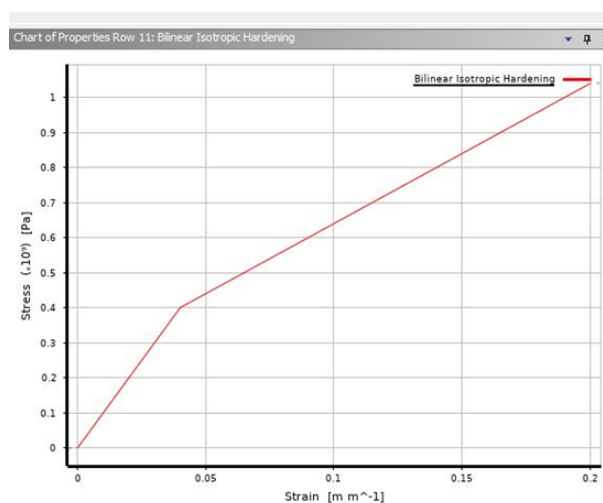


Fig. 3.3. Modelul constitutiv de material pentru fir

3.5. Rezultate ale simulării impactului și discuții

3.5.1. Analiza distribuției de tensiuni echivalente pe panoul cu două straturi

Simulările au fost rulate pentru a evidenția următoarele:

- posibilitatea modelării impactului la nivel mezo, adică ținând seama de comportarea firelor unidirecționale, cu caracteristici izotrope, simplificare acceptabilă pentru că arhitectura firelor în substraturi orientate cuadriaxiale ($0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$), conferă o oarecare uniformitate caracteristicilor mecanice, cel puțin în planul țesăturii, și, deci, și al compozitului, astfel încât pe baza unor criterii de validare, modelul să fie utilizat pentru evaluarea rezistenței la impact de viteză mică pentru anumite intervale de variație a unor parametri, cum ar fi suprafața panoului modelat, numărul de straturi, viteza și energia de impact, față de panourile deja testate,
- criteriile de validare a modelului pot fi criterii cantitative și calitative; cele calitative includ forma geometrică a orificiului de trecere a impactorului sau forma amprentei impactorului în cazul unei pătrunderi parțiale, forma delaminării, iar cele cantitative pot face referire la numărul de straturi rupte, dimensiuni ale orificiului de amprentare sau de trecere (diametru, adâncime), mărimea delaminărilor (sau detașării straturilor și substraturilor), observabile pe simulare, prin secționarea virtuală a modelului.

În Fig. 3.4. sunt prezentate imagini din simulare ale panoului, față (sus), spate (jos) și imagini reale ale panoului cu 2 straturi, față (sus), spate (jos) testate cu impactorul de $\varnothing 20$ mm la viteza $v_3=4$ m/s. Aceste imagini din simulare și imagini reale oferă informații detaliate despre comportamentul panoului cu două straturi în timpul și după impactul cu impactorul de 20 mm, la viteza de 4 m/s. Din simulările rulate se observă că durata impactului se încadrează în durata înregistrată pe mașina pe încercat la impact, adică de ordinul 10^{-3} s (câteva milisecunde).

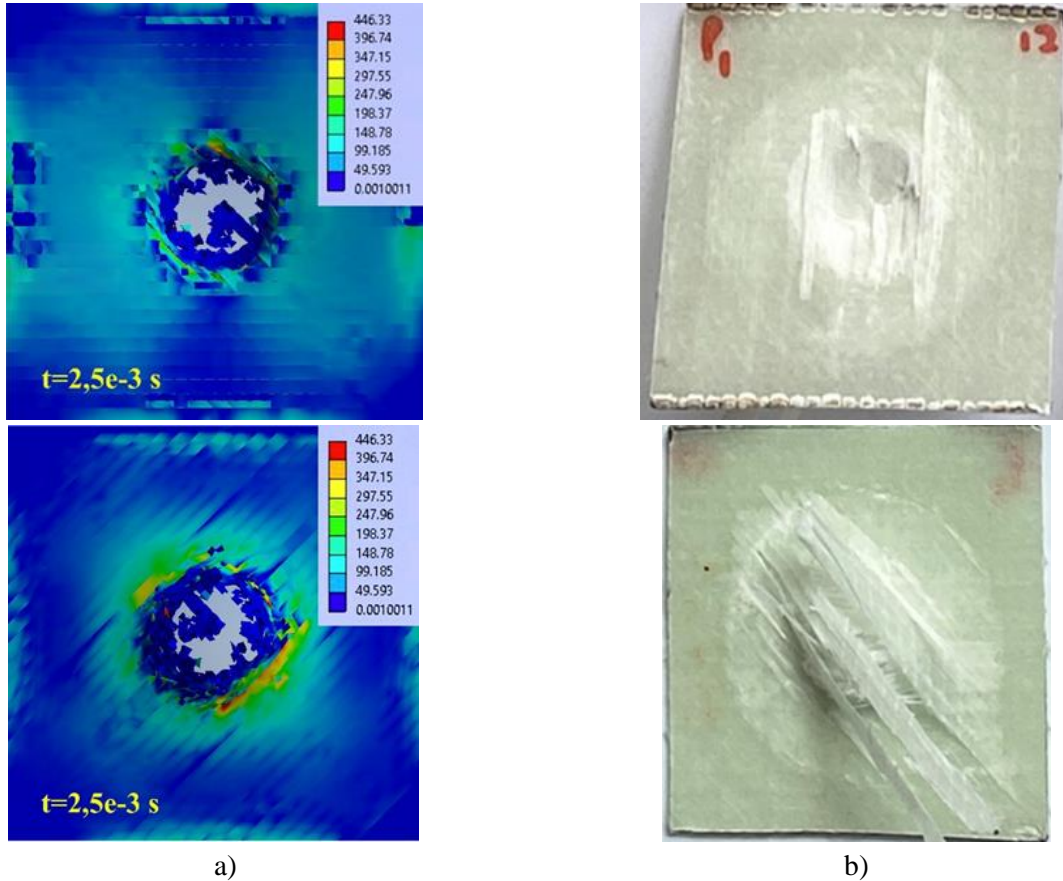


Fig. 3.4. Imagini: coloana a) din simulare ale panoului, față (sus), spate (jos); b) imagini reale ale panoului cu 2 straturi, față (sus), spate (jos), testate cu impactorul de \varnothing 20 mm la viteza $v_3=4$ m/s

3.5.2. Analiza comparativă a cedării firelor principale cu ajutorul imaginilor din simulare și a distribuției de tensiuni echivalente pentru cele două impactoare semisferice

Codificarea firelor principale analizate se păstrează în acest capitol (Fig. 3.5). S-a considerat ca firul principal 1 este cel de lângă planul de simetrie al axei impactorului și s-a adăugat numărul substratului pe care este firul.

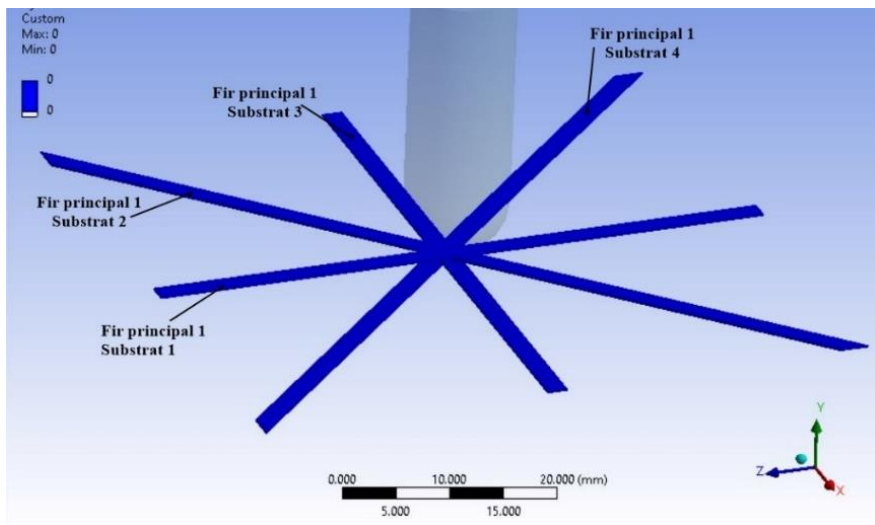


Fig. 3.5. Analiza tensiunilor echivalente pe fire și codificarea firelor principale analizate

Figurile 3.6-3.9 prezintă, la momente diferite ale simulării, o imagine cu distribuția de tensiuni echivalente pe firele principale (în MPa), câte un fir de pe fiecare substrat, și grafice ale distribuțiilor de tensiuni echivalente pe firele principale drepte (paralele cu laturile plăcii) și pe firele principale diagonale. Fiecare imagine virtuală ale firelor principale are scară proprie de culori pentru tensiunea echivalentă, tot în MPa.

Din simulările rulate se observă că durata impactului se încadrează în durata înregistrată pe mașina pe încercat la impact, adică de ordinul 10^{-3} s (câteva milisecunde). Rularea s-a efectuat pentru $2,5 \times 10^{-3}$ s, observându-se că pentru ambele simulări, la acest moment, tensiunile echivalente sunt sub 60...80 MPa, deci, valorile nu mai pot provoca nici distrugerea matricei prin rupere sau desprindere de pe fir/fire.

Pe grafice, ruperea unui fir este reflectată prin scăderea la zero a tensiunii echivalente. Ulterior, eventuale fragmente, rezultate din fir/fire pot fi solicitate la compresiune, prin antrenarea lor pe capul impactorului sau prin strivirea lor pe primul substrat care nu a cedat sau acedat parțial.

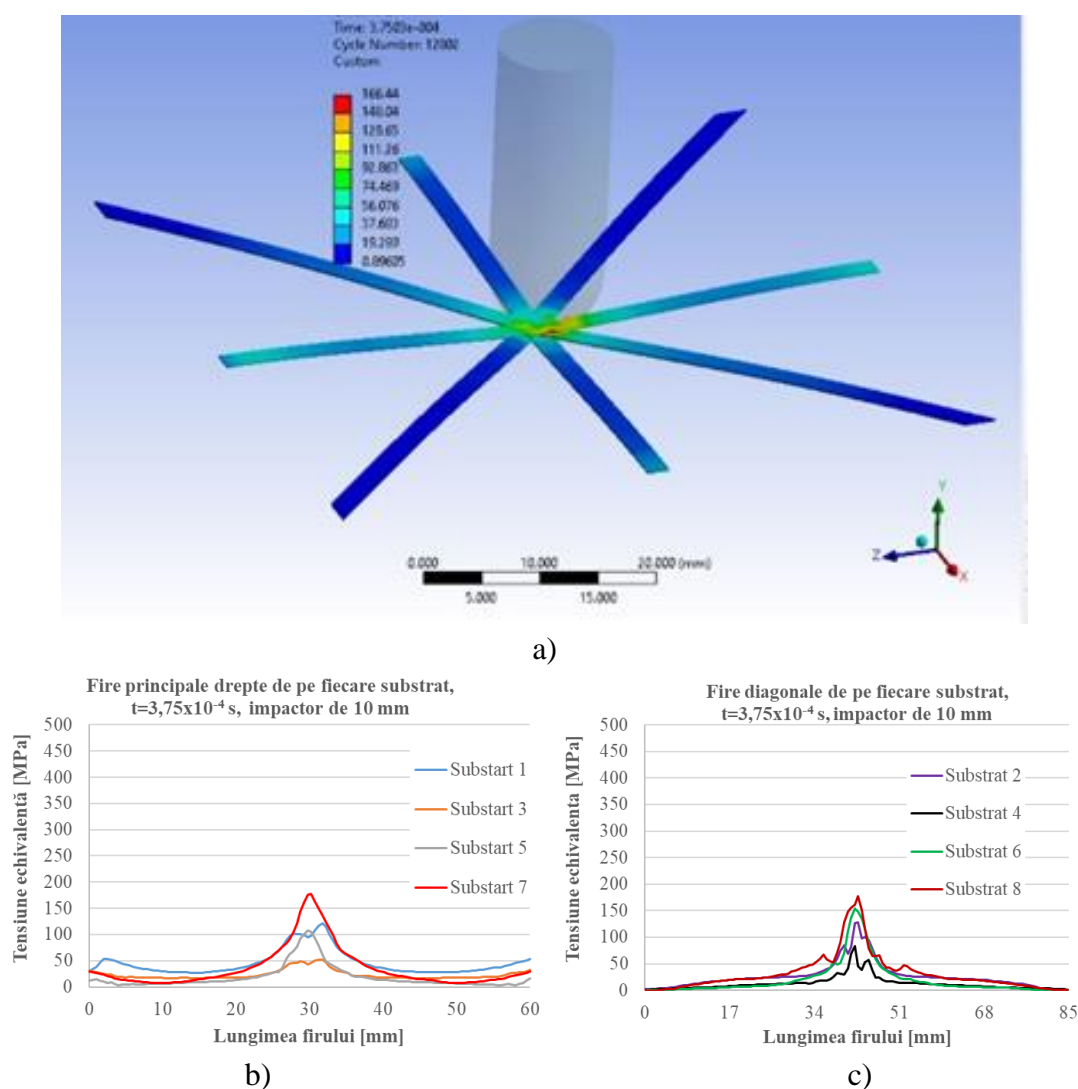


Fig. 3.6. Simulare pentru impactorul de \varnothing 10 mm și $v_3 = 4$ m/s, la momentul $t = 3,75 \times 10^{-4}$ s; a) firele principale analizate (celelalte corpuri ale panourilor cu 2 straturi sunt invizibile) și distribuția tensiunii echivalente pentru: b) firele principale drepte; c) firele principale diagonale.

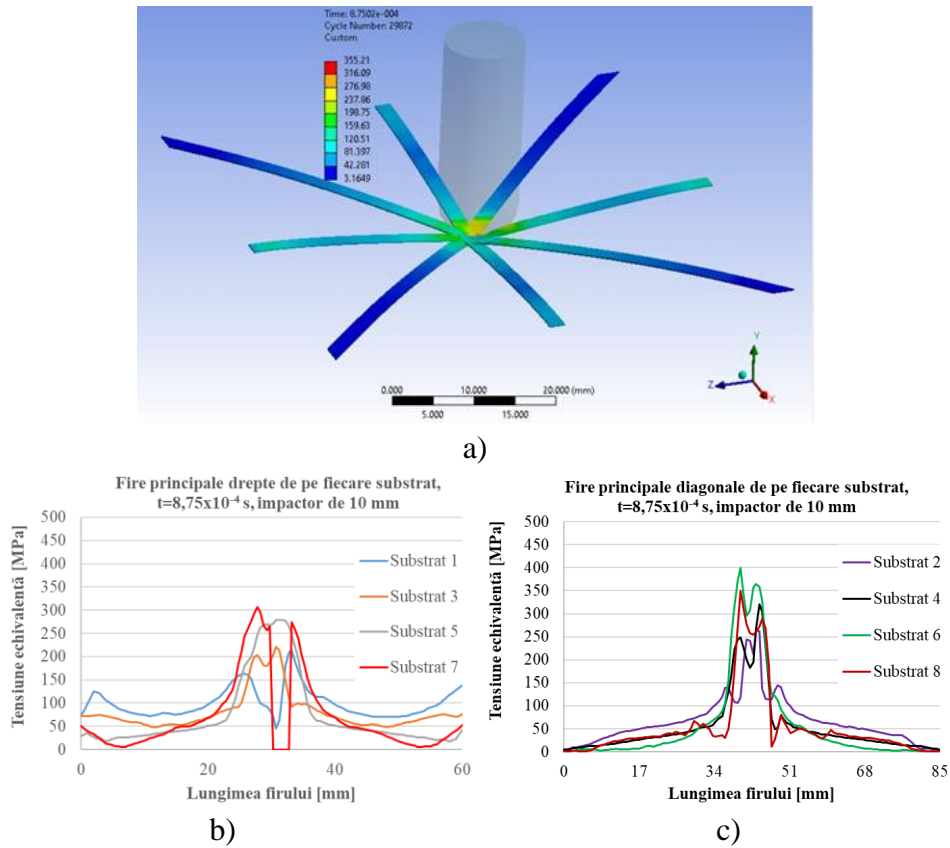


Fig. 3.7. Simulare pentru impactorul de \varnothing 10 mm și $v_3=4$ m/s, la momentul $t=8,75 \times 10^{-4}$ s; a) firile principale analizate (celelalte corpuri ale panourilor cu 2 straturi sunt invizibile) și distribuția tensiunii echivalente pentru: b) firele principale drepte; c) firele principale diagonale.

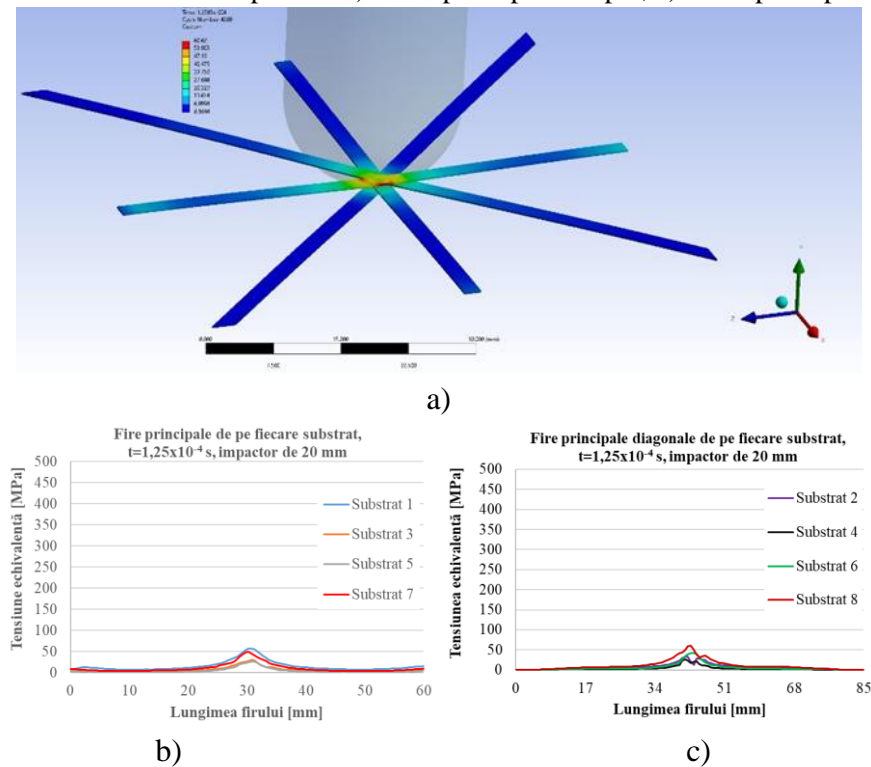


Fig. 3.8. Simulare pentru impactorul de \varnothing 20 mm și $v_3=4$ m/s, la momentul $t=1,25 \times 10^{-4}$ s; a) vederea firilor principale analizate (celelalte corpuri ale panourilor cu 2 straturi sunt invizibile) și distribuția tensiunii echivalente pentru: b) firele principale drepte; c) firele principale diagonale.

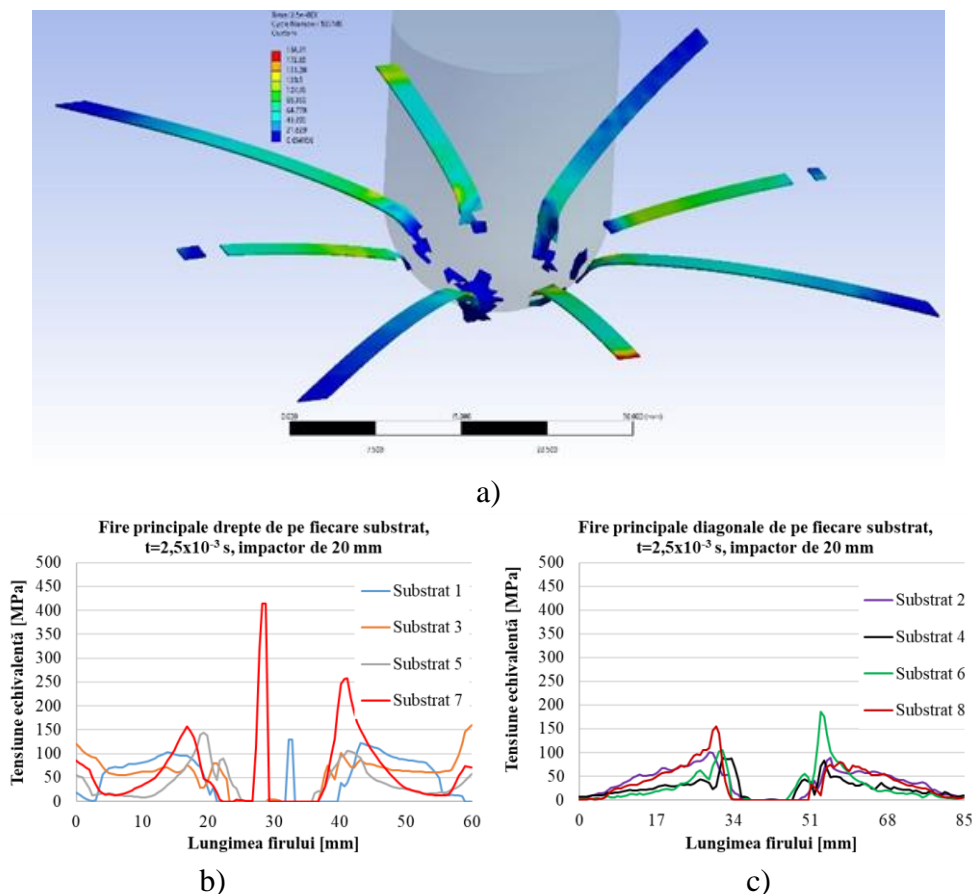


Fig. 3.9. Simulare pentru impactorul de \varnothing 20 mm și $v_3 = 4$ m/s, la momentul $t = 2,5 \times 10^{-3}$ s;
a) firele principale analizate (celelalte corpuri ale panourilor cu 2 straturi sunt invizibile) și distribuția tensiunii echivalente pentru: b) firele principale drepte; c) firele principale diagonale

Rezultatele obținute au condus la următoarele concluzii:

1. Modelul de material al firului, deși simplificat la un model biliniar izotrop cu durificare, a dat rezultate valide în concordanță cu datele experimentale disponibile din literatură. Acest lucru a fost demonstrat prin validarea numărului de straturi distruse în cazul plăcilor cu penetrare parțială și a mărimii delaminării pe spatele ultimului strat.
2. Analiza tensiunilor echivalente la diferite momente și pe diverse substraturi a permis distingerea etapelor impactului, atât pentru penetrarea totală, cât și pentru penetrarea parțială.

