George Ghiocel OJOC

PANOURI DE PROTECȚIE BALISTICĂ PE BAZĂ DE ȚESĂTURI DE FIBRE DE STICLĂ

GALATI UNIVERSITY PRESS

2024

Copyright © 2024 Galaţi University Press

Toate drepturile rezervate. Nicio parte a acestei publicaţii nu poate fi reprodusă în nicio formă, fără acordul scris al editurii.

Colecţia Ştiinţe Inginereşti

Galaţi University Press – Cod CNCSIS 281
Editura Universităţii „Dunărea de Jos”
Str. Domnească, nr. 47, 800008 – Galaţi, ROMÂNIA
Tel. 0336 130 139; Fax: 00 40 236 461 353
gup@ugal.ro

Referenţi Ştiinţifici:

Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU

Conf. univ. dr. ing. Constantin GEORGESCU

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
OJOC, GEORGE GHIOCEL
Panouri de protecţie balistică pe bază de ţesături de fibre de sticlă /
George Ghiocel Ojoc. - Galaţi : Galaţi University Press, 2024
Conţine bibliografie
ISBN 978-606-696-306-0

623
53

Publicate cu ajutorul Editurii Universităţii “Dunărea de Jos” din Galaţi - GALATI UNIVERSITY PRESS.

Prefață

Această carte prezintă un studiu dedicat compozitelor pe bază de țesături de fibre de sticlă, cu aplicabilitate ca materiale de protecție balistică. Aceasta a fost elaborată de autor ca teză de doctorat, dar este un bun exemplu de studiu experimental și de modelare.

Studiul se dezvoltă logic, cu un capitol dedicat literaturii de specialitate care tratează subiecte similare, un capitol de modelare a procesului de impact cu glonț, un alt capitol dedicat obținerii panourilor compozite din țesătură cuadriaxială în matrice de rășină epoxidică de calitate, un comentariu al rezultatelor obținute și al investigațiilor făcute pentru identificarea proceselor de deteriorare a panourilor. Concluziile sunt prezentate logic și fac legătura între modelare și date experimentale prin criterii de validare. Lucrarea se încheie cu o bibliografie bogată și recentă asupra comportării la impact balistic a compozitelor.

Rezultatele sunt de interes în domeniul construcției blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte, atât pentru cei care produc asemenea sisteme, cât și pentru cercetători, în dezvoltarea unor teme similare.

Prof. dr. ing. Lorena Deleanu

MULŢUMIRI

Adresez mulțumiri celor care mi-au oferit sprijinul și m-au îndrumat pe parcursul acestei teze de doctorat.

Mulțumesc doamnei profesor doctor inginer, Lorena Deleanu, care, în calitate de conducător științific, mi-a oferit îndrumare, încurajare în anii de pregătire și de elaborare a tezei.

Mulțumiri și comisiei de îndrumare a lucrării, formată din domnii prof. dr. fiz. Gabriel Murariu, prof. dr. fiz. Adrian Cîrciumaru și conf. dr. ing. Constantin Georgescu, pentru ajutorul oferit, pentru comentariile critice și soluțiile oferite pentru referate și teză, cu profesionalism, dar și pentru îndrumările și recomandările competente.

Realizarea încercărilor le-am făcut cu ajutorul doamnei dr. fiz. Simona Sandu și a personalului de la CCIACBRNE – Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN şi Ecologie, București.

Doresc să mulțumesc celor de la INAS Craiova, în special doamnei Irina David și domnului ing. Florian Vlădulescu, pentru recomandări de utilizare și pentru asistența tehnică a soft-ului Ansys Explicit Dynamics.

Doresc să mulțumesc domnului dr. ing. Cătălin Pîrvu, Institutul Naţional de Cercetare Dezvoltare Aerospaţială "Elie Carafoli" – INCAS Bucureşti, pentru recomandările făcute pentru conceperea modelului.

Pentru imaginile SEM, obținute cu ajutorul microscopului electronic din cadrul Universității "Dunărea de Jos", căutate cu răbdare, discutate, și care argumentează bine partea de investigație a mecanismelor de cedare, mulțumesc doamnei dr. fiz. Alina Cantaragiu Ceoromila.

Pentru sprijinul acordat la utilizarea etuvei din cadrul Universității "Dunărea de Jos" mulțumesc domnului lector univ. dr. ing. chim. Dumitru Dima.

Mulțumesc celor de la MartPlast Urziceni, în special domnilor Dan Iorga, Mihai Victor Popescu, cu care am colaborat în elaborarea panourilor de protecție și cu care am fost la salonul de invenţică de la Academia Forţelor Terestre "Nicolae Bălcescu" din Sibiu.

Această teză de doctorat a avut sprijinul proiectului „Excelența academică și valori antreprenoriale - sistem de burse pentru asigurarea oportunităților de formare și dezvoltare a competențelor antreprenoriale ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – ANTREPRENORDOC, cod proiect: SMIS 123847, cod contract: POCU/380/6/13, contract nr. 36355/23.05.2019.

Cu recunoștință și dragoste, mulțumesc părinților mei și surorii mele, care au fost alături de mine și care m-au sprijinit în această perioadă.

Ing. George Ghiocel Ojoc

Galați, 21.04.2022

Cuprins

Prefață 3
Mulțumiri 5
Cuprins 7
Introducere 9
Capitolul 1. Analiza stadiului recent de utilizare a fibrelor de sticlă pentru sisteme de protecție la impact 13
1.1. Fibre folosite la sisteme de protecție 13
1.2. Țesături pentru sisteme de protecție 15
1.2.1. Tipuri de țesături în materiale compozite 16
1.2.2. Fibre de sticlă 21
1.3. Proiectarea unui sistem de protecție 26
1.4. Problematici ale testării și evaluării sistemelor de protecție cu fibre de sticlă 34
1.5. Concluzii privind utilizarea fibrelor de sticlă pentru protecție balistică 41
1.6. Direcții de cercetare pentru acest studiu 42
Capitolul 2. Organizarea tezei 43
2.1. Importanţa temei și obiective principale 43
2.2. Organizarea tezei 43
Capitolul 3. Modelarea impactului proiectil – panou stratificat la nivel macro 46
3.1. Introducere 46
3.2. Modele constitutive de material 47
3.3. Criterii de cedare 50
3.4. Informații pentru modelarea în Explicit Dynamics 54
3.4.1. Definirea comportării corpurilor 54
3.4.2. Definirea conexiunilor 55
3.4.3. Rețeaua de discretizare 56
3.4.4. Limitări ale dimensiunii modelelor în Explicit Dynamics 57
3.5. Modelul impactului panou stratificat-proiectil 58
3.5.1. Rețeaua de discretizare a corpurilor implicate în model 60
3.5.2 Modele de material 61
3.6. Rezultate ale simulării și discuții 64
3.6.1. Scopul simulărilor rulate 64
3.6.2. Influența vitezei de impact asupra panoului modelat 71
3.6.3. Evaluarea prin simulare a unui interval de grosimi de panou, pentru v_0 = 375 m/s 75
3.7. Concluzii 79

Capitolul 4. Tehnologia la scară de laborator a panourilor de protecție balistică ……. 81
4.1. Analiza soluțiilor tehnologice pentru plăci compozite/stratificate de protecție balistică ..…. 81
4.2. Materialele implicate …… 81
4.2.1. Fibra de sticlă și țesătura de fibră de sticlă ..…… 81
4.2.2. Matricea de rășină epoxidică ...…… 86
4.2.2.1. Matrice pentru compozite cu fibre de sticlă ……. 86
4.2.2.2. Procesarea și utilizarea rășinii selectate ……..… 86
4.3. Tehnologia de laborator pentru obținerea panourilor ..…… 90
4.3.1. Tehnologii din documentația analizată ..……..… 90
4.3.2. Tehnologia de laborator pentru panourile proiectate ..…… 92
4.3.3. Caracterizarea panourilor elaborate ……..…… 97
4.4. Concluzii privind realizarea panourilor …… 100
Capitolul 5. Campania experimentală și evaluarea rezultatelor ……..…… 101
5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice …… 101
5.2. Campanii de testare pentru panouri rigide (blindaje sau componente de blindaje) ……..…… 106
5.3. Echipamentul de încercare .....…… 107
5.4. Procedura de încercare ……..…… 108
5.5. Rezultate obținute din încercările efectuate ..……...…… 109
5.6. Mecanisme de cedare în compozitele testate …… 119
5.7. Identificarea componentelor care au participat la impact prin analiză EDX …… 126
5.8. Concluzii privind comportarea la impact balistic a panourilor proiectate ...…… 133
Capitolul 6. Concluzii și contribuții personale ...…… 134
6.1. Importanța temei ...……... 134
6.2. Concluzii finale asupra rezistenței balistice a panourilor testate ...……..... 135
6.3. Contribuții personale ...…… 140
6.4. Direcții de cercetare inițiate de acest studiu ...…….. 141

Bibliografie ...…….. 143

Anexă ...……... 163

Introducere

În domeniul echipamentelor de protecţie la impact balistic, totul se află într-o competiţie dinamică, spiralată, dintre penetrator şi mijloacele de protecţie balistică. Tendinţa acestei competiţii este obținerea de sisteme de protecție balistică cât mai flexibile și cât mai rezistente la amenințări multiple.

Obiectivul acestui studiu este proiectarea și testarea unui compozit pe bază de țesături unidirecționale de fibre de sticlă, pentru un blindaj de nivel FB2 sau mai mare, pentru autovehicule. Studiul include o documentare, o propunere de tehnologie la scară de laborator a compozitelor, simulări și teste experimentale, investigații ale mecanismelor de cedare/distrugere.

În capitolul 1, sunt prezentate rezultate ale unor cercetători care au domeniul de activitate asupra fibrelor de sticlă, țesăturilor și materialelor implicate în obținerea de blindaje compozite, și din care a rezultat că cercetările pot fi continuate în sensul îmbunătățirii performanțelor unor astfel de componente.

Capitolul 2 prezintă organizarea tezei, astfel încât să se evidențieze rolul modelării, campaniei de testare și tehnologiei de laborator pentru realizarea panourilor de protecție balistică.

Capitolul 3 prezintă aspecte teoretice ale simulării, specifice softului *Ansys Explicit Dynamics,* și modelul realizat pentru simularea comportării panourilor pe bază de straturi, la impact cu glonț de calibru 9 mm. FMJ. Sunt discutate rezultatele obținute prin simulare. Pe baza rezultatelor din simulări și a celor din încercări, s-au rulat simulări la viteze mai mari decât cele din experimente pentru a sta la baza unei eventuale creșteri a nivelului de protecție pentru variante similare ale panourilor de protecție. În acest capitol, au fost identificate etape pentru penetrarea totală și penetrarea parțială, sunt prezentate informații referitoare la dimensiunea delaminărilor, pe panourile testate în laborator și dimensiunile delaminărilor măsurate pe simulări.

Capitolul 4 prezintă o tehnologie de laborator prin care se pot obține panouri cu diverse grosimi, prin pensulare și presare. Procesul realizat de autor are repetabilitate, precizie și robustețe. Rețeta pentru realizarea panourilor și tehnologia de laborator este originală, bazată pe materiale cu proprietăți superioare: țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă, furnizată de Castro Composites SL (Spania) și rășină Biresin CR82 cu întăritor CH80-2 de la Sika GA (Austria). Realizarea s-a făcut cu respectarea normelor de securitate și sănătate în muncă, cu echipament de protecție adecvat. Procesul tehnologic de realizare a panoului codificat OGe, de diverse grosimi, cuprinde o succesiune de operații, care include tăierea straturilor de țesătură, realizarea amestecului rășină + întăritor, pensularea și presarea, monitorizarea și controlul grosimii panoului în presă, o îmbătrânire naturală timp de șapte zile, un tratament termic de

menținere la 60°C, timp de 6 h, și un control de calitate (cântărire, măsurarea grosimii, calculul deviației standard pentru această suprafață și a densității de suprafață). Au fost fabricate panouri de 8 straturi, 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi, 24 straturi și 32 straturi.

În Capitolul 5, sunt prezentate rezultatele încercărilor efectuate în laboratorul specializat al Centrului de Cercetare și Inovație pentru Apărare CBRN și Ecologie București (CCIACBRNE), aparatura de măsurare și monitorizare, procedura de încercare, standardele care sunt aplicate în această campanie de încercări. Rezultatele testelor balistice, însoțite de un raport de cercetare specializat, analizate cu ajutorul imaginilor fotografice și SEM, susţin şi conferă panourilor de protecţie balistică, proiectate de autor, performanţe care justifică recomandarea lor, de a fi utilizate în prototipuri ale sistemelor de protecție. Pe baza imaginilor SEM, analizelor EDX și seturilor de fotografii la nivel macro, autorul a descris procese de cedare caracteristice acestui tip de panou de protecție balistică (straturi din țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă și rășină epoxidică).

Capitolul 6 prezintă concluziile studiului de cercetare și contribuţiile personale ale autorului, precum şi direcţii de cercetare inițiate prin această lucrare.

Panourile de protecție balistică (OGe-n, n = 8, 16, 20, 22, 24 și 32, n fiind numărul de straturi de țesătură cuadriaxială) sunt destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate, și asigură gradul de supraviețuire în acțiuni de protecție pentru nivel specificat (FB2, conform EN 1522/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la atacul cu glonț. Condiții și clasificare” și SR EN 1523/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la glonț. Metodă de Metodă de încercare”). Testele au fost realizate în laboratorul Centrului de Cercetare și Inovare pentru CBRN și Ecologie, București.

După efectuarea testelor (care s-au încadrat la nivel FB2) și compararea rezultatelor prin numărul de straturi rupte de proiectil, s-au constatat următoarele: panoul de 8 straturi a fost penetrat complet, celelalte panouri au rezistat prezentând penetrare parțială cu distrugerea câtorva straturi (panourile de 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi, 24 straturi prezintă câte 3 - 4 straturi rupte, iar la panoul cu 32 straturi au fost rupte 2 straturi, iar glonțul a fost ricoșat). Cu ajutorul microscopului electronic, a analizei EDX și a fotografiilor macro, pe panourile testate au fost identificate mecanisme de cedare a fibrelor, firelor și straturilor compozitului.

Creșterea grosimii plăcii testate, a dus la reducea cercurilor care sugerează delaminarea pe spatele plăcilor, ceea ce reflectă faptul că, fenomenul de delaminare, scade în intensitate (spre spatele plăcilor) dacă numărul de straturi ale compozitului crește.

Introduction

In the field of ballistic impact protection equipment, design and products are in a dynamic, spiral competition between the penetrator and the ballistic protection means. The tendency of this competition is to obtain ballistic protection systems that are as flexible as possible and as resistant as possible to multiple threats.

The aim of this research study is to design a composite made of unidirectional fibre glass fabrics, for a FB2 level shield or higher, for vehicles. The study includes a documentation, a laboratory-scale technology for manufacturing this class of composites, simulations and experimental tests and investigations on the failure mechanisms.

Chapter 1 presents the results of researchers working in the field of glass fibres, fabrics and materials involved in manufacturing composite shields, and argues that research may be continued to improve the performance of such components.

Chapter 2 presents the organization of the thesis so as to highlight the role of modelling, laboratory-scale technology, testing campaign and failure mechanisms investigation for the design of such ballistic protection panels.

Chapter 3 presents theoretical aspects of the particular simulation using Ansys Explicit Dynamics software and the model developed to simulate the ballistic impact behaviour of the panels with stratified layers, when they are hit with a 9 mm FMJ bullet. The results obtained by simulation are discussed, including failure aspects, stages and equivalent stress distributions. Based on the results from simulations and those from the tests, simulations were run at a higher speed (420 m/s) to underline a possible increase in the protection level for similar variants of the already tested protection panels. In this chapter, on simulations, stages for total and partial penetration have been identified and it was obtained information on delamination size, both from tested panels and simulation. A comparison on the delamination dimensions is presented.

Chapter 4 presents a laboratory-scale technology, through which panels of various thicknesses may be obtained by lay-up, pressing and heat treatment. The manufacturing process, designed and applied by the author, has repeatability, precision and robustness. The recipe for making panels and the laboratory-scale technology is original, based on materials with superior properties: quadriaxial fabrics of glass fibres supplied by Castro Composites SL (Spania) and Biresin CR82 resin with hardener CH80-2, supplied by Sika GA. The fabrication was made in compliance with the norms of safety and health at work, with adequate protective equipment. The technological process of producing the OGe panels, of various thicknesses, has a succession of phases, which include cutting the fabric layers, making the resin + hardener mixture, brush laying-up and pressing, monitoring and controlling the thickness of the panel in the press, a natural aging of seven days, a heat treatment of maintaining at 60 °C, for 6 hours,

and quality control (weighing, thickness measurement, standard deviation of thickness and mass, and surface density calculation). There were manufactured 8-layers, 16-layers, 20-layers, 22-layers, 24-layers and 32-layers panels.

Chapter 5 presents the results of the tests performed in the specialized laboratory of the Center for Research and Innovation for Defence CBRN and Ecology, Bucharest (CCIACBRNE), measuring and monitoring equipment, test procedure, standards that are applied in this test campaign. The results of ballistic tests, accompanied by a specialized research report, were analysed using photographic and SEM images, pointed out the performance of ballistic protection panels, designed by the author, that justifies their recommendation to be used in prototypes of protection systems. Based on SEM images, EDX analyses and macro-level photo sets, the author described the failure mechanisms of the target, characteristic of this type of ballistic protection panel (a composite made of layers of quadriaxial fibre glass fabrics and epoxy resin).

Chapter 6 presents the conclusions of the research study and the personal contributions of the author, as well as the research directions open by this paper.

Ballistic protection panels (coded OGe-n, n being the number of layers made of quadriaxial fabrics of glass fibres) are intended for light shields for vehicles and protected enclosures and ensure the degree of survival in protection actions for the specified level (FB2, according to EN 1522/2004 "Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Requirements and classification" and SR EN 1523/2004 "Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Test method". They were tested at the laboratory facilities of CBRN Defence and Ecology Research and Innovation Centre, Bucharest.

After performing the tests (classified at FB2 level) and comparing the results by the number of broken layers by the bullet, the followings were found: the 8-layer panel was completely penetrated, the other panels resisted, having partial penetration with the destruction of several layers (16-, 20-, 22- and 24-layer panels have 3-4 broken layers each, and 2 layers were broken on the 32-layer panel and the bullet was bounced). With the help of the electron scanning microscope, EDX analysis and macro photography, the failure mechanisms of the composite fibers, yarns and layers were identified on the tested panels.

The increase in the thickness of the tested plate has led to the reduction of the circles that suggest delamination on the back of the panels, which reflects the fact that the delamination phenomenon decreases in intensity (towards the back of the plates) if the number of composite layers increases.

Capitolul 1. Analiza stadiului recent de utilizare a fibrelor de sticlă pentru sisteme de protecție la impact

1.1. Fibre folosite la sisteme de protecție

Domeniul fibrelor de înaltă performanță este de interes economic [149] de doar 100 ani, dar oferă tehnologii inovatoare relevante pentru sisteme de protecție la impact [22], [34], [53], [83], [104], [106], [135], [161], [198], [213], [276], [293].

În general, sistemele de protecție balistică bazate pe fibre/fire/țesături sunt împărțite în două grupe de aplicații:

- protecția individuală [26], [38], [94], [120], [167], [191], [193], [197], [229], [282],
- protecția tehnicii de luptă sau de intervenție (inclusiv autovehicule, nave, avioane) [42], [66], [72], [79], [125], [126], [203],
- protecția structurilor imobile (clădiri, depozite, hangare etc.) [94], [134].

Fibrele de mătase și nylon au fost folosite pentru crearea de veste de protecție pentru soldați, dar eficiența lor este considerată limitată. Nylonul a fost brevetat de DuPont și comercializat în anul 1939. În anul 1960, DuPont [292] a dezvoltat poliparafenilen tereftalamida, o moleculă liniară mult mai rigidă, care a rezultat prin filarea unei soluții lichide cristaline, în urma căreia rezultă fibre cu un grad mare de cristalinitate. Astăzi, acestea și fibre similare, cum ar fi Twaron [253], sunt esențiale în fabricarea sistemelor de protecție individuală. Datorită proprietăților particulare de rezistență la impact, fibrele aramidice [251], [254] au constituit subiect de cercetare, de la nivel micro, până la sistemele de protecție ca produs final [46]. Alte fibre polimerice sunt destinate în mod deosebit pentru protecție balistică, cum ar fi: polietilena de foarte mare densitate (UHMWPE) (cu denumiri comerciale, cum ar fi: Dyneema [43], Spectra), polibenzobizoxal (PBO) [183], polibenzenimidazol (PBI) [10], [51].

Chiar dacă fibrele de sticlă au unele dezavantaje, acestea sunt utilizate în prezent pentru protecția vehiculelor și altor sisteme de protecție la impact și/sau la temperaturi ridicate, implicând însă matrici scumpe și rezistente, și ele, la regimul termic [75], [78].

Realizarea unui sistem de protecție pe bază de fibre de sticlă implică câteva aspecte:

- calitatea țesăturii, dar și a fibrei/firelor [109];
- calitatea matricei (a rășinii sau polimerului care va "lega" straturile și firele între ele) [5], [285];
- eficacitatea tehnologiei în sensul realizării rapide, repetabile, cu același nivel de calitate, a unor sisteme de dimensiuni și forme diferite, necesare aplicației, costurile relativ mai reduse, dar densități specifice mai mari;
- disponibilitatea și interschimbabilitatea, timpul de utilizare și chiar reciclarea unor asemenea sisteme.

Rezistența la tracțiune a fibrelor crește cu micșorarea diametrului fibrelor și este limitată de defectele de fibră, de tensiunile reziduale și de neomogenitățile structurale. Riscul de a găsi defecte scade cu scăderea diametrului pentru fibrele polimerice, de carbon, cele ceramice și fibrele de sticlă. În zilele noastre, fibrele de carbon au diametrele între 4 μm și 10 μm; pentru fibrele polimerice și majoritatea fibrelor ceramice și de sticlă, diametrele sunt în intervalul de 10 μm până la 15 μm. Fibrele procesate prin depunere chimică de vapori, cum ar fi fibrele de bor, tind să aibă diametre mai mari, tipic între 100-150 μm [161].

Comportarea la impact balistic a fibrelor polimerice este caracterizată prin abilitatea lor de a absorbi local energia cinetică a proiectilului și de a transmite energia absorbită repede în lungul lor, înainte ca să fie îndeplinite condiții de rupere/cedare, caracteristică cuantificată prin energia absorbită pe unitatea de masă, E_{sp}, adică este legată de tenacitatea fibrei raportată la limita de rezistență, σ_{fail}, de deformația fibrei la rupere, ε_{fail}, și de densitatea fibrei, ρ, și $E_{sp}=0.5\sigma_{fail}\cdot\varepsilon_{fail}/\rho$. Abilitatea fibrelor să disipe energia este guvernată de viteza sunetului prin material, modulul de elasticitate longitudinal, E, și de densitatea lor, ρ, sub forma $v_{sunet} = (E/\rho)^{(1/2)}$. Figura 1.1 arată o poziționare bună a energiei absorbite pe unitatea de masă pentru fibrele de sticlă.

În general, fibrele și firele sunt integrate în compozite sub formă de țesături cu diverse arhitecturi și, de aceea, caracterizarea lor trebuie să fie făcută exact pentru compoziția, structura, dimensiunile și amenințarea pentru care sunt proiectate [2], [185], [187].

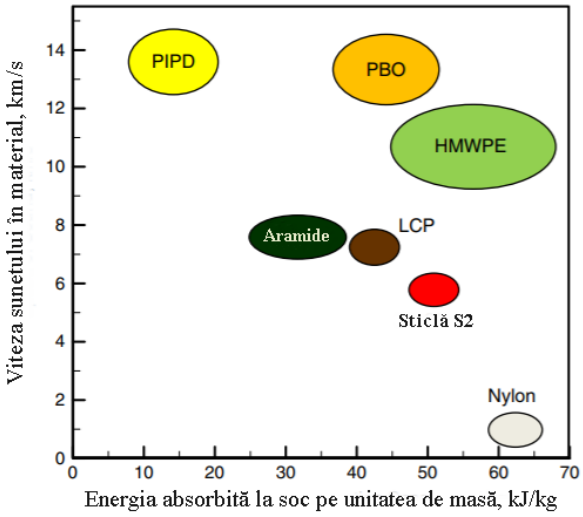


Fig. 1.1. Viteza sunetului prin material vs. capacitatea masică de absorbție a energiei pentru câteva fibre de înaltă performanță [102], HMWPE (high molecular weight polyethylene) – polietilenă de foarte mare densitate, LCP – polimeri cristalini lichizi, PBO – polibenzoxazol, PIPD - poli{2,6-diimidazo[4,5-b:4′,5′-e]-piridinilenă-1,4(2,5 - dihidroxi) fenilen}

Grafice pentru câteva caracteristici mecanice, implicate în caracterizarea rezistenței la impact, pentru diferite fibre, sunt date în Fig. 1.2; pentru nylon nu sunt trecute valorile

deformației la rupere, deoarece sunt între 1.5-2.5, mult mai mari decât valorile celorlalte fibre din grafic. Valori similare sunt date, mai recent, și în [267].

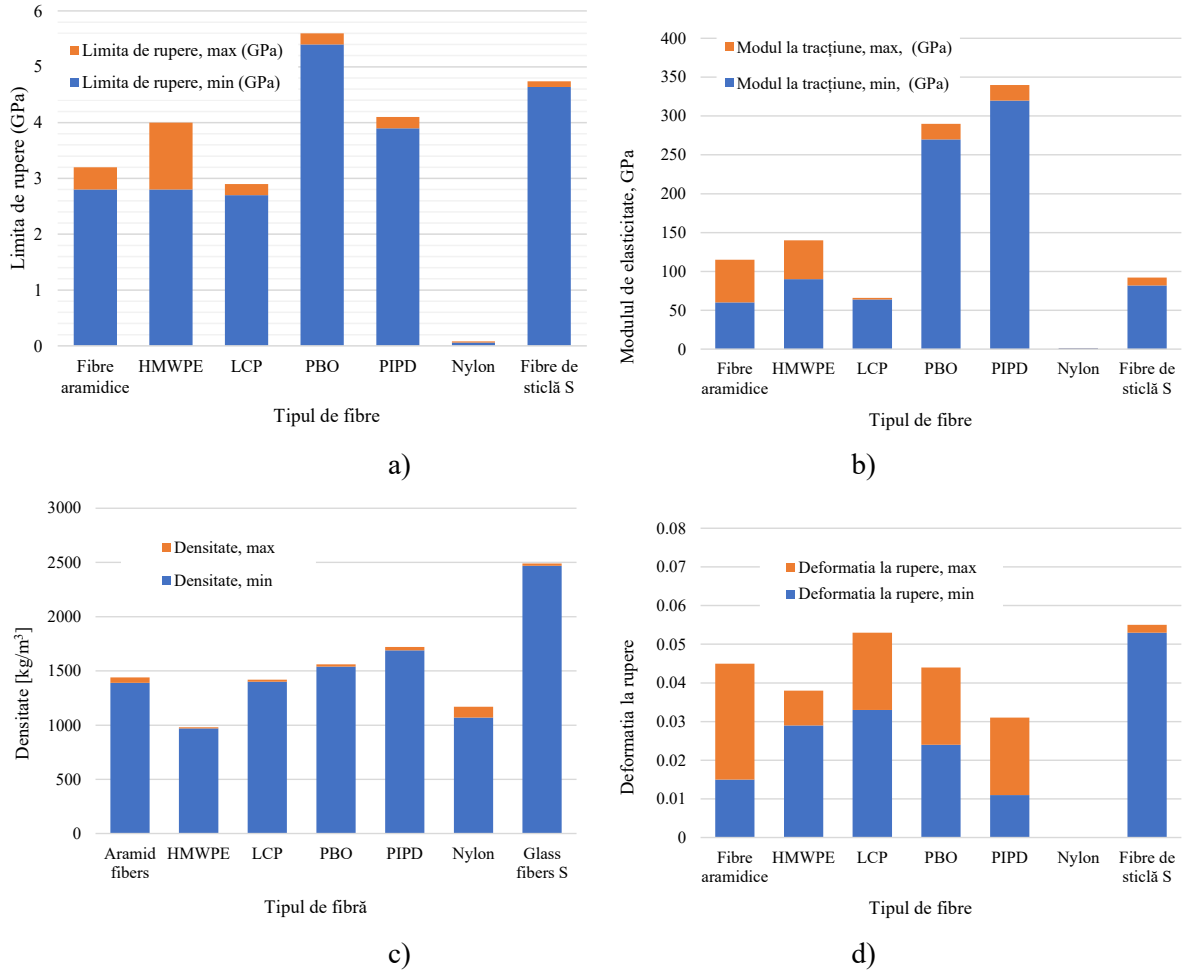


Fig. 1.2. Grafice ale câtorva caracteristici mecanice, implicate în rezistența la impact, pentru fibre: (HMWPE – polietilenă de foarte înaltă densitate, LPC – polimeri cu cristale lichide, PBO - polibenzoxazol, nylon – fibre de poliamidă) [102]

1.2. Țesături pentru sisteme de protecție

Un criteriu de mare importanță pentru structurile rezistente la impact, care include și fibrele de sticlă, este arhitectura firelor și/sau fibrelor. Studii asupra sistemelor de protecție care includ compozite stratificate sunt făcute la niveluri diferite: de la nivel micro [191], [217] pentru fibre și fire, la nivel mezo care se ocupă de țesături și straturi [50], până la nivel macro, când simularea și rezultatele experimentale sunt date pentru întreaga structură de protecție [44], [45], [56]. Performanțele recente ale computerelor (hardware și software) fac posibile simulări ale unor panouri balistice, luând în considerare firele și straturi cu fire [172].

Proprietățile compozitelor ranforsate cu fibre lungi depind de natura fibrei, arhitectura firelor, de matrice și de tehnologia care le asamblează, fracția volumică de fibre, grosimea pachetului.

Fibrele de sticlă au o rezistență mare la costuri relativ mici; fibrele de carbon au rezistență mai mare, rigiditate mare și densitate mai mică, fibrele aramidice au rezistență mare și densitate mică, prevenind răspândirea focului și sunt penetrabile de undele radio. Poliesterii sunt, de cele mai multe ori, folosiți ca matrice, deoarece oferă proprietăți bune la costuri relativ reduse. Rășinile epoxidice și poliamidele au proprietăți mai bune, dar sunt mai scumpe. Rezistența compozitelor crește dacă fracția volumică a fibrelor este mai mare și dacă orientarea fibrelor este paralelă cu direcția de solicitare. Deși fibrele de carbon și de sticlă sunt relativ des utilizate, acestea și unele fibre polimerice, metalice și ceramice sunt folosite și în aplicații particulare, inclusiv cele militare [4], [71], [113], [124].

1.2.1. Tipuri de țesături în materiale compozite

Conform site-ului DEX-online [288], „țesătura este un produs textil obținut la războaiele de țesut prin încrucișarea în unghi drept a unor fire de urzeală și de bătătură”, cu sinonimele pânză, stofă. Dar, din punct de vedere tehnic, țesătura este un sistem de fire (care poate avea un subnivel de organizare – fibrele firului), cu arhitecturi (poziționări repetitive) ale firelor care îi conferă proprietăți mecanice, fizice și chimice particulare, necesare anumitor aplicații, de la îmbrăcăminte, la sisteme de protecție (împotriva intemperiilor, focului, apei, impactului). Dezvoltarea acestor aplicații a implicat adăugarea de alte materiale care să îmbunătățească comportarea țesăturii (folii, acoperiri ale fibrelor, firelor), dar și tratamente prin care una sau mai multe caracteristici sunt direcționate (ignifugare, tratamente chimice pentru creșterea durabilității și/sau a rezistenței la umezeală etc.). Astăzi, țesăturile sunt folosite și ca ranforsări pentru obținerea de compozite (cele mai multe cu matrice polimerică) pentru aplicații în aeronautică, industria autovehiculelor [263], [295], medicină, construcții, și chiar aplicații militare [264], industria navală [285].

Țesătura este una din cele mai răspândite forme în care se pot găsi fibrele și firele în materialele compozite. Principalele tipuri de țesături 2D sunt date în Fig. 1.3.

Există mai multe criterii de clasificare pentru țesături [160]. După arhitectura fibrelor și firelor, acestea se pot clasifica în materiale țesute, materiale tricotate și materiale ne-țesute sau unidirecționale. La acestea din urmă, firele nu sunt ondulate, putând păstra rezistența pentru învingerea solicitării rezultate din întinderea firelor la solicitări exterioare. Țesăturile se clasifică, la rândul lor, în funcție de pozițiile relative ale firelor (de bătătură și de urzeală) (Fig. 1.3.): simplă sau 1/1, tip coș 2x2, twill (2/1 sau 2/2) și satin, cu diverse combinații. Mai există și alte forme de țesături (în os de pește, poplin, gabardină, corduroy etc.), dar nu sunt aplicate în aplicații de rezistență, ci mai degrabă în cele ornamentale. Țeserea 3D a devenit o tehnologie necesară în producerea de mănuși, șnururi, cabluri, frânghii etc. [287]. Materiale obținute prin tricotare se folosesc mai rar în sisteme de protecție din cauza spațiilor care rămân libere prin formarea spațială a tricotului. Materialele cu fire unidirecționale se produc cu ajutorul unor fire de legătură (de obicei rare și de rezistență mai mică), sau/și prin tragere în folii sau lipire. Materiale pe bază de fire se pot obține prin presare (de obicei, plecându-se de la vată, tort, sau „scame”, fire scurte, cu sau fără un adeziv sau liant) sau din fire foarte lungi (unele formate, la

rândul lor, din fibre), care își păstrează orientarea cu ajutorul unor fire de legătură sau cu ajutorul unui adeziv.

Materialele nețesute sunt definite în standardul SR EN ISO 9092:2019, Matriale textile nețesute. Vocabular. Documentele, inițiate în 1988, sunt identice în conținut, dar acestea au fost îmbogățite odată cu dezvoltarea tehnologiei și a comerțului pentru aceste produse. Asociațiile comerțului cu produse nețesute, Edana [269], au definit materialele nețesute astfel: ”Un material nețesut este un ansamblu fibros, inițial plan, care are, din proiectare, un anumit nivel de integritate structurală prin metode fizice și/sau chimice, excluzând țeserea, tricotarea sau tehnologia hârtiei”.

Țesăturile se pot clasifica după multe criterii [289], printre care reținerea apei, rezistența la foc, protecția balistică etc.

Semifabricatele nețesute se folosesc ca substraturi, conducte, materiale de filtrare, încălțăminte, produse pentru industria sanitară etc.

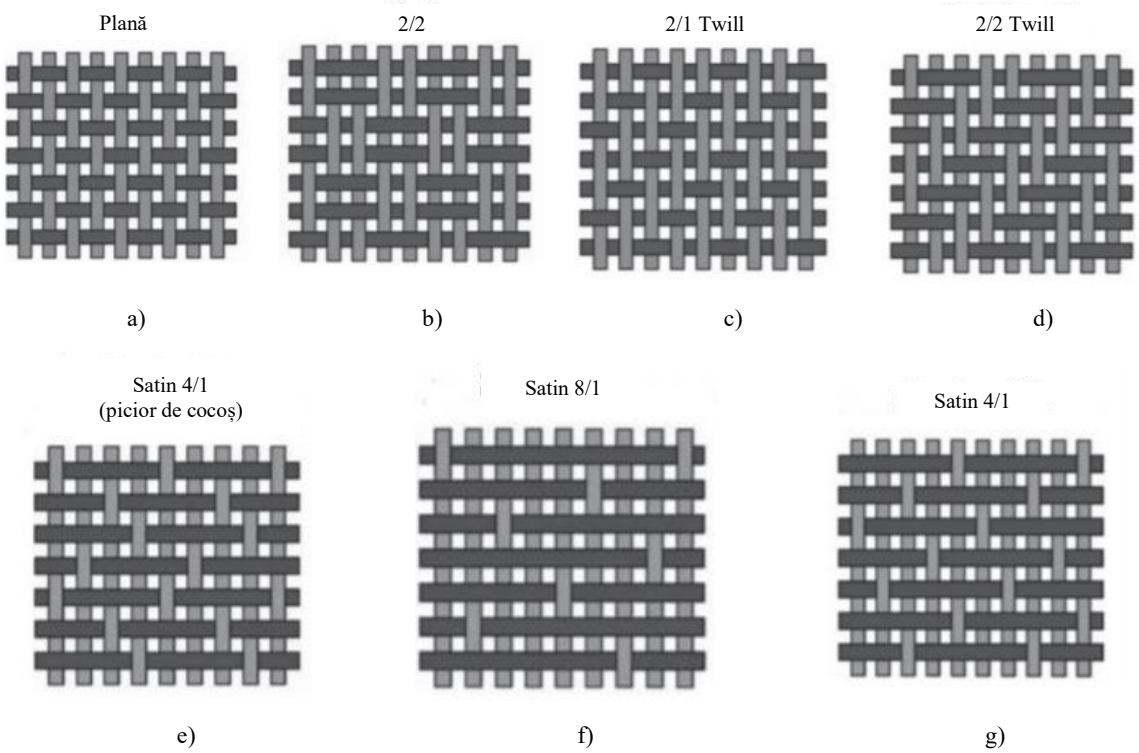


Fig. 1.3. Tipuri de țesături, în funcție de aranjamentul firelor de urzeală și de bătătură [31]

Țesătura plană. Acest mod de țesătură are o alternanță simplă a firului de urzeală cu cel de bătătură. Firul de urzeală trece succesiv peste și pe sub firul de bătătură. Țesătura plană poate fi aplicată oricărui tip de fibră, sintetică sau naturală. Țesătura rezultată are stabilitate si porozitate acceptabilă. Dezavantajele țesăturii plane sunt: un drapaj mai puțin flexibil, o îndoire a firelor mai pronunțată și mai frecventă, care determină proprietăți mecanice mai scăzute comparativ cu alte țesături. În limba engleză „draping” înseamnă drapaj, drapare sau ambalare în folie; când termenul este atașat unei țesături, se înțelege proprietatea materialului textil de a urma o suprafață complexă.

Țesătură twill. Această țesătură este caracterizată prin fire de urzeală care trec succesiv peste și pe dedesubtul a două sau mai multe fire de bătătură, într-o succesiune repetată; țesătura, astfel obținută, are un efect vizual de diagonale drepte, sau zigzag pe fața sau pe spatele țesăturii. Datorită îndoirii mai reduse și a frecvenței mai mici, pânza are un drapaj foarte bun, proprietăți mecanice mai bune, iar suprafața rezultată este mai puțin ondulată (Fig. 1.3).

Țesătura satin (Fig. 1.3, e, f și g) este o pânză cu aspect în diagonală, modificată astfel încât firele de urzeală și de bătătură să se intersecteze, rezultând un aspect mai neted al pânzei și o drapabilitate mai bună. Rezultatul acestei asimetrii este că pânza, pe față, are mai multe fire de urzeală, iar pe spate sunt vizibile mai multe fire de bătătură. Țesătura crowfoot (picior de pasăre) este un tip de țesătură satin, cu tipare de zigzaguri repetate. Țesătura satin are avantajul realizării unei densități mari pe unitatea de suprafață, pânza este foarte netedă și cu un drapaj excelent. Țesătura satin are dezavantajul că asimetria introduce concentratori de tensiune atunci când se asamblează (prin coasere, lipire etc.) [100], [147].

Țesături 3D**.** Această tehnologie de obținere a țesăturilor se aplică pentru componente realizate mai ales din fibre de carbon și polimerice. Comparativ cu cele din oțel sau aluminiu, piesele create prin intermediul acestei tehnologii de țesere 3D, sunt mai rezistente și mai ușoare, dar timpul necesar realizării lor poate fi mai lung. Pentru unele produse din această categorie (cabluri, mănuși, șosete) sunt folosite războaie de țesut circulare, cu ghidarea firelor prin laser. Figura 1.4 prezintă câteva variante de țesături 3D. Tehnologia de țesere 3D reduce volumul de materiale utilizate până la 50% și crește semnificativ rezistența lor. Procesul automatizat ar trebui să facă, de asemenea, mai ușoară producerea unui volum mare de piese în viitorul apropiat, ceea ce dă cercetătorilor speranța de a folosi această tehnologie cât mai eficient [247], [248].

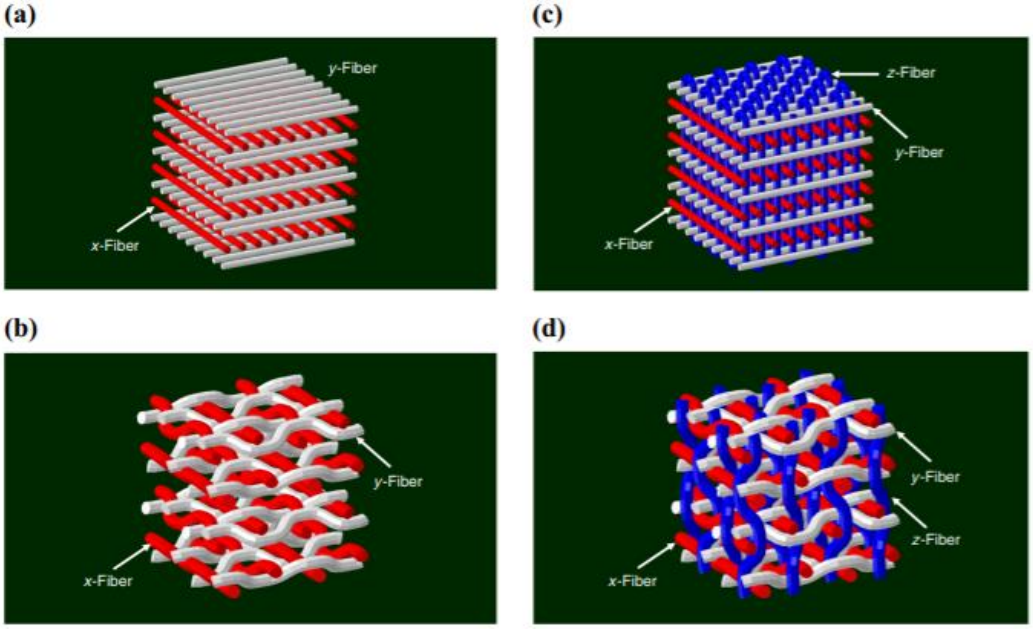


Fig. 1.4. Tipuri de arhitecturi de țesături: a) semifabricat cu două substraturi de fire unidirecționale, orientate 0°/90°, b) țesătură simplă, 1/1, c) arhitectură 3D, firul albastru fiind spațial, d) arhitectură 3D [27], [30]

Este foarte importantă arhitectura de ranforsare a compozitelor cu fire/fibre lungi, pentru răspunsul lor la impact balistic. Un prim criteriu ar fi poziționarea ranforsărilor, în plan (2D) sau în spațiu (3D). Tradițional, un compozit dedicat protecției balistice se bazează pe o arhitectură 2D.

Arhitectura 2D include aranjamente ale firelor unidirecționale cu variante (0°/90°), (0°/90°/45°), (0°/90°/45°/-45°) etc., iar cele țesute sunt 1/1, tip coș, satin, twill (Fig. 1.3). Atașarea straturilor de fire este o problemă de materiale și tehnologie (pensulare, formare în vid sau sub presiune, coasere etc.). În consecință, compozitele sunt controlate pe grosime de constituentul mai slab, de obicei matricea, iar în plan de proprietățile firelor/fibrelor.

Unele cercetări au raportat că ranforsarea 3D ar crește rezistența la delaminare pentru compozite și capacitatea acestora de a rezista la încărcări multi-axiale, inclusiv forfecări, [267].

Firma Castro are în portofoliu semifabricate pe bază de fibre de sticlă (Fig. 1.5) [267], [268].

- materiale fibroase, neondulate, multi-axiale;
- semifabricate combinate, din strat de vată sau tort de fibre scurte, presat și strat de țesătură; acestea au flexibilitate, dar au și rezistență mecanică, fiind adecvate pentru componente rezistente la impact. Rășinile recomandate pentru realizarea compozitului sunt poliesterii [242], [243] vinil esterii și rășinile acrilic-uretanice,
- țesături biaxiale, din două straturi unidirecționale, orientate la (0º/90º) și (45º/-45º), folosite pentru pensulare, injecție, infuzie etc.; se poate folosi orice tip de rășină termorigidă (poliesterice, uretan-acrilice, vinil-esterice sau epoxidice); au rezistență mecanică și suprafețe estetice,
- țesături cusute, numite și țesături cu fire neondulate sau unidirecționale, adecvate pentru ranforsări; fibrele sunt făcute mănunchiuri (fire) și sunt „cusute”, nu țesute, deci firul nu este ondulat (pentru că firul auxiliar de coasere este mult mai flexibil), așadar, firele nu-și pierd din rezistență prin ondulare, așa cum se întâmplă în țesături cu fire de urzeală și bătătura; se folosesc în industria navală, construcții, transporturi și în industria energiei eoliene; aceste țesături sunt destinate, în special, tehnologiilor prin pensulare și infuzie, cu control al cantității de rășină; sunt compatibile cu rășini poliesterice, uretan-acrilice, ester-vinilice și epoxidice.

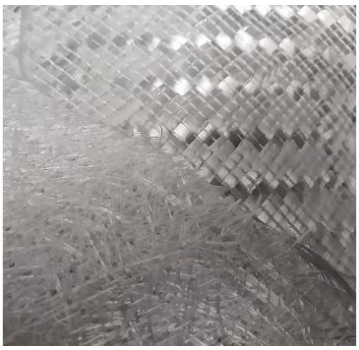
Avantajele semifabricatelor (țesăturilor) multiaxiale sunt:

- masa specifică este mai bună și rezistența fibrei este folosită pentru a face față sarcinii externe și nu încovoierii introduse de procesul tehnologic de asamblare (cum este la țesere): orientările fibrelor pot fi la 0°, 45°, 90°, chiar și -22,5° și +22,5°,
- fibrele drepte sunt optime pentru rezistența mecanică [236],
- au drapabilitate și permeabilitate (dacă este nevoie), mai reduse.

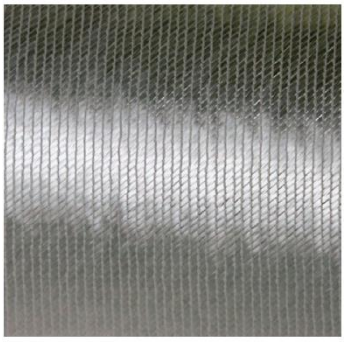
În general, semifabricatele multi-axiale duc la reducerea costurilor și timpilor de prelucrare pentru produsul final: sunt cerute mai puține foi de semifabricat multistrat (multi-axial) datorită densității specifice mai mari, caracteristică importantă, mai ales pentru compozite cu rezistență la impact [267].



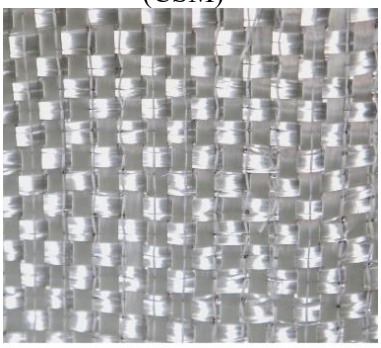
a) Tort presat din fibre de sticlă E, tăiate, 450 g/m^2 (CSM)



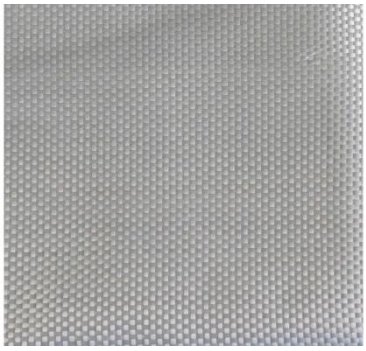
b) Țesătură hibridă din tort presat de fibre și țesătură twill 3/1



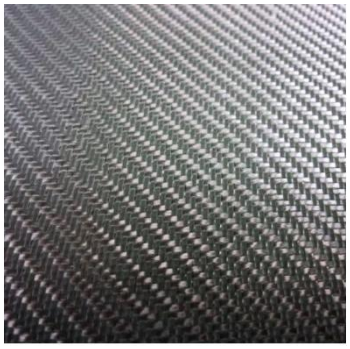
c) Țesătură triaxială (0º/+45º/-45º), cusută, 750 g/m^2



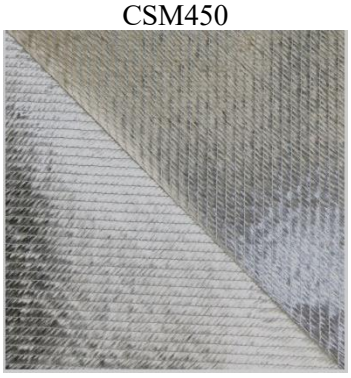
d) Țesătură simplă 1/1 800 + CSM450



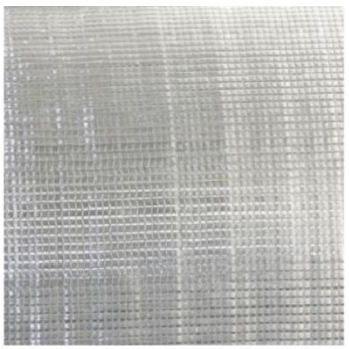
e) Țesătură simplă 1/1 280 g/m^2



f) Țesătură twill 2x2, 280 g/m^2



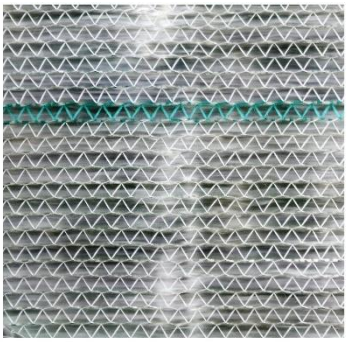
g) Țesătură unidirecțională biaxială (+45°/-45°), 800 g/m^2



h) Țesătură unidirecțională biaxială (0°/90°), cusută, 600 g/m^2



i) Țesătură cuadriaxială (0º/+45º/90º/-45º), cusută, 1200 g/m^2



j) Țesătură unidirecțională, cu fire auxiliare de legătură, tricotate, 1200 g/m^2



k) Araglass 540, țesătură hibridă, din țesătură aramidică biaxială (+45°/-45°), cu 370 g/m^2, cu semifabricat tort din fibre scurte, presate, 170 g/m^2

Fig. 1.5. Produse pe bază de fibre de sticlă de la firma Castro [267]

1.2.2. Fibre de sticlă

Sub denumirea de filamente sau fibre de sticlă, acestea sunt materiale versatile, produse prin topirea oxidului de siliciu și a altor minerale, cu răcire rapidă ca să se împiedice cristalizarea și formarea fibrilației [237]. Tipurile de fibre de sticlă s-au grupat după una din caracteristici pentru care fibrele sunt utilizate: E, S, C, A și D (Fig. 1.6) [156], [230], [231].

Fibrele de sticlă și țesăturile cu fibre de sticlă au domenii foarte variate de aplicație, de la domeniul mecanicii, electricității, rezistenței la coroziune, până la aplicații foarte înguste, așa cum sunt și aplicațiile de protecție balistică [2], [27], [180]. Printre grupele de fibre de sticlă, tipurile E și S (inclusiv S2) sunt fibre cu performanțe mecanice mai bune. Tipul E are în compoziție CaO, Al_2O_3, și SiO_2, uneori cu B_2O_3, de la 0 la 10 wt.%, acestea fiind adecvate pentru realizarea, prin diferite tehnici, a compozitelor cu fibre de sticlă (deseori întâlnite în literatura de specialitate cu abrevierea GFRP – glass fiber reinforced polymer, polimer ranforsat cu fibre de sticlă) [160]. Tipul S este compus, în principal, din silică, (oxid de siliciu, SiO_2), alumină (Al_2O_3) și magnezia (MgO) și a fost dezvoltat la începutul anilor '60 pentru aplicații la temperatură înaltă și rezistente mecanic. Abia prin anii 70 au fost introduse aceste fibre în aplicații balistice. În general, tipul S2 are o rezistență cu 35% până la 40% mai mare decât tipul E [160], și are o performanță foarte bună în protecție balistică, pentru blindaje tip compozit sau stratificate, datorită rezistenței bune la tracțiune și compresiune. Deformația la rupere destul de mare, comparativ cu alte materiale pentru protecție balistică (de exemplu, fibrele aramidice), joacă un rol important în mecanismul de impact balistic. Structurile obținute din fibre de sticlă sunt căutate și pentru protecția la foc, fum și gaze toxice, costuri relativ mai mici și masă specifică mai mică comparativ cu soluții care implică aliaje metalice sau beton armat. Avantajele fibrelor de sticlă sunt: prețul relativ mic, rezistență la tracțiune și la impact, rezistență chimică, dar trebuie luate în considerare și dezavantaje, cum ar fi modul de elasticitate mic, uzura firelor prin abraziune, rezistență mică la oboseală și o aderență mai slabă la unele rășini, ceea ce ridică prețul produselor prin selectarea unei matrici relativ scumpe [2].

Fabricarea fibrelor de sticlă și a țesăturilor este încă un sector de mare consum energetic, deoarece sticla se prelucrează prin extrudare și filare în fibre la temperaturi tipice de 1000 °C – 1200 °C [230].

Figura 1.6 prezintă compoziția chimică a diferitelor tipuri de sticlă, simbolurile fiind explicate sub figură. Analizând graficele caracteristicilor mecanice ale acestor tipuri de sticlă (Fig. 1.8), se observă că tipul S, inclusiv S 2, este recomandat pentru aplicații balistice, deoarece sticla conține SiO_2 și Al_2O_3 în procente ridicate, și că suma acestor două ceramice este de aproximativ 90% pentru tipul S, ceea ce reflectă o rezistență mecanică mai bună. O altă sursă documentară propune compoziția din Fig. 1.7 pentru tipuri similare.

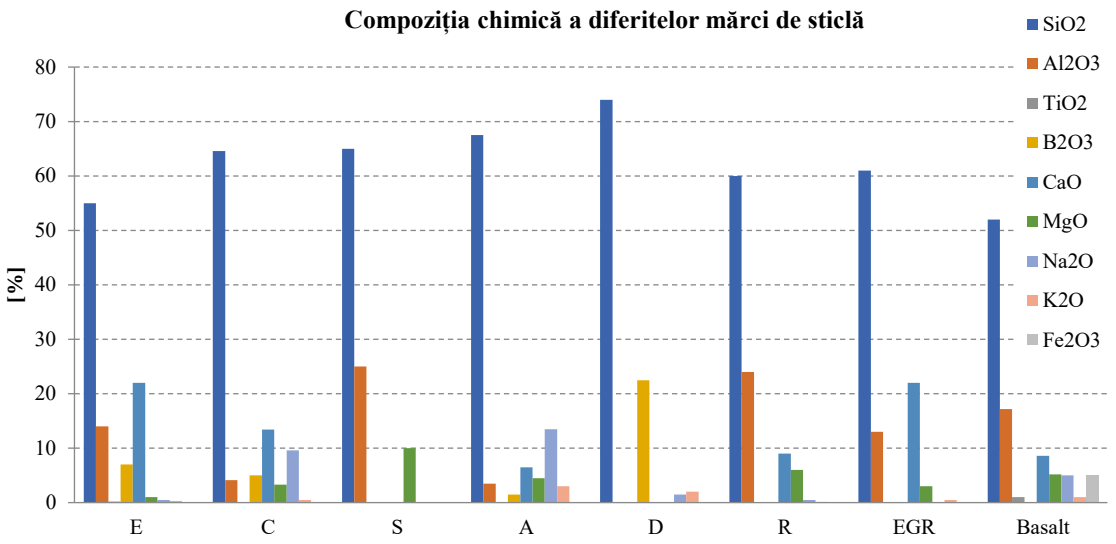


Fig. 1.6. Compoziția chimică a unor tipuri de sticlă:
A – sticlă cu durabilitate, rezistență mecanică mare și rezistivitate electrică mare, C – sticlă cu rezistență la coroziune mare, D – sticlă cu constantă electrică mică, E – sticlă cu rezistență mecanică mare și rezistivitate electrică mare, AR – sticlă cu rezistență la coroziunea alcalilor, R – sticlă cu rezistență mare și rezistență la coroziunea acizilor, EGR – sticlă pentru sisteme de recirculare a gazelor de ardere, S – sticlă cu cea mai mare rezistență la tracțiune, S 2 - sticlă cu rezistență mare la tracțiune, modul de elasticitate mare și stabilitate mare [207]

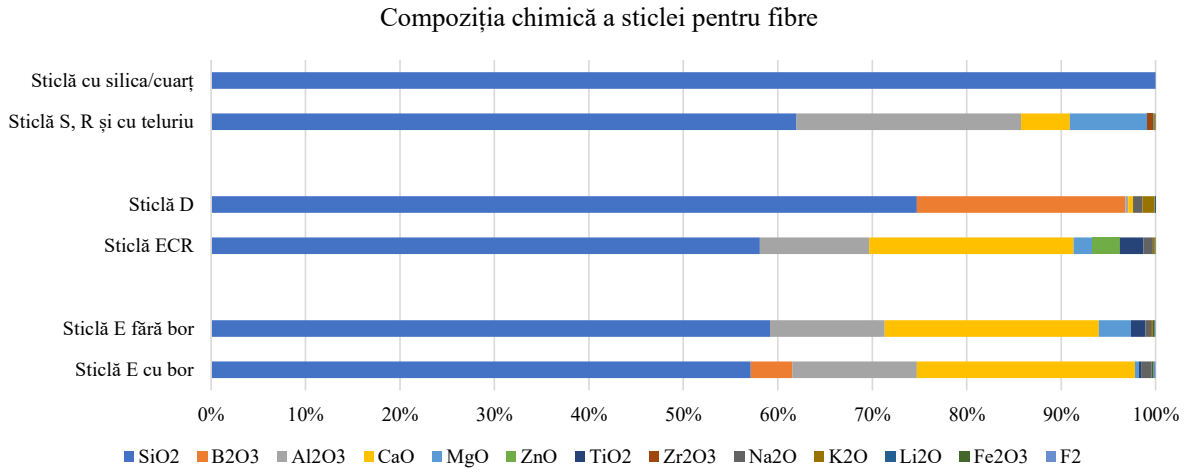


Fig. 1.7. Variații ale compoziției de fibre de sticlă [231]

Una din tipurile de sticlă E poate conține 5-6% oxid de bor. În unele cazuri, norme de mediu prevăd eliminarea borului din compoziție.

Tabelul 1.1 oferă câteva proprietăți mecanice și termice pentru deferite tipuri de fibră de sticlă și se observă că tipurile E (cu sau fără bor) au proprietăți mecanice bune, fiind depășite doar de tipul S.

Tabelul 1.1. Proprietăți ale fibrelor de sticlă [231]

	Densitate, g/cm^3	**Coeficient de dilatare liniară, 10^{-6}/°C**	**Căldură specifică, cal/(g·°C)**	**Pierderea de masă în 10% acid sulfuric, %**	**Rezistența la rupere la tracțiune, MPa**	**Modulul de elasticitate la tracțiune, GPa**	**Deformația la rupere, %**
Sticlă E cu bor	2,54-2,55	4,9-6,0	0,192	41	3100-3800	76-78	4,5-4,9
Sticlă E fără bor	2.62	6,0		6	3100-3800	80-81	4,6
Sticlă EGR	2,66-2,68	5,9		5	3100-3800	80-81	4,5-4,9
Sticlă D	2,16	3,1	0,175		2410		
Sticlă S	2,48-2,49	2,9	0,176		4380-4590	88-91	5,4-5,8
Silica/cuarț	2.15	0,54			493	69	5

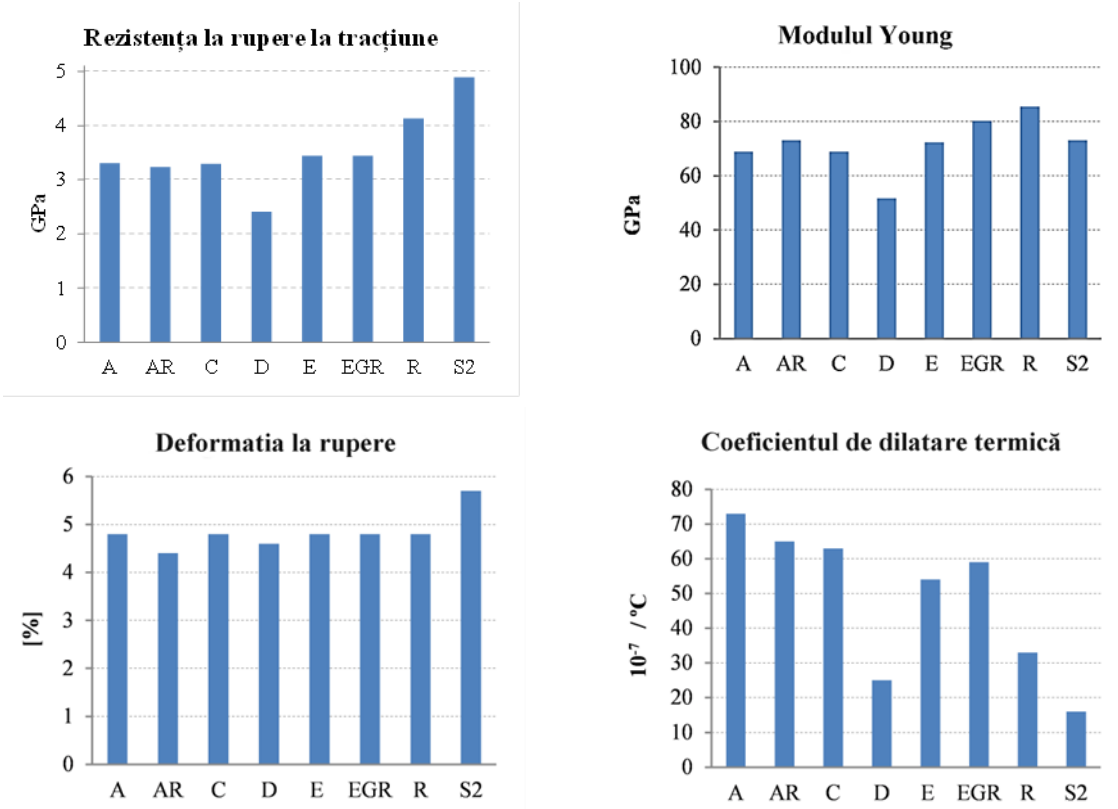


Fig 1.8. Caracteristicile fibrelor de sticlă (după [207])

Explicația abrevierilor tipurilor de sticlă din Fig. 1.8 sunt: A – sticlă pentru durabilitate mare, rezistență mecanică mare și rezistivitate electrică mare, C - sticlă cu rezistență la coroziune mare, D – sticlă cu constantă electrică mică, E – sticlă cu rezistență mecanică mare și rezistivitate electrică mare, AR - sticlă cu rezistență la coroziunea alcalilor, R – sticlă cu rezistență mare și rezistență la coroziunea acizilor, EGR – sticlă pentru sisteme de recirculare a gazelor de ardere, S – sticlă cu cea mai mare rezistență la tracțiune, S2 – sticlă cu rezistență mare la tracțiune, modul de elasticitate mare și stabilitate mare.

Fibrele de sticlă se clasifică în două categorii: fibrele de sticlă de uz general, cu preț redus și fibre de sticlă speciale, pentru aplicații înguste, de calitate [131], [132]. Peste 90% din fibrele de sticlă sunt folosite pentru produse de uz general. Aceste fibre sunt cunoscute sub desemnarea E. Fibrele cu destinație specială, care au semnificație specială astăzi, includ fibrele de sticlă cu

rezistență mare la coroziune (ECR), fibrele cu rezistență mare (tipurile S, R, și E), cu constante dielectrice reduse (D), fibre de înaltă rezistență, și fibre de cuarț sau de oxid de siliciu pur (silică), care pot fi folosite la temperaturi înalte.

Caracteristicile țesăturilor din fibre de sticlă (țesute sau nu) sunt: proprietăți mecanice bune la încovoiere, o densitate specifică care le situează între țesăturile polimerice și cele de oțel, rezistență la impact, conformabilitate la formare în matriță, o foarte bună umectare cu rășina și consum redus de rășină, când se produc compozite stratificate, în serie mai mare.

Compozitele stratificate hibride [95] sunt din ce în ce mai utilizate în aplicații militare, dar și în aplicații care presupun rezistență la impact. Este eficace determinarea unor proprietăți mecanice ale componentelor, determinate pentru viteze mari de deformare, specifice aplicației, apoi modelarea și simularea comportării structurii stratificate și, în final, proiectarea unui prototip și testarea lui cu proiectile reale [51].

Rao și Farris [199] au investigat influența răsucirii firului asupra rezistenței și modulului de elasticitate, și au constatat că firele din mai multe fibre au cea mai bună rezistență la tracțiune, la un unghi de răsucire de aproximativ 7°.

În domeniul balisticii, cele mai des utilizate tipuri de țesături sunt țesăturile 1/1 și cele tip coș (basket). Țesăturile sunt produse și cu fire unidirecționale, cu o singură orientare sau mai multe (două, trei și patru), pentru ultimul tip, unghiul dintre firele substraturilor variind de la (0°, 90°), (-45°, 45°) până la (0°, 90°, -45°, 45°). Cunniff [74] a observat că țesăturile țesute larg sau cu țesere neechilibrată (tip satin), duc la performanțe balistice slabe.

Faur-Csukat [88] a prelucrat compozite din țesături cu 55% wt (masic) fibre, prelucrate manual prin acoperire cu pensula, urmată de comprimarea straturilor. Performanța balistică a țesăturilor din fibre de carbon, sticlă, aramidice și polietilenă, folosite pentru fabricarea panourilor de protecție, au arătat că eficiența lor este în următoarea ordine; fibra de sticlă este mai bună decât fibra aramidică, care este mai bună sau egală cu polietilena de foarte mare densitate (UHMWPE), care este mai bună decât fibra de carbon.

În general, fibrele cu o deformație relativ mai mare, la o viteză de deformare mare, absorb mai bine energia decât cele cu deformație relativ mică la rupere [18], [169]. Interfața fibră-matrice joacă un rol critic în rezistența la impact. S-a observat că interacțiunea interfacială slabă a dus la o absorbție de energie mai mare [3], [185], [224], dar fiecare matrice trebuie să treacă proba experimentală pentru a fi acceptată. Compozitele cu țesături au mecanisme de cedare particulare, cum ar fi dezlipirea fibră-matrice, delaminarea (desprinderea straturilor între ele), alunecarea, fisurarea rețelei, dar și frecarea între componente, și între acestea și proiectil, favorizează absorbția de energie.

Arhitectura țesăturii influențează, și ea, performanțele balistice ale compozitelor. În condițiile de testare, performanța țesăturilor tip basket a fost mai bună cu aproape 10% decât a țesăturilor simple 1/1 [88]. Țesăturile tip satin și twill (2/1) tind să absoarbă mai multă energie decât țesăturile simple (1/1), posibil deoarece nu își pierd din rezistență pentru a face față ondulării cerute de arhitectura țesăturii 1/1. Arhitectura țesăturii este mai importantă în compozitele mai groase decât în compozitele mai subțiri, deoarece unghiurile mici de îndoire (ondulare a firelor) reduc concentrarea tensiunilor.

Performanțe balistice îmbunătățite pot fi obtinuțe prin utilizarea țesăturilor 3D în locul țesăturilor 2D [215], dar această nouă arhitectură, prin organizare 3D, este sensibilă în sensul că depărtează firele, creând micro-zone cu densități specifice mai mici și, deci, mai vulnerabile. Walter și alții [234] au analizat rezultatele obținute cu compozite de fibră de sticlă, țesute 3D, și au observat că delaminarea de-a lungul stratului mai slab este un dezavantaj sever pentru aceste compozite solicitate la impact, la viteze mari de deformare. În general, prinderea în forma de Z a crescut rezistența la rupere și a redus distrugerea la o arie totală mai mică decât cea obținută pe epruvetele neprinse 3D. Hosur și alții [115], au raportat o scădere a limitei balistice în țintele prinse în Z, deși nu au dat nici o explicație a acesteia, dar poate fi pusă pe seama firelor care par să aibă mai mult spațiu între ele când se face prinderea în acest mod.

Shockey și alții [214] au studiat țesături de Zylon într-un singur strat și au observat că energia absorbită a fost proporțională cu densitatea de suprafață a țesăturii, dar că eficacitatea balistică nu a fost puternic dependentă de densitatea țesăturii sau de apropierea firelor între ele. Chitrangad [63] a recomandat un interval de 0,60 până la 0,95 pentru factorul de acoperire (raportul dintre aria acoperită de fire și întreaga arie a țesăturii) pentru aplicații balistice cu țesături. Valoarea mai mică caracterizează țesăturile prea rare, dar valoarea mai mare induce o tensiune de încovoiere mult prea mare în fire, pe durata țeserii. V_{50} pentru țesăturile compozite cu deformație mai mare în firele de bătătură și cu deformație la rupere mai mică în firele de urzeală, a fost mai mare decât a țesăturilor făcute dintr-un singur material, care se poate datora influenței mai scăzute a ondulării firului. Luând în considerare ondularea firului la modelare, Tan și alții [222], [223] au obținut rezultate mai bune. Numărul straturilor țesăturii influențează performanța balistică; de obicei pot fi 18-56 straturi. Shokey și alții [214] au observat o creștere a energiei specifice absorbite de țintele stratificate din cauza frecării între straturi. Un model proiectat de Ionescu [121] a estimat că frecarea reduce viteza reziduală. Influența distanței între straturi asupra performanței balistice a fost investigată și în [74], [154]. Influența geometriei proiectilului devine mai puțin importantă, cu creșterea numărului de straturi [224]. O structură de țesătură 3D a fost studiată într-un compozit [100] care a fost proiectat să asigure o grosime mai mare pe direcția ranforsării, comparativ cu țesăturile 2D convenționale; această structură a demonstrat o performanță balistică mai bună și a dus la străpungerea unui număr mai mic de straturi la impact.

