

**Universitatea POLITEHNICA din București**

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică

Departamentul de Rezistența Materialelor

**Academia Tehnică Militară “Ferdinand I” din București**

Facultatea de Aeronave și Autovehicule Militare

Departamentul de Sisteme Integrate de Aviație și Mecanică

## **Rezumatul tezei de doctorat**

*Contribuții la studiul protecției balistice pentru structurile  
elicopterelor militare*

*Contributions to the study of ballistic protection for military  
helicopter structures*

AUTOR:

ing. Cătălin ADETU

CONDUCĂTORI ȘTIINȚIFICI:

Prof. univ. dr. ing. Anton HADĂR

Prof. univ. dr. ing. Vasile NĂSTĂSESCU

București

2022

## CUPRINS

<b>CAPITOLUL I .....</b>	<b>4</b>
<b>STADIUL ACTUAL PRIVIND SISTEMELE DE PROTECȚIE BALISTICĂ.....</b>	<b>4</b>
1.1. Introducere .....	4
1.2. Amenințări balistice asupra structurilor elicopterelor militare .....	4
1.3. Principalele materiale din construcția structurilor elicopterelor militare.....	6
1.4. Caracteristici ale muniției frecvent folosită împotriva elicopterelor.....	6
1.5. Cerințe și soluții actuale de protecție balistică .....	7
1.6. Concluzii .....	10
<b>CAPITOLUL II.....</b>	<b>11</b>
<b>OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI DE DOCTORAT.....</b>	<b>11</b>
2.1. Actualitatea subiectului tezei .....	11
2.2. Importanța subiectului tezei .....	11
2.3. Obiectivele tezei.....	11
2.3. Concluzii .....	12
<b>CAPITOLUL III .....</b>	<b>13</b>
<b>CERCETĂRI NUMERICE PRIVIND IMPACTUL PROIECTIL-PLACĂ.....</b>	<b>13</b>
3.1. Fundamente ale metodelor numerice utilizate .....	13
3.2. Modele numerice de analiză a impactului.....	14
3.1.1. Impactul normal proiectil-placă plană omogenă și izotropă.....	15
3.1.2. Impactul oblic proiectil-placă plană omogenă și izotropă .....	19
3.1.3. Impactul proiectil-placă din compozit multistrat.....	21
3.3. Concluzii .....	23
<b>CAPITOLUL IV .....</b>	<b>25</b>
<b>CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA PROTECȚIEI PRIN BLINDAJ A ELICOPTERULUI IAR 330.....</b>	<b>25</b>
4.1. Introducere .....	25
4.2. Analiza experimentală a impactului .....	26
4.3. Analiza numerică a impactului.....	28
4.4. Validarea modelului numeric .....	30
4.5. Concluzii .....	31

<b>CAPITOLUL V .....</b>	<b>32</b>
<b>ANALIZA UNOR NOI CONFIGURAȚII ALE PLĂCILOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ.....</b>	<b>32</b>
5.1. Placă de protecție Ti-F-Ti .....	32
5.2. Placă de protecție Ti-Ti-F-Ti .....	33
5.3 Placă de protecție Ti-Ti.....	34
5.4. Placă de protecție Ti 4 mm .....	34
5.5. Concluzii .....	35
<b>CAPITOLUL VI .....</b>	<b>36</b>
<b>CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI VIITOARE DIRECȚII DE CERCETARE .....</b>	<b>36</b>
6.1. Concluzii generale.....	36
6.2. Contribuții personale.....	37
6.3. Viitoare direcții de cercetare .....	38
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>39</b>

# **CAPITOLUL I**

## **STADIUL ACTUAL PRIVIND SISTEMELE DE PROTECȚIE BALISTICĂ**

### **1.1. Introducere**

În condițiile spațiului contemporan de confruntare multidimensională, pe timpul desfășurării misiunilor, elicopterele se pot confrunta cu amenințări asimetrice, cu lupte între grupuri armate desfășurate pe suprafețe întinse de teren sau cu elemente avansate din punct de vedere tehnologic din sistemul de apărare aerian al adversarului convențional, cu lipsa sistemelor de navigație de la sol sau cu fenomene periculoase zborului prevăzut sau neprevăzut.

Tocmai datorită abilității acestora de a executa misiunile cu viteză ridicată de deplasare deasupra terenurilor denivelate și cu necesitatea asigurării unor cerințe minime cu privire la terenul de aterizare, elicopterele sunt întrebuițate pentru executarea misiunilor la și de la destinații care, pentru alte tipuri de tehnică sunt practic inaccesibile și cu viteze care satisfac exigențele de celeritate ale tipurilor de acțiuni actuale, ceea ce le expune la un set de riscuri și de amenințări.

### **1.2. Amenințări balistice asupra structurilor elicopterelor militare**

În conflictele recente, atacurile cu grenade propulsate de proiectile reactive nedirijate (PRND) și focul executat cu arme mici, îndreptate împotriva elicopterelor, au provocat numeroase victime. Drept răspuns, s-a început dezvoltarea unor pachete pentru autoprotecția elicopterelor, precum și pentru detectarea amenințărilor și pentru realizarea mijloacelor de contracarare a amenințărilor împotriva acestor aeronave.

Se pune accent, în prezent, pe felul în care mijloacele tehnice, cum ar fi airbag-urile și scaunele antiglonț, precum și materialele și straturile rezistente la proiectilele reactive nedirijate, destinate inițial pentru protecția personalului vehiculelor blindate, pot fi încorporate în construcția elicopterelor actuale și a celor care vor fi fabricate în viitor.

Un elicopter de atac este un elicopter înarmat, capabil să atace țintele terestre, cum ar fi: infanteria inamică, tancurile și vehiculele blindate. Armele folosite pe aceste elicoptere pot include mitraliere, rachete și rachete antitanc dirijate. De asemenea, ele sunt capabile să transporte rachete aer-aer, în scopuri de autoapărare.

Spectrul de amenințări este reprezentat de componentele aeriene sau terestre de lovire și/sau cercetare sau, mai exact, de abilitatea adversarului de a detecta, identifica și angaja elicopterele și poate fi clasificat pe trei niveluri de intensitate a amenințărilor, astfel: scăzut, mediu și ridicat.

Elicopterele, ca orice alte aeronave, prezintă zone critice/sensibile, zone care, dacă ar fi lovite de sistemele de apărare antiaeriană sau chiar de armamentul individual de infanterie, pot pune în pericol elicopterul și echipajul. Astfel, zonele critice ale elicopterului se pot clasifica în două categorii:

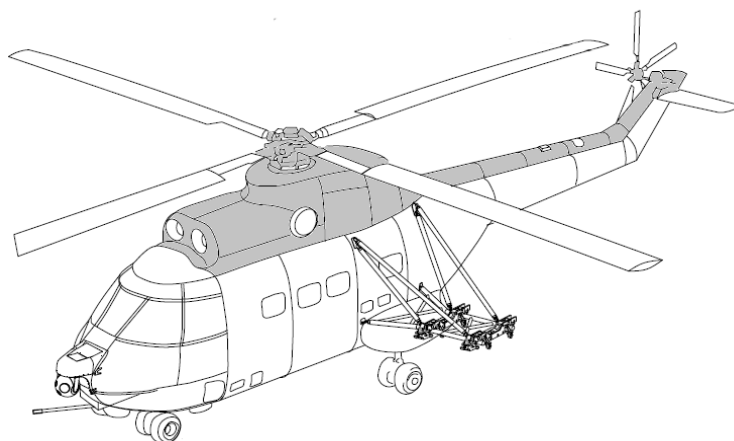
- compartimentul instalației de forță și al ansamblurilor mecanice;
- cabina piloților și compartimentul cargo.

Materialele din care sunt confecționate diversele elemente constructive sunt, în majoritate, aliaje ușoare - pentru părțile de rezistență, titan - pentru părțile solicitate termic și

materiale plastice stratificate - pentru părțile care nu sunt supuse la eforturi deosebite. În plus, anumite zone, care trebuie să fie în același timp ușoare și rigide, sunt de construcție specială, de regulă de tip fagure [2].