3.6. Concluzii privind evaluarea simulării impactului de viteză mică

Pentru penetrare totală (panoul de 2 straturi, cu impactor 10 mm), etapele observate din rularea modelului sunt:

- tensionarea straturilor fără ruperea firelor este o etapă foarte scurtă, de ordinul a 10^{-4} ... 10^{-3} s, interval mai lung decât într-un impact balistic considerat de viteză mare (100...800 m/s), acesta din urmă fiind de ordinul 10^{-6} s [37], dar valorile tensiunilor echivalente ating valori mari, aproape de limita rupere a firelor, iar deformația se apropie de valoarea criteriului de cedare, deformației plastice echivalente la rupere), iar primul substrat (implicit firele principale) este puternic deformat prin comprimare,

- de la momentul când se atinge valoarea stabilită prin program pentru criteriul de cedare (aici deformația plastică echivalentă la rupere – notată cu EPS), se inițiază ruperea firelor și delaminarea

între substraturi; se observă o delaminare/desprindere mai mare între ultimele substraturi din cauza deformațiilor mai mari ale acestora,

- etapă în care sunt rupte succesiv toate firele (de menționat că ruperea unuia sau mai multor fire se poate face, în simulare, între momentele selectate pentru simulare, și deci, graficele tensiunile echivalente pe fire pot avea valori mai mici decât limita de rupere),

- etapă în care tensiunile pe firele principale analizate este mai mică decât tensiunea limită (de rupere) a firelor, dar încă are valori care pot desprinde firele adiacente și firele de pe substraturi alăturate, valori care depășesc rezistența matricei compozitului, simulată prin condiții de desprindere a nodurilor (în acest studiu),

- etapa în care valorile tensiunii echivalente scad și sub valori care determină desprinderea matricei, nu mai apar cedări și se poate considera procesul de impact încheiat.

De subliniat că desprinderea firelor, unele față de altele sau de pe substraturi diferite poate apărea, local, încă de la depășirea condițiilor de desfacere a nodurilor, la tensiuni mult mai mici decât cele de rupere a firelor.

Tabelul 3.1 prezintă momentele între care s-a realizat ruperea fiecărui fir. Este ușor de evidențiat astfel când se rupe primul fir și ultimul. La impactorul de 10 mm, primul fir rupt este firul aflat pe substratul 7 (fir drept), pe când la impactorul de 20 mm, se rup în același timp și firul aflat pe substratul 1, cât și cel aflat pe ultimul substrat (8).

Tabelul 3.1. Momentele de rupere ale firelor

| Impactor de 10 mm | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|------|------|------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-----|--|
| Timp | 1,25 | 3,75 | 6,25 | 8,75 | 1,125 | 1,375 | 1,625 | 1,875 | 2,125 | 2,5 | |
| Firul | [x10 ⁻⁴ s] | | | | [x10 ⁻³ s] | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| Impactor de 20 mm | | | | | | | | | | | |
| | 1,25 | 3,75 | 6,25 | 8,75 | 1,125 | 1,375 | 1,625 | 1,875 | 2,125 | 2,5 | |
| Firul | [x10 ⁻⁴ s] | | | | [x10 ⁻³ s] | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | |

Fir drept

Fir diagonal

Durata distrugerii firelor este puțin mai lungă pentru impactorul cu diametrul mai mare.

- **pentru impactor de 10 mm**, firele se rup în ordinea: 8, 6, 4, 1, la momentul $t=1,375 \times 10^{-3}$ s, toate firele sunt rupte,

- pentru impactorul de 20 mm, la momentul $t=1,375 \times 10^{-3}$ s doar firul 8 este rupt; la $t=1,625 \times 10^{-3}$ s, firul 4 încă nu este rupt, dar se observă că la momentul următor din simulare, $t=1,875 \times 10^{-3}$ s, și el este rupt.

Pe firele diagonale, tensiunea crește cu viteza mai mare și este mai localizată sub impactor.

Etapa de reducere a tensiunilor se face mai repede și la valori mult mai mici pentru impactorul de 10 mm. Impactorul de 20 mm produce tensiuni echivalente mai mari din cauza procesului de încovoiere a firelor la deplasarea impactorului, valorile fiind favorabile producerii în continuare a desprinderilor între substraturi (delaminare), dar și între fire.

În această etapă în care firele nu mai sunt rupte, iar compozitul se poate considera doar tensionat

- pentru impactorul de 10 mm, delaminarea sau cedarea matricei este posibilă doar până la momentul $t=1,625 \times 10^{-3}$ s și aceea doar pentru firul 4; în această etapă tensiunile echivalente nu depășesc valorile de detașare a nodurilor, deci substraturile și implicit firele nu se mai desprind decât, eventual, local, așa cum se vede și într-o imagine SEM,
- pentru impactorul de 20 mm, apar distribuții de tensiuni mari (care pot duce la desprinderea nodurilor între fire și matrice (aici, în model de grosime zero) de pe substraturile 6 și 8.

În continuare, Figurile 3.10 și 3.11 compară distribuția de tensiuni echivalente pe firele principale, pentru impactorul de 10 mm și cel de 20 mm. S-au selectat doar câteva momente semnificative pentru procesul de impact.

Figura 3.10 arată distribuția de tensiuni echivalente la sfârșitul primei etape, când încă niciun fir nu este rupt. Se observă că, pentru ambele impactoare, până la $t=6,25 \times 10^{-4}$ s nu s-a rupt niciun fir pe compozit.

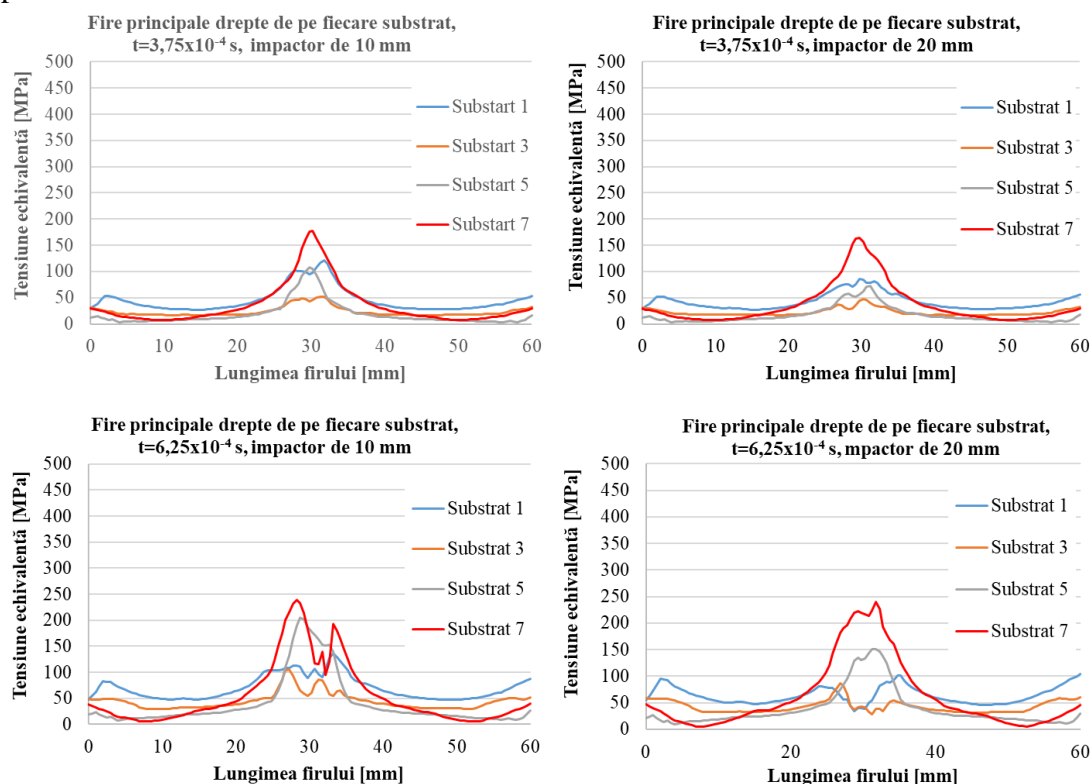


Fig. 3.10. Distribuția de tensiuni echivalente (în MPa) pe firele principale drepte (pe substraturile 1, 3, 5 și 7) și pe firele principale diagonale (pe substraturile 2, 4, 6 și 8) chiar înainte de ruperea primului fir, pentru impactorul de 10 mm (coloana din stânga), pentru impactorul de 20 mm (coloana din dreapta)

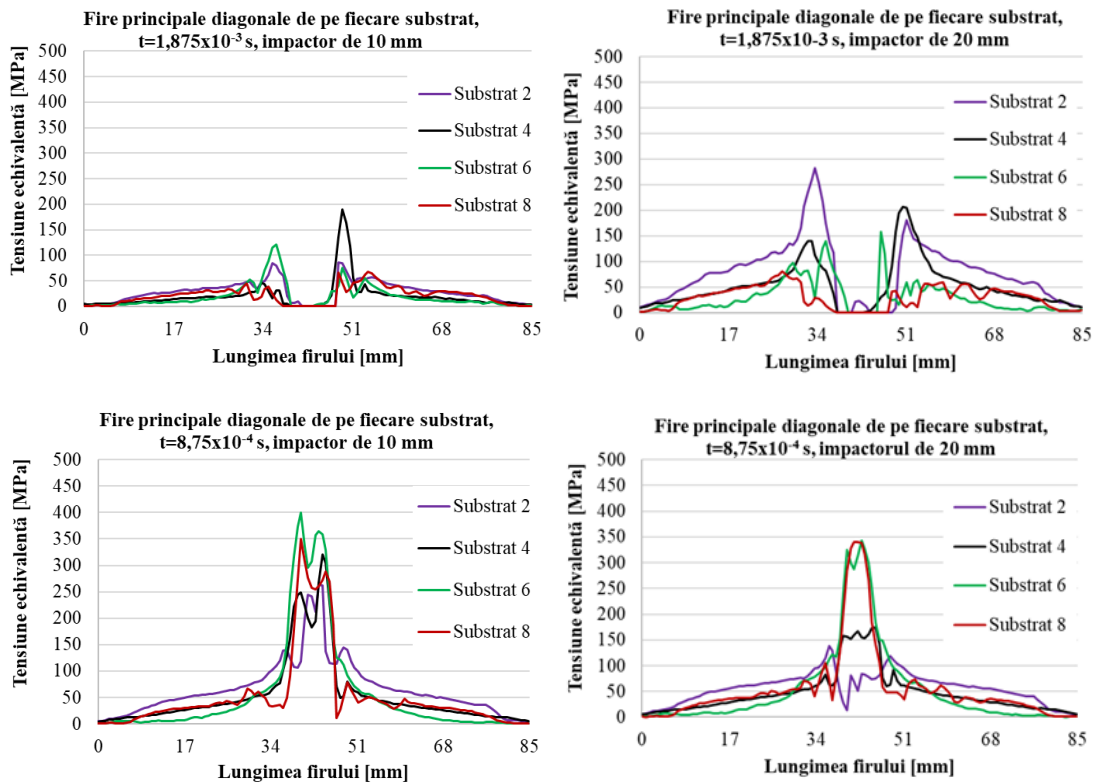


Fig. 3.11. Distribuția de tensiuni echivalente pe firele principale, la momentul $t=8,75 \times 10^{-4}$ s

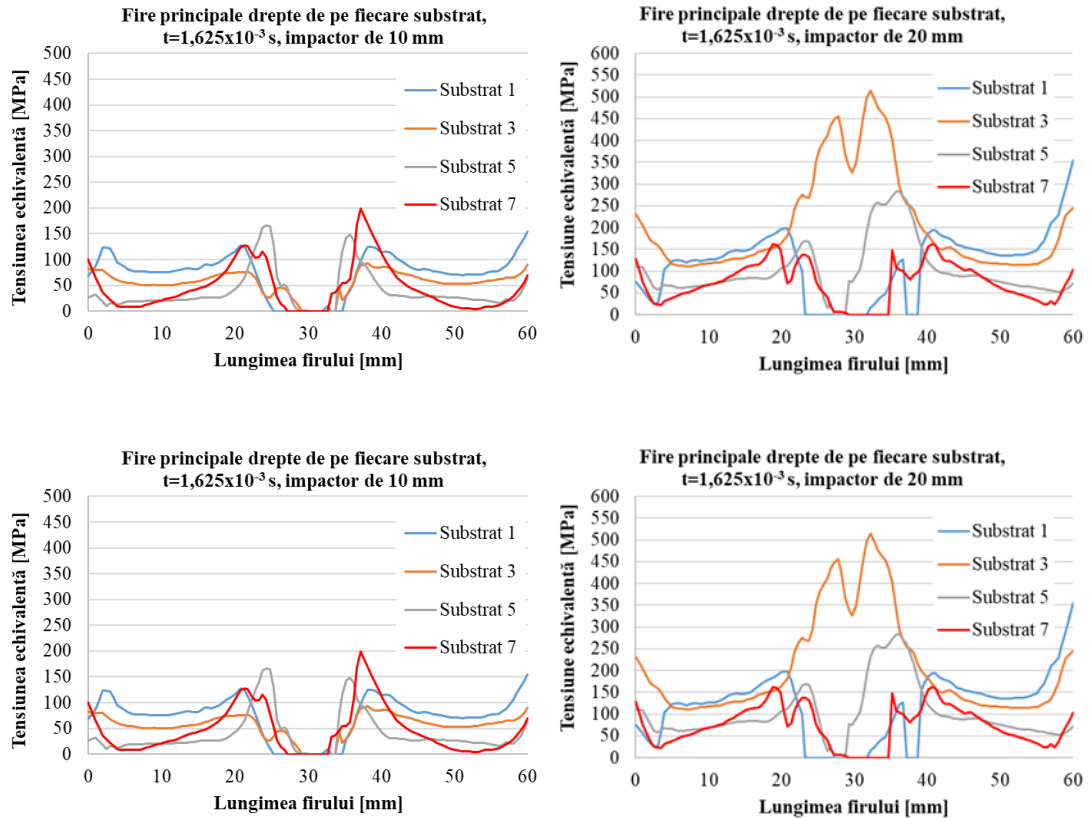


Fig. 3.12. Distribuția de tensiuni echivalente pe firele principale, la momentul $t=1,625 \times 10^{-3}$ s

Etapa a 2-a în care se rup firele principale, în cazul impactorului de 10 mm durează de la $t=8,75 \times 10^{-4}$ s (Fig. 3.11), când se rupe firul drept de pe substratul 7 până la $t=1,625 \times 10^{-3}$ s (Fig. 3.12), când sunt rupte toate firele principale analizate. La impactorul de 20 mm, la acest moment firul 3 și firul 4 sunt încă nerupte, dar puternic tensionate și deformate. La impactul cu corpul cu 20 mm diametru, firele diagonale nu sunt încă rupte, cele din mijlocul compozitului fiind mult mai puțin solicitate. Pentru impactorul de 20 mm, ruperea firelor se termină la momentul $t=1,875 \times 10^{-3}$ s (Fig. 3.13).

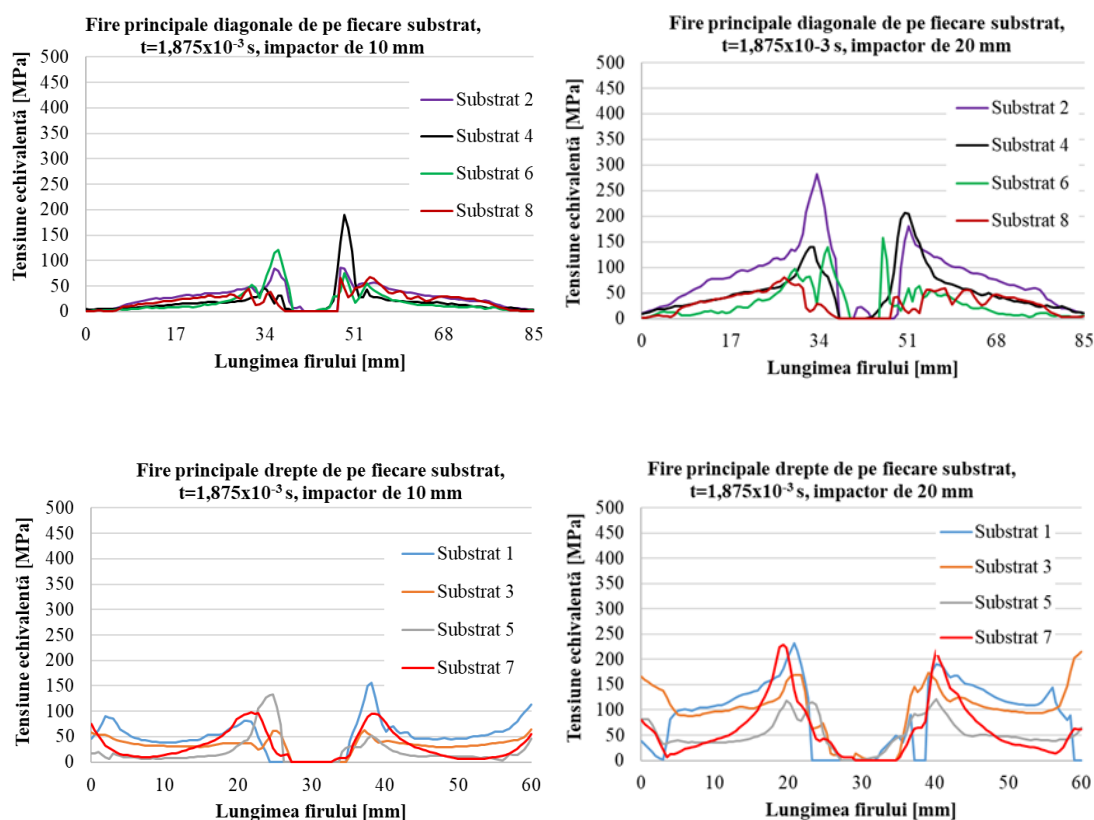


Fig. 3.13. Distribuția de tensiuni echivalente pe firele principale, la momentul $t=1,875 \times 10^{-3}$ s

În etapa a 3-a, în care firele nu se mai rup, dar sunt încă puternic tensionate legăturile între fire (nodurile comune între fire), deci există o zonă în compozit, în jurul contactului direct cu impactorul în care sunt depășite valorile limită pentru tensiunea de tracțiune și/sau cea de forfecare care „desfac” aceste noduri. Din graficele din Fig. 3.14 se observă că delaminarea este mai puțin intensă pentru compozitul lovit cu impactorul de 10 mm și mai intensă, dezvoltată pe o zonă mai mare, pentru impactorul de 20 mm. Această observație este susținută și de fotografiile macro ale plăcilor reale, testate în aceleași condiții. În plus, se observă că delaminarea este mai intensă (vizibilă prin diferența de culoare) pe spatele plăcilor. Din cauza orientării diferite a firelor pe substraturi, delaminarea nu are o formă circulară.

Simularea impactului a fost realizată până la momentul $t=2,5 \times 10^{-3}$ s (Fig. 3.15).

Impactor de 10 mm



Impactor de 20 mm



Fig. 3.14. Imagini ale plăcilor testate în aceleași condiții ca și cazurile simulate ($v_3=4$ m/s, plăci de 60 mm×60 mm)

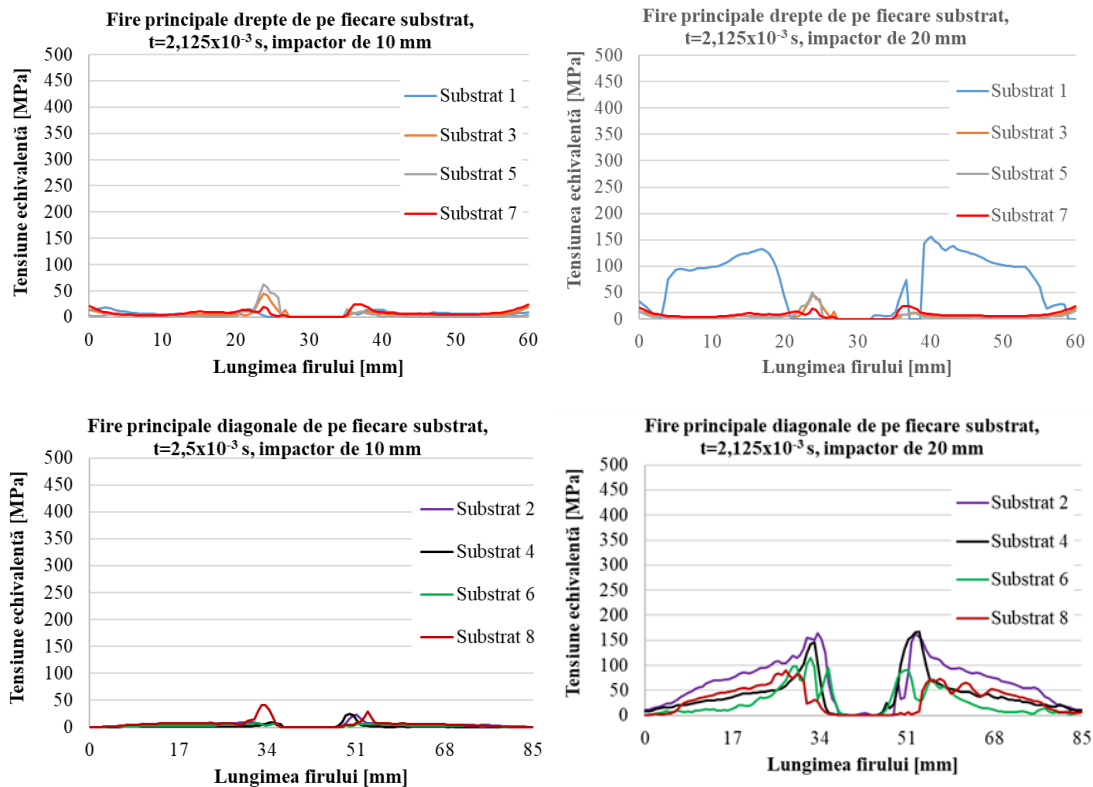
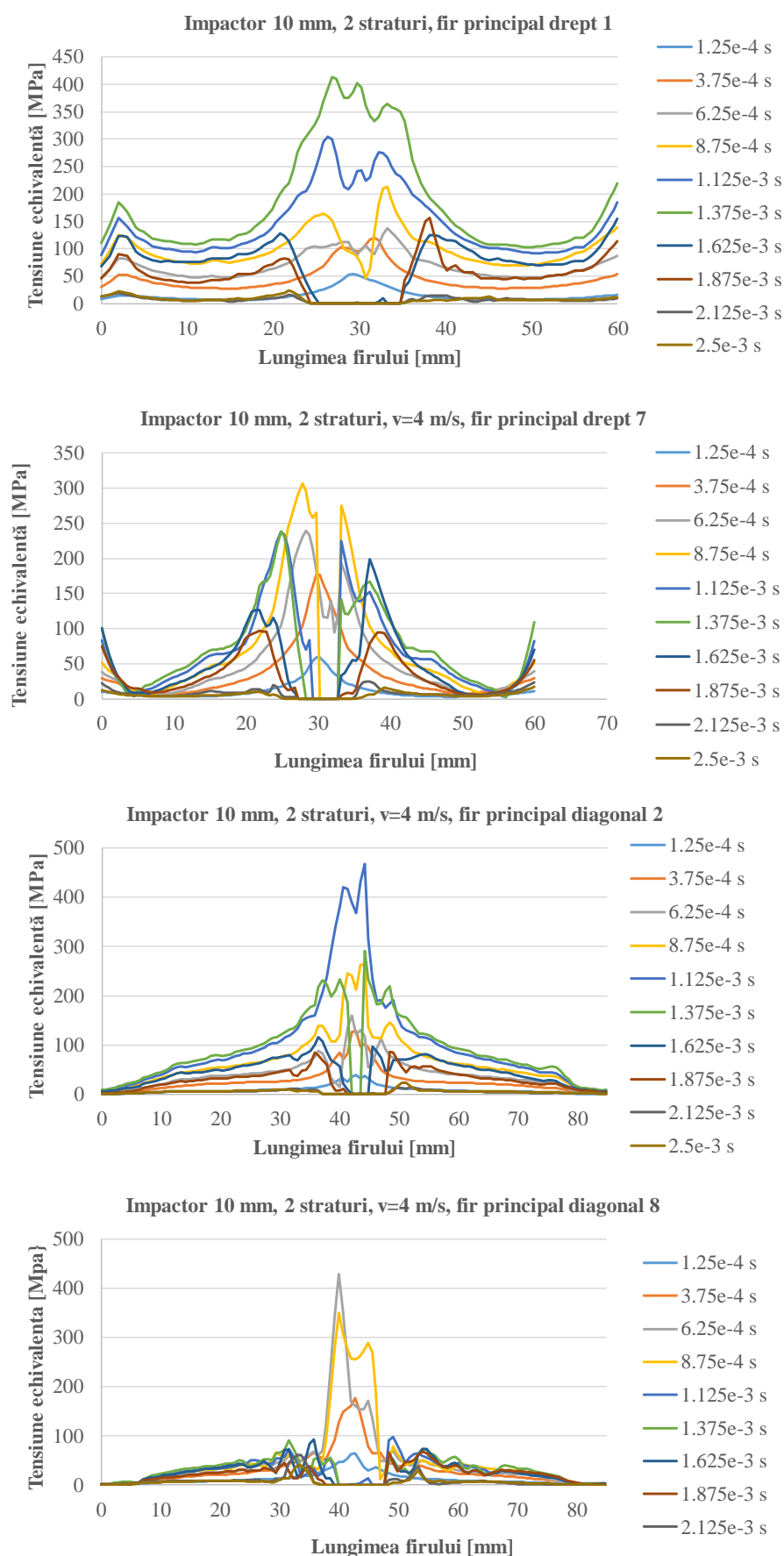


Fig. 3.15. Evoluția comparativă a tensiunii echivalente (în MPa) pentru firele diagonale: pentru impactorul de 10 mm (coloana din stânga), pentru impactorul de 20 mm (coloana din dreapta)

Figurile 3.16 și 3.18 prezintă tensiunile echivalente pe lungimea firelor principale, doar pentru firele 1, 2, 7 și 8, fire care sunt puternic solicitate și se rup primele, pentru impactorul cu diametrul de 10 mm, pentru toate momentele din simulare.