Kolopp și alții [147] au făcut un studiu experimental la impact realizat pe structură sandwich, pentru a îmbunătăți soluții pentru sisteme de protecție pentru aplicații în aeronautică: un panou neperforat, cu greutate minimă și cu deformații posterioare minime. Impactul de viteză medie (120 m/s) a fost făcut folosind proiectile sferice de 127 g. Au fost identificate două posibile variante pentru partea frontală a structurii tip sandwich: plăci de aluminiu, tipul AA5086-H111, de 3 mm grosime, și țesături cusute din fibre aramidice (8 până la 18 straturi). Testele de impact au arătat că miezul, sub formă de fagure din aluminiu, asociat cu plăci de aluminiu, au minimalizat distrugerile. Totuși, combinația dintre țesăturile așezate frontal și structura de fagure de aluminiu au dat rezultate mai bune decât structurile sandwich de aluminiu, cu o reducere a greutății totale.

Aplicațiile țesăturilor din fibre de sticlă și compozitelor lor includ industria autovehiculelor, industria navală, industria energetică, construcții, industria chimică și petrochimică, industria nucleară, construcția de mașini și protecția balistică [160] [250].

În industria autovehiculelor, raportul fibrelor de sticlă din compozit, ca masă, este între 31% pentru podeaua mașinii (cu matrice poliesterică, firma Das, 2011), până la 55% pentru caroserie și uși (cu rășină epoxidică la, Rocky Mountain Institute), și 69% pentru șasiu (cu rășină epoxidică, Suzuki & Takahashi, 2005). Pentru panourile de protecție la impact, acest procentaj ar putea să fie mai mare deoarece utilizatorii finali doresc o densitate de suprafață cât mai mică și o grosime cât mai redusă [248].

1.3. Proiectarea unui sistem de protecție

Figura 1.9 prezintă o schemă logică pentru proiectarea unui nou sistem de protecție, evidențiind o buclă mai strânsă a cercetărilor, pentru dezvoltarea de materiale noi, modelare și simulare, rezultând o reducere semnificativă a timpului necesar dezvoltării unei noi armuri. Aspectele legate de restricționarea informației în domeniu duc la elaborarea de soluții punctuale sau doar parțial eficace. Bucla de feedback, între proiectarea sistemului de protecție și proiectarea materialului, este în contrast cu practica curentă, în care fluxul de proiectare pune noile materiale "pe raft" pentru a fi încercate în procesul de testare (Fig. 1.9) [247].

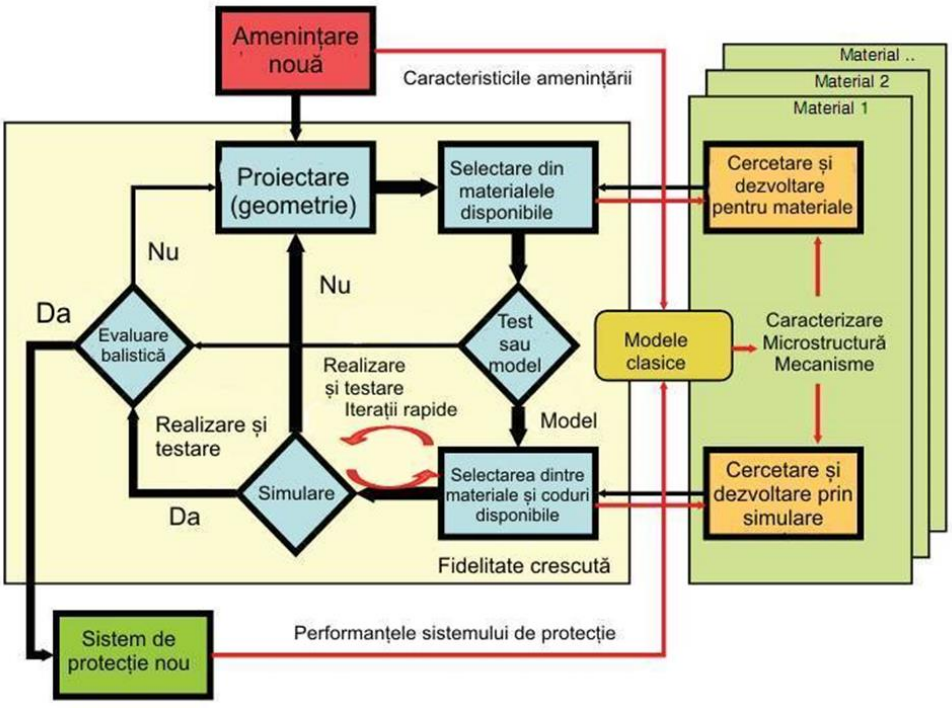


Fig. 1.9. Diagrama logică pentru re-proiectarea unei armuri sau a unui blindaj [247]

Medvedovski [162] a scos în evidență că un sistem de protecție balistică constă într-o placă ceramică monolitică sau într-o placă compozită ceramică-metal, acoperită de țesături polimerice balistice, cu o rezistență mare la tracțiune (cum ar fi Kevlar, Twaron, Spectra, Dyneema), acoperite sau laminate în polietilenă, plasate pe spatele ceramicii sau compozitului

metalo-ceramic, plăci subțiri de aluminiu putând fi utilizate ca material posterior. În unele cazuri, se atașează un scut de exfoliere pe partea frontală a armurii.

Elementele unui sistem de protecție la impact pot să nu fie ele însele noi ca materiale și soluții (Fig. 1.10 prezintă o structură teoretică și generală a unui sistem de protecție la impact [99], [215]), dar accentul se pune acum de la proiectare-producție-test de tragere-reproiectare la iterații de simulare, și de la proiectare cu materiale deja existente pe piață la proiectare cu materiale noi, care au dovedit că au rezistență la impact.



Material	Funcții
1 – Compozit	Protecție la viteza mică de impact și la abraziune
2 – Placă ceramică	Protecție balistică, integritate structurală
3 – Elastomer	
4 – Compozit	
5 – Țesătură sau placă metalică	Atenuarea deformării
6 – Compozite din fibre (de sticlă, polimerice)	Protecție la foc, fum și toxicitate

Fig. 1.10. Un sistem de protecție la impact (după [247])

Figura 1.11 arată un blindaj integrat, cu compozite, dezvoltat de US Army Research Laboratory (ARL) [89], [90], care are în componență, la exterior, o folie relativ subțire de compozit cu matrice polimerică pentru protejarea plăcilor ceramice, plăci ceramice groase pentru absorbția energiei cinetice prin mecanisme de oprire, spargere mixtă sub presiune și deformare/erodare a proiectilului, un strat de material elastomeric pentru a preveni cedarea prematură a compozitului de pe spatele blindajului și pentru a îmbunătăți performanța la lovituri multiple și a atenua undele de șoc de înaltă frecvență, o placă compozită groasă care să asigure suportul plăcilor balistice și să se adapteze structurii vehiculului și un strat de protecție la foc pe suprafața interioară a vehiculului. Pot exista straturi suplimentare pentru protecție electromagnetică sau la șocuri balistice severe.

Sub impactul unui proiectil (viteza de 700–1000 m/s), placa de ceramică dură este spartă și energia reziduală este absorbită de materialul posterior mai moale, chiar dacă este ranforsat, și care trebuie să suporte spargerea post-impact a plăcii ceramice și a glonțului oprit. Acoperirea mai moale protejează sistemul și împotriva posibilei deteriorări asociate vibrațiilor. Figura 1.12 prezintă un sistem cu câteva din elementele din Fig. 1.10, testat de Shukla [215].



Fig. 1.11 Armură integrală cu compozite [90], [244]

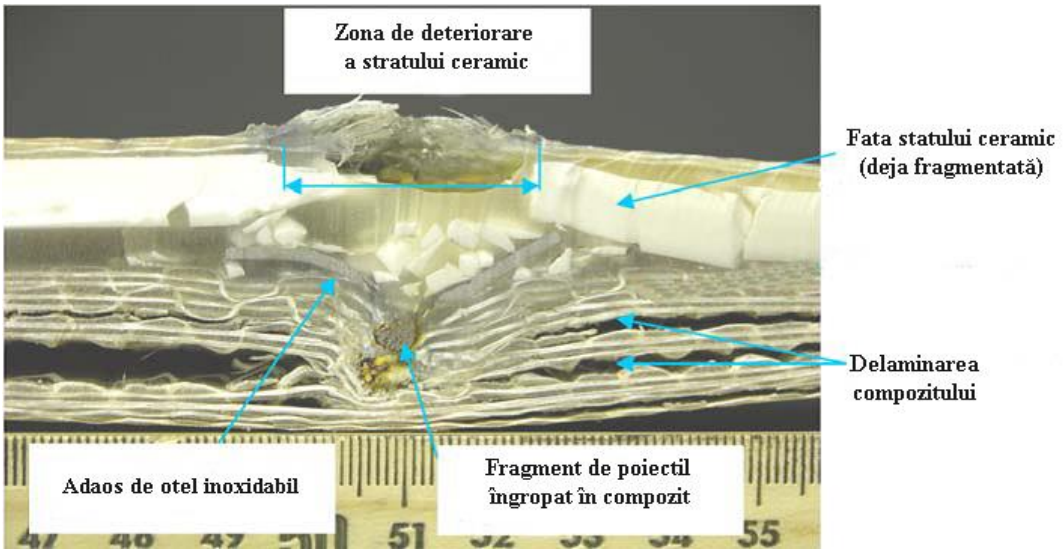


Fig. 1.12 Secțiune obținută prin tăiere cu jet de apă, printr-un blindaj pentru autovehicule, cu țesătură posterioară 3D [215]

Parametrii de performanță ai unui blindaj din compozite includ parametri măsurabili, dar și calitativi [89]. Cel mai important parametru măsurabil este limita balistică, adică viteza la care un anumit proiectil poate perfora o anumită țintă. De asemenea, este important răspunsul la lovituri multiple și toleranțele caracteristicilor de material și geometrice ale țintei, mai ales la penetrări parțiale, când interesează deteriorările și pe fața și pe spatele țintei, pentru a evalua supraviețuirea pe termen lung a sistemului protejat [152]. Alți parametri includ densitatea de suprafață, prelucrabilitatea, interschimbabilitatea și mentenanța, costurile aferente introducerii soluției respective în locul celei vechi etc. [244].

Complexitatea sistemelor de protecție fac evaluarea dependentă de amenințarea pentru care sistemul este proiectat. Ce este ușor ca masă pentru autovehicule, este extrem de greu pentru personal. În consecință, în evaluare, dacă un sistem de protecție este suficient de ușor, nu se poate considera numai masa reală a acestuia. Deoarece sistemele de protecție sunt proiectate să protejeze o anumită zonă [247], masa lor este descrisă mai bine de densitatea de suprafață, A_d:

$$A_d = \frac{masa\ sistemului}{aria\ care\ se\ protejează}\ [kg/m^2] \tag{1.1}$$

Dar această caracteristică a sistemului nu indică eficacitatea lui. Eficacitatea a două sisteme de protecție este evaluată doar comparând performanța lor împotriva aceleași amenințări. Eficacitatea pentru un sistem de protecție dat este numită masă efectivă, E_m, raportul densității de suprafață a unei armuri omogene laminate (RHA), un oțel obișnuit pentru o armură de tanc, care va opri o anumită amenințare, fiind dată o anumită densitate de suprafață a sistemului de protecție și care va opri aceeași amenințare.

$$E_{m(sistem\ de\ protecție)} = \frac{A_{d(RHA)}}{A_{d(sistem\ de\ protecție)}} \tag{1.2}$$

Eficacitatea masei sistemului de protecție indică cât de bun este sistemul la o anumită amenințare și, în general, sugerează dacă sistemul poate fi considerat ușor, adică cu cât E_m are valoare mai mare, cu atât este mai ușor sistemul. Una din problematicile oricărui sistem este că E_m, ca valoare, nu se translează de la o amenințare la alta, și că acest parametru se determină prin testare.

Determinarea vitezei reziduale a unui proiectil atunci când penetrează este importantă pentru o protecție civilă sau militară. Formula pentru determinarea acestei caracteristici prin sol, beton sau oțel există în literatură, dar pentru compozite, având în vedere gama foarte mare de materiale posibil de utilizat, este recomandată determinarea prin testare. O metodă de comparare a formulelor pentru diverse bariere este dată, încă din 1979, de Kar [136].

Adâncimea de penetrare a unui tip de proiectil într-un blindaj este important de determinat, dar trebuie avut în vedere că această valoare se obține pentru un anumit tip de amenințare (proiectil, viteză de impact și blindaj). Extrapolarea fără verificare prin testare este periculoasă și nu este recomandată în acest domeniu [253].

Soluțiile constructive pentru autovehicule militare includ protecția prin blindaj, alături de sisteme specifice (echipamentul de rulare, transmisie etc.) [66].

Protecția prin blindaj asigură supraviețuirea echipamentelor în condiții severe de trageri și, în măsura în care acesta face față cât mai multor amenințări, permite o autonomie îmbunătățită. Este, deci, o caracteristică importantă a vehiculelor militare.

Ideea de stratificare pentru a crește capacitatea de protecție balistică nu este nouă. În anii ’60, britanicii au folosit table stratificate din oțel pentru blindaj. Acesta consta, în al II-lea Război Mondial, sub forma blindajului Hadfield Duplex, dar a început să se folosească abia în anii ’70, odată cu adoptarea sa pentru vehiculele blindate pe roți, construite în Brazilia de firma Engesa. Blindajul cu duritate dublă este mai eficace decât blindajul omogen, de duritate mare. De exemplu, trebuie să aibă doar 9 mm. grosime pentru a face față muniției perforante de 7,62 mm, tip NATO, ceea ce îl face cu 28% mai ușor decât blindajul cu duritate mare [66].

Soluția proiectanților de blindaje a fost realizarea unui blindaj din mai multe straturi, cu materiale cu acțiune diferențiată asupra penetratorului. Alternanța caracteristicilor perturbă procesul de penetrare, atât în cazul proiectilelor cinetice, cât și în cazul proiectilelor cu jet cumulativ.

Blindajele stratificate conțin straturi cu diferite moduri de comportare la penetrare, datorate caracteristicilor fizico-mecanice diferențiate, într-o succesiune stabilită de proiectant și care să aibă un efect cât mai bun în distrugerea proiectilului. Blindajele stratificate sunt realizate în două variante constructive:

- în pachet omogen,
- în pachet neomogen.

Cel mai simplu model de perforare a țintelor monolitice de proiectile cumulative are la bază ipoteza că procesul este de natură hidrodinamică [66]. Rezultă că raportul adâncimilor de perforare a unui jet cumulativ într-un anumit material (s_m) și în oțel (s_s), este egal cu rădăcina pătrată a inversului raportului densităților (densitatea materialului fiind ρ_m iar densitatea oțelului fiind notată cu ρ_s):

$$\frac{s_m}{s_s} = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_m}} \tag{1.3}$$

Conform acestui model, dacă un anumit material are densitate mai mică decât cea a oțelului, deteriorarea țintei sau pătrunderea jetului în aceasta, va fi mai mare.

Masa unității de suprafață a blindajului se obține din produsul între densitatea materialului (stratificat sau nu) și adâncimea de penetrare [66]. Rezultă că, masa materialelor cu densitate mai mică, necesară pentru protejare față de proiectilele cumulative, este mai mică decât cea a oțelului. Astfel, teoretic, raportul densității RHA și a unui blindaj dintr-un material mai ușor, aluminiu, de exemplu, care se numește eficiență masică (sau eficiența masei blindajului), este de aproximativ 1,7. Materialele polimerice, care sunt mai puțin dense decât blindajul de aluminiu, sunt chiar mai bune. De exemplu, eficiența teoretică a masei polimetilmetacrilatului (PMMA), care are o densitate de 1180 kg/m^3, este 2,57. Superioritatea materialelor de densitate mai mică, în privința protecției balistice, a fost dovedită prin rezultate raportate în literatura open-source [87], [116]. Unele materiale polimerice sunt chiar mai bune decât ar putea sugera masa specifică teoretică, metaacrilatul de polimetril fiind unul dintre acestea, iar fibrele polimerice s-au dovedit foarte bune pentru armuri individuale.

Schema unui blindaj stratificat este prezentată în Fig. 1.13. Alte variante au, în loc de interstițiu plin cu lichid, tot un compozit. Există multe combinații ale plăcilor pentru realizarea blindajelor stratificate; dezvoltarea munițiilor antitanc a determinat ca protecția asigurată de utilizarea exclusivă a acestui tip de blindaj să nu asigure nivelul de protecție necesar.

Eficiența masică bună a blindajelor stratificate a determinat proiectarea unor soluții particulare cu 3-4 straturi, cu grosimile diferite, măsurate pe direcția probabilă de penetrare.

Fără a fi restrictivă, clasificarea acestor blindaje cuprinde următoarele grupe:

- blindaje compozite, compuse, în principal, din două straturi de oțel între care se intercalează material compozit, rezultat prin diverse tehnologii (turnare, placare, etc.),
- blindaje spațiate, cu 2 straturi, dintre care unul este realizat din oțel (grătar, panou, casetă), iar celălalt este format din aer și are grosime mult mai mare față de primul [66].

Primul blindaj compozit a fost realizat la mijlocul anilor ’50, de specialiștii americani sub denumirea de T95, și constă într-un strat de silicați, dispus între două plăci de oțel, ansamblul fiind realizat prin laminare [52].

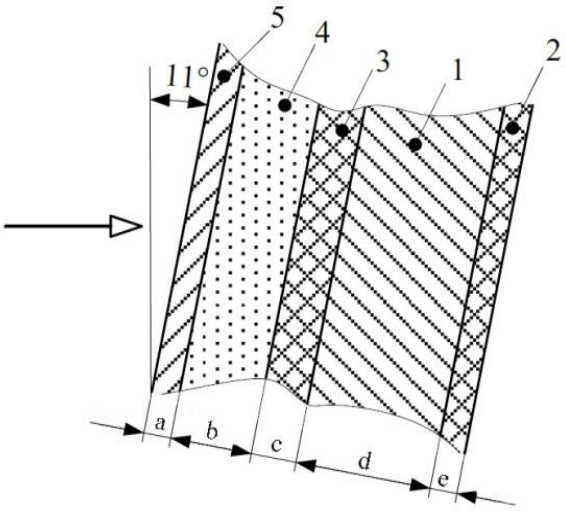


Fig. 1.13. Un exemplu de blindaj stratificat din diverse materiale: 1 - placă de bază, 2 și 3 – plăci din material compozit, 4 – interstițiu cu lichid, 5 – placă exterioară, executată din oțel dur [66]

În Uniunea Sovietică, un blindaj compozit s-a aplicat prima dată la tancul T-64, cunoscut sub denumirea Combinația K; era compus dintr-un strat de materiale polimerice, ranforsat cu fibre de sticlă, amplasat între două plăci de oțel. Modelele ulterioare au inclus și carburi de bor, mărind eficiența declarată a acestui tip de blindaj cu compozit [240].

La un tanc, blindajul compozit este utilizat pentru execuția părților frontale ale carcasei și turelei. Elementele componente ale unui astfel de blindaj sunt date în Fig. 1.14.

Un blindaj compozit, utilizat cu succes, a fost realizat în 1971, în Anglia, pentru echiparea prototipului FV 4211, sub denumirea blindaj Chobhman [259].

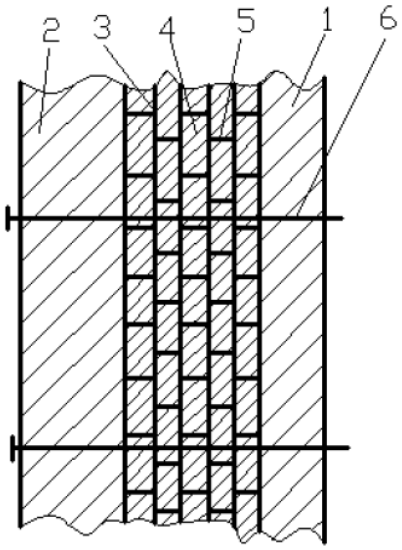


Fig. 1.14. Un exemplu de blindaj incluzând materiale compozite [66]: 1 - placă de bază din oțel de înaltă rezistență, 2 - placă exterioară din oțel, 3 – compozit cu matrice din rășină epoxidică, în care s-au adăugat plăcuțe ceramice, (4), fiecare plăcuță fiind introdusă într-o carcasă (5) polimerică sau din aluminiu, 6 – șuruburi de fixare

Tancul francez Leclerc avea un blindaj compozit, modular (soluție adoptată și la tancul japonez Type 90 și la tancurile chinezești Type 96 și Type 99).

Blindajul compozit are următoarele avantaje:

- rezistență bună la impact și vibrații;
- capacitate bună de amortizare a vibrațiilor și trepidațiilor;
- consum de energie relativ mic pentru tehnologie de serie mică sau mare;
- rezistență foarte bună la acțiunea agenților corozivi, dacă și componentele o au (rășina și fibrele);
- rezistență bună la temperaturi ridicate;
- mase specifice de 2 – 3 ori mai mici comparativ cu ale oțelului.

Blindajele compozite combină efectul de deviere a proiectilului la pătrunderea prin medii cu densități diferite, cu cel indus de materialele ceramice foarte dure și o rezistență bună la temperaturi înalte. Au o comportare bună la lovituri cumulative, dar și la proiectile subcalibru, miezul acestora putând fi spart sau fragmentat în contact cu ceramica dură. Este folosit ca blindaj de bază al părții frontale (Fig. 1.15). Între plăcile de blindaj omogen 1 și 2 sunt dispuse casetele 4 care incorporează elementele metalo-ceramice 5. Partea interioară a blindajului este căptușită cu material capabil să absoarbă schijele, notat cu 6.

Datorită durității ridicate a componentelor ceramice, acest blindaj compozit are o rezistență îmbunătățită la proiectile cu jet cumulativ, duritatea plăcilor de ceramică determinând spargerea și fragmentarea proiectilelor cinetice. Aceste mecanisme de deviere și anihilare a proiectilelor sunt prea puțin influențate de înclinarea acestor plăci și, renunțându-se la soluțiile cu componente înclinate, masa se reduce.

Blindajele cu compozite sunt folosite și la autovehicule de transportat personal sau echipamente, fiind de cele mai multe ori introduse în caroseria autovehicolului, între suprafețele metalice.

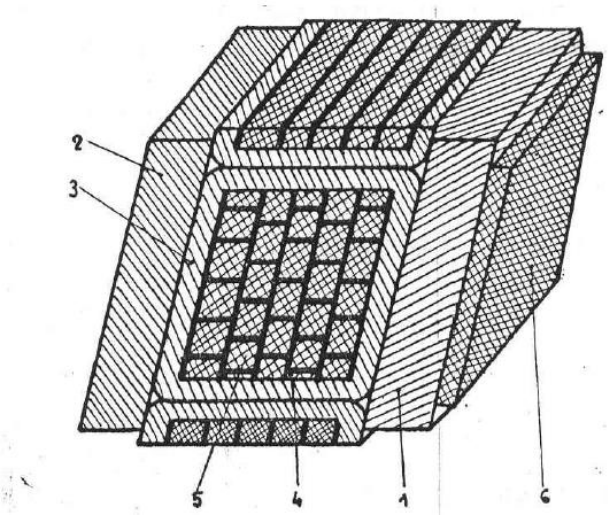


Fig. 1.15. Blindajul compozit utilizat la tancul Leopard 2 [66]

În Fig. 1.16. este prezentată o mașină blindată de intervenție în mediul urban, care are o parte din caroserie executată din compozit pe bază de fibre de sticlă.

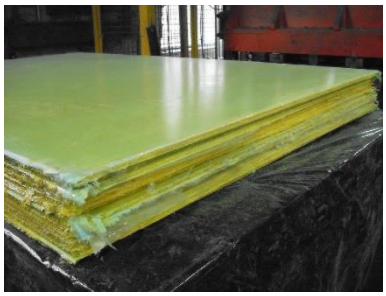


Fig. 1.16. Mașină blindată de intervenție în mediul urban [298]

Firma Protectolite Composites [255] produce plăci (foi) de protecție balistică din fibre de sticlă, obținute prin comprimare în matriță, cu precizie ridicată și repetabilitate, fiind deja utilizate pentru securizarea și supraviețuirea vehiculelor militare din teatre de operațiuni ca Bosnia, Somalia, Afganistan, Iraq și Orientul Mijlociu. Sunt fabricate în dimensiuni de la 600 mm x 600 mm până la 1525 mm x 4000 mm. Plăcile laminate pot fi executate din țesături aramidice, de carbon, dar și din fibră de sticle tip E sau S, utilizând ca matrice sau aderent rășini termorigide (vinilesterice, fenolice sau epoxidice) și folii sau rășini termoplastice.



a) vehicul blindat



b) componenta din compozit a blindajului



c) componente blindate cu panouri cu fibre de sticlă pentru vehicule militare

Fig. 1.17. Produse ale firmei Protectolite Composites [255], [270]

Panourile produse pot fi utilizate pentru vehicule militare, vehicule securizate și clădiri, vehicule pentru securitatea personalului, mașini blindate pentru transport de valori, blindaje

compozite cu alte destinații [25], și platforme aerospațiale sau aplicații de pe acestea (carcase pentru camere sau aparate de măsură). Plăcile oferă și o protecție pentru amenințări severe pentru jeep-uri, camioane militare de aprovizionare. Sunt utilizate și pentru echipamente ale poliției și soluții arhitecturale care necesită grad mare de protecție, inclusiv în justiție (Fig. 1.17).

1.4. Problematici ale testării și evaluării sistemelor de protecție cu fibre de sticlă

Densitățile unor ceramice, cum ar fi B_4C (2,52 g/cm^3) și SiC (3,29 g/cm^3), sunt mai mici decât pentru Al_2O_3 (3,98 g/cm^3), dar, datorită capacității de sinterizare ușoară și costurilor mici pentru pulberile primare, alumina este încă preferată pentru protejarea vehiculelor la care se poate tolera masa suplimentară, în timp ce ceramicele ușoare sunt acum utilizate în armura individuală [248].

Când un proiectil lovește un singur fir sau o singură fibră se formează și se propagă unde longitudinale și transversale, inițiate în punctul de contact [217], [218]. Cea mai mare parte a energiei cinetice se transferă de la proiectil la firele principale (cele care vin în contact direct cu proiectilul); firele perpendiculare care intersectează firele principale, absorb mai puțină energie [1], [24], [82]. Deformația transversală crește continuu până când atinge limita de deformație a fibrelor și provoacă deteriorarea țesăturii. Compozitele pe bază de fibre de sticlă au mecanisme specifice de distrugere, care pot fi investigate prin simulare [19], [101] și prin investigații după testare: ruperea legăturilor din fibră și ruperea fibrelor din fir, tragerea firului, distanțarea firelor în zona de impact, efecte de margine sau de muchie (gaura de pătrundere a proiectilului mai mică decât dimensiunea proiectilului), fibrilare și ruperea fibrei pe lungime, și efecte de frecare între proiectil și țesătură, rășină, fibră și fire (Fig. 1.18).

În figura 1.19, panoul făcut din fibre de sticlă și rășină epoxidică a oprit glonțul, raportul fibrelor pe înălțimea secțiunii prin placă fiind de aproximativ 70%, dar parametrii de fabricație a panoului sunt destul de severi [76].

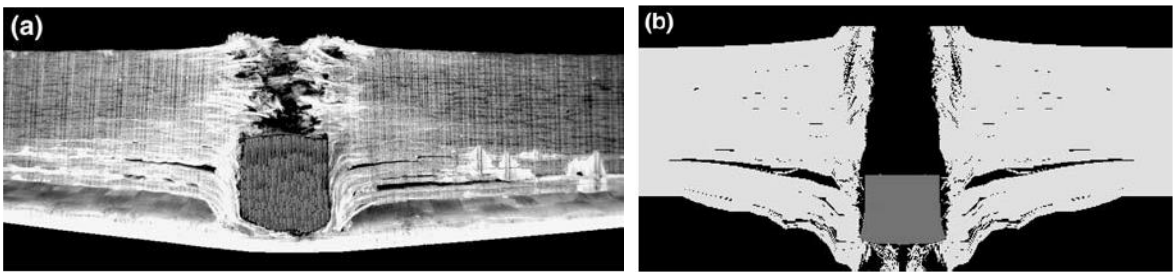


Fig. 1.18. Rezultate experimentale (a) și ale simulării (b) pentru un proiectil de calibrul 0.50 FSP cu 25,4 mm, pentru o placă realizată din fibre de sticlă tip E, în matrice epoxidică de polivinil ester. Viteza inițială a proiectilului a fost de 605 m/s [101]



Fig. 1.19. Compozit cu fibră de sticlă și rășină, de grosime 13 mm,
după impact cu proiectil de 9 mm FMJ, la viteza de 420 m/s [76]

Ansari și colaboratorii au prezentat o analiză experimentală și numerică a comportării la perforare a compozitelor laminate, ranforsate cu fibră de sticlă unidirecționale, după impact cu un proiectil cu suprafață plană de impact de, 52 g. Influența impactului oblic asupra performanței balistice a tinței laminate a fost studiată pentru unghiuri de impact de 0°, 30°, 45° și 60°, pentru viteze de impact între 50-500 m/s. Testele de impact asupra țintei cu fibre orientate (0°/90°/90°/0°), s-au realizat cu ajutorul unei puști pneumatice. În general, delaminarea este principala deteriorare din placa lovită de proiectilul cilindric, atunci când lovește normal pe țintă, mărimea acestei deteriorări scăzând pe măsură ce unghiul de impact crește [11].

O altă cercetare a acestor autori a remarcat că, pentru diferite plăci de tip sandwich, făcute din fibră de sticlă și Kevlar/laminat epoxidic, compozitul cu fibră de sticlă între straturi de Kevlar în rășină oferă cea mai bună rezistență la penetrare, chiar mai bună decât cea oferită de o placă executată numai din straturi de Kevlar și rășină epoxidică, pentru toate vitezele de impact. Absorbția energiei în compozitul sandwich KGK (Kevlar + fibră de sticlă + Kevlar) a fost mai mare decât celelalte două combinații GKK și KKG și chiar mai mare în cazul plăcilor din Kevlar în rășină epoxidică de aceeași grosime, la toate vitezele de impact. Diferența în energia absorbită de plăcile compozite KGK și KKG este de 20,64 J, respectiv 138,33 J pentru viteza de impact de 100 m/s, și 500 m/s, arătând că placa KGK este mai bună decât cea din Kevlar în ceea ce privește energia absorbită [11].

Tabelul 1.2 prezintă câteva lucrări experimentale pentru a evidenția diversitatea țesăturilor de fibră de sticlă și a matricelor, dar și diversitatea proiectilelor (formă, masă, viteză, materiale componente).

Schoßig și alții [211] au raportat rezultate pentru compozite cu fibre de sticlă și polipropilenă (PP) și polibuten-1 (PB-1), pentru intervalul de viteze de deformare de 0,007 s^{-1} și 174 s^{-1}, și pentru procent masic de fibre în compozit de 0% până la 40% wt. Comportarea

materialului, dependentă de viteza de deformare, este descrisă de modelul G'Sell–Jonas [21], [168]. S-a arătat că apare o tranziție de la comportarea izotermă la cea adiabatică, fiind necesare două regresii parametrice pentru a descrie mai realist comportarea unui singur material. O creștere a rezistenței la rupere la tracțiune s-a evidențiat pentru materialele PP și PB-1, cu creșterea vitezei de deformare. În literatură, acest comportament se consideră o dependență pozitivă de viteza de deformare.

Tabelul 1.2. Plăci pentru protecție balistică pe bază de fibre de sticlă

Autorii	**Placa / panoul / materialul de ranforsare / rășina**	**Parametrii testului**
Hebert și alții [110]	Sticlă tip E: E_3LTi 10800, E_2LTi 7200, E_2LTi3600 rășină vinil esterică și uretan	intervalul de testare 3,08–7,53 MPa vârful de tensiune
Sabet și alții [204]	Țesătură de fibra de sticlă tip E - fibra de sticlă tocată și presată 400 g/m^2, - țesătură 1/1, 400 g/m^2, - satin, 300 g/m^2, - unidirecțional 300 g/m^2, - bi-axial [0°, 90°].	80...160 m/s 3 și 6 mm grosime armă cu gaz, cu țeavă netedă placă 15 cm x 15 cm **proiectil**: ascuțit (30° cap conic, lungime totală 30 mm, lungime cartuș 15 mm, masă 9,74 g)
Ansari [11]	Fibre de sticlă unidirecționale placa 140 mm × 140 mm × 3,3 mm și (0°/90°/90°/0°), aplicarea rășinii - manuală	52 g proiectil plat cu diametrul de 19 mm placă fixată pe margine 150-300 m/s
Armenakas [13]	Plăci din fibre de sticlă 316 S cu rășină epoxidică 0,177 m lungime, diametrul 123 μm; matrice epoxidică obținută prin amestecare 10 g de Epon 828, 10 g de Epon 871 și 2,6 g de agent de reticulare D.	viteze de deformare mari (30,000 in/in/min) și viteze de deformare mici (0,0265 in./in./min până la 26,5 in/in/min) Funcția tensiune - deformație este liniară până la rupere.
Esfahani și alții [86]	Compozite din fibre de sticlă țesute (plain, 400 g/m^2), cu rășină poliesterică nesaturată, cu 1,5% wt și 3% wt argilă, obținute prin pensulare. Eșantioane cu 4, 8 și 12 straturi, cu grosimi între 2,1 mm până la 6,4 mm, eșantioane de 150 × 150 mm^2, fixate pe toate muchiile. Fracția masică de fibre a fost de 0,62 –0,64.	90–220 m/s, proiectil semi-sferic din oțel dur de 8,7 mm în diametru și masa de 11,54 g Media celor mai mari viteze de testare care au cauzat perforarea, dar au reținut proiectilul, a fost considerată limită balistică V_{50} (conform standardului MIL-STD-662F). evidențierea delaminării și alte mecanisme de distrugere
Barcikowski [17]	Compozite produse prin transfer de rășină în matriță, cu și fără vid. Rășină poliesterică nesaturată Polimal 1094 AWTP-1 (Polonia). sticlă tip E: Vetrotex M113 350-130 1B tip vată, cu 350 g/m^2, - țesătură unidirecțională Vetrotex Unifilo-series U750 450-138 cu 450 g/m^2, - semifabricat țesut Vetrotex 7533 plain (1x1), cu 200 g/m^2.	Testare cu armă pneumatică, cu proiectile sferice de 3 g, cu viteze de 60…70 m/s, energia cinetică variind între 5,4 și 7,35 J. La densitate de suprafață apropiată, straturi mai ușoare, dar mai multe, par să fie mai avantajoase față de straturi mai groase și cu arhitectură mai puțin strânsă.

Rebouillat și alții [200] au comparat trei materiale de ranforsare (fire de oțel, fibre de sticlă și fibre aramidice), analizând rezultatele unui test de tăiere pe compozite. Compozitele manifestă un aspect sinergic comparativ cu componentele, aspect care este util în aplicații de

protecție la impact. Unele cercetări au fost făcute pe materiale hibride, utilizând ranforsări cu două sau mai multe componente fibroase. Arhitectura dispunerii ranforsărilor este importantă, dar încercările s-au diversificat (standardizate sau nu) pentru a reproduce cât mai plauzibil solicitarea reală pentru care este folosit materialul format. Combinațiile de materiale fibroase pot da naștere unor soluții bune pentru protecția la impact. De exemplu, caracterul casant al fibrelor de sticlă este restrictiv pentru rezistența la tăiere, dar are o rezistență abrazivă destul de bună. O fibră de sticlă mai elastică, obținută tehnologic sau o țesătură mai flexibilă, obținută prin arhitectura firelor și tehnologia obținerii semifabricatului pot fi soluții de îmbunătățire a răspunsului materialelor pe bază de fibre de sticlă.

Cadieu și alții [48] au realizat un studiu cu scopul de a modela matematic răspunsul compozitelor termoplastice dacă sunt testate la viteze diferite de identare. Influența vitezei de deformare s-a observat la scară macro. Cu cât a crescut viteza de deformare, cu atât modulul de elasticitate la tracțiune, limita de rupere au fost mai mari, iar deformația la rupere mai mică. S-au realizat două tipuri de teste pentru evidențierea comportării la viteze mici de deformare (încercare cvasi-statică de 10^{-5}–10^{-3} m/s și energie mică de impact, generată de o viteză de 2,5 m/s). Cu cât viteza de încărcare a fost mai mare, cu atât rigiditatea K și maximul solicitării au fost mai mari iar adâncimea de penetrare δ_{max}, mai mică. Mecanismele de deteriorare au fost investigate cu imagini SEM. Indiferent de viteza de solicitare, s-au observat deteriorări coomune, predominând delaminarea, fragmentarea matricei și ruperea fibrelor. Micro-fisuri au fost observate la scara eșantionului, proces care s-a dovedit dependent de viteza de solicitare. Pentru matrice din rășini acrilice (amorfe), cu cât energia de impact este mai mare, cu atât fisurile se propagă mai repede și pe distanțe mai mari. Mecanismele de deteriorare s-au dovedit influențate și de adâncimea de penetrare.

Se pot formula următoarele concluzii:

– viteza de solicitare are o influență semnificativă asupra unor parametri macroscopici (F_{max}, K, δ_{max}) care pot caracteriza comportamentul epruvetei.

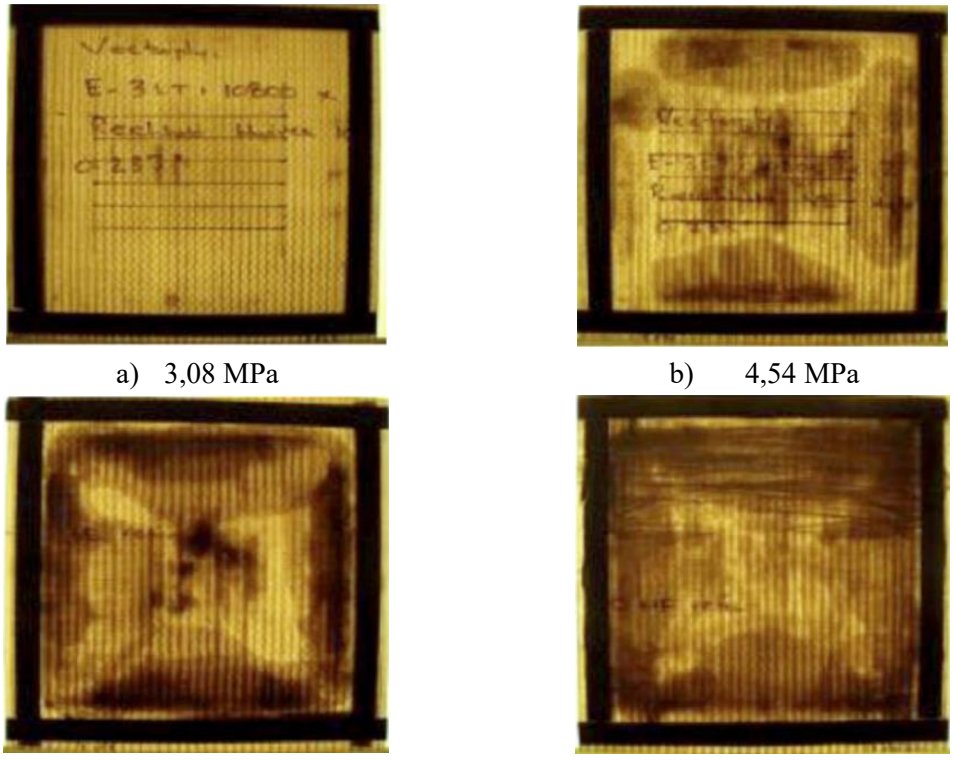
– evoluția deteriorării poate fi diferită, în funcție de viteza de solicitare, forma indentorului și masa lui [157].

În prezent, materialele metalice sunt înlocuite cu compozite cu diverse soluții constructive, datorită rezistenței specifice (rezistență pe unitate de masă) mai mare și sunt extensiv utilizate în aviație, industria navală și pentru echipamente militare. Aceste sisteme sunt supuse la viteze de deformații mari din cauza impactului cu obiecte, cum ar fi proiectile, păsări [193] sau fragmente de proiectil. Pentru a face o proiectare robustă este important să se înțeleagă dependența proprietăților mecanice de viteza de deformare a materialelor compozite.

Yuan și alții [239] au prezentat rezultatele experimentelor la impact pentru studiul rezistenței la exfoliere și delaminare ale unor compozite pe bază de fibre de sticlă și rășină epoxidică. Au fost investigate două arhitecturi: țesături din fibre de sticlă S2, în rășină poliesterică Cycom 4102 și o țesătură tip satin, din fibre de sticlă tip E, în matrice epoxidică Ciba LY564. Probele au fost impactate folosind un tun cu gaz de 82,5 mm. Rezistența la delaminare a plăcilor a fost dată ca o funcție de componenta normală a tensiunilor de impact și de deformare, aplicată prin supunerea probelor la un impact de compresiune și la un șoc de compresiune, combinat cu forfecare. Rezistențele la exfoliere ale celor două compozite s-au

micșorat cu creșterea nivelului de impact de compresiune, suprapunerea solicitării de forfecare peste compresiune, s-a dovedit a fi în detrimentul rezistenței la delaminare. Compozitul cu fibre de sticlă tip E a avut o rezistență mai mare la exfoliere sub impact normal de compresiune și la impactul combinat, de compresiune și forfecare, comparativ cu compozitul cu fibră de sticle de tipul S2.

Herbert și alții [110] au evaluat răspunsul unor panouri executate din fibre de sticlă de tip E în matrice de vinilester și poliuretan pentru două tipuri de impact: sarcină tip șoc și lovire de la înălțime. Undele de șoc au fost create folosind un tub cu un interval de testare a presiunii incidente de 3,08–7,53 MPa (Fig. 1.20).



a) 3,08 MPa b) 4,54 MPa

c) 5,72 MPa d) 7,12 MPa

Fig. 1.20. Delaminarea panourilor – 2 x 108 vinilester, 2 straturi de țesătură de fibră de sticlă, fiecare strat având 4 substraturi, orientate (0°/90°/0°/90°), grosime de 5,59 mm [110]

Performanța la impact în testul cu cădere liberă a unei greutăți, s-a măsurat prin energia absorbită de probe, adâncimea penetrării și studiul deteriorărilor interne și externe ale plăcilor. Țesăturile din fibre de sticlă au avut o masă specifică de 4,88 kg/m^2, respectiv 7,32 kg/m^2, și au fost infuzate cu una din cele trei tipuri de rășini ester-vinilice și o rășină uretanică. Panourile cu rășină uretanică au avut masa specifică de 7,32 kg/m^2 și s-au comportat mai bine decât panourile realizate cu rășini polivinilesterice. S-a constatat că, din cele 2 materiale cu aceleași rășini polivinilesterice, având masa specifică de 4,88 kg/m^2, panoul cu o structură mai fină a fibrei de sticlă s-a comportat mai bine, atât la unda de șoc, cât și la testul cu cădere liberă a unei greutăți.

Sabet și alții [204] au investigat compozite pe bază de fibre de sticlă ranforsate cu rășină poliesterică la o viteză de impact de 80...160 m/s. S-au folosit cinci tipuri de fibre de sticlă de tipul E, incluzând fibre scurte presate, țesătură 1/1, țesătură satin, țesătură unidirecțională și

țesătură bidirecțională (0°, 90°). Proiectilul folosit a fost un corp cu cap conic cu vârful ascuțit la 30°, cu lungimea totală de 30 mm și a corpului de 15 mm, cu greutatea de 9,74 g. Plăcile de compozit (150 mm x 150 mm) au fost realizate cu 3 mm și 6 mm grosime. Rezultatele (Fig. 1.21) au arătat o limită a vitezei balistice mai mare pentru plăcile de 3 mm cu fibră de sticlă tocată, urmată de țesătură bidirecțională, țesătură satin, țesătură 1/1.

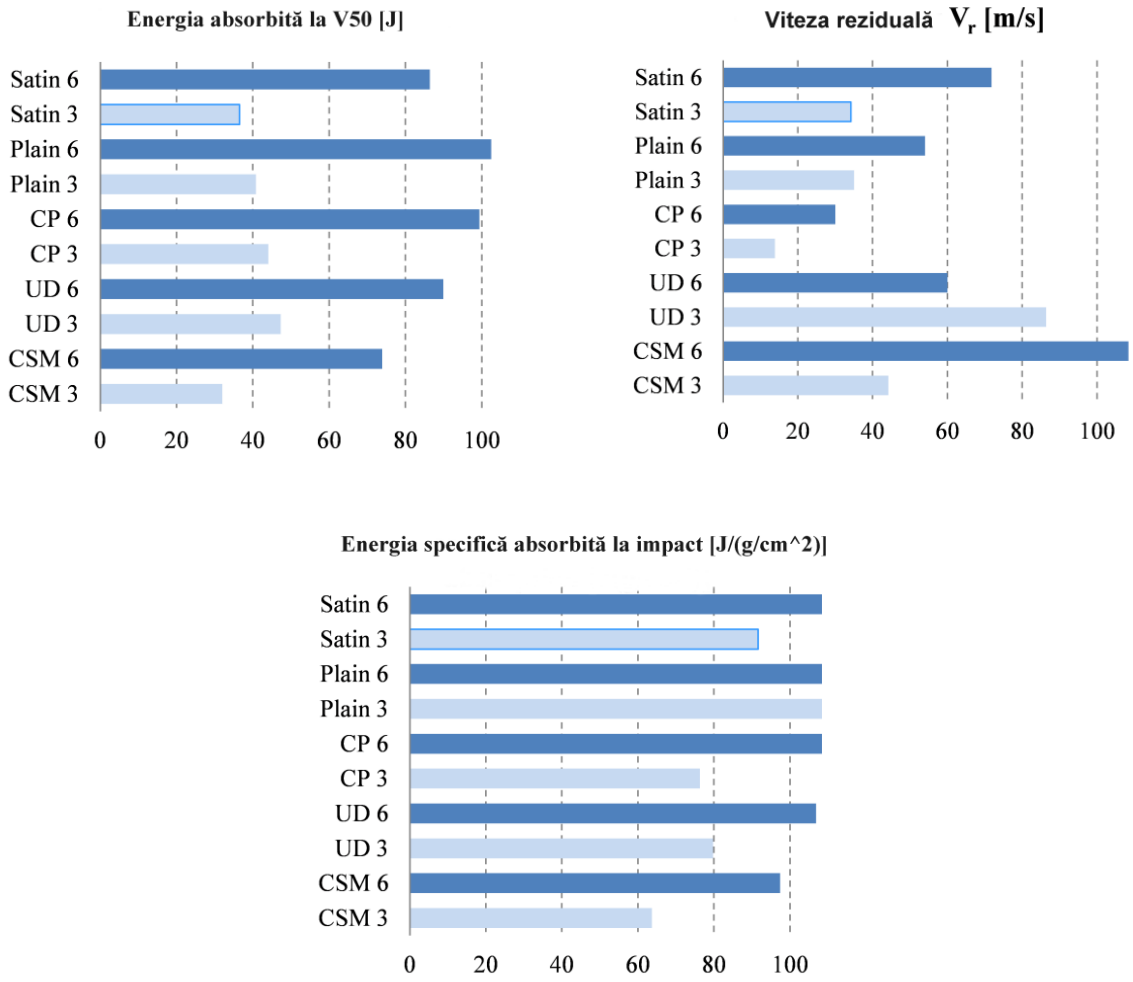
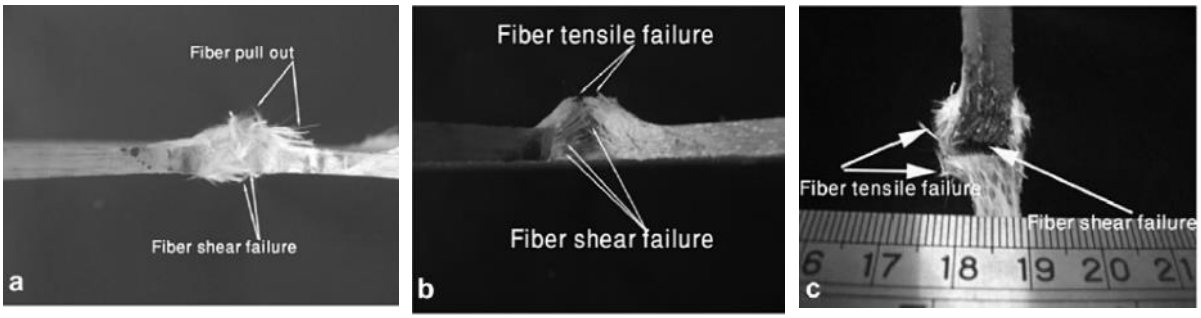


Fig. 1.21. Caracteristici ale unor panouri obținute cu diferite fibre de sticlă și cu aceeași matrice: CSM - fibră de sticlă tocată și presată, orientată aleator, cu 400 g/m^2, UD - țesătură unidirecțională cu 300 g/m^2, CP - țesătură bidirecțională (0°, 90°), – țesătură plană 1/1, de 400 g/m^2, Satin - țesătură satin cu 300 g/m^2, 3 mm grosime, 6 mm grosime [204]

Plăcile cu țesătură satin și cele cu țesătură bidirecțională au fost aproape la același nivel. Epruvetele mai groase (6 mm), cu țesătură 1/1 au arătat performanțe balistice mai bune, urmate de cele cu țesătură bidirecțională, țesătură satin, cele unidirecționale și plăcile făcute din fibre de sticlă, tocate și presate. Modurile dominante de distrugere au fost: întinderea firului, ruperea firului la forfecare pentru plăcile mai subțiri și delaminare severă pentru plăcile mai groase. Plăcile cu țesătură 1/1 și țesătură bidirecțională au avut o limită de viteză balistică mai mare comparativ cu celelalte tipuri de ranforsări. Absorbția de energie asociată cu țesătură 1/1 și

țesătura bidirecțională a avut valori mai mari (Fig. 1.21). Aria totală de deteriorare a probelor a crescut spre partea de ieșire a proiectilului sub forma unui con, unele probe arătând o fragmentare tip 4 petale, împreună cu delaminare severă (Fig. 1.22).

Diferențele între datele de simulare și datele experimentale pot fi explicate calitativ de disiparea energiei prin frecarea între straturi, așa cum este evidențiat și în lucrarea [121].



a) fibre de sticlă tocate și presate (CSM) b) țesătură satin c) țesătură 1/1

Fig. 1.22. Secțiune prin epruveta de 3 mm grosime, la impact cu viteză de 95 m/s [204]

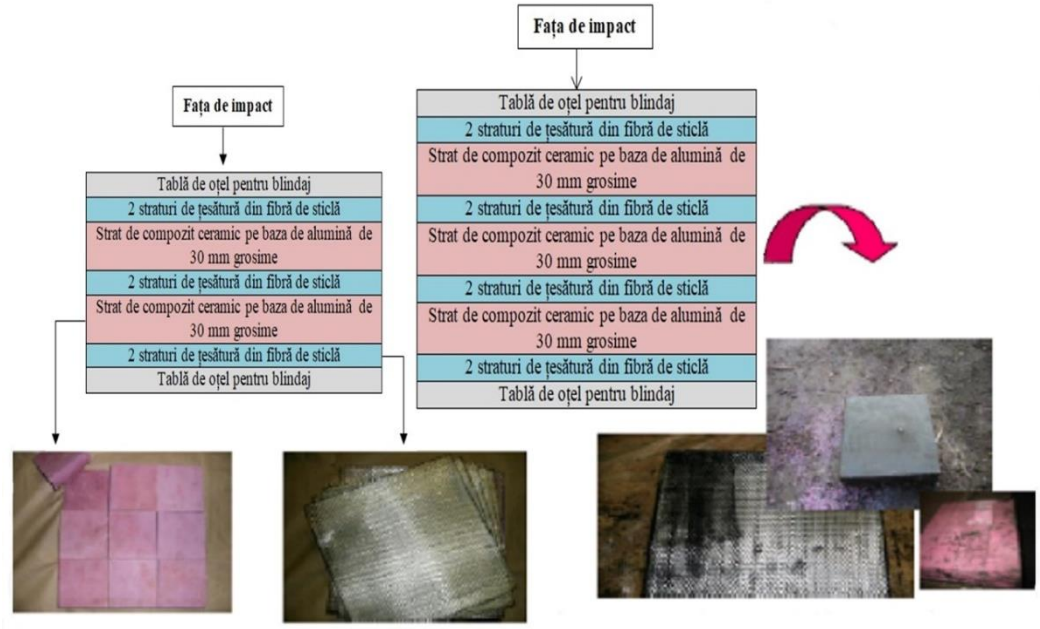


Fig. 1.23. Blindaj ProtectComb [257]

Shukla și alții [215] au testat panouri de protecție pentru autovehicule, realizate din compozite cu țesături 2D și 3D. Panourile de protecție cu țesătură 3D la partea posterioară au avut o eficiență balistică mai bună decât panourile cu țesătură 2D, poziționată la fel, având o delaminare controlată și penetrări complete mai puține. Totuși, studiind penetrarea completă, s-a evaluat că proiectilul a fost capabil să treacă prin partea posterioară a blindajului prin sfâșierea directă a firelor ondulate, fără să absoarbă energie din delaminare. Majoritatea delaminărilor în compozitele 3D a fost pe întreaga arie a panoului. Din cauza naturii neondulate a fibrelor de urzeală și bătătură, laminele individuale acționează ca o rețea țesută care opresc

penetrarea, permițând energiei cinetice să fie absorbită în principal prin delaminarea între straturi. Delaminarea severă (cu deschidere mare) a panourilor din compozite 3D s-a redus cu creșterea densității specifice, cea mai mică delaminare fiind observată la panourile cu 2,77 kg/3D și cele cu 5,38 kg/3D, utilizate ca acoperiri posterioare.

În România, deși se lucrează la soluții autohtone de blindaje, ultima apariție semnificativă a fost studiul de blindaj compozit ProtectComb (Fig. 1.23), în 2010 [257]. Acest blindaj conținea, alternativ, straturi de fibre de sticlă și compozit ceramic de alumină în sandviș de plăci de aluminiu, înlocuit în urma evaluărilor balistice cu plăci de oțel.

1.5. Concluzii privind utilizarea fibrelor de sticlă pentru protecție balistică

Un sistem de protecție ia în considerare amenințări tipice (balistice și/sau de explozie) și filosofia de proiectare pentru aplicații cheie ale sistemelor de protecție este particularizată pentru:

- protecția personalului (armură și cască);
- sisteme de protecție pentru vehicule;
- sisteme de protecție a obiectivelor imobile;
- sisteme de protecție transparente.

Pentru fiecare din aceste grupe de aplicații, trebuie utilizate constrângeri specifice de proiectare, limitând soluțiile fiabile și minimalizând riscul.

În dezvoltarea și testarea soluțiilor proiectate, se ia în considerare noutățile din domeniul materialelor de protecție, dar și eventualele zone încă neexplorate astfel încât să se prioritizeze pentru testare tipurile de materiale și sisteme de protecție mai performante.

Provocările în acest domeniu de cercetare a materialelor de protecție includ:

- mecanisme de penetrare în aliaje metalice, ceramice și materiale polimerice;
- mecanisme de cedare în materiale celulare, sandwich (stratificate) din cauza impactului;
- capabilitățile actuale de modelare și simulare pentru materiale și sisteme de protecție, la diferite scări, de la nivel micro, la nivel macro, inclusiv o discuție despre soft-urile posibil de utilizat.
- metode experimentale și definirea timpului de monitorizare, evaluarea comportării materialului la viteze de deformare relevante și investigații ale proceselor dinamice de cedare la impact,
- materiale ceramice pentru protecție, amorfe sau cristaline, pulberi ceramice, procesare și fabricare,
- fibre, inclusiv efectul diametrului fibrei asupra rezistenței fibrelor, firelor și sistemelor cu fire, microstructura care favorizează apropierea de tensiunea maximă teoretică și necesitatea testelor la viteze mari de deformare și la presiuni mari.
- țesături balistice, inclusiv testare, studiul mecanismelor de cedare, interacțiunea dintre fibre, fire și matrice pe durata impactului,
- compozite cu matrice metalică, inclusiv aliaje ușoare pe bază de magneziu,

– fabricarea și asamblarea sistemelor de protecție, cu accent pe adezivi, incluzând considerații în selectarea stratului intermediar de adeziv și testarea, modelarea și simularea comportării adezivilor și a sistemelor de protecție în care sunt incluse.

Chiar dacă compozitele pe bază de fibre de sticlă sunt concurate de cele cu fibre polimerice, de alte fibre metalice sau ceramice, acestea rămân încă de interes în aplicațiile balistice, fie ca parte a unui blindaj, fie ca întreg sistem de protecție, deoarece ele au o rezistență la impact bună la prețuri rezonabile. Cercetările vor fi efectuate în scopul creșterii raportului de fibre din compozit, dar și pentru stabilirea unei matrici adecvate aplicației.

Această documentare a fost utilă pentru organizarea unei cercetări pe panouri balistice realizate cu țesături de fibre de sticlă și pentru studierea mecanismelor de cedare.

1.6. Direcții de cercetare pentru acest studiu

Solicitarea la impact a compozitelor este și va fi o provocare pentru cercetători, având în vedere utilizarea tot mai intensă a acestor materiale și varietatea foarte mare de combinații care se pot obține pe baza matricelor și componentelor de ranforsare deja existente. Provocarea constă în realizarea unui compozit pentru protecție, astfel încât performanța balistică, structura și tehnologia de obținere să fie competitive pe o piață care include produse de înaltă complexitate, pe baza combinației unor materiale și tehnologii, unele considerate „clasice”, altele de ultimă oră.

Compozitele se caracterizează prin flexibilitate în proiectare, de la scara micro (fibrele sau alte materiale de ranforsare), la scară mezo, (tipuri de arhitecturi pentru fibre și fire), până la scară macro prin structura complexă, stratificată sau structurată în spațiu. Și metodele de obținere sunt variate, fără a implica temperaturi înalte (care presupun echipamente foarte scumpe). De aceea cercetarea este importantă pentru înțelegerea comportării acestor materiale de protecție și a factorilor care influențează performanțele lor într-un domeniu atât de sever din punct de vedere al siguranței și supraviețuirii.

Obiectivul acestui studiu este proiectarea unui compozit pe bază de țesături unidirecționale de fibre de sticlă, pentru un blindaj de nivel FB2 sau mai mare, pentru autovehicule. Studiul va include o documentare, o propunere de tehnologie de laborator la scară de laborator a compozitelor, simulări și teste experimentale, investigații ale mecanismelor de cedare/distrugere.

Capitolul 2. Organizarea studiului de cercetare

2.1. Importanţa temei și obiective principale

Beat Kneubuehl scria, în 2003, că "protecţia este o armă", în sensul că echipamentul de protecție participă la menținerea capacității de luptă sau de acțiune, la reducerea riscului de pierderi în rândul personalului și de distrugere a tehnicii de luptă sau de intervenție [144]. Cele două tipuri de arme, cele de atac şi cele defensive, sunt într-o continuă spirală a performanţelor, acest lucru fiind uşor de observat atât în cazul protecţiei individuale, cât și în cazul protecției echipamentelor deplasabile sau nu.

Obiectivele acestui studiu de cercetare sunt:

- analiza unei documentații de ultimă oră asupra panourilor de protecție balistică, realizate din compozite cu ranforsări de fibre, comentându-se atât rezultate teoretice, cât și experimentale; această documentație a stat la baza formulării unor direcții de cercetare pentru evaluarea comportării la impact balistic a panourilor realizate de autor;
- proiectarea unei tehnologii la scară de laborator, pentru obținerea de panouri de protecție balistică din diferite țesături cu fibre de sticlă;
- realizarea de panouri de protecție balistică pe bază de țesături multiaxiale din fibre de sticlă și rășină epoxidică, selectate pe baza documentației făcute;
- modelarea și simularea impactului proiectil-panou de protecție balistică, la nivel macro (panou din straturi cu caracteristici mecanice echivalente, preluate din literatura de specialitate), având ca scop limitarea numărului de încercări, deoarece acestea sunt relativ scumpe;
- realizarea unei metode de încercare în laborator specializat, din care să rezulte un studiu util în evidențierea răspunsului la impact balistic a panourilor realizate;
- testarea panourilor realizate şi evaluarea rezistenţei comportării la impact pentru proiectil de 9 mm FMJ;
- investigaţii ale mecanismelor de cedare a panourilor, utilizând fotografii macro, imagini SEM și analize EDX;
- recomandări privind încadrarea panourilor în nivele de protecție, conform normelor europene.

2.2. Organizarea tezei

Capitolul 1 este rezultatul unei documentări analitice asupra fibrelor de sticlă, țesăturilor și materialelor implicate în obținerea de blindaje compozite. Sunt prezentate rezultate ale unor cercetători cu același domeniu de activitate, și din care a rezultat că, cercetările, pot fi continuate în sensul îmbunătățirii performanțelor unor astfel de componente.

Capitolul 3 prezintă aspecte teoretice și modelul realizat pentru simularea comportării pachetelor pe bază de straturi la impact cu glonț. Sunt discutate rezultatele obținute prin simulare. Pe baza rezultatelor din simulări și a celor din laborator, s-au rulat simulări la viteze mai mari pentru a sta la baza unei eventuale creșteri a nivelului de protecție pentru variante similare ale panourilor de protecție.

Capitolul 4 prezintă tehnologia de obținere a panourilor la scară de laborator, după ce se face o trecere în revistă a altor metode de obținere a unor panouri similare sau diferite, cu aceeași destinație.

Capitolul 5 prezintă metodologia de testare, rezultatele obţinute prin evaluarea statistică a valorilor paramaterilor analizați. Se discută influența numărului de straturi asupra rezistenței la impact balistic de nivel FB2. Un subcapitol este destinat descrierii și interpretării mecanismelor de cedare a țintei, cu ajutorul fotografiilor macro, imaginilor SEM și a analizei EDX.

Capitolul 6 prezintă concluziile studiului de cercetare și contribuţiile personale ale autorului, precum şi direcţii de cercetare inițiate prin această lucrare.

Diseminarea rezultatelor. În perioada în care a urmat studiile Școlii Doctorale de la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, autorul a elaborat, împreună cu coordonatorul tezei și colegi implicați în realizarea modelului și a campaniei experimentale, 16 lucrări, unele cu tematică strict legată de teză, altele cu subiecte legate de comportarea la impact, modelarea impactului, câteva fiind indexate WOS (Web of Science), 11 fiind în reviste BDI. Autorul a prezentat lucrări ştiinţifice la conferinţe internaţionale (SerbiaTrib 2018, RoTrib 2019 Cluj, ROMAT 2020 București, Conferințele Școlilor Doctorale ale Universității „Dunărea de Jos” din Galați, din anii 2019, 2020 și 2021). Autorul a lucrat la redactarea unui îndrumar de proiectare ”Proiectarea reductoarelor cu roți dințate”, publicat în 2021.

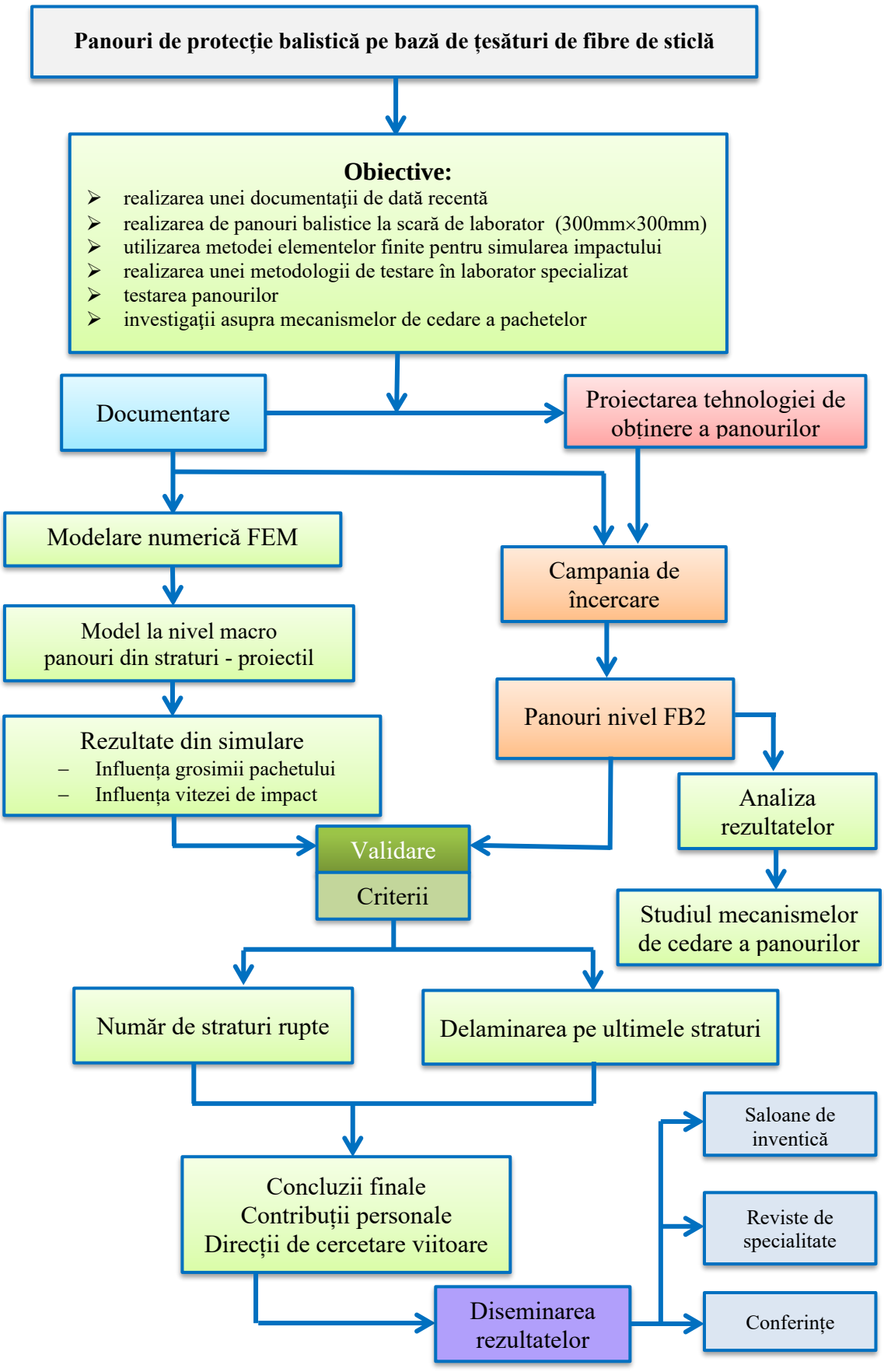


Fig. 2.1. Diagrama studiului de cercetare

Capitolul 3. Modelarea impactului proiectil – panou stratificat la nivel macro

3.1. Introducere

Materialele, mai ales cele folosite în domeniul balistic, au un răspuns complex la sarcina dinamică și se cer modelate următoarele procese: răspunsul neliniar la solicitare, întărirea sau durificarea pe durata solicitării și în funcție de viteza de deformare, înmuierea termică, compactarea (pentru materiale poroase), răspunsul ortotropic (pentru compozite, în special cele cu fibre lungi), deteriorarea prin strivire (în cazul ceramicilor, sticlelor, betonului), procese care implică energie chimică (în cazul exploziilor), distrugerea la tracțiune, modificări de faze (trecerea de la solid-lichid-gaz și invers). Modelarea acestor procese caracteristice impactului cuprinde trei componente: ecuația de stare, modelul rezistenței materialului și modelul de distrugere (de cedare) [1], [12], [20], [54], [84], [201], [227], [246], [252].

O ecuație de stare descrie răspunsul materialului la o solicitare dinamică. Acesta este răspunsul principal al solidelor la viteze de deformare mari, când presiunea exercitată pe solid este mult mai mare decât limita de curgere a materialului.

Inițial, materialelor solide li se alocă un răspuns elastic, dar în cazul solicitărilor dinamice mari, materialele pot atinge tensiuni care depășesc limita lor de curgere, deci, se deformează plastic. Au fost introduse legi constitutive ale materialelor care descriu acest răspuns neliniar, elasto-plastic [80], [114], [151], [164].