**a) Compartimentul instalației de forță și al ansamblurilor mecanice**

Instalația de forță este formată din două motoare TURMO IV CA de tip generator de gaz cu turbină liberă, situate alăturat, în partea din față a aparatului, deasupra cabinei (compartiment cargo), cuplate direct la cutia de transmisie principală [3].

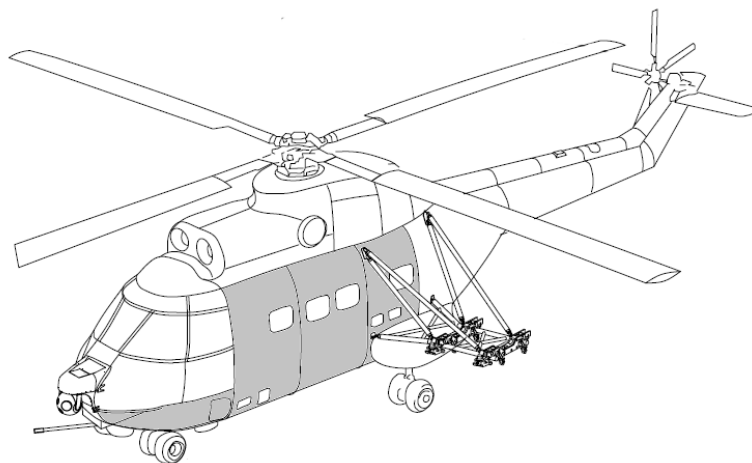


**Fig. 1.1** Compartimentul instalației de forță și al ansamblurilor mecanice [4]

Acest compartiment al instalației de forță și al ansamblurilor mecanice, evidențiat în figura 1.1, reprezintă o zonă critică și esențială a elicopterului. Dacă această zonă ar fi lovită de sistemele de apărare antiaeriană sau chiar de armamentul individual de infanterie, elicopterul ar fi, în primul rând, în pericol de prăbușire.

**b) Cabina piloților și compartimentul cargo**

A doua zonă critică a elicopterului o reprezintă cabina piloților și compartimentul cargo, evidențiată în figura 1.2. Spre deosebire de compartimentul instalației de forță și al ansamblurilor mecanice, aceste zone, în cazul în care ar fi lovite de proiectile, pot afecta direct echipajul și pasagerii din elicopter.



**Fig. 1.2** Cabina piloților și compartimentul cargo [4]

### 1.3. Principalele materiale din construcția structurilor elicopterelor militare

Fabricarea aeronavelor poate fi privită ca fiind unul dintre cele mai dinamice cazuri în ceea ce privește aplicarea rezultatelor cercetării, începând cu materialele folosite și terminând cu soluțiile aerodinamice și cu noile procese tehnologice. Utilizarea materialelor cu masă minimă și cu rezistență maximă a determinat evoluția, de la materiale naturale clasice, precum lemnul, la oțeluri, la aliaje metalice, precum și la materiale compozite.

Utilizarea diferitelor materiale în aplicații ingineresti se bazează pe calitatea acestora de a răspunde cerințelor de proiectare și de funcționare, cerințe bazate pe proprietățile lor mecanice și fizice. Proprietățile mecanice se referă la relația dintre solicitările mecanice și rezistența la deformare sau la rupere a materialului.

Elicopterul este un vehicul aerian motorizat, care face parte dintr-o clasă largă de aparate de zbor, numite aparate de zbor cu aripi rotative, sau, cum se întâlnește uneori în literatura de specialitate, giravioane. Acestea sunt caracterizate de faptul că sustentarea este realizată total sau parțial prin rotoare de mare diametru, cu ax vertical. Principalele calități sunt date de faptul că pot ateriza în spații înguste și pot rămâne în aer la punct fix. Momentul forței produs de elice stă la baza funcționării acestora [5].

Materialele din care sunt confecționate diversele elemente constructive ale elicopterului IAR 330 Puma sunt, în mare parte, aliaje de aluminiu ușoare, în special pentru părțile de rezistență și titan, pentru părțile solicitate termic, iar rezervoarele sunt din cauciuc autoobturant. De asemenea, sunt folosite și materiale plastice stratificate, pentru părțile care nu sunt supuse la eforturi deosebite. În plus, anumite zone, care trebuie să fie în același timp ușoare și rigide, sunt construcții de tip fagure.

Panourile, capotele și carenajele care sunt fixate la planșeul mecanic, pe grinda rotorului anticuplu și pe pilonul oblic, protejează diferite organe mecanice, de transmisie și de deservire, plasate pe structura exterioară a fuselajului. Două carenaje fixate lateral, la partea din spate a structurii inferioare, profilează și protejează trenul de aterizare principal [6].

### 1.4. Caracteristici ale muniției frecvent folosită împotriva elicopterelor

Pentru a putea studia și proiecta un sistem de protecție balistică, este necesar ca mai întâi să se studieze ce amenințări apar, prin amenințări înțelegându-se muniția sistemelor de apărare antiaeriană sau a armamentului individual de infanterie.

Muniția este mijlocul de luptă în a cărei organizare se găsesc elemente explozive sau pirotehnice și care are ca scop nimicirea sau neutralizarea personalului inamicului, producerea de distrugerii sau de avarii la tehnica de luptă a acestuia, crearea unei perturbări în desfășurarea acțiunilor de luptă, dar și favorizarea acțiunilor trupelor proprii [23].

Muniția se compune din următoarele patru componente principale (figura 1.3):

- focosul sau dispozitivul de aprindere (a);
- componenta de luptă (b);
- propulsorul (c);
- sistemul de dirijare și de stabilizare pe traiectorie (d).

Componenta de luptă este obligatorie, fiind aceea care realizează efectul la obiectiv.

Focosul reprezintă un ansamblu de mecanisme și de dispozitive special construite și destinate să provoace inițierea unui sistem exploziv, în punctul dorit al traiectoriei (înainte sau după lovirea țintei).

Prin sistem exploziv (proiectile, bombe de aruncător, mine, rachete, bombe de aviație) se înțelege un ansamblu de elemente destinat pentru distrugerea sau pentru neutralizarea diferitelor obiective.

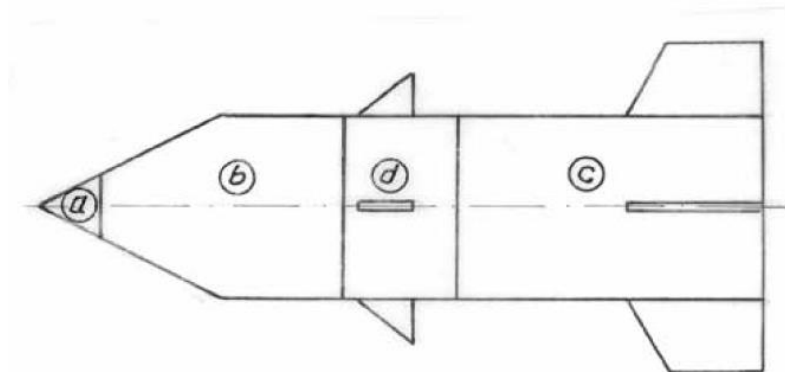


Fig. 1.3 Organizarea generală a muniției [23]

Sistemul de dirijare și de stabilizare pe traiectorie are rolul de a realiza o bună precizie la lovirea țintei, prin culegerea de informații privind parametrii de zbor ai muniției și prin luarea măsurilor necesare pentru aducerea acestora la valorile stabilite prin programul de zbor. În cazul muniției dirijate, acest compartiment este automatizat și electronizat, conținând dispozitive pentru culegerea și prelucrarea informațiilor, precum și componente de comandă și de execuție. Blocul de stabilizare cel mai simplu constă într-un ampenaj dispus la partea din spate a proiectilului, bombei, rachetei.