Firul principal 1 se rupe între $t=1,375 \times 10^{-3}$ și $t=1,65 \times 10^{-4}$ s. Ruperea firului se realizează în două puncte, fragmentul central rezultat fiind comprimat pe celelalte substraturi. Minimul de la $t=8,75 \times 10^{-4}$ este rezultatul deformării plastice locale cu micșorarea tensiunii echivalente.

Firul principal drept 7 se rupe între $t=6,25 \times 10^{-4}$ s și $t=8,75 \times 10^{-4}$ s. Apar tensiuni echivalente mari pe capetele rupte ale firului din cauza încovoierii acestora la trecerea impactorului (mai ales când impactorul trece cu partea cilindrică).

Ruperea firului principal diagonal 2 apare între momentele $t=1,375 \times 10^{-3}$ s și $t=1,625 \times 10^{-3}$ s din simulare.

Firul principal 8 se rupe între momentele $t=8,75 \times 10^{-4}$ s și $t=1,125 \times 10^{-3}$ s. Ruperea apare spre marginea contactului cu impactorul. După rupere firul este împins de impactor dar tensiunile echivalente sunt mici, sub 100 MPa.

Fig. 3.16. Distribuția de tensiuni echivalente pe fire principale diagonale, impactor de Ø 10 mm

Au fost alese doar primele două fire (de pe substraturile 1 – fir drept și 2 – fir diagonal) și ultimile două (de pe substraturile 7 – fir drept și 8 – fir diagonal), în teză fiind prezentate toate cele 8 fire principale selectate pentru analiză.

Figura 3.17a prezintă orificiul de ieșire pentru placa lovită cu impactor de 10 mm. Este mai dificil de stabilit orientarea inițială a firelor pentru că unul din fire a fost puternic încovoiat, și pentru că ruperea lui a fost într-o parte față de axa impactorului iar partea puternic încovoiată a firului a fost destul de lungă și desprinsă din matrice, încât să treacă prin orificiul format de impactor în compozit.

În Fig. 3.17b se prezintă ruperea, local asimetrică, a câtorva fire principale din primele substraturi, în care A reprezintă firul principal drept, de pe substratul 1, B – firul principal înclinat la -45° , de pe substratul 2, C – firul principal perpendicular pe firul A din primul substrat, și D – firul principal diagonal, înclinat la $+45^{\circ}$. Se observă că firele sugerează fragmentarea lor sub impactor, adică rupe fiecărui fir în două puncte ale acestuia, așa cum se deduce și din graficele tensiunilor echivalente, rezultate din simulare. Aceste fragmente pot fi antrenate de capul impactorului în afara plăcii dacă penetrarea este totală sau rămân comprimate (strivite, fisurate) pe substratul care nu are fire rupte. Pe imaginile SEM, asemenea fragmente se observă greu, doar dacă rămân prinse în firele nerupte pentru că probele sunt suflate cu jet de aer pentru a îndepărta fragmente de fibre de sticlă care pot înfunda filtrul camerei de vid a microscopului electronic.

Figura 3.18 prezintă analiza tensiunilor echivalente pentru firele principale de pe substraturile 1, 2, 7 și 8 pentru cazul de simulare a impactului cu impactor de 20 mm, la viteza de 4 m/s, pe aceeași placă de compozit cu 2 straturi de țesătură cuadriaxială (8 substraturi de fire din fibre de sticlă).

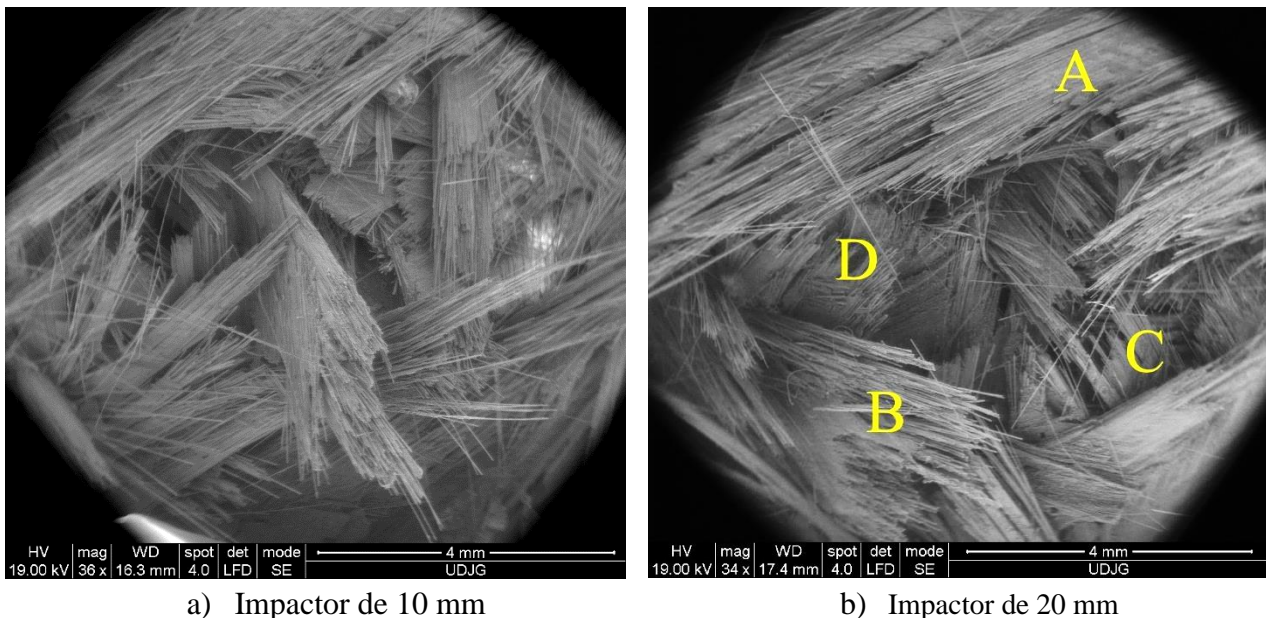
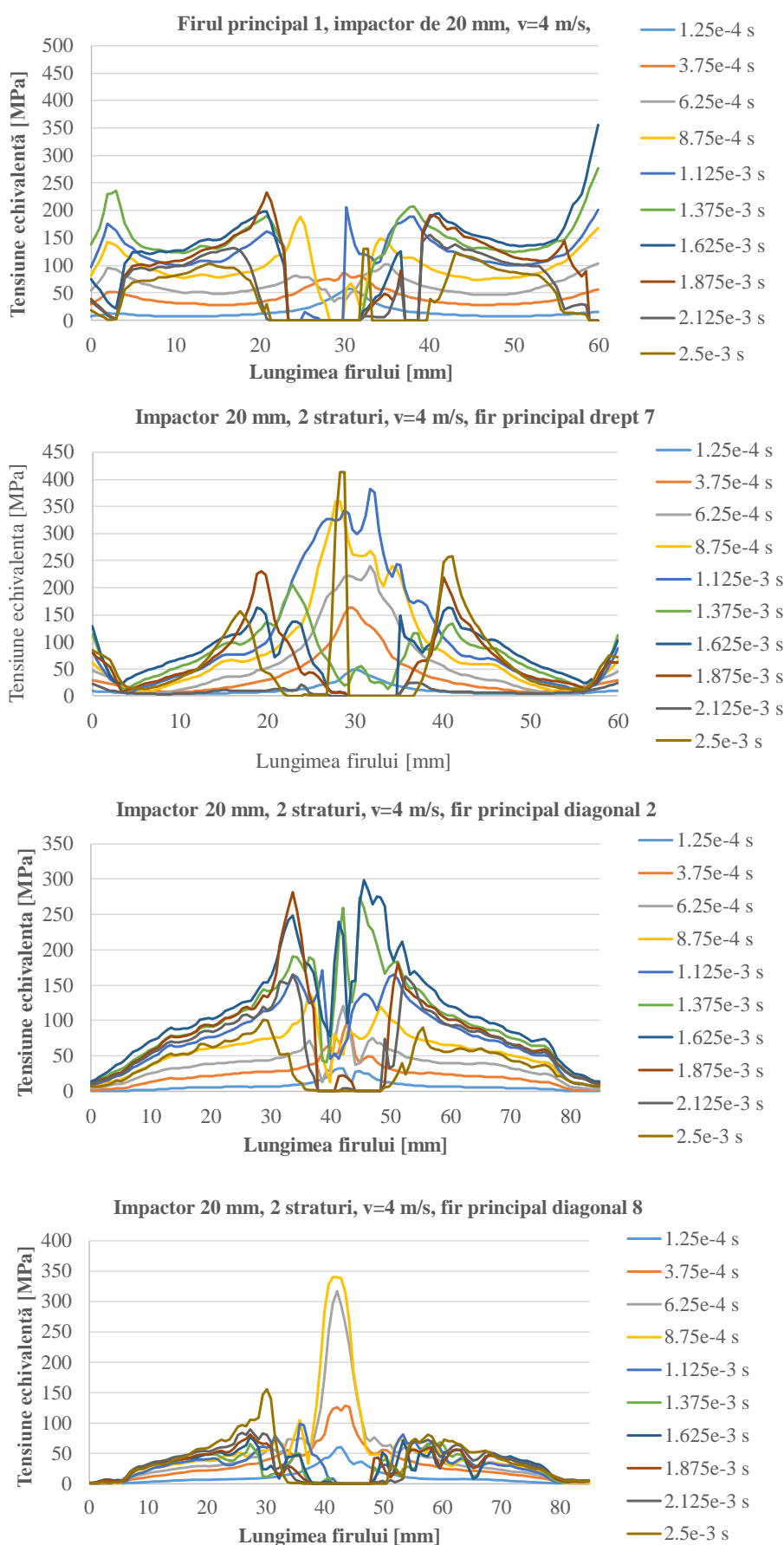


Fig. 3.17. Ruperea local asimetrică a firelor principale de pe substraturi, pentru o probă lovită cu $v_3=4$ m/s (vedere din spatele plăcii)



Firul principal drept 1 se rupe între momentele simulării $t=6.25 \times 10^{-3}$ s și $t=8.75 \times 10^{-4}$ s. Acest interval de timp indică momentul în care firul nu mai poate suporta încărcarea și cedează sub acțiunea solicitării.

Firul principal 7 se rupe între $t=1.375 \times 10^{-3}$ s și $t=1.625 \times 10^{-3}$ s. Pe capetele rupte ale firului apar tensiuni echivalente mari, ceea ce indică că acestea sunt supuse la încovoiere la trecerea impactorului, mai ales în zona cilindrică.

Firul principal 2 se rupe de în două locuri, între momentele $t=1.625 \times 10^{-3}$ s și la $t=1.875 \times 10^{-3}$ s.

Firul diagonal 8 se rupe între $t=8.75 \times 10^{-3}$ s și $t=1.125 \times 10^{-3}$ s.

Fig. 3.18. Distribuția de tensiuni echivalente pe fire principale diagonale, impactor de \varnothing 20 mm

3.7. Concluzii asupra rezultatelor simulării impactului

Evaluarea simulării impactului de viteză mică relevă faptul că distrugerea plăcilor este similară pentru ambele impactoare (unul de 10 mm în diametru, celălalt de 20 mm), dar modelul de detașare dintre fire și dintre straturi ar putea fi îmbunătățit prin introducerea zonei coezive de grosime zero (CZM). S-a evidențiat influența orientării firelor, dar caracteristicile detașării firelor ar putea fi supraestimate. Pentru a continua cercetarea, se propune determinarea caracteristicilor rășinii și compozitului prin experimente, pentru a obține parametrii necesari aplicării modelului CZM de grosime zero [10], [19].

Modelul a fost rulat pentru suprafața probelor, de 60 mm × 60 mm, dar geometria plăcii poate fi modificată pentru plăci de suprafață mai mare, apropiate de cele ai aplicației reale.

Modelul poate fi folosit pentru o estimare inițială a grosimii pentru care panoul rezistă la un anumit impact, caracterizat prin viteza și masa impactorului.

Analizând graficele tensiune echivalentă pe lungimea firelor principale, se confirmă ruperea local asimetrică prin imaginile SEM din Fig. 3.17., în care s-a ales o scară relativ mică de mărire (×40, ×50), astfel încât se poate vedea tot orificul de trecere a impactorului și ruperea firelor.

Capitolul 4. Procesul de fabricație al compozitelor multiaxiale din fibră de sticlă

4.1. Planul de teste, destinat încercării compozitelor cu țesătură cuadriaxială și rășină epoxidică

Analiza soluțiilor tehnologice pentru materiale compozite cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă la impact cu viteză mică a fost investigată în mai multe studii [16], [32], [43], [45]. Balasubramaniam K. et al. [6] a propus testarea nedistructivă, bazată pe analiză calorimetrică, pentru a identifica și localiza distrugerilor de impact, abia vizibile în structurile polimerice armate cu fibră de sticlă. În urma impactului, se pot produce schimbări subtile în proprietățile termice ale materialului, care pot fi detectate și analizate pentru a identifica și localiza distrugerile abia vizibile. Rajan, B. G. et al. [41] a analizat rezistența la impact a țevilor compozite hibride, din fibre de carbon și fibră de sticlă și a constatat că rezistența la impact scade odată cu creșterea unghiului de orientare a firelor. S-a constatat că rezistența la impact scade pe măsură ce unghiul de orientare al fibrelor crește.

În Fig. 4.1 este detaliat planul de teste efectuat în această teză. După cum se observă, fiecare test caracterizat prin (număr de straturi, impactor, viteză de impact) se repetă de 3 ori.

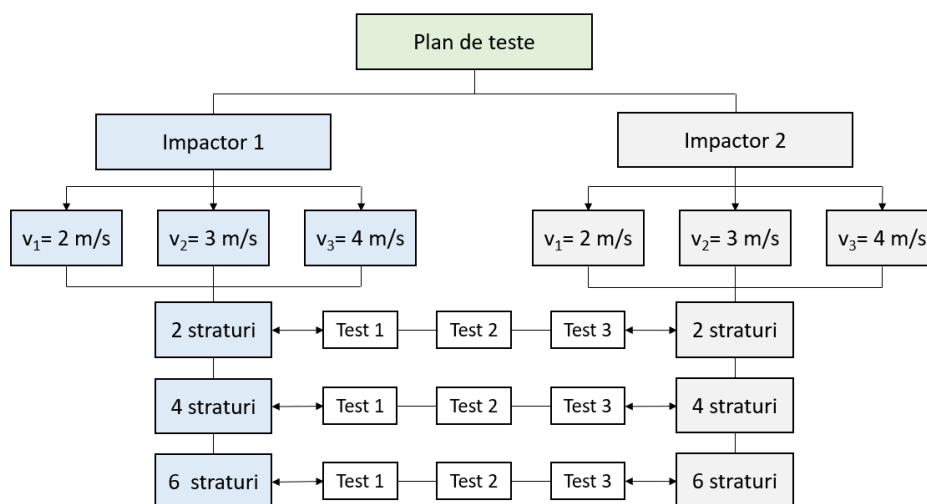


Fig. 4.1. Plan de teste efectuat în teză

4.2. Materialele utilizate în realizarea probelor de compozit

4.2.1. Țesătura de fibre de sticlă

Studiul a utilizat o țesătură stratificată în patru substraturi cu orientare ($0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$) (conform Fig. 4.2 în care a) vederea țesăturii, b) un fir și c) fibre dintr-un fir, cu diametrul transversat măsurat), care oferă proprietăți cvasi-izotrope. Această țesătură are denumirea comercială "1200 g/m² Quatriaxial Glass Cloth ($0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$) 127" și este fabricată din fibre de sticlă de tip E [55], Produsul a fost achiziționat de la firma Castro sub codurile WTVQX1200-1 E-glass și Q1200E10Q [51].

Tabelul 4.1 prezintă compoziția elementală a fibrelor de sticlă (valori medii), obținute prin metoda EDX.

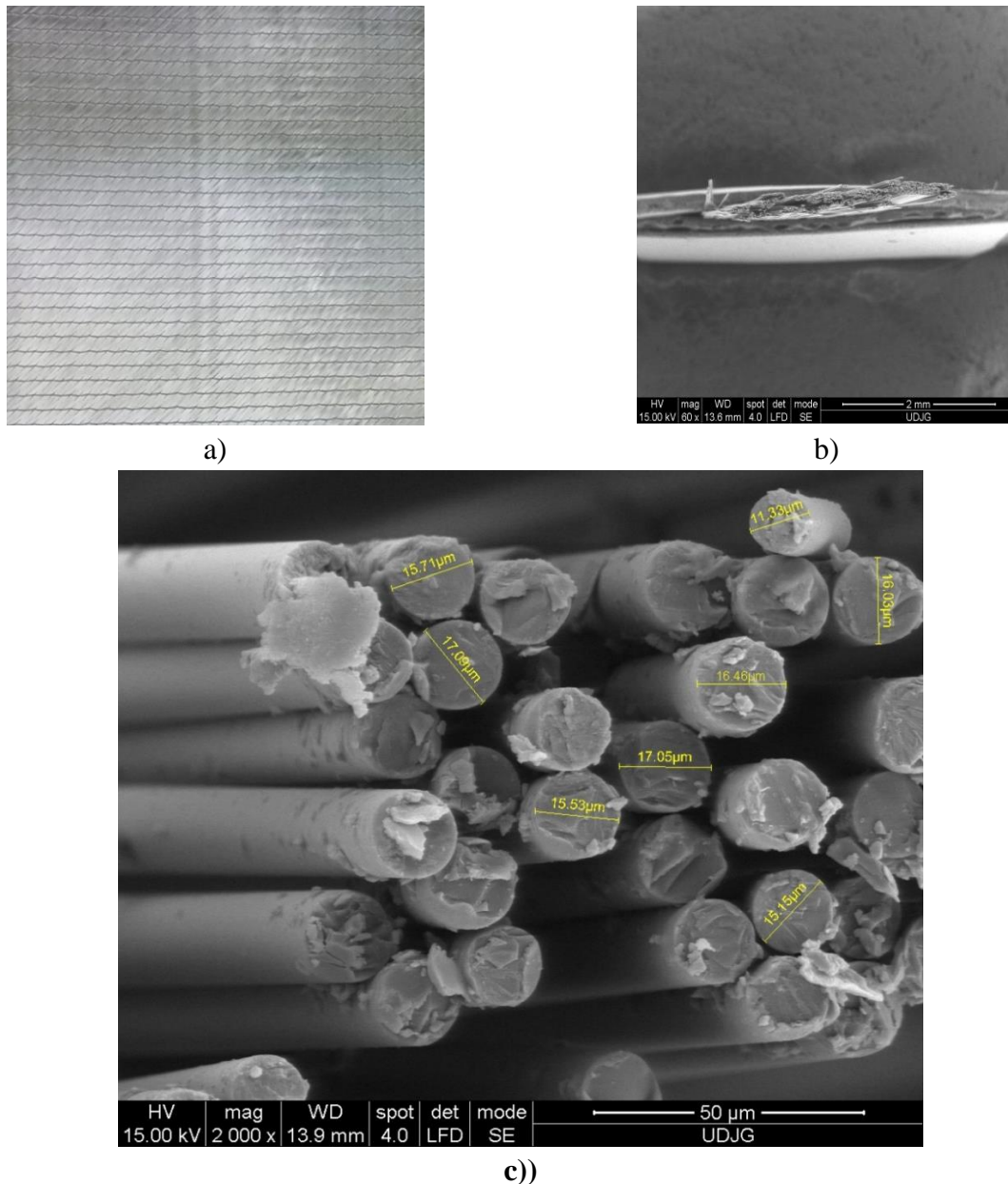


Fig. 4.2. Imagini macro și micro ale țesăturii cuadriaxiale

Prin combinarea acestei țesături cu rășina selectată se pot obține panouri compozite cu performanțe superioare, pentru o gamă largă de aplicații, de la construcții și industria navală, până la sectorul aeronautic sau cel pentru echipamente sportive.