Modelul de distrugere sau de cedare a unui material este necesar în cazul în care solidele cedează (se rup, se sparg, se deformează excesiv) în condiții de solicitare severă. În acest caz, rezultatul simulării trebuie să reflecte că materialul a fost fragmentat, rupt, zdrobit sau fisurat. Modelele de cedare pentru materiale simulează diferite moduri în care materialele sunt distruse; chiar și lichidele se distrug sau se separă la tracțiune, un fenomen denumit cavitație. În *ANSYS Explicit Dynamics* se pot introduce o gamă diversă de modele de materiale și modele de cedare [252]. În continuare sunt date caracteristici ale materialelor posibil de modelat în Ansys:

- materialele metalice: elasticitate, procese de șoc, plasticitate, durificare izotropă, durificare cinematică, durificare în funcție de viteza de deformare, înmuiere termică, rupere ductilă, rupere casantă, rupere dinamică (exfoliere);
- roci și beton: elasticitate, procese datorate poziției relative, compactarea materialelor poroase, plasticitate, durificare la deformare, durificare în funcție de viteza de deformare la compresiune sau tracțiune, plasticitate dependentă de solicitare, rupere/spargere prin forfecare sau prin solicitare la tracțiune;
- solide tip pulbere: elasticitate, procese induse de șoc, compactare, plasticitate, plasticitate dependentă de solicitare, cedare la forfecare sau tracțiune;
- polimeri (inclusiv elastomeri): elasticitate, vâsco-elasticitate, hiper-elasticitate;
- materiale ortotrope (cu referire la compozite cu fibre lungi, compozite stratificate etc. [140]): elasticitate ortotropă.

În funcție de obiectivele simulării, aceasta poate fi făcută la nivel:

- micro [16], [102], [216], [218], cu referire la fibră;
- mezo, implicând modelarea firului și a țesăturii cu fire [59], [60], [62], [98], [145], [173], [193], [210];
- macro, modelarea implicând tot sistemul de protecție sau panoul stratificat [55], [58], [121], [133], [188], [202], [245].

3.2. Modele constitutive de material

Dependența proprietăților elastice de temperatură nu este disponibilă în simulările care folosesc sisteme explicit dinamice. Se utilizează doar o singură valoare pentru o proprietate. Primele valori definite ca date dependente de temperatură vor fi folosite în rezolvarea numerică.

În cazul impactului proiectil-panou de protecție, utilizarea proprietăților fără dependența de temperatură este justificată de înregistrări cu camere termice, de rezultatele modelelor prezentate în literatură [9], [49], [101], [102], [105], [127], [158], [166], [177], [178], [181], [182], [217], și de caracteristicile materialelor utilizate pentru panouri, unele dintre acestea (cum ar fi compozitele cu fibre aramidice sau de sticlă), având proprietăți constante pe un interval de temperatură destul de mare. Din studiul documentar, modelarea unui impact de glonț de calibru (9 mm. sau 7.62), în domeniul vizat de autor (100…400 m/s), este analizată în condiții izoterme. Există un efect termic, dar acesta este considerat slab comparativ cu mecanismele de cedare ale solidelor implicate (rupere, deformare, delaminare, frecare).

Ecuația de stare descrie răspunsul hidrodinamic (la presiune) al materialului solid la viteze de deformare mari, când presiunea hidrodinamică este mai mare decât limita de curgere a materialului [252].

În general, un material solid răspunde mai întâi elastic, dar dacă solicitarea crește, acesta începe să se deformeze plastic și răspunsul acestuia este descris de o lege neliniară.

Pentru a simula cât mai realist comportarea materialului, modelul de material cuprinde:
- un model de cedare;
- un model de evoluție a tensiunii/deformației la solicitare exterioară.

În cazul compozitelor stratificate, se pot introduce legi de evoluție a tensiunii și cedării interlaminare, cum ar fi modelul zonei coezive (de grosime zero) [64], [107], [108], [130], [152].

În modelele de material cu plasticitate, specialiștii [40] recomandă să se lucreze cu curba tensiuni reale – deformații reale:

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \tag{3.1}$$

în care:
ε_{real} – deformație reală,
ε_{eng} – deformație inginerească,

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng}(1 + \sigma_{eng}) \tag{3.2}$$

în care σ_{real} – tensiunea reală,

σ_{eng} – tensiunea inginerească (așa cum rezultă din $\sigma = F/A_0$, în care A_0 este aria inițială a epruvetei solicitate la tracțiune cu forța F). Această conversie este valabilă doar pentru materialele incompresibile [153].

Modelul biliniar cu durificare este utilizat în analize cu deformații mari. Curba este definită dacă se cunoaște limita de curgere și modulul tangent pentru materialul modelat. Panta primului segment este chiar modulul de elasticitate E, iar panta celui de-al doilea segment este modulul tangent.

O variantă mai complexă este modelul multiliniar cu durificare care, însă, nu este recomandat pentru deformații mici și ciclice. Primul segment definește domeniul elastic terminat cu limita de curgere. Un model multiliniar cu rezultate bune a fost folosit de Pîrvu [196], dar pentru viteze mici de impact (1 m/s).

Modelul Johnson-Cook [128], [129], [212] este utilizat pentru materiale metalice, în general, supuse la viteze mari de deformare și temperaturi ridicate.

Comportarea elastică a unui material izotrop se specifică prin două caracteristici: modulul lui Young și coeficientul Poisson.

În cazul compozitelor, care sunt materiale ortotropice, cele două caracteristici date mai sus, se specifică pentru fiecare axă a sistemului de referință, adică valori pentru modulul lui Young pe direcțiile X, Y, Z, coeficienții Poisson γ_{xy}, γ_{yz}, $\gamma_{xz,}$ și modulele de elasticitate la forfecare în cele trei plane de referință, G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}.

Plasticitatea se poate introduce sub forma datelor tensiune-deformație (ca funcție sau puncte), în termen de tensiune și deformație, iar atunci rezultatele vor fi obținute tot ca tensiuni și deformații reale. Pentru domenii cu deformații mici la solicitare, curbele tensiune reală-deformație reală și tensiune inginerească-deformație inginerească sunt aproximativ identice.

În Explicit Dynamics sunt disponibile următoarele modele de plasticitate: durificarea/întărirea izotropică biliniară, durificarea izotropică multiliniară, durificarea cinematică biliniară și multiliniară, modelele Johnson-Cook [128], [129], Cowper-Symonds [70], Steinberg-Guinan [103], Zerilli-Armstrong [212], [241].

Modelul biliniar izotrop cu durificare este util în analizele cu deformații mari. Pentru introducerea acestui model se cer valorile pentru limita de curgere și modulul tangent, pentru materialul respectiv. Modulul de elasticitate al materialului este prima pantă a curbei, iar modul tangent este a doua pantă [61].

Modelul multiliniar izotrop cu durificare, se folosește tot pentru analize cu deformații mari, dar nu este recomandat în analizele cu deformații mici, cu solicitări variabile sau neproporționale. Primul punct al curbei este punctul de curgere caracterizat prin zero deformație plastică și limita de curgere. Se pot încărca în aceste modele de material până la zece puncte tensiune-deformație, dacă se utilizează Ansys Mechanics [152].

Dependența de temperatură a curbelor tensiune-deformație nu este direct introdusă. Plasticitatea dependentă de temperatură poate fi introdusă doar prin modelul Johnson-Cook.

Modelul de material Johnson-Cook redă comportarea materialelor tipic metalice, supuse la deformații mari, viteze mari de deformații și temperaturi înalte. Această comportare poate avea probleme în cazul solicitărilor cu viteze mari de impact, datorate vitezei mari de

deformare. În acest model, limita de curgere variază cu deformația, viteza de deformație și temperatură:

$$Y = \left[A + B\varepsilon_p^n\right]\left[1 + C\varepsilon_p^*\right][1 - T_H^m] \tag{3.3}$$

în care ε_p este deformația plastică efectivă (reală),

ε_p^* este viteza deformației plastice efective;

T_H este temperatura relativă în relația lui Johnson-Cook;

T_{room} este temperatura ambiantă;

T_{melt} este temperatura de topire a materialului;

A, B, C, n și *m* sunt constante de material.

Prima paranteză exprimă tensiunea ca o funcție de deformație, în care ε_p^* = 1 s^{-1} și T_H = 0 pentru experimente la temperatura camerei. A este limita de curgere la deformații lente, iar B și n reprezintă efectul durificării prin deformare la viteze mai mari. A doua paranteză este efectul vitezei de deformare asupra limitei de curgere a materialului. Viteza de deformare de referință, față de care s-au măsurat datele de material, se folosește pentru a normaliza influența vitezei de deformare plastică. Implicit se folosește 1 s^{-1}. A treia paranteză reprezintă efectul înmuierii termice, astfel încât limita de curgere scade la zero când se atinge temperatura de topire T_{melt}. Modelul Johnson Cook poate fi folosit pentru toate corpurile definite cu toate tipurile de elemente și în combinație cu toate ecuațiile de stare și criterii de cedare. În Explicit Dynamics, o capacitate termică masică trebuie introdusă pentru a permite calcularea temperaturii și a efectelor de înmuiere.

Modelul Steinberg-Guinan [103] presupune că limita de curgere crește inițial cu viteza de deformare, dar datele experimentale din șocuri, induse pe suprafețe libere, indică că efectele vitezelor de deformare mari (mai mari decât 10^5 s^{-1}) devin nesemnificative în comparație cu alte efecte, și că limita de curgere atinge o valoare maximă care, în acest domeniu, nu mai este dependentă de viteza de deformare. Acest model postulează că, modulul la forfecare crește cu creșterea presiunii și descrește cu creșterea temperaturii. Relații pentru modulul de forfecare G și limita de curgere *Y* sunt:

$$G = G_0\left\{1 + \left(\frac{G_p}{G_0}\right)\frac{p}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \left(\frac{G_t}{G_0}\right)(T - 300)\right\} \tag{3.4}$$

$$Y = Y_0\left\{1 + \left(\frac{Y_p}{Y_0}\right)\frac{p}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \left(\frac{G_t}{G_0}\right)(T - 300)\right\}(1 + \beta\varepsilon)^n \tag{3.5}$$

$$Y_0[1 + \beta\varepsilon]^n \leq Y_{max} \tag{3.6}$$

Parametrii care au indicii *p* și *t* sunt derivate ale parametrului, în funcție de presiune și temperatură, față de starea de referință (T = 300 K, p = 0, ε = 0). Indicii zero se referă la valorile pentru *G* și *Y*, în starea de referință. Dacă temperatura materialului depășește temperatura de topire specificată, modulul la forfecare și limita de curgere devin zero. În continuare, trebuie dată o valoare pentru capacitatea termică masică pentru a permite calculul temperaturii și efectului de înmuiere.

Un model general de material cere ecuații care să lege tensiunea de deformație și energia internă (sau o lege dependentă și de temperatură). În cele mai multe cazuri, vectorul tensiunilor

poate fi separat într-o presiune hidrostatică uniformă (toate cele trei tensiuni normale sunt egale) și un vector de tensiune asociat cu rezistența materialului la deformare prin forfecare.

Relația dintre presiunea hidrostatică, densitatea locală și energia specifică locală (sau temperatură) este cunoscută ca ecuație de stare.

Legea lui Hooke este cea mai simplă formă a ecuației de stare și este implicit asumată când se folosesc proprietăți liniar elastice pentru material. Legea lui Hooke este independentă de energie și este valabilă dacă materialul este supus doar la mici modificări în volum. O altă ecuație de stare ar trebui folosită dacă materialul este de așteptat să aibă modificări mari de volum pe durata analizei.

Una dintre ecuațiile de stare posibil de utilizat este ecuația liniară de stare pentru șoc. Ecuațiile de stare Rankine-Hugoniot, pentru condițiile de șoc, pot fi privite ca o relație între orice set de variabile, ρ (densitate), p (presiune), e (energie), u_p (viteza particulei) și U (viteza de șoc).

În multe experimente dinamice, care au măsurat u_p și U, s-a constatat, pentru majoritatea solidelor și lichidelor, într-un interval mare de presiuni, o relație liniar empirică între aceste variabile:

$$U = C_0 + su_p \tag{3.7}$$

Modelul EOS liniar pentru șoc permite includerea unei forme parabolice pentru viteza de șoc și viteza particulei:

$$U_s = C_0 + S_1 u_{p+} S_2 u_p^2 \tag{3.8}$$

în care C_0 este viteza sunetului în material.

Parametrul S_2 poate fi diferit de zero pentru a reda mai bine date puternic neliniare de material.

Această ecuație de stare poate fi aplicată numai corpurilor solide. Coeficientul Poisson este presupus zero când se calculează deformația reală. Parțial, trebuie definită o capacitate calorică masică pentru această proprietate, pentru a permite calculul temperaturii.

3.3. Criterii de cedare

Materialele nu suportă o tensiune de tracțiune care depășește local rezistența la rupere la tracțiune a materialului. Calculele deformațiilor și deplasărilor materialelor în ipoteza ca ele să rămână mereu continue, atunci când apar tensiuni locale foarte mari, ar duce la soluții nerealiste. Trebuie introdus un model care să recunoască când sunt atinse limite de tensiuni și care să modifice mersul de calcul, astfel încât să descrie proprietățile materialului după ce s-a întâmplat acest eveniment de depășire a limitei de rezistență a materialului. În *Ansys Explicit Dynamics* există câteva modele de inițiere a cedării materialului.

Orice model de cedare trebuie sa aibă două componente: inițierea fisurii și răspunsul post-cedare [33].

Pentru inițierea fisurii există câteva mecanisme modelate în acest soft: cedarea la atingerea unei deformații plastice critice (abreviat, deseori, cu EPS), cedarea la atingerea unei valori pentru tensiunea principală, cedarea la atingerea unei deformații principale, cedare la

tracțiune, cedare după modelul Johnson-Cook, cedare prin exfoliere. Când un criteriu specificat este îndeplinit pentru un element, se activează un răspuns post-cedare.

După inițierea cedării unui element, caracteristicile de rezistență ale elementului se vor modifica în funcție de modelul de cedare:

- cedare instantanee: după inițierea cedării, tensiunea deviatorie a elementului va fi setată la zero și reținută ca valoare la acest nivel: rezultă că elementul va fi capabil să suporte numai compresiune;

- cedare graduală (deteriorare): după inițierea cedării, tensiunea pe element este limitată de legea de evoluție a deteriorării. De obicei, aceasta rezultă într-o reducere graduală a capacității elementelor de a suporta tensiunile suplimentare și/sau de presiune. Modelele de cedare la întindere vor produce un răspuns post-cedare instantaneu.

În *Ansys Explicit Dynamics*, se pot introduce următoarele modele de cedare: cedare la deformație plastică, cedare la tensiune principală, cedare la deformație principală, cedare statistică, cedare la tracțiune, cedare prin fisurare și relaxare, cedare Johnson-Cook și cedare prin exfoliere [252].

Cedarea la deformație plastică se folosește pentru materiale ductile. Inițierea cedării se bazează pe deformația plastică reală în material. Utilizatorul trebuie să introducă o valoare a deformației plastice maxime la care materialul cedează. Dacă deformația plastică reală a materialului este mai mare decât această valoare, apare cedarea (sau ruperea). Materialul cedează instantaneu. Acest model de cedare trebuie folosit coroborat cu un model de rezistență a materialului, plastic sau casant.

Criteriul de cedare Johnson Cook [128], [129] poate fi folosit pentru modele de materiale ductile, care sunt supuse la presiuni mari, viteze mari de deformație și intervale mari de temperatură. Acest model de cedare este elaborat într-un mod similar cu modelul de rezistență Johnson-Cook. Constă din trei termeni independenți, care definesc deformația la rupere dinamică ca o funcție de tensiune, viteza de deformație și temperatură.

$$D = \sum \frac{\Delta_\varepsilon}{\varepsilon^f} \tag{3.9}$$

$$\varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*} [1 + D_4 \ln|\dot{\varepsilon}^*|]\right] [1 + D_5 T^*] \tag{3.10}$$

în care ε^f este deformația la distrugere (rupere); prima paranteză reflectă dependența distrugerii de presiune (tensiune) prin termenii $D1$, $D2$ și $D3$; a doua paranteză reflectă influența vitezei de deformare asupra deteriorării prin termenul $D4$, iar ultima paranteză este introdusă pentru a cuantifica influența temperaturii cu ajutorul termenului $D5$, iar Δ_ε este variația deformației pentru un element.

Raportul dintre incrementul deformației plastice reale și deformația la rupere reală pentru elementul respectiv este evaluat și stocat în rezultatele calculului. Materialul este presupus intact până când parametrul de deteriorare, *D*, este egal cu 1. În acest moment, se inițiază fisura elementului și se declanșează un răspuns post-cedare instantaneu. Acest model se poate aplica numai corpurilor solide [152].

Pentru definiții și comenzi în Ansys Explicit Dynamics s-au folosit informațiile din [152].

Modelul realizat în această lucrare este creat și analizat cu ajutorul soft-ului *Explicit Dynamics (Ansys)*. O astfel de analiză poate determina răspunsul dinamic al modelului datorită

undelor de propagare a tensiunilor sau modificării rapide, în timp, a solicitărilor. Modificările momentelor cinetice ale corpurilor în mișcare și efectele inerției sunt importante în acest tip de analiză. Cu acest solver se pot modela fenomene și procese puternic neliniare, cum este, de exemplu, comportarea materialelor la viteze mari de deformații, specifice impactului proiectil-panou. Neliniaritățile se referă la:

– materiale (incluzând aici hiperelasticitate, curgeri plastice, cedări, ruperi);

– contact (pentru rezolvarea cazurilor de impact);

– modificarea formei geometrice a componentelor structurilor analizate (flambaj, implozie etc.).

Evenimentele care pot fi analizate pe scara timpului, pot fi pe intervale foarte scurte (de obicei de ordinul a 10^{-3} s și chiar mai puțin).

Pasul de timp folosit în Explicit Dynamics este constrâns să mențină stabilitatea și consistența prin condiția CFL (Courant-Friedrichs-Lewy [69]).

Incrementul de timp este proporțional cu cea mai mică dimensiune din model și invers proporțional cu viteza sunetului în materialele utilizate. Pașii de timp sunt, de obicei, de ordinul milisecundelor și sunt necesare cicluri de calcul (pași de timp) de ordinul miilor pentru a obține o soluție.

Condiția stipulează că pasul de timp este limitat astfel încât o perturbație (de exemplu, o undă de tensiune) nu poate călători mai departe decât cea mai mică dimensiune de element caracteristic dintr-o rețea de discretizare, într-un singur pas de timp. Criteriul pasului de timp pentru stabilitatea soluției va fi:

$$\Delta t \leq f \cdot \left[\frac{h}{c}\right]_{min} \tag{3.11}$$

în care Δt este incrementul de timp;

f este factorul de stabilitate al pasului de timp (setat implicit la 0,9);

h este dimensiunea caracteristică a elementului;

c este viteza sunetului printr-un element de material.

În Tabelul 3.1 sunt date dimensiuni recomandate pentru elementele care sunt folosite în rețeaua de discretizare și care asigură stabilitatea soluției.

Tabelul 3.1. Dimensiuni caracteristice ale elementelor rețelei de discretizare [153]

Tipul elementelor	Dimensiuni caracteristice
Hexaedrale sau pentaedrale	Volumul elementului împărțit la radicalul celei mai lungi diagonale și scalat cu $\sqrt{2/3}$
Tetraedrale	Distanța minimă a oricărui nod al elementului la fața elementului opus

Valoarea minimă a raportului dintre dimensiunea minimă a elementului și viteza sunetului prin materialul respectiv va determina pasul de timp și acesta va fi utilizat pentru toate elementele modelului. Deci, numărul pașilor de timp necesar rezolvării simulării este dictat de cel mai mic element din model. De aceea, rețeaua de discretizare trebuie generată ținând seama de acest lucru, astfel încât unul sau mai multe elemente foarte mici să nu controleze pasul de timp. Se recomandă o rețea de discretizare mai uniformă.

Folosind solverul lagrangian, rețeaua se mișcă și se deformează cu materialul fizic (Fig. 3.1). Această metodă este des utilizată datorită unor avantaje ca abilitatea de a urmări cu precizie și eficient interfețele de material și modele de material complexe. Este utilizată pentru corpuri solide, dar este sensibilă la distorsiuni, simularea rezultând în pași de timp mici și o posibilă pierdere de precizie. Pot apărea erori sub forma așa numitelor goluri de volum ca rezultat al unei rețele „încâlcite". Pot exista algoritmi de re-discretrizare sau de adaptare a rețelei, sau se pot folosi metode de erodare a elementelor cu distorsiuni exagerate folosind o valoare-prag a deformației plastice. Adaptarea și re-discretizarea pot fi „nerentabile" din punct de vedere al resurselor de timp și de hardware, iar pentru unele modele 3D chiar nu este posibil de aplicat. Condițiile de erodare pot cauza scăderea preciziei deoarece înlătură energia de deformare din calcul. Pierderea masei elementelor erodate influențează proprietățile inerțiale ale modelului. Probleme apar și în cazul în care erodarea se aplică elementelor aflate la interfața de contact, modificând simularea și îndepărtând-o de realitate [32].

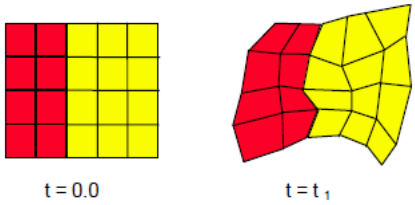
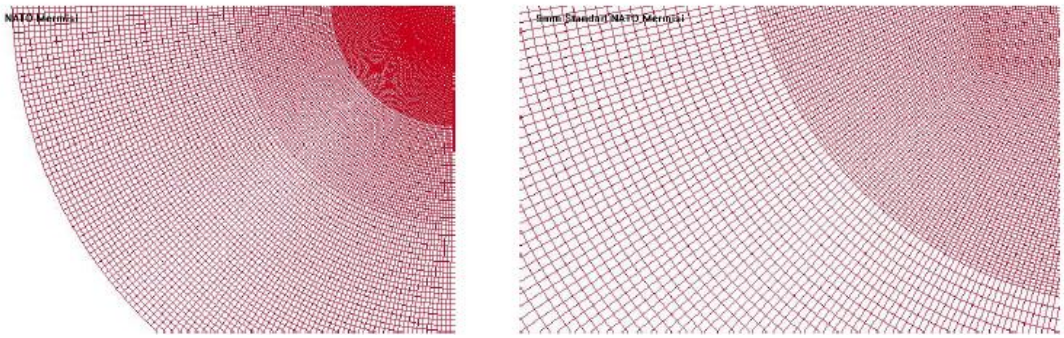


Fig. 3.1. Rețea de discretizare Lagrangiană [152]

Buyuk și alții [47] au considerat că elementele de tip hexaedral pot genera unele dificultăți în simulare din cauza distorsiunii exagerate a aspectului elementului, dar că se pot obține rezultate acceptabile, ca și în cazul modelării cu elemente tip foaie (shell) (Fig. 3.2). Atât modelarea, cât și experimentul din lucrare au evidențiat procesul de petalare a proiectilului, proces dependent de viteza de impact, de material și de grosimea țintei (Fig. 3.3).



a) b)

Fig. 3.2. Elemente tip foaie (shell): a) rețea de discretizare pe zone, b) detaliu

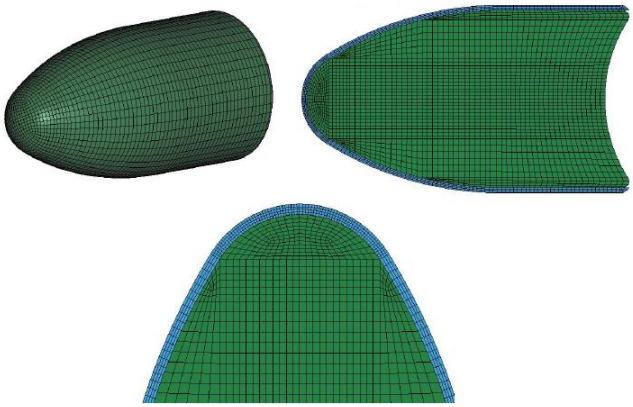


Fig. 3.3. Rețeaua de discretizare pentru glonț, așa cum a fost propusă în [47]

Satkar și alții [208] au studiat performanțele la impact balistic ale unui compozit hibrid, din 3 straturi de fibre de sticlă și două straturi de fibre de carbon în rășină epoxidică, pe simulare numerică. Capacitatea compozitului de a absorbi energia cinetică a proiectilului a fost studiată pentru câteva viteze de impact (400 m/s, 450 m/s și 500 m/s) și diferite combinații, folosind *Ansys-Explicit Dynamic*. Rezultatele au arătat că alternanța între stratul de fibră de sticlă și cel de fibre de carbon a dat cele mai bune valori. Simulările au fost rulate pentru a afla efectul diverșilor parametri ai impactului asupra performanțelor compozitelor modelate. Din aceste simulări a rezultat că fibrele de sticlă au performanțe mai bune comparativ cu fibrele de carbon, care, chiar dacă au proprietăți mecanice mai bune, în condițiile impactului simulat, nu au profitat de acestea. Modelarea a sugerat că hibridizarea unor compozite poate oferi o soluție prin care să se obțină rezistență la impact, dar și alte caracteristici dorite, cum ar fi reducerea masei specifice.

3.4. Informații pentru modelarea în Explicit Dynamics

3.4.1 Definirea comportării corpurilor

Densitatea trebuie specificată pentru fiecare material, dacă se definesc valori pentru mai multe temperaturi prin comanda „Material Field Variable”; acestea nu sunt folosite în *Explicit Dynamics*. Pentru rezolvare, se ia în considerare doar prima valoare dată într-un tabel. Se utilizează doar o singură valoare pentru temperatura de referință, chiar dacă se folosesc mai multe materiale în model.

Analiza cu Explicit Dynamics permite să se țină seama de efecte neliniare specifice procesului analizat (aici la impact). Corpurile pot fi definite ca rigide sau flexibile, în funcție de soluția utilizatorului, iar discretizarea se va face cu metode specifice.

Când se folosește solverul Explicit Dynamics cel puțin un corp trebuie să fie flexibil, pentru a se putea calcula pasul de timp.

Condițiile limită pentru corpuri în Explicit Dynamics sunt:

• conexiuni sau interacțiuni între corpuri: frictionless (fără frecare), frictional (cu frecare) și bonded (lipit, conectat);

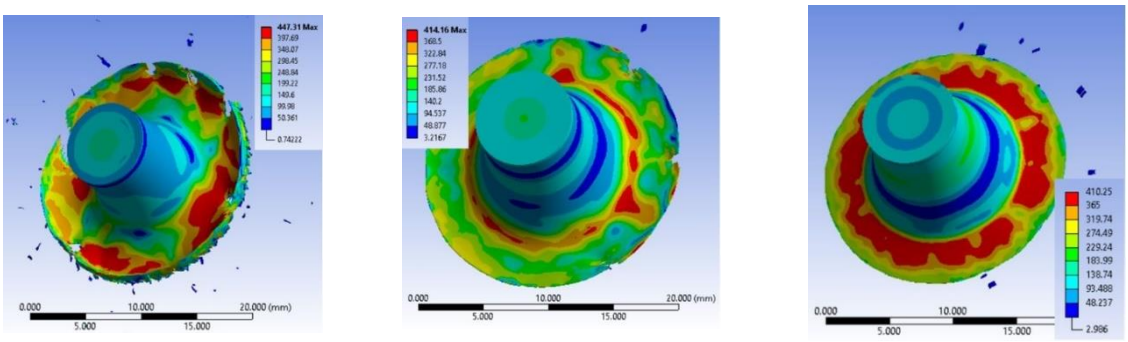
• condiții inițiale: velocity (viteză), angular velocity (viteză unghiulară);

• suporți (reazeme): deplasare, suport fix și viteză;

• sarcini: presiune și forță; forța nu este suportată în analizele Explicit Dynamics.

În domeniul impactului balistic, determinarea coeficientului de frecare este dificil de realizat, dar se poate evalua și se utilizează în modelare, fie ca o valoare constantă, fie ca o funcție de viteză și tensiune de contact.

Având în vedere resursele de hardware și licența de Explicit Dynamics, autorul a evidențiat influența frecării, pe un model simplu de impact (Fig. 3.4).



COF = 0 COF = 0,2 COF = 0,3

Fig. 3.4. Influența valorii coeficientului de frecare (COF) asupra formei unui proiectil inițial cilindric, care lovește o placă perfect rigidă, cu viteza de 300 m/s și distribuția de tensiuni von Mises (în MPa), la momentul $t = 9\times10^{-5}$ s (Fiecare imagine are scara de culori pentru tensiuni) [181]

3.4.2 Definirea conexiunilor

Pentru contact linie pe linie de pe două corpuri, se pot face următoarele acțiuni:

- detectarea contactului se setează „pe baza vecinătății” (Proximity Based) de la Interacțiuni între corpuri (Body Interactions);

- muchie-pe muchie (Edge on Edge) se setează pe Yes (Da) la interacțiuni între corpuri (Body Interactions);

- tipul de interacțiune poate fi cu frecare sau fără frecare.

Body Interactions (interacțiuni între corpuri), Contact (contact) și Spot Welds (joncțiuni de sudare) sunt aplicabile în analizele în Explicit Dynamics.

Sunt disponibile interacțiunile cu frecare (Frictional), fără frecare (Frictionless) și interacțiuni de tip lipire (Bonded body), dar și alte opțiuni de contact. Contactul de tip bonded, condiționat, poate fi simulat folosind proprietăți de rupere (cedare) pentru fiecare regiune, definite cu conexiuni bonded. Și joncțiunile de sudură (adeziune) pot fi distruse prin proprietăți de rupere (cedare). Pentru a identifica și evita problemele de distorsiune exagerată (hourglassing), se pot utiliza puncte de recunoaștere, dacă sunt doar câteva noduri active în definiția legăturii (contactului).

Deformarea excesivă sau distorsionată (hourglassing) este o deformare aparentă, falsă, într-o rețea de elemente finite, rezultând din exercitarea la grade de libertate cu energie zero

[148], [153], [219]. Se manifestă ca „petice” în zig-zag sau ca elemente distorsionate sub formă de clepsidră (Fig. 3.5); elementele individuale sunt puternic deformate, dar rețeaua din jur este deformată cu valori mici. Pot apărea pe elemente hexaedrale sau tetraedrale [91]. 295].

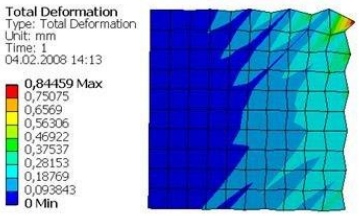


Fig. 3.5 Manifestare tipică a distorsiunii tip clepsidră (LS Dyna) [295]

Conexiunile tip „bonded” nu sunt recomandate pentru conectarea rețelelor tetraedrale. În acest model s-a utilizat în loc „multibodied part”, așa cum recomandă [152].

Dacă nu este specificat, se inserează implicit automat „interacțiune între corpuri” (Body Interaction) pentru toate obiectele modelului, dar fără frecare.

3.4.3. Rețeaua de discretizare

Înainte de rularea simulării, rețeaua de discretizare a fost verificată pentru a îndeplini cerințele de rulare.

Solverele implicite și explicite cer rețele de discretizare diferite. Cel mai simplu mod de a le diferenția este să se comute pe opțiunea Physics Preference, între Explicit și Mechanical. În general, pentru o geometrie complexă nu se aplică aceiași rețea de discretizare pentru ambele solvere.

Rețelele uniforme de discretizare sunt mai eficace [152]. Cu solverul explicit, finețea rețelei nu este întotdeauna soluția cea mai bună. Pasul de timp (incrementul de timp) pentru care solverul Explicit este controlat de cel mai mic element din rețea, influențând tot modelul, deci rezolvarea (ca timp și soluție) va duce la creșterea timpului de rulare. Specialiștii apreciază că solverul Explicit Dynamics lucrează mai bine cu elemente cuboide, distribuite cât mai uniform pe model. Diferența între mărimile elementelor va denatura mai mult rezultatele comparativ cu un solver implicit pentru că folosește pentru calcule masa, deformația și viteza fiecărui element. Pentru a rezulta o simulare realistă, proiectantul trebuie să evalueze elementul maxim și cel minim, și statistica rețelei. Cu cât diferența între elemente este mai mică, cu atât mai bine pentru simulare.

Pentru regiunile relativ subțiri și care este posibil să suporte și încovoiere, se recomandă cel puțin două elemente pe grosime, astfel încât modelul în solverul explicit să se deformeze plauzibil (corect).

Comanda „Body Interactions” este oricând prezentă în sistemele *Explicit Dynamics*. Implică o detectare automată a contactului, ceea ce este foarte util deoarece în *Explicit Dynamics* se lucrează cu modele de impact și strivire, locul contactului între corpuri fiind, inițial, necunoscut. Tipurile de contact principale sunt fără frecare (frictionless), cu frecare

(frictional) și cu legătură (bonded), dar în Explicit Dynamics există și reinforcement (pentru modelarea structurilor ca betonul armat etc.).

Este recomandată o rulare cu o rețea de discretizare mai grosieră și apoi rafinarea acesteia, cu compararea unor rezultate (tensiuni, deformații).

Condiții limită. Spre deosebire de solverul Explicit Dynamics, solverul implicit nu are o dependență reală de inerție. Solverul Explicit Dynamics folosește timpul ca referință, diferența între momentele calculate fiind suficient de mică pentru a pune în evidență mecanisme de cedare care nu „se văd" pe epruvetele reale, decât la sfârșitul testului.

Evitarea condițiilor limită conflictuale. Solverul Explicit Dynamics permite ca mai mult de o condiție limită să fie aplicată pe aceiași muchie, fiind evaluate pentru fiecare pas al analizei.

Condiții inițiale pot fi o viteză inițială, o viteză unghiulară, atașate unui corp la momentul inițial. Valoarea acesteia nu are constrângeri și nu este limitată. Condițiile inițiale pot fi folosite pentru o pre-încărcare, rezultată, de obicei, dintr-o rulare în solverul Implicit.

Controlul etapelor. Simularea în Explicit Dynamics poate fi văzută ca un fragment din timpul real al evenimentului care este „încetinit", ca și cum ar fi înregistrat cu o cameră de filmare rapidă. Se poate lucra cu timp de simulare sub 1 secundă.

Intervalul de timp definește simularea, începând de la zero și până la valoarea finală (End Time). De obicei, modelele rulate în Explicit Dynamics sunt constrânse la un interval de timp pe baza numărului maxim de cicluri lăsate ca implicite sau de setarea acestui număr de către utilizator. Fiecare ciclu este o parte din timpul soluției, cu un anumit pas de timp și are o singură iterație.

Controlul pasului de timp. Incrementul de timp sau pasul de timp este valoarea timpului cu care avansează solverul, între două cicluri de calcul. Cu cât pasul de timp este mai mic și cu cât calculele sunt mai complexe pe un ciclu (rețea de discretizare mai densă, modele de material mai complexe etc.), cu atât timpul de simulare va fi mai mare. A avea un control asupra pasului de timp este important pentru a avea o simulare realistă. Există numeroase moduri de a controla pasul de timp. Factorul care guvernează valoarea pasului de timp este mărimea cea mai mică a elementului, h. Timpul este calculat pe baza vitezei sunetului în material, C_0 (care depinde de densitatea și proprietățile materialului) și este nevoie să existe o valoare suficient de mică pentru h pentru a simula realist undele de tensiune care călătoresc prin corp.

3.4.4. Limitări ale dimensiunii modelelor în Explicit Dynamics

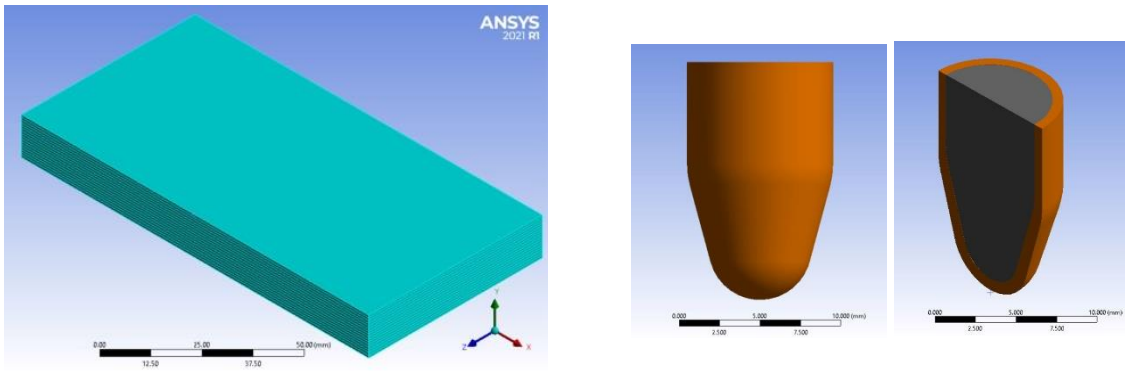
Modele cu un număr foarte mare de elemente și noduri este posibil să nu poată fi rezolvate cu ajutorul *Explicit Dynamics* într-un timp rezonabil.

Se recomandă începerea analizei cu rețele grosiere și studiul convergenței soluțiilor pe măsură ce se rafinează rețeaua de discretizare. Se poate reduce timpul de rulare, distribuind modelul pe mai multe procesoare în paralel, lucru ce nu a fost posibil pentru această analiză, licența fiind pentru un singur post de lucru, cu 16 Gb RAM. Timpul de inițializare nu poate fi redus prin această metodă și el va crește substanțial pentru modele mari. Analiza de convergență pentru un anumit model depinde de resursele RAM ale calculatorului.

Complexitatea modelului, ca rețea de discretizare, depinde de solverul ales (aici, de tip Lagrange), de modelele constitutive de material, de opțiunile activate (care includ modelele de cedare și tipul de interacțiune).

3.5. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat

Modelul este format din mai multe corpuri, glonțul din două corpuri cu conexiune cămașă-miez de tip „perfect bonded” și panou, la rândul lui compusă din 8 straturi, 10 straturi, 12 straturi, 16 straturi sau 24 straturi (Fig. 3.6.a și b).



a) Panou stratificat (16 straturi) b) Glonț 9 mm FMJ

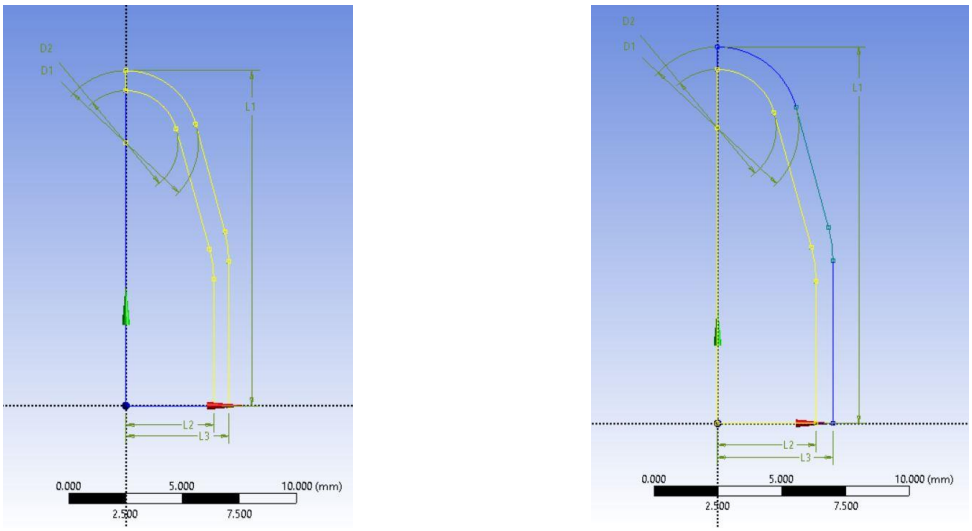
Fig. 3.6. Modelul analizat

Dimensiunile corpurilor modelului sunt date în continuare. Panoul are o suprafață de 120 mm x 120 mm. Placa reală, realizată de autor și testată, este de 300 mm x 300 mm, ceea ce a permis efectuarea a 3 focuri (lovituri), la o distanță între ele de 120 mm, în triunghi echilateral. Din motive de timp de rulare și caracteristici de hardware, autorul a optat pentru simularea unei singure lovituri pe o suprafață mai mică (120 mm x 120 mm), fiind suficientă pentru a evidenția procesul de delaminare pentru un singur foc.

Glonțul a fost desenat după [236], iar valorile parametrilor pentru geometrie (Fig. 3.7) sunt: diametrele $D_1 = 6{,}354$ mm, $D_2 = 4{,}588$ mm, $L_1 = 14{,}732$ mm, $L_2 = 3{,}858$ mm, $L_3 = 4{,}515$ mm, iar grosimea cămășii la vârf fiind 0,883 mm (valoare determinată automat).

Pentru a diminua timpul de rulare, glonțul a fost adus cât mai aproape de panou, distanța între vârful glonțului și placă fiind de 0,258 mm.

Conexiunea dintre straturi fiind de tip „bonded”, cu condiția de desprindere „breakable”, desprinderea nodurilor realizându-se condiționat de depășirea unei valori pentru tensiunea normală și de forfecare și care a fost introdusă cu valoarea de 90 MPa pentru tracțiune (întindere) și 60 MPa pentru tensiunea de forfecare, valori caracteristice rășinii utilizate pentru lipirea/atașarea straturilor în panou.



a) Cămașa b) Miezul

Fig. 3.7. Geometria glonțului

Comanda „Breakable” (separabil) setată pe „No” (nu), implică faptul că legăturile generate la inițializare vor fi active pentru întreaga analiză. În acest model, s-a optat pentru opțiunea „Breakable”, setată cu „Stress Criteria” (criteriu de tensiune), și atunci conexiunea se poate rupe sau desface pe durata analizei. În acest cod, criteriul de rupere este definit astfel:

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^{limit}}\right)^n + \left(\frac{|\sigma_s|}{\sigma_s^{limit}}\right)^m \geq 1 \qquad (3.12)$$

în care:

σ_n^{limit} este valoarea pentru limita de rupere pentru tensiunea normală (în acest model);

n estevaloarea exponentului din relația (3.12), pentru raportul tensiunilor normale, $n = 2$;

σ_s^{limit}este valoarea pentru limita de forfecare;

m este valoarea exponentului din relația (3.12), pentru raportul tensiunilor de forfecare, $m = 2$.

Interacțiunea între corpuri este considerată cu frecare, coeficientul de frecare fiind constant, setat la COF = 0,1, atât pentru frecarea între straturi, cât și pentru frecarea între strat și proiectil. Valoarea coeficientului de frecare în cazul impactului este greu de măsurat, încercările din literatură fiind făcute pentru viteze relativ mai mici decât în realitate și luând în considerare doar alunecarea dintre două corpuri. În cazul țesăturilor distruse prin impact, rolul coeficientului de frecare între fibre și fire, și între fire și matrice, este important și poate absorbi o parte din energia de impact [65], [67]. Intervalul găsit în literatură pentru COF este de la valori sub 0,1 până la 0,4 [119], [163]. În realitate, în procesul de impact, coeficientul de frecare nu este constant și depinde de cuplul de materiale între care are loc mișcarea și de solicitarea pe direcția normală a contactului între corpuri.

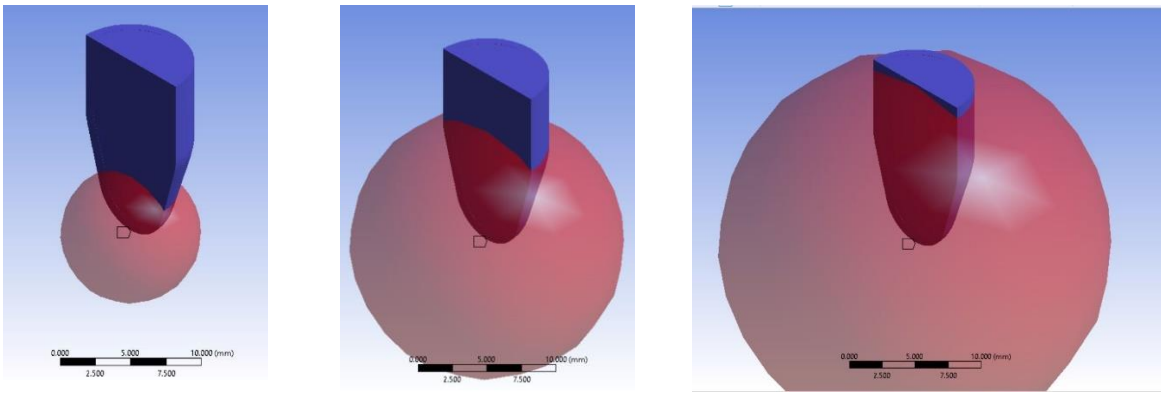
Rețeaua de discretizare s-a făcut după o documentare asupra subiectului din care a rezultat că mărimea elementului și stilul de discretizare este important, dar trebuie adaptat la cazul particular care se modelează [102]. Figura 3.8 prezintă rețeaua de discretizare pentru gloanțe de următoarele calibre: 9 mm FMJ RN Remington, .44 Magnum SJHP Remington și .357 Magnum SJSP Remington



Fig. 3.8. Exemple de rețea de discretizare pentru proiectil [281]

3.5.1. Rețeaua de discretizare a corpurilor implicate în model

În modelul din această lucrare, pentru glonț s-a folosit o rețea tetraedrală cu minimum două elemente pe grosimea cămășii, obținută dintr-o discretizare inițială, peste care s-a finisat o discretizare cu 3 sfere de influență, cu raza sferelor de 5 mm, 10 mm și 15 mm, pentru a avea o creștere relativ controlată și mai redusă a elementelor rețelei. Pentru sfera de 5 mm, mărimea elementului a fost 0,35 mm, pentru următoarea sferă a fost 0,45 mm iar pentru cea mai mare sferă, de 0,55 mm (Fig. 3.9)



a) Sfera cu rază de 5 mm b) Sfera cu rază de 10 mm c) Sfera cu rază de 15 mm

Fig. 3.9. Sferele de influență pentru rețeaua de discretizare a glonțului

Fiecare strat al panoului are grosimea de 0,8 mm (ca și stratul utilizat pentru formarea compozitului în laborator), cu un element pe grosime, mărimea elementului fiind de 0,8 mm (Fig. 3.10). Elementele hexaedrale pentru un strat al compozitului sunt recomandate și în [152] și [221], rafinarea rețelei de discretizare pentru o rulare necesitând resurse hardware superioare.

Condiția inițială este dată de viteza glonțului, aici considerată v_0 = 375 m/s, valoare determinată experimental pentru campania de teste (vezi Capitolul 5).

Modelul conține un plan de simetrie care trece prin centrul pătratului care definește aria plăcii (și conține secțiunea longitudinală a proiectilului și este paralel cu una din laturile panoului).

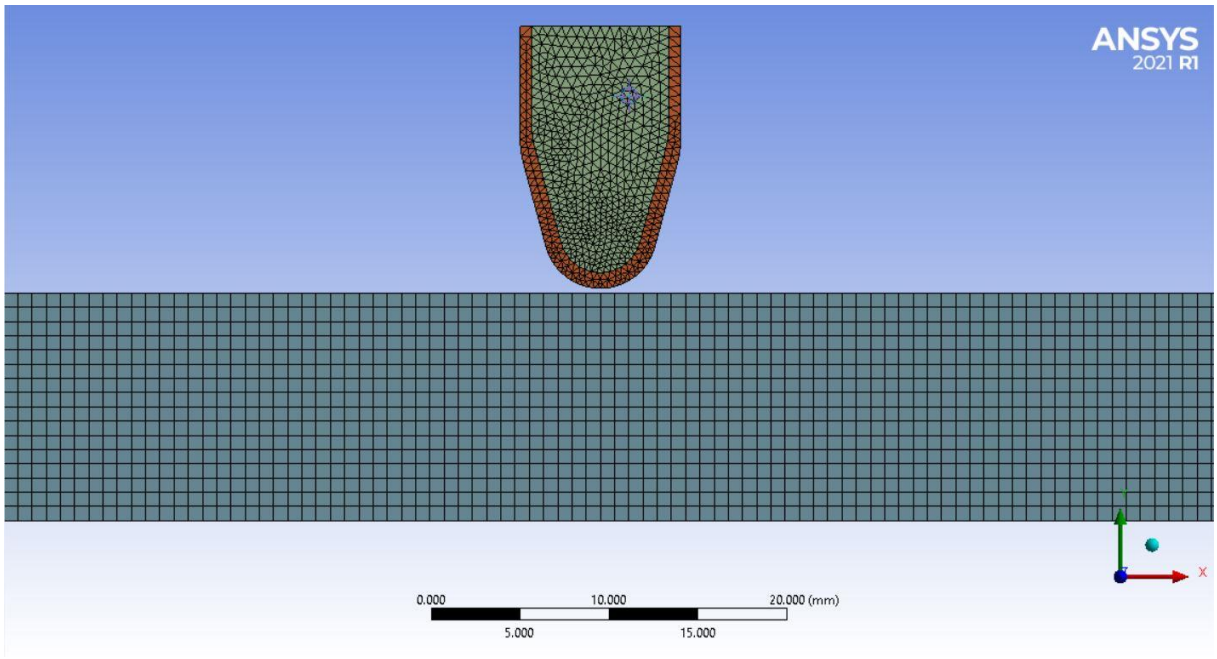
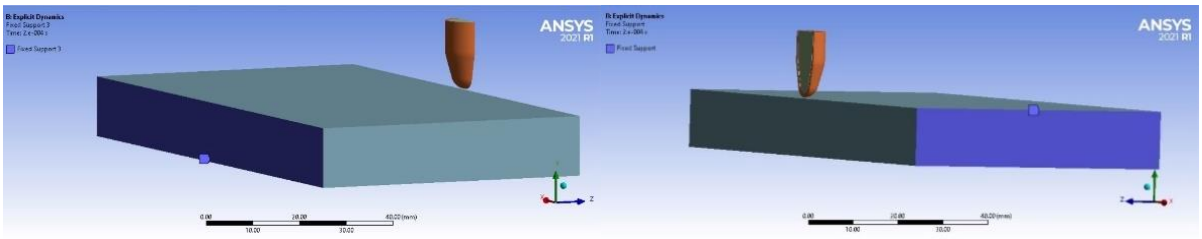


Fig. 3.10. Rețeaua de discretizare pentru modelul analizat

Condiții limită ce implică fixarea plăcii. Fiecare strat din placă este încastrat pe suprafața laterală a stratului (Fig. 3.11).



a) b)

Fig. 3.11. Condiții limită pentru panou

3.5.2. Modele de material

În aceste simulări au fost folosite următoarele materiale:

- alamă (brass) pentru cămașă, cu model Johnson-Cook, pe baza datelor experimentale obținute de [36] [96], [187], (Tabelul 3.2);
- plumb sau aliaj de plumb pentru miez, model Johnson-Cook, pe baza datelor experimentale obținute de [36] [96], [187] și introduse în baza de date pentru materiale din Ansys [152] (Tabelul 3.3).

Tabelul 3.2. Proprietăți mecanice pentru cămașa proiectilului

Proprietate	**Valoare**
Densitate *[kg mm^-3]*	8,45e-006
Căldura specifică la presiune constantă *[mJ kg^-1 C^-1]*	380
Modulul lui Young *[MPa]*	90000
Coeficientul Poisson	0,344
Modulul în volum *[MPa]*	93750
Modulul la forfecare *[MPa]*	33582
Temperatură *[°C]*	22
Constante pentru modelul Johnson_Cook	
Limita de curgere inițială *[MPa]*	90
Constantă de întărire *[MPa]*	628
Exponent pentru întărire	0,72
Constanta vitezei de deformare	0,266
Exponentul înmuierii termice	604
Temperatura de topire *[°C]*	927
Viteza de deformare plastică (/sec)	1
Deformația plastică la rupere	0,4

Tabelul 3.3. Proprietăți mecanice pentru miezul proiectilului

Proprietate		**Valoare**
Densitate *[kg mm^-3]*		1,135e-005
Modulul lui Young *[MPa]*		16000
Coeficientul Poisson		0,44
Modulul în volum *[MPa]*		44444
Modulul la forfecare *[MPa]*		5555,5
Temperatură *[°C]*		22
Căldura specifică la presiune constantă *[mJ kg^-1 C^-1]*	**Temperatură *[°C]***	
1,183e+005	-170,2	
1,214e+005	-115,7	
1,243e+005	-61,26	
1,272e+005	-6,817	
1,288e+005	22	
1,301e+005	47,63	
1,328e+005	102,1	
1,355e+005	156,5	
1,381e+005	211	
1,407e+005	265,4	
1,432e+005	319,9	
Constante pentru modelul Johnson_Cook		
Limita de curgere inițială *[MPa]*		1
Constantă de întărire *[MPa]*		55
Exponent pentru întărire		9,8e-002
Constanta vitezei de deformare		0,231
Exponentul înmuierii termice		221
Temperatura de topire *[°C]*		327,5
Viteza de deformare plastică (/sec)		1
Deformația plastică la rupere		0,4

– fiecare strat al plăcii are caracteristicile mecanice din Tabelul 3.4.

Tabelul 3.4. Proprietăți mecanice pentru straturi

Proprietate	**Valoare**
Densitate *[kg mm^-3]*	1,904e-006
Căldura specifică la presiune constantă *[mJ kg^-1 C^-1]*	6,e+005
Modulul lui Young *[MPa]*	50000
Coeficientul Poisson	0,3065
Modulul în volum *[MPa]*	43066
Modulul la forfecare *[MPa]*	19135
Temperatură *[°C]*	22
Model cu întărire biliniar izotropă	
Limita de curgere inițială *[MPa]*	550
Modulul tangent *[MPa]*	10000
Temperatura *[°C]*	22
Deformația plastică la rupere	0,09

Modelul este izoterm, din două motive. *Explicit Dynamics* nu suportă modele adiabatice, iar din literatură s-a constatat că, în acest domeniu de viteze de impact, 100 m/s până la 450 m/s, influența termică poate fi neglijată în evaluarea distrugerii proiectilului și țintei.

Între straturi a fost introdus modelul zonei coezive, de grosime zero, (CZM) [249], denumirea în comenzile Explicit Dynamics fiind „Bilinear for interface delamination" (delaminăre biliniară la interfața corpurilor) (Tabelul 3.5) [253], criteriul de rupere fiind setat pentru „Fracture energies based debonding" (delaminare bazată pe energii de rupere) (Tabelul 3.6) în modul I de deschidere a fisurii. În Anexe, este dat un raport de rulare pentru impactul glonțului cu un panou de 16 straturi.

Tabelul 3.5. Parametrii pentru modelarea rezistenței la delaminare interfacială (interlaminară)

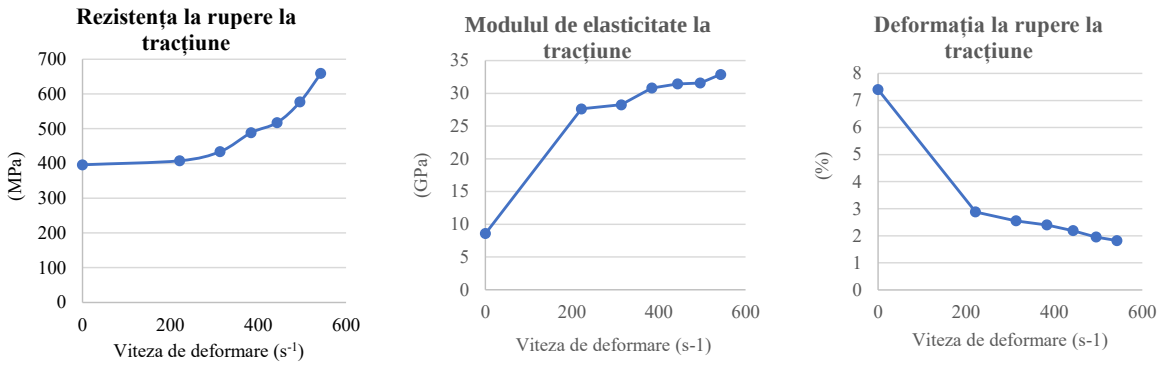
Temperatura, °C	Limita la tracțiune normală, MPa	Saltul de deplasare la terminarea delaminării cu întindere, mm	Limita la forfecare, MPa	Saltul de deplasare tangențială la terminarea delaminării, mm	Raport
23	70	5	50	0,1	0,3

Tabelul 3.6. Parametrii pentru energia de rupere la delaminare

Temperatura, °C	Tensiunea normală maximă de contact, MPa	Energia critică la cedare pentru separarea normală, J/m^2	Tensiunea tangențială maximă de contact	Energia critică la cedare pentru alunecare tangențială, J/m^2	Coeficient de amortizare artificială
22	100	3000	-	-	0,1

Naresh et al. [171] au raportat influența vitezei de deformare asupra proprietăților la tracțiune ale unor compozite din fibre de sticlă, fibre de carbon sau hibride, în matrice de rășină epoxidică, pentru un interval al vitezelor de deformare 0,0016 s^{-1}...542 s^{-1}, cu ajutorul unui echipament cu căderea unei greutăți, iar pentru teste cvasi-statice a utilizat o mașină universală pentru încercare la tracțiune Instron, în concordanță cu ASTM D638 (Fig. 3.12). Rezultatele

au arătat că, pentru GFRP și compozitele hibride, limita de rezistență și modulul la tracțiune cresc cu creșterea vitezei de deformare, deformația la rupere scade, iar caracteristicile CFRP sunt mai puțin sensibile la viteza de deformare. Pentru compozitele cu fibre de sticlă și rășină epoxidică, limita la tracțiune și modulul de elasticitate au crescut cu creșterea vitezei de deformare, iar deformația la rupere a scăzut cu creșterea aceluiași parametru.



a) b) c)

Fig. 3.12. Influența vitezei de deformare asupra caracteristicilor mecanice ale unui compozit de fibră de sticlă în matrice de rășină epoxidică, cu patru straturi [171]

3.6. Rezultate ale simulării și discuții

3.6.1. Scopul simulărilor rulate

Modelul și simulările au fost realizate pentru a evidenția următoarele aspecte:

– posibilitatea modelării impactului la nivel macro, cu straturi cu caracteristici izotrope, simplificare acceptabilă pentru că un strat are 4 substraturi orientate (0°/45°/ 90°/ -45°), care conferă uniformitate caracteristicilor mecanice, cel puțin în planul țesăturii, astfel încât pe baza unor criterii de validare, modelul să fie utilizat pentru evaluarea rezistenței balistice pentru un nivel superior celui deja testat;

– criteriile de validare sunt: calitative (forma orificiului de penetrare, forma delaminării) și cantitative (numărul de straturi rupte și mărimea maximă a delaminărilor observabile pe model).

Simulările sunt utile pentru:

– identificarea etapelor impactului, fapt care nu se poate realiza prin studiul post-mortem al distrugerilor țintei, din cauza intervalelor foarte mici de timp pe care se desfășoară;

– analiza stării de tensiuni și deformații pentru diferite ținte, în funcție de grosime (numărul de straturi) și de viteza de impact;

– pentru un singur panou, analiza stării de tensiuni pentru diferite straturi, la diferite momente, astfel încât să se evidențieze influența unor factori asupra mecanismelor de cedare.

În acest studiu, s-a discutat influența numărului de straturi și influența vitezei de impact, pentru același proiectil, 9 mm FMJ.

Rulările au fost realizate pentru următoarele cazuri:

– număr de straturi: 8, 10, 12, 16 și 24; de menționat că testele sunt realizate doar pentru panourile cu 8, 16 și 24 de straturi, dar simularea ar permite evaluarea unor valori intermediare ale numărului de straturi, care ar duce la scăderea densității specifice, pentru protecție împotriva aceleiași amenințări;

– viteza inițială de 375 m/s și 420 m/s; viteza mai mare (pentru care nu există teste de laborator în această lucrare) ar corespunde unui nivel superior de protecție (FB3 conform EN 1063:1999 [260]) și analiza simulărilor ar permite o evaluare pe baza căreia se poate programa o viitoare campanie de încercări pentru nivelul superior.

Plăcile cu 10 straturi și 12 straturi nu au avut corespondent în campania de testare, dar simularea poate oferi informații utile privind rezistența compozitului între valorile testate în laborator, pentru plăcile de 8 și 16 straturi, astfel putându-se optimiza greutatea specifică a plăcii de protecție în mediul virtual, urmând o testare doar pentru grosimea sau grosimile considerate eficace din simulare.

Simulările pentru grosimi intermediare între cele testate poate da informații asupra evoluției vitezei reziduale.

După simulări, s-au comparat formele de distrugere în mediul virtual cu cele obține pe plăci testate. S-au analizat distribuțiile de tensiuni pe fiecare strat, cu ajutorul funcției ”Path” (Fig. 3.13 și Fig. 3.14) și s-au comparat pentru diferite grosimi ale plăcii, obținându-se influența numărului de straturi asupra evoluției tensiunilor echivalente în timp pe un strat de interes. Din simulare, se pot extrage imagini (la anumite momente) care aparțin etapelor procesului de impact.

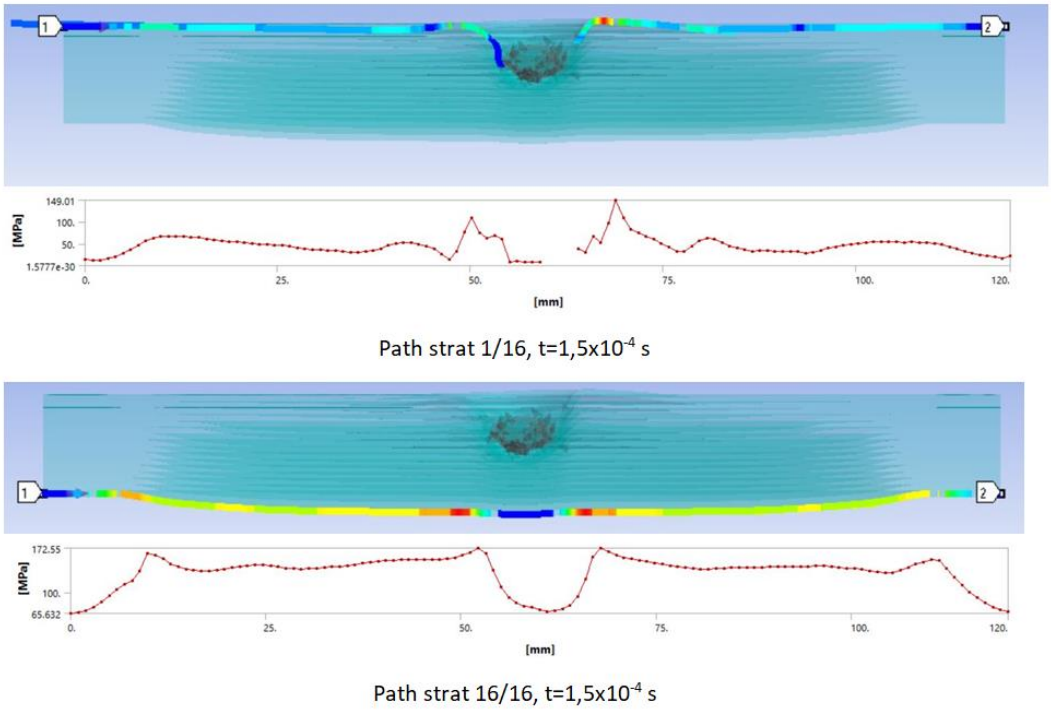


Fig. 3.13. Analiza tensiunilor echivalente pe un strat: pentru panoul cu 16 straturi, sus - stratul 1, jos - stratul 16 (ultimul strat)

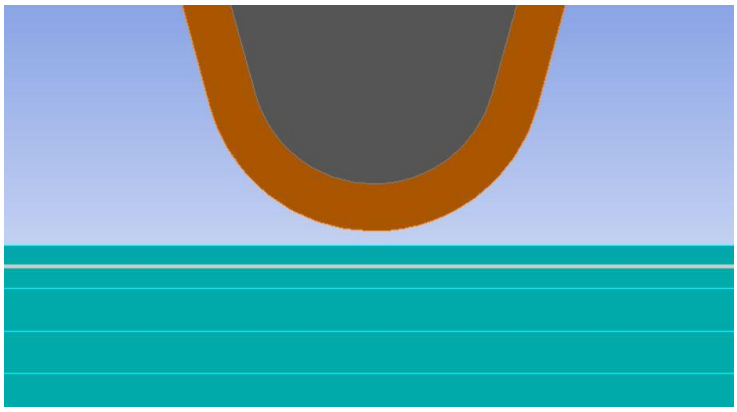


Fig. 3.14. Reprezentarea liniei ajutătoare pentru un strat (Path), în planul de simetrie al modelului

Pentru penetrare totală (panoul de 8 straturi) (Fig. 3.15), etapele observate din simulare sunt:

– tensionarea straturilor fără rupere este o etapă foarte scurtă, pe această simulare doar la momentul $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s nu se observă fire rupte, dar valorile tensiunilor echivalente ating valori mari, aproape de rupere (1490 MPa în Fig. 3.15.a), iar primul strat este puternic deformat prin comprimare;

– de la momentul $t = 1{,}5 \times 10^{-5}$ s se inițiază ruperea stratului 2 și 3 și delaminarea între straturile 1-2 și 2-3; se observă și un început de delaminare în zona în care deformația ultimului strat este mare;

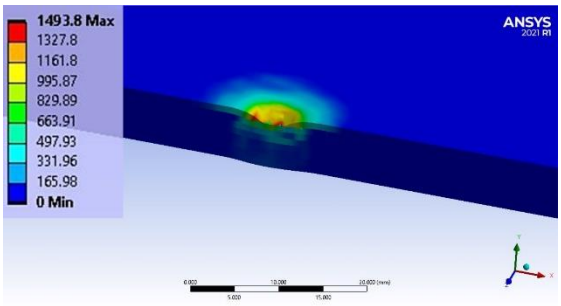
– etapă în care sunt rupte, succesiv, toate straturile ($2{,}25\times10^{-5}$... $6{,}75\times10^{-5}$ s),

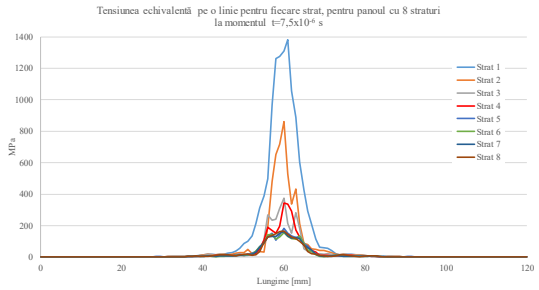
– etapă în care glonțul continuă să avanseze față de panou, între glonț și resturile de panou există frecare și glonțul, chiar dacă este deteriorat (deformat, zgâriat), produce încovoieri puternice ale marginilor straturilor, în vecinătatea canalului de penetrare, deja rupte, rezultând mici fragmente.

Pe grafice, ruperea unui strat este reflectată prin scăderea la zero a tensiunii echivalente.

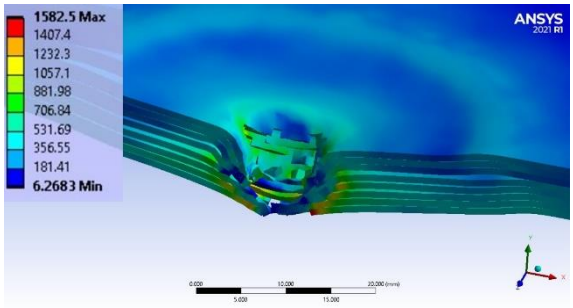
Graficele nu au simetrie față de axa proiectilului pentru că ruperea straturilor nu este identică în secțiune, în dreapta și stânga direcției de impact. Acest lucru este explicabil prin asimetria locală a rețelei de discretizare inițială și a condițiilor de contact. Și, în realitate, nu se observă o simetrie a orificiului de penetrare într-un material izotrop din diverse cauze, incluzând diferențe locale ale structurii, deformațiilor etc.

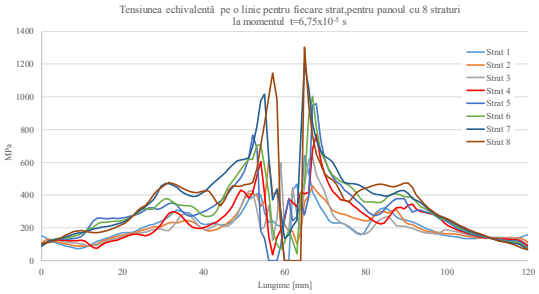
Spre momentele finale ale impactului, tensiunile mari apar sub formă de concentratori de tensiune pe marginile fragmentelor puternic încovoiate de trecerea proiectilului; pe măsură ce proiectilul avansează și părăsește contactul cu unele straturi, aceste straturi au tensiuni din ce în ce mai mici. Se poate vedea, ca exemplu, distribuția tensiunii echivalente pentru stratul 1 din graficul pentru $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s (Fig. 3.15).