Componenta de luptă este partea utilă a muniției, care realizează efectul la țintă. Ca tipuri reprezentative de componente de luptă se pot aminti: proiectilul, glonțul, mitraliera, componenta de luptă a rachetei sau a torpilei [23].

Fabricația, perfecționarea și modernizarea continuă a armamentului ușor constituie, în prezent, pe plan mondial, una dintre preocupările principale ale constructorilor și proiectanților militari. Aflat în dotarea fiecărui luptător, fie el infanterist, tanchist, aviator sau marinar, armamentul portativ formează, într-un război modern, cea mai răspândită tehnică, fără de care nu este posibilă obținerea succesului în luptă [30].

*Fiind așa de răspândit, acest armament mic, de infanterie, reprezintă principala amenințare la adresa elicopterelor, în teatrele de operații.*

Armamentul automat de infanterie cuprinde: pistolul mitralieră, pușca-automată și pușca mitralieră, ca armament individual, precum și mitraliera, ca armament colectiv.

### 1.5. Cerințe și soluții actuale de protecție balistică

În momentul de față, o problemă de actualitate și de mare importanță o constituie protecția balistică a elicopterelor. Având în vedere faptul că elicopterele efectuează misiuni de atac, dar și de transport, este necesar ca acestea să beneficieze de o protecție împotriva sistemelor de apărare aeriană, pentru a nu pune în pericol echipajul și eventualii pasageri.

Câmpurile de luptă ale viitorului vor fi caracterizate prin sisteme de arme automate, de coordonarea integrată a categoriilor de forțe armate și de folosirea sistemelor cibernetice, utilizate pentru completarea limitărilor fizice ale combatanților. Astfel, tehnica blindată își menține o poziție dominantă pe timpul luptei datorită gradului de protecție, mobilității și puterii de foc.

Conceptul de protecție în domeniul tehnicii blindate este definit ca reprezentând totalitatea capabilităților vehiculului militar de a face față atacurilor realizate prin diferite metode: proiectile, mine, grenade, dispozitive explozive improvizate, arme de infanterie și de a oferi protecție personalului pe timpul executării misiunilor.

Actualmente, protecția prin blindaj poate fi definită ca un set de măsuri constructive și tactice care vizează evitarea detectării vehiculului de către orice inamic, evitarea lovirii prin efectuarea unor manevre de re poziționare, precum și supraviețuirea în cazul unei loviri de către inamic.

În consecință, blindajul poate fi considerat ca fiind un set de plăci care au ca scop asigurarea protecției personalului în cazul unui atac armat [34].

Adăugarea sistemelor de protecție balistică pe elicoptere, în scopul de a proteja echipajul și pasagerii, atunci când acestea execută misiuni în zone de război, a reprezentat întotdeauna un compromis între instalarea unui element suplimentar de protecție și creșterea masei elicopterului, micșorând în același timp sarcina utilă a acestuia.

Sistemul de protecție balistică este format din plăci, unele de dimensiuni reduse, altele de dimensiuni mai mari, în funcție de disponibilitatea fiecăreia, tocmai pentru a permite mobilitatea acestora și ușurința schimbului lor, în cazul în care acestea sunt lovite sau pur și simplu sunt îmbunătățite. De asemenea, elicopterul, având o construcție monococă, cilindrică, o protecție sporită și pe o suprafață cât mai mare, nu se poate asigura decât cu un număr mai mare de plăci de dimensiuni reduse.

Spre exemplu, *elicopterul AH-1Z*, construit de firma americană Bell Helicopters, dispune de o protecție de tip înveliș din plăci de dimensiuni 300 mm x 400 mm x 12 mm, realizate din Kevlar, dispuse în interiorul învelișului de aluminiu, în partea laterală, în partea din spate și în partea de jos a scaunelor piloților, dar și în zona ansamblelor mecanice și a motoarelor. Constructorul estimează că protecția balistică instalată pe acest elicopter poate rezista unor lovituri de calibru de până la 25 mm.

De-a lungul anilor, Departamentul de integrare a protocoalelor pentru aviație și cercetare în domeniul armelor din Statele Unite ale Americii (AMRDEC) a dezvoltat sisteme de protecții balistice pentru mai multe elicoptere, *CH47 Chinook*, fabricat de Boeing și cunoscutul *UH60 Black Hawk*, fabricat de Sikorsky. Folosind materiale compozite, au reușit să dezvolte sisteme de protecție balistică eficiente, cu o masă scăzută, oferind, în același timp, protecție împotriva armelor de calibru mic, până la 7,62 mm. Pe un elicopter CH-47 Chinook, acest lucru a redus masa protecției balistice cu aproximativ 900 kg, la o masă actuală de 1587 kg. Protecția include podeaua cabinei piloților, cabina cargo, panourile laterale și geamurile blindate. O reducere similară a masei a fost obținută și pentru protecția balistică a elicopterului UH-60 Black Hawk, cu aproximativ 227 kg.

Conform [42], *UH-60 Black Hawk* beneficiază de o protecție balistică sporită a compartimentului cargo (figura 1.4), a planșeului cabinei piloților (figurile 1.5, 1.6) și a pereților laterali (figura 1.7). Sikorsky prezintă acest sistem de protecție balistică bazat pe materiale compozite, ca fiind printre cele mai avansate sisteme la ora actuală, fiind caracterizat de o masă scăzută, rezistent la lovituri multiple și cu durabilitate ridicată. Masa maximă a protecției poate ajunge la 532 kg.



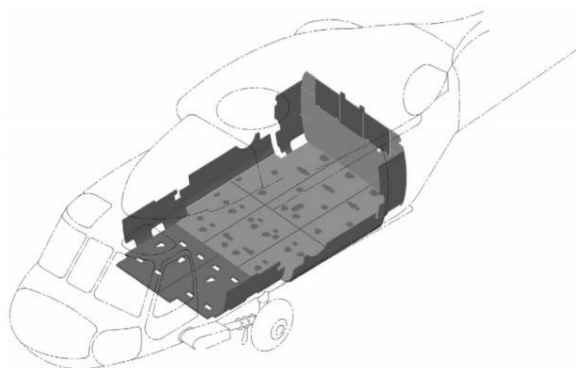


Fig. 1.4 Podea cargo UH-60 Black Hawk [42]

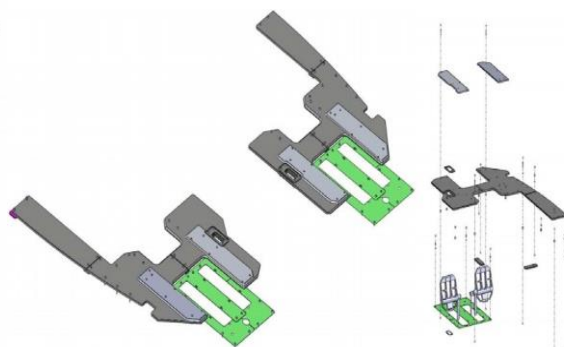


Fig. 1.5 Podea cabina piloților UH-60 Black Hawk [42]



Fig. 1.6 Podea cabina piloților UH-60 [42]

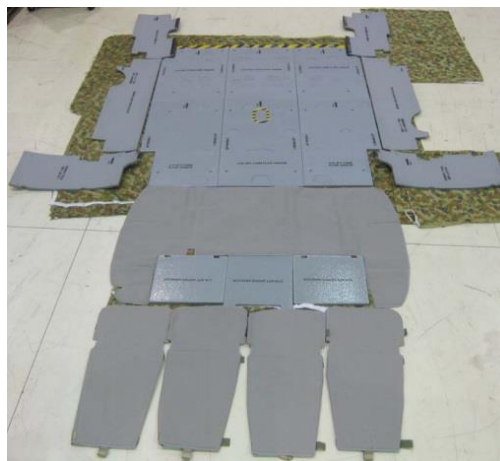


Fig. 1.7 Panouri laterale cabină UH-60 [42]

Un alt exemplu de elicopter care are instalată o protecție balistică este *AH-64 Apache*. Furnizorul acestei protecții balistice este Teledyne Ryan Aeronautical și prezintă acest blindaj ca fiind realizat din următoarele straturi succesive, de la interior către exterior: căptușeală de Kevlar, miez din carbură de bor, de înaltă duritate și înveliș de naylon balistic. Acest blindaj poate fi observat în figura 1.8.