Tabelul 4.1. Arhitectura țesăturii multiaxiale din fibre de sticlă

| Nr. Crt. | Orientarea fibrei pe substrat | Masa unității de suprafață (g/m ²) |
|----------|-------------------------------|--|
| 1 | 0° | 283 |
| 2 | 45° | 300 |
| 3 | 90° | 307 |
| 4 | -45° | 300 |
| 5 | Fir auxiliar | 10 |
| Total | - | 1200(±3%) |

Tabelul 4.2. Analiza compoziției chimice a fibrei de sticlă utilizată (valori medii) [Ojoc, G. (2022)]

| Wt% | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| B | C | O | Na | Mg | Al | Si | S | Cl | K | Ca | Ti | Fe | Zn |
| Secțiuni transversale prin fibră | | | | | | | | | | | | | |
| 29,39 | 24,75 | 9,03 | 0,38 | 0,42 | 3,55 | 14,21 | 1,75 | 0,20 | 0,22 | 8,88 | 0,50 | 2,19 | 4,43 |
| Secțiuni transversale prin teacă | | | | | | | | | | | | | |
| 30,81 | 24,11 | 10,34 | 0,48 | 0,74 | 3,61 | 13,21 | 1,61 | 0,22 | 0,48 | 9,07 | 0,88 | 2,82 | 6,69 |

4.2.2. Matricea de rășină epoxidică

Rășina Biresin® CR82 [52] este o rășină epoxidică cu performanțe remarcabile, cu proprietăți mecanice superioare și aderență excelentă la fibrele de sticlă. Această rășină oferă o rezistență ridicată la solicitări mecanice și un grad înalt de durabilitate, făcând-o ideală pentru utilizarea în aplicații cu cerințe de rezistență și durabilitate [56]. Întăritorul CH80-2 este un agent de întărire compatibil cu rășina Biresin® CR82, care conferă proprietăților chimice și mecanice ale compozitului finit. Acest întăritor îmbunătățește rezistența la impact și aderența între rășină și fibre, asigurând o distribuție uniformă a rășinii în compozit și o reacție de întărire adecvată. Combinația dintre rășina Biresin® CR82 și întăritorul CH80-2 oferă un sistem bicomponent foarte eficient pentru fabricarea compozitelor cu fibră de sticlă [54]. Alegerea acestei rășini se bazează pe avantajele pe care le oferă în ceea ce privește proprietățile mecanice, rezistența la impact și aderența la ranforsare, toate acestea fiind cruciale pentru obținerea panourilor compozite de înaltă calitate.

Pentru a obține rezultate optime, este important să se respecte cu precizie raportul de amestecare specificat în fișa tehnică a rășinii Biresin® CR82 cu întăritorul CH80-2. Abaterile de la aceste rapoarte pot conduce la o reducere a performanțelor compozitului rezultat.

Tabelul 4.3. prezintă proprietăți mecanice și termice ale rășinii epoxidice deja formate și tratate termic.

Tabelul 4.3. Caracteristicile mecanice și termice ale rășinii utilizate în acest studiu [53], [37]

| Proprietăți mecanice pentru rășina (după întărire și tratament termic) | | | |
|--|---------------------------|-------------------|--------|
| Rășină Biresin® CR82 (A) | Cu întăritor Biresin® (B) | | CH80-2 |
| Rezistența la rupere la tracțiune | SR EN ISO 527 | MPa | 90 |
| Modul de elasticitate la tracțiune | SR EN ISO 527 | MPa | 3000 |
| Deformația la rupere | SR EN ISO 527 | % | 5,6 |
| Rezistența la rupere încovoiere | SR EN ISO 178 | MPa | 130 |
| Modul de elasticitate la încovoiere | SR EN ISO 178 | MPa | 3200 |
| Rezistența la rupere la compresiune | SR EN ISO 604 | MPa | 105 |
| Densitate | SR EN ISO 1183 | g/cm ³ | 1,14 |
| Duritate Shore | SR EN ISO 868 | - | D 85 |
| Rezistența la impact | SR EN ISO 179 | kJ/m ² | 66 |
| Caracteristicile termice tipice pentru rășina întărită complet | | | |
| Rășină Biresin® CR82 (A) | Cu întăritor Biresin® (B) | | CH80-2 |
| Temperatura de deformare la cald | SR EN ISO 75-1 | °C | 83 |
| Temperatura de tranziție vitrosă | SR EN ISO 11357 | °C | 90 |

Prin utilizarea întăritorului CH80-2, rășina rezultată are o rezistență la rupere la tracțiune destul de mare pentru grupa aceasta de rășini. Cu întăritorul CH80-1 rășina rezultată ar avea o rezistență la rupere la tracțiune cu doar 5% mai mare decât cea obținută folosind întăritorul CH80-2. S-a ales acesta din urmă pentru componentul A, datorită timpului de prelucrare mai scurt, dar suficient pentru a monta în presă compozitul elaborat. Alegerea întăritorului CH80-2 pare a fi adecvată în cadrul acestui studiu, având în vedere că procesul exoterm și răcirea ulterioară s-au realizat într-un interval de timp rezonabil (aproximativ 1 oră de la pensulare), permițând o întărire (îmbătrânire naturală și artificială) corespunzătoare și menținerea integrității compozitului.

Pentru acest studiu, s-a optat pentru menținerea eșantioanelor la 60°C timp de 6 ore, rezultatul obținut apropiindu-se de evoluția reprezentată de curba albastră. Înainte de a fi supuse tratamentului, eșantioanele au fost lăsate să îmbătrânească natural timp de 7 zile la temperatura de 23°C.

4.3. Tehnologia de laborator pentru obținerea panourilor

Obiectivul tehnologiei proiectate de autor a fost obținerea la nivel de laborator a unor panouri din material compozit cu țesături multiaxiale (cuadriaxiale) din fibre de sticlă, care vor fi apoi testate la impact de viteză mică.

Laboratorul de lucru a fost organizat în două standuri:

- standul I amenajat pentru tăierea valului de fibră de sticlă
- standul II amenajat pentru fabricarea panourilor, care include presa și masa de lucru

Operațiile pentru realizarea plăcilor compozite sunt: croirea foilor de țesătură quadriaxială (Fig. 4.3), cu dimensiuni 400 mm × 400 mm, cântărirea pachetelor de 2, 4 și 6 foi, ceruirea matriței pentru o mai ușoară scoatere a plăcii, realizarea amestecului de rășină prin amestecarea celor două componente în proporția recomandată de producător, pensularea foilor cu rășină (Fig. 4.4), presarea compozitului în presă și menținerea presiunii pentru 24 de ore, scoaterea din presă, verificarea și netezirea muchiilor, îmbătrânire naturală în atmosferă de laborator timp de șapte zile, tratament termic de îmbătrânire artificială și stabilizare (6 ore la 60°C într-o etuvă cu temperatură controlată), verificarea calității plăcilor și măsurarea unor caracteristici (grosime în patru puncte, masa, calculul raportului dintre masa țesăturii și masa compozitului, trasarea probelor de 60 mm × 60 mm pentru efectuarea testelor (Fig. 4.5)., tăierea lor cu freză disc de mare viteză în regim uscat (Fig. 4.3) și codificarea lor.



Fig. 4.3. Confecționarea foilor de țesătură quadriaxială



Fig. 4.4. Presa în care au fost introduse plăcile



Fig. 4.5. Trasarea eşantioanelor de testat pe panourile compozite formate

Panourile formate au fost introduse în presa metalică și menținute pentru o perioadă de 12 ore, sub sarcină.

După ce procesul de presare a fost finalizat, panourile au fost scoase și au necesitat efectuarea operațiunilor de finisare a marginilor. După finalizarea acestui proces produsul finit a fost verificat, s-a măsurat grosimea lui în patru puncte și s-a cântărit.



Fig. 4.6. Tăierea eşantioanelor din panoul de material compozit

Figura 4.5 prezintă procesul de trasare pe panourile compozite formate. În această etapă, pe panourile compozite sunt marcate și delimitate zonele din care vor fi tăiate eşantioanele, care ulterior vor fi supuse testelor de impact la viteză mică. Panoul compozit de $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ a fost împărțit în panouri de dimensiuni mici, $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$.

4.4. Caracterizarea panourilor elaborate

S-au elaborat următoarele plăci compozite: 2 plăci de 2 straturi de țesătură cuadriaxială, 2 plăci de 4 straturi și 2 plăci de 6 straturi. Pentru fiecare set s-au măsurat și calculat caracteristicile din Tabelele 4.4, 4.5 și 4.6.

Tabelul 4.4. Caracteristicile panourilor cu 2 straturi

| Nr Crt. | Masa țesăturii [g] | Masa plăcii [g] | Masa rășinii* [g] | Raportul masic țesătură/placă** | Densitatea de suprafață*** [kg/ m ²] | Grosime în 4 puncte | | | | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|---|---------------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | medie |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Placa 1 | 221,5 | 316 | 94,5 | 0,700 | 3,511 | 1,65 | 1,61 | 1,65 | 1,70 | 1,6525 |
| Placa 2 | 221,5 | 316 | 94,5 | 0,700 | 3,511 | 1,65 | 1,70 | 1,6 | 1,6 | 1,6375 |
| Media | 221,5 | 316 | 94,5 | 0,7 | 3,511 | 1,65 | 1,65 | 1,625 | 1,65 | 1,6425 |
| Max | 221,5 | 316 | 94,5 | 0,7 | 3,511 | 1,65 | 1,70 | 1,65 | 1,7 | 1,6525 |
| Min | 221,5 | 316 | 94,5 | 0,7 | 3,511 | 1,65 | 1,61 | 1,6 | 1,6 | 1,6375 |

Tabelul 4.5. Caracteristicile panourilor cu 4 straturi

| Nr Crt. | Masa țesăturii [g] | Masa plăcii [g] | Masa rășinii* [g] | Raportul masic țesătură/placă** | Densitatea de suprafață*** [kg/ m ²] | Grosime în 4 puncte | | | | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|---|---------------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | medie |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Placa 1 | 439,5 | 608,5 | 169 | 0,722 | 6,761 | 3,35 | 3,34 | 3,4 | 3,45 | 3,385 |
| Placa 2 | 440 | 603,5 | 163,5 | 0,729 | 6,7 | 3,4 | 3,45 | 3,6 | 3,5 | 3,4875 |
| Media | 439,75 | 606 | 166,25 | 0,7255 | 6,7305 | 3,375 | 3,395 | 3,5 | 3,475 | 3,436 |
| Max | 440 | 608,5 | 169 | 0,729 | 6,761 | 3,4 | 3,45 | 3,6 | 3,5 | 3,4875 |
| Min | 439,5 | 603,5 | 163,5 | 0,722 | 6,7 | 3,35 | 3,34 | 3,4 | 3,45 | 3,385 |

Tabelul 4.6. Caracteristicile panourilor cu 6 straturi

| Nr Crt. | Masa țesăturii [g] | Masa plăcii [g] | Masa rășinii* [g] | Raportul masic țesătură/placă** | Densitatea de suprafață*** [kg/ m ²] | Grosime în 4 puncte | | | | |
|--------------|-----------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|---|---------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | medie |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Placa 1 | 664 | 897 | 233 | 0,740 | 9,966 | 5 | 4,5 | 5,5 | 5 | 5 |
| Placa 2 | 662 | 883,5 | 221,5 | 0,749 | 9,816 | 5,6 | 5,7 | 5,8 | 5,7 | 5,7 |
| Media | 663 | 890,25 | 227,25 | 0,744 | 9,891 | 5,3 | 5,1 | 5,65 | 5,35 | 5,35 |
| Max | 664 | 897 | 233 | 0,749 | 9,966 | 5,6 | 5,7 | 5,8 | 5,7 | 5,7 |
| Min | 662 | 883,5 | 221,5 | 0,740 | 9,816 | 5 | 4,5 | 5,5 | 5 | 5 |

4.5. Proceduri de testare și mașina de testare

Au fost folosite două diametre diferite de impactor semisferic, din oțel durificat, impactorul 1 având diametrul de 10 mm, în timp ce impactorul 2 are o dimensiune de 20 mm în diametru. Aceasta este singura diferență dintre cele două tipuri de impactori. Viteza impactorului variază între 2 m/s și 4 m/s, cu trei valori diferite testate, pentru fiecare dimensiune a impactorului: $v_1 = 2$ m/s, $v_2 = 3$ m/s, $v_3 = 4$ m/s.

Testele de impact au fost efectuate la temperatura camerei, utilizând mașina de impact cu turn cu cădere controlată pneumatic, Instron CEAST 9340 (interval al energiei maxime de lovire 0,3-405 J, interval al vitezei de lovire 0,77-4,65 m/s, masa impactorului între 1 kg și 37,5 kg iar înălțimea de cădere reglabilă pentru a obține energia de lovire dorită), așa cum este ilustrat în Fig. 4.7.



Fig. 4.7. Mașina de testat la impact de viteză mică Instron CEAST 9340 - [57] în timpul testelor

Figura 4.8 prezintă graficele în funcție de timp a parametrilor analizați în această lucrare, așa cum au fost obținute cu ajutorul softului dedicat al mașinii de încercat la impact Instron CEAST 9340 [57] și prelucrate în Excel. Este un exemplu concret al testelor efectuate cu aceleași parametri și se observă că variația formei curbelor și a parametrilor de interes este foarte mică în comparație cu valorile măsurate. Aceasta indică o foarte bună repetabilitate a experimentelor iar teza conține reprezentarea tuturor testelor efectuate în Anexa cu date experimentale.

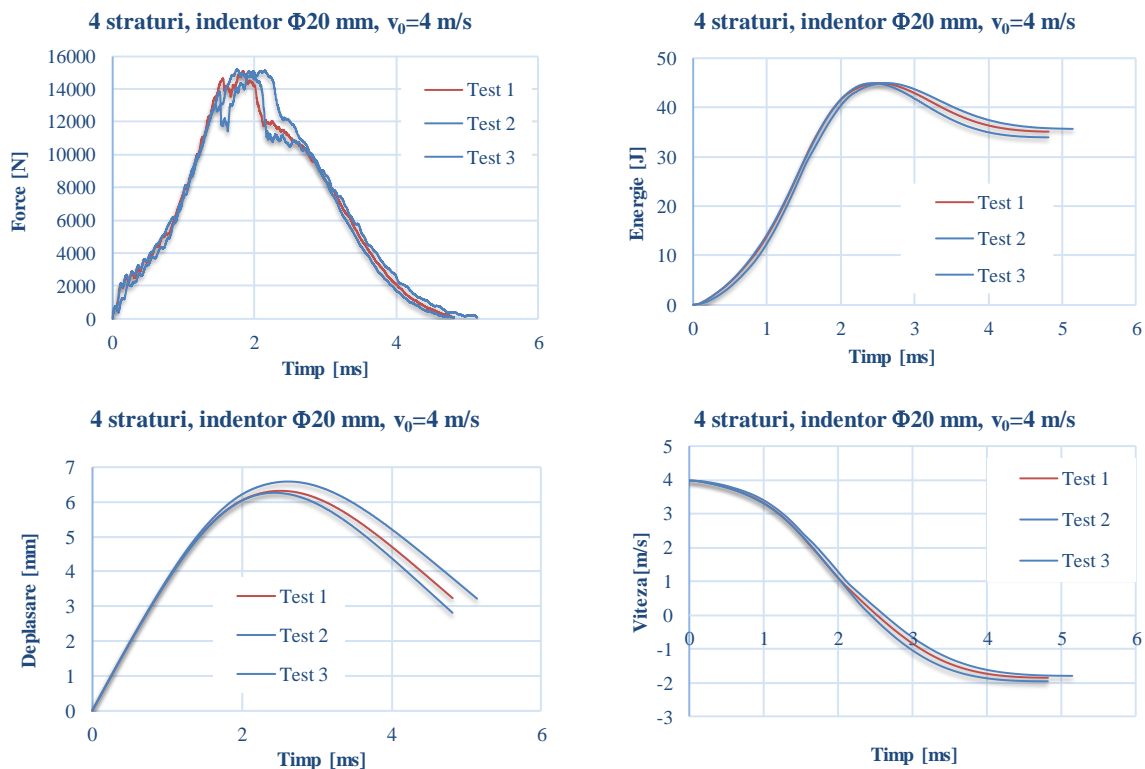


Fig. 4.8. Repetabilitate exemplificată grafic, pentru testel efectuate pe panourile de 4 strat-uri, cu impactorul de 20 mm

4.6. Concluzii privind realizarea panourilor

Caracteristicile panourilor compozite elaborate pentru acest studiu sunt prezentate în Tabelul 4.7. De remarcat raportul între masa țesăturii și masa plăcii, care are o medie de 0,723, cu o deviație standard de 0,018. Dacă se calculează în procentul raportul dintre deviația standard și valoarea medie a acestei caracteristici a panourilor, se obține 2,49%, ceea ce reflectă o calitate foarte bună a panourilor compozite realizate.

Tabelul 4.7. Caracteristicile panourilor elaborate

| Codul de panou (număr de straturi) | Grosimea medie | Masa | Densitatea de suprafață | Raportul masic țesătură/placă |
|---|-----------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | [mm] | [g] | [kg/m ²] | - |
| S2 | 1,6425 | 316 | 3,511 | 0,700 |
| S4 | 3,436 | 606 | 6,733 | 0,725 |
| S6 | 5,25 | 890,25 | 9,891 | 0,744 |

În funcție de rezultatele testelor de impact, tehnologia poate fi îmbunătățită pentru grosimile selectate, în vederea reducerii timpului de realizare și control, bazându-ne pe experiența acumulată în realizarea acestor seturi de panouri.

Capitolul 5. Interpretarea rezultatelor obținute experimental și investigația mecanismelor de cedare

5.1. Parametrii mășurați la testul de impact la viteză mică

Această teză de doctorat a implicat eforturi considerabile pentru investigarea răspunsului compozitelor cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă în fața încărcărilor de impact de viteză mică, folosind diverse metode experimentale avansate, raportate în [42], [16].

Testele de impact la viteză mică cu mașina de impact INSTRON CEAST 9340 permit determinarea unor parametri care caracterizează comportamentul compozitelor cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă sub acțiunea unei sarcini dinamice. S-au efectuat câte trei teste pentru fiecare set de parametri de încercare (număr de straturi, viteză de impact, diametrul impactorului).

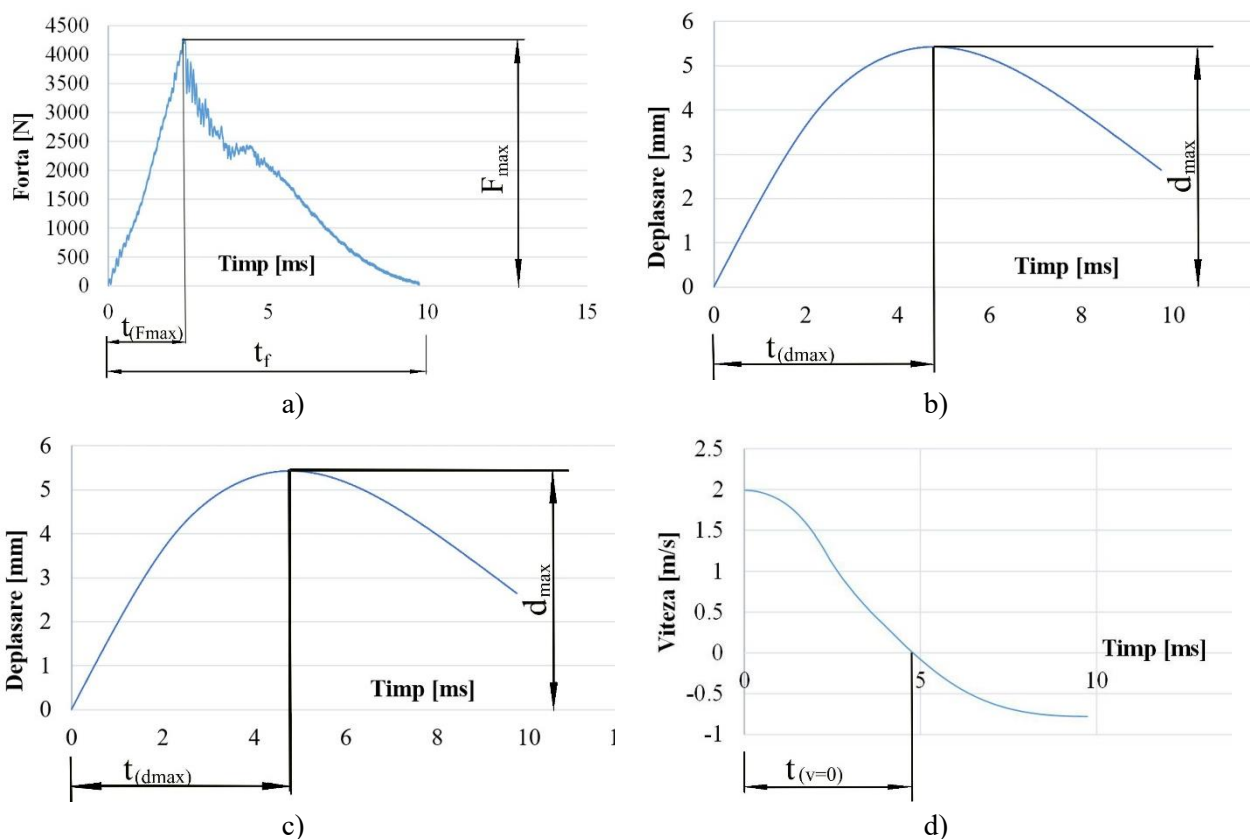


Fig. 5.1. Semnificația parametrilor analizați

Pe graficele obținute pe mașina droptest se pot identifica etapele procesului de impact: solicitare în domeniul elastic și elasto-plastic până la forța maximă, o etapă de distrugere prin impact, diferențiată dacă impactorul este respins (pătrundere parțială) sau dacă trece prin placă (pătrundere totală). În Fig.5.1 prezintă parametrii de interes pentru caracterizarea răspunsului la impact a fiecărei probe. Notațiile au următoarele semnificații:

g_p – grosime panou, în mm

F_{max} – forța maximă, în N,

$t_{(F_{max})}$ – timpul de la începutul impactului până la valoarea maximă a forței (F_{max}), în ms,

t_f – durata de la începutul impactului până la anularea forței de impact ($F=0$), în ms,

E_{max} – energie maximă, în J,

$t_{(E_{max})}$ – timpul de la începutul impactului până la valoarea maximă a energiei absorbite (E_{max}), în ms,

$t_{(v=0)}$ – timpul de la începutul impactului până la valoarea zero a vitezei impactorului ($v=0$), în ms,

d_{max} – deplasare maximă, în mm

$t_{(dmax)}$ – timpul de la începutul impactului până la deplasarea maximă, în ms,

v_1, v_2, v_3 – viteza nominală de impact, în m/s ($v_1=2$ m/s, $v_2=3$ m/s și $v_3=4$ m/s).

Tabelul 5.1 este un exemplu a modului de prezentare a acestor parametri. Rezultatele tuturor testelor efectuate sunt prezentate în Anexa tezei. Figura 5.1 prezintă evoluția în timp a forței, deplasării și vitezei impactorului și energia absorbită de epruvetă, pentru trei teste.