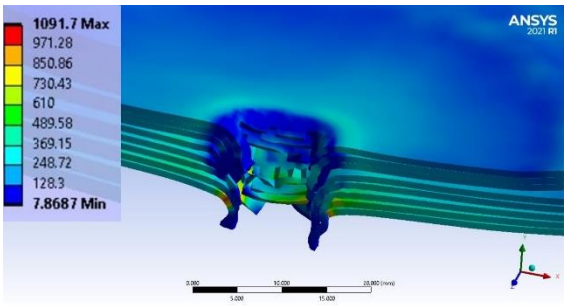


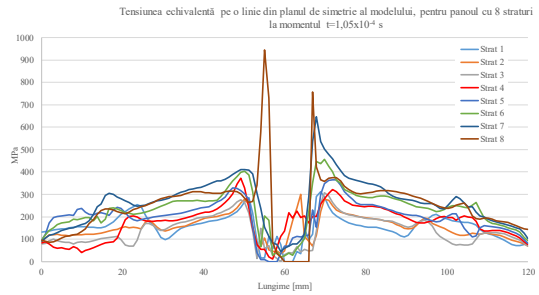
a) $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s



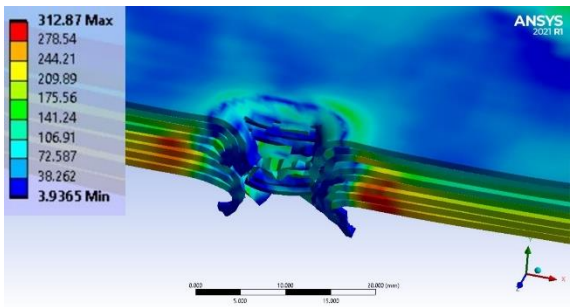


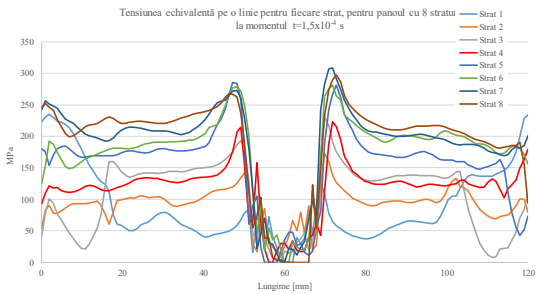
b) $t = 6{,}75\times10^{-5}$ s





c) $t = 1{,}05\times10^{-4}$ s

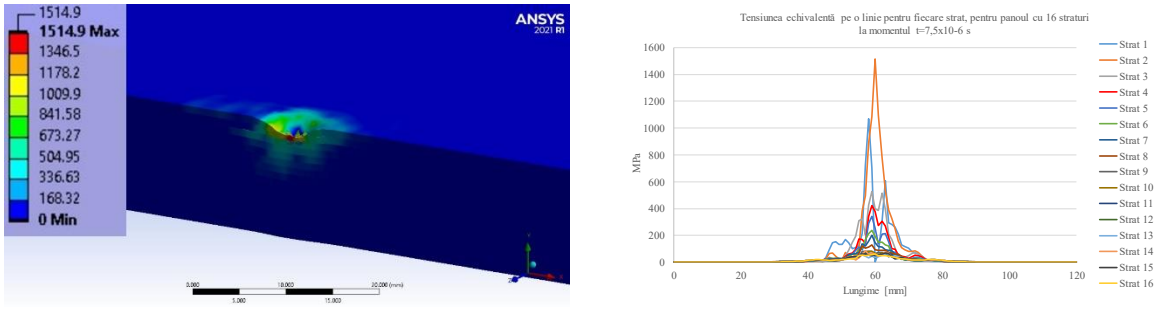




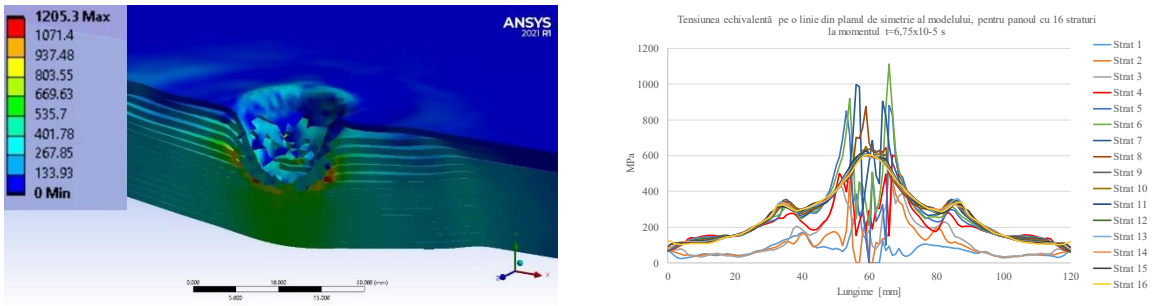
d) $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s

Fig. 3.15. Momente importante în desfășurarea procesului de impact pe panoul cu 8 straturi, cu penetrare totală

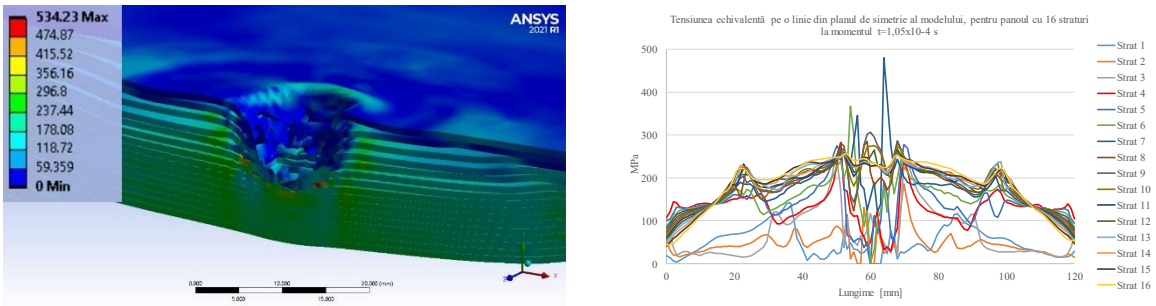
Pentru penetrare parțială (panoul de 16 straturi) (Fig. 3.16), tensionarea straturilor fără rupere este o etapă foarte scurtă; pe această simulare, doar la momentul $7{,}5\times10^{-6}$ s nu se observă fire rupte, dar valorile tensiunilor echivalente ating valori mari, aproape de rupere (1520 MPa pentru stratul 2, în Fig. 3.16.a). La momentul final al simulării, se observă oprirea glonțului între staturile 4 și 5, iar pentru celelalte straturi graficul tensiunilor echivalente este aproximativ similar.



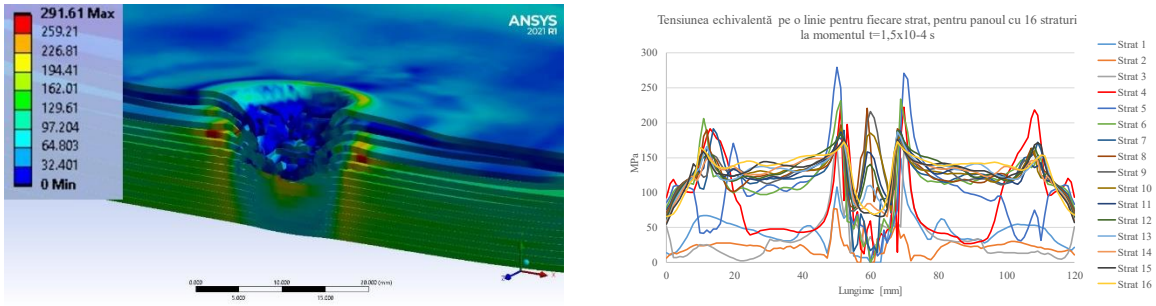
a) $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s



b) $t = 6{,}75\times10^{-5}$ s



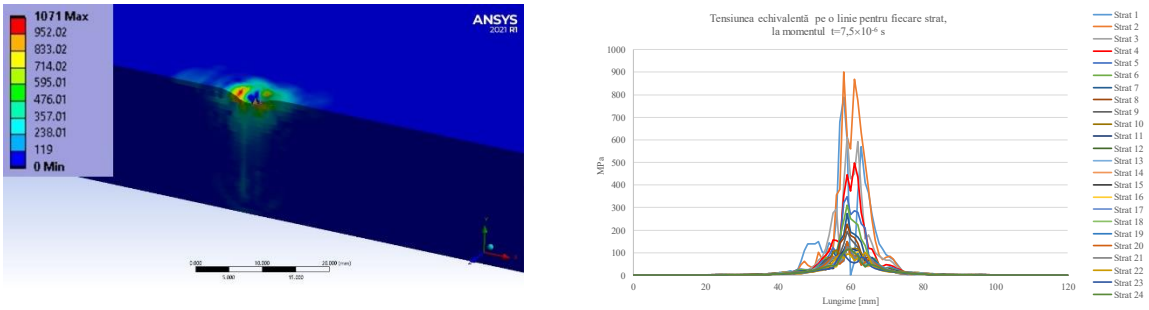
c) $t = 1{,}05\times10^{-4}$ s



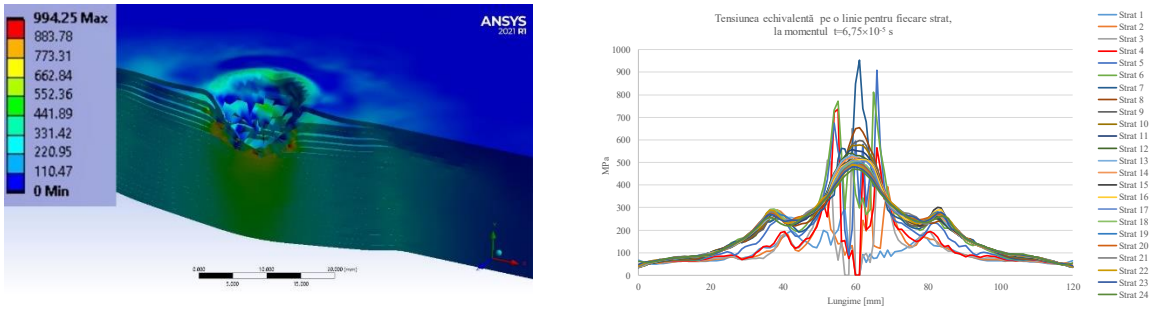
d) $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s

Fig. 3.16. Momente importante în desfășurarea procesului de impact pe panoul cu 16 straturi, cu penetrare parțială

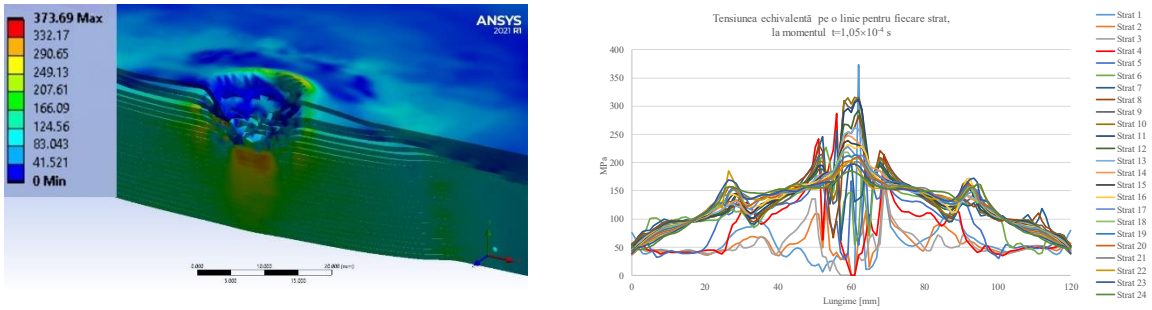
Pentru impactul pe panoul cu 24 straturi (Fig. 3.17), distribuția de tensiuni este asimetrică, în sensul că localizarea maximului nu este în aceeași zonă pe straturi succesive. La momentul final al simulării, se observă oprirea glonțului între staturile 3 și 4.



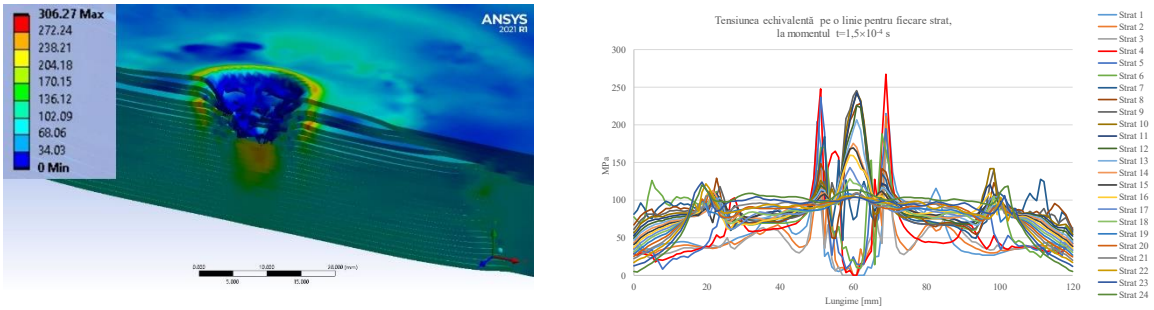
a) $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s



b) $t = 6{,}75\times10^{-5}$ s



c) $t = 1{,}05\times10^{-4}$ s

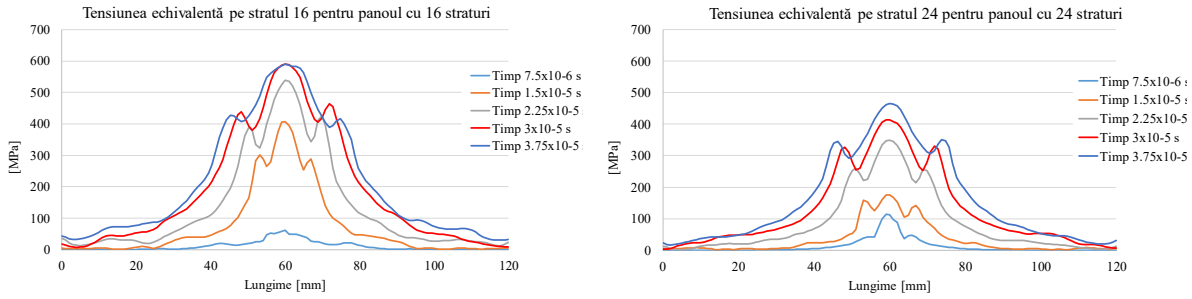


d) $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s

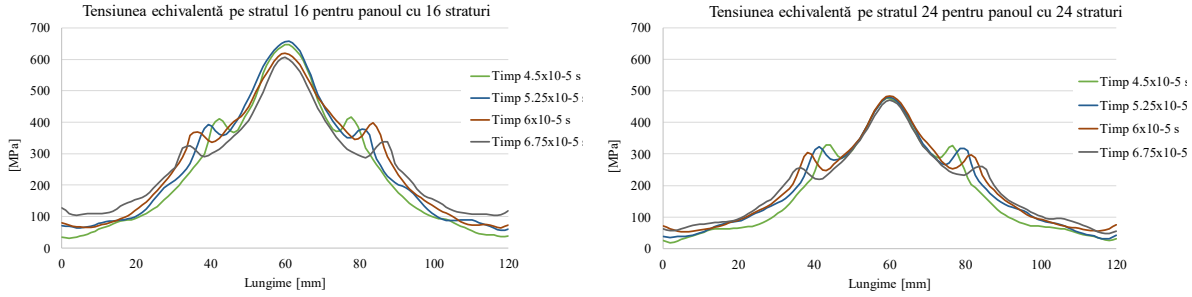
Fig. 3.17. Momente importante în desfășurarea procesului de impact pe panoul cu 24 straturi, cu penetrare parțială

Figura 3.18 prezintă gruparea graficelor tensiunii echivalente pe secțiunea ultimului strat, pentru panoul cu 16 straturi, și Figura 3.19 prezintă aceleași grafice pentru panoul cu 24 de straturi. Există asemănări și diferențe între cele două figuri, deși etapele stabilite calitativ sunt aceleași.

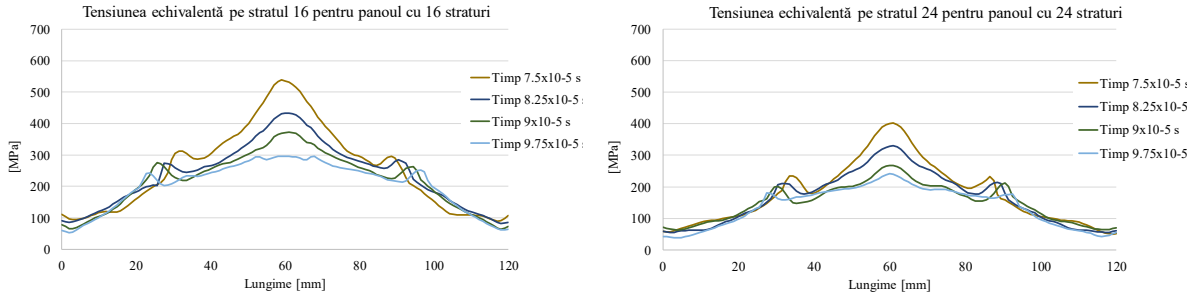
La graficele notate cu a) se observă că la primul moment al simulării ($7{,}5\times10^{-6}$ s) valoarea de maxim se obține la 24 straturi (110...115 MPa), mai mare decât la panoul de 16 straturi (60...80 MPa), probabil din cauza elasticității panoului mai subțire. Pentru ultimul moment din această etapă se constată valori mai mari la panoul cu 16 straturi (600 MPa) și 460 MPa la panoul cu 24 de straturi.



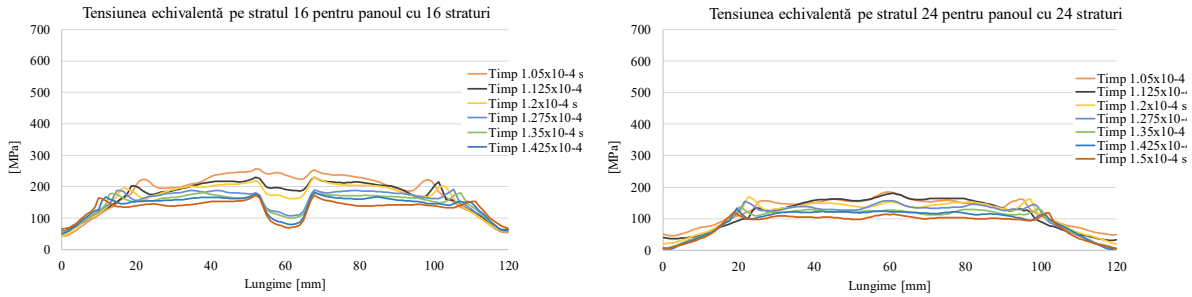
a)



b)



c)



d)

Fig. 3.18. Distribuția de tensiuni echivalente pe stratul 16 pentru panoul de 16 straturi

Fig. 3.19. Distribuția de tensiuni echivalente pe stratul 24 pentru panoul de 24 straturi

Graficele pentru următoarele două etape (b și c) se aseamănă dar, tot așa, valorile mari se obțin pe panoul cu 16 straturi.

Diferențe de formă ale graficelor apar doar în ultima etapă, panoul mai subțire având o zonă mai puțin tensionată sub proiectil.

De menționat că intervalul de timp studiat în simulare ($1{,}5\times10^{-4}$ s) nu reprezintă tot procesul de impact, adică intervalul de timp la sfârșitul căruia materialele implicate nu mai sunt tensionate sau tensionate foarte puțin (tensiuni remanente mici) și/sau corpurile sunt în repaus.

3.6.2. Influența vitezei de impact asupra panoului modelat

Testele realizate (vezi Capitolul 5) pot fi incluse în nivelul FB2 [260] [261], dar s-a observat că pentru panourile cu 16 și 24 de straturi, numărul de straturi distruse (rupte) este relativ mic, 3...4 straturi la panoul de 16 straturi (adică 18,75%...25%, din numărul de straturi), și tot atâtea straturi pentru panoul de 24 de straturi (ceea ce reprezintă (12,5%...16,6% din numărul de straturi).

Aceste valori mici sugerează că aceste panouri ar putea fi testate și la un nivel superior pentru a vedea dacă rezistă. Simularea pentru viteza medie de la nivel FB3, 420 m/s, ar putea fi utilă în sensul că rezultatele ei ar fi un punct de plecare în a stabili dacă merită sau nu să se facă teste la nivelul superior.

Figurile ce urmează (Fig. 3.20 până la Fig. 3.25) prezintă o comparație între distribuțiile de tensiuni echivalente pentru panourile cu 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, la vitezele de impact $v_0 = 375$ m/s și $v_0 = 420$ m/s.

Scopul acestei comparații este de a evalua, pe simulările rulate, dacă panourile analizate ar putea face obiectul unor teste de laborator, la un nivel superior (FB3). Din datele experimentale (vezi Capitolul 5), am observat că pentru panourile de 16 straturi și 24 straturi, „rezerva” de material sau de straturi, (adică straturile neperforate) este relativ mare și ar sugera o rezistență balistică la amenințări mai periculoase.

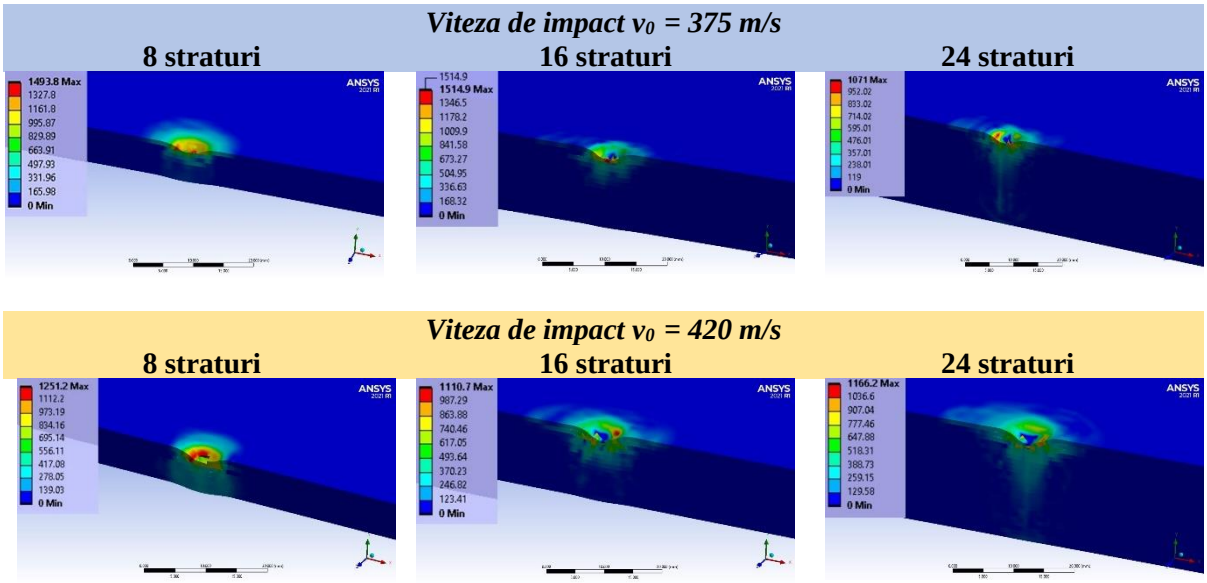


Fig. 3.20. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s

În Figura 3.20 sunt date distribuțiile de tensiuni echivalente la primul moment al simulării ($t = 7{,}5\times10^{-6}$ s). Creșterea vitezei a dus la modificări substanțiale ale distribuției de tensiuni, dar și ale distrugerilor provocate de același proiectil.

Pentru panoul cu 8 straturi, viteza mai mare a indus deja ruperea primului strat și inițierea de delaminări mici, ca dimensiune, între straturile 1-2 și 2-3. La viteza mai mică, ultimele 4 straturi nu sunt tensionate încă, pe când la $v_0 = 420$ m/s, se observă o distribuție cilindrică de tensiuni, de ordinul 100-200 MPa, până la ultimul strat.

Această mărire a zonelor mai solicitate se observă și pe panourile cu 16 straturi și 24 straturi. Delaminarea este mai pronunțată la viteza mai mare și apare între mai multe straturi (1-2, 2-3).

La momentul $t = 3{,}75\times10^{-5}$ s, diferențele de aspect ale cedării materialului țintei sunt mai pronunțate. La panoul cu 8 straturi, ruperea straturilor se face cu o fragmentare mai măruntă la viteza mai mare, delaminarea este mai pronunțată și deplasarea pe direcția impactului a ultimilor straturi este mai mare (Fig. 3.21). Se inițiază delaminarea, chiar și între ultimele straturi, la viteza mai mică, aceasta nefiind vizibilă la panourile mai groase. La acest moment, numărul de straturi rupte este de 3 straturi pentru $v_0 = 375$ m/s, dar la 420 m/s numai 2 straturi sunt fără rupere.

Pentru panourile mai groase, se observă tendința glonțului de a rupe mai puține straturi, la acest moment, comparativ cu panoul de 8 straturi. Diferența fiind că, la viteza mai mică, numărul de straturi rupte este mai mic. Delaminarea nu mai este vizibilă pe straturile inferioare, dar separarea între straturi este mai mare la viteza mai mare.

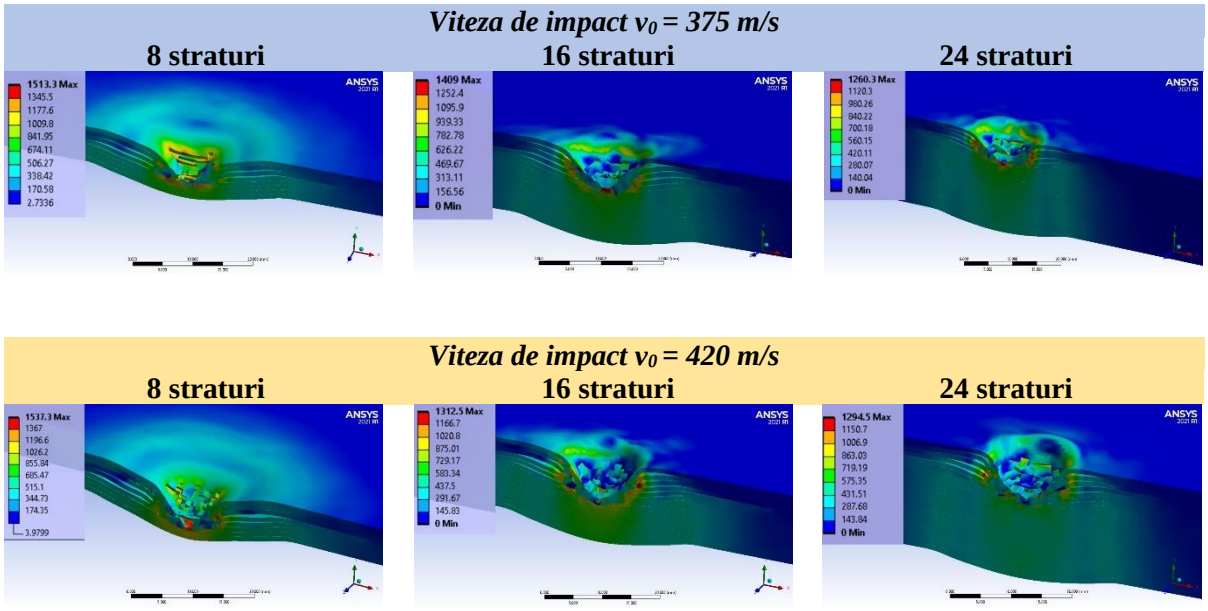


Fig. 3.21. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul $t = 3{,}75\times10^{-5}$ s

La momentul $t = 6\times10^{-5}$ s (Fig. 3.22), la panoul cu 8 straturi, diferența de aspect al distrugerilor este mare, la viteza mică încă nu s-au rupt ultimele 2 straturi, pe când la viteza mai mare, deja există penetrare totală și delaminare între toate straturile. Tot aici apar

concentratori locali de tensiune, din cauză că proiectilul deformat și fragmentat agață unul sau 2 straturi pe traiectoria lui, provocând încovoieri ale fragmentelor de strat.

Pentru panourile mai groase, diferența constă în dezvoltarea delaminării, în planul panoului, iar proiectilul a distrus 1-2 straturi în plus pentru viteza mai mare.

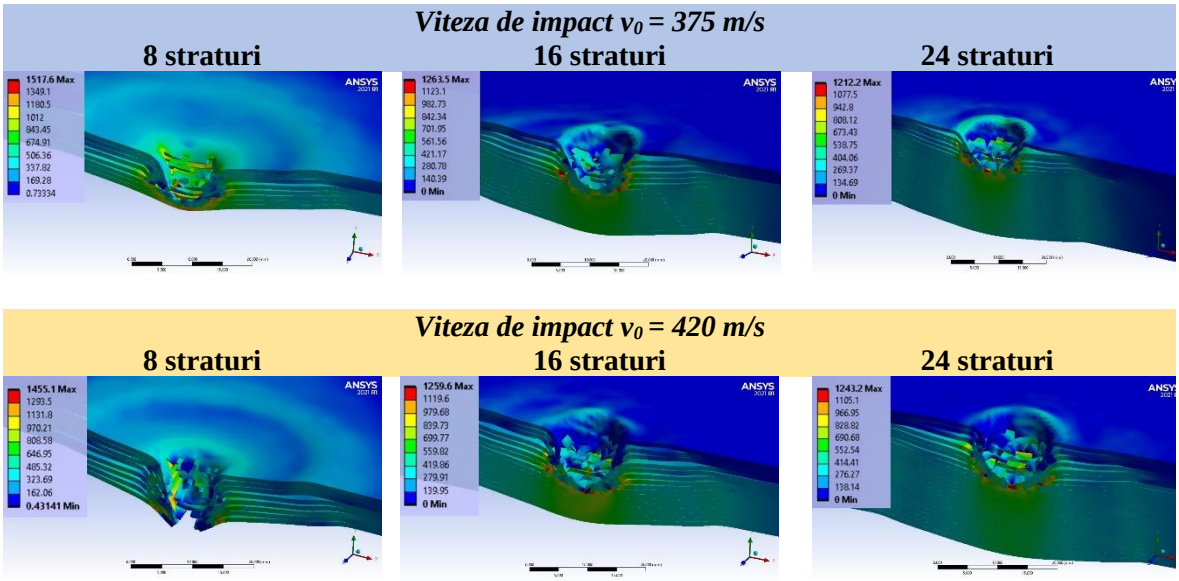


Fig. 3.22. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul t = 6×10^{-5} s

Pentru $t = 7{,}5\times10^{-5}$ s (Fig. 3.23), panoul de 8 straturi este deja perforat în întregime, dar la viteza mai mare, distrugerea este mai agresivă, iar orificiul de trecere este mai mare. Tot la această viteză apar încovoieri mai mari ale ultimelor straturi din spatele panoului. Pentru panoul cu 16 straturi, viteza mai mică a distrus 6 straturi, iar viteza de 420 m/s a distrus 8 straturi.

Se păstrează aceeași tendință și pentru panoul cu 24 de straturi (4 straturi rupte la v_0 = 375 m/s, și la v_0 = 420 m/s sunt 6 straturi rupte).

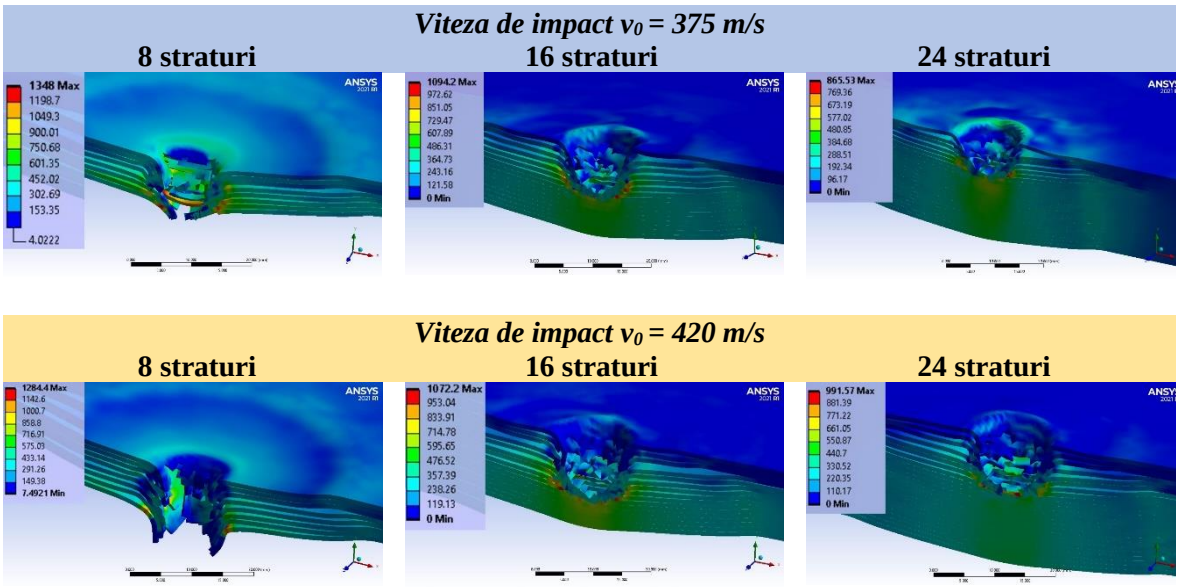


Fig. 3.23. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul t = $7{,}5\times10^{-5}$ s

Pentru momentul t = 9,75×10^{-5} s (Fig. 3.24), pentru panourile cu 16 straturi și 24 straturi, se poate spune că glonțul a fost deja oprit pentru viteza de impact de 375 m/s, pentru că nu mai apar straturi distruse, iar maximile de tensiune echivalentă sunt sub limita de curgere considerată pentru materialul stratului. Pentru viteza mai mare, tensiunile echivalente depășesc limita de curgere pentru panoul cu 16 straturi, dar la panoul cu 24 straturi cea mai mare tensiune echivalentă înregistrată la acest moment este de doar 416 MPa. Dezvoltarea delaminărilor continuă pentru ambele panouri.

Pentru panoul cu 8 straturi, la viteza mică, glonțul încă se mai freacă de ultimele straturi, pe când la viteza mai mare, acesta a părăsit zona de contact cu panoul.

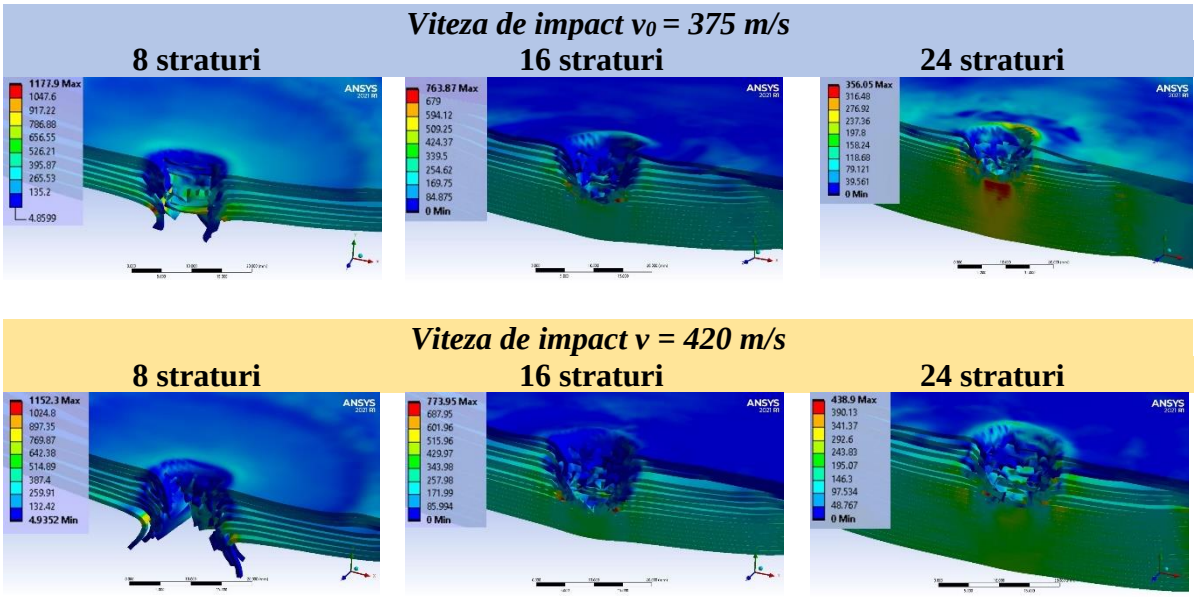


Fig. 3.24. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul t = 9,75×10^{-5} s

Analiza ultimului moment al simulării (Fig. 3.25) arată tensiuni sub limita de curgere pentru ambele viteze și toate panourile, dar momentul surprinde fragmentarea ultimelor straturi pentru viteza mai mare (la panoul cu 8 straturi).

Pentru panourile cu penetrare parțială, diferențele de aspect sunt foarte importante.

Panoul cu 16 straturi are, la viteza de impact de 375 m/s, 5 straturi distruse, ceea ce reprezintă 31,2% din grosimea lui. La viteza de 420 m/s, același panou a avut distruse 12 straturi, ceea ce reprezintă 75% din grosimea lui. În unele referințe [66], se consideră recomandabil un panou dacă „rezerva” acestuia (materialul rămas intact) este în jur de 30% din grosimea lui. Ar rezulta că acest panou de 16 straturi nu ar fi recomandabil, sau ar trebui făcute mai multe teste, astfel încât să confirme sau să infirme simularea. Luând în considerare aceleași criterii, panoul cu 24 straturi ar face față proiectilului cu viteză superioară, deoarece straturile rupte reprezintă doar 25% din grosimea panoului (la viteza de impact de 420 m/s).

Conform rezultatelor din simulare este probabil ca un panou cu un număr mai mic de straturi (20-22 straturi) să îndeplinească și el cerințele de protecție la viteza de v_0 = 420 m/s, dar să aibă o densitate de suprafață mai mică. Trebuie subliniat că aceste rezultate din modelare nu pot fi puse în practică decât după încercări în laborator, conform standardelor în vigoare

[260], [261], extrapolarea rezultatelor de la modelare direct la produs nefiind acceptată în acest domeniu de mare risc.

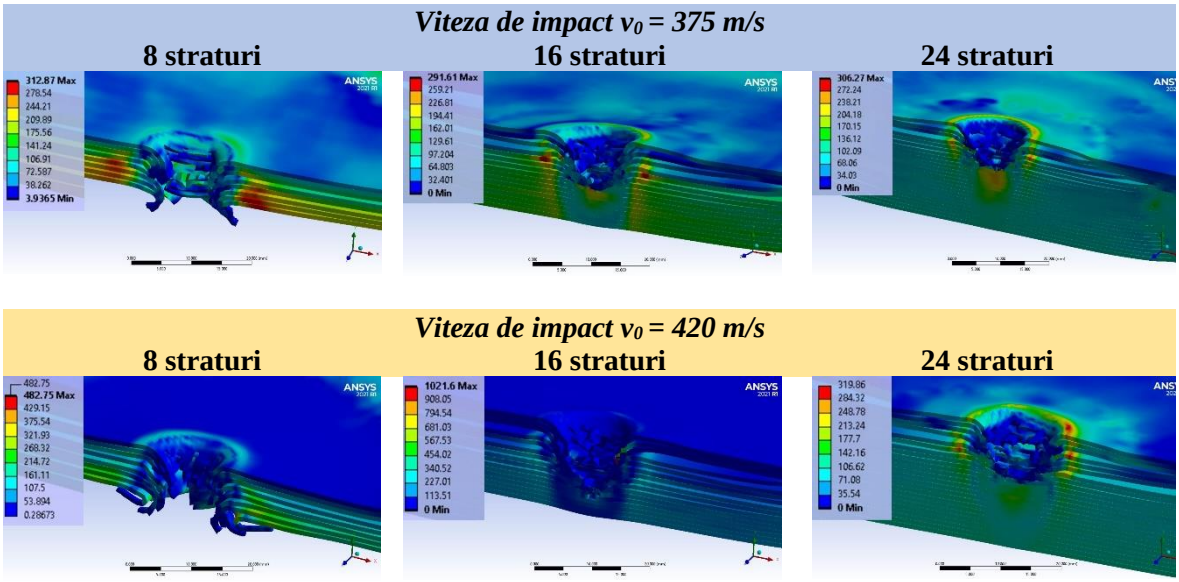


Fig. 3.25. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s

3.6.3. Evaluarea prin simulare a unui interval de grosimi de panou, pentru v_0 = 375 m/s

Scopul acestei analize este de a argumenta o soluție intermediară între două soluții deja modelate și confirmate prin teste de laborator. Ideea este că ar fi de dorit o densitate de suprafață cât mai mică, fără a afecta calitatea răspunsului panoului la amenințări.

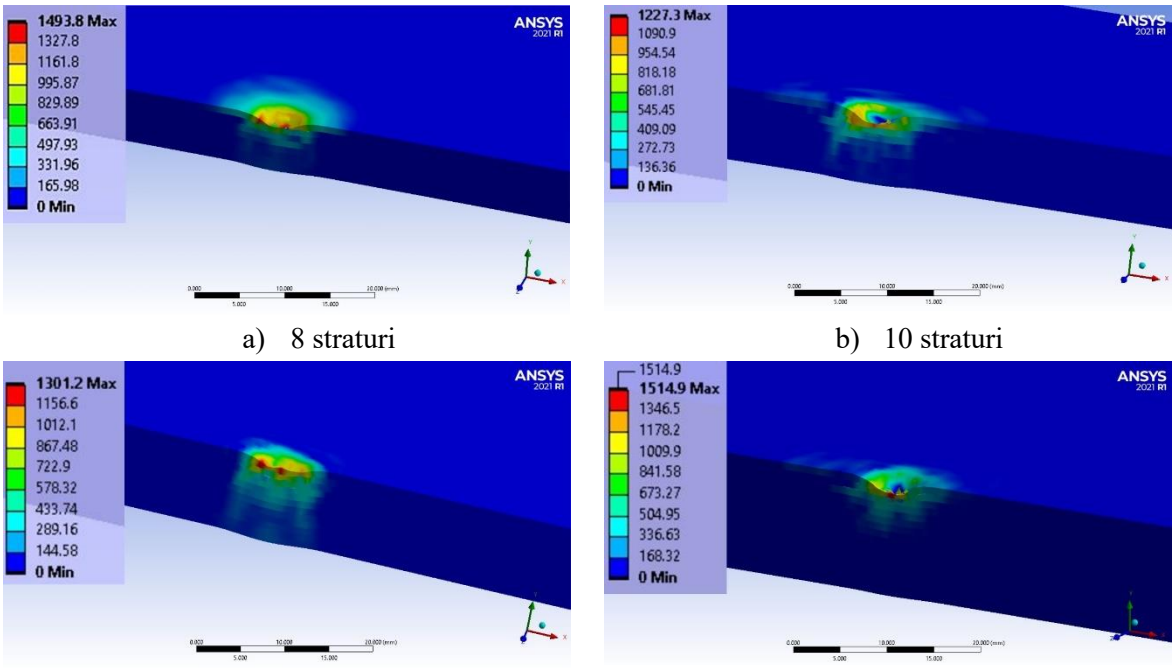
Experimental și numeric, există două variante de panou cu comportări extreme:

- panoul de 8 straturi, care are penetrare totală (inacceptabil din punct de vedere al rezistenței balistice);
- panoul de 16 straturi care a rezistat bine și la încercările de laborator și a cărui distrugere este simulată cu un grad mare de verosimilitate.

Întrebarea la care ar răspunde această analiză este: există în intervalul 8…16 straturi, un panou care să aibă un număr mai mic de straturi decât 16, dar care să aibă performanțele unui panou care să merite să fie încercat în laborator și apoi ca prototip? Având în vedere spațiul acordat acestui subcapitol, am simulat și impactul panourilor cu 10 straturi, respectiv 12 straturi, pentru a vedea care dintre acestea ar putea fi un candidat pentru realizare la scară de laborator.

Următoarele figuri prezintă comparativ, la același moment din simulare, panoul, glonțul fiind transparent pentru a se observa mai bine modurile de cedare ale panourilor.

La primul moment al simulării impactului ($t = 7{,}5\times10^{-6}$ s), distribuția de tensiuni echivalente este similară în sensul creării de zone locale cu valori mari ale tensiunii (Fig. 3.26).

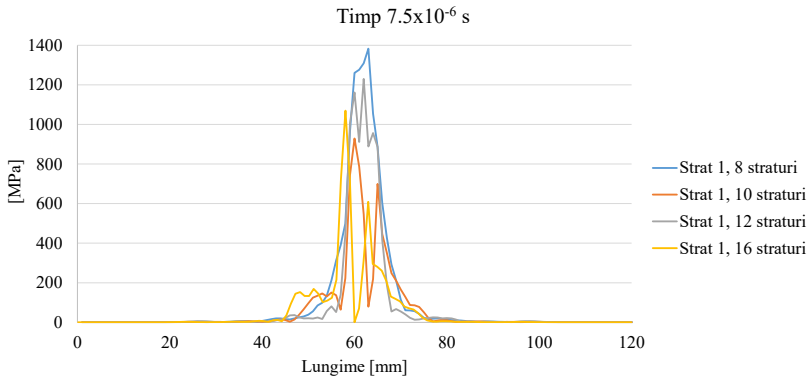


a) 8 straturi b) 10 straturi

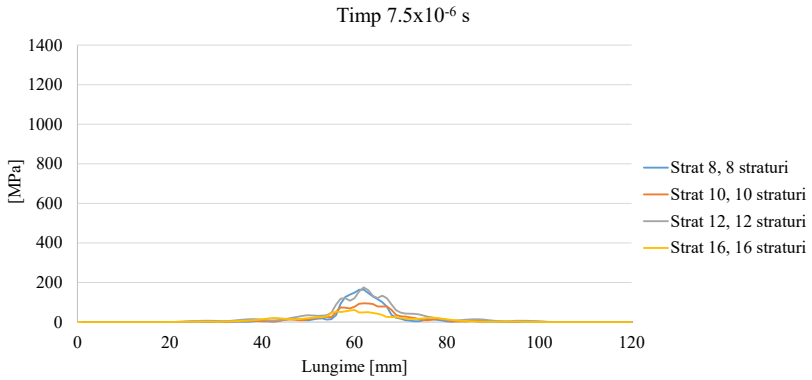
c) 12 straturi d) 16 straturi

Fig. 3.26. Distribuția de tensiuni echivalente (în MPa) la momentul $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s pentru panouri cu diferite numere de straturi

Aceste valori ale tensiunii echivalente se observă mai bine pe graficele pentru stratul 1 de pe fiecare panou, date în Fig. 3.27. Latura fiecărui strat al modelului este de 120 mm, valoarea de 60 mm fiind chiar în dreptul axei proiectilului, și care coincide cu direcția de impact (perpendiculară pe suprafața panoului). Panourile mai groase (n = 12 straturi și n = 16 straturi) au minime în zona de lovire. Atingerea valorii de zero (pentru panoul cu n = 16) sugerează ruperea stratului, iar valori puțin mai mari ca zero (60…70 MPa pentru panoul cu 10 straturi) arată că momentul ruperii este în jurul momentului de timp redat de simulare. Pentru unele straturi, este posibil ca ruperea să nu fie poziționată în planul de simetrie analizat. Pentru panoul cu n = 8 straturi și n = 12 straturi, valorile tensiunii echivalente sunt mari, sugerând că ruperea încă nu s-a realizat în secțiunea analizată.



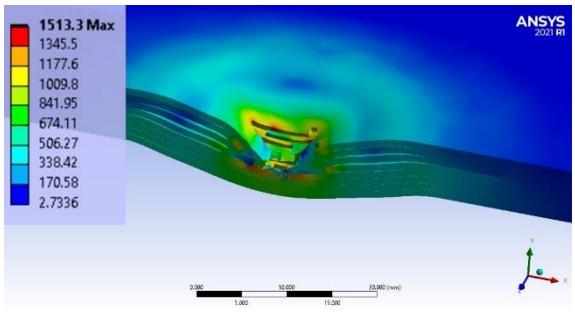
a) Stratul 1



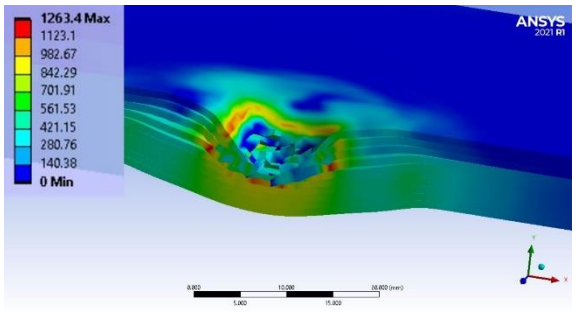
b) Ultimul strat

Fig. 3.27. Graficul tensiunilor echivalente pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b), pentru panouri cu diferite numere de straturi, la momentul $t = 7{,}5\times10^{-6}$ s

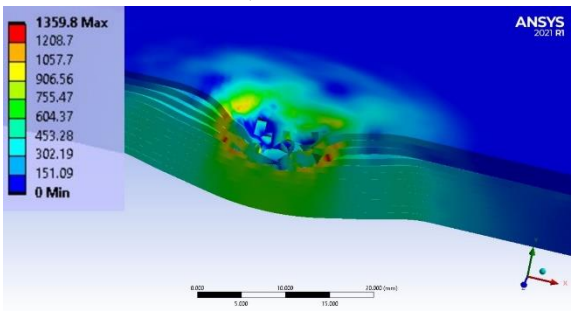
La momentul $t = 3{,}75\times10^{-5}$ s, (Fig. 3.28 și Fig. 3.29), valori maxime sunt la marginea contactului dintre proiectil și panou, cu excepția panoului cu n = 16 straturi. Valorile maximelor depășesc limita de curgere asociată materialului stratului (550 MPa). Micro-zonele de culoare roșie (valori maxime) sunt fie sub proiectil, fie lateral din cauză că proiectilul presează și împinge lateral straturile. Cu excepția panoului cu n = 16 straturi, celelalte panouri dezvoltă maxime de 700…800 MPa. Delaminarea există pe toate panourile.



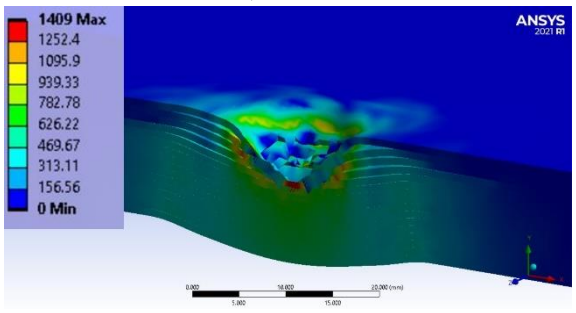
a) 8 straturi



b) 10 straturi

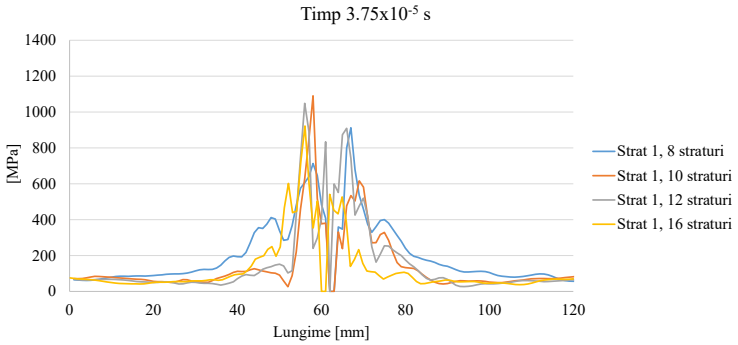


c) 12 straturi

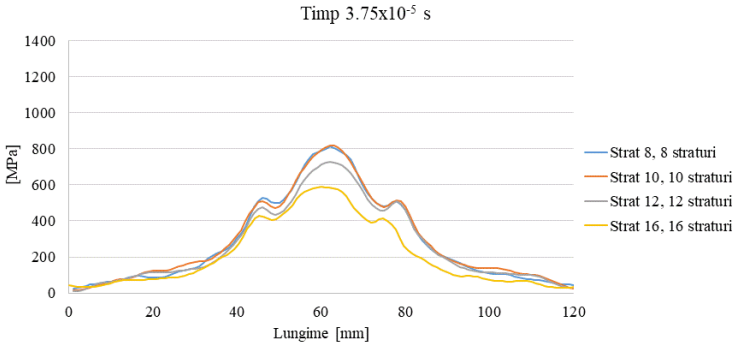


d) 16 straturi

Fig. 3.28. Distribuția de tensiuni echivalente (în MPa) la momentul $t = 3{,}75\times10^{-5}$ s, pentru panouri cu diferite numere de straturi



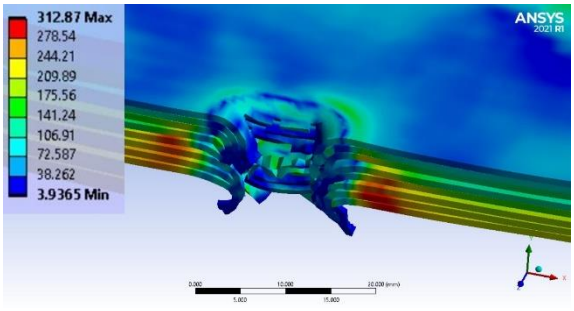
a) Stratul 1



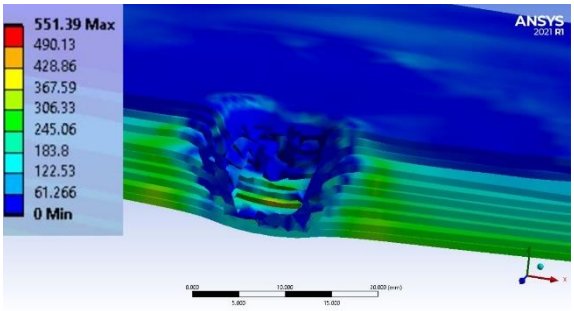
b) Ultimul strat

Fig. 3.29. Graficul tensiunilor echivalente pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b) pentru panouri cu diferite numere de straturi, la momentul $t = 3{,}75\times10^{-5}$ s

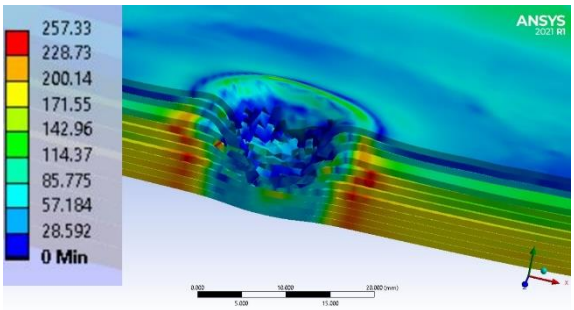
La momentul final, Fig. 3.30 și Fig. 3.31, tensiunile scad și pe primul strat și pe ultimul.



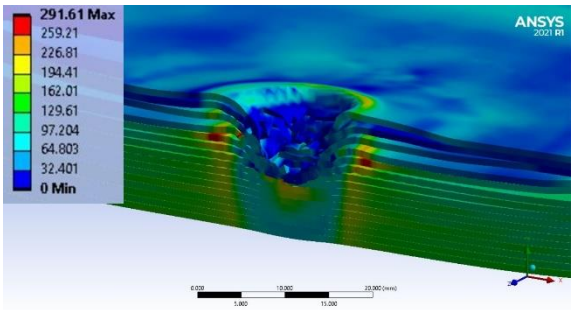
a) 8 straturi



b) 10 straturi



c) 12 straturi



d) 16 straturi

Fig. 3.30. Distribuția de tensiuni echivalente (în MPa) la momentul $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s, pentru panouri cu diferite numere de straturi

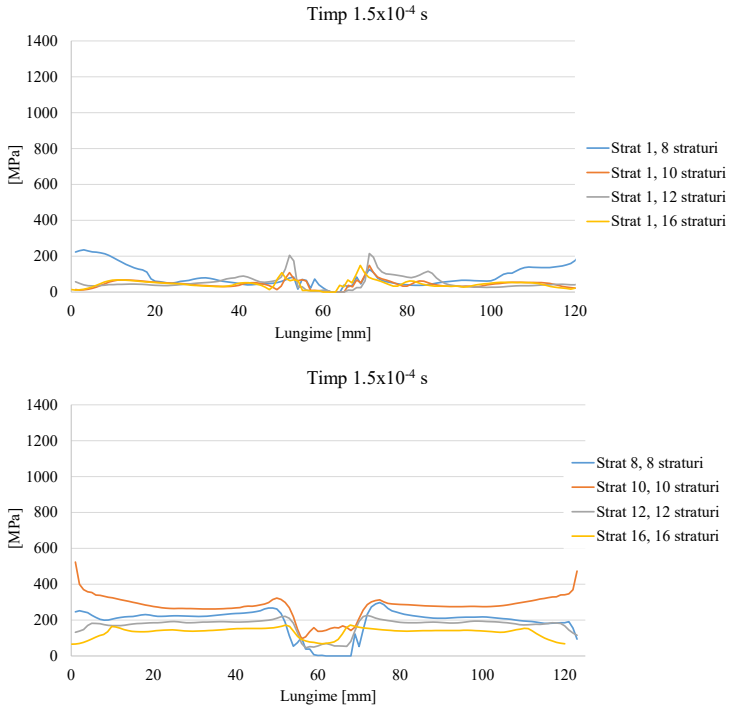


Fig. 3.31. Distribuția de tensiuni echivalente (în MPa) pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b), la momentul $t = 1{,}5\times10^{-4}$ s

3.7. Concluzii

Acest capitol a prezentat un model de impact panou stratificat – proiectil, la nivel macro, cu următoarele aspecte:

– toate corpurile și materialele implicate sunt în domeniul elasto-plastic, cu criteriu de cedare EPS (equivalent plastic strain - deformație plastică echivalentă) [68], [155]; multe referințe [57], [61] au unul din corpuri (proiectilul, cel mai adesea) considerat rigid, ceea ce modifică răspunsul la impact substanțial; de aceea simulările cu toate corpurile deformabile sunt mai realiste, dar trebuie realizate cu o atenție deosebită; simularea cu țintă rigidă poate evidenția modul de distrugere a unui proiectil deformabil [226];

– s-a modelat delaminarea, ținând seama de referințe pentru modelul zonei coezive [64], [107], [108], [130], [249], și de modul în care poate genera solverul selectat (*Ansys Explicit Dynamics*) această cedare;

– s-au identificat etape pentru penetrarea totală și penetrarea parțială;

– s-au realizat simulări pentru panourile testate în laborator și s-a validat modelul pe criteriul numărului de straturi rupte (±1 strat) și mărimea delaminării pe spatele panoului;

– s-au simulat cazuri pentru grosimi intermediare între 8 straturi și 16 straturi pentru că, din rezultatele testelor de laborator, s-a constatat o „rezervă” de rezistență la impact, în sensul stabilirii la nivel de modelare a unor grosimi eficace, dar mai mici pentru aceiași amenințare;

– numai pentru această lucrare, fără a lua în considerare modele și rulări anterioare stabilirii acestora, însumate, s-au rulat 5 cazuri la viteza de 375 m/s, viteză care a fost viteza

medie a încercărilor realizate în laborator, și 3 cazuri la viteza de 420 m/s, viteză caracteristică pentru nivel FB3, cu aceiași muniție;

– o comparație între placa cu 8 straturi, care are penetrare completă, și placa cu 16 straturi care are penetrare parțială (4...5 straturi rupte, ca și în încercarea reală).

Din rezultatele obținute pentru aceste rulări, s-au putut formula următoarele concluzii:

– deși modelul de material al stratului a fost simplificat la un model biliniar izotrop cu durificare, pe baza datelor din literatură, rezultatele obținute pentru parametrii cu care s-au efectuat testele reale au fost validate prin numărul de straturi distruse pentru plăcile cu penetrare parțială și prin mărimea delaminării pe spatele ultimului strat;

– din analiza tensiunilor echivalente la diferite momente și pe diferite straturi s-au putut distinge etapele impactului pentru penetrare totală și penetrare parțială;

– pe baza rezultatelor pentru panouri modelate și testate în laborator, s-au rulat cazuri cu grosimi intermediare (sau număr de straturi) între panouri, cu 8 straturi și cu 16 straturi; s-au rulat simulări pentru panouri de 10 straturi și 12 straturi, din care a rezultat o soluție numerică care ar putea fi validată prin încercare de laborator și care să ofere o protecție balistică bună, dar cu densitate de suprafață (și, implicit, grosimea panoului) mai mică;

– același model a fost rulat pentru condiții specifice nivelului FB3, pentru grosimi de 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, din care a rezultat că ultimul panou ar putea să reziste foarte bine la următorul nivel, cu același proiectil, dar de viteză mai mare (420 m/s).

Tabelul 3.7 prezintă informații referitoare la dimensiunea delaminărilor pe panourile testate în laborator și dimensiunile delaminărilor măsurate pe simulări. Se observă că cea mai mare diferență, de 29,4% față de valoarea măsurată pe panoul testat, s-a obținut pentru panoul cu 8 straturi, cu penetrare totală. Această diferență ar fi putut rezulta din cauza elasticității mai mari a panoului real și a faptului că, la trecerea glonțului prin ultimele straturi, desprinderea dintre ele a fost mai severă. Pentru panoul cu 16 straturi, s-a obținut o diferență mai mică de 10,1%, între panoul real și cel simulat, valoare acceptabilă în condiții de simulare la nivel macro. Pentru panoul mai gros, de 24 straturi, diferența între panoul testat și panoul simulat la impact a fost de 14,4%, rezultatele fiind rezonabil de apropiate pentru a utiliza modelul de material și în alte simulări, în intervale nu foarte mari ale parametrilor (număr de straturi, viteza de impact).

Tabelul 3.7. Diametre ale cercurilor de delaminare pe eșantioanele testate, măsurate pe spatele panourilor

Panoul	**Grosimea plăcii (medie)**	**Diametrul 1 focul 1**	**Diametrul 2 focul 2**	**Diametrul 3 focul 3**	**Media valorilor**	**Diametrul din modelare**
	[mm]					
8 straturi	6,37	165	165,9	158,09	**162,99**	**117,04**
16 straturi	12,49	105,86	111,5	108,62	**108,66**	**100,19**
24 straturi	18,26	102,17	100,6	98,14	**100,3**	**86,1**

Capitolul 4. Tehnologia la scară de laborator a panourilor de protecție balistică

4.1. Analiza soluțiilor tehnologice pentru plăci compozite / stratificate de protecție balistică

Structura unui panou de protecție balistică cuprinde un număr de straturi de țesături, asamblate prin lipire și presare. Stratul poate fi o țesătură simplă 2D, o folie (cum este cazul materialelor din UHMWPE) [8] sau poate fi alcătuit dintr-o țesătură multiaxială. Numărul de straturi dintr-un asemenea compozit nu este singurul factor după care se poate aprecia performanța pachetului balistic.

Un blindaj din compozit este alcătuit din straturi succesive din materiale identice sau diferite, în general alcătuit dintr-o matrice (metalică, polimerică), și elemente de ranforsare (metalice, sub formă de fire de natură metalică, ceramică sau polimerică, sau sub formă de pulbere), cu scopul de a opri penetrarea proiectilelor. Sunt mai ușoare decât variantele echivalente, realizate numai din oțel. Unele soluții sunt mai voluminoase, iar costul poate fi mai mare. Prima variantă de acest tip de blindaj a fost folosită pentru tunul tancului sovietic T-64, care avea un material stratificat cu oțel cu miez de material plastic ranforsat cu fibre de sticlă, compozitul fiind turnat sub presiune. Au apărut versiuni de blindaj compozit sub forma de blocuri care pot fi aplicate și vehiculelor de luptă și logistică ușoare, fiind ușor demontabile, interschimbabile sau înlocuibile [257].

Naresh și alții [171] au format un compozit din țesătură din fibre de sticlă E, 1/1, cu 610 g/m^2, de la Shakthi, Chennai, India și rășină epoxidică bi-component (Araldite -LY556 și întăritor HY951). Raportul masic fibre/rășină a fost 1:1, iar raportul masic rășină/întăritor a fost 10:1. Laminatele au avut 300 mm x 300 mm, cu o grosime de 2 mm și au fost obținute prin tehnica de comprimare în matriță. Toate straturile au avut orientări (0º, 90º). Fiecare are o grosime de 0,4 mm. Au folosit distanțiere pentru a menține grosimea de 2 mm a pachetului.

4.2. Materialele implicate

4.2.1. Fibra de sticlă și țesătura de fibre de sticlă

Poziționarea sticlei și a țesăturilor pe bază de fibre de sticlă, într-un spațiu cu coordonate de interes în aplicații balistice sau la impact, este dată în Fig. 4.1. În abscisă este dată viteza undei longitudinale prin material, iar în ordonată energia absorbită pe unitatea de masă. Se observă o poziționare intermediară a materialelor pe bază de sticlă. Alegerea unui compozit pentru o aplicație specificată implică factori ca stabilirea componentelor unei rețete de compozit,

prelucrabilitatea acestuia și caracterizarea mecanică și termică, și/sau determinarea unor caracteristici proprii aplicației (de exemplu, tribologice, pentru impact etc.) [34], [35], [39].

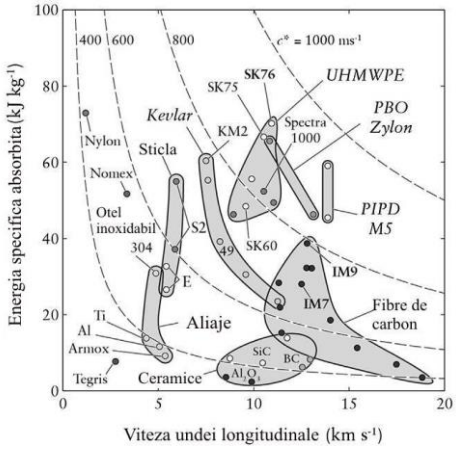


Fig. 4.1. Poziționarea sticlei și a țesăturilor pe bază de fibre de sticlă într-un spațiu cu coordonate de interes [14], [74], [138]

Țesătura utilizată în acest studiu este stratificată în patru substraturi, cu orientare (0°/+45°/90°/-45°) (Fig. 4.2), ceea ce presupune că țesătura va avea o comportare cvasi-izotropă. Denumirea comercială este 1200 g/m^2 Quatriaxial Glass Cloth (0°/+45°/90°/-45°) 127, având codul WTVQX1200-1 E-glass Q1200E10Q, și a fost achiziționată de la firma Castro Composites [268]. În Tabelul 4.1, este detaliată construcția ranforsării țesăturii. Figura 4.3 prezintă mărimea firelor și fibrelor de sticlă, măsurate la microscopul electronic. Lățimea unui fir este de ~3 mm, grosimea fiind de ~180 μm. Diametrele fibrelor de sticlă sunt aproximativ de ~15-18 μm. Rolele de țesătură de fibre de sticlă au fost păstrate în laborator, la o umiditate relativă de 40-70% și la o temperatură de 18-30°C, așa cum recomandă producătorul.

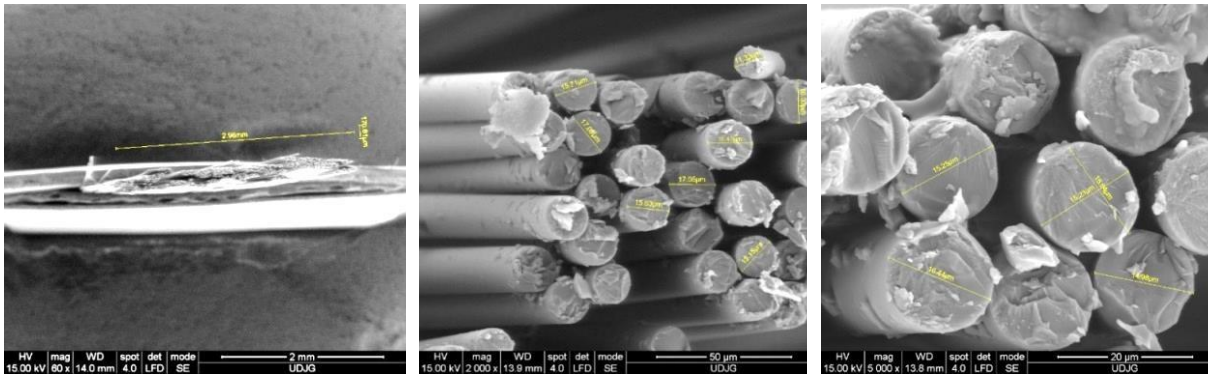


Fig. 4.2. Vedere a țesăturii selectate pentru panouri [268]

Tabelul 4.1. Caracterizarea arhitecturii țesăturii

Construcția ramforsării țesăturii			
	Strat	Tipul fibrei	Greutatea suprafeței
1.	0°	600 Tex	283 g/m^2
2.	45°	300 + 600 Tex	300 g/m^2
3.	90°	600 Tex	307 g/m^2
4.	-45°	300 + 600 Tex	300 g/m^2
5.	Fir auxiliar	76 DTex	10 g/m^2

Total: 1200 g/m^2 (±%3)



a) dimensiunile unui fir b) măsurători ale diametrelor fibrelor de sticlă

Fig. 4.3 Mărimea firelor și fibrelor de sticlă măsurate, la microscopul electronic

Figurile 4.4 - 4.16 prezintă analize elementale EDX pentru fibrele de sticlă ale țesăturii utilizate în această lucrare. S-au analizat atât secțiuni transversale prin fibră, cât și teaca fibrei, punctual sau în zone rectangulare mici (cu latura de 2…5 μm).