De asemenea, sunt protejate și scaunele piloților, fiind dotate cu Kevlar, un scut realizat din acrilat anti-explozie-fragmentație, dar și un geam antiglonț [44].

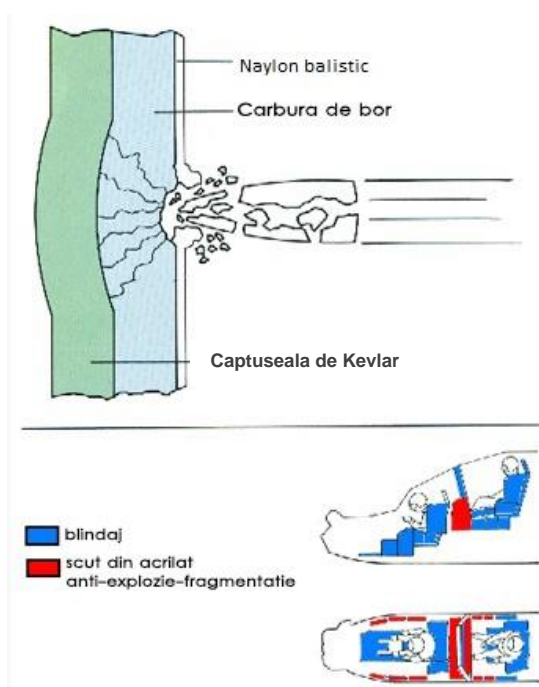


Fig. 1.8 Blindajul cabinei la AH-64 Apache: dispunere și compoziție [42]

## 1.6. Concluzii

Elicopterele militare joacă un rol important și integrat în operațiunile aeriene, terestre și maritime, îndeplinind o serie de misiuni esențiale, precum: misiuni de cercetare, misiuni de observare, misiuni de conducere a focului din aer, misiuni de comandă și de control aeropurtat, misiuni de transport de trupe/materiale, misiuni de lovire din aer și asalt aerian și misiuni de război electronic.

Spectrul de amenințări este reprezentat de componentele aeriene sau terestre de lovire și/sau cercetare sau, mai exact, de abilitatea adversarului de a detecta, identifica și angaja elicopterele și poate fi clasificat pe trei niveluri de intensitate a amenințărilor, astfel: scăzut, mediu și ridicat.

Folosirea materialelor compozite în construcția de aeronave a cunoscut o dezvoltare durabilă și continuă, evoluând de la producția unor piese care nu pot prelua sarcini mari, în cazul aeronavelor cu viteze de zbor mici, până la producția de piese esențiale pentru aeronave cu viteze mari.

Un elicopter nu poate fi proiectat și construit folosind doar un singur tip de material, ci folosind mai multe tipuri de materiale, combinate, în scopul reducerii masei și creșterii rezistenței.

Armamentul mic de infanterie reprezintă principala amenințare la adresa elicopterelor, în teatrele de operații. Acesta cuprinde: pistolul mitralieră, pușca-automată și pușca mitralieră, ca armament individual, precum și mitraliera, ca armament colectiv. Armamentul de infanterie aflat în prezent în dotarea armatelor are calibrul cuprins între 5,45 mm și 14,5 mm, cu tendința de extindere a acestui ecart de valori către limita inferioară.

Masa elicopterului este un factor extrem de important, mai ales pe timpul operațiunilor desfășurate la mare altitudine, unde performanțele motoarelor scad din cauza lipsei de oxigen. Pentru a nu afecta configurația de zbor a elicopterului, în primul rând, este necesar ca sistemele de protecție balistică să aibă o masă redusă. De aceea, la fabricația acestor blindaje se folosesc materiale compozite, care oferă, în același timp, masă redusă și protecție sporită.

## **CAPITOLUL II**

### **OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI DE DOCTORAT**

#### **2.1. Actualitatea subiectului tezei**

Rolul deosebit de important al elicopterelor militare reiese din misiunile pe care acestea le execută, misiuni esențiale, precum cele de cercetare, observare, comandă și control aeropurtat, conducere a focului, lovire din aer și asalt aerian, transport de trupe sau de materiale.

Sistemele actuale de protecție balistică se află într-o permanentă dezvoltare, prin optimizarea materialelor și a structurilor de protecție și prin descoperirea de noi materiale, pentru a se realiza un echilibru între varietatea amenințărilor din teatrele de operații și protecția împotriva acestora.

Adăugarea sistemelor de protecție balistică pe elicoptere, în scopul de a proteja echipajul și pasagerii, atunci când execută misiuni în zone de război, a reprezentat întotdeauna un compromis între instalarea unui element suplimentar de protecție și creșterea masei elicopterului, micșorând, în același timp, sarcina utilă a acestuia.

Astfel, în momentul de față, sistemele de protecție balistică, instalate în prezent pe unele elicoptere militare, sunt sisteme modulare de plăci, montate în zonele critice ale acestuia, care asigură un nivel de protecție sporit, atât aeronavei, cât și echipajului, pe timpul executării misiunilor în teatrele de operații.

Industria aeronautică este considerată a fi cea mai dinamică și competitivă, mai ales din prisma rezultatelor cercetărilor efectuate asupra materialelor folosite în construcția aeronavelor, soluțiilor aerodinamice și noilor procese tehnologice.

#### **2.2. Importanța subiectului tezei**

Începând cu fundamentele luptei dintre proiectil/blindaj, teza de doctorat urmărește creșterea factorului de protecție pentru blindajele elicopterelor militare, prin identificarea și testarea unor configurații noi de materiale, destinate zonelor critice ale acestora, acest lucru conducând la proiectarea și dezvoltarea la un cost redus, în cadrul industriei naționale de apărare, a unor sisteme de protecție balistică destinate elicopterelor din dotarea Forțelor Aeriene Române. Aceste sisteme modulare de plăci pot fi montate în zonele critice, astfel încât să asigure protecție atât aeronavei, cât și echipajului pe timpul executării misiunilor în teatrele de operații, în cazul atacurilor cu armament de infanterie ușor.

Actualitatea și complexitatea tezei de doctorat sunt întărite mai ales prin faptul că nu există studii și date publice referitoare la sistemele de protecție balistică instalate pe elicopterele de atac din întreaga lume. Nu există efectiv o colaborare între companiile care dezvoltă astfel de sisteme de protecție balistică, ci, mai degrabă, o concurență, piața globală a materialelor pentru protecția balistică fiind evaluată la aproximativ 8,8 miliarde de dolari în anul 2015, cu o majorare de până la 11,03 miliarde de dolari în anul 2022.

#### **2.3. Obiectivele tezei**

În scopul proiectării și dezvoltării unui sistem de protecție balistică pentru elicopterele militare, urmare a participării în misiunile de menținere a păcii, implementarea unor noi

soluții de protecție poate reprezenta singura variantă pentru a proteja atât echipajul, cât și aparatul de zbor, fapt care a determinat abordarea acestei lucrări.

Lucrarea are ca obiectiv principal fundamentarea teoretică și experimentală pentru un nou sistem de protecție balistică, care să fie rezistent la impactul cu glonțul cal. 7,62 mm.