Tabelul 5.1. Exemplu de prezentare a rezultatelor testelor, pentru teste efectuate cu impactor de 10 mm, cu $v_1=2$ m/s, pentru setul de 3 panouri realizate din 6 straturi de țesătură cuadriaxială.

| Straturi | Test | Grosime | F_{max} | $t(F_{max})$ | t_f | $t(v=0)$ | E_{max} | $t(E_{max})$ | d_{max} | $t(d_{max})$ |
|--------------|------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| | | [mm] | [N] | [ms] | [ms] | [ms] | [J] | [ms] | [mm] | [ms] |
| 6 | 1 | 3,600 | 6611,047 | 2,105 | 4,619 | 2,265 | 10,902 | 2,265 | 2,647 | 2,265 |
| | 2 | 3,700 | 6143,685 | 2,097 | 4,760 | 2,330 | 10,903 | 2,330 | 2,667 | 2,239 |
| | 3 | 3,540 | 6435,433 | 1,809 | 4,172 | 2,055 | 10,884 | 2,055 | 2,300 | 2,055 |
| Medie | | 3,613 | 6396,722 | 2,004 | 4,517 | 2,217 | 10,896 | 2,217 | 2,538 | 2,186 |
| Max | | 3,700 | 6611,047 | 2,105 | 4,760 | 2,330 | 10,903 | 2,330 | 2,667 | 2,256 |
| Min | | 3,540 | 6143,685 | 1,809 | 4,172 | 2,055 | 10,884 | 2,055 | 2,300 | 2,055 |
| SD | | 0,066 | 192,753 | 0,138 | 0,251 | 0,117 | 0,009 | 0,117 | 0,168 | 0,093 |
| SD% | | 1,826 | 3,013 | 6,884 | 5,548 | 5,294 | 0,080 | 5,294 | 6,639 | 4,275 |

Max – valoarea maximă a parametrului determinat/calculat pentru cele trei teste, Min – valoarea minimă a parametrului determinat/calculat pentru cele trei teste, SD – deviația standard a unui parametru, obținută pentru cele 3 valori, SD% - deviația standard, exprimată în procente, pentru raportul între SD și valoarea medie a parametrului respectiv

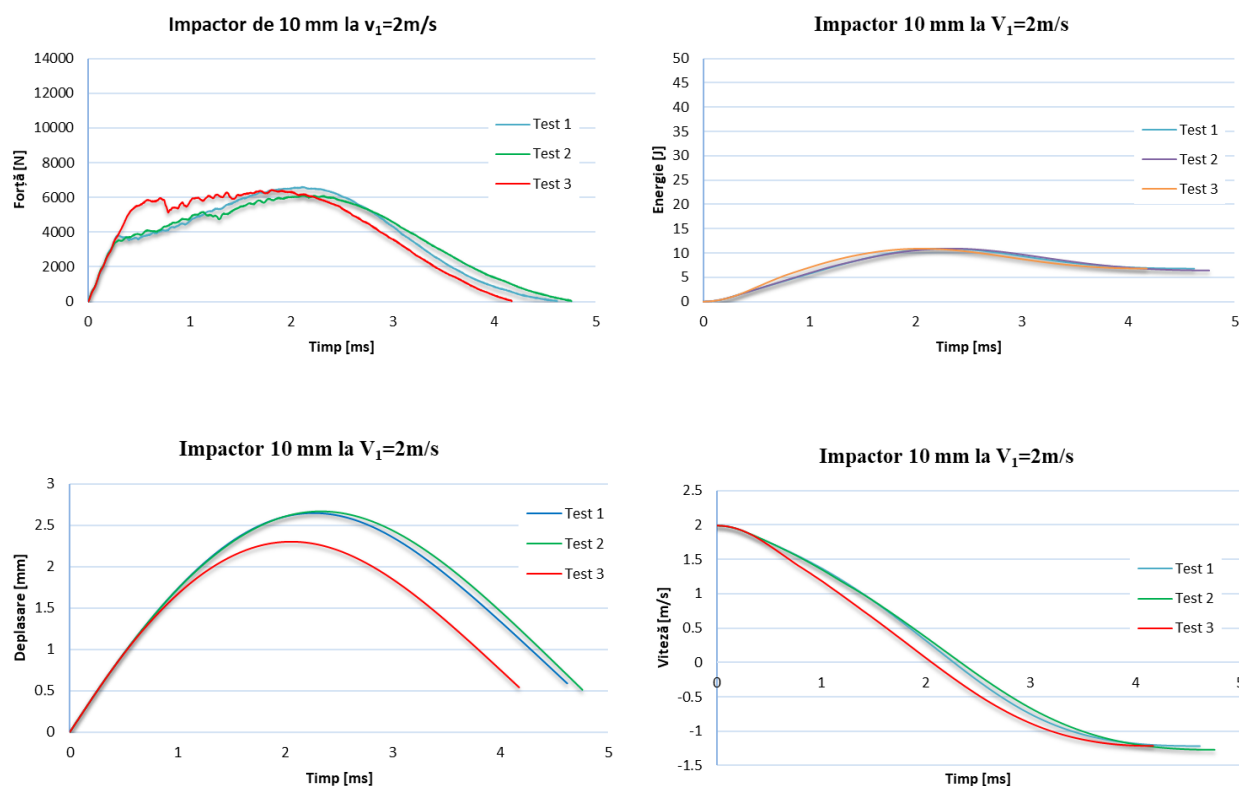


Fig. 5.2. Plăci formate din 6 straturi de fibre de sticlă, testate cu impactor 10 mm, la $v_1=2$ m/s

Se observă că momentul în care se înregistrează E_{max} este același cu momentul în care viteza de impact devine nulă ($v=0$), fizic reflectând că energia cinetică a impactorului a fost, în acel moment,

în totalitate absorbită de panou ($t_{(E_{max})} = t_{(v=0)}$). Reculul impactorului în cazul penetrării parțiale se datorează componentei elastice a deformațiilor panourilor. În cazul penetrării totale, impactorul pătrunde prin panou dar are o viteză reziduală, deci nu întreaga lui energie cinetică inițială a fost absorbită de panou.

5.2. Rezultate experimentale pe mașina de impact INSTRON CEAST 9340

5.2.1. Influența numărului de straturi asupra parametrilor impactului

În cadrul acestui subcapitol, sunt prezentate și analizate rezultatele experimentale obținute prin efectuarea testelor de impact pe mașina de impact Instron CEAST 9340 asupra compozitelor cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă.

În Fig. 5.3 sunt date graficele forță-timp pentru testele efectuate. S-a luat în considerare un singur test din cele trei efectuate și anume cel cu evoluție medie între celelalte două teste.

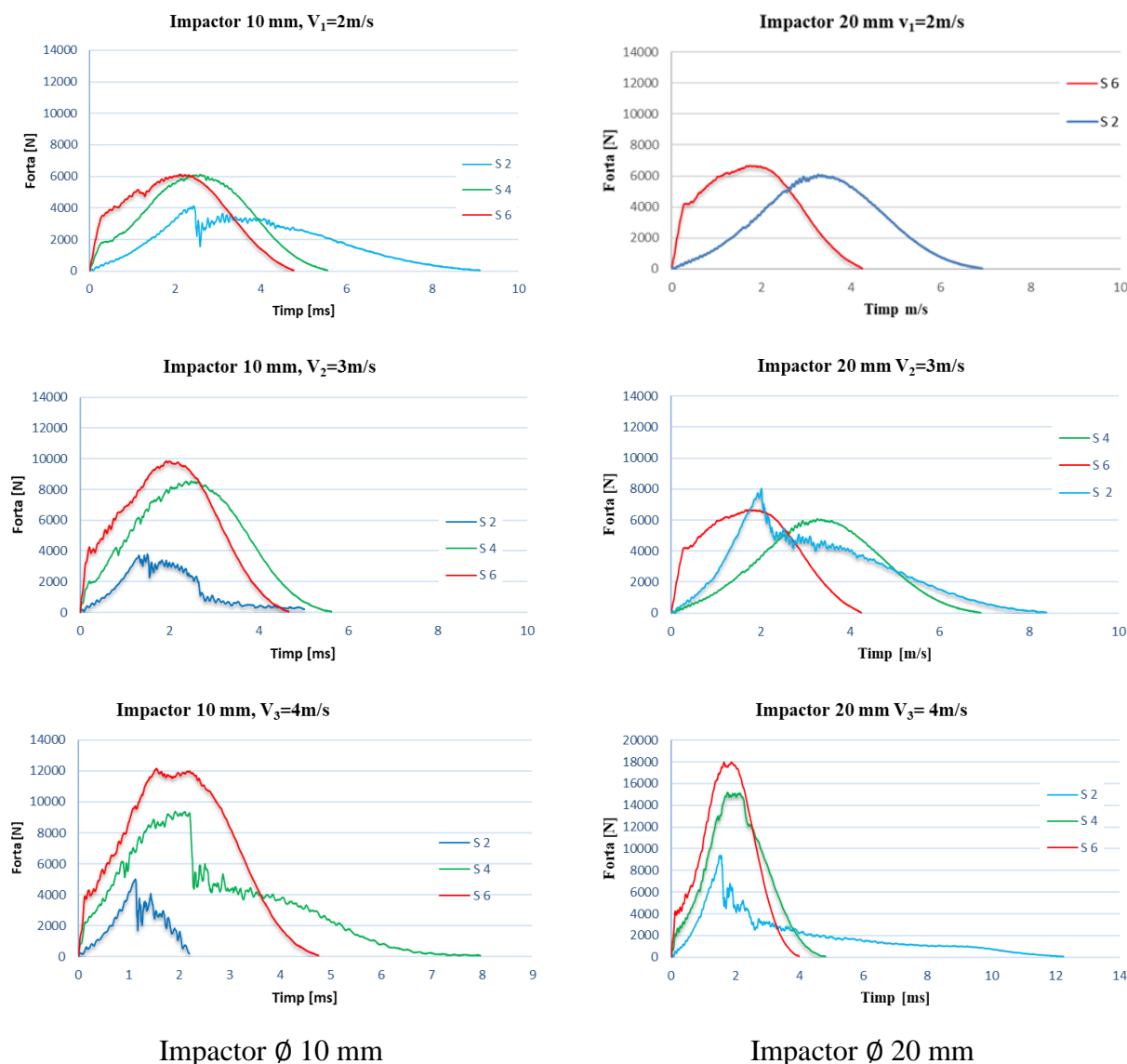


Fig. 5.3. Influența numărului de straturi asupra curbei forță – timp (s reprezintă numărul de straturi)

Prin testarea materialului la diferite viteze, inclusiv la viteze mai mari decât cele tipice, cercetătorii pot evalua rezistența și capacitatea de absorbție a energiei în condiții extreme.

În Fig. 5.3 sunt date graficele forță-timp pentru testele efectuate. S-a luat în considerare un singur test din cele trei efectuate și anume cel cu evoluție medie între celelalte două teste. În coloana din stânga sunt graficele testelor efectuate cu impactorul de \varnothing 10 mm, iar în dreapta sunt graficele testelor efectuate cu impactorul de \varnothing 20 mm.

La cea mai mică viteză, $v_1=2$ m/s se poate constata că F_{\max} se obține pe panoul cu 6 straturi, în jur de 6000 N. Creșterea vitezei la $v_2=3$ m/s determină creșterea forței, ajungând la $F_{\max}=10000$ N.

La impactorul de \varnothing 20 mm, tot pentru panoul cu 6 straturi de țesătură cuadriaxială, F_{\max} este 18000 N. Cu cât raza de curbură este mai mare, cu atât forța este mai mare.

La cea mai mare viteză de testare, la impactorul de \varnothing 10 mm, F_{\max} este 12000 N, pe când la impactorul de \varnothing 20 mm, F_{\max} este 18500 N și tot pe panoul de 6 straturi.

Pentru panoul cu 2 straturi F_{\max} se obține la 4000 N pentru v_1 și la 4500 N pentru v_2 .

La impactorul de \varnothing 10 mm F_{\max} apare la $v_1=2$ m/s pentru panoul de 6 straturi iar pentru celelalte panouri valorile acestui parametru sunt apropiate.

La $v_2=3$ m/s, F_{\max} apare mai repede pe panourile subțiri de 2 straturi și timpul cel mai lung apare la panoul de 4 straturi și apropiat de cel de 6 straturi.

La impactorul de \varnothing 10 mm v_3 F_{\max} apare la timpul cel mai scurt, la panoul cel mai subțire.

$$F_{\max(2s)} < F_{\max(4s)} < F_{\max(6s)} \quad (5.1)$$

La impactorul de \varnothing 20 mm la fel.

Durata impactului până la anularea forței este mai mare pentru panourile subțiri, cu 2 straturi de țesătură cuadriaxială, și $t_f = 10$ ms și din ce în ce mai scurt pe panouri cu mai multe straturi.

Distrugerile care apar în panouri pot fi explicate prin faptul că impactorul încetinește și prelungește durata impactului, deci și solicitarea de compresiune.

5.2.2. Influența energiei și vitezei de impact asupra parametrilor impactului

Această analiză oferă o privire detaliată asupra modului în care compozitul reacționează sub acțiunea unor impacturi de diferite viteze sau energii de lovire și poate furniza informații importante despre absorbția de energie și deformarea materialului în situații critice.

Din Fig. 5.4 se observă grosimea panourilor în funcție de numărul de straturi. Evoluția este aproape liniară, ceea ce sugerează același conținut de fibre de sticle (în procente masice). Calitatea panourilor este reflectată prin variația foarte mică a grosimii.

În Fig. 5.5 sunt date curbe energie absorbită – timp.

Din graficele forță-timp și energie-timp, putem deduce că în cazul panourilor cu penetrare parțială, impactorul se oprește în panou, iar întreaga energie cinetică a impactorului este absorbită de panou. Acest lucru se observă prin forma curbilor în care putem observa că energia crește în timp până la atingerea unui punct maxim (E_{\max}) și apoi scade treptat pe măsură ce impactorul pătrunde în panou și este oprit.

Pe de altă parte, în cazul panourilor cu penetrare totală, distrugerea panoului nu consumă toată energia cinetică a impactului.

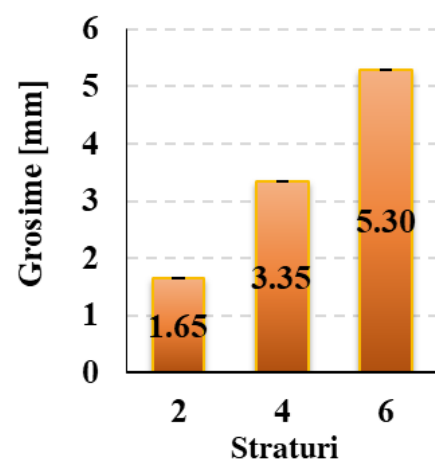
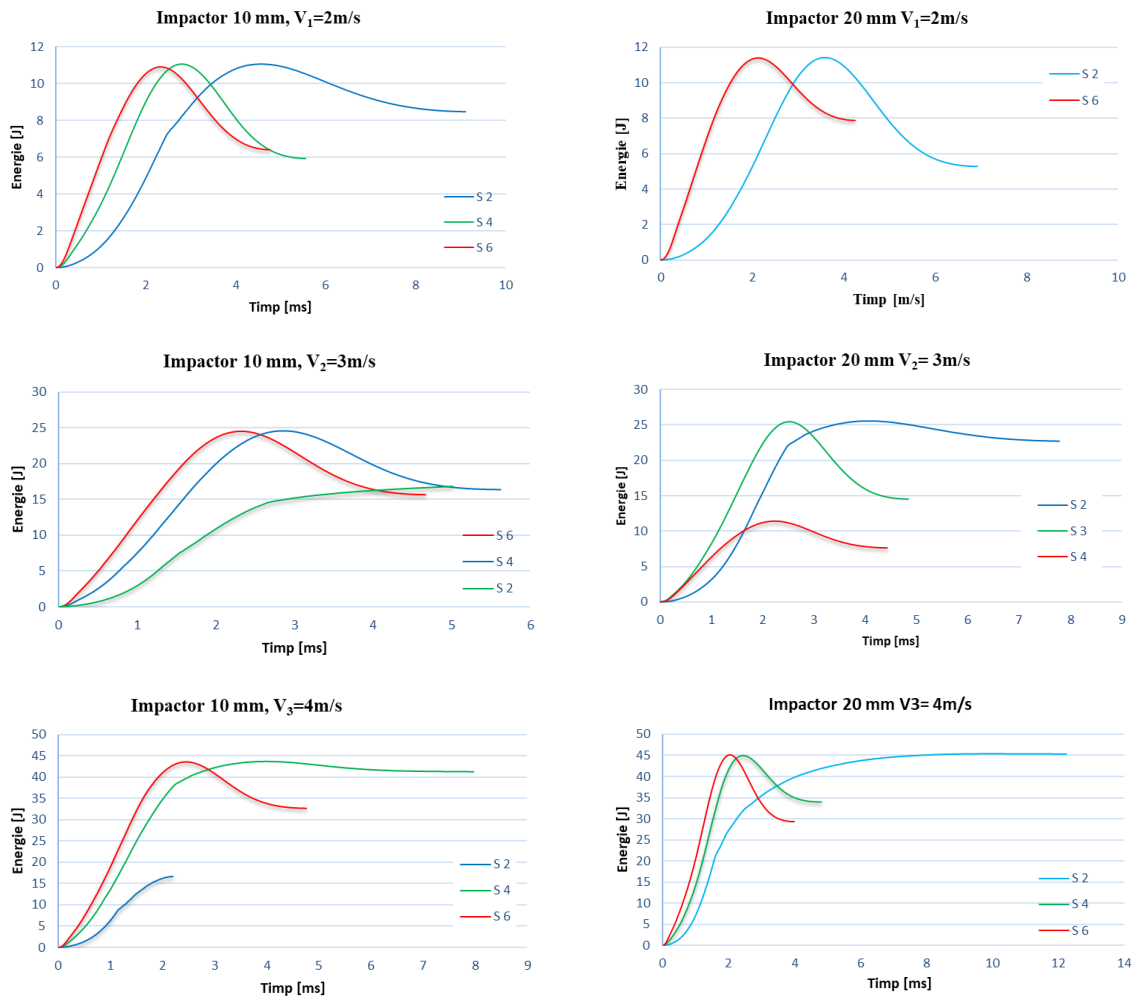


Fig. 5.4. Grosimea panourilor (grosimi măsurate pe panouri tăiate la 60 mm × 60 mm)



Impactor \varnothing 10 mm

Impactor \varnothing 20 mm

Fig. 5.5. Influența numărului de straturi asupra curbei energie – timp

Figura 5.6 prezintă influența vitezei de impact asupra numărului de straturi în compozitele analizate. Aceste grafice oferă informații despre modul în care numărul de straturi din materialul compozit afectează comportamentul acestuia sub diferite viteze de impact de viteză mică.

În panourile cu penetrare totală, distrugerea panoului nu consumă toată energia cinetică a impactului. Pe graficele energie-timp se poate observa clar care panouri au penetrare totală (energia absorbită maximă nu are valoarea apropiată de energia de impact, este mai mică, impactorul continuându-și traiectoria cu o viteză reziduală, și care au penetrare parțială (datorată deformațiilor elastice, este transferată înapoi impactorului și acesta are un recul).

În cazul panourilor cu 2 straturi, penetrarea totală are loc la $v_2=3$ m/s. La această viteză de impact v_2 panourile au fost doar parțial distruse, fapt dovedit pe graficele energie-timp unde energia transferată panoului s-a înregistrat pentru 11 J.

Graficele energie – timp evidențiază dacă panoul este parțial sau total penetrat în sensul că pe panoul în care se obține E_{\max} avem o penetrare parțială iar la penetrarea totală rezultă că doar o parte din energia cinetică de impact este transferată panoului.

Pentru aceiași impactor, la aceeași viteză de impact, panourile de grosimi diferite determină pante diferențiale graficului energie-timp. Gradientul de absorbție al energiei este mai mare la

tensiunilor mari care apar în diferite zone ale fibrei. Ruperea fibrei se produce datorită efectelor puternice ale câmpului de tensiuni. Impactorul induce și o forță de forfecare și solicitări mari de încovoiere în partea fibrei/firului care este lângă zona de contact direct al impactorului.

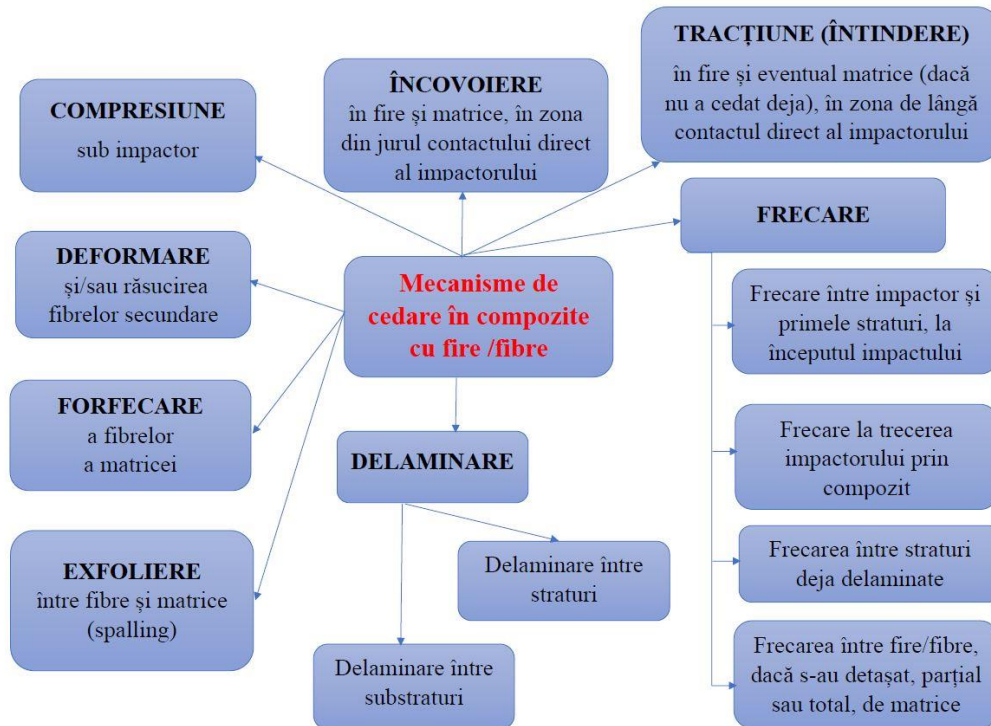


Fig. 5.7. Mecanisme de cedare în compozite cu fibre

Figura 5.7 prezintă diferite mecanisme de cedare care pot apărea în compozitele cu fibre.

Modul de penetrare a fost studiat și microscopic (Fig. 5.8). Absorbția energiei cinetice de lovire este importantă pentru delaminarea, forfecarea și încovoierea elastică sau chiar plastică a firelor/fibrelor din compozit.