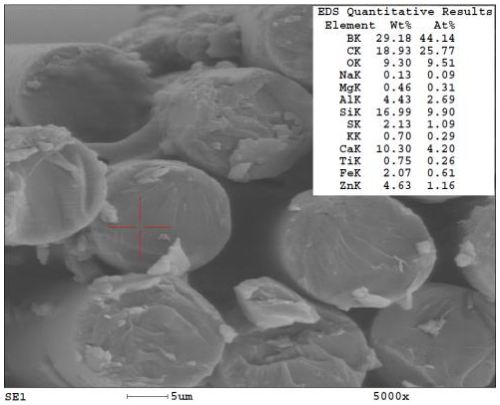


Fig. 4.4. Analiză elementală EDX, punctuală, în secțiunea fibrei de sticlă

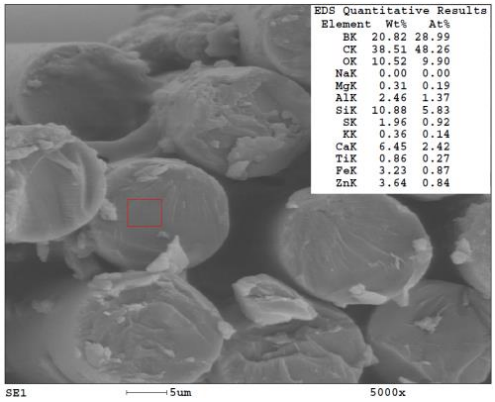


Fig. 4.5. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea fibrei de sticlă (aceeași secțiune ca în Fig. 4.4)

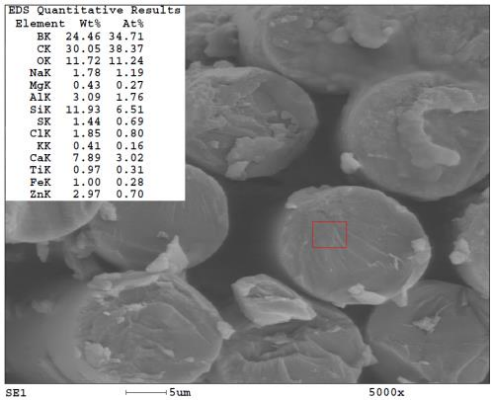


Fig. 4.6. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea unei fibre de sticlă

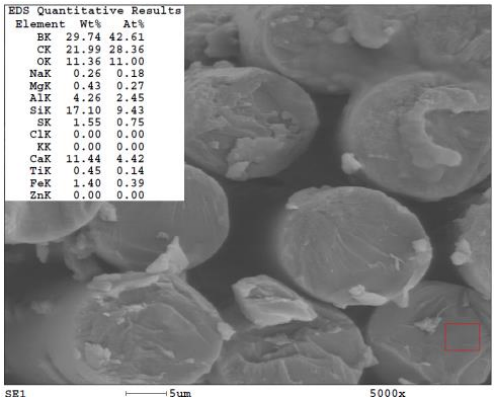


Fig. 4.7. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea unei fibre de sticlă

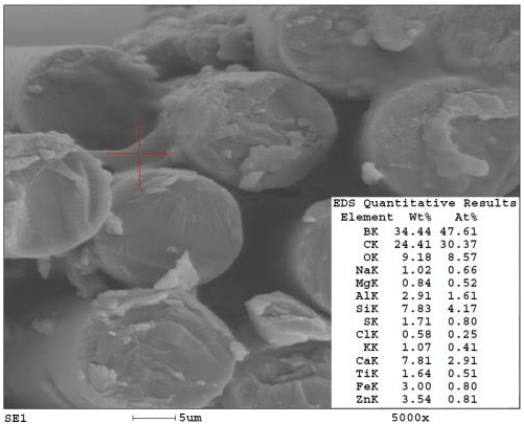


Fig. 4.8. Analiză elementală EDX, pe teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioară a fibrei)

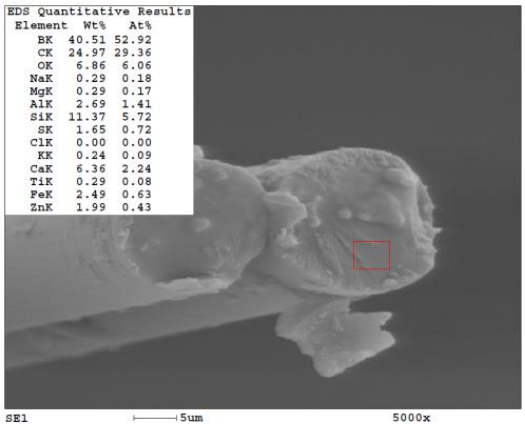


Fig. 4.9. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea unei fibre de sticlă

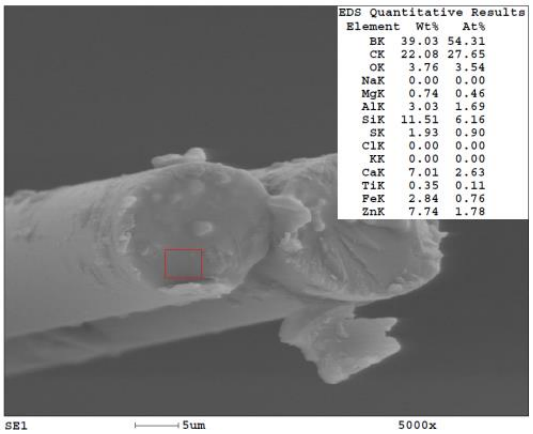


Fig. 4.10. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea unei fibre de sticlă

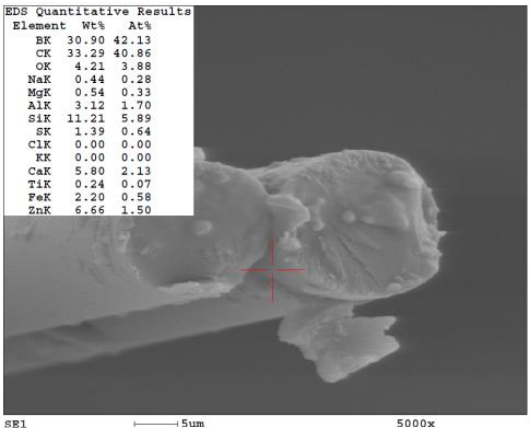


Fig. 4.11. Analiză elementală EDX, pe teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioară a fibrei)

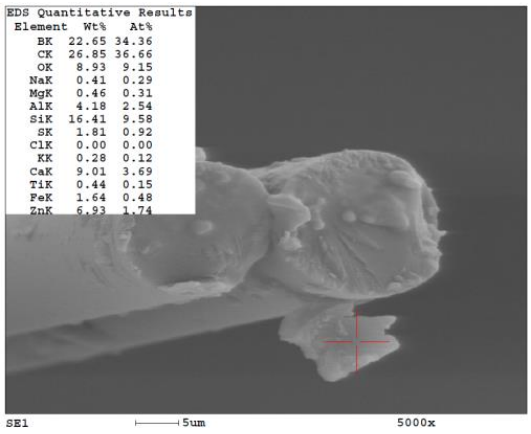


Fig. 4.12. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, pe un fragment al unei fibre de sticlă

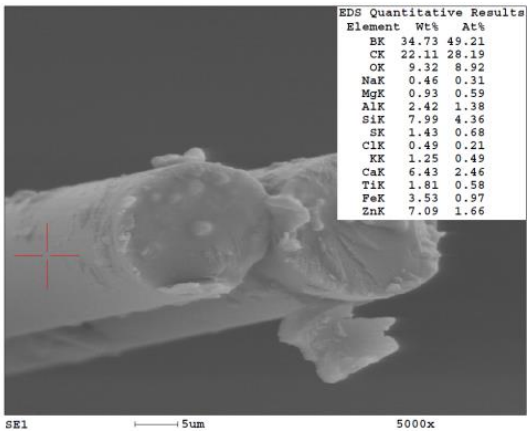


Fig. 4.13. Analiză elementală EDX, teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioară a fibrei)

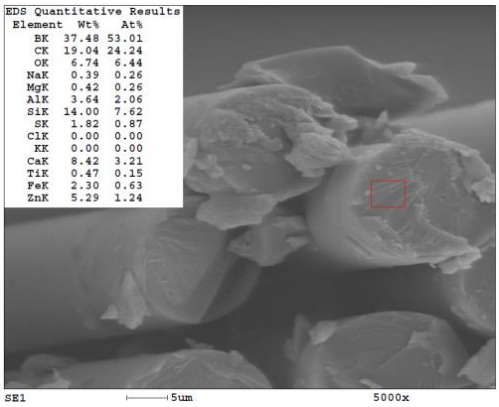


Fig. 4.14. Analiză elementală EDX, pe o micro-arie, în secțiunea unei fibre de sticlă

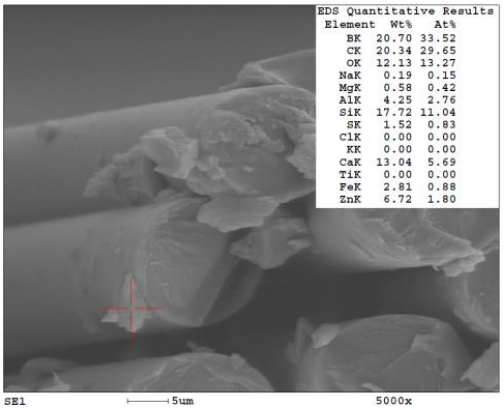


Fig. 4.15. Analiză elementală EDX, pe teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioară a fibrei)

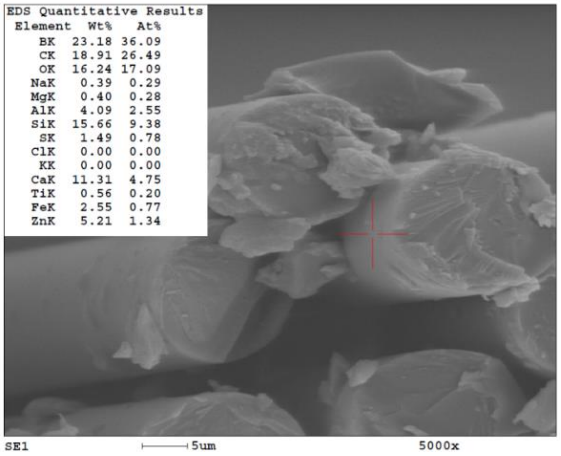


Fig. 4.16. Analiză elementală EDX, pe teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioară a fibrei)

Tabelul 4.2. Compoziția elementală a fibrei de sticlă utilizată

Cod în Fig. 4.17.	Fig.	Wt. %													
		B	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**Cl**	**K**	**Ca**	**Ti**	**Fe**	**Zn**
Secțiuni transversale prin fibră															
1	4.4	29,18	18,93	9,3	0,13	0,46	4,43	16,99	2,13	0	0,7	10,3	0,75	2,07	4,63
2	4.5	20,82	38,51	10,52	0	0	2,46	10,88	1,96	0	0,36	6,45	0,86	3,23	3,64
3	4.6	24,46	30,05	11,72	1,78	0,43	3,09	11,93	1,44	1,85	0,41	7,89	0,97	1	2,97
4	4.7	29,74	21,99	11,36	0,26	0,43	4,26	17,1	1,55	0	0	11,44	0,45	1,4	0
5	4.9	40,51	24,97	6,86	0,29	0,29	2,69	11,37	1,65	0	0,24	6,36	0,29	2,49	1,99
6	4.10	39,03	22,08	3,76	0	0,74	3,03	11,51	1,93	0	0	7,01	0,35	2,84	7,74
7	4.12	22,65	26,85	8,93	0,41	0,46	4,18	16,41	1,81	0	0,28	9,01	0,44	1,64	6,93
8	4.14	37,48	19,04	6,74	0,39	0,42	3,64	14	1,82	0	0	8,42	0,47	2,3	5,29
9	4.15	20,7	20,34	12,13	0,19	0,58	4,25	17,72	1,52	0	0	13,04	0	2,81	6,72
Secțiuni transversale prin teacă															
12	4.8	34,44	24,41	9,18	1,02	0,84	2,91	7,83	1,71	0,58	1,07	7,81	1,64	3	3,54
13	4.11	30,9	33,29	4,21	0,44	0,54	3,12	11,21	1,39	0	0	5,8	0,24	2,2	6,66
14	4.13	34,73	22,11	9,32	0,46	0,93	2,42	7,99	1,43	0,49	1,25	6,43	1,81	3,53	7,09
15	4.16	23,18	18,91	16,24	0,39	0,4	4,09	15,66	1,49	0	0	11,31	0,56	2,55	5,21

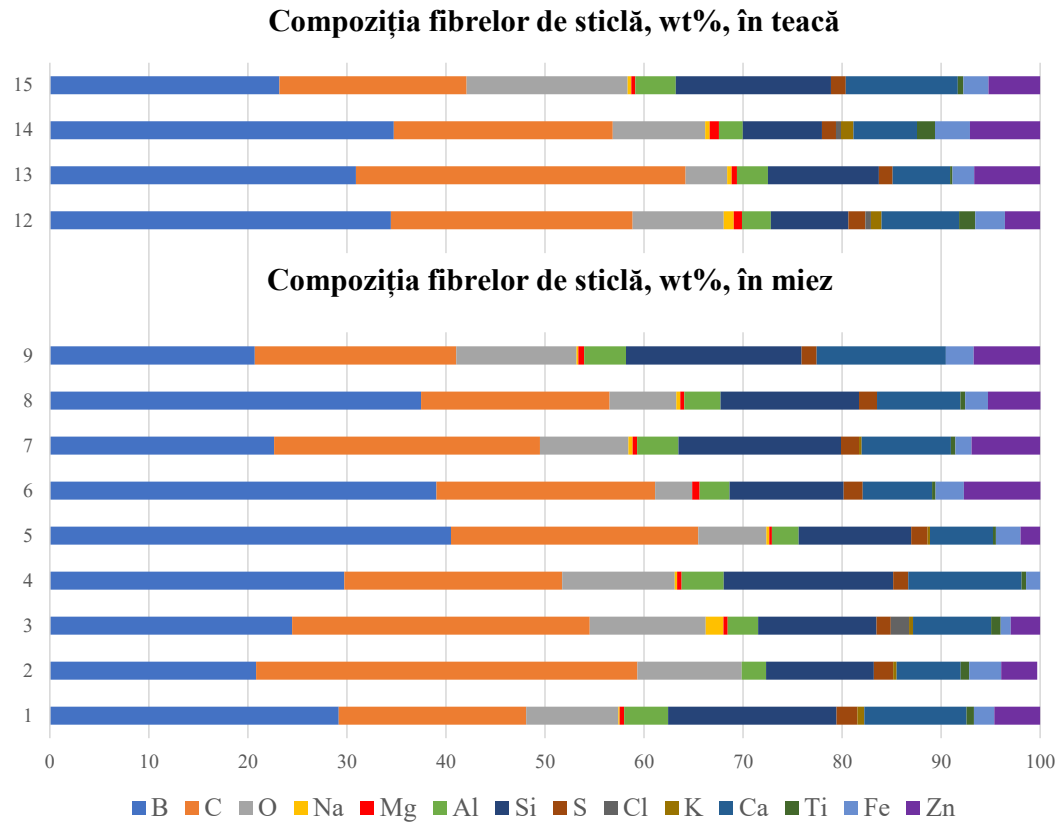


Fig. 4.17. Compoziția elementală a fibrelor de sticlă, pentru realizarea panourilor, prin analiză EDX (Explicația numerotării compozițiilor este dată în Tabelul 4.2)

Din Tabelul 4.2 și Figura 4.17, se observă că predomină borul (B), carbonul (C), aluminiu (Al), siliciu (Si) și calciu (Ca), cu urme de fier (Fe), zinc (Zn) și titan (Ti), o compoziție care ar putea fi poziționată între sticla E și sticla S, particularitatea compoziției fiind alocată zonei de extracție a materiei prime.

Rășinile compatibile cu această țesătură sunt rășini poliesterice, vinil-esterice și epoxidice. Conținutul de apă este de maxim 0,2% masic (conform SR EN ISO 3344:2002 Materiale de ranforsare. Determinarea conţinutului de umiditate.

4.2.2. Matricea de rășină epoxidică

4.2.2.1. Rășina-matrice pentru compozite cu fibre de sticlă

După o documentație în domeniul rășinilor pentru compozite cu fibră de sticlă, din experiența colectivului contractului 725/2017 [76], am selectat rășina bicomponentă Biresin® CR82 cu întăritor CH80-2 [256].

4.2.2.2. Procesarea și utilizarea rășinii

Raportul de amestecare trebuie să fie respectat cu acuratețe, așa cum este dat în fișa tehnică a rășinii pentru a obține rezultate optime. Abaterea de la aceste rapoarte va duce la

reducerea performanțelor. Valorile finale pentru proprietăți termice și mecanice depinde de ciclurile de tratament după îmbătrânire. Pensulele se recomandă să fie curățate imediat după terminarea operațiunii, cu Sika Reinigungsmittel 5. În acest studiu, s-a folosit Biresin® CR82 cu întăritor CH80-2, cu rezultate bune privind capacitatea pensulei de a fi refolosită.

Biresin® CR82 este o rășină epoxidică pentru formare prin pensulare individuală, manuală, a straturilor, pentru formare în vid și proces de înfășurare, mai ales pentru aplicații în care temperatura de tratament termic ≥ 75°C nu poate fi aplicată. Biresin® CR82 poate fi folosită în marină și compozite generale pentru industrie.

Materialul și procesarea se recomandă să fie de la 18°C la 35°C.

Toate rășinile sunt certificate de Germanischer Lloyd (Certificate No. WP 1620020 HH).

Temperatura de tranziție vitroasă până la 80°C poate fi atinsă în funcție de condițiile de întărire. Întăritorii (B) Biresin® CH80-2 și CH80-6 sunt disponibili și în culoare albăstruie.

Ciclul de întărire, adecvat valorilor caracteristicilor mecanice și termice, depinde de diverși factori, cum ar fi grosimea compozitului, volumul de fibre, reactivitatea sistemului rășină+întăritor.

Tabelul 4.3 prezintă familia de întăritori adecvați pentru rășina Biresin® CR82. Firma Sika [296] (prin PolyChem București) oferă 4 întăritori (B) cu un singur raport masic de amestecare pentru fiecare, dar recomandă un interval larg de timpi de procesare. Reactivitatea amestecului poate fi adaptată prin selectarea întăritorului.

Tabelul 4.3. Caracteristici ale rășinii Biresin® CR82 și întăritorilor utilizabili 0[256]

Caracteristici fizice		Rășină (A)	Întăritor (B)			
Componente individuale		Biresin® CR82	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2*	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10
Raport de amestecare	Masă	100	27			
Raport de amestecare	Volum		32	31	32	32
Culoare		Transparent	incolor până la galben	incolor până la galben sau albastru		incolor până la galben
Vâscozitate, 25°C	mPa.s	~1,600				
Densitate, 25°C	g/ml	1,11	0,95	0,99	0,95	0,95
			Amestec			
Potlife (durata de procesare), 100g/RT, valoare aproximativă	min		80	80	220	330
Vâscozitatea amestecului, 25°C, valoare aproximativă	mPa.s		850	600	400	390

* Întăritorul utilizat în realizarea panourilor

Un ciclu adecvat de tratament poate fi următorul:

– viteza de încălzire de aproximativ 0,2°C/min până la aproximativ 10°C sub temperatura de tranziție vitroasă cerută, Tg;

– menținere în matriță la această temperatură între 2 ore și 12 ore;

– compozitul va fi răcit cu ~0,5°C pe minut.

Tratamentul de răcire specific trebuie adaptat cerințelor tehnice și economice:

- cu întăritorii (B) Biresin® CH80-1 și CH80-2 se poate face scoaterea din matriță, la temperatura camerei;

- cu întăritorii (B) Biresin® CH80-6 și CH80-10 este necesar un tratament la 45°C înainte de scoaterea din matriță.

Figura 4.18 arată cum se dezvoltă procesul exoterm pentru rășina Biresin® CR82 cu diverși întăritori; se observă că pentru întăritorul CH80-2, ales de mine, temperatura în miezul compozitului poate atinge 200°C pe o durată de câteva minute, după care compozitul se răcește destul de repede, temperatura ambientală fiind atinsă aproximativ după 5-6 ore.

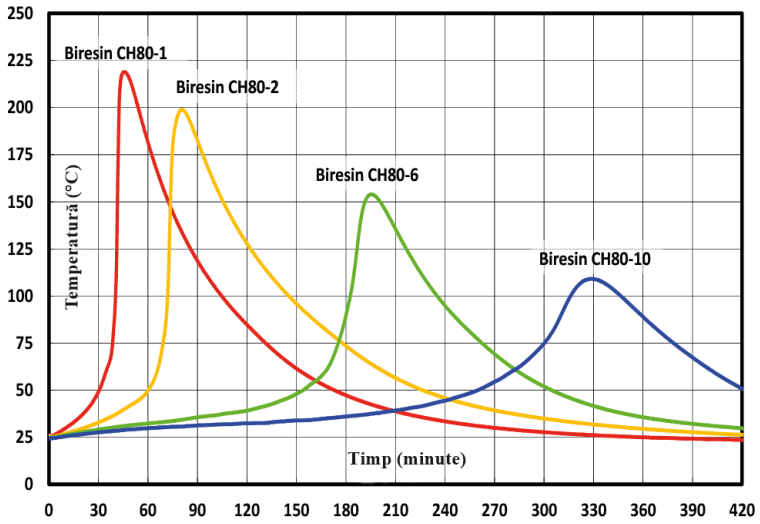


Fig. 4.18. Dezvoltarea procesului exoterm pentru amestecuri Biresin CR82 rășină A+ întăritor B, 100 g/RT, izolat termic [256]

Figura 4.19 arată modificarea în timp a vâscozității rășinii deja formate, ceea ce presupune o prelucrare destul de rapidă a compozitului în aproximativ o oră.

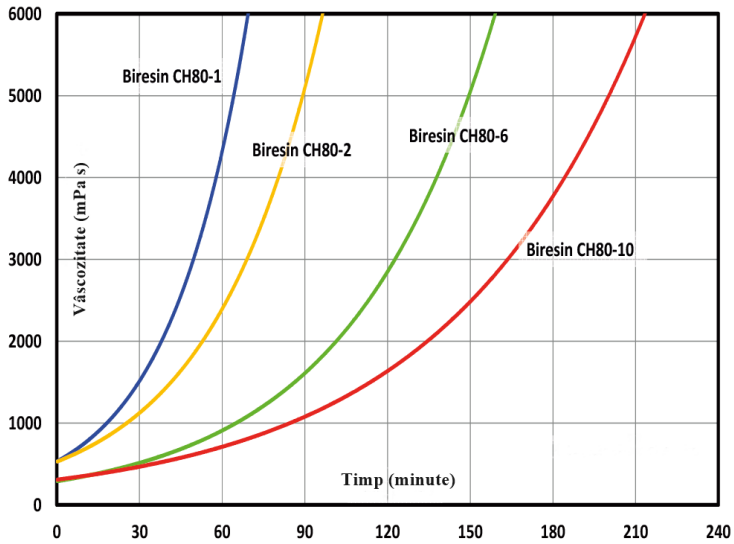


Fig. 4.19. Evoluția vâscozității pentru amestecuri Biresin CR82 rășină A+ întăritor B, 100 g/RT, izolat termic [256]

Tabelul 4.4 prezintă proprietățile mecanice și termice ale rășinii deja formate și tratate termic, și se observă că, utilizând întăritorul CH80-2, se obține o limită la tracțiune destul de mare pentru o rășină epoxidică. Nu am ales întăritorul CH80-1, care are o limită de rezistență doar cu 5% mai mare decât rășina obținută cu întăritorul CH80-2, din cauza timpului de prelucrare mai mic.

Tabelul 4.4. Proprietățile mecanice și termice ale rășinii [256]

Proprietăți mecanice tipice pentru rășina întărită complet						
Rășină **Biresin® CR82** (A)	Cu întăritor **Biresin®** (B)		**CH80-1**	**CH80-2**	**CH80-6**	**CH80-10**
Rezistența la rupere la tracțiune	ISO 527	MPa	94	90	84	82
Modulul de elasticitate la tracțiune	ISO 527	MPa	3000	3000	2900	2900
Deformația la rupere	ISO 527	%	4,9	5,6	6,4	6,2
Rezistența la încovoiere	ISO 178	MPa	140	130	127	118
Modulul de elasticitate la încovoiere	ISO 178	MPa	3300	3200	2900	2800
Rezistența la compresiune	ISO 604	MPa	120	105	110	110
Densitate	ISO 1183	g/cm^3	1,14	1,14	1,14	1,14
Duritate Shore	ISO 868	-	D 85	D 85	D 85	D 85
Rezistența la impact	ISO 179	kJ/m^2	38	66	55	56
Proprietăți termice tipice pentru rășina întărită complet						
Rășină **Biresin® CR82** (A)	Cu întăritor **Biresin®** (B)		**CH80-1**	**CH80-2**	**CH80-6**	**CH80-10**
Temperatura de deformare la cald	ISO 75A	°C	93	83	71	71
Temperatura de tranziție vitroasă	ISO 11357	°C	97	90	83	85

Durata minimă de depozitare pentru rășina Biresin® CR82 (A) este de 24 luni și întăritorii Biresin® CH80-1, CH80-2, CH80-6 și CH80-10 pot fi depozitați pentru 12 luni la temperatura camerei (18-25°C) dacă nu se deschide containerul original.

Dacă depozitarea se face la temperatură mai joasă, poate apărea cristalizarea rășinii A. Acest inconvenient poate fi ușor înlăturat prin menținerea la cel puțin 60°C un timp suficient de mare. Se recomandă utilizarea cât mai rapidă a conținutului unui container.

Diagrama din Fig. 4.20 arată modul în care se obține temperatura de tranziție vitroasă în funcție de tratamentul de stabilizare-întărire. Având în vedere posibilitățile existente în cadrul universității, am optat pentru o menținere la 60°C, timp de 6 ore, evoluția Tg fiind apropiată de curba albastră. Înainte de tratament, eșantioanele au fost îmbătrânite natural timp de 7 zile, la 23°C. Când se face tratament pentru un compozit, tot compozitul (inclusiv mijlocul laminatului) trebuie să ajungă la temperatura de tratament.

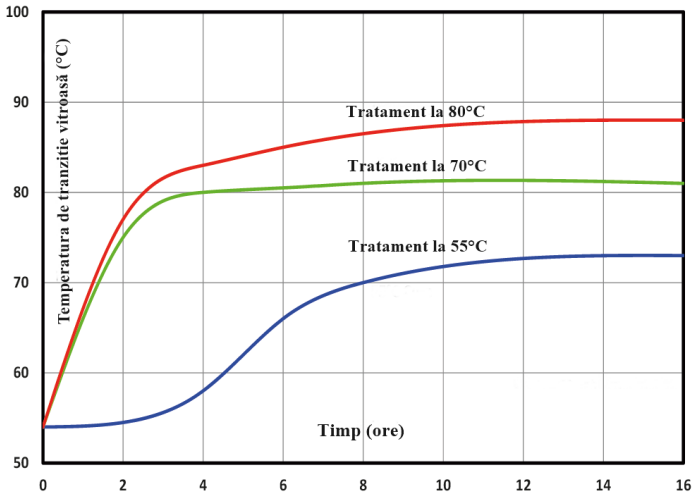


Fig. 4.20. Temperatura de tranziție vitroasă în funcție de tratamentul de stabilizare / întărire. Eșantioanele au fost produse din rășină pură, cu grosimea de 3 mm [256]

4.3. Tehnologia de laborator pentru obținerea panourilor

4.3.1 Tehnologii din documentația analizată

Fabricarea compozitelor are caracteristici particulare, avantajul acesteia fiind faptul că elimină condițiile foarte severe, specifice altor procese de prelucrare a componentelor cu destinație similară (temperaturi de topire foarte înalte, pentru ceramice și aliaje metalice, presiuni mari pentru modificarea formei, prelucrări ulterioare pentru realizarea formei dorite etc.) [7], [14], [73], [85], [92], [111], [122], [123], [143], [175], [244].

Rășinile epoxidice sunt larg utilizate ca matrice în compozitele de rezistență, cu aplicații în aeronautică, industria navală, dar și în protecția balistică.

Yang și alții [238] au efectuat teste Charpy, determinând influența fracției volumice asupra rezistenței compozitului. Figura 4.21 prezintă poziționarea unor familii de compozite în funcție de rezistența la impact, de unde rezultă că fibrele de sticlă în compozite cu matrice epoxidică pot oferi o rezistență similară compozitelor cu fibre de carbon. Rășini poliesterice sau acrilice sunt raportate cu rezultate mai slabe.

Sadykov și alții [205] au obținut un compozit din fibre de sticlă E, în țesătură 1/1 Y0212 de la Fothergill Engineered Fabrics, cu densitatea de suprafață de 0,546 kg/m^2, grosimea țesăturii de 0,5 mm, cu 670 ends/m în direcția de urzeală și 630 pics/m în direcția bătăturii. Țesătura are o finisare cu clorură de metacrilat cromic care îi permite compatibilitatea și adeziunea cu rășini epoxidice, vinil-esterice și esterice, asigurându-se prelucrabilitatea. Au folosit rășină epoxidică, marca Araldite® LY 564, care conține un diluant reactiv și un întăritor HY 2954 (întăritor pe bază de amină cicloalifatică) de la CIBA Polymers, cu un raport masic de 100:35 Araldite®/întăritor. Nanotuburile de carbon de tip Elicarb® (multi-walled carbon nanotubes, MWNTs) de la Thomas Swan au avut 10–30 nm diametrul mediu, iar lungimea de ordinul micronilor. Compozitul de referință a avut 11 straturi. Densitatea fibrelor de sticlă de tip E a fost de 2560 kg/m^3.

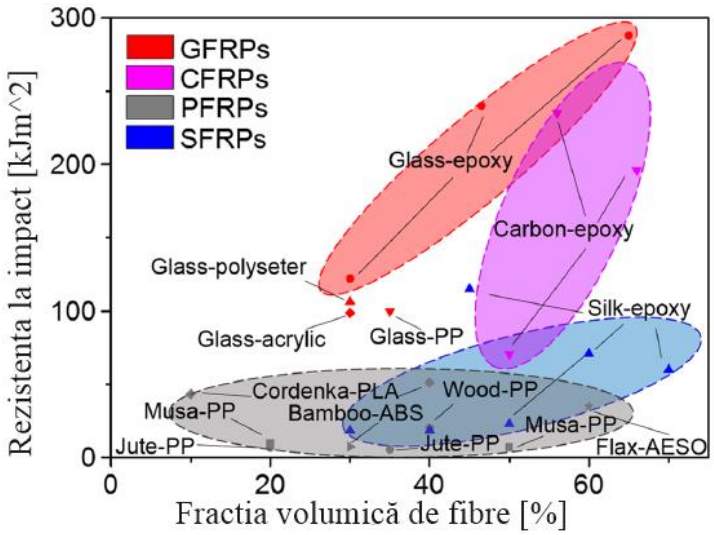


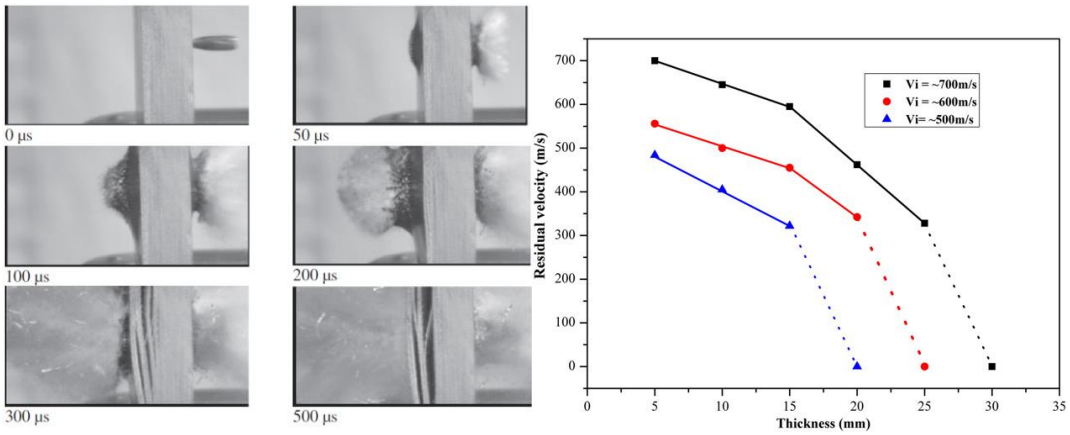
Fig. 4.21. Poziționarea diverselor compozite cu fibre și matrici din rășini polimerice în funcție de fracția volumică a fibrelor și de rezistența la impact. GFRP – compozite ranforsate cu fibre de sticlă și matrice polimerică, CFRP - compozite ranforsate cu fibre de carbon și matrice polimerică, PFRP - compozite ranforsate cu fibre naturale și matrice polimerică și SFRP - compozite ranforsate cu fibre de mătase și matrice polimerică [238]

Grujicic și alții [101] au fabricat compozite cu fibre de sticlă tip E, în matrice de rășină epoxidică polivinilesterică, cu adaos de amestec de MWCNT, și au fost testate la impact balistic cu un proiectil tip fragment (FSP). Laminatele au avut o grosime de 12,7 mm, și au fost lovite cu proiectil de calibru mic 0.30 (7.62 mm în diametru și 7.62 mm în înălțime).

Hojo și alții [112] au realizat plăci laminate din țesătură de fibră de sticlă și poliester, în două variante de grosime, pentru a le testa la impact de viteză mică (teste de cădere liberă a unei greutăți) până la 1500 J, evidențiind un proces de delaminare. Dacă epruvetele au aceleași diametre, forțele de impact și cele determinate în teste cvasi-statice, pot fi scalate în funcție de grosime și cedarea are o componentă de delaminare.

Saunders și alții [209] au testat la compresiune, compozite cu diferite tipuri de țesături de fibră de sticlă (țesătură plană, twill, satin). Țesăturile au fost impregnate cu trei rășini: o rășină poliesterică ne-newtoniană de vâscozitate relativ mare, o rășină poliesterică ne-newtoniană de vâscozitate relativ mică, și o rășină epoxidică de vâscozitate mică. Raportul de cercetare a prezentat comportarea mecanică în funcție de viteza de compresiune, tipul de țesătură și vâscozitatea și tipul rășinii.

Subba Reddy și alții [220] au raportat performanțele balistice ale unui compozit cu fibre de sticlă E, în matrice fenolică ca o funcție de grosimea acestuia, și viteza proiectilului cu miez de oțel moale (7.62 × 39 mm). Rezultatele au arătat o dependență neliniară între energia absorbită și grosimea plăcii fabricate. Deformația proiectilului este dependentă în mai mare măsură de grosimea plăcii comparativ cu viteza de impact (Fig. 4.22). Sunt descrise modificări ale mecanismelor de cedare în funcție de grosimea plăcii. Ținta a fost fixată la 10 m față de gura țevii balistice, iar vitezele de impact măsurate au fost de 500 ± 15 m s^{-1} până la 700 ± 15 m s^{-1}.



a) b)

Fig. 4.22. a) Filmare cu camera video cu viteza mare de înregistrare, pe un laminat de 25 mm, impactat cu proiectil 7.62 mm MS. la o viteză de 700±15m/s, b) viteza reziduală [220]

Thyagaraj și alții [225] au folosit o rășină poliesterică, nesaturată ca matrice, pentru țesături de fibră de sticlă și țesături de iută, tehnologia implicând pensularea rășinii. Demulatorul folosit a fost o acetilenă polivinilică. Dimensiunea plăcilor fabricate a fost de 300 mm × 300 mm. Rășina poliesterică nesaturată a avut componentele peroxid de metil-etil-cetonă (MEKP) și un accelerator cu cobalt, în procent de 2%. Menținerea în presă a fost de 24 de ore, producându-se plăci cu fibră de sticlă cu 4 și 12 straturi de țesătură (de grosime 2,2 mm și 6 mm).

4.3.2. Tehnologia de laborator pentru panourile proiectate

Scopul tehnologiei a fost realizarea la scară de laborator a unor plăci de protecție balistică codificate (Oge) (Fig. 4.23), destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate. Placa poate fi integrată în sisteme de protecție.

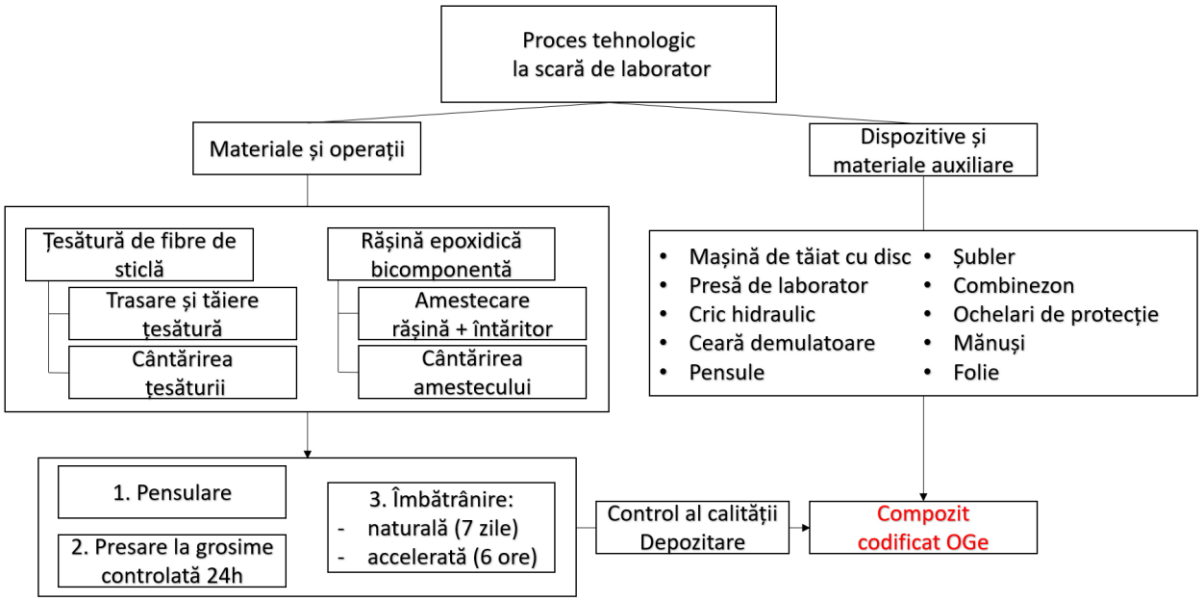
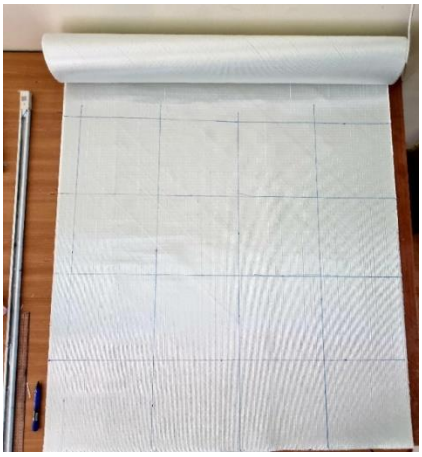


Fig. 4.23. Diagrama procesului tehnologic, la scară de laborator, pentru producerea compozitelor

Se dorește ca placa să asigure protecţia balistică de nivel FB2.

Avantajul tehnologiei propuse este că se pot executa plăci de grosimi diferite, cu aceleași etape și cu unele caracteristici, într-un interval îngust pentru același număr de straturi în compozit (de exemplu, concentrația masică de fibre, tolerante la grosimi etc.)

Tăierea s-a efectuat cu ajutorul unei foarfece electrice marca Vibromat S-54 (Fig. 4.24.b), având diametrul de tăiere de 50 mm, greutatea fiind de 700 g, puterea de ieșire 80 W iar înălțimea maximă de tăiere fiind de 12 mm.



a) Rețea de tăiere



b) Foarfece electric Vibromat S-54

Fig. 4.24. Croirea foii de țesătură cuadriaxială

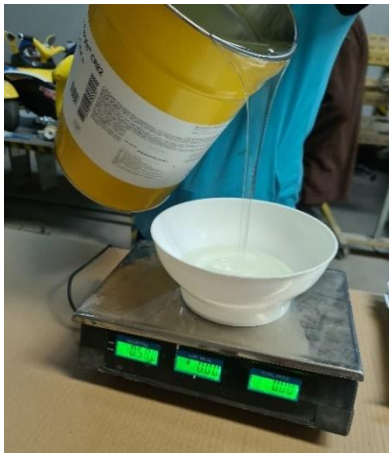
Laboratorul de lucru a fost organizat astfel: stand de lucru pentru tăierea fibrei de sticlă și încă un stand pentru fabricarea panourilor OGe (Fig. 4.25).



Fig. 4.25. Organizarea laboratorului pentru realizarea panourilor

Cântărirea componentelor rășinii și a panourilor s-a realizat cu un cântar electronic de precizie.

Amestecarea componentelor rășinii se observă în Fig. 4.26. Deoarece se lucrează la nivel de laborator, s-a realizat câte un amestec de 800 g de rășină CR82 și 200 g de întăritor CH80-2 pentru plăcile cu mai mult de 16 straturi și amestecuri de câte 400 g de rășină CR82 și 100 g de întăritor CH80-2 pentru plăcile cu mai puțin de 16 straturi.



a) Rășină Biresin® CR82



b) Întăritor Biresin® CH80-2

Fig. 4.26. Realizarea amestecului componentelor rășinii

Pensularea constă în întinderea rășinii, pe fiecare strat de țesătură în parte, cu ajutorul unei pensule (Fig. 4.27).



Fig. 4.27. Impregnarea straturilor cu amestecul de rășină și întăritor

CIREX CP 10 este o ceară de extracție (furnizor Airétec, distribuitor RomPolimer Composites), utilizată pentru rășini poliesterice, gelcoat și rășini epoxidice. Este un agent de demulare moale, care se evaporă la temperatura camerei și formează un strat subțire monomolecular, care aderă la pereții matriței și nu are afinitate pentru rășină (Fig. 4.28). Matrița trebuie lustruită înainte de aplicarea rășinii. CIREX CP 10 nu conține silicon. Se prezintă sub formă de pastă sintetică, cu greutate moleculară mare, dispersată în solvenți volatili care se evaporă pentru a elibera agentul de demulare activ. Conține substanțe solide în proporție de aproximativ 26%, având o densitate 0,790 g/ml, iar punctul de aprindere este

>40°C. Se aplică cu pensula sau cu un burete, într-un strat sau în două și se așteaptă evaporarea solvenților înainte de aplicarea celui de-al doilea strat sau de intrarea în contact cu laminatul.



Fig. 4.28. Demulator CIREX CP 10

Panourile de protecție au fost menținute cel puțin 8 ore în presă (Fig. 4.29).



a) presa în poziția de repaus b) presa în poziția de presare

Fig. 4.29. Presa pentru fabricarea panourilor compozite OGe

După finalizarea procesului de întărire, panourile sunt scoase din presă și acestea necesită operațiuni de finisare a marginilor fără a afecta zona cu ranforsare. După finisarea marginilor, compozitul a fost verificat pentru integritate, cântărit și codificat (Fig. 4.30).

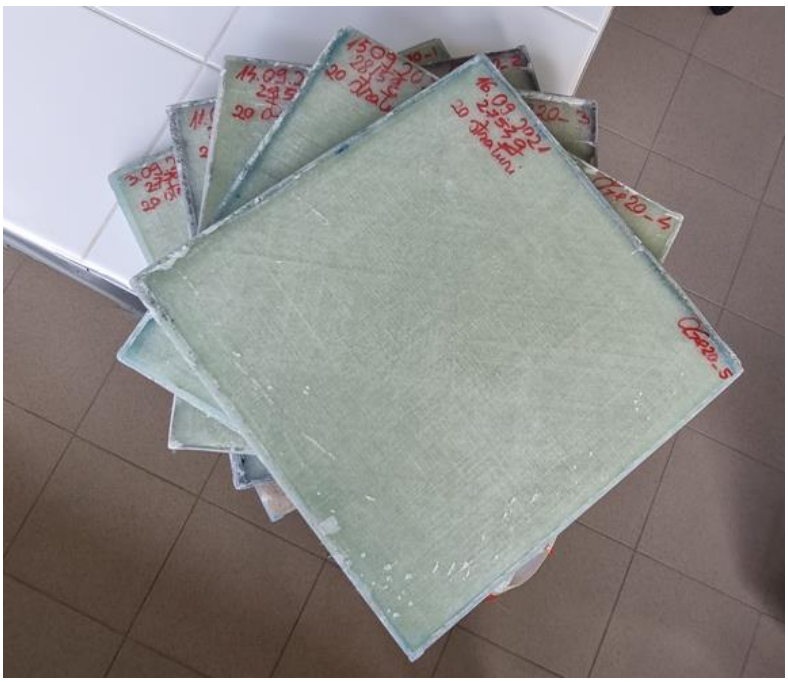


Fig. 4.30. Un set de 5 plăci fabricate, fiecare, din 20 de straturi de țesătură cuadriaxială

Îmbătrânirea constă în menținerea timp de 7 zile la temperatura camerei.

Tratamentul termic a fost efectuat după îmbătrânirea naturală, în două etape, ținând cont de soft-ul etuvei utilizate, de câte 3 ore fiecare, la 60°C la etuva din cadrul Universității „Dunărea de Jos" din Galați, Facultatea de Stiințe și Mediu, Departamentul de Chimie, Fizică și Mediu (Fig. 4.31).



a) setul de panouri cu 16 straturi

b) setul de panouri cu 20 straturi

c) setul de panouri cu 22 straturi

Fig. 4.31. Aranjarea plăcilor în etuvă, cu distanțiere de lemn

În Figura 4.32, este prezentată diagrama Gantt pentru programarea producerii unui set de 5 plăci.

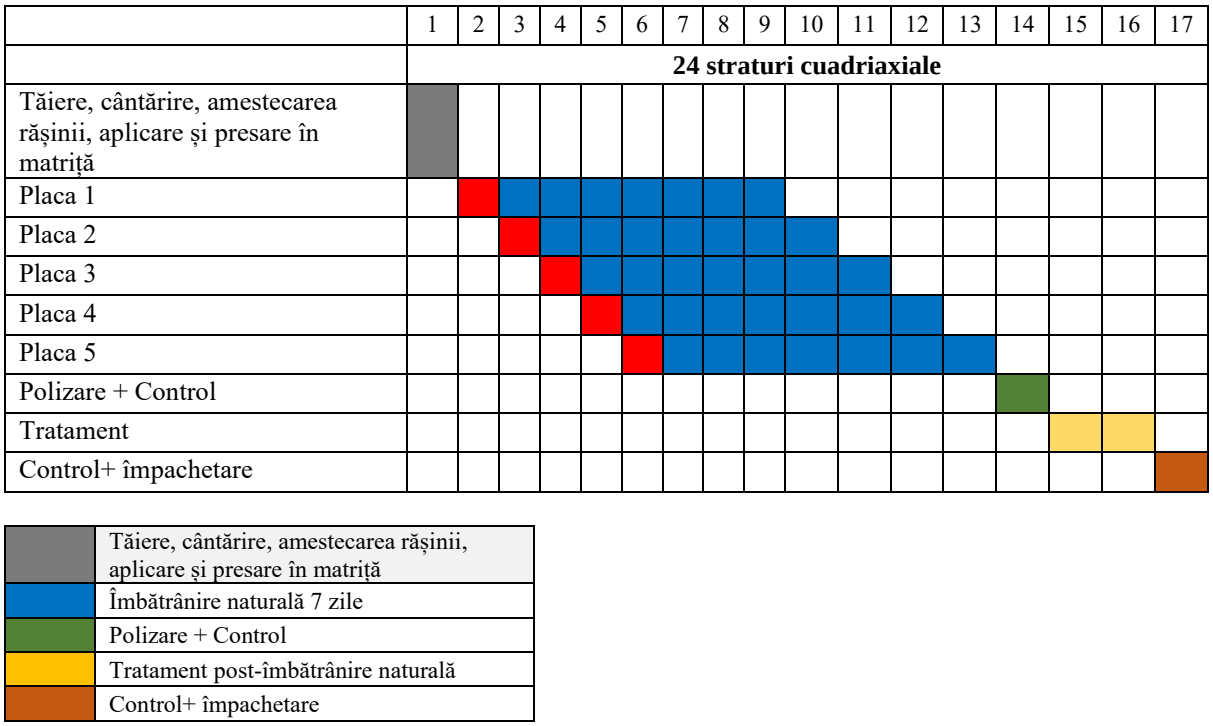


Fig. 4.32. Diagrama Gantt pentru programarea producerii unui set de 5 plăci

În regim de laborator, pentru un set de 5 plăci, timpul necesar este de 12…17 zile. În regim de serie mică (seturi mai mari și dimensiuni mai mari), acesta se poate reduce la 8…9 zile, dacă sunt disponibile două prese simple.

Concluzie. Timpul de prelucrare depinde, în foarte mică măsură, de numărul de straturi (operația de pensulare și de tăiere, care depinde de numărul de operatori responsabili cu această operație).

4.3.3. Caracterizarea panourilor elaborate

Pe baza observațiilor din documentație și din câteva teste preliminare pe plăci de 24 straturi și 16 straturi, s-au elaborat următoarele seturi de plăci: 3 plăci de 8 straturi, 5 plăci de 16 straturi, 5 plăci de 20 de straturi, 5 plăci de 22 straturi, 5 plăci de 24 straturi și 3 plăci de 32 straturi.

Pentru fiecare set s-au calculat parametrii din Tabelele 4.5...4.10.

Deviația standard este un calcul important pentru matematică și științe, în special pentru rapoartele de laborator. Deviația standard a unei variabile aleatoare reprezintă o măsură a împrăștierii valorilor acesteia în jurul valorii medii. Se numește și abatere medie pătratică [299].

Relația pentru deviația standard este:

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{.....(4.1)}$$

în care, N este numărul total de elemente pentru care se calculează deviația standard;

$\bar{x}$ este valoarea medie, obținută pentru N elemente (valori);

x_i este valoarea obținută pentru elementul $\bar{\imath}$.(i=1,…,N);

Tabelul 4.5. Caracteristicile plăcilor cu 8 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	840	1130	290	0,743	12,55	6,41	6,21	6,27	6,70	6.40
Placa 2	827	1112	285	0,743	12,35	6,23	6,46	6,20	6,62	6.38
Placa 3	837	1106	269	0,756	12,28	6,32	6,25	6,64	6,12	6,33
Media	**835**	**1116**	**281**	**0,747**	**12,39**					**6,37**
Max	840	1130	290	0,756	12,55					
Min	827	1106	269	0,743	12,28					
Deviația standard	**5,56**	**10,19**	**8,96**	**0,006**	**0,11**					**0.029**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

Tabelul 4.6. Caracteristicile plăcilor cu 16 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	1675	2145	470	0,780	18,61	11,71	11,84	11,37	11,93	11,71
Placa 2	1620	2230	610	0,726	18	13,22	12,78	13,51	11,95	12.86
Placa 3	1702	2315	603	0,735	18,91	12,31	12,94	12,84	13,52	12,90
Placa 4	1675	2220	545	0,754	18,61	12,47	12,43	12,51	12,56	12,48
Placa 5	1680	2195	515	0,765	18,66	11,84	13,45	12,05	12,62	12,49
Media	**1670**	**2221**	**549**	**0,752**	**18,59**					**12,49**
Max	1702	2315	610	0,780	18,91					
Min	1620	2145	470	0,726	18					
Deviația standard	**27,11**	**55,44**	**53,01**	**0,019**	**0,302**					**0.427**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

Tabelul 4.7. Caracteristicile plăcilor cu 20 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	2067	2770	703	0,746	22,96	14,02	14,23	14,97	15,33	14,64
Placa 2	2069	2815	746	0,735	22,98	15,62	14,64	16,05	15,23	15.38
Placa 3	2080	2950	870	0,705	23,11	16,02	17,04	15,03	16,31	16,12
Placa 4	2046	2815	769	0,726	22,73	15,35	15,27	14,83	16,15	15,41
Placa 5	2075	2754	679	0,753	23,05	15,15	16,48	15,55	17,24	16,11
Media	**2067**	**2821**	**753**	**0,733**	**22,97**					**15,53**
Max	2080	2950	870	0,753	23,11					
Min	2046	2754	679	0,705	22,73					
Deviația standard	**11,64**	**68,99**	**66.28**	**0,017**	**0,129**					**0.550**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

Tabelul 4.8. Caracteristicile plăcilor cu 22 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/ placă*	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	2300	3325	1025	0,691	25,55	19,25	19,90	19,92	20,57	19,91
Placa 2	2225	3345	1120	0,665	24,72	18,86	17,74	17,94	17,70	18,06
Placa 3	2287	2990	775	0,765	25,41	16,95	18,37	16,82	17,49	17,41
Placa 4	2215	3105	890	0,713	24,61	18,37	17,37	18,20	17,37	17,83
Placa 5	2293	3215	922	0,713	25,47	16,82	17,03	17,22	18,23	17,33
Media	**2264**	**3196**	**946**	**0,709**	**25,15**					**18,11**
Max	2300	3345	1120	0,765	25,55					
Min	2215	2990	775	0,665	24,61					
Deviația standard	**36,29**	**134,10**	**117,87**	**0,033**	**0,402**					**0.940**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

Tabelul 4.9. Caracteristicile plăcilor cu 24 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	2500	3273	773	0,763	27,77	18.37	18.46	18.60	18.12	18.38
Placa 2	2510	3118	608	0,805	27,88	17.21	18.53	17.37	18.23	17.83
Placa 3	2460	3150	690	0,781	27,33	18.61	18.04	18.96	18.20	18.45
Placa 4	2460	3174	714	0,775	27,33	18.24	18.02	18.76	17.97	18.24
Placa 5	2450	3200	750	0,765	27,22	18.53	18.23	18.46	18.37	18.39
Media	**2476**	**3183**	**707**	**0,778**	**27,51**					**18,26**
Max	2510	3273	773	0,805	27,88					
Min	2450	3118	608	0,763	27,22					
Deviația standard	**24,17**	**52,51**	**57,17**	**0,015**	**0,266**					**0,225**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

Tabelul 4.10. Caracteristicile plăcilor cu 32 straturi de țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășinii*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m^2]	[mm]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Placa 1	3320	4506	1186	0.736	36.88	26,89	26,63	25,83	24,60	25,99
Placa 2	3330	4611	1281	0.722	37	25,73	27,41	26,93	26,40	26,62
Placa 3	3220	4400	1180	0.731	35.77	23,94	24,45	24,24	25,63	24,57
Media	**3290**	**4506**	**1216**	**0.729**	**36.55**					**25,73**
Max	3330	4611	1281	0.736	37					
Min	3220	4400	1180	0.722	35.77					
Deviația standard	**49,67**	**86,14**	**46,26**	**0,006**	**0,554**					**0.857**

* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (coloana 2 - coloana 1)

** Raportul masic țesătură/placă = masa țesăturii/ masa plăcii, adică (coloana 1/ coloana 2)

***Densitatea de suprafață = masa placa/arie placă (0,09 m^2)

4.4. Concluzii privind realizarea panourilor

Acest capitol prezintă o tehnologie originală la scară de laborator pentru obținerea plăcilor de protecție balistică.

Procedeul are repetabilitate, precizie și robustețe.

Rețeta pentru realizarea panourilor și tehnologia de laborator este originală.

Realizarea s-a făcut cu respectarea normelor de securitate și sănătate în muncă, cu echipament de protecție adecvat.

Panourile OGe au fost efectuate la dimensiuni 300 mm x 300 mm.

Panourile de protecție balistică (OGe) sunt destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate și asigură gradul de supravieţuire în acţiuni de protecție pentru nivel specificat (FB2, FB3, conform SR EN 1522/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la atacul cu glonț. Condiții și clasificare” [261] și SR EN 1523/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la glonț. Metodă de încercare” [262]. în funcție de rezultatele testelor) (vezi capitolul 5).

S-a folosit o țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială, 1200 g/m^2 quatriaxial glass cloth (0º/+45º/90º/-45º), cu înaltă rezistență, destinată și aplicațiilor balistice, și rășină epoxidică bicomponent (rășină Biresin CR82 cu întăritor Biresin CH80-2), cu tratament termic de stabilizare.

Procesul tehnologic de realizare a panoului OGe, de diverse grosimi, cuprinde următoarele faze:

- tăierea straturilor de țesătură (și cântărirea straturilor tăiate care vor fi incluse în panou);
- realizarea amestecului rășină + întăritor;
- pensularea matricei lichide și suprapunerea straturilor de țesătură;
- presarea și control al grosimii panoului în presă;
- tratament termic, menținere la 60°C, timp de 6 h (2 tratamente a câte 3 h);
- control de calitate (cântărire, măsurare grosime).

După această ultimă fază, caracteristicile panourilor elaborate sunt date în Tabelul 4.11. Analizând valorile, se observă deviații standard mici și un raport masic fibre/panou aproape constant, indiferent de grosimea plăcilor (mediile sunt pentru 5 panouri cu excepția panourilor de 8 și 32 de straturi, pentru care media s-a calculat pentru trei bucăți).

În funcție de rezultatele testelor balistice, tehnologia poate fi îmbunătățită pentru grosimile selectate, în sensul reducerii timpului de realizare și control, pe baza experienței realizării acestor seturi de panouri.

Tabelul 4.11. Caracteristicile panourilor elaborate

Tipul de panou	Grosime medie	Deviația standard	Masa	Densitatea de suprafață	Raportul masic țesătură/panou
	[mm]		[g]	[kg/ m^2]	
OGe8	6,37	0,029	1116	12,39	0,747
OGe16	12,49	0,427	2221	18,59	0,752
OGe20	15,53	0,550	2821	22,97	0,733
OGe22	18,11	0,940	3196	25,15	0,709
OGe24	18,26	0,225	3183	27,51	0,778
OGe32	25,73	0,857	4506	36,55	0,729

Capitolul 5. Campania experimentală și evaluarea rezultatelor

5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice

Standardizarea în domeniul protecției balistice, mai mult decât în alte domenii, se încadrează în principiile declarației CEN/CENELEC că „standardele generează încredere” (“standards build trust”) [258], promovând inovația și introducerea de noi soluții performante, bazate pe proceduri și protocoale de testare, care sunt capabile să evidențieze calitatea și siguranța pentru astfel de sisteme. Standardele de testare balistică au specificații particulare pentru materiale, diferențierea încercărilor făcându-se mai ales în funcție de scopul produsului de protecție balistică. În ultimele decenii, metodele de testare s-au rafinat, iar dispozitivele de măsurare au devenit mai complexe [23].

Specificațiile din standard sunt folosite pentru:

- evaluarea performanțelor și calității prin încercări;
- evaluarea unor materiale și soluții noi sau îmbunătățite, în aceleași condiții ca și pentru cele „clasice”;
- investigarea și înțelegerea mecanismelor de cedare ale sistemelor de protecție;
- abordarea logică, integrată, a soluțiilor de protecție împotriva amenințărilor balistice;
- înțelegerea și evitarea consecințelor loviturilor asupra personalului și echipamentelor;
- protejarea și păstrarea disponibilității personalului și echipamentelor la un nivel eficace.

Standardele furnizează proceduri de încercare, cerințe pentru echipamentele de măsurare, condiții și terminologie pentru determinarea protecției balistice oferite de diverse soluții, cu diferite scopuri (care se referă la diverse materiale și combinații ale acestora: metalice, non-metalice, compozite, ceramice, sisteme hibride ale materialelor enumerate mai sus) [265].

Testele pentru protecție balistică se efectuează în condiții impuse și particularizate. În realitate, condițiile din studii de cercetare pot fi diferite. Dacă un geam de protecție este fixat într-un cadru, unul flexibil, altul rigid, într-o variantă ar putea fi eficace (va opri proiectilul), în alta poate fi penetrat total. Factori ca umiditatea, praful, lumina și agenții chimici pot diminua performanța sistemului de protecție. Specialiștii ar trebui să cunoască sensibilitatea produsului la condițiile de testare. O condiție de testare este evaluată ca sensibilă dacă o modificare relativ minoră este suficient să producă un rezultat mult diferit [144].

O reglementare sau o normă poate fi elaborată după două principii de bază, luând în considerare fie atacul potențial (reglementare orientată pe atac), fie potențiala protecție (reglementare cu orientare pe protecție). Reglementările pot fi grupate în două clase:

– recomandări standard, incluse în legislație națională sau regională; acestea sunt elaborate de organizații recunoscute ca având domeniu de standardizare și devin obligatorii,

– recomandări care nu sunt incluse în legislație; acestea sunt instrucțiuni stabilite de

organizații economice sau publice, cu scopul de a putea avea un sistem de testare de referință pentru anumite produse.

Luând în considerare standardele și documentele [260], [261], [262], [271], [272], [273], [283], [284], [290], [291], [297], pentru armuri pentru personal și vehicule, Tabelul 5.1 prezintă informațiile incluse într-un raport al unui test balistic. Rezultatele se compară, calitativ și cantitativ (prin parametri și măsurători) cu cerințele din standard, dacă părțile interesate o cer.

Tabelul 5.1. Informații dintr-un raport de încercare balistică

– Informații despre contractor	– Personalul care efectuează testul și orice martori agreați de ambele părți
– echipamente de testare, măsurare și înregistrare	– Arma sau armele utilizate, aparate de măsurare și înregistrare
– Informații pentru contactarea personalului/firmei care face încercarea	– Informații privind proiectilele utilizate: cod, masă, soluție sau variantă constructivă, materiale, dimensiuni, furnizor, design, condiționare
– numărul lotului și cantitățile	– Informații privind materialul de propulsare: tip, masa acestuia la fiecare lovitură, compoziție etc.
– numărul și specificațiile articolului de testat	– Rezultatele includ: viteza de impact în calculul pentru V_{50}, cu cea mai mare penetrare parțială, cea mai mică valoare pentru penetrare completă, intervale de împrăștiere ale parametrilor de testare, ale rezultatelor
– Specificații pentru produsul încercat	– Caracteristicile piesei/sistemului martor
– Descrierea materialelor pentru armuri	– Observații asupra modului de efectuare a testului sau asupra comportării materialului/sistemului
– Identificarea materialului pentru fiecare eșantion	– Fotografii, filme, imagini obținute la microscop sau prin alte mijloace agreate de părțile interesate
– Temperatura și umiditatea în facilitățile de încercare	– (dacă se cere) mecanismele de cedare evidențiate
– Data efectuării încercărilor	– Numărul standardului sau reglementării după care s-a făcut testarea

Metodele de încercare au două variante, pentru aceste tipuri de produse fiind aplicate ambele:

- testarea unei viteze de penetrare definite (v_{50}), care furnizează informații asupra protecției balistice, relevând în același timp calitatea produsului și variante de producere a sistemului de protecție;

- testarea la o viteză definită de impact pentru care sistemul de protecție nu este penetrat total și are un suficient coeficient de siguranță pentru un număr impus de lovituri.

Trebuie menționat că, testarea pentru caracterizarea mecanică la tracțiune, încovoiere sau forfecare [40], nu reflectă întotdeauna aceeași ierarhizare a materialelor testate la impact [41]. O influență deosebită asupra răspunsului sistemului de protecție o are viteza de impact. Deși o clasificare clară a ceea ce înseamnă viteză mică sau mare pentru impact nu există în literatură [190], unii specialiști consideră teste de tip Charpy [168], [194], sau impact sub 100 m/s ca fiind de viteze mici [29], peste această valoare, impactul fiind considerat specific vitezelor mari (100 m/s...1000 m/s) [77], [117], [165], [170], [174], iar următorul domeniu fiind considerat pentru viteze foarte mari. Amenințările sunt însă caracterizate prin intervale mici de variație a vitezei de impact (din cauza soluției constructive particulare a sistemului de tragere/lansare a

proiectilului), și de aceea testele vor fi cu atât mai utile cu cât vor fi realizate cât mai aproape de caracteristicile amenințării.

Pentru sisteme de protecție destinate echipamentelor, Fig. 5.1 prezintă câteva aspecte legate de încercări standardizate sau nu.

În standarde, amenințările sunt clasificate pe nivele și, în consecință, un sistem asigură protecție împotriva amenințărilor de un anumit nivel. Nu este permis să se presupună că un nivel mai înalt recomandă implicit un nivel mai mic fără testare, pentru că riscul este foarte mare.

Familii importante de standarde sunt dezvoltate de organizațiile militare (NATO), de statele puternic industrializate, în care cercetarea în domeniul militar este o prioritate (USA, Uniunea Europeană, China, Africa de Sud). Exemple tipice de standard în domeniu sunt cele ale DIN (German Institute for Standardization), Ö-Norm (Austrian Standards Institute) sau SNV (Swiss Standards Association).

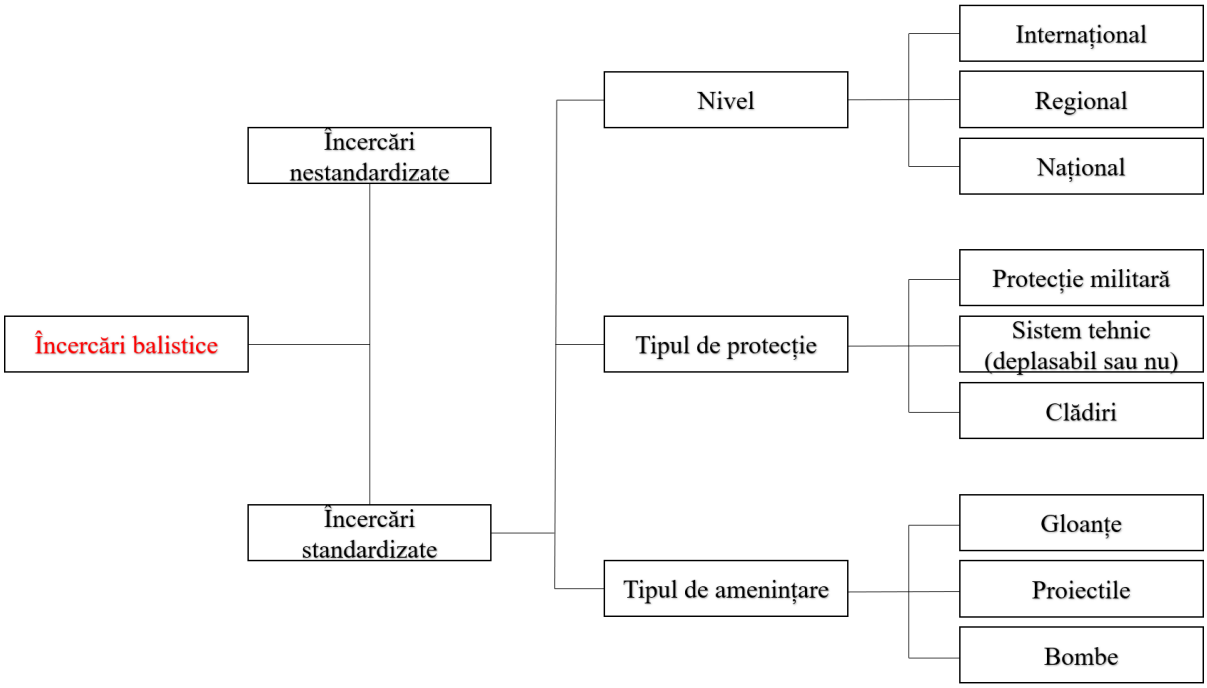


Fig. 5.1. Teste pentru protecție balistică

Recomandările sunt referințe prioritare pentru procurarea echipamentului pentru armată sau poliție, așa cum sunt recomandările NATO STANAG sau recomandări pentru PFA (Police Records Academy) în Muenster (Westfalia).

Specificațiile din standard depind de destinația produsului de protecție. De exemplu, în standardele americane, NIJ 0101.07 [274] și NIJ 0101.04 [275], pentru evaluarea rezistenței la impact balistic pentru veste individuale, sunt specificate aspecte legate de limitarea traumei corpului uman. Pentru vehicule blindate, specificațiile sunt adaptate tipului de vehicul (camion, elicopter, tanc etc.), și amenințării la care trebuie să facă față, iar produsele pot fi supuse unor încercări adiționale, de rezistență la foc, la intemperii etc.

Pe piața acestor produse intră în prezent noi compozite hibride deoarece au parametri

îmbunătățiți în termeni de raport rezistență-densitate specifică, o durată de viață mai mare și proprietăți termice mai bune [195].