Printre obiectivele specifice aceste lucrări se pot enumera următoarele:

- sistematizarea și prezentarea într-o formă accesibilă a unui studiu referitor la structura elicopterului IAR 330 Puma Socat, la principalele materiale din construcția sa, la amenințările balistice și la caracteristicile muniției folosite împotriva acestora, precum și la cerințele și soluțiile actuale de protecție balistică;
- prezentarea unor metode și modele noi de analiză și de simulare numerică, studierea prin aceste metode a impactului dintre un proiectil și o placă aflată în diferite configurații și compararea rezultatelor;
- studierea fenomenului de ricoșet la impactul proiectil-placă și determinarea condițiilor în care acesta apare;
- proiectarea, fabricarea și testarea în poligon a unui sistem de protecție balistică, efectuarea analizei numerice a impactului, compararea rezultatelor numerice cu cele experimentale și validarea modelului numeric;
- prezentarea unor noi variante constructive de protecție balistică și efectuarea analizei numerice aferente acestora.

### 2.3. Concluzii

În condițiile tensiunilor militare actuale din vecinătatea țării, se pune accent pe înnoirea tehnicii militare și pe dezvoltarea unor sisteme eficiente de protecție, atât pentru vehiculele terestre, cât și pentru cele aeriene.

Din cele prezentate mai sus se desprinde faptul că mărirea factorului de protecție pentru elicopterele militare suscită un interes major, atât părții militare, cât și părții civile.

Organizarea tezei de doctorat, studiul teoretic și experimental efectuat - cu mijloacele actuale de investigare științifică - au condus la îndeplinirea în totalitate a obiectivelor asumate, la perfecționarea pregătirii profesionale și personale și la identificarea unor noi direcții de abordare a cercetării științifice în domeniu.

## CAPITOLUL III

### CERCETĂRI NUMERICE PRIVIND IMPACTUL PROIECTIL-PLACĂ

Analiza numerică a mediilor continue și simularea comportării acestora în anumite condiții au cunoscut o dezvoltare explozivă după anii 2000, fiind de departe mijloacele de investigare cele mai utilizate în practica proiectării, a optimizării sau a cercetării științifice, în general.

#### 3.1. Fundamente ale metodelor numerice utilizate

Calcululele actuale de rezistență ale materialelor, deși sunt aplicate la problemele clasice care aparțin teoriei elasticității sau plasticității, sunt imposibile fără folosirea metodelor numerice și a modelelor de materiale. Această situație este rezultatul direct al evoluției din domeniul computerelor, atât pe partea hardware cât și pe partea software.

Trebuie reținut faptul că, problemele de analiză la impact reprezintă o analiză în regim dinamic, cu luarea în considerație a neliniarităților de material.

Metoda elementelor finite (Finite Element Method, FEM) a fost dezvoltată în a doua jumătate a secolului al XX-lea, ca răspuns la necesitatea soluționării numerice a fenomenelor fizice complexe, care sunt descrise prin anumite ecuații diferențiale, cu probleme dificil de rezolvat. Versatilitatea și aplicabilitatea largă a acestei tehnici au introdus-o în lumea științifică, iar dezvoltarea tehnologiei informatice a facilitat popularizarea și utilizarea acesteia pe scară largă [35].

Metoda elementelor libere Galerkin (Element-Free Galerkin Method, EFG Method) se bazează pe o serie de ecuații ale teoriei elasticității, folosite în condițiile speciale de aproximare numerică, prin metoda celor mai mici pătrate în mișcare.

Dorința de nou și de eficiență crescută au condus la apariția unor metode noi de analiză și de simulare numerică, cunoscute sub numele de metode fără rețea (meshfree particle method), sau metode bazate pe particule (particle-based methods), sau metode cu rețea liberă (meshfree methods).

Aceste metode folosesc noduri pentru aproximarea variabilelor de câmp, așa cum este cazul unor metode precum: metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), metoda RKPM (Reproducing Kernel Particle Method), metoda MLPG (Meshless Local Petrov-Galerkin), metoda PIM (Point Interpolation Method) și metoda FPM (Finite Point Method). Toate metodele de acest tip mai sunt numite și metode cu rețea liberă (meshfree methods) sau metode fără rețea (meshless methods) [50].

Metoda SPH este o metodă relativ nouă, folosită pentru integrarea aproximativă a ecuațiilor diferențiale parțiale. Este, de asemenea, o metodă de tip fără rețea (meshless method), într-o abordare lagrangiană, care folosește pseudoparticule (atașate în noduri), pe baza cărora se definește o metodă de interpolare pentru calculul variabilelor de câmp netezite.

Fiecare dintre cele două metode de analiză numerică (MEF și SPH) are avantaje și dezavantaje, dificil de prezentat, dar ușor de sesizat în practica utilizării lor. Ideal că ar fi combinarea avantajelor, astfel încât să se diminueze cât mai mult dezavantajele, cuplând cele două metode. La ora actuală este posibilă realizarea modelului unei structuri în care o parte să fie modelată cu elemente finite și o altă parte cu SPH.

Mai mult, acest cuplaj al celor două metode conduce la rezolvarea problemelor de interacțiune fluid-structură, printr-o abordare unică, în regim automat implicit, prin care sunt

descrise atât caracteristicile curgerii fluidului, precum și efectele care apar în structurile cu care interacționează.

Aproape că nu există astăzi lucrări ingineresti, de la lucrările de absolvire, mai ales cele de masterat și de doctorat, până la mari studii de fundamentare sau de proiectare, fără să facă apel la utilizarea metodelor numerice de calcul și la simularea fenomenelor studiate.

Dominiul analizei numerice a structurilor a fost revoluționat, pur și simplu, de noua arhitectură a procesoarelor și de frecvența de lucru a acestora, de capacitatea de stocare pe hard disk-uri, precum și de creșterea memoriei RAM.

La cele de mai sus se adaugă alocarea dinamică a memoriei, perfecționarea procedurilor de rezolvare a sistemelor de ecuații algebrice de mari dimensiuni, lucrul în paralel al mai multor calculatoare și procesoare etc.

Se remarcă două aspecte foarte importante privind progresul în calculul numeric al structurilor: apariția modelelor de material - care includ atingerea ruperii materialului și perfecționarea descrierii contactului dintre materiale.

### 3.2. Modele numerice de analiză a impactului

Cercetarea impactului proiectil-placă trebuie să răspundă la câteva întrebări din partea proiectantului sau a luptătorului, printre care, cele mai importante, ar fi:

- dacă glonțul penetrează sau perforează?
- dacă viteza după perforare îi asigură efect letal asupra personalului?
- în ce condiții se produce ricoșetul?
- care este capacitatea de absorbție a plăcilor de protecție?

Bineînțeles, răspunsul cel mai exact la întrebările de mai sus îl pot oferi cercetările experimentale, dar trebuie ținut cont de faptul că *analiza numerică poate pregăti drumul investigației experimentale, ducând la economii de timp și de material.*

În cele ce urmează, se va prezenta analiza numerică în cazul unui proiectil reprezentat de glonțul perforant cal. 7,62 mm, în interacțiune cu o placă având diferite versiuni constructive (placă omogenă și izotropă, placă multistrat și placă multistrat cu miez de tip fagure). Cercetările numerice efectuate au avut în vedere interacțiunea proiectil-placă, atât în condițiile impactului normal, cât și al impactului oblic, la diferite viteze de impact.

Cercetarea numerică efectuată se bazează pe utilizarea programului Ansys LS-Dyna, luând în considerare mai multe modele de material din cadrul bibliotecii de material a programului. Toate modelele de material folosite descriu atât solicitarea de impact, cât și fenomenul de rupere a materialului la interacțiunea proiectil-placă. Cele mai utilizate modele de material cărora, în această lucrare, li s-a acordat o atenție deosebită sunt: modelul plastic kinematic și modelul Johnson Cook. Există, la ora actuală, peste trei sute de modele de material. Avantajul modelului Johnson Cook este reprezentat de luarea în considerare a temperaturii, iar dezavantajul este că trebuie determinate/cunoscute mai multe constante de material. Având în vedere recomandările specialiștilor în analize numerice la impact, confirmate și de validarea lor pe cale experimentală, s-a optat pentru modelul de material plastic kinematic.