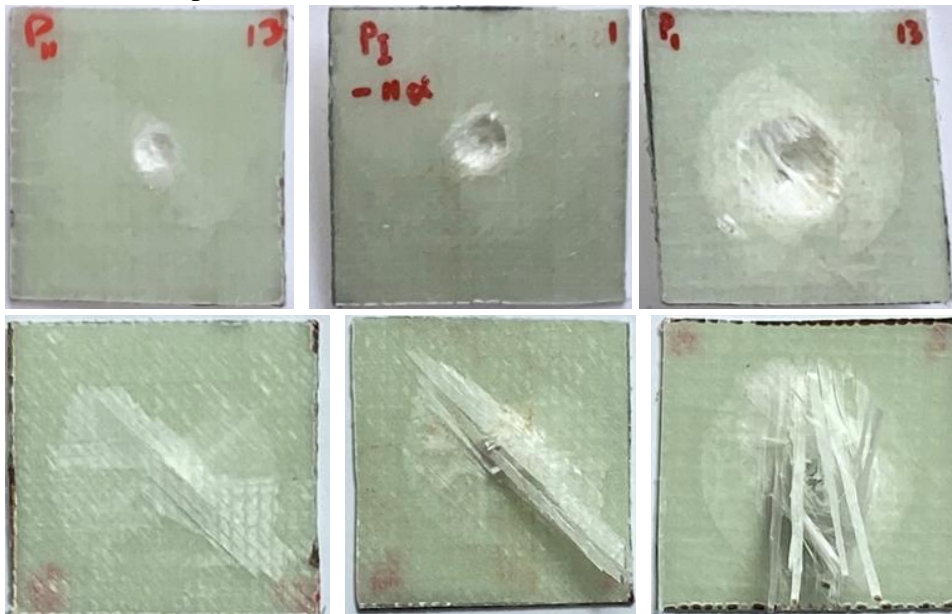


Fig. 5.8. Aspecte macroscopice: față (sus) și spate (jos) ale materialelor compozite cu 2 straturi supuse impactului, la viteze de impact v_1 , v_2 și v_3 (de la stânga la dreapta), folosind impactorul de 10 mm (Toate plăcile compozite au 60 mm × 60 mm) [39].

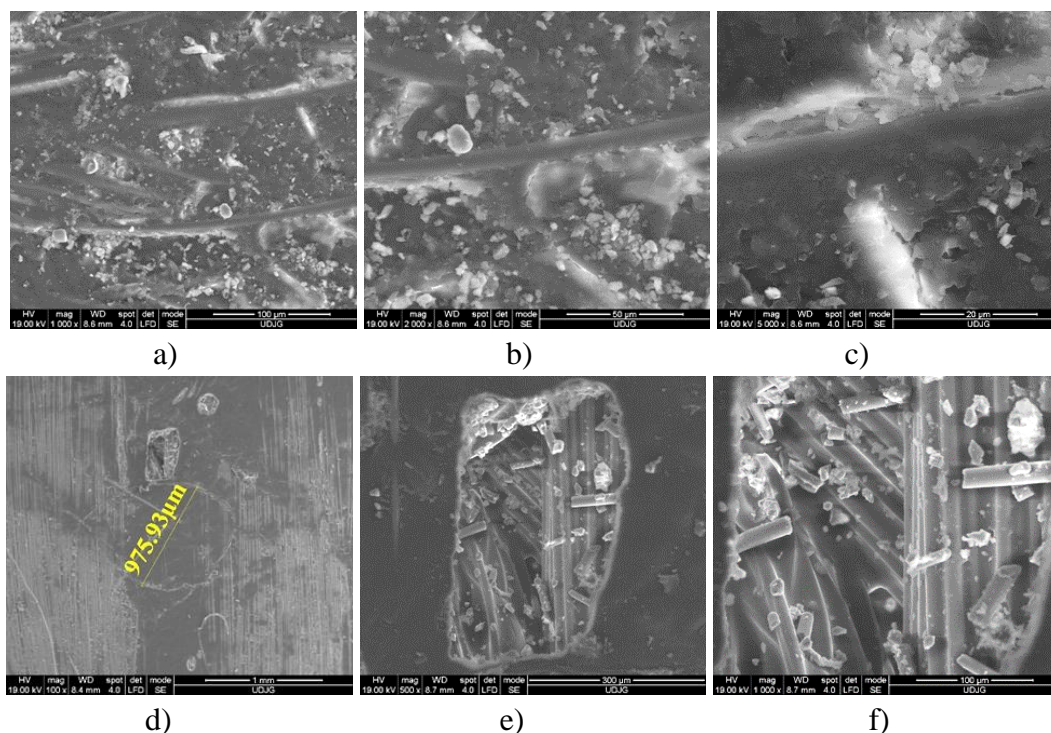


Fig. 5.9. Imagini SEM ale materialelor compozite cu 2 straturi față (sus) și spate (jos) supuse impactului de v_1 cu impactor de 10 mm

Analiza imaginilor SEM a materialelor compozite cu 2 straturi supuse impactului de v_1 cu impactorul de 10 mm (Fig.5.9) , a relevat fenomene semnificative precum fisurarea matricei și deplasarea fibrelor. Aceste observații sunt de o importanță majoră pentru înțelegerea comportamentului acestui tip de material în condiții de solicitare intensă și pot oferi informații valoroase pentru îmbunătățirea și optimizarea performanțelor materialelor compozite utilizate în aplicații cu impact.

Analiza SEM ale materialelor compozite cu 2 straturi supuse impactului de v_3 cu impactor de 10 mm indică ruperea firului, rupere ce are loc în poziție diferite pe fibre, și o rupere prin forfecare (Fig. 5.10). În imaginea (a), putem observa clar ruperea firului, fenomen care indică o slăbiciune a legăturii dintre fibre și matrice sau o concentrare a tensiunilor în zona respectivă. Deosebit de interesant este faptul că ruperea firului are loc în poziții diferite pe fibra materialului compozit, ceea ce sugerează variabilitatea caracteristicilor fibrelor în cadrul materialului. În imaginea (b), se poate observa cu claritate orientarea fibrelor. Acest aspect este deosebit de important în evaluarea performanțelor materialelor compozite, deoarece orientarea fibrelor poate influența semnificativ rezistența și rigiditatea materialului. În Fig. 5.10 (c), se observă procese multiple de rupere, cum ar fi ruperea fragmentară prin încovoiere și ruperea prin forfecare. Ruperea fragmentară prin încovoiere indică faptul că materialul compozit a fost supus unor solicitări de îndoire care au condus la ruperea progresivă a fibrelor. De asemenea, ruperea prin forfecare indică exercitarea forțelor tangențiale asupra fibrelor, rezultând o ruptură specifică prin torsiune. În imaginile (d) și (e), se poate observa cum impactorul trece și dezorganizează firele și fibrele. Această dezorganizare a fibrelor poate fi cauzată de solicitările intense generate de impactor și poate duce la o rupere asimetrică a fibrelor în zona afectată.

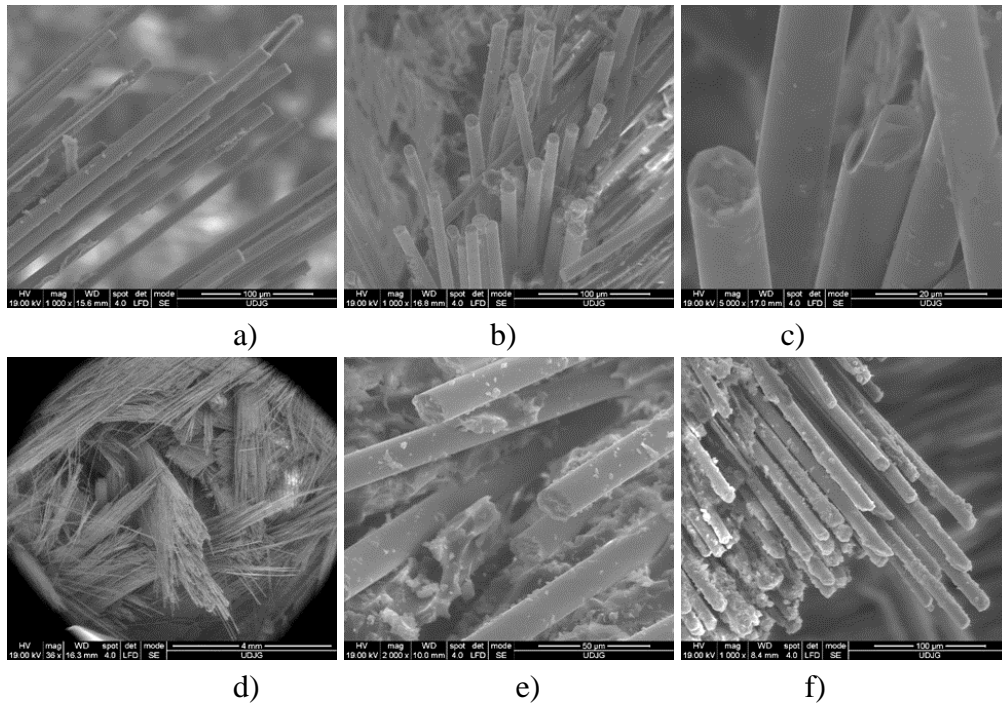


Fig. 5.10. Imagini SEM ale materialelor compozite cu 2 straturi față (sus) și spate (jos) supuse impactului de v_3 cu impactor de 10 mm

Figura 5.10 prezintă observarea aspectelor macroscopice ale materialelor compozite cu 2 straturi supuse impactului la diferite viteze de impact ($v_1=2$ m/s, $v_2=3$ m/s și $v_3=4$ m/s) utilizând impactorul cu diametrul de 20 mm. Imaginea prezintă aspectele vizuale ale suprafețelor față și spate ale materialului compozit după impact.

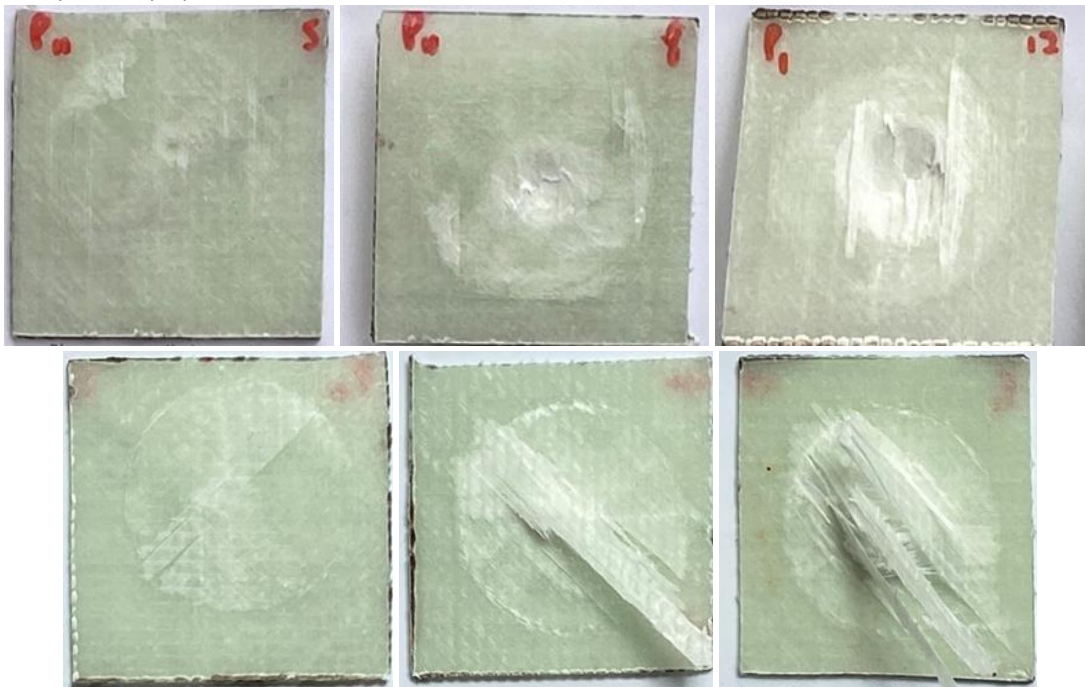


Fig. 5.11. Aspecte macroscopice ale impactului pe materialele compozite cu 2 straturi: față (sus) și spate (jos), la viteze de impact v_1 , v_2 și v_3 (de la stânga la dreapta), folosind impactorul de 20 mm (Toate plăcile compozite au 60 mm × 60 mm.) [39]

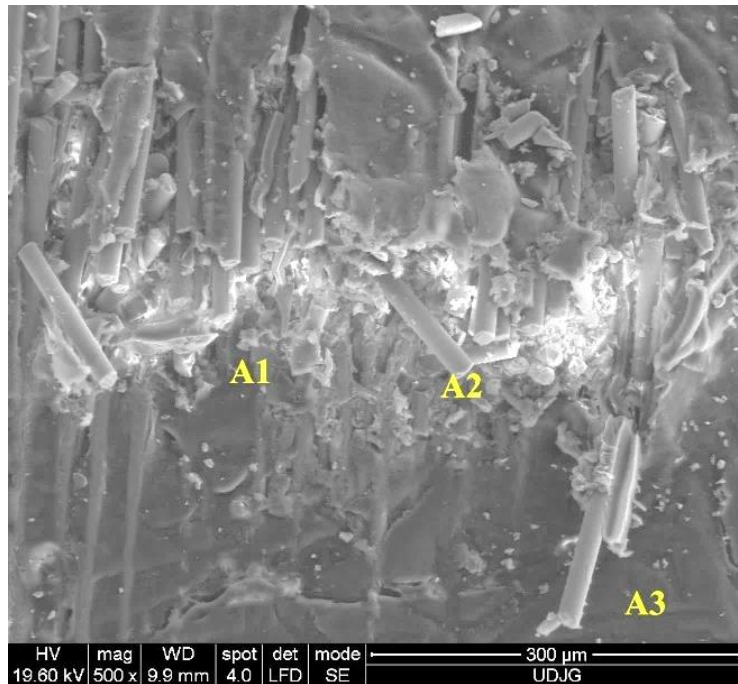


Fig. 5.12. Imagine SEM a materialelor compozite cu 6 straturi față supus impactului de v_1 cu impactor de \varnothing 10 mm

În figura 5.12 este imaginea SEM pentru panoul cu 6 straturi la impactorul de \varnothing 10 mm la $v_1=2$ m/s. A1, A2 și A3 reprezintă orientări diferite ale fibrelor.

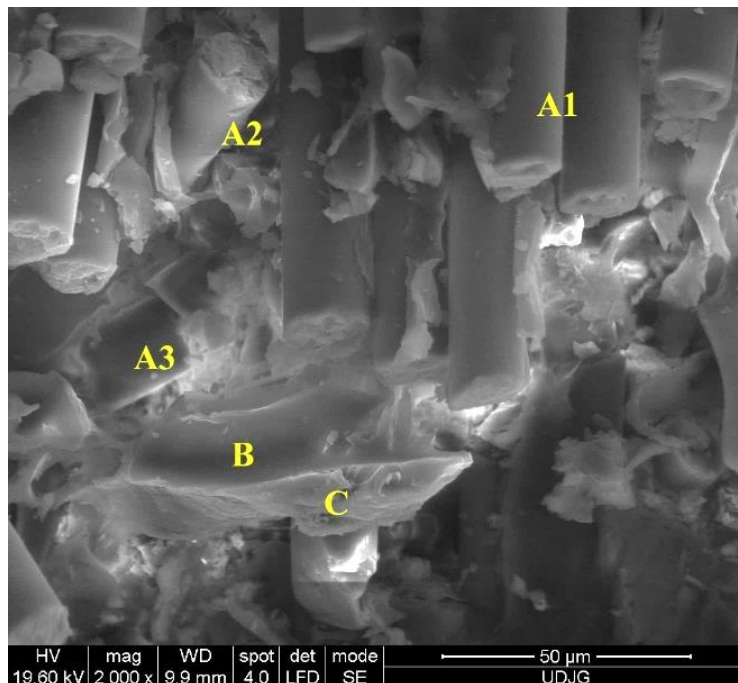


Fig. 5.13. Imagine SEM a materialelor compozite cu 6 straturi față supus impactului de v_1 cu impactor de \varnothing 10 mm

În Fig. 5.13 se pot observa fibre pe mai multe direcții. Fiind menționate A1, A2 și A3 ca orientări diferite ale fibrelor, este evident că există o anizotropie în structura materialului. Anizotropia indică faptul că proprietățile materialelor variază în funcție de direcție.

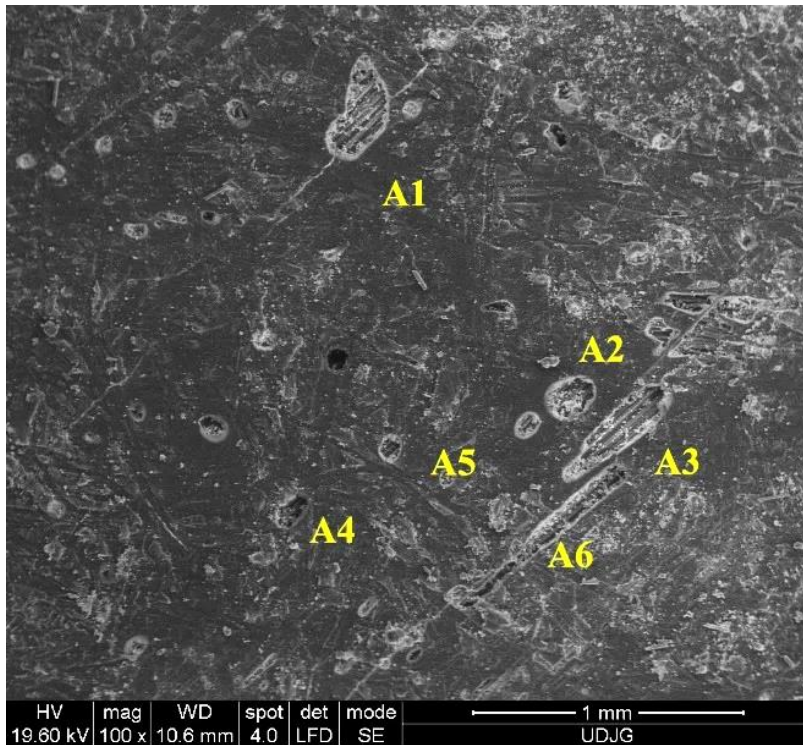


Fig. 5.14. Imagine SEM a materialelor compozite cu 6 straturi spate supus impactului de v_1 cu impactor de \varnothing 10 mm

În Fig. 5.14, la o scară mai mare, de x100, se văd exfolieri de mărimi diferite notate cu A1, A2, A3, A4 și A5. În zonele unde s-a realizat exfolierea fibrele nu sunt rupte. Micile exfolieri rezultă că materialele sunt de calitate și nu se poate considera o distrugere semnificativă a materialului.

5.4. Sinteza rezultatelor experimentale și concluzii

Rezultatele indică faptul că valoarea forței maxime, F_{max} (Fig. 5.15), și durata impactului, t_f (Fig. 5.17), considerată până la anularea solicitării pe placă, adică $F(t_f)=0$, sunt influențate de viteza impactului și de numărul de straturi ale panourilor. Impactorul de 20 mm determină o forță maximă mai mare comparativ cu impactorul de 10 mm, la aceleași viteze și numere de straturi de țesătură cuadriaxială.

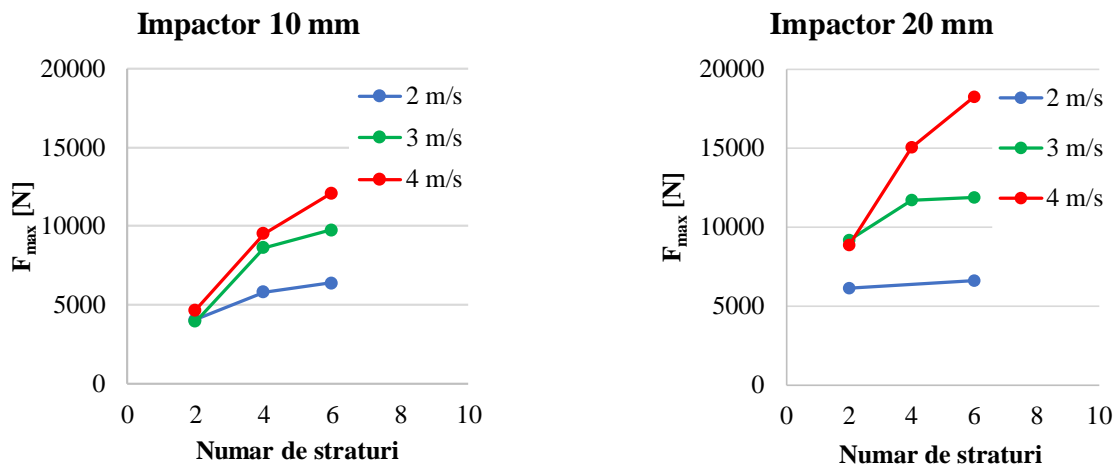


Fig. 5.15. Influența F_{max} obținute pentru testele realizate cu impactorul de \varnothing 10 mm și impactorul de \varnothing 20 mm asupra numărului de straturi

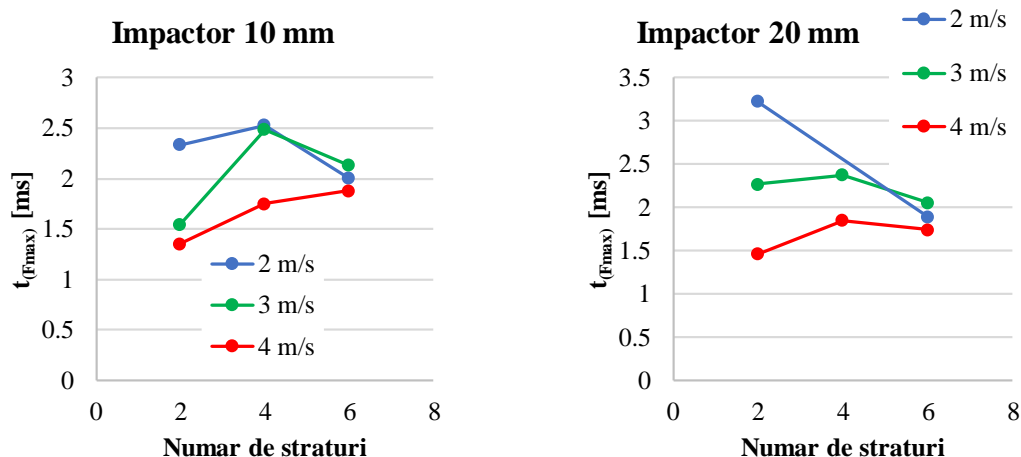


Fig. 5.16. Influența numărului de straturi de țesătură cuadriaxială asupra momentului când apare F_{max} , $t_{(Fmax)}$

Panourile cu mai multe straturi au o capacitate mai bună de a rezista la impact, iar viteza impactului are un efect semnificativ asupra valorii F_{max} și a duratei impactului. Diametrul impactorului afectează valoarea F_{max} și momentul când apare. Aceste informații pot fi folosite pentru dezvoltarea de materiale și structuri rezistente la impact în diverse aplicații industriale.

Figurile 5.17, 5.18, 5.19 și 5.20 prezintă influența unor parametri asupra numărului de straturi în cazul materialelor compozite supuse la impact de viteză mică. Durata până la anularea solicitării ($F=0$) scade cu creșterea numărului de straturi, cu excepția panourilor lovite de impactorul de 10 mm, la $v_3=4$ m/s. Deplasarea maximă, d_{max} , scade odată cu creșterea numărului de straturi, dar pentru același panou, crește cu viteza de impact. Pentru vitezele impact de 2 m/s și 3 m/s, graficele momentelor de generare a deplasării maxime sunt foarte apropiate. Pentru impactorul de 10 mm, acest timp este mai mare cu aproximativ 1 ms (nu este trecută valoarea pentru panoul de 2 straturi pentru că penetrarea este totală).