La CEN, Comitetul Tehnic 33 este responsabil cu elaborarea și revizuirea standardelor legate de protecția balistică, standardele reprezentative fiind: EN 1063:1999, EN 1522:2004, EN 1523:2004. ISO 16935:2007 (reconfirmat în 2017) [271], prezintă proceduri de încercare pentru evaluarea materialelor pentru ferestre de securitate și a altor produse pentru interior și exterior împotriva impactului balistic, cu clasificare după armă și muniție. Se presupune că fereastra, geamul sau materialul este fixat adecvat, dar rezultatele nu se aplică materialelor înconjurătoare sau altor structuri auxiliare. EN 1063 [260] este tot un standard de siguranță a ferestrelor/geamurilor pentru măsurarea rezistenței de protecție la gloanțe. De obicei, se folosește EN 1522 [261], [265] pentru a forma un sistem de clasificare balistică, cu care vehiculele blindate sunt încercate și ierarhizate. O clasificare similară este utilizată în SUA în NIJ 0108, care include geamuri și plăci.

NATO a introdus STANAG 2920 [282] pentru ierarhizarea abilității materialelor de a opri fragmente și proiectile. Inițial, tehnicile de măsurare au fost dezvoltate pentru armuri individuale, dar acum pot fi utilizate și în evaluarea evenimentelor care generează fragmente cu risc mare de impact, inclusiv pentru vehicule blindate. Încercările standardizate sunt realizate cu proiectile care simulează fragmentele, abreviate în literatura de specialitate de limbă engleză cu FSP (fragment simulating projectile), trase pe eșantioane, cu diferite viteze, analizându-se modul de cedare al țintei și eventuale soluții îmbunătățite. Prin modificarea vitezei și realizarea unei statistici de lovituri, se poate evalua limita balistică, adică viteza pentru care ținta rezistă acceptabil din punct de vedere al siguranței personalului și echipamentului. Trupele combatante suferă răni și direct, la impactul cu glonț (lovitură directă), dar trebuie să facă față și riscului lovirii de fragmente rezultate și împrăștiate (lovitură indirectă). Testul pentru determinarea V_{50} este recunoscut la nivel internațional pentru evaluarea rezistenței la impact cu fragmente. Cu cât viteza de impact este mai mare, cu atât este mai mare nivelul de protecție atașat. V_{50} este considerată media vitezelor înregistrate pentru șase lovituri, cu cele mai mici trei valori pentru care se obține penetrare completă și cele mai mari trei viteze pentru care se obține penetrare parțială, în așa fel încât intervalul de împrăștiere al vitezelor să nu fie mai mare de 40 m/s [282].

NATO AEP-55 STANAG 4569 [283] include tehnici și proceduri standard și reproductibile pentru evaluarea rezistenței balistice a componentelor vehiculelor (integrale, suplimentare, opace sau transparente), cât și evaluarea zonelor vulnerabile ale vehiculului.

Avantajele utilizării eșantioanelor nestandardizate (ca dimensiuni) sunt:

- disponibilitatea de a fi realizate în laborator (de obicei, se realizează eșantioane pătrate cu latura de 100 mm până la 250 mm);
- mai ușor de fixat pe cadrele de laborator;
- mai ușor de realizat investigații suplimentare, cu ajutorul camerelor de filmare rapidă, camere termice etc;
- mai ușor de decupat eșantioane care să fie analizate cu ajutorul microscoapelor electronice, profilometrelor cu laser sau microscoapelor atomice etc..

Dezavantajele utilizării eșantioanelor nestandardizate pot include:

- dificultate în extrapolarea răspunsului panoului atunci când este mai mare; în acest

domeniu al materialelor de protecție balistică nu se acceptă astfel de extrapolări decât la nivel de concepție, sau simulare numerică, tendință care trebuie imperativ verificată prin încercări;

- dimensiuni prea mici ale eșantioanelor pot evidenția unele cedări, dar pot ecrana altele sau chiar împiedică dezvoltarea unora, cum ar fi delaminarea, delaminarea absoarbe energie cinetică și dezvoltarea ei pe eșantioane mici nu reflectă valoarea energiei;
- modul de fixare poate induce un răspuns diferit comparativ cu panoul real care va fi montat, posibil, într-un cadru mai complex (de exemplu, portierele vehicolului).

Eșantioanele pentru încercări standardizate sunt mai mari. De exemplu, pentru panouri de armură individuală, dimensiunile sunt 500 mm x 500 mm, ca și pentru panouri de autovehicule [261], [262]. Pentru clădiri și sisteme fără mobilitate, standardele recomandă panouri și mai mari. Aceste eșantioane, chiar dacă reacționează la impact similar cu cele din aplicații reale, sunt prea mari pentru investigații de finețe, la scară mică (SEM, FTIR, EDX), și trebuie tăiate printr-o metodă care să nu influențeze (prea mult) zona de impact. Panourile din țesături aramidice sunt greu de tăiat și este foarte probabil ca să le deranjeze poziția firelor când sunt tăiate. În privința panourilor realizate din țesături de fibră de sticlă, acestea sunt mai susceptibile să dezvolte delaminări suplimentare la tăiere. Într-un raport tip review, cu privire la compozite pe bază de fire/țesături, Abtew [2] a evidențiat cu fotografii influența mărimii eșantionului, a sistemului de fixare și a designului proiectilului (prin formă, mărime, viteză), concluzionând că teste mai de încredere sunt cele care „imită" cât mai îndeaproape situațiile reale.

Pach [184] a testat rezistența balistică a unor panouri hibride: trei tipuri de compozite din două straturi. Primul strat este format din plăci de carburi de wolfram, bile ceramice de Al_2O_3 sau bile de oțel (100Cr6), introduse într-o matrice polimerică. Al doilea strat a fost un laminat din 10 straturi de țesătură aramidică, într-o matrice de stiren-butadien-stiren. Arma folosită a fost o pușcă Beryl, iar muniția a fost de 5.56 x 45 mm, cu glonț SS109 MESCO. Eșantioanele au fost mici (100 mm x 100 mm), distanța de tragere a fost de 10 m, iar direcția de tragere a fost perpendiculară pe țintă, proiectilele având viteza de 870...890 m/s.

Kilic [141] a determinat performanța balistică a unui panou și, cu ajutorul metodei elementelor finite, a aproximat grosimea panourilor din oțel și testând pe cele a căror rezistență fusese previzionată. Testele, efectuate după procedura Stanag 4569 [284], au validat modelul și rezistența balistică la impact cu proiectil de 7.62 mm, pentru panouri cu 20 mm grosime.

Procedurile de încercare standardizate se aplică, de obicei, după încercări preliminare la scară de laborator, care îndeplinesc doar o parte din cerințele din standard, în special cele cerute de natura și tipul amenințării (tipul proiectilului, viteza și masa acestuia). Tehnologia de realizare a eșantioanelor depinde de mărimea acestora și, astfel, răspunsul eșantionului nestandardizat poate diferi de cel care se va obține pe panoul standard. De asemenea, soluția reală pentru implementarea protecției balistice poate diferi, inclusiv sistemul de fixare al blindajului, prezența altor componente ale sistemului care va fi protejat putând influența performanța (cum ar fi, de exemplu, muchii sau colțuri de fixare ale panourilor de protecție balistică).

5.2. Campanii de testare pentru panouri rigide (blindaje sau componente de blindaje)

Industria militară este o succesiune în spirală de invenții și inovații pentru proiectil și sistemul care îl poate anihila [26], [149]. Panourile de protecție balistică trebuie să asigure un anumit grad de siguranță, să fie cât mai ușoare, să ofere mobilitate și manevrabilitate în cazul autoheviculelor, în plus, un factor important este prețul și dinamica inovației pe plan mondial. Rezistența unei ținte atunci când este lovită de un proiectil este un subiect de interes în câteva domenii de activitate (militar, aerospațial, naval, civil și nuclear). Competiția crescândă din industria compozitelor textile și creșterea pieței globale pentru sisteme de protecție la impact sunt factori care au dus la dezvoltarea compozitelor pe bază de textile cu fibre de înaltă rezistență și metodelor lor de fabricație [4], [28], [71], [81], [113], [140], [232].

Încercările balistice și studiul post-factum al proiectilului și țintei sunt decisive pentru a înţelege procesele de deteriorare, pentru a identifica factorii care influențează comportarea materialelor la acest tip de impact [118], [206], [277], [278]. Chiar dacă simularea impactului balistic a devenit din ce în mai realistă [173], campania experimentală după cerințe standardizate este etapa finală pentru verificarea și omologarea sistemelor de protecție [179].

Țesăturile unidirecţionale (cele mai des întâlnite variante fiind cele biaxiale, triaxiale sau cuadriaxiale) sunt introduse în compozitele destinate protecției la impact balistic.

Fibrele de sticlă pot avea rezultate satisfăcătoare, dar nu se recomandă pentru viteze foarte mari și pentru o protecție a corpului uman [2].

Scopul acestui capitol include:

- testarea dacă pachetele concepute de autor rezistă la impact balistic cu glonț de 9 mm FMJ, conform Ps-02512C-14.00-017 Determinarea rezistenței la impactul proiectilelor, SR EN 1523-l:2004 Uși și jaluzele. Rezistența la gloanțe. Metoda de încercare;
- investigarea proceselor și etapele de cedare cu ajutorul fotografiei macro, a imaginilor SEM și a analizei elementale (EDX);
- stabilirea influenței numărului de straturi pentru panourile proiectate pe baza rezultatelor experimentale.

Pentru a determina performanța proiectilului și a sistemului de protecție, sunt necesare echipamente specifice, aparatură de măsurare scumpă și foarte specializată și metode de încercare care, în final, prin analiza rezultatelor, să caracterizeze sistemul de protecție.

Gloanţele sunt și astăzi o ameninţare pentru personal și tehnica de luptă sau intervenție. Acestea diferă prin calibru, formă și dimensiuni, viteză inițială, masă, materialele și tehnologiile implicate în obținerea lor etc. Un sistem de protecţie care să ofere siguranţă totală pentru toate aceste amenințări este o imposibilitate practică, având în vedere şi constrângeri legate de mobilitatea echipamentelor protejate [66].

Pentru a evalua rezistenţa la impact a pachetelor de protecţie, standardele propun nivele de protecție, rezultatele dând posibilitatea de a include materialele sau sistemele testate într-un anumit nivel de protecţie.

Pentru acest studiu de cercetare, testele s-au efectuat pe panouri realizate din aceleași materiale, dar cu un număr diferit de straturi de țesătură cuadriaxială de fibre de sticle:

- cu 8 straturi (3 panouri disponibile);
- cu 16 straturi (5 panouri disponibile);
- cu 20 straturi (5 panouri disponibile);
- cu 22 straturi (5 panouri disponibile);
- cu 24 straturi (5 panouri disponibile);
- cu 32 straturi (3 panouri disponibile).

5.3. Echipamentul de încercare

Campania de încercări a avut ca scop evaluarea comportării panourilor de protecţie balistică realizate de autor, la acţiunea gloanţelor de calibru 9 mm FMJ, prin trageri în laborator specializat, metoda fiind cea recomandată în standardul EN 1522/2004 [261].



Fig. 5.2. Cronograf Oehler model 43, folosit la Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie (CCIACBRNE)

Viteza inițială este notată cu v_0 şi se măsoară cu ajutorul unui sistem de măsurare a vitezelor proiectilelor, cronograful model Oehler 43 (Fig. 5.2). Cronograful realizează următoarele măsurători: viteza la gura ţevii, viteza de control, timpul proiectilului în aer, viteza la ţintă. O schemă de aranjare a unui laborator de tragere este dată în Fig. 5.3.

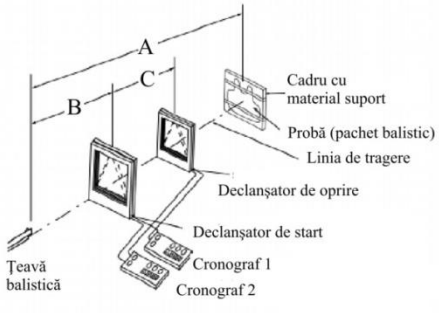


Fig. 5.3. Schema echipamentului de monitorizare a tragerii [272]

5.4. Metodologia de încercare

Determinarea rezistenţei balistice a panourilor de protecţie balistică la acţiunea gloanţelor de infanterie de calibru 9 mm FMJ, s-a realizat conform EN 1522/2004, astfel: la glonţ, cu viteza iniţială medie de 373 m/s, la distanţa de 5 m (condiţii normale), cu excepția dimensiunilor panourilor încercate, care au fost de 300 mm x 300 mm față de 500 mm x 500 mm, cât prevede standardul, deoarece presa de laborator, materialul disponibil, etuva avută la dispoziție pentru tratamentul termic al compozitului au permis doar aceste dimensiuni, de 300 mm x 300 mm.

Tragerile au avut loc în laboratorul de la Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRNE și Ecologie, București, (vezi Anexa 5 care prezintă un raport de încercare).

Muniţia și armamentul necesare încercărilor se păstrează în spații special amenajate, cu regim controlat. Încercările au fost făcute conform procedurilor operaţionale și instrucţiunilor de lucru aprobate în cadrul acestui laborator.

Procedura de încercare a fost similară cu cea prezentată în [176], dar pentru nivel FB3 și FB5, testele preliminare fiind realizate tot pe panouri de 300 mm x 300 mm, dar cu altă rețetă și alte materiale [76].

Tragerile au fost executate de personalul calificat al CCSACBRNE. Au fost respectate normele de protecţie și regulamentele specifice acestui tip de laborator.

Toate panourile au fost executate după tehnologia de laborator proiectată de autor (vezi Capitolul 4).

Aprecierea penetrării totale a unui panou este simplă, putându-se recupera proiectilul sau fragmente din acesta.

Aparatura şi materialele necesare pentru determinarea rezistenţei balistice la acţiunea gloanţelor muniţiei de infanterie sunt următoarele:

- cronograf stabil în domeniul de temperatură 5°C - 40°C, cu precizia de 0,3%;
- suport rigid pentru ţevi balistice;
- ţevi balistice care nu depăşesc limita uzurii acceptate pentru efectuarea încercării;
- muniţie corespunzătoare cu SR EN 1522/2004;
- higrometru cu precizia de măsurare de 1%;
- barometru cu precizia de măsurare de 1 mm Hg;
- termometru cu precizia de măsurare de 1°C;
- ladă suport pentru eşantionul de testare, conform SMT 40202/1 - 2000;
- cameră climatică, care permite temperarea la 20 ± 5°C;
- etuvă pentru temperarea muniției;
- masă de tragere, cu recul compensat.

Condiţii ale mediului ambiant în laborator au fost:

- temperatura: 21 ± 5°C;
- umiditate relativă: 65%;

- presiunea atmosferică: 764 ± 15 mm Hg.

Pentru efectuarea încercării se parcurg următoarele etape:

- echipamentul de încercare se poziţionează în suportul de prindere, la distanţa impusă faţă de gura ţevii; se folosesc tipurile de armament şi muniţie necesare nivelului de protecţie pentru care se efectuează încercarea, în acest studiu, pentru nivelul FB2 [261] (Fig. 5.4).

- se poziţionează sistemul de măsurare a vitezei glonţului, începând cu distanţa de 2 m de la gura ţevii, astfel încât cadrele sistemului să fie în plane perpendiculare pe direcţia de tragere; distanţa între cadrele sistemului de măsurare a vitezei este de 0,5 m; măsurarea distanţelor se realizează cu o precizie de 1 mm;

- se execută 3 focuri asupra pachetului de testare, acestea fiind aranjate sub forma unui triunghi echilateral cu latura de aproximativ 120 mm.

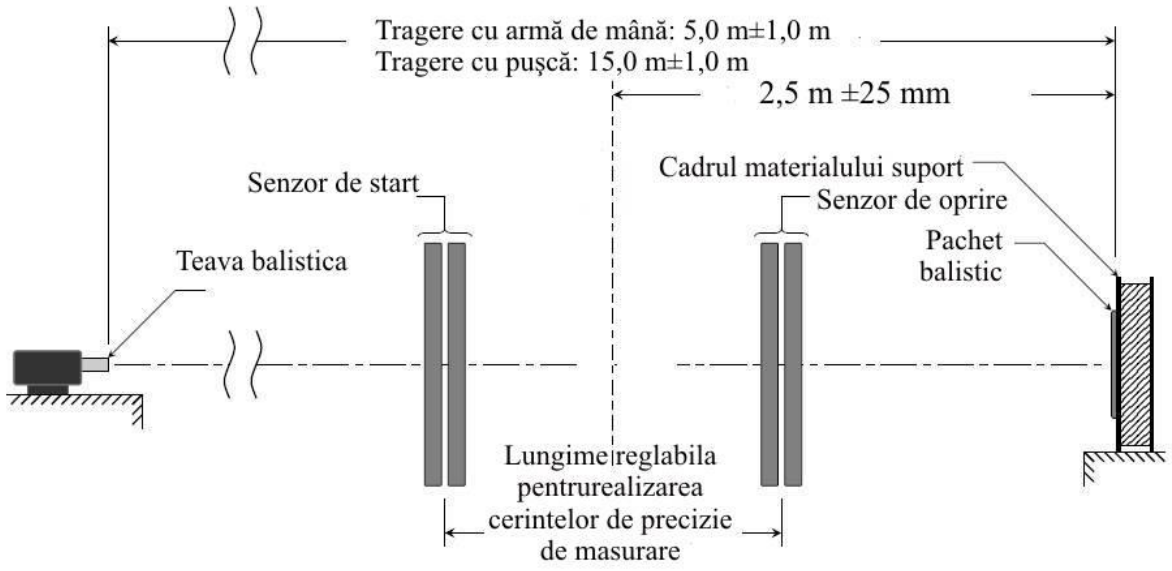


Fig. 5.4. Dispozitivul de tragere [274]

5.5. Rezultate obținute din încercările efectuate

Rezultatele obținute și mecanismele de cedare ale țintei (la penetrare totală și penetrare parțială) sunt discutate în continuare în scopul de a îmbunătăți răspunsul țintei, prin modificarea unor parametri, cum ar fi numărul de straturi ale panoului.

Pentru 12 măsurători ale vitezei proiectilului, prezentate și în Fig. 5.5, s-au determinat:

- viteza medie (372,66 m/s);
- deviația standard (2,211 m/s, ceea ce reprezintă doar 0,593% din viteza medie);
- valoarea maximă: 376 m/s;
-valoarea minimă: 369 m/s;

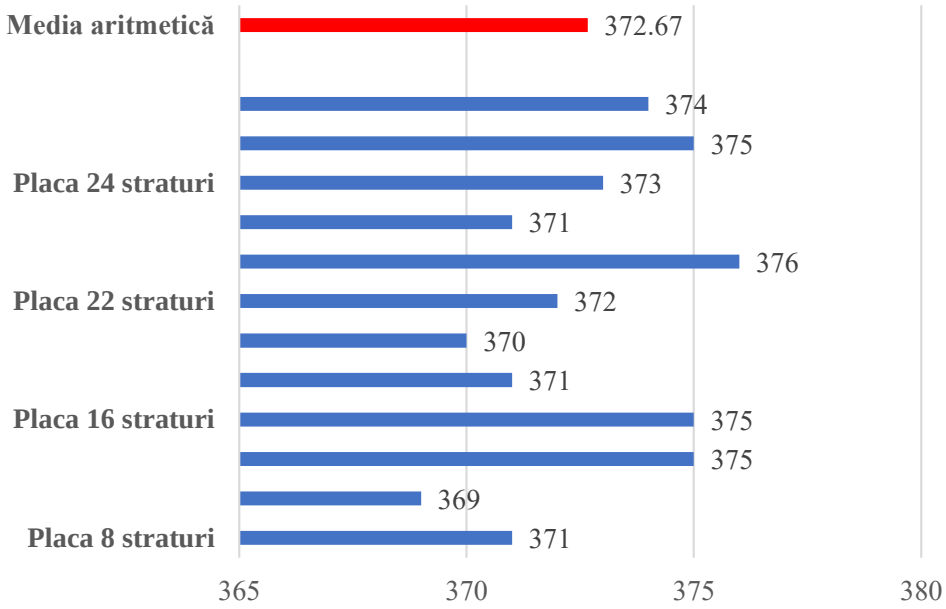
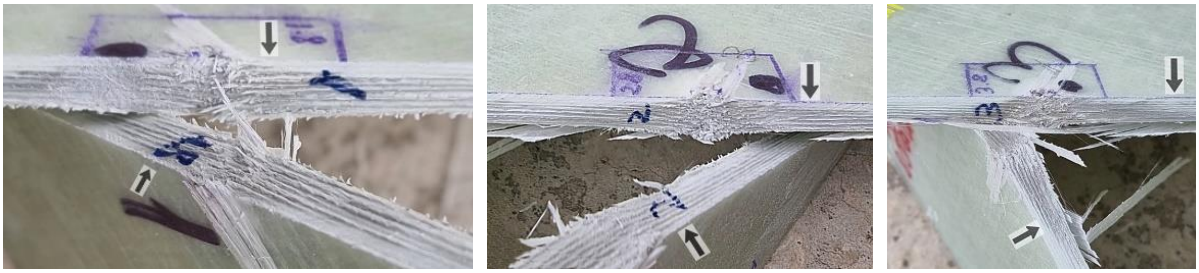


Fig. 5.5. Vitezele proiectilului (măsurate pentru fiecare foc)

Viteza medie cu care s-au realizat testele corespunde cel puțin nivelului FB2 de protecție, fiind intermediară între nivelul FB2 și FB3.

S-au realizat fotografii față (fața s-a considerat suprafața compozitului care vine prima oară în contact cu proiectilul și spate (partea opusă a compozitului), detalii ale fiecărui foc, tot pe fața și spatele compozitului. În plus, una din plăci a fost tăiată cu un disc abraziv de mare viteză pentru a putea vizualiza orificiul de penetrare al proiectilului.



Focul 1 Focul 2 Focul 3

Fig. 5.6. Panou de protecție balistică OGe8 (tăiere uscată cu disc abraziv de mare viteză)

Figura 5.6 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe8, cu 8 straturi. Se observă o penetrare totală, cele trei focuri produc o distrugere similară a panoului, neobservându-se o creștere a deteriorării orificiilor în funcție de ordinea focurilor, ceea ce înseamnă un răspuns calitativ bun al panoului la impact multiplu. Se observă o ușoară delaminare a substraturilor de pe stratul 1 și a substraturilor de pe ultimul strat al compozitului. Pe fețele panoului, delaminările sunt influențate de direcția firelor de pe aceste fețe. Există delaminare și între straturile intermediare, mărimea suprafețelor delaminate fiind mai vizibilă în vedere (Fig. 5.7).

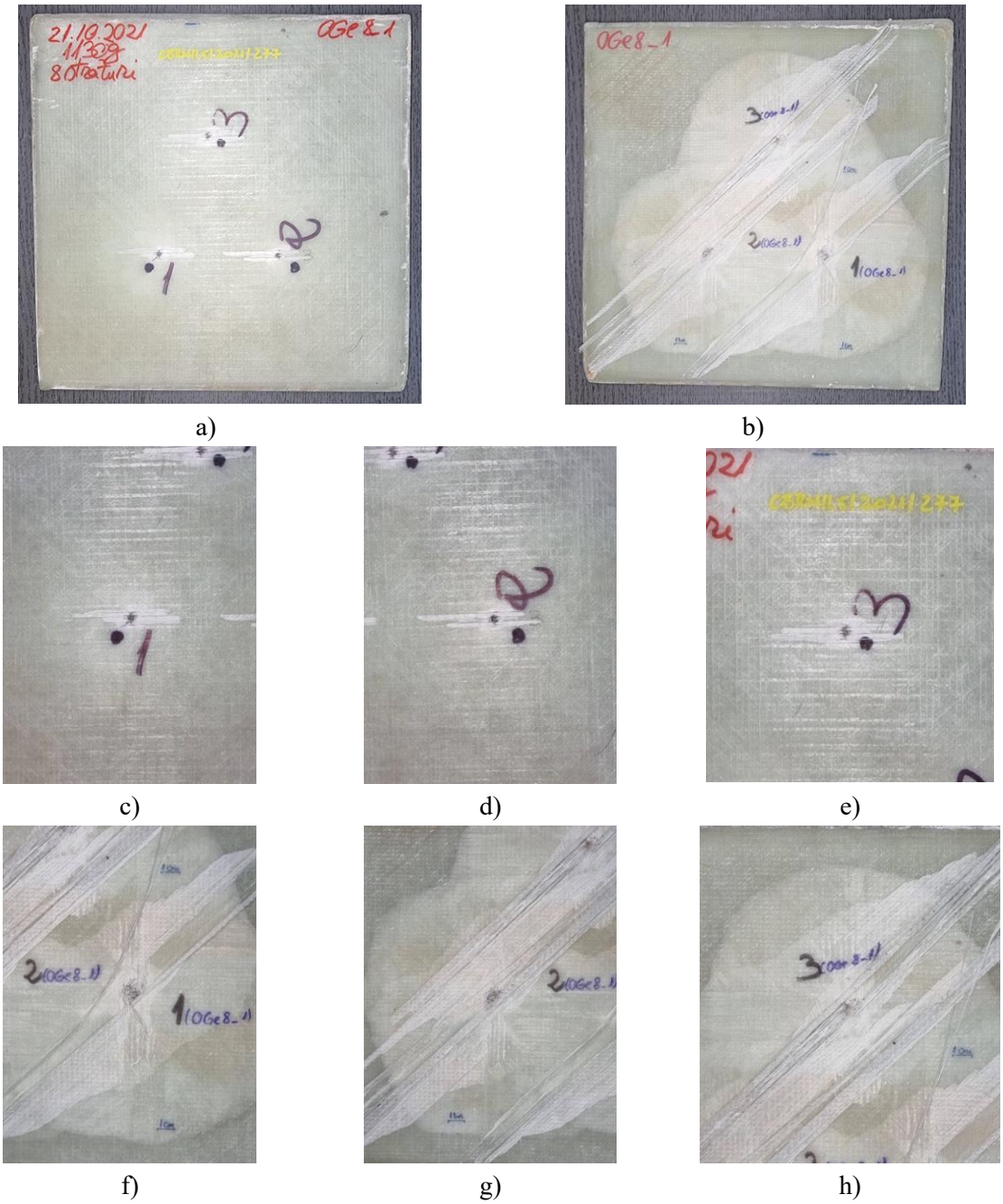


Fig. 5.7. Rezultatele tragerii pe panoul cu 8 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3

Faptul că delaminarea este vizibilă ca diferență de culoare mai mult pe vederea din spate, arată că acest proces este mai intens în ultimele straturi. Forma aproape circulară a delaminărilor pentru fiecare foc indică faptul că arhitectura țesăturii (0°/45°/90°/-45°) uniformizează comportarea panoului multistrat.

Delaminarea pe stratul 1 (față) este localizată și a depins de poziționarea firelor pe primul sub-strat. Pe spate, delaminarea se poate observa în grosimea plăcii prin schimbarea culorii. Se observă cercuri aproape de același diametru, zonele de suprapunere a suprafețelor circulare de

delaminare, nesugerând distrugeri suplimentare. De asemenea și pe spate, ultimul strat este mai distrus, observându-se clar orientarea -45° a firelor de pe ultimul sub-strat. Calitatea răspunsului la lovituri multiple se observă prin diferențele mici între dimensiunile zonelor delaminate pentru fiecare foc.

Delaminarea are aspect diferit pe fața panoului față de delaminarea care s-a observat pe spatele panoului. Delaminarea pe fața primului strat evidențiază orientarea firelor pe primul substrat al stratului 1 (orientare de 0°) iar pe spatele panoului este evidentă orientarea sub-stratului de suprafață la -45°, cu o delaminare mult mai intensă.

Din toate fotografiile suprafețelor spate ale panourilor, s-a observat că această țesătură cuadriaxială a generat urme de delaminare aproape circulare, iar diametrele acestora au valori apropiate, ceea ce reflectă, calitativ, o comportare a straturilor fără un caracter pronunțat de anizotropie în planul țesăturii.



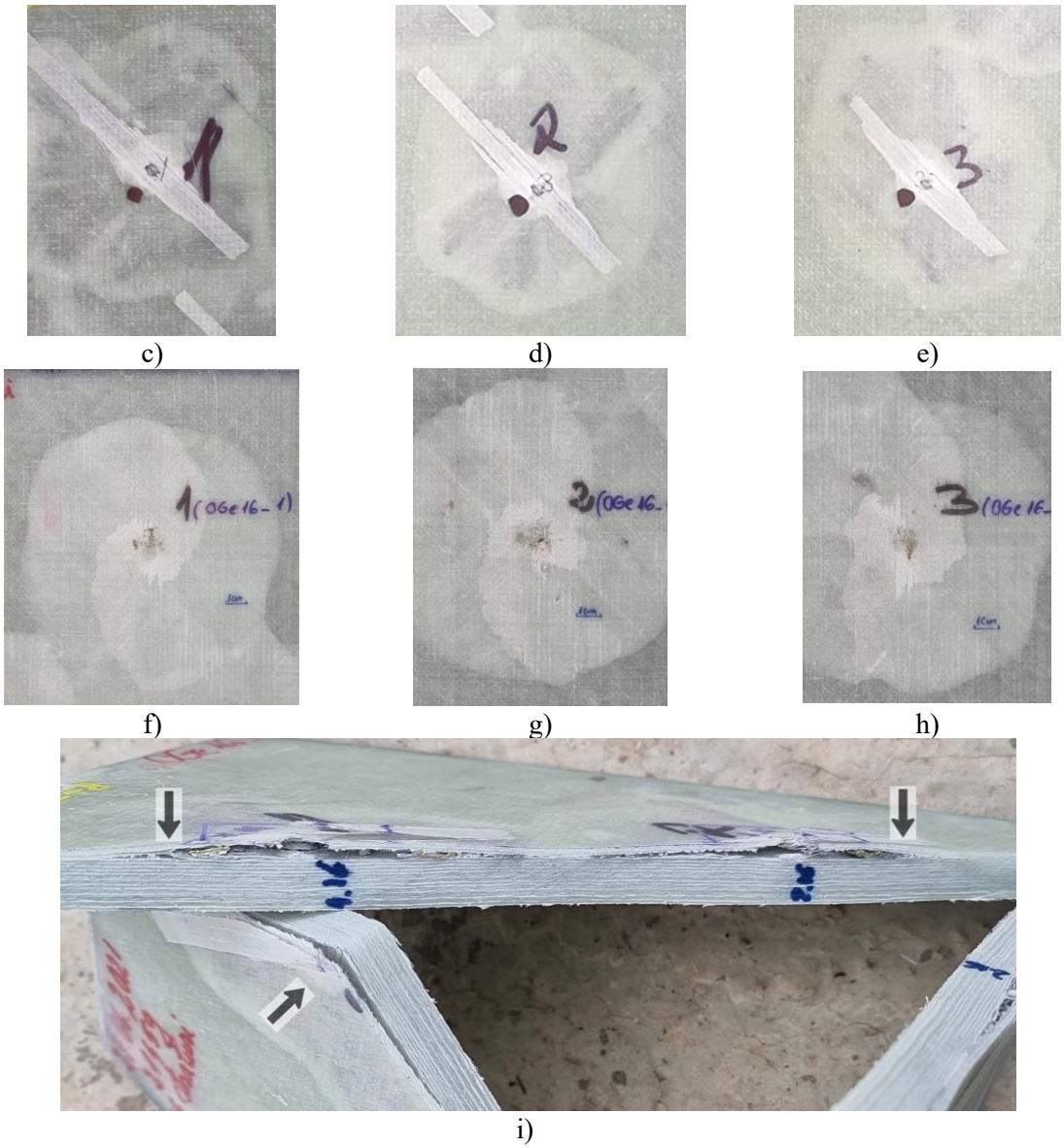
a) Focul 1 b) Focul 2 c) Focul 3

Fig. 5.8. Panou de protecție balistică Oge16 (16 straturi de țesătură cuadriaxială)

Figura 5.8 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul Oge16, cu 16 straturi. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, definită prin mărimea, materialele și viteza proiectilului, panoul de 16 straturi rezistă foarte bine, deși urme de delaminare sunt vizibile pe fața și pe spatele panoului. Din secțiunile prezentate în figura de mai sus se observă o delaminare puternică (distanțare și propagare a delaminării) între ultimul strat perforat de proiectil și stratul pe care acesta se oprește. Conturul acestor delaminări mari se observă atât pe fața panoului cât și pe spate. Spre spatele panoului delaminările sunt foarte fine, dar destul de avansate în planul panoului.



a) b)



c) d) e)

f) g) h)

i)

Fig. 5.9. Rezultatele tragerii pe panoul cu 16 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3, i) Secțiune prin două focuri

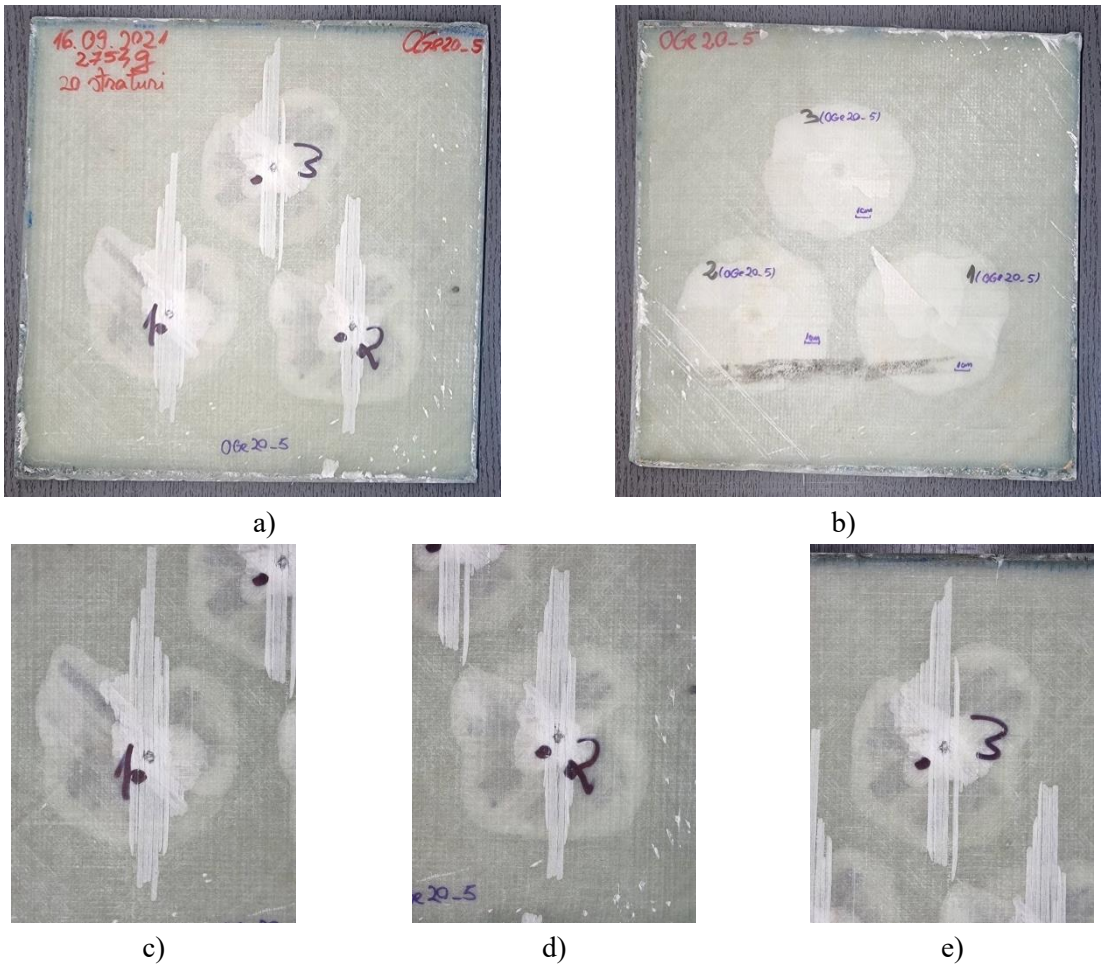
O secțiune prin două focuri, 1 și 2, (Figura 5.9i), arată o distrugere similară pentru ambele focuri; distanța dintre punctele de ochire de 120 mm nu a dus la o desprindere continuă în zona delaminată, se observă o delaminare foarte ușoară (distanțare foarte mică între straturi) pentru ultimele straturi, lucru vizibil prin schimbarea de culoare de pe spatele panoului. Delaminarea are forma aproape circulară, ceea ce reflectă faptul că țesătura cuadriaxială are un răspuns relativ uniform în planul țesăturii. Pe spatele panoului, chiar pe direcția impactului, se observă fisuri neprofunde, implicit se observă pe macrofotografii câteva fire rupte, deși zona dintre stratul pe care s-a oprit glonțul și spatele panoului nu este fisurată pe direcția de impact (Fig. 5.9).



a) Focul 1 b) Focul 2 c) Focul 3

Fig. 5.10. Panou de protecție balistică OGe20 (20 straturi de țesătură cuadriaxiale)

Figura 5.10 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe20, cu 20 straturi. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, panoul de 20 straturi rezistă foarte bine. Pentru acest panou cu 20 de straturi, se observă că urmele de delaminare de pe spate nu se mai suprapun, ceea ce reprezintă o dimininuare a acestui proces. Spre deosebire de panoul cu 16 straturi, acesta nu prezintă urme de fisurare pe spate pe direcția impactului. Acest tip de proiectil este puternic fragmentat la impact, și împins spre marginea orificiului de intrare (Fig. 5.11i). Din aceste macrofotografii, nu se observă deformații mari ale ultimelor straturi, evidențiindu-se caracterul rigid al panoului de această grosime și pentru această amenințare.

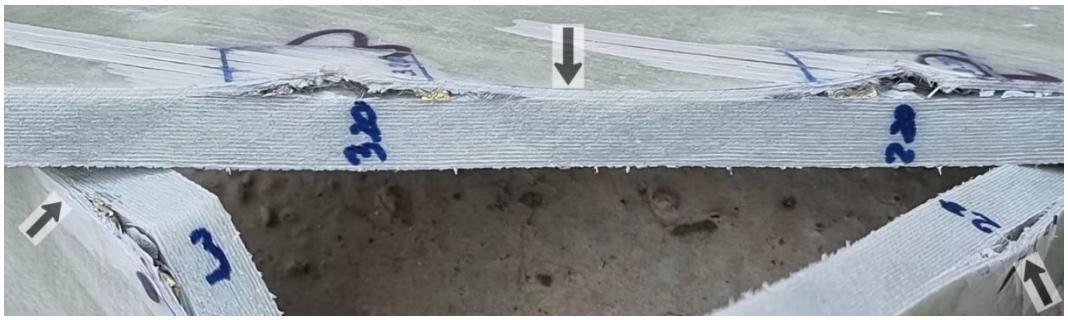


a) b)

c) d) e)

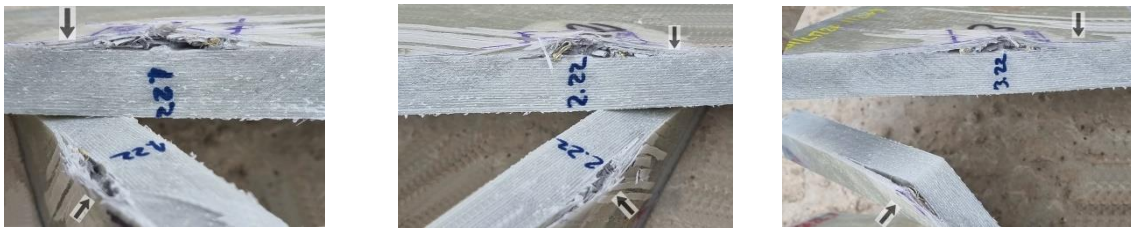


f) g) h)



i)

Fig. 5.11. Rezultatele tragerii pe panoul cu 20 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3, i) Secțiune prin două focuri

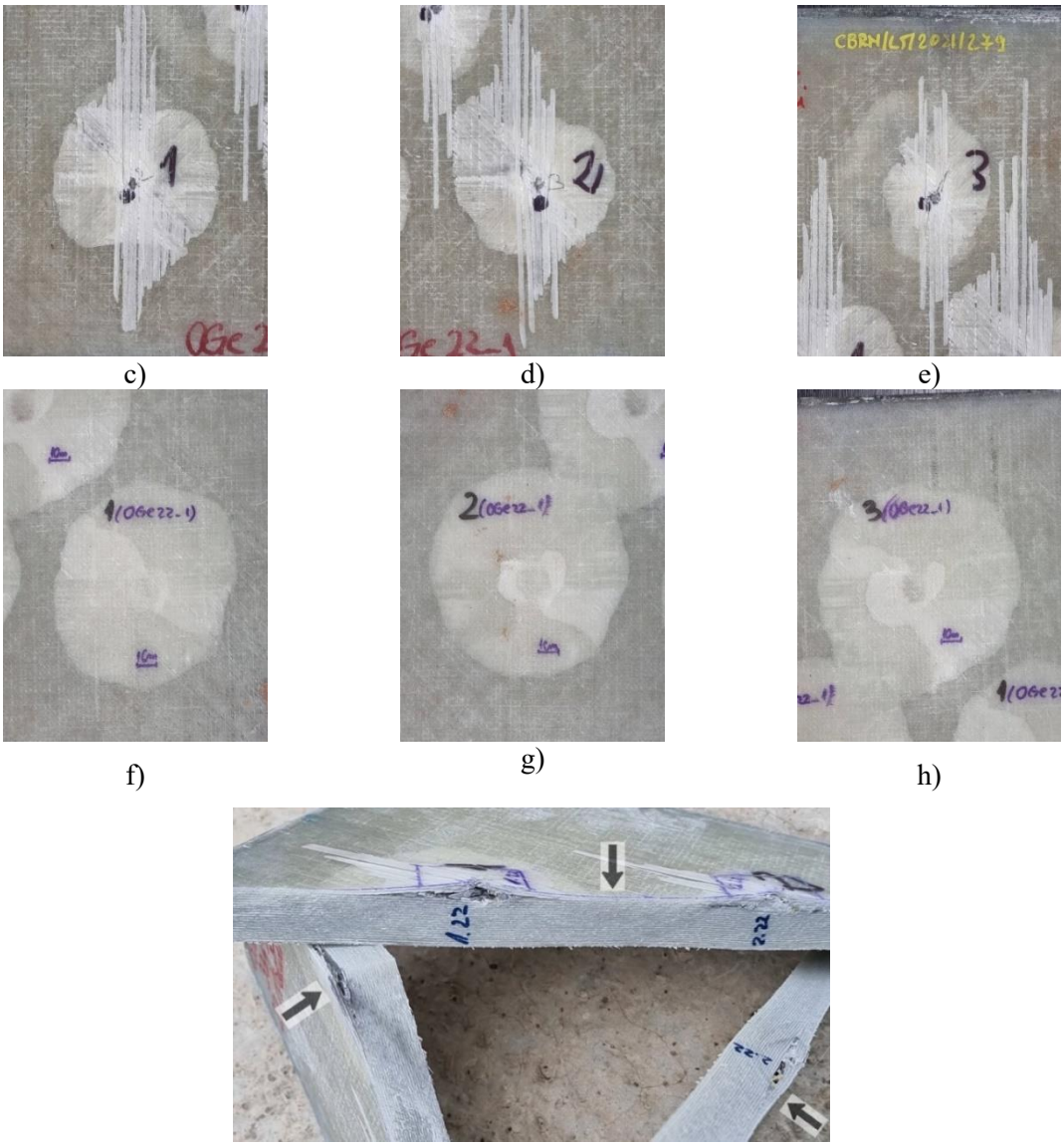


a) Focul 1 b) Focul 2 c) Focul 3

Fig. 5.12. Panou de protecție balistică OGe22 (22 straturi de țesătură cuadriaxiale)



a) b)



c) d) e)

f) g) h)

Fig. 5.13. Rezultatele tragerii pe panoul cu 22 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3, i) Secțiune prin două focuri

Figurile 5.12 si 5.13 prezintă detalii asupra impactului prin panoul OGe22, cu 22 straturi. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, având 2-4 straturi rupte. Pentru această amenințare, definită prin mărimea, materialele și viteza proiectilului, panoul de 22 straturi rezistă foarte bine.



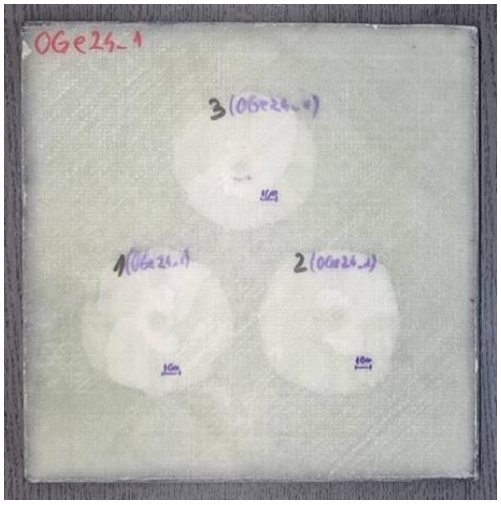
a) Focul 1 b) Focul 2 c) Focul 3

Fig. 5.14. Panou de protecție balistică OGe24 (24 straturi de țesătură cuadriaxiale)

Figurile 5.14 și 5.15 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe24, cu 24 straturi de țesătură cuadriaxială. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, panoul de 24 straturi rezistă foarte bine. Din aceste macro-fotografii, nu se observă deformații mari ale ultimelor straturi, evidențiindu-se caracterul rigid al panoului de această grosime și pentru această amenințare.



a)



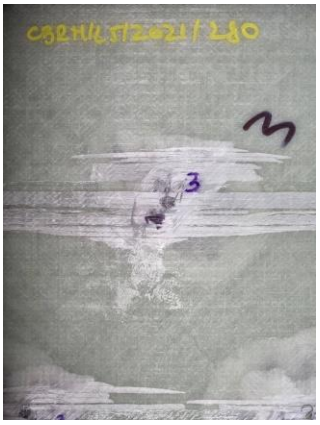
b)



c)



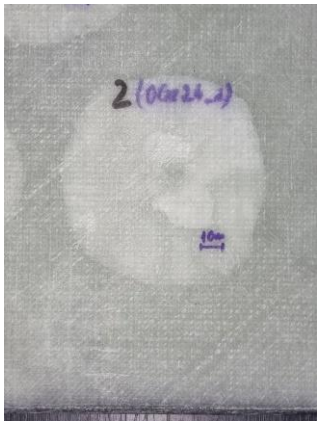
d)



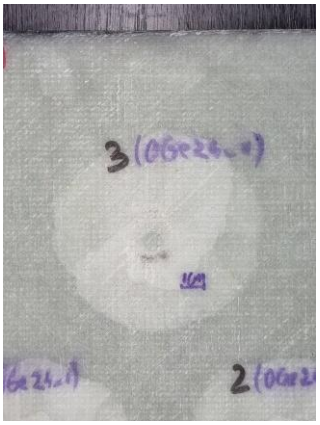
e)



f)



g)



h)



i)

Fig. 5.15. Rezultatele tragerii pe panoul cu 24 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3, i) Secțiune prin două focuri



Focul 1



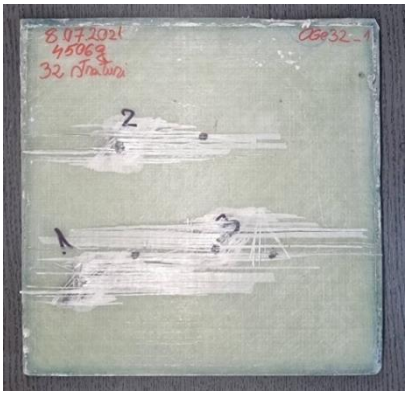
Focul 2



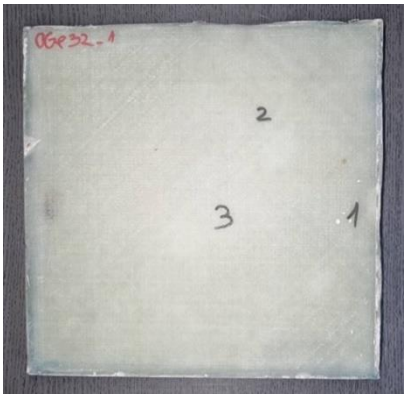
Focul 3

Fig. 5.16. Panou de protecție balistică OGe32 (32 straturi de țesătură cuadriaxiale)

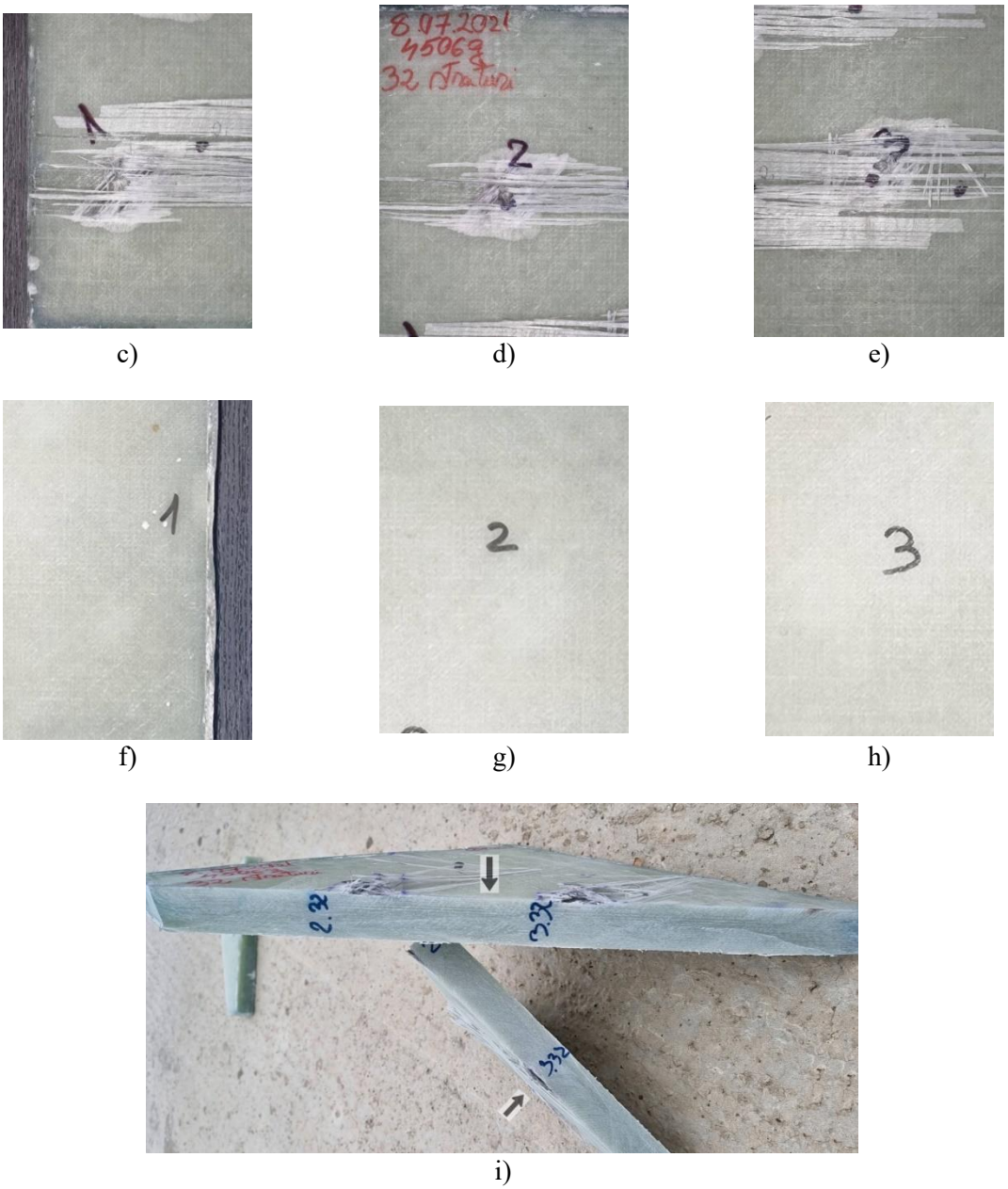
Figurile 5.16 și 5.17 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe32, cu 32 straturi. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, panoul de 32 straturi rezistă foarte bine. Pentru acest panou, gloanțele au fost ricoșate, neexistând urme de cămașă sau miezul glonțului, cum sunt pe panourile cu straturi mai puține. Pe spatele panoului, nu există nicio urmă de delaminare. Analizând fotografiile secțiunilor prin panou, acesta poate fi considerat prea bun pentru acest nivel de amenințare; oprirea proiectilului după câteva straturi rupte îl recomandă pentru încercări la un nivel imediat superior (FB4 sau FB5).



a)



b)



c) d) e)

f) g) h)

i)

Fig. 5.17. Rezultatele tragerii pe panoul cu 32 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilul), c) detaliu față pentru focul 1, d) detaliu față pentru focul 2, e) detaliu față pentru focul 3, f) detaliu spate pentru focul 1, g) detaliu spate pentru focul 2, h) detaliu spate pentru focul 3, i) Secțiune prin două focuri

5.6. Mecanisme de cedare în compozitele testate

Mecanismele de cedare ale compozitelor stratificate, așa cum sunt și cele testate pentru acest studiu de cercetare, sunt diferențiate prin mulți factori, printre care cei mai importanți sunt cei care caracterizează proiectilul (forma, dimensiunile, masa, viteza de impact și, implicit, energia cinetică la impact) și ținta (natura materialelor, succesiunea lor în sistem, densitatea specifică, grosimea, efectele chimice, termice pe care le provoacă proiectilul etc.) [15], [37].

Acestea sunt explicate cu ajutorul imaginilor post-testare: tip fotografie macro în vedere și secțiune și imagini SEM în vedere și secțiune, în zona de penetrare și oprire a proiectilului.

Imaginile SEM au fost obținute la microscopul cu scanare electronică de la Universitatea „Dunărea de Jos" din Galați, Facultatea de Științe și Mediu.

Probele au fost tăiate încât să poate fi introduse în camera de vid a microscopului (aria unei probe având 20 mm x 40 mm).

Având în vedere natura materialelor, posibil de evidențiat în câmpul vizual al microscopului (metale, polimeri, sticlă), probele au fost acoperite cu aur.

Înainte de a fi analizate la microscopul cu scanare cu electroni, probele au fost montate pe un suport de aluminiu, prin fixarea cu o bandă de carbon dublu adezivă. Datorită caracterului slab conductor al polimerilor sau compozitelor care conțin polimeri, este necesară acoperirea (metalizarea) suprafețelor probelor prin procedeul pulverizării în vid (vaporizare catodică – sputtering). Acest procedeu constă în aplicarea unui strat foarte subțire metalic (grosime maximă de 7 nm) de aur, iar echipamentul folosit este SPI Sputter Coater Module (SPI Supplies, USA). Se produc descărcări în plasmă cu o intensitate a curentului de 18 mA, în atmosferă controlată, cu atomi ai unui gaz inert (argon). Condițiile de lucru au fost: timp maxim de acoperire 120 s, presiunea vidului 0,1 mbar.

Parametrii care au fost reglați pentru o imagine clară la microscopul electronic au fost: **HV** (high voltage), **mag** (magnificare/mărire), **WD** (distanța de lucru), **spot** (lățimea fasciculului de electroni), **det** (detectorul folosit în analiză, de tip LFD, large field detector), **mode** (SE- electroni secundari emiși de suprafața probei). Mărirea a fost de ×20, ×50, ×100, ×200, ×500, ×1000, ×2000, ×5000 și ×10000, în funcție de procesul de distrugere care s-a dorit evidențiat. În acest studiu sunt incluse doar o parte din imaginile SEM realizate.

Fiecare din mecanismele enumerate în Fig. 5.18 va fi explicat pentru impactul realizat experimental (glonț 9 mm FMJ și placă de compozit de țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă și rășină epoxidică, cu diferite grosimi sau număr de straturi de țesătură.)

Energia consumată pentru deformare la compresiune din cauza impactului proiectilului are două componente, datorate:

- compresiunii sub proiectil, foarte evidentă;
- compresiunii + încovoierii + întinderii, o solicitare compusă, spre marginea zonei de acțiune a proiectilului.

Energia consumată pentru deformarea conică sau piramidală a țintei este importantă, dar vizibilitatea ei este mai pronunțată pe plăcile flexibile de la armurile individuale [191], [206]. Pentru plăci rigide, deformația este relativ mică, deci deformația nu este un mecanism care să absoarbă mult din energia cinetică a proiectilului.

Energia necesară pentru ruperea firelor. Acest mecanism este diferit pentru armurile flexibile și cele rigide. Pentru fibrele de sticlă, se observă, statistic, că secțiunile de rupere ale fibrelor sunt perpendiculare pe axa longitudinală a fibrei, fiind rare ruperile înclinate (Fig. 5.22 și Fig. 5.25).

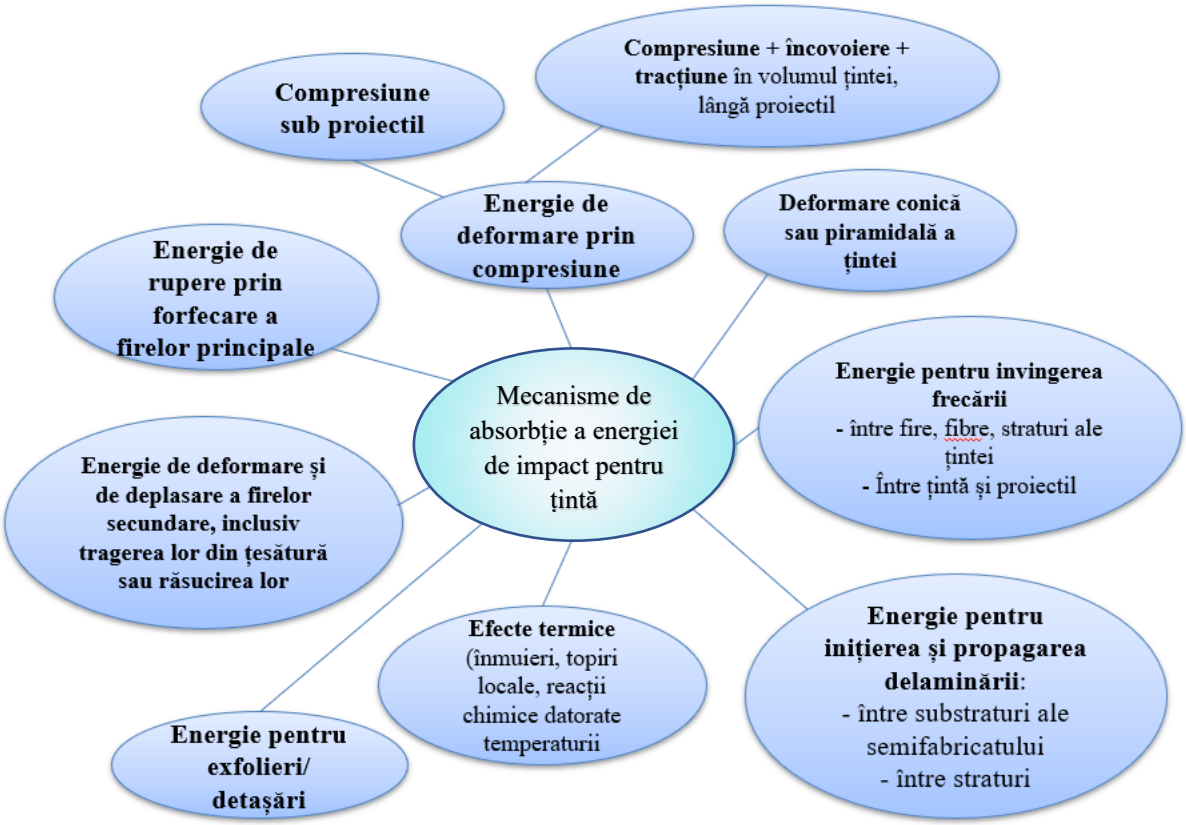


Fig. 5.18. Mecanisme de absorbție a energiei de impact pentru țintă

Pentru plăcile rigide, testate, nu s-au observat trageri ale firelor din țesătură, dar o parte din energia transferată plăcii s-a utilizat pentru încovoierea și revenirea firelor/fibrelor la trecerea proiectilului, de aceea zona vizibilă de trecere a proiectilului are un diametru mai mic decât cel al proiectilului și uneori, nici nu este prea vizibilă forma cilindrică, din cauza orientării firelor substraturilor pe direcții diferite.

Energia consumată pentru învingerea frecării apare între proiectil și straturile plăcii, dar și între straturi, după delaminarea unora dintre ele, dacă există mișcare relativă oricât de mică între ele. Urme de frecare intensă între fibre și proiectil sunt vizibile, sugerând un coeficient de frecare destul de mare, pentru că se văd urme de deformare plastică în materialul miezului sau cămășii proiectilului și de deplasare a fibrelor de sticlă (târâre) (Fig. 5.19).

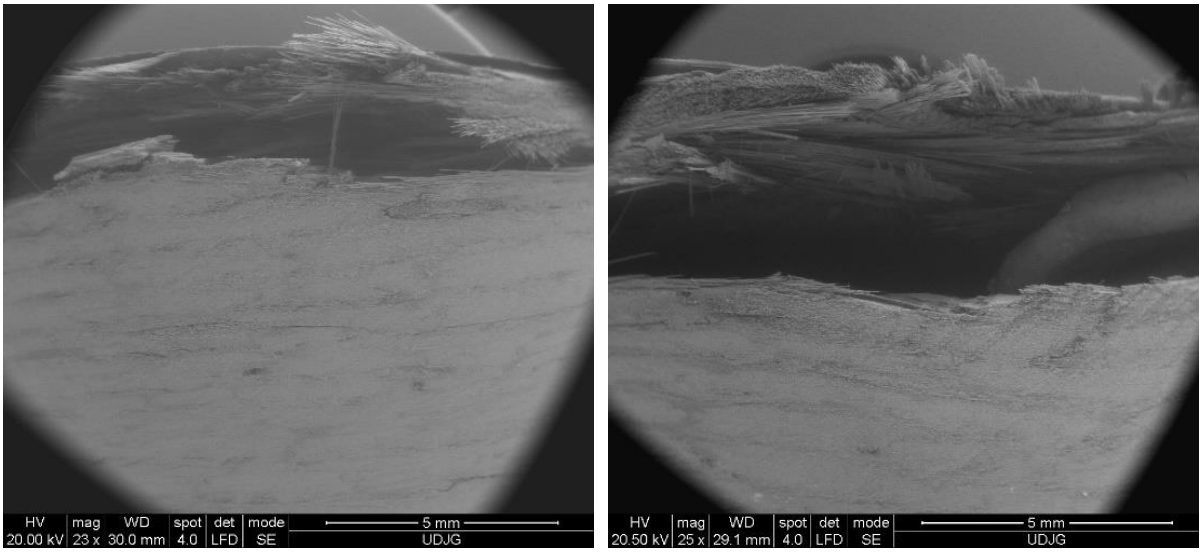
Energia pentru inițierea și propagarea delaminării depinde de caracteristicile matricei și de adeziunea matricei la fiecare strat. Procesul de delaminare se realizează în etape succesive. În Capitolul 3, s-a presupus un scenariu de delaminare la care, atunci când limita de rupere la tracțiune considerată pentru coeziunea între straturi este atinsă, delaminarea avansează pe o anumită lungime. Constantele necesare acestei modelări au fost stabilite de autor, luându-se în considerare literatura consultată [252]. Aspectul delaminării depinde de mulți factori, atât materialele implicate (ale panoului și proiectilului), cât și de parametrii impactului (masa proiectilului, viteză de impact, condiții de mediu), incluzând elasticitatea firelor și a matricei,

adeziunea dintre ele, grosimea plăcilor (implicit de numărul de straturi). Delaminarea poate avea loc între straturi (cel mai probabil, vizibil și pentru aceste panouri), dar și între substraturi (în funcție de tehnologia de atașare a substraturilor, mai ales la țesături cuadriaxiale și de calitatea aderenței între substraturi).

Energia absorbită pentru exfolieri și detașări locale, fragmentări locale ale fibrelor depinde mult de natura materialelor compozitului.

În funcție de nivelul încercat, de tipul proiectilului și de natura materialelor țintei pot exista două situații:

- când efectele termice ale impactului pot fi neglijabile;
- când efectele termice ale impactului nu sunt neglijabile [6], [8], [234].



a) Panoul 16 straturi b) Panoul de 20 straturi, focul 1

Fig. 5.19. Delaminare între stratul pe care se oprește proiectilul și ultimul strat penetrat

În Fig. 5.20 sunt date, sintetic, mecanisme de cedare a țintei, diagramă realizată după consultarea unor articole de referință [97], [137], [142], [146], [190], [228], [233]. Deși acestea pot fi descrise separat, pe țintă, pe orificiul de penetrare, pe straturile distruse sau în apropierea lor, aceste mecanisme se pot suprapune, rezultatul fiind sinergic și uneori mai dificil de identificat. Aceste mecanisme ar trebui diferențiate în funcție de rezistența la impact a țintei:

- mecanisme caracterizând penetrarea totală și
- mecanisme de cedare caracteristice arestării proiectilului.

Pentru plăcile din a doua categorie, particularitățile și intensitatea proceselor sunt dependente și de grosimea țintei.

Delaminarea poate apărea între straturi și/sau între substraturile compozitului. Forma, mărimea și zona în care apare delaminarea pot diferi în funcție de mai mulți factori:

- tipul de penetrare (totală sau parțială),
- grosimea panoului,
- caracteristicile amenințării (tipul de proiectil, energia de impact, materialele care participă la formarea proiectilului.

Penetrarea totală face vizibile mai multe zone de delaminare, mai intense între primele și ultimele straturi. Inexistența unui material în fața sau în spatele primelor sau ultimelor straturi inițiază delaminarea și o dezvoltă substanțial.

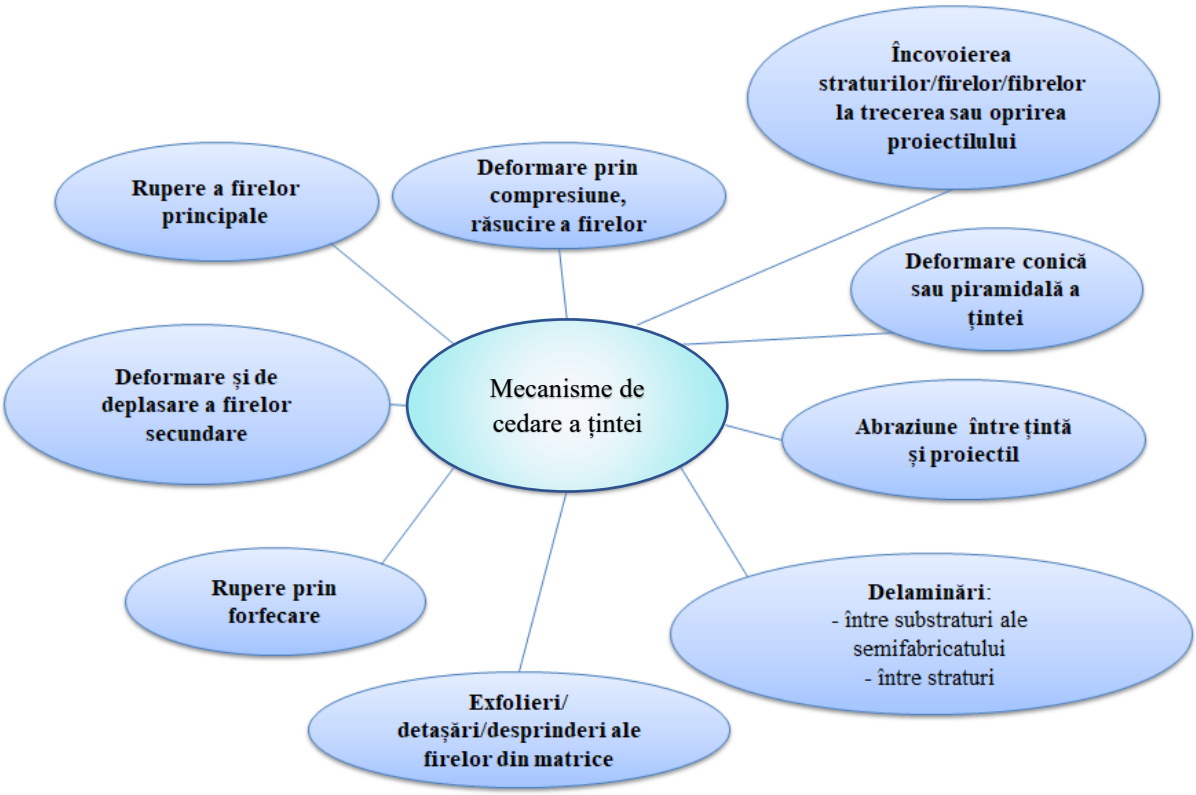


Fig. 5.20. Mecanisme de cedare a țintei

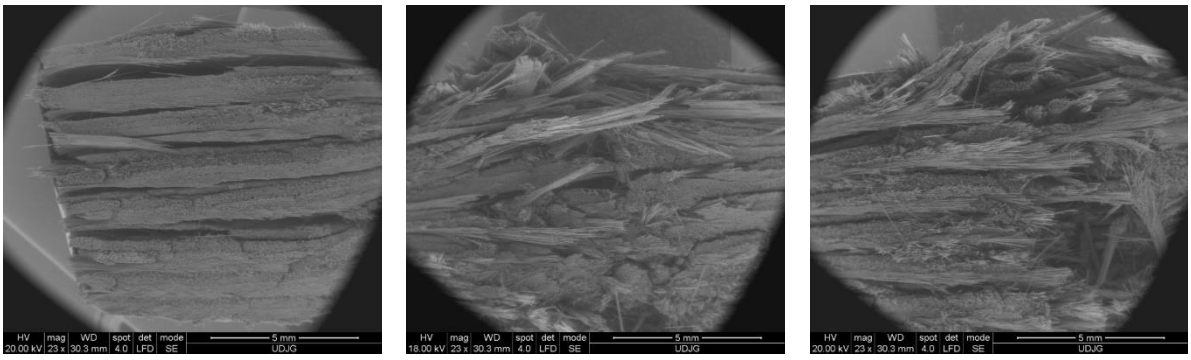
La penetrare parțială pot apărea trei zone cu delaminare:

- între primele straturi, mecanismul și aspectul delaminării fiind apropiate de cele de la penetrare totală; primul strat are fire încovoiate, cu curbură în afara planului inițial al stratului;

- delaminare intensă între ultimul strat perforat și primul strat pe care se oprește proiectilul, deoarece oprirea glonțului îl obligă să se deformeze lateral și să se fragmenteze, fragmentele fiind împinse lateral și forțând delaminarea în această zonă a compozitului;

- delaminare între ultimele straturi, vizibilă mai bine la panourile mai subțiri cu penetrare parțială (16 straturi) și mai puțin la panourile mai groase (cu 24 straturi și 32 straturi).