### 3.1.1. Impactul normal proiectil-placă plană omogenă și izotropă

#### Modelul cu MEF - impact normal

Pentru cercetarea impactului normal proiectil-placă, s-a început cu studiul unei plăci omogene și izotrope din aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm. Impactul cu glonțul cal. 7,62 mm x 39 mm a fost unul normal, cu viteza de 500 m/s, iar durata analizei numerice a fost de  $9 \cdot 10^{-5}$  secunde.

S-a acordat o atenție deosebită plăcii, de aceea a fost considerat un material rigid pentru glonț. De asemenea, nu a fost aplicată o viteză unghiulară glonțului, deoarece s-a constatat că această mișcare de rotație în jurul axei nu influențează capacitatea de perforare pe durata analizei numerice. Utilizarea acestor ipoteze acoperă rezultatele calculului și apare o economie de timp în rularea programului.

Modelul cu elemente finite (placa) a fost realizat cu 61206 noduri și 50000 elemente solide, având o discretizare uniformă, mărimea laturilor fiind de 1 mm (figura 3.1).

Desigur, soluția cea mai economică ar fi fost utilizarea unui model simplificat (1/4), structura având două axe de simetrie, dar s-a optat pentru un model întreg, pentru a putea urmări și rezultatele postprocesărilor grafice, care vor fi și ele, în mod normal, simetrice.

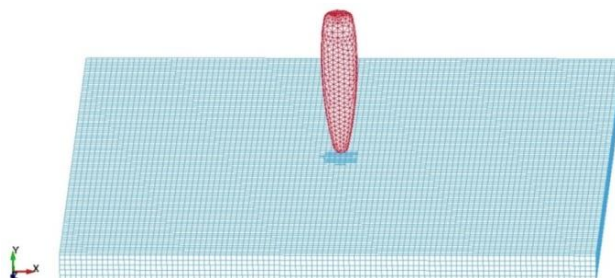
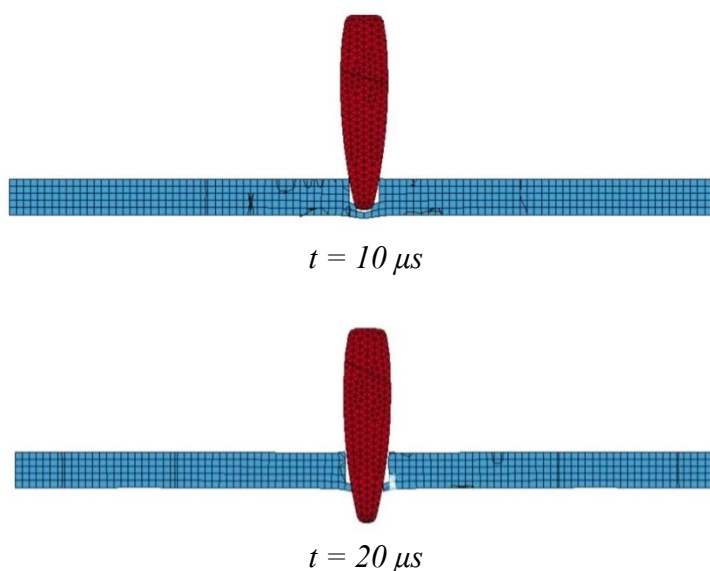
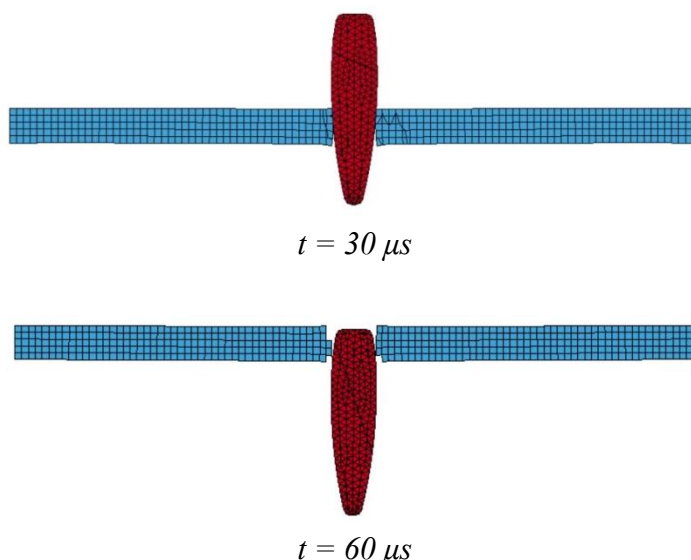


Fig. 3.1 Modelul cu elemente finite la impact normal

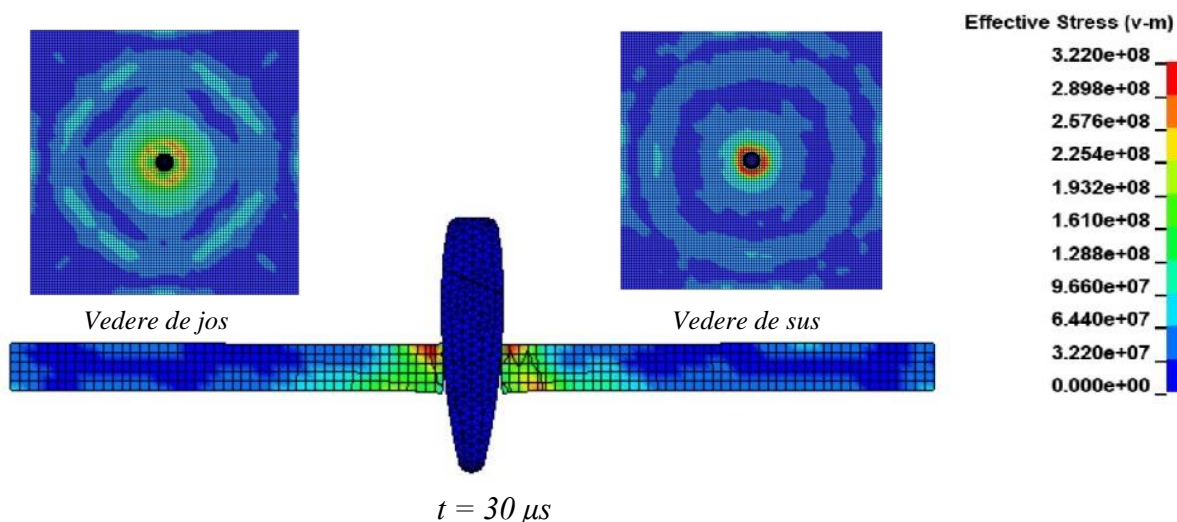




**Fig. 3.2** Evoluția în timp a impactului normal - MEF

În figura 3.2 este prezentată evoluția impactului, cu efectele sale (deformarea cu perforare a plăcii), prin prezentarea stării deformate pe durata analizei de 60 microsecunde.

În figura 3.3 sunt prezentate, în mod independent ca postprocesare, valorile și aspectul câmpului tensiunilor echivalente von Mises pentru placă la timpul  $t = 30 \mu s$  (privită lateral, printr-o secțiune de la jumătatea plăcii și privită pe direcția impactului, vedere de jos și de sus).



**Fig. 3.3** Câmpul tensiunilor echivalente von Mises la impact normal - MEF

De asemenea, au fost prezentate variația în timp a energiei totale a plăcii, variația în timp a energiei cinetice a glonțului, precum și variația în timp a vitezei glonțului pe durata proceselor de penetrare și de perforare. Rezultatele au fost notate și comparate ulterior.

### Modelul cu EFG - impact normal

Modelul cu Elemente Libere Galerkin (placa) a fost realizat cu 61206 noduri și 50000 elemente solide, având o discretizare uniformă, cu mărimea laturilor de 1 mm și este



reprezentat în figura 3.4.