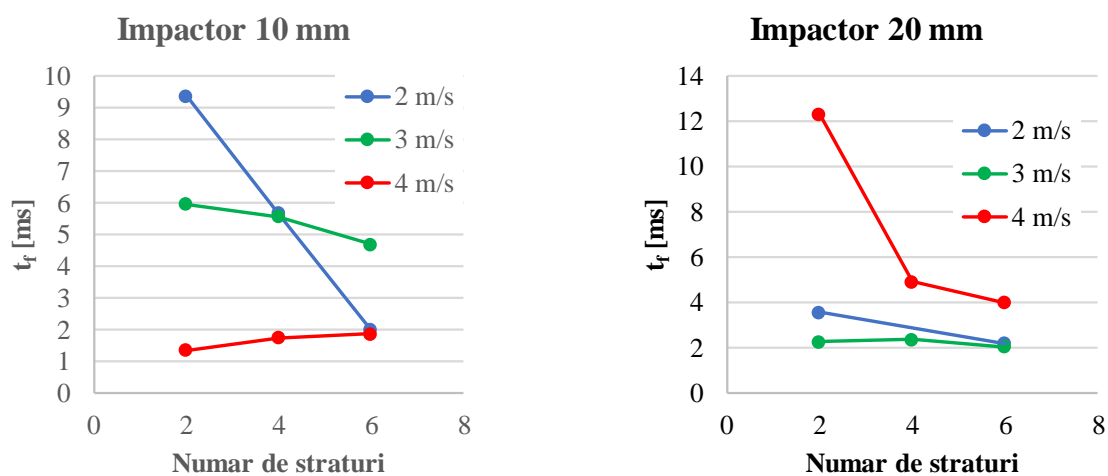


Fig. 5.17. Influența numărului de straturi de țesătură cuadriaxială asupra duratei impactului, t_i considerată de la creșterea forței de impact până la anularea acesteia ($F_{(t_i)}=0$)

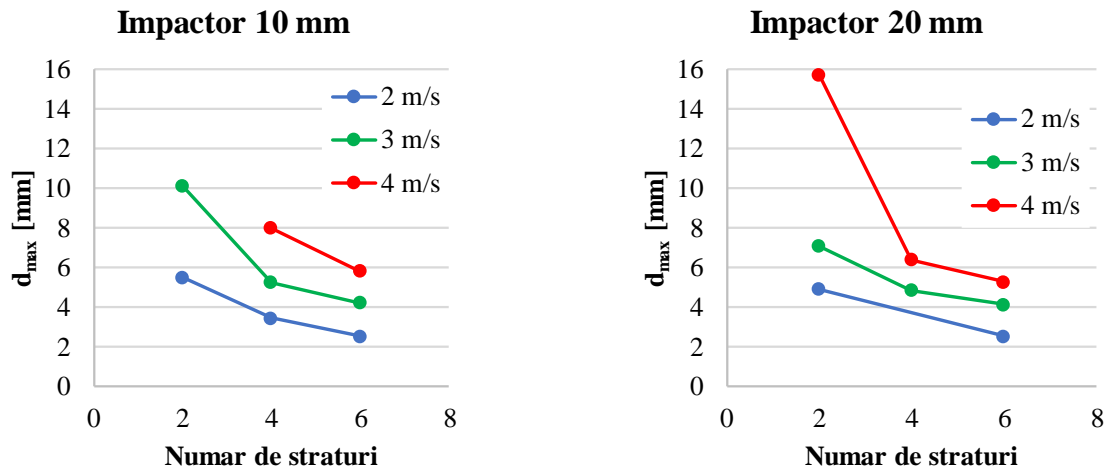


Fig. 5.18. Influența numărului de straturi de țesătură cuadriaxială asupra deplasării maxime a impactorului, d_{max} (pentru penetrare totală nu este reprezentată)

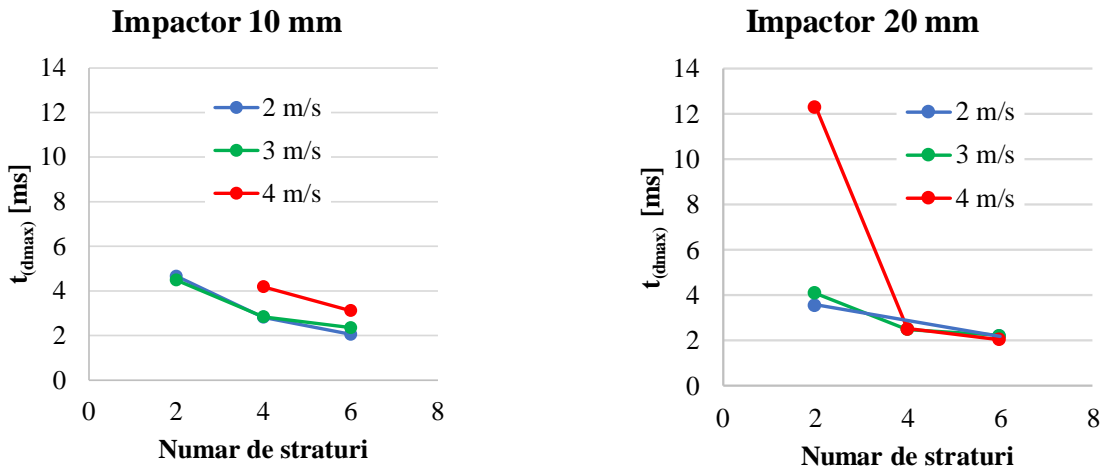


Fig. 5.19. Influența numărului de straturi asupra duratei până la momentul deplasării maxime, $t_{(d_{max})}$

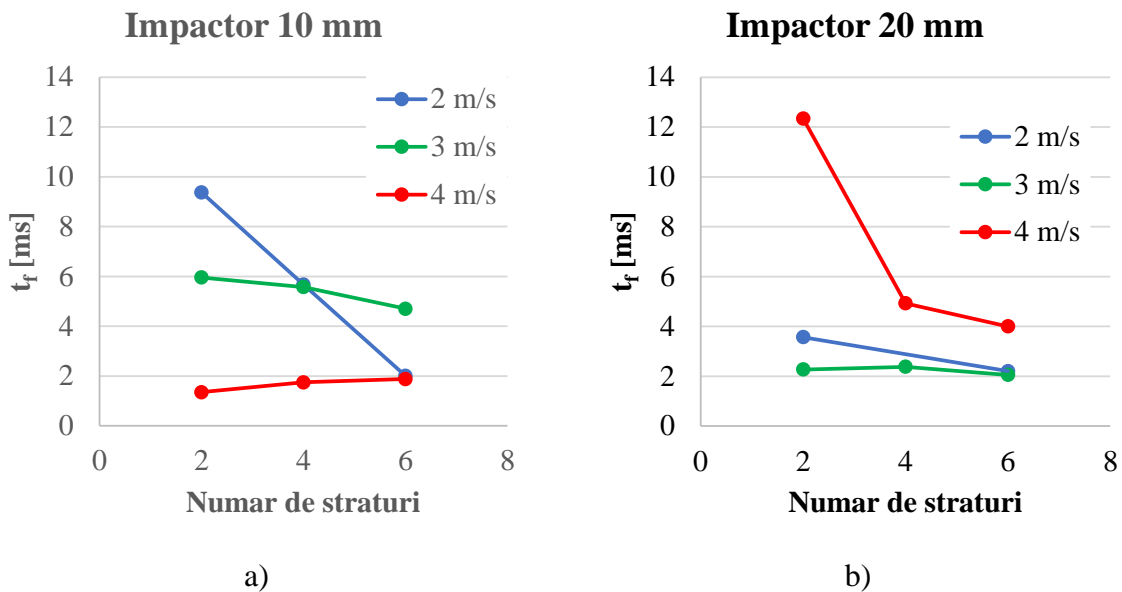


Fig. 5.20. Influența numărului de straturi și a vitezei de impact asupra duratei până la momentul anulării solicitării ($F=0$), t_f

Pentru durata impactului, considerată între cele două momente în care $F=0$, notată cu t_f , se pot formula următoarele concluzii (Fig. 5.20):

- pentru impactorul de $\varnothing 10$ mm, pentru cea mai mică viteză de încărcare durata t_f scade mult de la panoul cu 2 straturi la panoul cu 6 straturi. Aceasta înseamnă că pentru compozitele cu mai multe straturi, rezistența la impact și capacitatea de absorbție a energiei sunt îmbunătățite, ducând la o mai rapidă finalizare a impactului. Panta este mai mică pentru panoul cu 4 straturi, iar pentru viteza cea mai mare t_f crește cu grosimea panoului. Panoul cu 4 straturi prezintă o scădere a duratei impactului mai puțin abruptă decât celelalte configurații cu mai multe straturi. În cazul vitezei de încărcare maxime, durata impactului crește odată cu mărimea grosimii panoului. Acest aspect poate fi influențat de fenomenele de absorbție a energiei și deformare plastică la nivelul compozitului,

- pentru impactorul de $\varnothing 20$ mm tendința este alta. Se observă o scădere a lui t_f între viteza de 2 și 4 m/s, durata impactului scade brusc între panoul cu 2 și 4 straturi și foarte puțin la panoul cu 6 straturi. Acest lucru poate indica o comportare diferită a compozitelor la solicitări dinamice, unde panoul cu 4 straturi poate avea o rezistență sporită la impact în comparație cu panoul cu 2 straturi. Odată ce panoul atinge configurația cu 4 straturi, durata impactului se schimbă foarte puțin la adăugarea unui strat suplimentar în panoul cu 6 straturi. Acest lucru poate indica că, în cazul acestor impactoare mai mari, adăugarea de straturi suplimentare poate avea un impact mai redus asupra duratei impactului, deoarece panoul cu 4 straturi poate fi deja suficient de eficient în absorbția energiei.

Capitolul 6. Contribuții personale și concluzii

6.1. Importanța tezei

Această teză cu titlul „*Comportamentul compozitelor cu țesături multiaxiale din fibre de sticlă la impact de viteză mică*” are un subiect de interes pe termen lung deoarece sistemele tehnice, prin faptul că și-au mărit performanțele (sarcină, viteză, temperatură) au crescut și riscul de impact cu piese prelucrate sau cu elemente aduse din alte sisteme.

Obiectivul tezei a fost realizat deoarece autorul a proiectat, a realizat, testat și analizat o clasă de panouri pe bază de țesături multiaxiale din fibre de sticlă care au protecție în domeniul 1-4 m/s, cu energii de lovire până la 45 J.

În acest studiu de cercetare au fost implicate următoarele organizații:

- Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați prin intermediul laboratorului în care se află microscopul electronic de baleiaj (SEM), Biblioteca Universității „Dunărea de Jos”
- Universitatea Politehnica din București,
- Institutul Național de Cercetări Aeronautice „Elie Carafoli” - INCAS București,
- INAS Craiova.

Experiența și competențele profesionale ale personalului, împreună cu resursele și facilitățile de care dispun, au fost elementele cheie care au contribuit la extinderea cunoștințelor și abilităților individuale, depășind limitele inițiale ale cercetării și furnizând o analiză exhaustivă a subiectului în cauză. Această combinație sinergică de know-how și resurse a jucat un rol esențial în soluționarea cu succes a temei propuse.

6.2. Concluzii finale asupra rezistenței la impact de viteză mică a panourilor realizate de autor

În cadrul studiului, autorul a utilizat o țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială, cu o greutate de 1200 g/m², având orientări de fibre (0°/+45°/90°/-45°), cunoscută pentru rezistența sa sporită și destinată în special aplicațiilor balistice. Pentru întărire, s-a folosit o rășină epoxidică bicomponentă (Biresin CR82 cu întăritor Biresin CH80-2), iar procesul a inclus un tratament termic de stabilizare. Această combinație de materiale și tratamente contribuie la obținerea de panouri cu proprietăți superioare și potențial de performanță îmbunătățită în fața solicitărilor de impact.

Procesul tehnologic de fabricație al panourilor din materiale compozite, cu diferite grosimi, implică o serie de etape consecutive. Aceste etape includ: tăierea țesăturii (și cântărirea acesteia în vederea realizării panoului), pregătirea amestecului de rășină și întăritor, presarea materialului compozit, monitorizarea și controlul grosimii panoului în timpul presării, efectuarea unui tratament termic la 60°C, timp de 6 ore, și, în final, un control de calitate (care constă în măsurarea grosimii și calcularea deviației standard pentru fiecare set de panouri).

Tabelul 6.1 prezintă deteriorările care au loc cu impactorul de Ø 10 mm și impactorul de 20 mm, în panourile formate.

Din această analiză rezultă panourile care sunt recomandate pentru anumite valori ale vitezei de impact. Valorile impactului pentru celulele colorate nu sunt recomandate.

Tabelul 6.1. Distrugerile care au loc în panourile formate

| Impactor Ø10 mm | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Număr de straturi de țesătură cuadriaxială | $v_1=2$ m/s | $v_2=3$ m/s | $v_3=4$ m/s |
| S2 | PP | PP* | PT |
| S4 | PP | PP* | PP* |
| S6 | PP | PP | PP |
| Impactor Ø20 mm | | | |
| | $v_1=2$ m/s | $v_2=3$ m/s | $v_3=4$ m/s |
| S2 | PP | PP* | PT |
| S4 | PP | PP | PP* |
| S6 | PP | PP | PP |

PT- penetrare totală, PP-penetrare parțială, PP*-penetrare parțială cu distrugerii mari pe spate, nerecomandate pentru aplicații practic

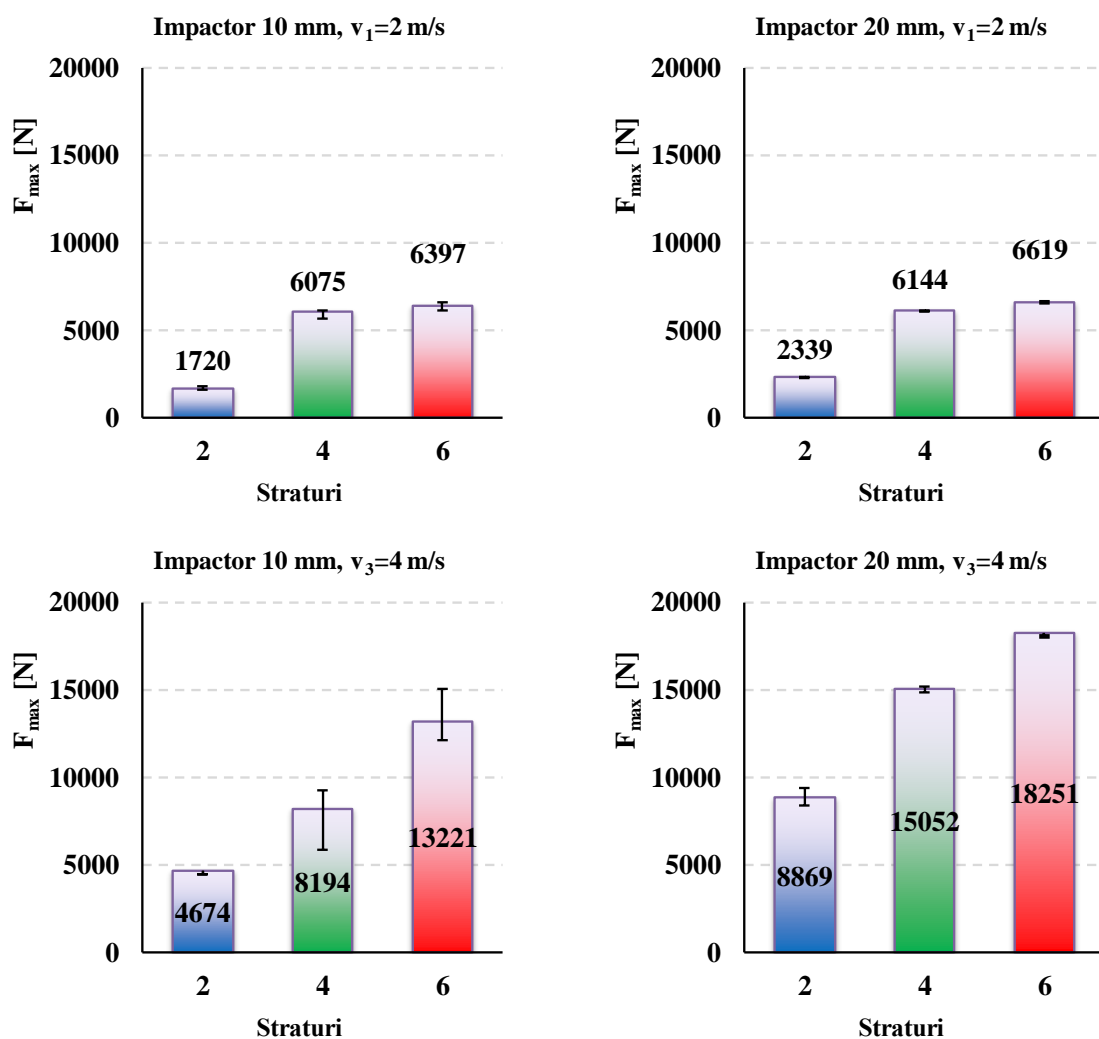


Fig. 6.1 Forța maximă, înregistrată pe durata impactului, F_{max} , pentru testele efectuate, în funcție de impactor, numărul de straturi de țesătură cuadriaxială și de viteza de impact

În Figura 6.1 se poate observa tendința de creștere a forței cu creșterea numărului de straturi, dar și cu creșterea vitezei de impact. În cazul impactorului de \varnothing 10 mm, aceasta este mai accentuată de la trecerea de la panoul de 2 straturi la panoul de 4 straturi, iar pentru panoul de 6 straturi forța crește, dar în mai mică măsură, dependența fiind de formă parabolică, pe când tendința de creștere a forței F_{max} este mai apropiată de o dreaptă. Evident, pe intervalul de straturi studiat.

Figura 6.2 prezintă două fotografii macro ale panourilor compozite, fiecare cu un comportament de penetrare diferit.

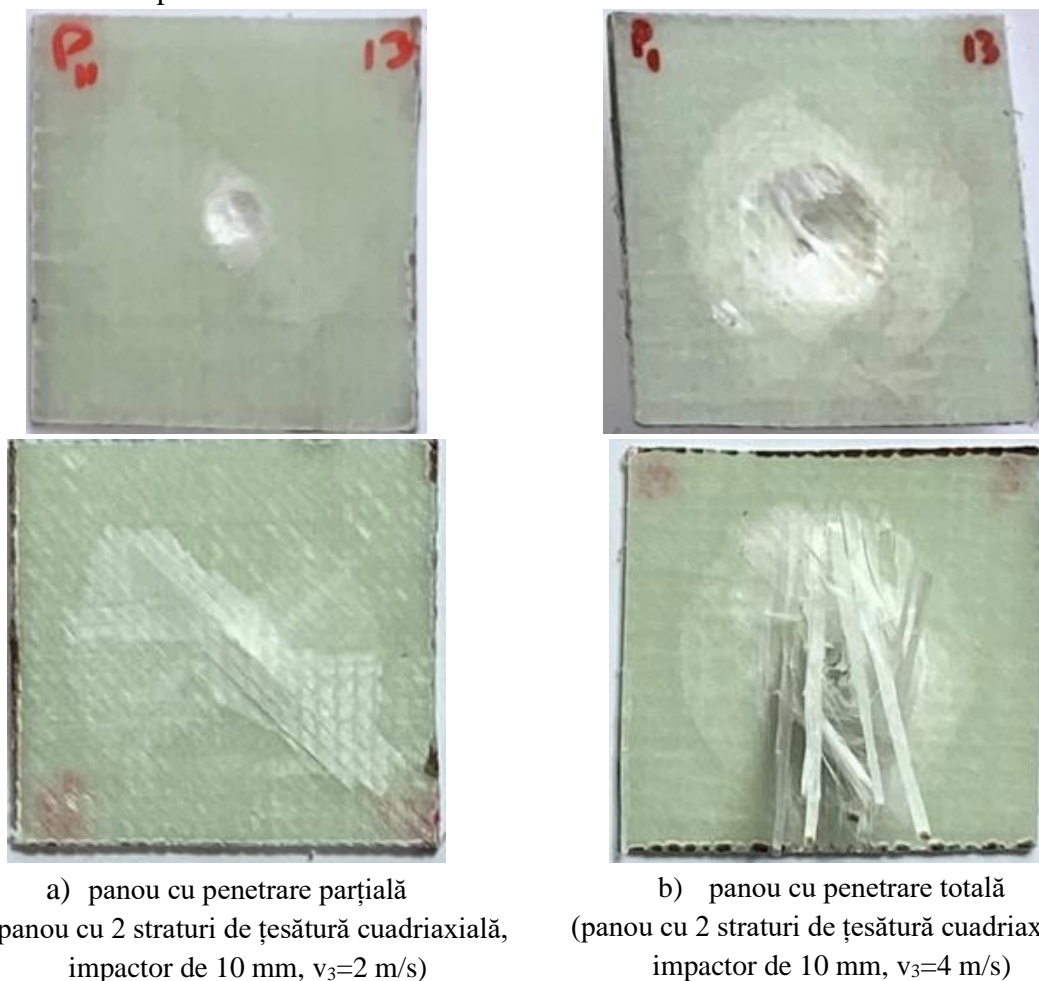


Fig.6.2. Tipuri de penetrări

În funcție de viteza impactului și diametrul impactorului, adăugarea de straturi suplimentare la panouri poate îmbunătăți rezistența acestora, dar impactul exact poate varia în funcție de dimensiunile impactorului și viteza acestuia.

Faptul că mașina de încercări la impact este instrumentată cu dispozitive de măsurare de ordinul milisecundelor și o celulă de forță de precizie a permis compararea unor parametri care nu au mai fost analizați în alte lucrări (timpul la care apare F_{max} și $t_{(F_{max})}$, timpul de finalizare a acțiunii impactului t_f , timpul de anulare al vitezei, t_{v0} , cu ajutorul cărora s-a putut realiza o interpretare realistă a procesului de impact în domeniul de viteze studiat și s-au putut formula recomandări pentru utilizarea panourilor compozite cu proprietăți de impact. Panourile de 4 și 6 straturi au rezistat bine și pot fi recomandate pentru domeniul 2-4 m/s.

6.3. Contribuții personale

Studiul de cercetare aduce în atenție următoarele contribuții originale în domeniul proiectării și testării materialelor pentru rezistența la impact de viteză mică, prin abordarea sinergică între experiment și simulare:

- s-a realizat o selecție critică și s-a efectuat o analiză a documentației existente privind materialele, încercările și modelele de țesături cu aplicații în cazul impactului de viteză mică, sistematizând aceste referințe.

- a fost identificată și justificată tema cercetării, axată pe utilizarea compozitelor pe bază de fibre de sticlă.

- s-a elaborat un model numeric de impact, model bilinear, la nivel mezo (prin considerarea firelor din țesătură), care a fost utilizat pentru a evalua rezistența la impact a unei clase de compozite cu diferite numere de straturi de țesătură cuadriaxială. Acest model a investigat influența dimensiunii impactorului, dar poate fi folosit și pentru a determina influența numărului de straturi, a vitezei și a calității matricei. Pentru a valida rezultatele simulării, s-au efectuat și încercări de laborator, cu criterii specifice de validare, precum numărul de straturi distruse.