Se observă că orificiul de trecere al proiectilului nu este bine delimitat (ca un cilindru) din cauza ruperii asimetrice a straturilor succesive de țesătură (și din cauza orientării pe diverse direcții ale firelor din cele 4 substraturi ale țesăturii. Se observă și revenirea firelor care au fost încovoiate în domeniul elastic (Fig. 5.21 și Fig. 5.22).



a) b) c)

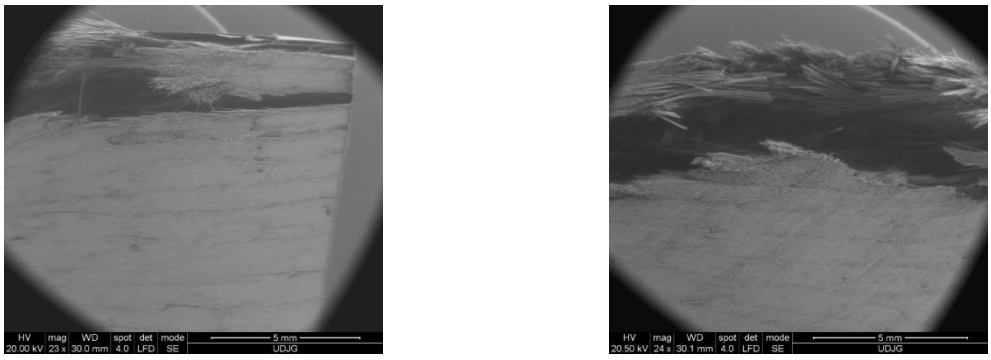
Fig. 5.21. Imagini SEM, în secțiune pentru panoul de 8 straturi (penetrare totală)



a) b)

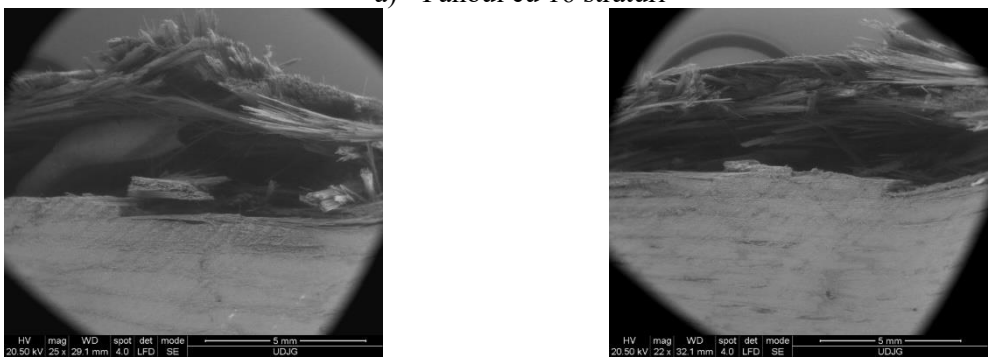
Fig. 5. 22. Fire rupte de la un impact pe panoul de 8 straturi

Detalii pentru orificiul de pătrundere, din care se observă direcțiile firelor pe diferite substraturi sunt date în Fig. 5.23.



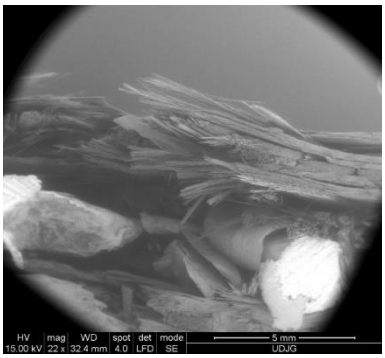
Focul 1 Focul 3

a) Panoul cu 16 straturi

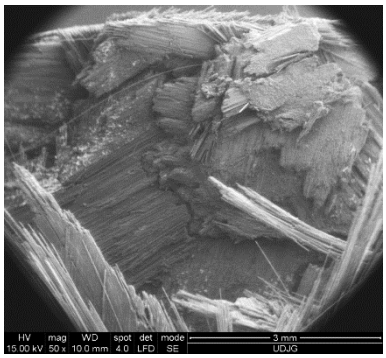


Focul 1 Focul 3

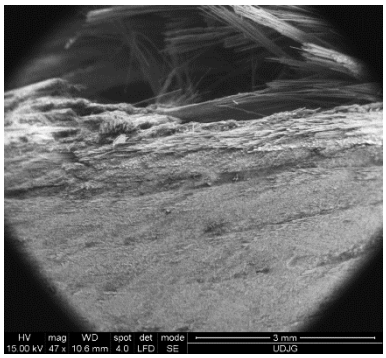
b) Panoul cu 20 straturi



c) Panoul cu 22 straturi- Focul 1



Focul 1 (vedere de sus, din direcția impactului)



Focul 3 (secțiune)

d) Panoul cu 24 straturi

Fig. 5.23. Imagini SEM pentru panourile de 16, 20, 22 și 24 de straturi

În Fig. 5.24 se observă ruperea aproape circulară a firelor, câteva fragmente de fire sau straturi sunt presate pe primul strat care a rezistat și care, la rândul lor, produc fragmentarea glonțului și împingerea acestor fragmente în lateral, depărtând mult straturile deja delaminate. În Fig. 5.25 este prezentat un detaliu asupra focului 1 de pe panoul cu 20 straturi.

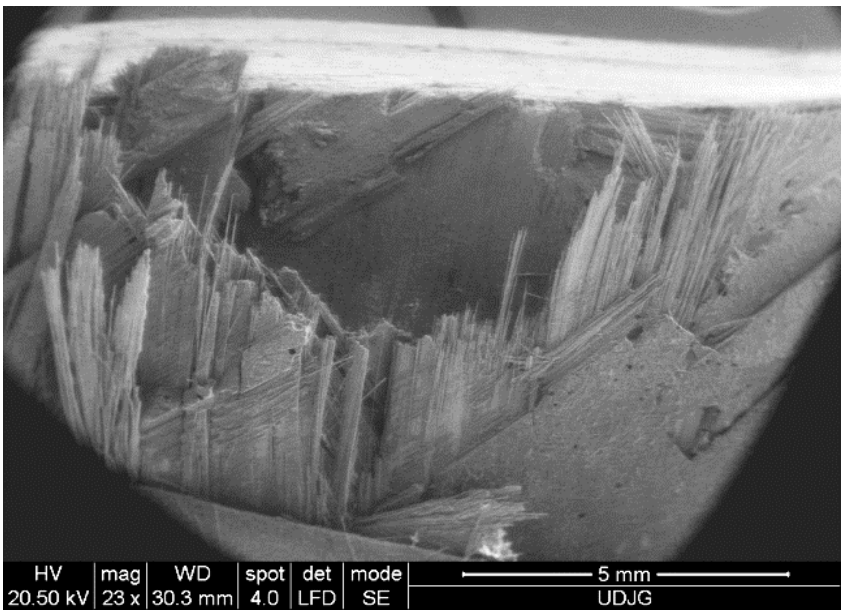


Fig. 5.24. Vedere de sus a feței panoului de 20 de straturi, focul 1

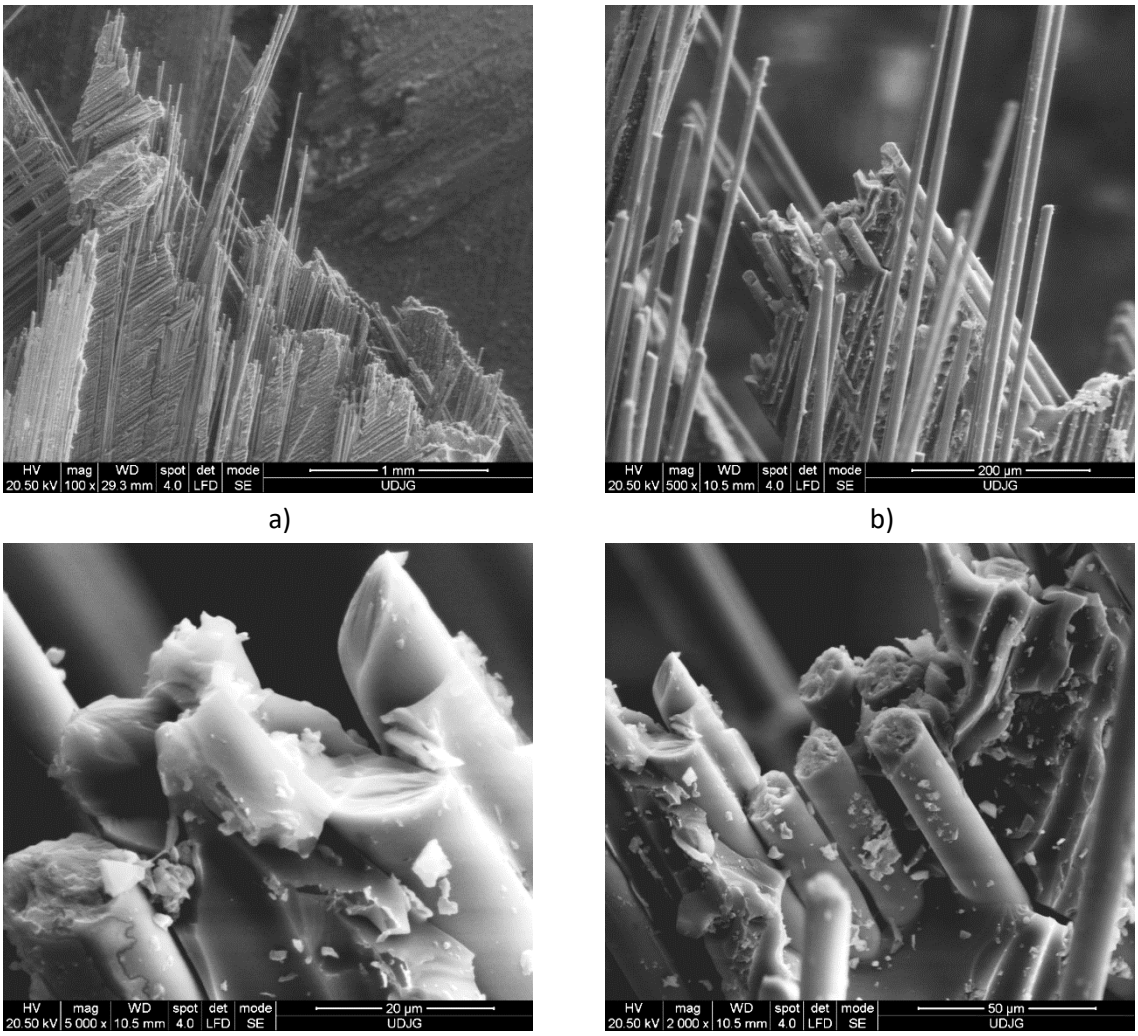


Fig. 5.25. Detalii din vederea de sus a feței panoului de 20 de straturi, focul 1: a) și b) forfecarea fibrelor; c) și d) detaliu cu forfecarea fibrelor în diverse plane față de axa fibrelor și cu fragmente de matrice

5.7. Identificarea componentelor care au participat la impact prin analiză EDX

Figura 5.26 prezintă o analiză a elementelor unei zone punctuale din secțiunea prin compozitul cu 22 de straturi (OGe22), după executarea tragerii, pentru focul 1. Imaginea este luată pe direcția de impact, prin orificiul de pătrundere a glonțului. Se observă că materialul de culoare deschisă este plumb (Pb) sau aliajul de plumb-zinc din care este realizat miezul proiectilului și imprimarea țesăturii pe acest aliaj, de aici și urme de carbon (de la rășina compozitului) și de aluminiu (Al), oxigen (O) (de la fibra de sticlă). Urmele de elemente metalice (Sn, Sb) pot fi de la aliajul miezului, iar alte elemente metalice, cum ar fi Zn pot fi rămase de la cămașă. Cuprul este prezent în această zonă punctuală ca rezultat al frecării aliajului de Pb cu cămașa care este din aliaj de cupru, pe durata comprimării miezului în cavitatea generată prin împingerea laterală a glonțului, în momentul în care a fost oprit.

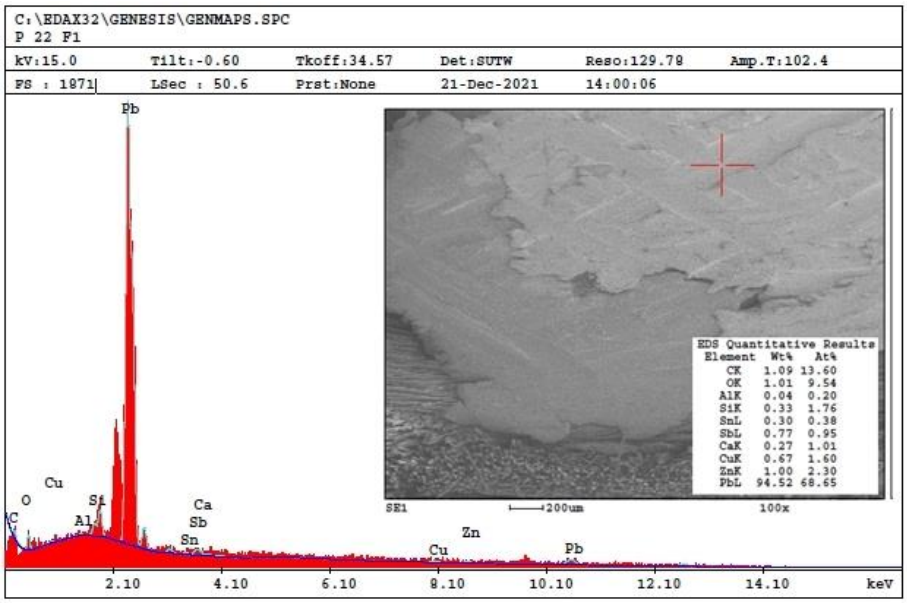


Fig. 5.26. Analiză elementală EDX, panoul de 22 straturi, focul 1, punctul 1 (țința roșie)

Figura 5.27 prezintă identificarea fragmentelor cămășii proiectilului în punctul marcat cu o țintă roșie. Se observă, în punctul analizat, o concentrație mare de cupru (58,83%) și zinc (24,09%). Sunt prezente și elementele plumb (3,25%), staniu (0,91%) și stibiu (1,03%), elemente prezente de obicei în aliajul utilizat pentru miezul proiectilului.

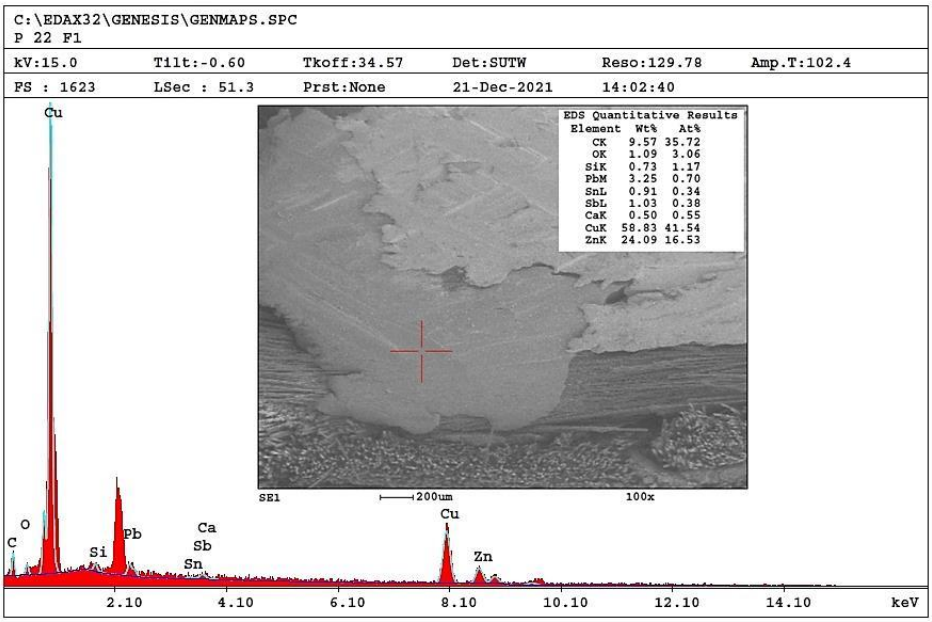


Fig. 5.27. Analiză elementală EDX, placă de 22 straturi, focul 1, punctul 2 (țința roșie)

Pe analiza EDX a întregii imagini din Fig. 5.28, se observă carbonul, care este caracteristic rășinii, oxigenul care este conținut și în rășină, dar și în oxizii din fibrele de sticlă, oxizi ai Al, Si, Ba, Ca și Mg. Este o zonă cu compozit fragmentat, urmele albe din stânga jos putând fi urme de aliaj de Pb din miez, aderate la fragmentele de compozite pe durata impactului.

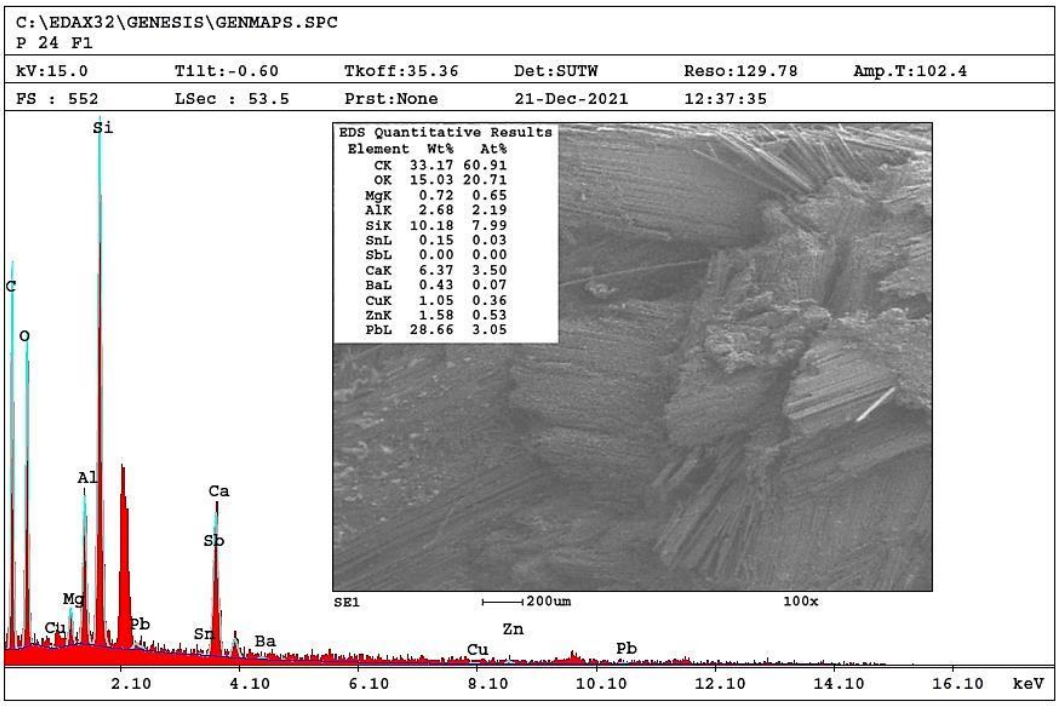


Fig. 5.28. Analiză elementală EDX, pentru panoul de 24 de straturi, focul 1

Pe imaginea SEM din Fig. 5.29, s-a conturat un dreptunghi cu linii roșii pentru a identifica de unde provine materialul de culoare mai deschisă. Zona analizată conține mult Pb (64,79% wt), ceea ce înseamnă că fragmentele mai deschise sunt din miezul proiectilului. Prezența carbonului destul de mare (27,19% wt) arată că fragmente de matrice relativ mici, de ordinul zecilor de microni, cel mult, au fost amestecate în masa miezului, pe durata impactului.

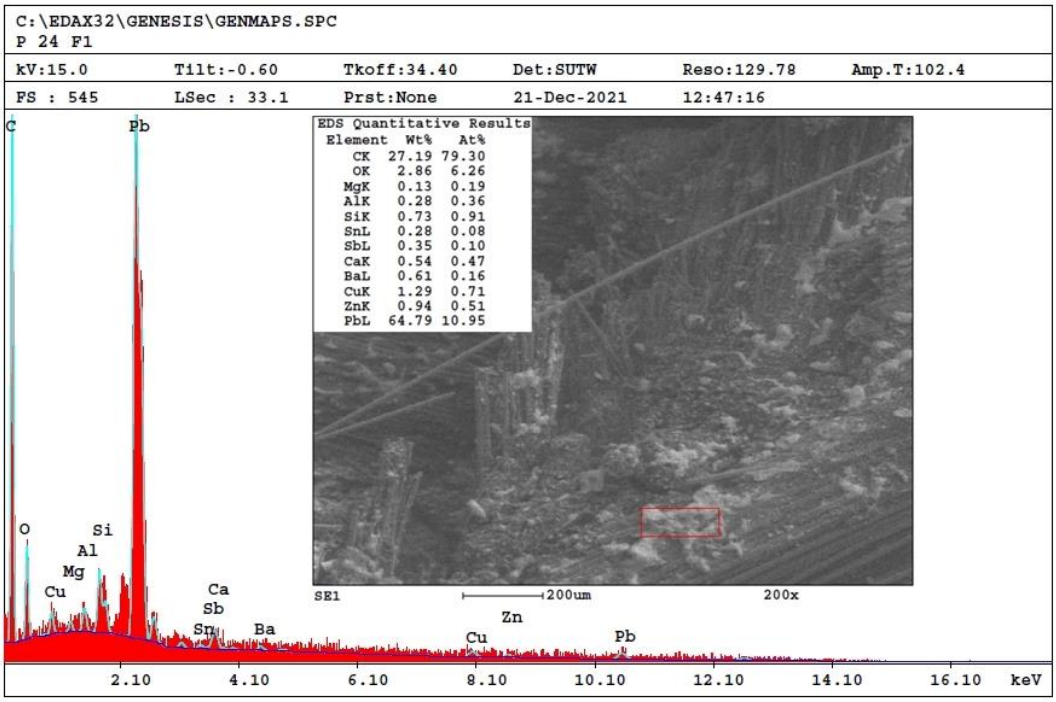


Fig. 5.29. Panoul de 24 straturi. Fragmentarea și împrăștierea miezului proiectilului

Figura 5.30, prezintă un detaliu al zonei de impact de pe stratul pe care s-a oprit proiectilul, care pune în evidență următoarele:

- fragmente rupte din matrice;
- fragment din fibră de sticlă (colțul din stânga sus);
- fragmente de formă sferoidală, care au fost analizate EDX, dovedindu-se că micro-picăturile observate (de altfel, rare) sunt din aliaj de plumb, forma sugerând că datorită vitezei impactului (373 m/s), bucăți mici de plumb au ajuns în stare topită sau înmuiată, și s-au solidificat rapid. Concentrația de Pb în această zonă punctuală este de 81,45% wt, elementele caracteristice fibrei de sticlă nefiind prezente, dar posibil fragmente și mai mici de matrice să fie înglobate în picătura de aliaj de plumb (Pb), deoarece concentrația locală de carbon (C) este de 12,37% wt.

Dacă se analizează punctul din stânga jos detaliat în Fig. 5.31, marcat de țința roșie, se observă că aglomeratul rezultat din impact este un amestec de aliaj de Pb al miezului și matrice (evidențiată de prezența carbonului, 22,25% wt).

Tot pe aceeași imagine a fost identificată natura fragmentului din stânga sus (Fig. 5.32), ca fiind fibră de sticlă (prin prezența B, O, Si, Ca, Al), pe care mai este încă atașată matrice (cu 43,49% wt carbon), explicabil prin prezența carbonului.

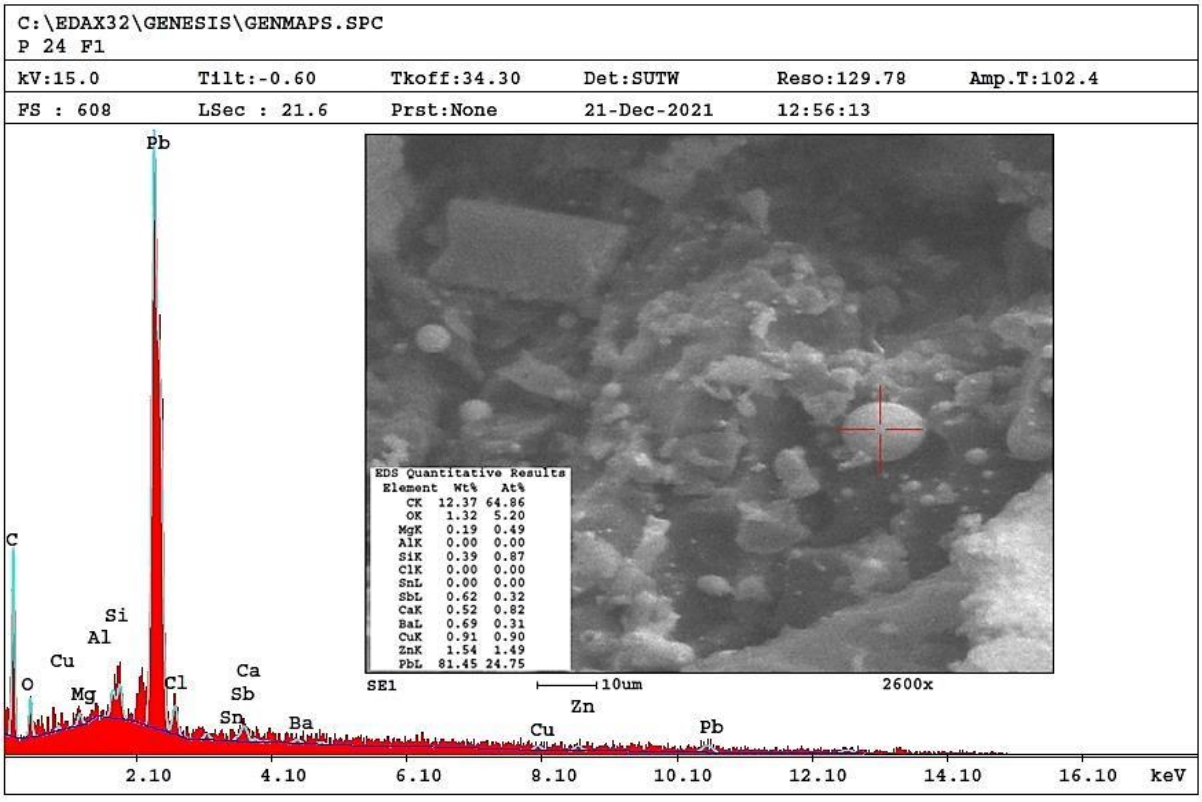


Fig. 5.30. Panoul de 24 straturi. Topirea și solidificarea fragmentelor de miez al proiectilului (din aliaj de plumb)

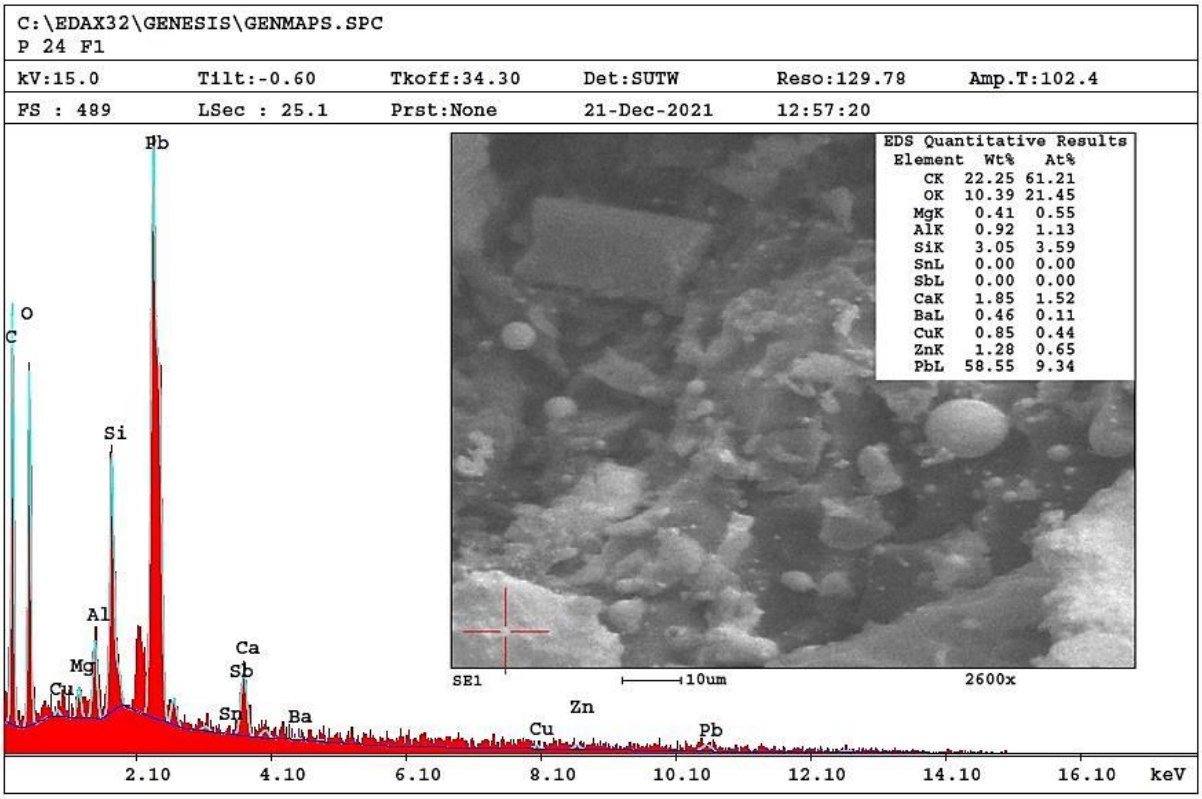


Fig. 5.31. Un fragment mai mare din miezul proiectilului, parțial înmuiat. Panoul de 24 de straturi

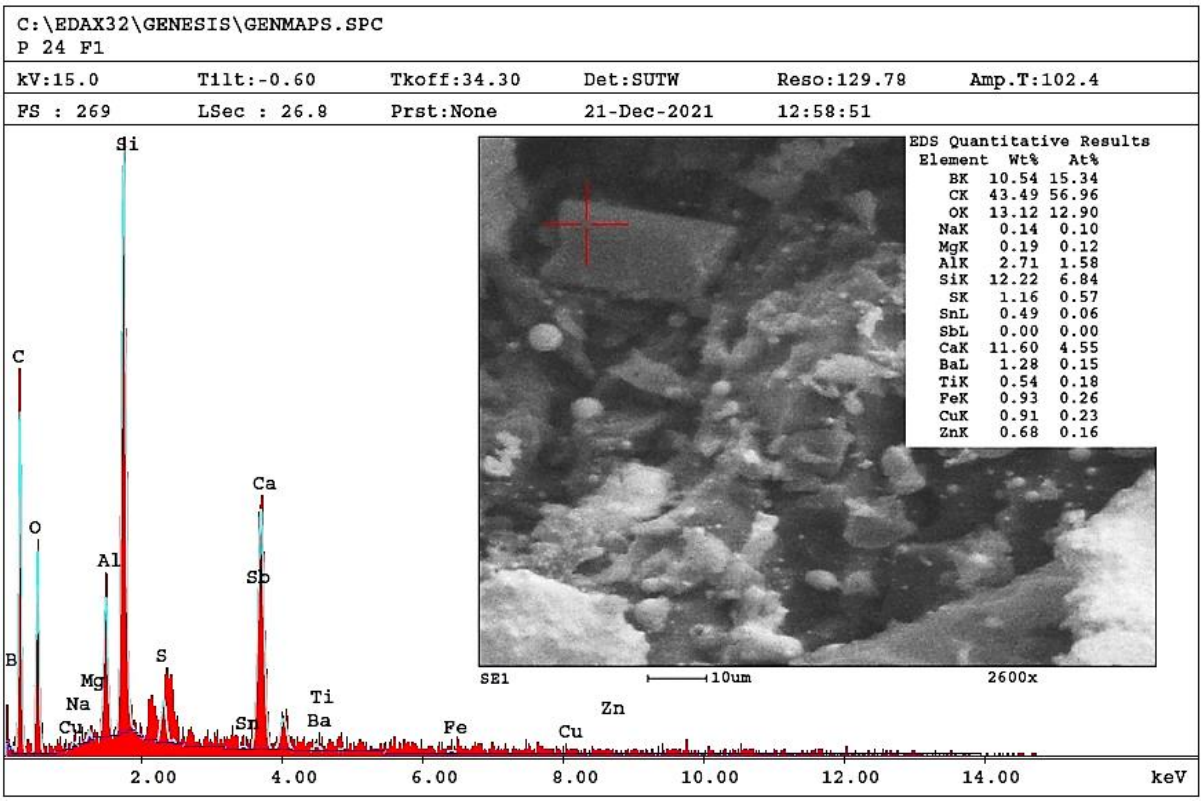


Fig. 5.32. Un fragment de fibră se sticlă, identificat prin concentrația elementelor identificate punctual. Panoul de 24 de straturi

Cavitatea analizată cu ținta roșie arată că aceasta este formată din matricea organică a compozitului, având o concentrație de 82,53% wt carbon (Fig 5.33).

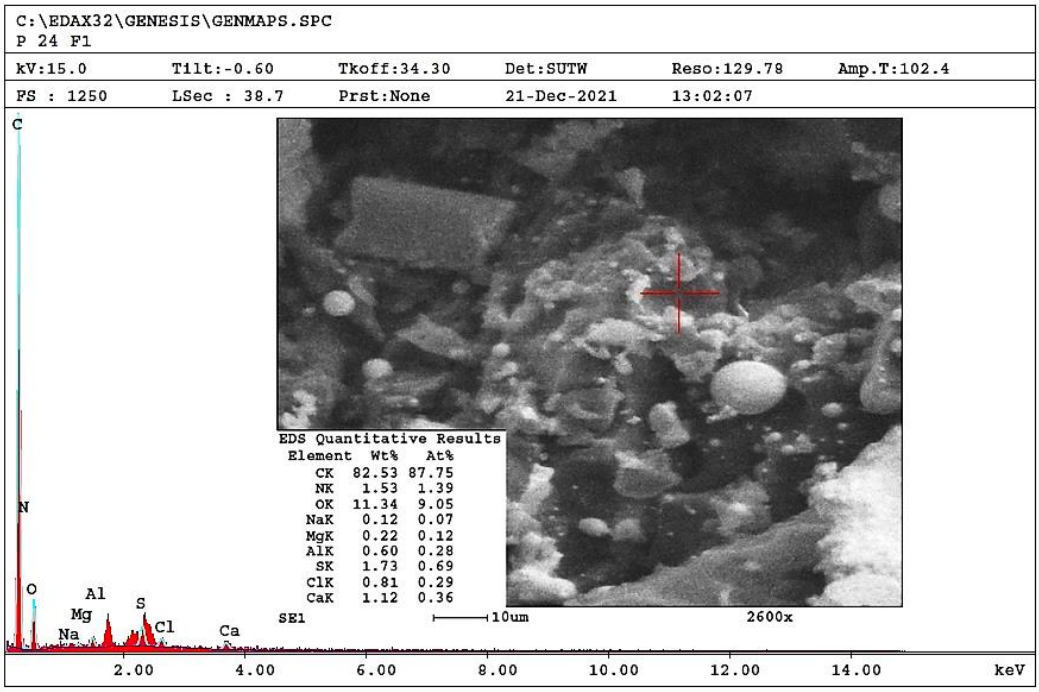


Fig. 5.33. Analiza elementală a suprafeței unei cavități, identificându-se matricea epoxidică a compozitului. Panoul de 24 de straturi

În Fig. 5.34, sunt date mecanisme de distrugere, identificate în zona în care a fost oprit proiectilul: A – fragment de compozit, desprins din straturile distruse și strivit pe straturile care nu au mai cedat; B – miezul proiectilului, deformat puternic și cu fragmente de fibră de sticlă; C – fire rupte, se observă că impactul cu firele a desprins matricea de fibrele rupte.

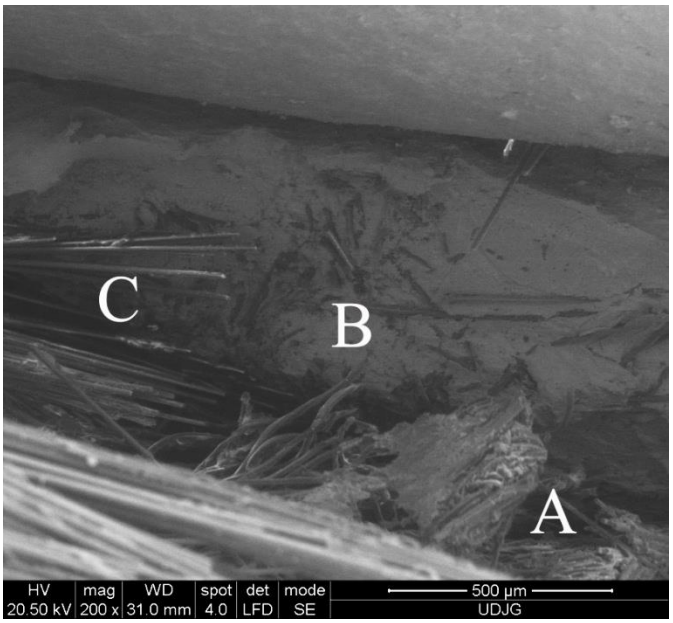


Fig. 5.34. Mecanisme de distrugere în zona în care a fost oprit proiectilul

Această imagine a fost analizată EDX pentru a vedea dacă acoperirea cu aur pentru a avea o rezoluție mai bună a materialelor nemetalice, influențează analiza elementală (Fig. 5.35). Din Tabelul 5.2, se observă că variația în procente este destul de mică și se pot face analize fără includerea aurului.

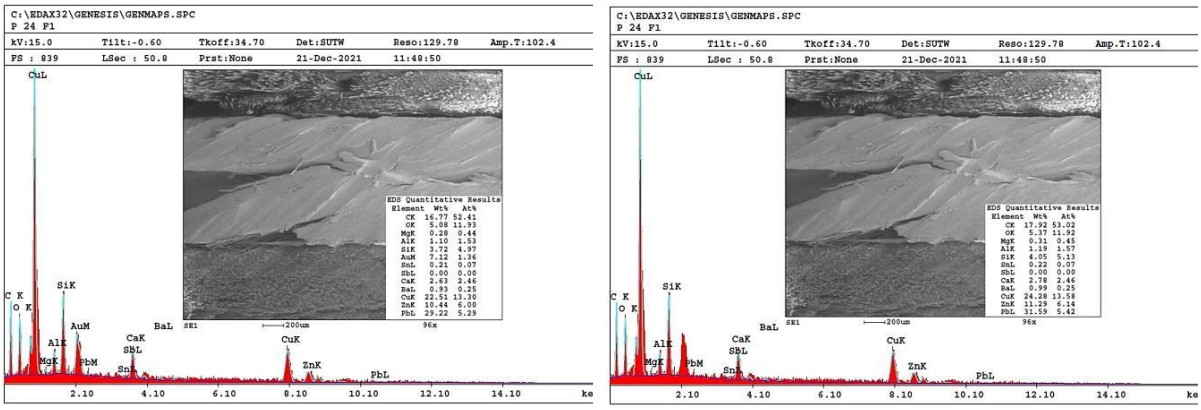


Fig. 5.35. Analiză elementală EDX. Variația elementelor de interes cu sau fără includerea aurului în lista elementelor analizate

Tabelul 5.2. Variația în procente a elementelor cu sau fără aur, pentru analiza elementală a aceleiași imagini

Element	Analiză în care a fost inclus aurul	Analiză în care nu a fost inclus aurul	Variația în %
CK	16,77	17,92	1,15
OK	5,08	5,37	0,29
MgK	0,28	0,31	0,03
AlK	1,10	1,19	0,09
SiK	3,72	4,05	0,33
AuM	7,12		
SnL	0,21	0,22	0,01
SbL	0,00	0,00	0,00
CaK	2,63	2,78	0,15
BaL	0,93	0,99	0,06
CuK	22,51	24,28	1,77
ZnK	10,44	11,29	0,85
PbL	29,22	31,59	2,37

Conglomeratul analizat (Fig. 5.36) arată că, fragmente din miezul din aliaj de plumb, sunt puternic deformate. Suprafața este rugoasă, ceea ce arată că materialul a fost doar puternic deformat și nu înmuiat sau topit. Se observă pe fragmentul analizat (pătratul limitat cu linii roșii) o concentrație mare de Pb, Cu și Zn, deci acest material a rezultat din fragmentarea proiectilului

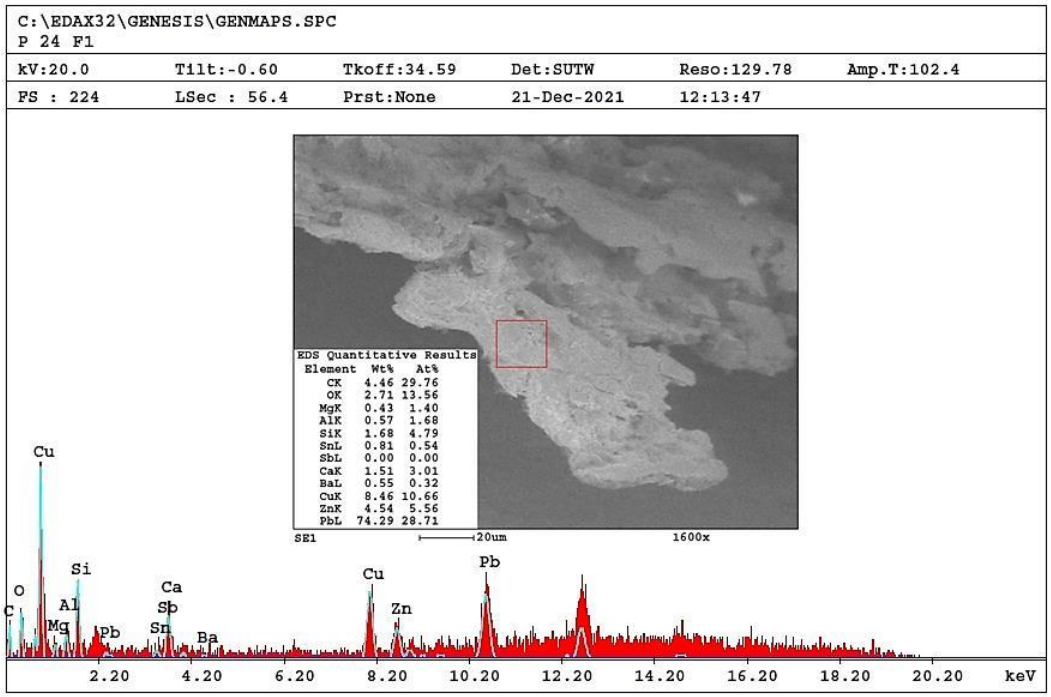


Fig. 5.36. Analiză elementală EDX pentru panoul cu 24 straturi, focul 1

5.8. Concluzii privind comportarea la impact balistic a panourilor proiectate

Studiul a pornit de la grosimi de plăci de protecție balistică, lovite cu proiectile similare (9 mm), dar nu identice, și autorul a proiectat un set de panouri de grosimi diferite, cu caracteristici foarte bune în ceea ce privește raportul masic fibre/material compozit.

După efectuarea testelor (care s-au încadrat la nivel FB2) și compararea rezultatelor prin numărul de straturi rupte de proiectil, s-au constatat următoarele: panoul de 8 straturi a fost penetrat complet, celelalte panouri au rezistat, prezentând penetrare parțială cu distrugerea câtorva straturi (panourile de 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi, 24 straturi prezintă câte 3-4 straturi rupte, iar la panoul cu 32 straturi au fost rupte doar 2 straturi, iar glonțul a fost ricoșat).

Creșterea grosimii plăcii testate, a dus la reducea cercurilor care sugerează delaminarea pe spatele plăcilor, ceea ce reflectă faptul că fenomenul de delaminare, la aceiași amenințare scade în intensitate (spre spatele plăcilor) dacă numărul de straturi ale compozitului crește.

Din aceste rezultate se pot trage următoarele concluzii: pentru nivelul testat, panoul de 16 straturi este suficient de rezistent, micșorarea numărului de straturi nu se poate discuta decât după efectuarea unor teste pe panouri cu grosimi intermediare (între 8 și 16 straturi).

Având în vedere comportarea panourilor mai groase, de 20 straturi până la 32 straturi, autorul propune continuarea testelor pe panourile de aceste grosimi pentru un nivel superior, nivel FB3 și FB4, conform SR EN 1522:2004.

Analiza imaginilor macro și SEM a evidențiat procesele de distrugere din compozit și faptul că materialele selectate (țesătura și rășina) sunt adecvate pentru această aplicație.

Capitolul 6. Concluzii și contribuții personale

6.1. Importanța temei

Teza de doctorat cu titlul *„Un studiu teoretic și experimental al pachetelor de protecție balistică pentru blindaje pe bază de fibre de sticlă”* se încadrează în domeniul cercetărilor privind protecția la impact, cu referire la protecția balistică a echipamentelor. *„Războiul modern devine din ce în ce mai puţin o confruntare directă între două armate ale unor state sau alianţe, şi tot mai mult o confruntare între două forţe disproporţionate economic şi militar, în care fiecare parte încearcă să găsească noi tehnici de a câştiga lupta”* [206]. „*Protection is also a weapon”* (Protecția este tot o armă). Dar orice protecție eficace împotriva unei arme va genera o spirală pentru proiectarea unei arme care să o învingă [144].

Un grad de protecţie mai performant pentru personal și echipamente minimalizează riscul de a fi distruse și focalizează atenția personalului pentru îndeplinirea misiunii.

Obiectivul tezei a fost atins deoarece autorul a proiectat, a testat și a analizat distrugerea unei familii de panouri de protecție balistică, care pot fi recomandate pentru aplicații practice. Pe parcursul programului de studii doctorale, programul de documentare, modelare și experimentare a fost îndeplinit, autorul primind sprijinul unor specialiști din domeniul modelării, producerii și încercării panourilor de protecție, de la următoarele instituţii:

- Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN şi Ecologie (CCIACBRNE), București;
- Institutul Național de Cercetări Aerospațiale „Elie Carafoli” - INCAS București;
- INAS Craiova;
- Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați.

Experienţa personalului şi facilităţile acestora, au ajutat la depăşirea graniţelor personale de studiu şi la realizarea unei analize de calitate a temei propuse spre rezolvare.

Această teză de doctorat a avut ca obiectiv proiectarea, realizarea la scară de laborator şi caracterizarea unui panou de protecție, tip compozit, pe bază de țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă, unidirecționale, în matrice epoxidică, prin analiză numerică și o campanie de încercări. S-a validat un model la scară macro, și care a putut fi aplicat pentru îmbunătățirea soluției inițiale și reducerea intervalelor unor parametri, ca numărul de straturi.

Campania de încercări a urmărit comportamentul panourilor de protecţie balistică la acţiunea glonţului de 9 mm FMJ (nivel FB2).

6.2. Concluzii finale asupra rezistenței balistice a panourilor testate

Acest studiu de cercetare este o lucrare unitară și include o sinteză documentară asupra rezultatelor raportate în literatura deschisă, a experimentelor raportate privind performanțele balistice ale materialelor şi panourilor de protecţie realizate pe bază de țesături de fibre de sticlă, făcută cu ajutorul accesului la baze de date, oferit de Biblioteca *Universității „Dunărea de Jos”*.

Lucrarea are 6 capitole interdependente, care, prin succesiune, oferă soluţii privind interpretarea şi înţelegerea comportării materialelor tip compozit stratificat, pe bază de țesături multiaxiale, din fibre de sticlă, folosind datele obţinute prin simulare şi din încercări.

Capitolul 1 evidenţiază studii recente (rapoarte, teze de doctorat, cărți și articole apărute în reviste de prestigiu) asupra încercării panourilor balistice, cu referire la cele realizate din țesături cu fibre de sticlă. Capitolul 1 constituie punctul de plecare de la care s-a inițiat dezvoltarea lucrării şi face o trecere în revistă pentru studiul cercetării privind panourile de protecţie balistică, pe plan internaţional și naţional.

Sistemele de protecţie balistică există într-o mare varietate de soluţii, din punct de vedere al structurii lor, cât şi al naturii materialelor şi combinațiilor acestora. Diversitatea de interacţiuni, mecanisme de cedare şi modificarea comportamentului materialelor participante la impact, necesită o abordare sistematică a proiectării protecției la impact balistic și o analiză detaliată a proceselor de cedare. Modelele analitice, empirice sau semi-empirice și numerice, încearcă să descrie comportarea sistemului de protecție în cazuri particulare, cu aplicabilitate într-un interval îngust al parametrilor de influență, de multe ori doar pentru o anumită amenințare.

Complexitatea metodelor de modelare a impactului au generat rezolvări particulare atunci când au fost folosite metode numerice, înlăturându-se formularea şi rezolvarea unor ecuaţii cu derivate parţiale, caracteristice modelelor analitice.

Capitolul 2 prezintă o schemă logică a activităților incluse în studiul de cercetare sugerând conexiunile între capitole și activitățile realizate de autor. Diagrama accentuează legătura dintre simulare și rezultatele experimentale și importanța acestei legături în îmbunătățirea soluției finale de proiectare a panoului de protecție balistică.

Capitolul 3 prezintă o simulare a impactului cu ajutorul unui model parametric la nivel macro. Parametrii avuți în vedere de autor, au fost: viteza de impact a proiectilului, numărul de straturi ale panoului modelat. Modelul a introdus modele constitutive de material care țin seamă de viteza de deformare a materialelor, pentru miez și cămașa proiectilului. S-a modelat delaminarea din condiția de salt (inițiere) al fisurii dacă se atinge o anumită valoare a tensiunii la solicitare de tracțiune și forfecare, interlaminare. Modelul a introdus un criteriu de cedare bazat pe deformația plastică echivalentă (EPS), prin valori caracteristice pentru fiecare din materialele care au participat la impact.

Prin simularea impactului glonţ - panou stratificat şi studierea influenței grosimii panoului (cu 8 straturi, 10 straturi, 12 straturi, 16 straturi și 24 straturi) s-a evidenţiat penetrarea totală pentru panoul cu 8 straturi şi penetrare parţială pentru celelalte panouri. Din rezultatele încercărilor prezentate în Capitolul 5, panourile cu 8 straturi au avut penetrare totală, fără

reţinerea glonţului. Din simularea procesului de impact pe panoul cu 8 straturi, s-a obținut o cedare a panoului, cu penetrare totală, la fel ca și în cazul testelor de laborator. Aceasta reprezintă o validare calitativă a modelului elaborat de autor, dar are și o validare cantitativă, întrucât numărul de straturi rupte în simulare este același cu numărul de straturi rupte, obținute din testele experimentale.

Autorul a realizat o validare a numărului de straturi rupte în model şi variantele de panou compozit încercat. Pentru panourile mai groase, de 16 straturi și 24 straturi, experimental s-au obţinut 3...4 straturi distruse, aşa cum s-au obţinut şi pe modelul panoului stratificat. Stratul real de țesătură cuadriaxială a fost modelat simplificat, ca fiind dintr-un material izotrop, simplificare argumentată de faptul că dispunerea firelor unidirecționale la (0°/45°/90°/-45°) tinde să uniformizeze în plan proprietățile mecanice ale stratului astfel format. Proprietățile mecanice ale fibrei de sticlă au fost luate din literatura specializată [171] și din catalogul de produs al firmei Castro. În simulare, distrugerea glonţului este asemănătoare cu cea observată în experimente pentru proiectilele care au penetrat total sau parțial, diferite variante ale panoului, dar deformarea și fragmentarea glonţului în simulare nu este atât de severă ca cea rezultată din testele făcute în laborator, având în vedere că software–ul utilizat (Ansys Explicit Dynamics) nu a luat în considerare efectul termic asupra materialelor.

Modelul de impact panou stratificat – proiectil, proiectat și rulat de autor, în Ansys Explicit Dynamics este la nivel macro, cu următoarele caracteristici:

- toate corpurile și materialele implicate sunt în domeniul elasto-plastic, cu criteriu de cedare EPS (equivalent plastic strain - deformare plastică echivalentă la rupere); multe referințe studiate de autor au unul din corpuri (proiectilul, cel mai adesea) considerat rigid [57], [159], ceea ce modifică răspunsul la impact substanțial, și alterează comportarea modelului;

- s-a modelat delaminarea din condiția de separare a legăturilor între straturi, cu valori ale tensiunii la tracțiune și forfecare, model care a dat rezultate satisfăcătoare privind mărimea delaminării între straturi, comparativ cu delaminările obținute experimental;

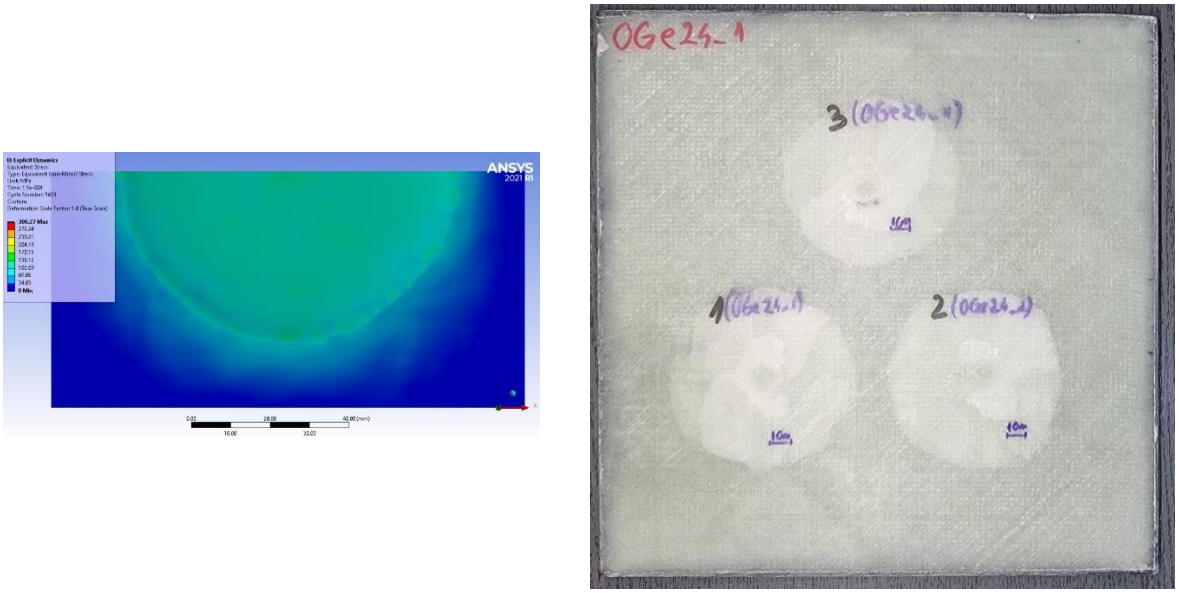
- s-au identificat etape ale procesului de impact pentru penetrarea totală și penetrarea parțială;

- s-au realizat simulări pentru panourile testate în laborator și s-a validat modelul pe criteriul numărului de straturi rupte (±1 strat) și mărimea delaminării pe spatele panoului;

- s-au simulat cazuri pentru grosimi intermediare între 8 straturi și 16 straturi pentru că, din rezultatele testelor de laborator, s-a constatat o „rezervă” de rezistență la impact, în sensul stabilirii la nivel de modelare a unor grosimi eficace, dar mai mici pentru aceeași amenințare;

- numai pentru această lucrare, fără a lua în considerare modele și rulări anterioare stabilirii acestora, s-au rulat 5 cazuri la viteza de 375 m/s, viteză care a fost viteza medie a încercărilor realizate în laborator și 3 cazuri la viteza de 420 m/s, viteză caracteristică pentru nivel FB3, cu aceiași muniție.

Figura 6.1 prezintă un exemplu de comparare al mărimii delaminării vizibile pe ultimul strat din simulare (a) și din experiment (b), pentru panoul cu 24 straturi. Diferența între diametrele delaminărilor a fost de doar 13 mm, ceea ce reprezintă 12,9% din diametrul delaminării obținute experimental. Și pentru alte grosimi, s-au obținut diferențe similare sau chiar mai mici.



a) b)

Fig. 6.1. Delaminarea pe spatele panoului de 24 de straturi: a) din simulare (87,60 mm), b) pe panoul testat (100,60 mm). Condiții de testare, viteza inițială a proiectilului 375 m/s

Din rezultatele obținute pentru aceste rulări, s-au putut formula următoarele concluzii:

- deși modelul de material al stratului a fost simplificat la un model biliniar izotrop cu durificare, pe baza datelor din literatură, rezultatele obținute pentru parametrii cu care s-au efectuat testele reale au fost validate prin numărul de straturi distruse pentru plăcile cu penetrare parțială și prin mărimea delaminării pe spatele ultimului strat;

- din analiza distribuțiilor tensiunilor echivalente la diferite momente și pe diferite straturi, s-au putut distinge etapele impactului pentru penetrare totală și penetrare parțială;

- pe baza rezultatelor pentru panourile testate în laborator, s-au rulat cazuri cu grosimi intermediare (sau număr de straturi) între panoul cu 8 straturi și panoul cu 16 straturi; s-au rulat simulări pentru panouri de 10 straturi și 12 straturi, din care a rezultat o soluție numerică care ar putea fi validată prin încercare de laborator și care să ofere o protecție balistică bună, dar cu densitate de suprafață (și, implicit, grosimea panoului) mai mică.

Același model a fost rulat pentru condiții specifice nivelului FB3 pentru grosimi de 8 straturi, 16 straturi și 24 de straturi, din care a rezultat că ultimul panou ar putea să reziste foarte bine la următorul nivel, cu același proiectil, dar de viteză mai mare (420 m/s).

Generarea unor simulări ale impactului de viteze mari, cât mai aproape de realitate, prin metoda elementelor finite, este condiționată de luarea în considerare a unor aspecte legate de deplasări și deformaţii mari, fisurări, metode de eroziune a elementelor prea mici, prea deformate etc., neliniarități ale comportării materialelor implicate şi proprietăţile lor la viteze de deformare mari. Utilizarea solverelor de tip *Explicit Dynamics*, specializate în simularea proceselor dinamice, cu introducerea unor modele constitutive de material complexe, modele bazate pe rezultate experimentale, ajută la reducerea semnificativă a intervalelor de încercare pentru anumiți parametri, cum ar fi grosimea panourilor (numărul de straturi), succesiunea materialelor în panourile hibride, asamblarea straturilor. Simularea este foarte utilă pentru că reduce costurile legate de realizarea primelor eșantioane și de încercările în poligon.

Avantajul utilizării simulărilor la impact este acela că, în dezvoltarea oricărui produs destinat protecției la impact (model experimental, prototip), acestea oferă date în timp scurt. Simularea impactului utilizând metoda elementelor finite este o etapă utilă în proiectarea unui sistem de protecție, nu întotdeauna foarte precisă, în stabilirea influenţei unor parametri de interes asupra nivelului rezistenţei la impact a unei ţinte. Proiectantul unui sistem de protecție balistică poate reduce considerabil timpul și resursele umane, respectiv financiare, implicate în experimente dacă se analizează alternativ date obţinute experimental cu cele rezultate din simularea numerică, în vederea optimizării.

Capitolul 4 prezintă o tehnologie de laborator prin care se pot obține panouri cu diverse grosimi, prin pensulare și presare. Procesul realizat de autor are repetabilitate, precizie și robustețe. Rețeta pentru realizarea panourilor și tehnologia de laborator este originală. Realizarea s-a făcut cu respectarea normelor de securitate și sănătate în muncă, cu echipament de protecție adecvat.

Panourile de protecție balistică (OGe) sunt destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate, și asigură gradul de supravieţuire în acţiuni de protecție pentru nivel specificat (FB2, conform EN 1522/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la atacul cu glonț. Condiții și clasificare” și SR EN 1523/2004 ”Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la glonț. Metodă de încercare”).

Autorul a folosit o țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială, 1200 g/m^2, (0º/+45º/90º/-45º), de înaltă rezistență, destinată și aplicațiilor balistice, și rășină epoxidică bicomponentă (BIRESIN CR82 cu întăritor Biresin CH80-2), cu tratament termic de stabilizare.

Procesul tehnologic de realizare a panoului OGe, de diverse grosimi, cuprinde o succesiune de faze, care includ tăierea straturilor de țesătură (și cântărirea setului care participă la realizarea panoului), realizarea amestecului rășină + întăritor, pensularea și presarea, monitorizarea și controlul grosimii panoului în presă, un tratament termic de menținere, timp de 6 h, la 60 °C, și un control de calitate (cântărire, măsurarea grosimii, calculul deviației standard și a densității de suprafață pentru fiecare set de panouri).

Analizând valorile caracteristicilor panourilor realizate de autor (Fig. 6.2), se observă deviații standard mici și un raport masic fibre/panou aproape constant, indiferent de grosimea plăcilor (mediile sunt pentru 5 panouri, cu excepția panourilor de 8 straturi și 32 de straturi, pentru care media s-a calculat pentru trei bucăți).

În Capitolul 5 sunt prezentate rezultatele încercărilor efectuate în laboratorul specializat al CCIACBRNE București, aparatura de măsurare și monitorizare, procedura de încercare și standardele care sunt aplicate în această campanie de încercări. Rezultatele testelor balistice, însoțite de un raport de cercetare specializat, analizate cu ajutorul imaginilor fototografice și SEM, conferă panourilor de protecţie balistică, proiectate de autor, performanţe care justifică recomandarea lor de a fi utilizate în prototipuri ale sistemelor de protecție. Pe baza imaginilor SEM, analizelor EDX și seturilor de fotografii la nivel macro, autorul a descris procese de cedare caracteristice acestui tip de panou de protecție balistică (straturi din țesătura cuadriaxială de fibre de sticlă și rășină epoxidică).

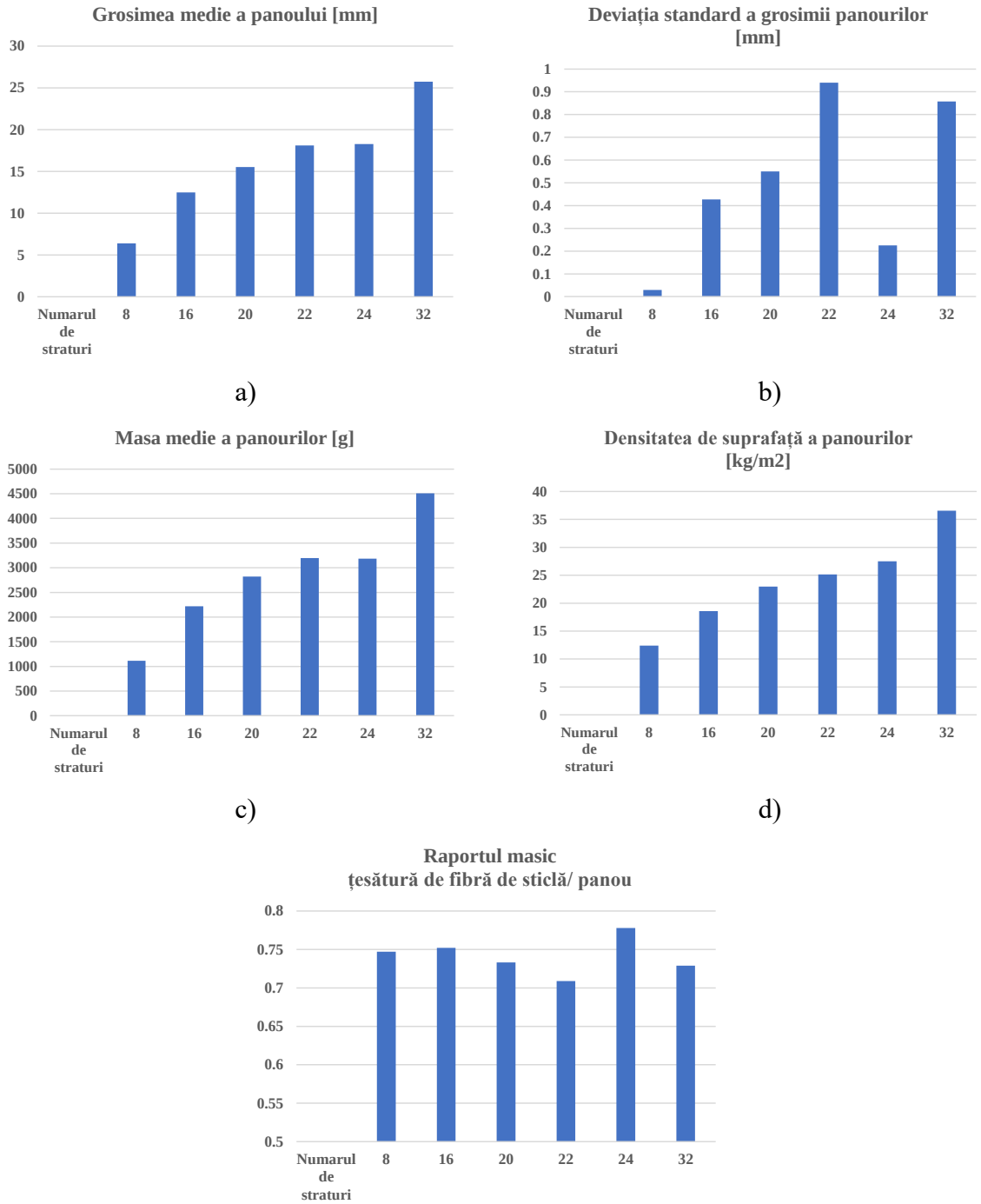


Fig. 6.2. Valorile caracteristicilor panourilor realizate de autor

Pentru viteza de impact măsurată (373 m/s ± 3 m/s), oprirea proiectilului s-a făcut după distrugerea integrității primelor straturi (2...4 straturi pentru panourile de 16 straturi, 20 de straturi, 22 straturi și 24 de straturi), ceea ce reflectă o dependență mai slabă a adâncimii de pătrundere a proiectilului în cazul compozitului cu număr de straturi mai mare. La panoul de 32 de straturi s-a observat o distrugere a unui număr de 1…2 straturi, cu ricoșarea proiectilului puternic fragmentat.

Capitolul 6 prezintă importanța temei de cercetare, concluzii finale pe baza rezultatelor numerice și a celor experimentale, contribuţiile autorului şi direcţii viitoare de cercetare în domeniul utilizării compozitelor în sisteme de protecție balistică.

6.3. Contribuții personale

Rezultatele studiului de cercetare, abordarea sinergică între experiment și simulare au dus la evidențierea următoarelor contribuții originale în domeniul proiectării și testării materialelor pentru protecție balistică:

- selectarea și analiza critică a unei documentații referitoare la materiale, încercări și modelări ale țesăturilor cu aplicații balistice, sistematizarea acestor referințe;

- identificarea şi justificarea temei de cercetare: realizarea și testarea unor compozite pe bază de fibre de sticlă și rășină epoxidică pentru protecție balistică;

- conceperea unui model numeric al impactului proiectil-panou stratificat, la nivel macro, pentru a evalua, prin simulare, rezistența la impact a unei familii de panouri. Modelul a fost rulat pentru a evidenția influența numărului de straturi și influența vitezei de impact până la nivel FB3. Rezultatele simulării au fost validate de încercările de laborator pentru panourile de 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, cu considerarea următoarelor criterii de validare: numărul de straturi distruse și mărimea delaminării vizibile pe ultimele straturi. Utilizarea simulării pentru a detalia răspunsul la impact a panourilor cu un număr de straturi intermediare între 8 straturi și 16 straturi, deoarece din datele experimentale s-a constatat că panoul de 16 straturi a rezistat foarte bine la încercări (nivel FB2), deci, este necesar un studiu pe model care să recomande, eventual, un panou de grosime mai mică, care să reziste la aceeași amenințare. Din datele obținute din simulare se pot recomanda încercări inițiale de laborator pe panoul cu 12 straturi. Simulările au fost realizate și la viteză mai mare (420 m/s, corespunzătoare FB3), pentru că, din analiza distrugerii panourilor la nivel FB2, se poate recomanda testarea acestei soluții de proiectare a panourilor și pentru un nivel superior. Trebuie subliniat încă o dată că în acest domeniu de mare risc, al protecției balistice, extrapolarea rezultatelor din simulare se face numai pe baza testării ulterioare în laborator.