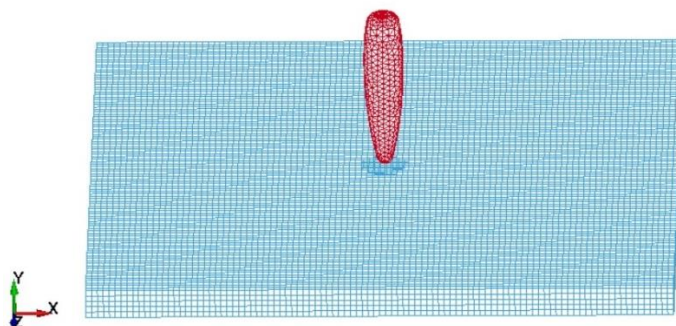


Fig. 3.4 Modelul cu EFG la impact normal

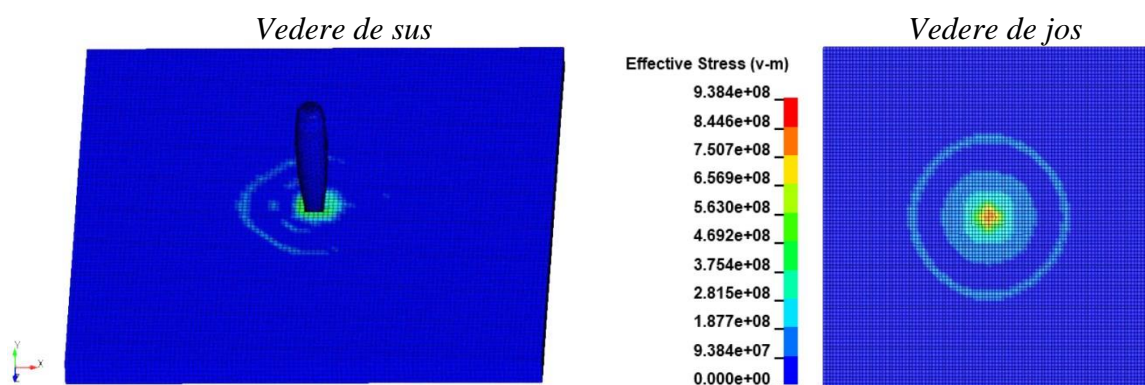


Fig. 3.5 Câmpul tensiunilor echivalente von Mises la  $t = 10 \mu s$  la impact normal - EFG

Din analiza câmpului tensiunilor echivalente von Mises sau a presiunii pe direcția de impact din figura 3.5, se poate constata caracterul puternic local al impactului, precum și simetria tensiunilor.

### Modelul cu SPH - impact normal

Modelul cu SPH a fost realizat cu 50000 noduri și 50000 elemente solide, cu o distanță internodală de 1 mm și este reprezentat în figura 3.6.

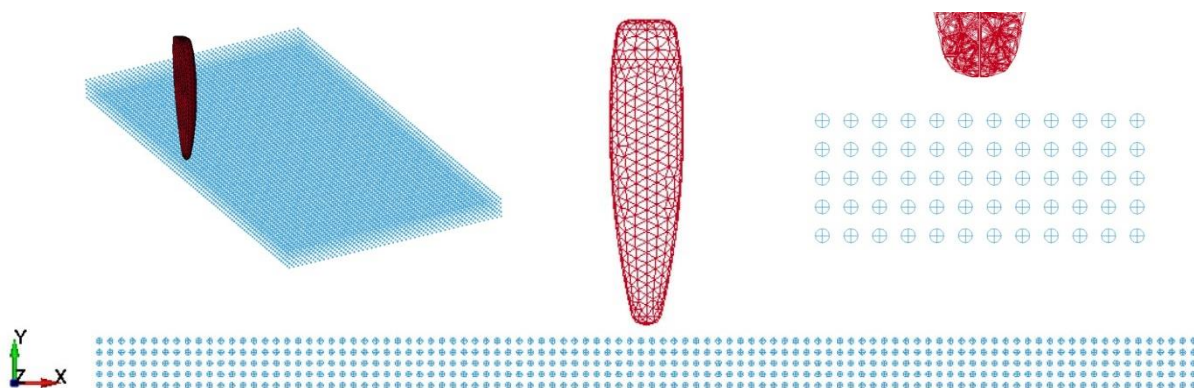
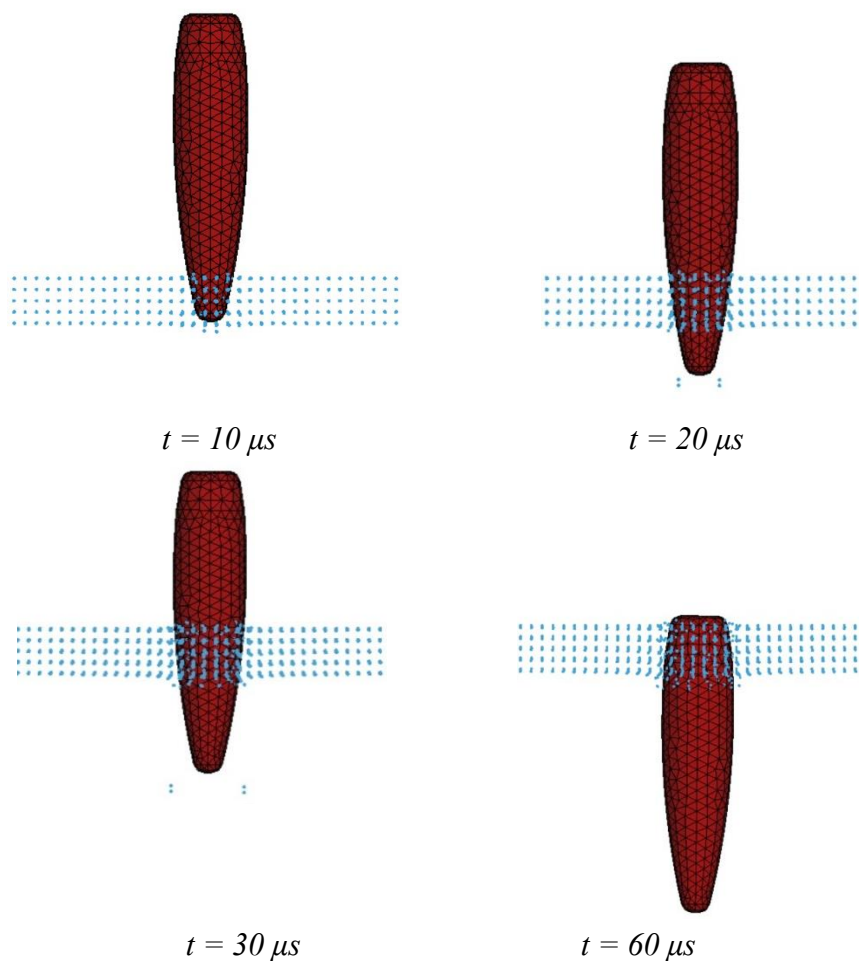


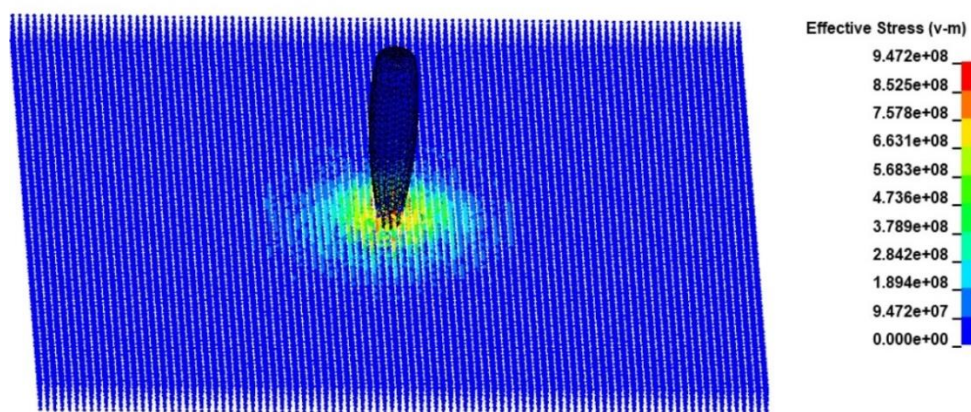
Fig. 3.6 Modelul cu SPH la impact normal



**Fig. 3.7** Evoluția procesului de perforare a plăcilor la impact normal - SPH

Din analiza imaginilor din figura 3.7 se constată fenomenul de penetrare a plăcii de aluminiu, dar totodată, și fenomenul de cedare a materialului prin fragmentare și prin deplasarea particulelor atât în sensul perforării, cât și în sens invers.