- simulările s-au axat pe detalierea răspunsului la impact a panourilor cu două straturi, fiind realizate la o viteză de 4m/s.

- proiectarea unui panou astfel încât să se evidențieze factorii care influențează procesul de impact:

- grosimea panourilor,
- viteza de impact,
- forma impactorului,

- s-a pus accentul pe optimizarea procesului de fabricație a plăcilor compozite pentru a reduce pierderile de rășină și pentru a asigura uniformitatea caracteristicilor acestora. Cercetarea s-a concentrat pe identificarea și aplicarea de noi tehnici și metode pentru a obține panouri compozite de calitate superioară.

Pe baza rezultatelor experimentale, autorul a comparat răspunsul panourilor proiectate cu alte soluții existente raportate în literatura de specialitate. Calitatea panourilor fabricate a fost evaluată și reflectată prin deviația standard măsurată pentru grosimea acestora, care a înregistrat o valoare maximă de 0,585 mm.

Deoarece existau constrângeri de timp și resurse limitate pentru această cercetare, s-a ales să se lucreze pe o familie de eșantioane, cu diferite numere de straturi (2 straturi, 4 straturi și 6 straturi). Acest demers a permis evaluarea calității panourilor în contextul impactului de viteză mică, analizarea uniformității răspunsului panourilor cu aceeași grosime și a deschis posibilitatea unor cercetări ulterioare pentru potențiala utilizare a acestui tip de panouri.

- analiza mecanismelor de cedare a panourilor funcție de numărul de straturi prin utilizarea tehnicilor avansate de macrofotografie și imagini cu microscop electronic cu scanare (SEM). Aceste metode de investigație permit cercetătorilor să observe și să înțeleagă în profunzime modul în care materialele se comportă sub încărcări dinamice și cum evoluează mecanismele de cedare în timpul impactului.

- analiza critică a rezultatelor și recomandărilor pentru utilizarea panourilor de 4 și 6 straturi pentru parametrii de impact testați (viteză, energie, forma impactorului).

Prin integrarea experimentelor și simulărilor, această cercetare oferă noi perspective asupra proiectării și testării materialelor pentru a le conferi o mai bună rezistență la impact de viteză mică.

Pe intervalul de parametri studiați (viteză, diametrul impactorului și grosimea panourilor) autorul a stabilit dependențe între acești parametri astfel încât aceste dependențe să fie utile în proiectarea unor sisteme reale (rețeta autorului propusă pentru compozite).

- diseminarea rezultatelor s-a făcut prin prezentarea de articole cu date experimentale și din simulări la conferințe naționale și internaționale: RoTrib19, The Leading International Conference on Tribology, 2019, Cluj-Napoca, UgalMat 2020, 8-9 decembrie, Galați, Conferința Școlilor Doctorale din Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2021, Galați, 10-11 iunie 2021, Innovative Manufacturing Engineering & Energy, IManEE2022 17-19 noiembrie, Iași, 9 th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2022, Universitatea Politehnica din București, Serbiatrib '23, 18th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 17–19 mai 2023, TurkeyTrib 2023 (4rd International Conference on Tribology) 25-27 mai 2023, The 29th edition of the International Scientific Conference „The Knowledge - Based Organization”, KBO 2023 Sibiu.

6.4. Perspective de cercetare

Perspectivile viitoare de cercetare în domeniul proiectării și testării materialelor pentru rezistența la impact de viteză mică pot fi foarte interesante și promițătoare, având în vedere contribuțiile originale ale acestui studiu. Iată câteva posibile direcții de cercetare care ar putea fi explorate în continuare:

- proiectarea și testarea la impact de viteză mică a altor tipuri de compozite cum ar fi cele cu fibre de carbon sau aramidice, pentru a evalua impactul diferențelor în proprietățile materialelor asupra rezistenței la impact.

- optimizarea configurațiilor structurale care să ofere cea mai bună rezistență la impact de viteză mică prin utilizarea simulării.

- în studiile viitoare, s-ar putea investiga impactul altor parametri de încărcare asupra comportamentului materialului, cum ar fi unghiul de impact.

- pe baza rezultatelor obținute în această cercetare, se poate contribui la dezvoltarea unor teste și standarde de performanță pentru materialele compozite utilizate în aplicații cu expunere la impact de viteză mică. Aceste standarde ar putea asigura că materialele sunt evaluate și certificate în conformitate cu cerințele specifice pentru utilizarea lor în diverse domenii.

- cercetarea ar putea evolua către aplicarea practică a materialelor compozite cu rezistență la impact de viteză mică în diverse industrii, precum sectorul auto, transportul feroviar, industria navală, echipamentele de protecție și multe altele. Aceste materiale pot contribui la îmbunătățirea performanței și siguranței produselor și infrastructurii.

Această teză de doctorat deschide multiple direcții de explorare și dezvoltare în domeniul proiectării și testării materialelor pentru rezistența la impact de viteză mică, oferind o platformă solidă pentru viitoare studii care pot aduce contribuții semnificative în domeniul materialelor avansate și aplicațiilor lor practice.

Listă de lucrări publicate și prezentate de Iulian Păduraru

Articole științifice publicate

1. **Păduraru, I.**, Săracu, G., Bogdan, M., Graur, I., Munteniță, C., & Cîrciumaru, A. (2020). Effects of organic compounds and nickel nitrate on friction coefficient of thermosetting. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 724, No. 1, p. 012016. IOP Publishing. Prezentată la RoTrib'19, The Leading International Conference on Tribology, 2019, Cluj-Napoca, Romania, [https://minas.utcluj.ro/assets/files/ROTRIB'19-Conference-Program-\(updated-16-09-2019\).pdf](https://minas.utcluj.ro/assets/files/ROTRIB'19-Conference-Program-(updated-16-09-2019).pdf), doi:10.1088/1757-899X/724/1/012016, WOS:000619349400016
2. Iulia, P. G., Dragomir, C. M. B., & **Păduraru, I.** (2023). Importance of the basic reactions in the manufacture of synthetic resins. *Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics and Engineering*, 65(4S), <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2043/1623>, prezentată oral la Innovative Manufacturing Engineering & Energy, IManEE2022 17-19 Noiembrie, Iași, <https://imane.ro/program/>, WOS:000969679100024
3. **Păduraru, I.**, Bria, V., Cîrciumaru, A. (2021). Manufacturing Technology of Some Impact Resistant Materials. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 44(1), 54-58. doi: <https://doi.org/10.35219/mms.2021.1.08>, prezentată și poster la UgalMat 2020, December 8-9, Galati, Romania, https://www.ugalmat.ugal.ro/images/2020/UGALMAT_2020_PROGRAMME_1.pdf
4. Apareci, T., Dănăilă, I., **Păduraru, I.**, Cîrciumaru, A., Gorovei, M. C. (2022). Trends on Reinforced Polymer Composites—A Review. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 45(4), 62-71. <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mms/article/view/5821/5063>
5. Drăghici, S. M., Dănăilă, I., Apareci, T., Săracu, G., **Păduraru, I.**, Bria, V., & Gorovei, M. C. (2022). Modified Thermosets—A Review. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 45(4), 72-80. <https://gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mms/article/view/5822/5064>
6. Dănăilă, I., Apareci, T., Drăghici, S. M., **Păduraru, I.**, Săracu, G., Cîrciumaru, A., & Gorovei, M. C. (2022). A Review on Modified Polymers and Their Composites. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 45(4), 114-125, <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mms/article/view/5830/5071>
7. **Păduraru, I.**, P. Graur, I., Deleanu, L., *Tribology of electric vehicles - a review*, SerbiaTrib '23, 18th International Conference on Tribology 17–19 May 2023, Kragujevac, Serbia, Proceedings, ISBN: 978-86-6335-103-5, pp: 629-634, 2023.
8. **Păduraru, I.**, Ojoc, G. G., P.-Graur, I., Petrescu, H., & Deleanu, L. (2023). Analyzing Impact Behaviour of Glass Fiber Epoxy Composites for Higher Safety Systems. In *International Conference Knowledge-Based Organization*, 29(3), pp. 56-64, DOI: <https://doi.org/10.2478/kbo-2023-0076>

Lucrări prezentate la conferințe științifice internaționale

1. **Păduraru, I.**, Bria, V., Cîrciumaru, A., Development of Some Modern Composite Materials Used for Ballistic Protection, *Scientific Conference of Doctoral Schools „Perspectives and challenges in doctoral research”*, ”Dunarea de Jos” University of Galati, Romania, 10th and 11th of June 2021. <http://www.cssd-udjg.ugal.ro/index.php/2020-2/programme-22>
2. Săracu, G., **Păduraru, I.**, Drăghici, S.M., Cîrciumaru, A., Electric Properties of Inorganic Agents Modified Epoxy Resin, *9 th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2022*, Universitatea Politehnica din București.
https://romat2022.ro/wp-content/uploads/2022/11/RoMAT-2022_Conference-Program-Book-of-Abstracts_v3.pdf
3. Apareci (Gîrneț), T., Săracu, G., **Păduraru, I.**, Dănăilă (Țicău), I., Cîrciumaru, A., An Analysis of Mechanical Properties of Fabric Reinforced Materials with Stratified Polymer Matrix, *9 th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2022*, Universitatea Politehnica din București. https://romat2022.ro/wp-content/uploads/2022/11/RoMAT-2022_Conference-Program-Book-of-Abstracts_v3.pdf
4. Dănăilă (Țicău), I., **Păduraru, I.**, Săracu, G., Apareci (Gîrneț), T., Drăghici, S.M., Cîrciumaru, A., *Thermoset Polymer Blends – A Mechanical Analysis*, *9 th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2022*, Universitatea Politehnica din București
https://romat2022.ro/wp-content/uploads/2022/11/RoMAT-2022_Conference-Program-Book-of-Abstracts_v3.pdf
5. **Păduraru, I.**, Graur P. I., Bălănică Dragomir, C. M., Applying Eco-Tribology Principles for Sustainable Management of Natural Resources and Ecosystem Services, *TurkeyTrib 2023 (4rd International Conference on Tribology)*, 25-27 May 2023,
<http://turkeytribconference.com/index.php/en/>

Cărți

1. Graur, I., **Păduraru, I.**, *Modelarea și simularea sistemelor de producție*, suport de curs, Editura Fundației Universitare „Dunărea de Jos” Galați, 2023, ISBN 978-973-627-684-2.
2. Graur, I., **Păduraru, I.**, *Modelarea și simularea sistemelor de producție*, îndrumar de laborator, Editura Fundației Universitare „Dunărea de Jos” Galați, 2023, ISBN 978-973-627-685-9.
3. Graur, I., **Păduraru, I.**, *Polymeric Composite Materials*, Ed. Lambert, ISBN 978-620-5-52898-3, 2023.

Cursuri finalizate pe perioada doctoratului

1. Engleza pentru scopuri științifice și ingineresti
2. Etica cercetării științifice și integritate academică
3. Deteriorarea sistemelor mecanice. Metode experimentale de investigare

Programe postuniversitare de formare și dezvoltare profesională

1. Managementul referințelor bibliografice
2. Managementul calității în învățământul superior

Bibliografie

- [1] Abrate, S. (2016). *Damage in laminates from low-velocity impacts*. In Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures, 35-69. Woodhead Publishing.
- [2] Abteu, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite structures*, **223**, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966>
- [3] Aktaş, M., Atas, C., İçten, B. M., Karakuzu, R. (2009). An experimental investigation of the impact response of composite laminates. *Composite Structures*, **87(4)**. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.02.003>
- [4] Andrianov, I. V., Awrejcewicz, J., Danishevskyy, V. V. (2018). *Asymptotical mechanics of composites*. Cham, Springer, Germany,
- [5] Ansari, M. M., Chakrabarti, A., Iqbal, M. A. (2017). An experimental and finite element investigation of the ballistic performance of laminated GFRP composite target. *Composites Part B: Engineering*, **125**, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.079>
- [6] Balasubramaniam, K., Ziaja, D., Jurek, M., Fiborek, P., Malinowski, P. (2021). Experimental and numerical analysis of multiple low-velocity impact damages in a glass fibered composite structure. *Materials*, **14(23)**, <https://doi.org/10.3390/ma14237268>
- [7] Bejan, L. (2000). *Introducere în micromecanica materialelor compozite armate cu țesături*. Editura Gh. Asachi.
- [8] Bencomo-Cisneros, J. A., Tejada-Ochoa, A., García-Estrada, J. A., Herrera-Ramírez, C. A., Hurtado-Macías, A., Martínez-Sánchez, R., Herrera-Ramírez, J. M. (2012). Characterization of Kevlar-29 fibers by tensile tests and nanoindentation. *Journal of Alloys and Compounds*, **536**, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.11.031>
- [9] Chib, A. (2006). *Parametric study of low velocity impact analysis on composite tubes* (Doctoral dissertation), Graduate School of Wichita State University, <https://soar.wichita.edu/bitstream/handle/10057/267/t06004.pdf;sequence=3>
- [10] Chowdhury, U., Wu, X. F. (2021). Cohesive zone modeling of the elastoplastic and failure behavior of polymer nanoclay composites. *Journal of Composites Science*, **5(5)**, 131. <https://doi.org/10.3390/jcs5050131>
- [11] Cormos, R., Petrescu, H., Hadar, A., Adir, G. M., Gheorghiu, H. (2017), Finite Element Analysis of the Multilayered Honeycomb Composite Material Subjected to Impact Loading, *Materiale plastice*, **54(1)**, 180-185
- [12] Courant, R., Hilbert, D. (2008). *Methods of mathematical physics: partial differential equations*. John Wiley & Sons.
- [13] Dogan, U., Sunbuloglu, E. (2023). A novel simplified ballistic impact theory for woven composites. *International Journal of Impact Engineering*, **177**, 104530. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104530>
- [14] Endruweit, A., Zeng, X., Matveev, M., Long, A. C. (2018). Effect of yarn cross-sectional shape on resin flow through inter-yarn gaps in textile reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **104**, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.020>
- [15] Ess, J. W., Hornsby, P. R. (1986). Characterisation of distributive mixing in thermoplastics compositions. *Polymer testing*, **6(3)**, 205-218 [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(86\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0142-9418(86)90063-2)

- [16] Gao, J., Kedir, N., Hernandez, J. A., Gao, J., Horn, T., Kim, G., Chen, W. (2022). Dynamic fracture of glass fiber-reinforced ductile polymer matrix composites and loading rate effect. *Composites Part B: Engineering*, **235**, 109754. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109754>
- [17] Guedes, R. M. (Ed.). (2019). Creep and fatigue in polymer matrix composites. Woodhead publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102601-4.00009-6>
- [18] Hadăr, A., Baciú, F., Voicu, A.D., Vlasceanu, D., Tudose, D.I., Adetu, C. (2022) Mechanical Characteristics Evaluation of a Single Ply and Multi-Ply Carbon Fiber-Reinforced Plastic Subjected to Tensile and Bending Loads, *Polymers*, **14(15)**, DOI 10.3390/polym14153213
- [19] Harper, P. W., Sun, L., Hallett, S. R. (2012). A study on the influence of cohesive zone interface element strength parameters on mixed mode behaviour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43(4)**, 722-734. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.016>
- [20] Hasan, K. F., Al Hasan, K. N., Ahmed, T., György, S. T., Pervez, M. N., Bejó, L., Alpár, T. (2023). Sustainable bamboo fiber reinforced polymeric composites for structural applications: A mini review of recent advances and future prospects. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100362>
- [21] Hosseini, A., Raji, A. (2023). Improved double impact and flexural performance of hybridized glass basalt fiber reinforced composite with graphene nanofiller for lighter aerostructures. *Polymer Testing*, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108107>
- [22] Huang, Z. C., Li, H. Z., Jiang, Y. Q. (2023). Low-velocity impact response of self-piercing riveted carbon fiber reinforced polymer-AA6061T651 hybrid joints. *Composite Structures*, **315**, 116983. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116983>
- [23] Jiang, T. (2006). Impact and penetration studies: Simplified models and materials design from ab initio methods. Georgia Institute of Technology. <https://www.proquest.com/openview/68d196bcf906459f723c682505553ea3/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [24] Khan, Z., Naik, M. K., Al-Sulaiman, F., Merah, N. (2016). Low velocity impact of filament-wound glass-fiber reinforced composite pipes. *Journal of Material Sciences and Engineering*, **5(253)**, 2169-0022. doi:10.4172/2169-0022.1000253
- [25] Kim J.-K., Mai Y.-W. (1998) Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites, Elsevier Science Ltd, Oxford U.K.
- [26] Kim, E. H., Rim, M. S., Lee, I., Hwang, T. K. (2013). Composite damage model based on continuum damage mechanics and low velocity impact analysis of composite plates. *Composite Structures*, **95**, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.07.002>
- [27] Lei, Z. X., Ma, J., Sun, W. K., Yin, B. B., Liew, K. M. (2023). Low-velocity impact and compression-after-impact behaviors of twill woven carbon fiber/glass fiber hybrid composite laminates with flame retardant epoxy resin. *Composite Structures*, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117253>
- [28] Li, S., Thouless, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A., Zavattieri, P. D. (2005). Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite. *Composites Science and Technology*, **65(3-4)**, 537-549. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.08.004>
- [29] Liu, D. (1988). Impact-induced delamination—a view of bending stiffness mismatching. *Journal of Composite Materials*, **22(7)**, 674-692. <https://doi.org/10.1177/002199838802200706>
- [30] Lu, X., Bardet, J. P., Huang, M. (2012). Spectral analysis of nonlocal regularization in two-dimensional finite element models. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **36(2)**, 219-235, <https://doi.org/10.1002/nag.1006>

- [31] Ma, D., dos Santos Cougo, C. M., Amico, S. C., Giglio, M., Manes, A. (2023). A novel numerical method for stochastic study of fiber-reinforced composites with nanoparticles under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 104662. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104662>
- [32] Mars, J., Chebbi, E., Wali, M., Dammak, F. (2018). Numerical and experimental investigations of low velocity impact on glass fiber-reinforced polyamide. *Composites Part B: Engineering*, **146**, 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.012>
- [33] Mathivanan, N. R., Jerald, J. (2010). Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of woven glass fiber epoxy matrix composite laminates of EP3 grade. *Materials & Design*, **31(9)**, 4553-4560. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.051>
- [34] Múgica, J. I., Aretxabaleta, L., Ulacia, I., Aurrekoetxea, J. (2016). Rate-dependent phenomenological model for self-reinforced polymers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **84**, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.002>
- [35] Naresh, K., Shankar, K., Rao, B. S., Velmurugan, R. (2016). Effect of high strain rate on glass/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, **100**, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.007>
- [36] Năstăsescu, V. (2004). *Finite element method* (in Romanian). Military Technical Academy Publishing, Bucharest.
- [37] Ojoc, G. G. (2022). Un studiu teoretic și experimental al pachetelor de protecție balistică pentru blindaje pe bază de fibre de sticlă (A Theoretical and Experimental Study of Ballistic Protection Packages Made of Glass Fibers) (Doctoral dissertation, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați).
- [38] Patil, S., Reddy, D. M., Reddy, M. (2018, April). Low velocity impact analysis on composite structures—A review. *In AIP conference proceedings 1943* (1), 020009. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5029585>
- [39] Păduraru, I., Ojoc, G. G., P.-Graur, I., Petrescu, H., Deleanu, L. (2023). Analyzing Impact Behaviour of Glass Fiber Epoxy Composites for Higher Safety Systems. *International Conference Knowledge-Based Organization*, 29 (3), 56-64. <https://doi.org/10.2478/kbo-2023-0076>
- [40] Radeș, M. (2007). *Rezistența materialelor*. Printech.
- [41] Rajan, B. G., Padmanabhan, S., Ganesh, R. L., Chandana, K. M., Lavanya, E. (2021). Low velocity impact analysis of carbon/glass/epoxy hybrid composite pipes. *Materials Today: Proceedings*, **47**, 4181-4188. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.454>
- [42] Ratna, D., Chongdar, T. K., Chakraborty, B. C. (2004). Mechanical characterization of new glass fiber reinforced epoxy composites. *Polymer composites*, **25(2)**, 165-171. <https://doi.org/10.1002/pc.20013>
- [43] Reddy, T. S., Mogulanna, K., Reddy, K. G., Reddy, P. R. S., Madhu, V. (2019). Effect of thickness on behaviour of E-glass/epoxy composite laminates under low velocity impact. *Procedia Structural Integrity*, **14**, 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.034>
- [44] Sadighi, M., Alderliesten, R. C., Benedictus, R. (2012). Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, **49**, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.05.006>
- [45] Seydibeyoglu M. O., Mohanty A. K., Misra M. (editori), (2017) *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, Elsevier Ltd

- [46] Titire, L. C., Musteata, A. E., Cioromila, A., Cristea, G. C., Ojoc, G. G., Deleanu, L. (2021). Characterization of Blend PA6+ EPDM (60/40) by Tensile Tests. *Materiale Plastice*, **58(3)**, 51-63. <https://doi.org/10.37358/MP.21.3.5503>
- [47] Titire, L. C., Rusu, V. T., Sandu, S. (2022, October). Influence of material characteristics on impact response for fabrics made of glass and aramid fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1262 (1), 012045. IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012045
- [48] Wang, Z. W., Zhao, J. P., Wang, S. (2019). Low velocity impact responses of glare hybrid laminates based on simplified finite element model. *Key Engineering Materials*, **795**, 109-115. <https://www.scientific.net/KEM.795.109>
- [49] Xiao, H., Liu, T., Li, T., Duan, Y. (2023). Design of damage-resistant hybrid lay-up structures for fiber-reinforced composites based on interface properties. *Composite Structures*, 117210. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117210>
- [50] *** ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide (2021). ANSYS, Inc., USA
- [51] *** 1200 g/m² Quadriaxial Stitched Glass Fabric (0°/+45°/90°/-45°), 127 cm wide (accesat 12.01.2022). <https://www.castrocompositesshop.com/en/fibre-reinforcements/1204-1200-gm2-quadriaxial-stitched-glass-fabric-0%C2%BA45%C2%BA90%C2%BA-45%C2%BA-127-cm-wide.html>
- [52] *** Biresin® CR82. Composite Resin System, (accesat 4.10.2020). <https://industry.sika.com/dms/getdocument.get/93a3a9b1-7291-47ce-8ca7-18ae3f458043/Biresin-CR82-New.pdf>
- [53] *** Sika Group. About us (accesat 3.10.2021), <https://www.sika.com/en/home.html>
- [54] *** Uses of Fiberglass [Accessed: 2022-02-22]. 2017. Available from: <https://www.thoughtco.com/uses-offiberglass-820412>
- [55] *** High Strength Glass Fibers (accesat 12.03.2022). https://www.agy.com/wp-content/uploads/2022/03/AGY_HighStBro_HR.pdf, AGY [Internet]. (2017). http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf.
- [56] *** Technical Design Guide for FRP Composite Products and Parts [Internet]. (2022). [accesat: 20.03.2022]. <https://www.moldedfiberglass.com/?s=Technical+design+guide+for+FRP+Composite+products+and+Parts>
- [57] *** Handbook INSTRON CEAST 9340, <https://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2010/02/ceast-9300-series.pdf?la=en-US>