- analiza rezultatelor campaniei de testare care au constat în recomandarea panoului pentru nivel FB2;

- analiza mecanismelor de cedare ale panourilor în funcție de grosimea acestora.

Pe baza rezultatelor experimentale se poate compara răspunsul panoului proiectat de autor cu alte soluții deja existente, raportate în literatura de specialitate. Trebuie menționat obținerea unui raport masic țesătură-panou, de 0,709…0,77 pentru toate panourile realizate de autor, ceea ce reflectă o tehnologie de laborator adecvată, cu grad mare de repetabilitate. Calitatea panourilor realizate este reflectată și în deviația standard măsurată pentru grosimea panourilor, care nu depășește 0,94 mm. Având în vedere timpul și resursele limitate pentru această temă, cercetarea s-a efectuat pe o familie de eșantioane, pentru un număr de straturi (8 straturi, 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi, 24 straturi și 32 straturi), astfel încât să se evalueze calitatea panourilor la lovituri multiple (3 focuri pe un panou), răspunsul uniform al panourilor

de aceeași grosime, și o eventuală cercetare pentru utilizarea acestui tip de panou (materiale, tehnologie) pentru un nivel superior de protecție.

Comportarea panourilor la amenințarea FB2 și „rezerva de material" nedistrus pentru plăcile cu 16 straturi până la 32 straturi, dar și rezultatele analizelor SEM recomandă utilizarea tehnologiei și a panourilor pentru încercări la nivel FB3 sau mai mari.

– realizarea, împreună cu specialiştii de la Centrul de Cercetare și Inovație pentru Apărare CBRN şi Ecologie București, a unei campanii de încercări a panourilor balistice realizate de autor, utilizând echipamentul de tragere, aparatele de măsură și monitorizare disponibile;

– diseminarea rezultatelor pe parcursul întregii perioade a studiilor doctorale; începând cu modelări la impact și terminând cu rezultate experimentale;

– rețeta compozitului este originală, bazată pe materiale cu proprietăți superioare (țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă și rășină Biresin CR82);

– tehnologia de laborator este o tehnologie care se aplică compozitelor de înaltă rezistență și parametrii aplicați de autor au dus la obținerea unei game de panouri de protecție cu intervale mici de abatere pentru grosimea panoului, densitatea de suprafață și, implicit, raportul masic țesătură-panou;

– metodologia de testare preliminară a avut rezultate omologate conform nivel FB2, conform standardului EN 1522/2004 și EN 1523/2004, cu excepția mărimii panoului, care a fost de 300 mm × 300 mm, față de 500 mm × 500 mm cât este recomandat în standard,

– analiza mecanismelor de cedare a materialelor implicate în impact cu ajutorul macro fotografiei, imaginilor SEM și analizei EDX.

6.4. Direcții de cercetare inițiate de acest studiu

În domeniul echipamentelor de protecţie la impact balistic, totul se află într-o competiţie dinamică, spiralată, dintre penetrator şi mijloacele de protecţie balistică. Tendinţa acestei competiţii este obținerea de sisteme de protecție balistică cât mai flexibile, și cât mai rezistente la amenințări multiple. Direcțiile de cercetare în acest domeniu, sunt:

– obţinerea și caracterizarea de materiale compozite și/sau hibride noi, pe baza fibrelor de înaltă rezistență;

– ierarhizarea soluțiilor obținute pe baza unor criterii legate de flexibilitatea echipamentelor mobile, masa specifică, manevrabilitate;

– simularea fenomenelor de impact la niveluri diferite, de la nivel micro, la nivel macro, cu scopul de a utiliza cât mai eficient proprietățile de material și de arhitectură a materialelor;

– extinderea aplicării acestor soluții de protecție balistică în industrii civile, unde există risc de impact (aerospațială, industrie energetică, industrii grele, industrii ale automobilelor, industria navală etc.).

Studiul efectuat de autor, poate fi continuat în următoarele direcții:

– proiectarea și încercarea unor soluții pentru panouri de protecție, hibride sau care să utilizeze materiale mai ușoare decât cele obținute cu fibre de sticlă;

– proiectarea și încercarea unor panouri din țesături din fibre de sticlă, pentru alte aplicații decât cele balistice, în special pentru infrastructura rezistentă la impact, de tip panou de protecţie, confecţionate din țesături de fibre de performanță;

– realizarea și testarea produselor de tip panou de protecție, confecționate din țesături de fibre de performanță, în condiţiile respectării standardelor în vigoare; această lucrare are rezultate experimentale pentru panouri de 8 straturi, 16 straturi şi 24 straturi, dar realizarea și încercarea panourilor cu straturi intermediare, între 10 straturi şi 16, poate conduce la reducerea densității specifice (de suprafață), fără a afecta siguranţa în utilizare;

– extinderea utilizării țesăturilor cu fibre de sticlă în diverse combinaţii cu alte materiale, în alte domenii în care există riscul unui impact (aeronautică, sisteme tehnologice caracterizate prin valori mari ale parametrilor de lucru, în special viteză şi sarcină);

– îmbunătățirea tehnologiei de laborator în sensul reducerii pierderilor de rășină și de uniformizare a caracteristicilor plăcilor obținute;

– proiectarea unor simulări cu modele de material mai apropiate de răspunsul real al acestuia;

– proiectarea unei game de panouri pentru nivele superioare de protecție balistică.

Bibliografie[1]

[1] Abrade, S. (2016). Damage in laminates from low-velocity impacts. In Silberschmidt V. V. (Editor), *Damage in laminates from low-velocity impact in Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures* (pp. 35-70). Woodhead Publishing.

[2] Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P, Loghin, C. & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composites Structures,* 223(2), 110966, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966

[3] Agbossou, A., Cohen, I. & Muller, D. (1995) Effects of interphase and impact strain rates on tensile off-axis behavior of unidirectional glass fiber composite—Experimental results. *Engineering Fracture Mechanics,* 52(5) 923. https://doi.org/10.1016/0013-7944(94)00320-H

[4] Ahmad, S., Rasheed, A., & Nawab, Y. (Editors) (2020). *Fibers for Technical Textiles*, Springer, Dordrecht, The Netherlands

[5] Alcock, B. (2004) S*ingle Polymer Composites Based on Polypropylene: Processing and Properties, teză de doctorat*, „Queen Mary" University of London, UK, http://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/1798

[6] Alekseevskii, V. P. (1966). Penetration of a Rod into a Target at High Velocity, Combustion, Explosion and Shock Waves, 2, 63-66, Pleiades Publishing Ltd., Springer Verlag.

[7] Alhilli, A. H. M. (2006). *Analytical and Experimental Study of High Velocity Impact on Composite Plates*, Nahrain University, Irak. https://www.academia.edu/22855052/ANALYTICAL_AND_EXPERIMENTAL_STUDY_OF_HIGH_VELOCITY_IMPACT_ON_COMPOSITE_PLATES

[8] Alil L. C., Arrigoni M., Deleanu L., & Istrate M., Assessment of delamination in Tensylon® UHMWPE composites by laser-induced shock, 2018, Materiale plastice, 55(3), pp 364-317, http://www.revmaterialeplastice.ro/pdf/24%20ALIL%20L%203%2018.pdf

[9] Alonso, L., Martínez-Herguetac, F., Garcia-Gonzalez, D., Navarro García-Castillo, C. S. K., & Teixeira-Dias, F. (2020). A finite element approach to model high-velocity impact on thin woven GFRP plates. *International Journal of Impact Engineering*. 142, 103593, https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103593

[10] Anand, S. C. (2016). Technical fabric structures-knitted fabrics. In Horrocks A.R. & Anand S.C. (Eds.), *Handbook of Technical Textiles*. (2nd ed.) (pp. 107-162). Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.

[1] Referințele bibliografice sunt redactate în stil APA (7th edition), Common Reference Examples Guide, https://apastyle.apa.org/instructional-aids/reference-examples.pdf

[11] Ansari, M. M., & Chakrabarti, A. (2017). Impact behaviour of GFRP and Kevlar/epoxy sandwich composite plate: Experimental and FE analyses, *Journal of Mechanical Science and Technology* 31(2), 771-776, doi: 10.1007/s12206-017-0128-y

[12] 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, 211-226, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.079

[13] Armenakas, A. E., & Sciammarella, C. A. (1973). Response of Glass-fiber-reinforced Epoxy Specimens to High Rates of Tensile Loading. *Experimental Mechanics.* 433-440

[14] Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

[15] Bahei-El-Din, Y., Shazly, M. & Salem, S., (2016). Damage in laminates from low-velocity impact. In Silberschmidt V. V. (Editor), in *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures* (pp. 471-490). Woodhead Publishing.

[16] Bansal, S. K. (2007). *The development of micro-mechanical model of Kevlar fabrics used in engine containment system of aircrafts*. (Corpus ID: 110370659), Arizona State University, USA.

[17] Barcikowski, M., (2008). Glass fibre/polyester composites under ballistic impact, *Kompozyty*. 8(1), 70-76. https://kompozyty.ptmk.net/pliczki/pliki/2008_1_13.pdf

[18] Barre, S., Chotard, T., & Benzeggagh, M. L. (1996). Comparative study of strain rate effects on mechanical properties of glass fibre-reinforced thermoset matrix composites. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing.* **27**(12), 1169–1181.

[19] Basaran, B. (2007). *Computational analysis of advanced composite armor systems*, master thesis, Middle East Technical University, Turkey, http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/3/12608858/index.pdf

[20] Benaroya H. (Ed.) (2010). *The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.

[21] Besnea, M. A. C., Trufaşu, D. C., Coteț, A., & Andrei, G. (2015). Identification of Mechanical Behavior Law Parameters for Polyphenylene Sulphide Composites Reinforced by Glass/Carbon Fibers, Graphite and Polytetrafluoroethylene. *Applied Mechanics and Materials.* 809–810, 531–536. Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.809-810.531

[22] Bhat G., (2016). Introduction to high-performance fibers. In Bhat G. (editor), *Structure and Properties of High-Performance Fibers*, (pp. 1-4). Woodhead Publishing Series in Textiles, Elsevier.

[23] Bhatnagar, A. (2006) Standards and specifications for lightweight ballistic materials. In Bhatnagar, A. (Editor), *Lightweight ballistic composites.* (pp 127-167). Woodhead Publishing Limited, CRC Press, Boca Raton.

[24] Bhatnagar, A. (2006). *Lightweight ballistic composites*. Woodhead Publishing Limited, CRC Press, Boca Raton, New York.

[25] Bhatnagar, A. (2006). Military and Law-Enforcement Applications. In Bhatnagar, A. (Editor), *Lightweight ballistic composites.* (pp. 400-408) Florida: CRC Press; Woodhead Publishing Limited, CRC Press, Boca Raton.

[26] Bhatnagar, A. (Editor) (2016). *Lightweight ballistic composites* (2nd ed.), Woodhead Publishing, Elsevier.

[27] Bilisik K., Kaya G., Ozdemir H., Korkmaz M., & Erdogan G. (2018). Applications of Glass Fibers in 3D Preform Composites. In Sglavo V. M. (Ed.), *Advances in Glass Science and Technology*, IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.73293

[28] Bilisik, K. (2017). Impact resistant fabrics. In Miao, M., & Xin, J., (editors). *Engineering of High Performance Textiles*, Elsevier Limited-Woodhead Publishing, New York.

[29] Bilisik, K., & Yolacan, G. (2014). Low-velocity impact characterization of multistitched woven E-glass/polyester nano/micro composites. *Textile Research Journal.* 84, 1411-1427, https://doi.org/10.1177/0040517514523178

[30] Bilisik, K., Karaduman, N. S., & Bilisik, N. E. (2016). 3D Fabrics for Technical Textile Applications. In Jeon, H., (Ed.). *Non-woven Fabrics*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/60468, http://dx.doi.org/10.5772/61224

[31] Bilisik, K., Karaduman, N. S., & Bilisik, N. E., (2016). Fiber architectures for composite applications. In: Fangueiro, R., Rana, S., (Editors), Fibrous and Textile Materials for Composite Applications. (pp. 75-134), Singapore: Springer Science+Business Media.

[32] Birnbaum, N. K., Francis, N. J., & Gerber, B. I. (1999). Coupled techniques for the simulations of fluid-structure and impact problems, *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 6(3-4), 295-311.

[33] Bjorklund, O., (2008). Modelling of failure, disertație, Linkopings University, LIU-IEI-TEK-A-08/00381-SE, Sweden. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:17900/FULLTEXT01.pdf

[34] Boccacinni, A. R. (2005). *Continuous fibre reinforced glass and glass-ceramic matrix composites*. Spinger.

[35] Bonilla Gomez, J. (2018). Composite Materials and Materials Selection, dissertation thesis, Autonomous University of Baja California, USA.

[36] Børvik, T., Dey, S., & Clausen, A.H., (2009) Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. International Journal of Impact Engineering. 36, 948-964. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003

[37] Bourne, N. K. (2010). On failure and dynamic performance of materials Dynamic Behavior of Materials. In Proulx T. (Ed.), P*roceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics,* Volume 1, Springer.

[38] Braga, F. O., Lima, Jr É. P., Lima, E. S., & Monteiro, S. N. (2017). The effect of thickness on aramid fabric laminates subjected to 7.62 mm ammunition ballistic impact. *Materials Research*, 20, 676-680.

[39] Brown P. J., & Stevens K. (Eds) (2007). *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England & CRC Press LLC, Boca Raton, USA.

[40] Brown, R. (2002). *Handbook of Polymer Testing. Short-Term Mechanical Tests*. Rapra Technology Limited.

[41] Brown, R., & Egglestone, G. T. (1989). *Ballistic Properties of Composite Materials For Personnel Protection*, MRL Technical Report, MRL-TR-89-6, Victoria, Australia.

[42] Bucur, F. (2015). Contribuţii la îmbunătăţirea factorului de protecţie a blindajelor pentru autovehicule militare, teză de doctorat, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I", București.

[43] Bucur, F., Rotariu, A., Matache, L., Baciu, F., Jiga, G., & Trană, E. (2020). Experimental and numerical study on the behavior of Dyneema ® HB26 composite in compression, *Materiale Plastice*, 57(2), 113-122, doi: 10.37358/MP.20.2.5357

[44] Bunea, M., Bosoanca, R., Eni, C., Cristache, N., & Stefanescu, V., (2017). The Impact Characteristics of Fabric Reinforced Hybrid Composites. *Materiale Plastice*, 54(2), 286-290.

[45] Bunea, M., Circiumaru, A., Buciumeanu, M., Birsan, I. G., & Silva, FS., (2019). Low velocity impact response of fabric reinforced hybrid composites with stratified filled epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, 169, 242-248, doi: 10.1016/j.compscitech.2018.11.024

[46] Burgoyne, C. J. (1992). Aramid Fibres for Civil-Engineering Applications. In Doran D.K. (ed.), *Construction Materials Reference Book*, Butterworths, Cambridge University, http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/p13.pdf

[47] Buyuk, M., Kan, C.-D. S., Bedewi, N. E., Durmus, A., & Ulku, S. (2004). Moving Beyong the Finite Elements, a Comparison between the Finite Element Methods and Meshless Methods for a Ballistic Impact Simulation, *8th International LS-Dyna Users' Conference, DynaLook*, Detroit, USA.

[48] Cadieu, L., Kopp, J. B., Jumel, J., Bega, J., & Froustey, C. (2019). Strain rate effect on the mechanical properties of a glass fibre reinforced acrylic matrix laminate. An experimental approach. *Composite Structures*, 223, 110952, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110952

[49] Carboni, M. (2004). Evaluation of Ballistic Materials for Back Protection under Low Velocity Impact. PhD thesis, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, USA. https://digital.wpi.edu/pdfviewer/3n203z148

[50] Cavallaro, P. V. (2011). Soft Body Armor: An overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics, Naval Undersea Warfare Center Division Newport, Rhode Island, USA.

[51] Chandradass, J., Kumar, M. R., & Velmurugan, R. (2008). Effect of clay dispersion on mechanical, thermal and vibration properties of glass fiber-reinforced vinyl ester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 27, 1585-1601.

[52] Chang, A. L., & Bodt B. E., (1977). JTCG/AS Interlaboratory Ballistic Test Program — Final Report, Army Research Laboratory - TR-1577 - December 1977, p. 12.

[53] Chawla, K. (2009). Fibrous Materials. pp. 199-229), Cambridge University Press, Cambridge, UK. https://doi.org/10.1017/CBO9780511525209

[54] Chelluru, S. K. (2004). *Finite Element Simulations of Ballistic Impact on Metal and Composite Plates*. PhD thesis, Andhra University, Wichita State University, USA.

[55] Chen D., Luo Q., Meng M., Li Q., & Sun G. (2019). Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres. *Composites Part B* 176, 1071-1091

[56] Chen, F., Peng, Y., Chen, X., Wang, K., Liu, Z. & Chen, C. (2021). Investigation of the Ballistic Performance of GFRP Laminate under 150 m/s High-Velocity Impact: Simulation and Experiment. *Polymers*. 13, 604. https://doi.org/10.3390/polym13040604

[57] Chen, X. W., Huang, X.L., & Liang, G. J. (2011). Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 613-621. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.12.005

[58] Chin, L. S. (2006). *Finite Element Modeling of Hybrid-Fiber ECC Targets Subjected to Impact and Blast*, PhD thesis, National University of Singapore

[59] Chiper L., Ojoc G. G., Deleanu L.**,** & Pîrvu C., Simulation of impact behavior of a glass yarn, Mechanical Testing and Diagnosis, 2020 (X), Vol. 1, pp. 10-17, https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/4061

[60] Chiper L., Ojoc G. G., Pirvu, C., & Deleanu, L. (2021). Simulation of projectile impact on layered package made of unidirectional glass fibers, *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 83(4), pp. 253-266.

[61] Chiper Titire L., Musteata A. E., Cioromila (Cantaragiu) 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/Mat.Plast.1964

[62] Chiper, L., Ojoc G. G., Deleanu, L., & Pîrvu, C. (2020). Simulation of impact behavior of a glass yarn. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 10(1), 10-17, https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/4061

[63] Chitrangad, I. (1993). *Hybrid Ballistic Fabric*, Patent no. 5,187,003. http://www.freepatentsonline.com/5187003.pdf

[64] Chowdhury, U., & Wu, X.-F. (2021). Cohesive zone modeling of the elastoplastic and failure behavior of polymer nanoclay composites. *Journal of Composites Science*, 5, 131. https://doi.org/10.3390/jcs5050131

[65] Chu, Y., Min, S., & Chen, X. (2017). Numerical study of inter-yarn friction on the failure of fabrics upon ballistic impacts. *Materials and Design,* 115, 299–316. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.013

[66] Ciobotaru, T. (2018). *Ingineria autovehiculelor militare cu șenile, Volumul I. Organizarea generală. Capacitatea de supraviețuir*e, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I", București.

[67] Cornelissen, B. (2012). *The Role of Friction in Taw Mechanics*, PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

[68] Corona, E., & Reedlunn, B. (2013). A review of macroscopic ductile failure criteria. https://pdfs.semanticscholar.org/5404/27e7cd18762d80b311adc475825edf148a9b.pdf

[69] Courant, R., Friedrichs, K. & Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM Journal*, 215-234.

[70] Cowper, G. R., & Symonds, P. S. (1957). *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. Office of Naval Research, Contract Ncmr-562(10), NR-064-406 Technical Report No. 28 Brown University Providence.

[71] Cox, B. N., & Flanagan, G. (Editors) (1997). *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, NASA Center for AeroSpace Information, USA.

[72] Cristea, S. (2008). *Contribuţii la studiul comportării unor materiale de blindaj, la impactul cu proiectilul*, teză de doctorat, Universitatea Lucian Blaga din Sibiu, România.

[73] Cui, H. (2013). *Glass fiber reinforced biorenewable polymer composites and the fabrication with pultrusion process*, PhD thesis, Iowa State University, USA, http://lib.dr.iastate.edu/etd

[74] Cunniff, P. M. (1992). An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 62, 9, 495-509, Report AD-A273 891. https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA273891.pdf

[75] da Costa Pires, J. M. (2012). Mechanical behaviour at elevated temperatures of GFRP pultruded composite profiles, PhD thesis, Tecnico Lisboa, Portugal.

[76] Deleanu, L., Georgescu, C., Pîrvu, C., & Sandu, S. (2017). *Development of protection system,* Research contract 725/2017, "Dunarea de Jos" University of Galati, Romania

[77] Deniz, T. (2010). *Ballistic Penetration of Hardened Steel Plates*, PhD thesis, Middle East Technical University, USA.

[78] Dey, S. K., & Xanthos, M. (2010). Glass fibers. In Xanthos M. (Ed.), *Functional Fillers for Plastics* (pp. 141–162), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

[79] Dolan, A. M. (2007). *Ballistic Transparent Armor Testing Using a Multi-Hit Rifle Pattern*, PhD thesis, Kettering University, Flint, Michigan, USA.

[80] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-Ph., & Rodrıguez-Ferran, A. (2004). Chapter 14. Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods. In Stein, E., de Borst R. & Hughes T. J. R. (Eds.), *Encyclopedia of Computational Mechanics*, Volume 1: Fundamentals. John Wiley & Sons, Ltd.

[81] Dunn, D. R., & White, H. P. (2006). Testing lightweight ballistic materials. In Bhatnagar A. (Ed.), *Lightweight ballistic composites. Military and Law-Enforcement Applications* (pp. 168-188), Woodhead Publishing and Maney, CRC Press, Boca Raton, USA.

[82] Duodu, E. A., Gu J. N., Shang, Z., Ding, W., & Tang, S. (2017). Damage induced by high-velocity impact. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering,* 41, 97–107.

[83] Eichhorn, S. J., Hearle, J. W. S., Jaffe, M., & Kikutani, T. (Eds) (2009). *Handbook of textile fibre structure, Vol. 1: Fundamentals and manufactured polymer fibres*, Woodhead publishing limited.

[84] El-Habti, M. (2010). *Finite Element Analysis of Composites Integral Armour*, PhD thesis, „Queen Mary" University of London, UK.

[85] Ellis, R. L. (1996). *Ballistic Impact Resistance of Graphite Epoxy Composites with Shape Memory Alloy and Extended Chain Polyethylene Spectra™ Hybrid Components*, PhD thesis, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

[86] Esfahani J. M., Esfandeh, M., & Sabet, A. R. (2012). High-velocity impact behavior of glass fiber-reinforced polyester filled with nanoclay, *Journal of Applied Polymer Science*, 125, E583–E591.

[87] Esfahlani, S. S. (2021). Ballistic performance of Polycarbonate and Polymethyl Methacrylate under normal and inclined dynamic impacts, *Heliyon*, 7, e06856. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06856

[88] Faur-Csukat, G. (2006). A study on the ballistic performance of composites. *Macromolecular Symposia,* 239(1), 217-226.

[89] Fink, B. K. (October 2000). *Performance metrics for composite integral armor*. Technical Report ARL-RP- 8, U. S. Army Research Laboratory (ARL), Department of Chemistry, Oklahoma State University, Stillwater, USA. file:///C:/Users/Asus/Downloads/Performance_Metrics_for_Composite_Integr.pdf

[90] Fink. B. K., Monib, A. M., & Gillespie, J. W. (2001). *Damage tolerance of thick-section composites subjected to ballistic impact*. Technical Report ARL-TR-2477, U. S. Army Research Laboratory, (ARL).

[91] Flanagan, D. P., & Belytschko, T. (1981). A uniform strain hexahedron and Quadrilateral and Orthogonal Hourglass Control, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17, 679-706.

[92] Friedrich, K, Fakirov, S, & Zhang, Z. (2005). *Polymer Composites from Nano- to Macro-Scale* (pp. 3-23), Springer, New York, USA.

[93] Fu, Y. (2013). *Study of New Sandwiched Sphere Structures for Ballistic Protection*, PhD thesis, University of Akron, Ohio, USA.

[94] Gama, B. A., Gillespie, Jr. J. W., Bogetti T. A., & Fink, B. K. (2001). *Innovative Design and Ballistic Performance of Lightweight Composite Integral Armo*r, SAE Technical Paper Series, 2001-01-0888. file:///C:/Users/Asus/Downloads/Bazle_SAE_2001-01-0888.pdf

[95] Geanta, V., Voiculescu, I., Chereches, T., Zecheru, T., Matache, L., & Rotariu, A. (2019). Behavior to Dynamic Loads of Multi-layer Composite Structures, *Materiale Plastice*, 56(2), 460-465. WOS:000476641000034

[96] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., Peroni L., & Scapin M. (2012). Investigation about the influence of the mechanical properties of lead. *EPJ Web of Conferences 26*, 04010. doi: 10.1051/epjconf/20122604010

[97] Gillespie, Jr. J. W., & Monib, A M. (2003). Damage Tolerance of thick-section s-2 glass fabric composites subjected to ballistic impact loading. *Journal of Composite Materials*, 37(23), 2131.

[98] Gogineni, S. (2010). *Finite Element Analysis of Ballistic Penetration of Plain Weave Twaron CT709® Fabrics: A Parametric Study*, PhD thesis, Texas A&M University, USA.

[99] Gooch, W. Jr., (2006). Overview of the development of ceramic armor technology—Past, present and the future, *30th Intern Conf on Advanced Ceramics and Composites*, Cocoa Beach, USA.

[100] Grogan, J., Tekalur, S. A.., Shukla, A., Bogdanovich, A., & Coffelt, R. A. (2007). Ballistic resistance of 2D and 3D woven sandwich composites. *Journal of Sandwich Structures & Materials,* 9(3), 283-302.

[101] Grujicic, M., Pandurangan, B, Angstadt, D. C., Koudela, K. L., & Cheeseman, B. A. (2007) Ballistic-performance optimization of a hybrid carbon-nanotube/E-glass reinforced poly-vinyl-ester-epoxy-matrix composite armor. *Journal of Materials Sci*ence. **42,** 5347–5359.

[102] Grujicic, M., Snipes, J., Ramaswami, S., & Avuthu, V., (2016). Unit-cell-based derivation of the material models for armor-grade composites with different architectures of ultra-high molecular-weight polyethylene fibers. *International Journal of Structural Integrity*. 7(4), 458-489, doi: 10.1108/IJSI-06-2015-0015

[103] Guinan, M. W., & Steinberg, D. J. (1974). Pressure and temperature derivatives of the isotropic polycrystalline shear modulus for 65 elements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 35, 1501-1512. https://doi.org/10.1016/S0022-3697(74)80278-7

[104] Gupta, P. K. (1988). Glass Fibers for Composite Materials. In Bunsell A.R. (Ed.), *Fibre Reinforcements for Composite Materials*, (pp. 19–72), Elsevier Publishers,

[105] Hamouda, A. M. S., & Risby, M. S., 2006Modeling ballistic impact. In Bhatnagar A. (ed.), *Lightweight Ballistic Composites. Military and Law-Enforcement Applications* (pp. 101-126), Woodhead Publishing and Maney, CRC Press, Boca Raton, USA.

[106] Hancox, N. L. (2000). An overview of the impact behaviour of fibre reinforced composites, In Reid S. R., Zhou G. (Editors), *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures* (pp. 1-32), CRC Press, Boca Raton, USA, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

[107] 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 43, 722–734, doi:10.1016/j.compositesa.2011.12.016

[108] Harper, P. W., & Hallett, S. R. (2008). Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination. *Engineering Fracture Mechanics*, 754774–4792.

[109] Hausrath, R. L., & Longobardo, A.V. (2010). High-strength glass Fibers and markets. In Wallenberger F. T. (Ed.), Bingham P. A. (Eds.), *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications* (pp. 197-225), Springer, USA.

[110] Hebert, M., Rousseau, C.-E., & Shukla, A. (2008). Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites. *Composite Structures,* 84, 199–208.

[111] Hoa, S. V. (2017). Principles of the Manufacturing of Composite Materials (2nd ed.) (pp. 3-5). Destech Publications, Lancaster.

[112] Hojo, M., Ando, T., Tanaka, M., Adachi, T., Ochiai, S., & Endo, Y. (2006). Modes I and II interlaminar fracture toughness and fatigue delamination of CF/epoxy laminates with self-same epoxy interleaf. *International Journal of Fatigue*, 28, 1154–1165.

[113] Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (Editors) (2000). *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing Limited and The Textile Institute, Cambridge, England.

[114] Hosford W. F. (2010). *Mechanical Behavior of Materials*, (2nd ed.), Cambridge University Press, UK.

[115] Hosur, M., Vaidya, U., Ulven, C., & Jeelani S. (2004). Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. *Composite Structures,* 64(3-4), 455-466.

[116] Hsieh, A. J., DeSchepper, D., Moy, P., Dehme, P. G., & Song, J. W. (2004). The effects of PMMA on ballistic impact performance of hybrid hard/ductile all-plastic- and glass-plastic-based composites, Research Report, ARL-TR-3155, https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA420878.pdf

[117] Huang, M. (2007). *Ballistic Resistance of Multi-layered Steel Shields*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.

[118] Hub, J. (2010, February 6-8). Some aspects of machine gun penetration of the aluminium sheet-metal plate using Ansys Autodyn, ANSYS konference 2010, http://www.ansys.stuba.sk/ANSYS2010/prednasky/Ansys%20Mechanical/Hub_Some_aspects_of_machine_gun_bullet_penetration_of_the_aluminium_sheet-metal_plate_using_ansys_autodyn.pdf

[119] Ingle, S., Yerramalli, C. S., Guh,a A., & Mishra, S. (2021). Effect of material properties on ballistic energy absorption of woven fabrics subjected to different levels of inter-yarn friction. *Composite Structures*, 266, 113824. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113824

[120] Ionescu, C. E. (2009). *Contribuţii la studiul unor efecte ale tragerii cu armamentul de infanterie asupra blindatelor uşoare*, teză de doctorat, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I", București.

[121] Ionescu, T. F., Pîrvu C., Badea, S, Georgescu, C., & Deleanu, L. (2017). The influence of friction characteristics in simulating the impact bullet − stratified materials. *15th International Conference on Tribology, SerbiaTrib'17,* Kragujevac, Serbia.

[122] Itu C. (2014). *Contribuții privind îmbunătățirea plăcilor circulare realizate din materiale compozite stratificate*, Universitatea "Transilvania" din Brașov.

[123] Iyer, S. R., & Drzal L.T. (1990). Manufacture of powder-impregnated thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 3, 325-355.

[124] Jalil Alsalihi, M. A. (2014). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars After Exposure to Elevated Temperatures, PhD thesis, University of Wisconsin Milwaukee, USA.

[125] Jalili, I., Nouri, Z. H., Aabady, A. Z., & Akbari, V. K. (2013). Strengthening the composite protective shield of lightweight ship against ballistic impacts: Analytical and Experimental. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10, 1211–1223.

[126] Jantharat, P., Mccuiston, R., Gamonpilas, C., & Kochawattana S., (2014). Influence of the laminate configurations of transparent armor on its ballistic protection. *Key Engineering Materials*, 608, 253–58. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.608.253

[127] Jiang T. (2006). *Impact & Penetration Studies: Simplified Models and Materials Design from Ab Initio Methods*, Georgia Institute of Technology Atlanta, USA. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/10443/jiang_tianci_200605_phd.pdf

[128] Johnson G. R., & Cook W. H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands.

[129] Johnson G. R., & Cook W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48.

[130] Joki, R. K., Grytten, F., Hayman, B., & Sørensen, B. F. (2016). Determination of a cohesive law for delamination modelling - Accounting for variation in crack opening and stress state across the test specimen width. *Composites Science and Technology*, 128, 49-57. 10.1016/j.compscitech.2016.01.026

[131] Jones, F. R., & Huff, N. T. (2009). Structure and Properties of Glass Fibres. In A.R. Bunsell (Ed.), *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres* (pp. 529-573), Woodhead Publishing, Cambridge, UK.

[132] Jones, J. R. (2001). Glass fibres. In Hearle J. W. S. (Ed.), *High-Performance Fibres* (pp. 197-238), Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK.

[133] Jovicic, J. M. (2003). Numerical Modeling and analysis of static and ballistic behavior of multi-layered/multiphase composite materials using detailed microstructural discretization, PhD thesis, Drexel University, Philadelphia, USA.

[134] Justo J. M. C. F. (2003). Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos, Univerisdade do Porto, Portugal.

[135] Kanaya, T., & Kaji, K. (2016). Chapter 1. History of Fiber Structure. In *High-Performance and Specialty Fibers Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future* (pp. 3-20), Springer Japan, The Society of Fiber Science and Technology, Japan.

[136] Kar, A. K. (1979). Residual velocity for projectiles. *Nuclear Engineering and Design*, 53(1), 87-95.

[137] Karahan, M., Kuş, A. & Eren, R. (2008). An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 35(6), 499-510. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2007.04.003

[138] Karthikeyan, K., Russell, B.P., Fleck, N.A., Wadley, H.N.G., & Deshpande, V.S. (2013). The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 42 35-53, doi: 10.1016/j.euromechsol.2013.04.002

[139] Kazemahvazi, S. (2010). Impact Loading of Composite and Sandwich Structures, dissertation thesis, Stockholm, Sweden.

[140] Kiekens, P. & Jayaraman, S. (Eds). (2010). *Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC Protection*, Dordrecht, The Netherlands.

[141] Kılıç, N, Bedir, S, Erdik, A, Ekici, B, Tasdemirci, A., & Güden, M. (2014) *Materials & Design*, Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. 63**,** 427-438. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.030

[142] Kim J. K., & Mai Y.-W. (2006). *Engineered interfaces in fiber reinforced composites*. Elsevier Science Ltd.

[143] Kmetty, Á., (2012). Development of All-Polypropylene Composites for Injection Moulding, PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Hungary.

[144] Kneubuehl, B. P. (2003). Ballistic protection, Hun, Switzerland, English edition, http://www.vpam.eu/fileadmin/Wissenswertes/Ballistic-protection.pdf

[145] Koh, C.-P. A. (2009). *Response of Yarn Systems to Impact Loading*, PhD thesis, National University of Singapore.

[146] Koloor, S. S. R., Abdul-Latif, A., Gong, X. J., & Tamin, M. N. (2012). Evolution Characteristics of Delamination Damage in CFRP Composites Under Transverse Loading, Tamin M. N. (Ed.) *Damage and Fracture of Composite Materials and Structures* (pp. 45-60), Springer Heidelberg, Germany, DOI 10.1007/978-3-642-23659-4

[147] Kolopp, A, Rivallant, S, & Bouvet, C. (2013). Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering,* 61**,** 24-35.

[148] Kosloff, D., & Frazier, G. A., (1978). Treatment of hourglass patterns in low order finite element codes, I*nternational Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2, 57-72.

[149] Laible R. C. (ed.) (1980). *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.

[150] Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Patts, H. M., Song, J. W., & Mayer, A. H. (2001). Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact. *Journal of Composite Materials*, 35(18), 1605-1633.

[151] Lee, H.-H., (2021). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021*. SDC Publications. USA.

[152] 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, 537–549.

[153] Li, X. (1999). A mixed finite element for local and nonlocal plasticity. In Cheng F. Y., Gu Y., (Eds.), *Computational Mechanics in Structural Engineering*, (pp. 267-280), Elsevier Science Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-008043008-9/50059-4

[154] Lim, C. T., Tan, V. B. C., & Cheong, C. H. (2002). Perforation of high strength double-ply fabric system by varying shaped. *International Journal of Impact Engineering,* 27(6), 577-591.

[155] Lombard, D. B. (1961). *The Hugoniot Equation of State of Rocks*, United States, Web.

[156] Lowenstein, K. L. (1993). *The manufacturing technology of continuous glass fibres* (3rd ed.), Springer, Amsterdam, the Netherlands.

[157] Ma, P., Jin, L., & Wu L. (2018). Experimental and numerical comparisons of ballistic impact behaviors between 3D angleinterlock woven fabric and its reinforced composite, *Journal of Industrial Textiles*, DOI: 10.1177/1528083718754903

[158] Ma, D., Manes, A., Campos Amico, S., & Giglio, M. (2019). Ballistic strain-rate-dependent material modelling of glass-fibre woven composite based on the prediction of a meso-heterogeneous approach. *Composite Structures*, 216, 187–200.

[159] Ma, X., Zhang, Q., Zhang, X. & (2022). A model for rigid asymmetric ellipsoidal projectiles penetrating into metal plates, *International Journal of Impact Engineering*. 163, 104140. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104140.

[160] Mallick, P. K. (2007). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*. (2nd ed.) (pp. 60-116), CRC Press, Florida, USA.

[161] Mazumdar S. K. (2002) *Composites Manufacturing. Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press, Boca Raton, USA.

[162] Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International,* 36, 2103–2115.

[163] Meyer, C. S., O'Brien, D. J., (Gama) Haque, B. Z., & Gillespie, Jr. J. W. (2022). Mesoscale modeling of ballistic impact experiments on a single layer of plain weave composite. *Composites Part B*, 235, 109753. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109753

[164] Meyers, M. A. (1994). *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
[165] Mudric, T, Giacomuzzo, C, Francesconi, A., & Galvanetto, U. (2016). Experimental Investigation of the Ballistic Response of Composite Panels Coupled with a Self-Healing Polymeric Layer. *Journal of Aerospace Engineering*, 29(6), 04016047.
[166] Múgica, J. I., Aretxabaleta, L., Ulacia, I., & Aurrekoetxea, J. (2016). Rate-dependent phenomenological model for self-reinforced polymers. *Composites: Part A*, 84, 96-102.
[167] Muhlhausen, D. B. (2018). Director's Corner: Improved Officer Safety in 2017 — and Beyond, https://nij.ojp.gov/speech/directors-corner-improved-officer-safety-2017-and-beyond
[168] Musteata A. E., Petrescu H., Cantaragiu Cioromila A., Ojoc G. G., & Deleanu, L. (2021). Influence of Composition on Energy at Break of Blends PP + PA6, *U.P.B. Scientific Bulletin, Series B*, 83(3).
[169] Naik, N. (2004). Composite structures under ballistic impact. *Composite Structures,* 66(1-4), 579-590.
[170] Naik, N. K. (2016). Ballistic impact behavior of composites: analytical formulation. In Silberschmidt, V. V. (Ed.), *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures* (pp. 425-460), Woodhead Publishing.
[171] Naresh K., Shankar K., Rao B.S., & Velmurugan R. (2016). Effect of high strain rate on gla http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.007ss/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites, *Composites Part B*, 100, 125-135,
[172] Nilakantan, G, & Nutt, S. (2017). Effects of ply orientation and material on the ballistic impact behavior of multilayer plain-weave aramid fabric targets, *Defence Technology,* 1-14.
[173] Nilakantan, G., & Gillespie, Jr. J. W. (2012). Ballistic Impact modeling of woven fabrics considering yarn strength, friction, projectile impact location and fabric boundary, *Composite Structures*. 94, 3624-3634, Elsevier Ltd.
[174] Nunes, G. S., Scazzosi, R., Manes, A., Campos Amico, S., Ferreira de Amorim, Jr. W., & Giglio M. (2019). Influence of projectile and thickness on the ballistic behavior of aramid composites: Experimental and numerical study. *International Journal of Impact, Engineering*, 132, 103307. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.021
[175] Offringa, A. R. (1996). Thermoplastic composites-rapid processing applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* 27, 329-336.
[176] Ojoc, G. G., Deleanu, L., Georgescu C., Iorga D., Popescu M. V., Pîrvu C., & Sandu S. (2020). Ballistic panel made of glass fiber fabrics + resin matrix for levels FB3 and FB5, Academia Forţelor Terestre „Nicolae Bălcescu" din Sibiu, Buletin ştiinţific supliment, Catalogul oficial al salonului „Cadet INOVA"® Nr. 5, Cercetări şi inovaţii în viziunea tinerilor cercetători, 336-340, http://37.251.175.30/documente/Supliment_Inova_20.pdf
[177] Ojoc, G. G., Oancea, L., Pîrvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2019). Modeling of impact on multiple layers with unidirectional yarns. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 8(4), 5-15, https://doi.org/10.35219/mtd.2018.4.01
[178] Ojoc, G. G., Pîrvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2019, 15–17 May). Friction Modeling in Simulating Ballistic Impact. A Review, *SERBIATRIB '19, 16th International Conference on Tribology*, Kragujevac, Serbia.

[179] Ojoc, G. G., Pîrvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2019, 19-21 September). Standardization in testing ballistic protection systems, RoTrib 2019, the 14th International Conference on Tribology, Cluj-Napoca, Romania.

[180] Ojoc, G. G., Pirvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2018, October 11-13). Glass fibers for impact protection systems. A review, *the 8 th International Conference on Material Science & Engineering, UgalMat 2018*, Galati, Romania. doi: 10.1088/1757-899X/485/1/012019

[181] Ojoc, G. G., Totolici Rusu, V., C. Pîrvu, C., & Deleanu, L. (2021). How Friction could influence the shape and failure mechanism in impact, with the help of a finite element model, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 83(3).

[182] Ojoc, G. G., Totolici Rusu, V., Popescu, C., Pirvu, C., & Deleanu, L. (2020). Influence of friction in a case of impact simulation, *INCAS Bulletin*. 12(4), 145-154, https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.4.13

[183] Okhawilai, M., Hiziroglu, S., & Rimdusit, S, (2018). Measurement of ballistic impact performance of fiber reinforced polybenzoxazine/polyurethane composites. *Measurement* **130**, 198–210, doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.006

[184] Pach, J., Pyka, D., Jamroziak, K., & Mayer, P. (2017). The experimental and numerical analysis of the ballistic resistance of polymer composites. *Composites Part B: Engineering,* 113, 24-30**.** https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.006

[185] Park, R, & Jang, J. (1998). A study of the impact properties of compozites consisting of surface-modified glass fibers in vinyl ester resin. *Composites Science and Technology,* 58(6) 979-985.

[186] Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., & Dash, R. R. (2009). A comparative study on different ceramic fillers affecting mechanical properties of glass-polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28, 1305-1318.

[187] Peroni, L., Scapin, M., Fichera, C., Manes A., & Giglio, M. (2012). Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet in numerical simulations of ballistic impacts. in Proceedings of *DYMAT 2012.*

[188] Petrescu, H. A., Hadăr, A., & Pastrama, S. D. (2017). Experimental Program for Impact Tests on a Honeycomb Core Composite Material, P*roceedings of The Romanian Academy Series A-Mathematics Physics Technical Sciences Information Science*, 18(2), 150-157, WOS:000406324400008

[189] Phadnis, V.A., Roy, A., & Silberschmidt, V.V. (2016). Dynamic damage in FRPs: from low to high velocity. In Silberschmidt V. V. (Ed.), *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures* (pp. 193-224). Woodhead Publishing.

[190] Pîrvu C., & Deleanu L., Failure Investigation of Layered LFT SB1plus Package after Ballistic Tests for Level IIA. Polymers. 2021; 13(17):2912. https://doi.org/10.3390/polym13172912

[191] Pîrvu, C. (2015). *Contribuţii la studiul experimental și numeric al pachetelor de protecție balistică cu fibre aramidice*. PhD thesis, „Dunarea de Jos" University, Galati, Romania.

[192] Pîrvu, C., Boșcoianu, C. E., Pricop, V. M., & Deleanu, L., (2016). Bird strike damage assessment for an aircraft tail plane. *Mechanical Testing and Diagnosis*. 4, 12-21, http://www.om.ugal.ro/mtd/download/2016-4/2%20MTD_2016_Volume%204_Pirvu%20bird%20strike.pdf

[193] Pîrvu, C., Musteata, A. E., Ojoc G. G., Sandu, S. & Deleanu, L. (2019). A meso level FE model for the impact bullet – yarn. *Materiale Plastice*, 56(1), 22-31.

[194] Pîrvu, C.. Musteată, A. E., Ojoc, G. G., & Deleanu, L. (2020). Numerical and Experimental Results on Charpy Tests for Blends Polypropylene + Polyamide + Ethylene Propylene Diene Monomer (PP+PA+EPDM). *Materials*, 13, 5837. https://doi.org/10.3390/ma13245837

[195] Potluri, R., Supriya, K., & Vittal, G. V. G. (2018). Effect of boron carbide particles inclusion on the mechanical behaviour of S2-Glass fiber based polyester composites. *Material Today. Proceedings.* 5(9/3), 20257-20267. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.397

[196] Prosser, R. A., Cohen, S. H., & Segars, R. A. (2000). Heat as a factor in the penetration of cloth ballistic panels by 0.22 caliber projectiles. *Textile Research Journal,* 70(8), 709-722.

[197] Purushothaman, P., Coimbatore, G., & Ramkumar, S. S, (2013). Soft Body Armor for Law Enforcement Applications. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 8(2), 97-103.

[198] Rana S., & Fangueiro R. (Eds) (2016) *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering Processing, Properties and Applications*, Elsevier, Woodhead Publishing AMSTERDAM

[199] Rao, Y., & Farris, R. J. (2000). Modeling and experimental study of the influence of twist on the mechanical properties of high-performance fiber yarns. *Journal of Applied Polymers Science,* 77(9), 1938-1949.

[200] Rebouillat, S., Steffenino, B., & Miret-Casas, A. (2010). Aramid, steel, and glass: characterization via cut performance testing, of composite knitted fabrics and their constituent yarns, with a review of the art, *Journal of Materials Science*, 45, 5378–5392, doi: 10.1007/s10853-010-4590-5

[201] Rosenberg Z. & Dekel E. (2012). Terminal Ballistics (pp. 27-44), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.

[202] Rotariu, A., Mărmureanu, M., (2008). A Numerical Study on the Effect of Explosive Reactive Armour on a Lightweight Armoured Vehicle's Hull, 107-+In (Eds.) Mastorakis, NE., & Cârstea I., Joint Conf of the 1st WSEAS Int Conf on Finite Difference, Finite Elements, Finite Volumes, Boundary Elements/1st WSEAS Int Conf on Maritime and Naval Science and Engineering, Malta, MALTA. WOS:000260248200016

[203] Ryan, S., Li, H. Edgerton, M., Gallardy, D., & Cimpoeru S. J. (2016). The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel. An experimental investigation. International *Journal of Impact Engineering*. 94, 60–73. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.03.011

[204] Sabet, A., Fagih, N., & Beheshty, M. B. (2011). Effect of reinforcement type on high velocity impact response of GRP plates using a sharp tip projectile. *International Journal of Impact Engineering,* 38, 715-722.

[205] Sadykov, D., Nouice, L., & Lekakou, C. (2017). Hybrid woven glass fibre fabric-multi-walled carbon nanotube-epoxy composites under low rate impact. *Journal of Composites Science*, 1, 10. doi:10.3390/jcs1010010

[206] Safta I. (2011). *Contribuţii la studiul teoretic şi experimental al mijloacelor individuale de protecţie balistică.* teză de doctorat, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I", Bucureşti, 2011.

[207] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275.

[208] Satkar, A. R., Mache, A., & Kulkarni, A. (2022). Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.464

[209] Saunders, R.A., Lekakou, C., Bader, M. G. (1999). Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins. *Compossites Science and Technology*, 59, 983–993.

[210] Sava M., Hadăr A., Părăuşanu I., Petrescu H.-A., Baciu F., & Stănescu M. M. (2016). Validation of the numerical model of single-layer composites reinforced with carbon fiber and aramid, *AIP Conference Proceedings*, 1738, 480080, https://doi.org/10.1063/1.4952316

[211] Schoßig, M., Bierogel, C., Grellmann, W., & Mecklenburg, T. (2008). Mechanical behavior of glass-fiber reinforced thermoplastic materials under high strain rates, *Polymer Testing*, 27, 893–900.

[212] Schwer, L. (2007) Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook constitutive model and the role of the parameter Epsilon_01, Dynamore GmbH, LS-Dyna, Andwerderforum, Frankenthal, Impact, https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/07-forum/impact/optional-strain-rate-forms-for-the-johnson-cook/view

[213] Seydibeyoglu M. €., Mohanty A. K., & Misra M. (Eds) (2017). Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Elsevier Ltd., Woodhead Publishing , Cambridge, USA.

[214] Shockey, D. A., Elrich, D. C., & Simmons, J. W. (2001). *Improved barriers to turbine engine fragments.* Interim report III, DOT/FAA/AR-99/8, III. Menlo Park, California SRI International.

[215] Shukla, A, Grogann, J., Tekalur S., Bogdanovich A., & Coffelt R. (2005). Ballistic resistance of 2D & 3D woven sandwich compozites. In Thomsen, O, Bozhevolnaya, E, Lyckegaard, A. (Eds.), *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proc of the 7th Intern Conf on Sandwich Structures* (pp. 625-634), Springer.

[216] Sockalingam S., Dey, M., Gillespie Jr. J. W., & Keefe M. (2014). Finite element analysis of the microdroplet test method using cohesive zone model of the fiber/matrix interface. *Composites: Part A* 56, 239–247.

[217] Sockalingam, S. (2016). *Transverse Impact of Ballistic Fibers and Yarns – Fiber Length-Scale Finite Element Modeling and Experiments*, PhD thesis, University of Delaware, USA. http://udspace.udel.edu/handle/19716/19972

[218] Sockalingam, S., Casem, D. T., Weerasooriya, T., & Gillespie, Jr. J. W. (2018). Chapter 9 High Strain Rate Transverse Compression Response of Ballistic Single Fibers. In Kimberley J. et al. (Eds.), *Dynamic Behavior of Materials*, Vol. 1, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, doi: 10.1007/978-3-319-62956-8_9

[219] Stryjak, D., & Czernikiewicz, W., (2020). Chapter 23. Briefly characterize the 'hourglass' effect in the finite element method. *AlmaMater Computational Mechanics*. http://www.zkwp.put.poznan.pl/sites/files/dydaktyka/MK/Pytania-ENG/Question%20no%2023.pdf

[220] Subba, Reddy P. R., Sreekantha, Reddy T., Madhu, V., Gogia, A. K., V. & Rao, K., (2015). Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact, *Materials and Design*, 84, 79–86.

[221] Tabacu, S., Hadăr, A; Stănescu, N.D., Ilie, S., & Tudor, D.I. (2010). Hexahedral Finite Elements Mesh Generation Method with Applications to Plastics Parts. *Materiale Plastice*, 47(1), 94-102.

[222] Tan, V. B. C., Lim, C. T., & Cheong, C. H. (2003). Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry. *International Journal of Impact Engineering*, 28(2), 207-222. doi: 10.1016/S0734-743X(02)00055-6

[223] Tan, V. B. C., Shim, V. P. W., & Zeng, X. (2005). Modelling crimp in woven fabrics sub-jected to ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering,* 32(1-4), 561-574

[224] Tanoglu, M., McKnight, S., Palmese, G., & Gillespie, Jr J. (2001). The effects of glass-fiber sizings on the strength and energy absorption of the fiber/matrix interphase under high loading rates, *Composites Science and Technology,* 61(2), pp. 205-220.

[225] Thyagaraj, N. R., Subbareddy, D. N., Ravikumar, M., & Chikkanna, N. (2018). Strength analysis of E-glass and jute fiber reinforced polyester composites. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD).* 8(2), 517-526.

[226] Totolici Rusu, V., Ojoc, G. G., Pirvu, C., & Deleanu, L. (2021). Influence of element size in a case of impact simulation. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 10(4), 24-29. https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/4068

[227] von Neumann, J., & Richtmeyer, R. D. (1950). A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks, *Journal of Appied Physics*. 21, 232-237.

[228] Voyiadjis, G. Z., & Allen, D. H. (1996). *Damage and Interfacial Debonding in Composites*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

[229] Wagner, L., (2006). Introduction, In Bhatnagar A. (Ed.), *Lightweight ballistic composites. Military and law-enforcement applications* (pp. 1-28), Woodhead Publishing and CRC Press, Boca Raton, USA.

[230] Wallenberger, F. T. (2010). Commercial and experimental glass fibers. In Wallenberger F. T., Bingham P. A. (Editors), *Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications* (pp. 3-90). Springer, USA.

[231] Wallenberger, F.T., Watson, J. C., & Li, H. (2001). *Glass Fibers. ASM Handbook. 21: Composites* (pp. 27-34). American Technical Publishers Ltd., Ohio, USA.

[232] Walling, S. J. (1985). S-2 Glass Fiber: Its Role in Military Applications, in International Conference on Composite Materials, Metallurgical Society of AIME, pp. 443–456.

[233] Walter, T., Subhash, G., Sankar, B., & Yen, C. (2009). Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading. *Composites Part B: Engineering.* 40(6), 584-589.

[234] Walters, W., Williams, C., & Normanidia M., (2006). An Explicit Solution of the Alekseevskii-Tate Penetration Equations, *International Journal of Impact Engineering*, 33, 837-846, Elsevier Ltd.

[235] Wei, Y., & Zhang, J. (2008). Characterization of microstructure in stitched unidirectional composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* 39, 815-824.

[236] Wiśniewski, A. & Gmitrzuk, M. (2013). Validation of numerical model of the Twaron CT709 ballistic fabric. Proceedings of *27th International Symposium on Ballistics, BALLISTICS 2013*, 2, 1535-1544.

[237] Xanthos M (2010). *Functional Fillers for Plastics* (2nd edition) (pp. 1.1-18), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

[238] Yang, K., Wu, S., Guan, J., Shao, Z., & Ritchie, R. O. (2017). Enhancing the mechanical toughness of epoxy-resin composites using natural silk reinforcements, *Scientific Reports*, 7, *11939.* doi:10.1038/s41598-017-11919-1

[239] Yuan, F, Tsai, L, Prakash, V, Rajendran, A. M., & Dandekar, D. P. (2007). Spall strength of glass fiber reinforced polymer composites, *International Journal of Solids and Structures,* 44, 7731–7747.

[240] Zaloga, S., & Abrams, M., (1993). *Main Battle Tank 1982-1992*, Osprey Publishing Ltd., London, UK.

[241] Zerilli, F. J., & Armstrong, R. W. (1992). Modeling Shock waves with dislocation mechanics based constitutive relations. In Schmidt, S.C., Dick, R.D., Forbes, J.W., Tasker, D.G. (Editors), Shock Compression of Condensed Matter, (pp. 257-260), Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89732-9.50058-3.

[242] Zhou, G., & Greaves, L. J. (2000). Damage resistance and tolerance of thick laminated woven roving GFRP plates subjected to low-velocity impact. In Reid, S. R., & Zhou, G. (Eds), *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures*. (pp. 133-185), CRC Press, Boca Raton, USA, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

[243] Zhou, G., & Davies, G. A. O. (1997). Impact response of thick glass fibre reinforced polyester laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 17, 357–374.

[244] Zhu, F. (2009). *Advanced Materials for Composite Armour*, PhD thesis, School of Engineering and Materials, „Queen Mary" University of London, UK.

[245] Zohdi, T. I., (2002). Modeling and simulation of progressive penetration of multilayered ballistic fabric shielding, *Computational Mechanics.* 2961–2967, doi: 10.1007/s00466-002-0324-0

[246] Zukas, J. A., (1990). *High velocity impact dynamics*, John Wiley & Sons.

[247] *** 2011 *Opportunities in protection materials science and technology for future army applications*, Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications National Research Council, ISBN 978-0-309-21285-4
[248] *** 2016 *Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in the manufacturing of lightweight materials: glass fiber reinforced polymer composites*, Energetic Incorporated, DOE/EE-1344
[249] *** 4.12. Cohesive Zone Material (CZM) Model, Release 18.2 - © ANSYS, Inc. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_thry/thy_mat11.html
[250] *** A Guide to Fiberglass Fabrics, https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15312, accesat 22.02.2022
[251] *** A true all-round para-aramid performer, Teijin, (2017). ta-2.1-20181106-en,
[252] *** ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide (2021). ANSYS, Inc., USA
[253] ******* Application of Lightweighting Technology to Military Vehicles, Vessels, and Aircraft, 2012, Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting National Materials and Manufacturing Board, doi: 10.17226/13277
[254] *** Ballistic Materials Handbook, Aramids by Teijin, QMB1.1 20181001EN, 2020
[255] *** Ballistic (accesat 11.02.2022). https://www.protectolite.com/ballistic/industries.html,
[256] *** 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
[257] *** Blindajul – principala armă a vehiculului de luptă, https://www.rumaniamilitary.ro/blindajul-principala-arma-a-vehiculului-de-lupta
[258] *** CEN CENELEC Declaration, Standards build trust, https://www.cencenelec.eu/news/publications/Publications/CENCENELEC-DECLARATION-Final.pdf
[259] *** Chobham armour, https://ro.wikipedia.org/wiki/Blindaj_Chobham
[260] *** EN 1063:1999 Glass in building. Security glazing. Testing and classification of resistance against bullet attack (under revision)
[261] *** EN 1522:2004 Windows, doors, shutters and blinds. Bullet resistance. Requirements and classification
[262] *** EN 1523:2004 Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Test method
[263] *** Giant 3D loom weaves parts for supercar, (28.03.2022), https://www.thetruthaboutcars.com/2012/07/the-making-of-the-lexus-lfa-supercar-an-inside-report-chapter-2-in-the-clean-room/
[264] *** Glass Armor Systems: AGY. 2017. Available from: http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/S-2_Glass_Armor_Systems-Defense.pdf
[265] *** Guidance Note: Bullet Resistant Glass, (accesat 25.02.2022). file:///C:/Users/Asus/Downloads/Bullet-resistant-glass.pdf
[266] *** High Strength Glass Fibers: AGY [Internet]. (2017). http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf. Landesmann

[267] *** Glass (accesat 3.02.2021). https://www.castrocompositesshop.com/en/63-glass, (accesat 22.02.2022)
[268] *** 1200 g/m2 Quadriaxial Stitched Glass Fabric (0º/+45º/90º/-45º), 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
[269] *** What are nonwovens? (accesat 22.02.2022). https://www.edana.org/nw-related-industry/what-are-nonwovens,
[270] *** Discover our products (accesat 6.01.2022), https://www.protechsecurite.fr/en/products
[271] *** ISO 16935:2007 Glass in building -- Bullet-resistant security glazing -- Test and classification
[272] *** NIJ 0108 ± ballistic resistant protective materials National Institute of Justice,
[273] *** NIJ Standard 0101.03, 1987 Ballistic Resistance of Police Body Armor, U.S. Department of Justice, National Institute of Justice
[274] *** NIJ Standard 0101.07 Ballistic Resistance of Body Armor, National Institute of Justice, January 2018, https://nij.ojp.gov/sites/g/files/xyckuh171/files/media/document/nij-standard-0101-07-ballistic-resistant-body-armor-draft-for-comment.pdf
[275] *** NIJ Standard–0101.04 (2008). Ballistic Resistance of Personal Body Armor, https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA524733.pdf
[276] *** High Strength Glass Fibers (accesat 12.03.2022). https://www.agy.com/wp-content/uploads/2022/03/AGY_HighStBro_HR.pdf,
[277] *** Penetration Testing. Procedures and Methodology, EC Council Press, 2011, Chapter 1, Penetration Testing Methodologies, pp 1-1-1-22
[278] *** Penetration Testing. Procedures and Methodology, EC Council Press, 2011, Chapter 4 Penetration Testing Planning and Scheduling. pp. 4-1-4-14
[279] *** Satin, (accesat 17.12.2018), http://www.a-c-m.com/fabric_styles/default.html
[280] *** Saving Lives with Simulations: CEDREM Collaborates with DuPont on Ballistic Protection Solutions, Altair Partner Alliance, CEDREM, April 18, 2018, https://www.altair.com/newsroom/partner-perspectives/cedrem-dupont-simulations-save-lives/ (accesat 13.02.2022)
[281] *** Selection and Application Guide to Ballistic-Resistant Body Armor for Law Enforcement, Corrections and Public Safety NIJ Selection and Application Guide-0101.06. (2014). (accesat 4.11.2021). https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/247281.pdf
[282] *** STANAG 2920 Classification of personal armour. 2015
[283] *** STANAG 4569 2012 Protection levels for occupants of armoured vehicles, (2nd ed) NATO Standardization Agency
[284] *** Standardization of Hard Body Armor Testing, https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/policies/2010/20100427Standardization_ofHardBodyArmorTesting.pdf?ver=2019-08-19-144401-467

[285] *** Technical Design Guide for FRP Composite Products and Parts, https://moldedfiberglass.com/wp-content/uploads/2020/01/pdf_Technical_Design_Guide_for_FRP_Composite_Products_and_Parts_2018.pdf [accessat: 20.03.2022]
[286] *** Technical Report of Ship Structure Committee, SSC-360. Use of Fiber Reinforced Plastics in the Marine Industry. September 1990, (accesat 12.03.2022), http://www.shipstructure.org/pdf/360.pdf
[287] *** Tehnologia de fabricație 3D (accesat 28.03.2022), https://www.solidsmack.com/3d-cad-technology/3d-printing-your-days-are-numbered-lexus-uses-3d-loom-to-weave-the-lfa/
[288] *** Țesătură, https://dexonline.ro/definitie/%C8%9Bes%C4%83tur%C4%83 și https://dexonline.ro/sursa/dex09
[289] *** Țesături, (17.12.2018), http://cjcompositestechnology.com
[290] *** Testing of Body Armor Materials: Phase III, 2012, ISBN 978-0-309-25599-8
[291] *** The Most Widely Used Ballistic Standards For Bulletproof Vests, https://www.bodyarmornews.com/ballistic-standards/
[292] *** The right body armor makes all the difference, DuPont, (accesat 20.03.2022), https://www.dupont.com/life-protection/ballistic-protection.html
[293] *** Uses of Fiberglass [accesat: 2022-02-22]. 2017. Available from: https://www.thoughtco.com/uses-offiberglass-820412
[294] ***Automotive Glass Fiber Composites Market—Growth Trends and Forecasts (2015-2020) [accesat 6.08.2019]. (2015). https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-glass-fiber-composites-market
[295] *** What is the "hourglass effect" in finite element analysis? (accesat 10.11.2021), https://www.quora.com/What-is-the-hourglass-effect-in-finite-element-analysis-How-does-the-reduced-integration-resulting-in-the-hourglass-effect-work-How-can-we-counter-the-hourglass-effect#:~:text=What%20is%20hourglassing%3F,hourglass%20like%20element%20shapes%20
[296] ***Sika Group. About us (accesat 3.10.2021), https://www.sika.com/en/home.html
[297] ***Office of the Secretary of Defense,,, Standardization of Hard Body Armor Testing, (accesat 27.04.2019)
[298] ***Products for Military, Defense and Security Applications, https://www.moldedfiberglass.com/applications/military-defense/
[299] *** Deviația standard, https://ro.eferrit.com/cum-se-calculeaza-deviatia-standard/, (accesat 27.01.2022)

Anexă

MINISTERUL APĂRĂRII NAŢIONALE
Centrul de Cercetare şi Inovare pentru Apărare CBRN şi Ecologie

L5 - Laborator Echipamente de protecţie balistică individuală

Acreditat RENAR cu certificat nr. LI 1180

Şos. Olteniţei, nr.225, sector 4, Bucureşti
Telefon: 021.332.11.99, fax: 021.332.21.15

NECLASIFICAT
Exemplar nr. __din__

acreditat pentru
ÎNCERCARE
RENAR

SR EN ISO/IEC 17025:2018
CERTIFICAT DE ACREDITARE
LI 1180

APROB
Şeful Centrului de Cercetare şi Inovare pentru Apărare CBRN şi Ecologie Bucureşti
Colonel doctor inginer
Gabriel EPURE

DE ACORD, ROG A APROBA
Manager tehnic
Colonel doctor inginer
Claudiu LĂZĂROAIE

RAPORT DE ÎNCERCARE

Nr. L5-055 din 24.11.2021

Pagină albă

Notă:
Rezultatele se referă numai la obiectele încercate.
Se interzice reproducerea parţială a prezentului raport de încercare fără aprobarea scrisă a structurii emitente.

1. **Beneficiar/client (nume, adresă)**: Universitatea Dunărea de Jos din Galați, strada Domnească nr.47

2. **Cod identificare**:
   - CBRN/L5/2021/277 - panou balistic multistrat 8 straturi
   - CBRN/L5/2021/278 - panou balistic multistrat 16 straturi
   - CBRN/L5/2021/279 - panou balistic multistrat 22 straturi
   - CBRN/L5/2021/280 - panou balistic multistrat 24 straturi

3. **Descrierea obiectului de încercat:**
   - Panou balistic multistrat

4. **Data primirii obiectelor de încercat**: 23.11.2021

5. **Baza executării încercărilor:**
   - *Contract:* A 3753/08.11.2021
   - *Comanda:* A3854/18.11.2021

6. **Perioada executării încercărilor:** 23.11.2021

7. **Metode folosite:** Ps-02512C-14.00-017 – Determinarea rezistenței la impactul proiectilelor, SR EN 1523-1:2004 - Ferestre, uşi, obloane şi jaluzele - Rezistența la gloanțe - Metoda de încercare

8. **Rezultate**

Denumirea încercării: **Determinarea rezistenței la impactul proiectilelor (gloanțe, schije)**

Armament: țeavă balistică calibru 9 mm
Muniție: cartuș cal. 9x19 mm
Distanța de tragere: 5 m

Nr. crt	Cod probă	Unghi de Tragere (°)	Viteza ref. (m/s)	Viteza măs. (m/s)	Penetrare ref.	Penetrare rez.
1	CBRN/L5/ 2021/277	0	-	371	-	P
2		0		369		P
3		0		375		P

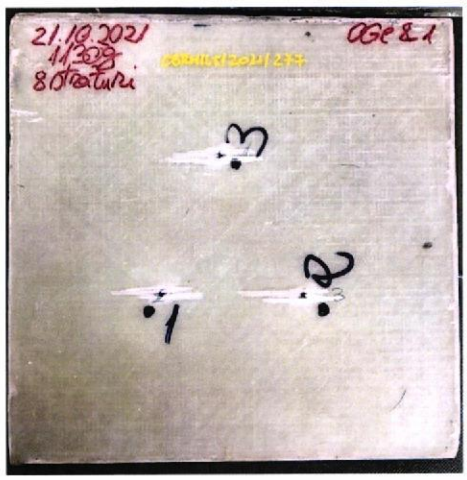
Nr. crt	Cod probă	Unghi de Tragere (°)	Viteza ref. (m/s)	Viteza măs. (m/s)	Penetrare ref.	Penetrare rez.
1	CBRN/L5/ 2021/278	0	-	375	-	NP
2		0		371		NP
3		0		370		NP

Notă:
Rezultatele se referă numai la obiectele încercate.
Se interzice reproducerea parțială a prezentului raport de încercare fără aprobarea scrisă a structurii emitente.

Nr. crt	Cod probă	Unghi de Tragere (°)	Viteza ref. (m/s)	Viteza măs. (m/s)	Penetrare ref.	Penetrare rez.
1	CBRN/L5/ 2021/279	0	-	372	-	NP
2		0		376		NP
3		0		371		NP

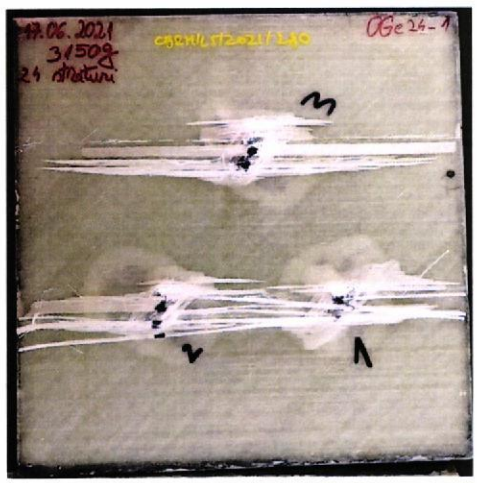
Nr. crt	Cod probă	Unghi de Tragere (°)	Viteza ref. (m/s)	Viteza măs. (m/s)	Penetrare ref.	Penetrare rez.
1	CBRN/L5/ 2021/280	0	-	373	-	NP
2		0		375		NP
3		0		374		NP

P – perforare, NP – neperforare









Notă:
Rezultatele se referă numai la obiectele încercate.
Se interzice reproducerea parţială a prezentului raport de încercare fără aprobarea scrisă a structurii emitente.

9. Observaţii: -

10. Declararea conformităţii/neconformităţii: -

11. Opinii şi interpretări*:

**Opiniile şi interpretările conţinute de prezentul raport nu sunt acoperite de acreditarea RENAR.*

---------- **SFÂRŞIT DOCUMENT** ----------

VERIFICAT

Şef laborator Echipamente de Protecţie Balistică Individuală
Fiz.dr.
Simona SANDU

Şef secţie Echipamente de protecţie /Supervizor tehnic
Col.dr.ing.
Ciprian SĂU

Manager calitate
Ing.
Sorina BĂJENARU

ÎNTOCMIT

Responsabil încercare

Plt.
Adrian BUGEAN

Notă:
Rezultatele se referă numai la obiectele încercate.
Se interzice reproducerea parţială a prezentului raport de încercare fără aprobarea scrisă a structurii emitente.