Observând câmpul tensiunilor echivalente von Mises din figura 3.8, se poate constata atât caracterul puternic local al impactului, cât și simetria tensiunilor care apar în placă.



**Fig. 3.8** Câmpul tensiunilor echivalente von Mises la  $t = 10 \mu s$  la impact normal - SPH

Aspectul câmpului tensiunilor este unul natural, în conformitate cu așteptările, în sensul că impactul normal reprezintă o solicitare axial simetrică, iar câmpul tensiunilor prezintă această simetrie față de normală. Valorile maxime ale tensiunilor apar în punctul de impact și ele se propagă ca unde elastice în tot materialul, respectând aspectul simetric al solicitării.

### 3.1.2. Impactul oblic proiectil-placă plană omogenă și izotropă

Pentru cercetarea impactului oblic proiectil-placă, s-a continuat studiul început pe placa prezentată anterior, în cadrul impactului normal. Astfel, au fost păstrate datele de intrare și s-a aplicat proiectilului un unghi de incidență  $\alpha=30^\circ$  față de axa longitudinală.

Impactul oblic proiectil-placă a fost simulat prin MEF, modelul cu elemente finite (placa) a fost realizat cu 61206 noduri și 50000 elemente solide, prezentând o discretizare uniformă, având mărimea laturilor de 1 mm (figura 3.9).

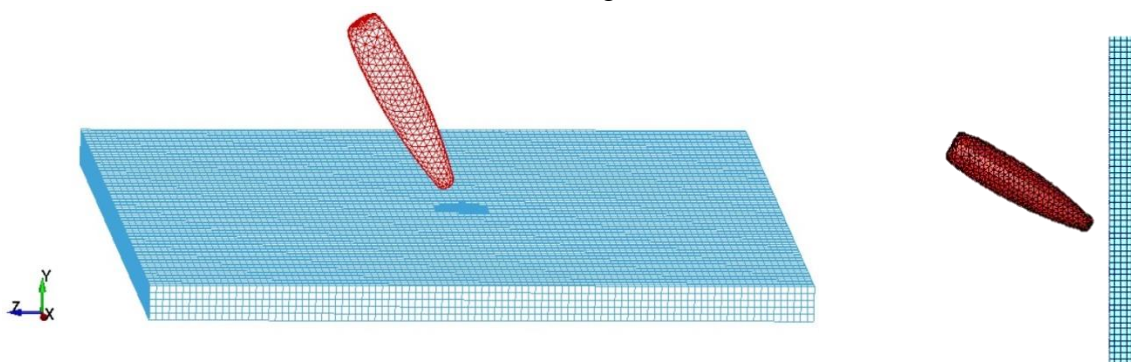


Fig. 3.9 Modelul cu elemente finite la impact oblic

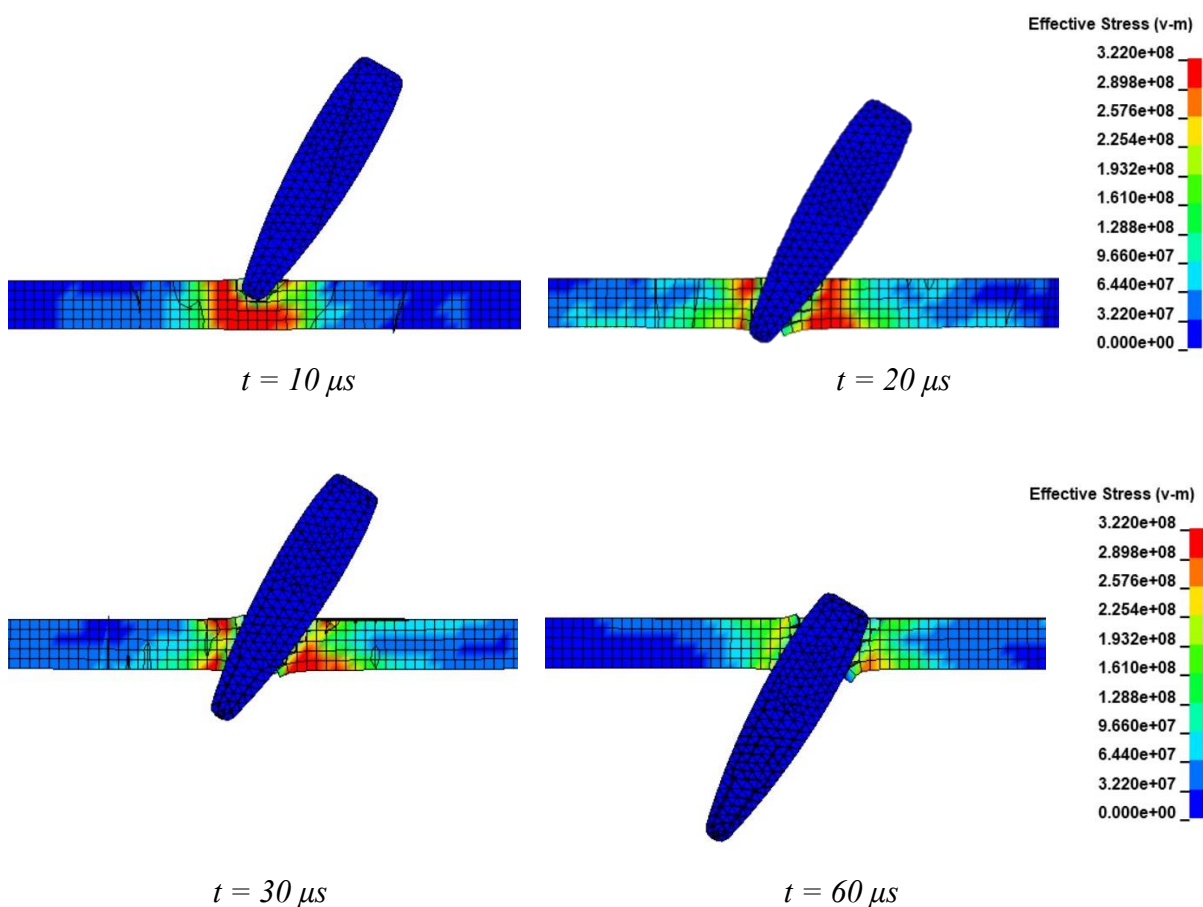


Fig. 3.10 Câmpul tensiunilor echivalente von Mises la impact oblic - MEF

În figura 3.10 sunt prezentate, în mod independent ca postprocesare, valorile și aspectul câmpului tensiunilor echivalente von Mises pentru placa modelată cu elemente finite (privită lateral, printr-o secțiune de la jumătatea plăcii).

### Modelarea fenomenului de ricoșet

În studierea impactului oblic proiectil-placă trebuie luat în calcul și fenomenul de ricoșet. Astfel, s-a continuat studiul pe placa prezentată anterior, placă de aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm, supusă unui impact oblic, viteza glonțului fiind de 500 m/s, analiza fiind realizată cu ajutorul elementelor finite. Dacă anterior a fost prezentat impactul oblic, glonțul având un unghi de incidență  $\alpha=30^\circ$  (figura 3.11), în acest subcapitol a fost determinat unghiul la care a început ricoșarea, adică unghiul  $\alpha=50^\circ$ .

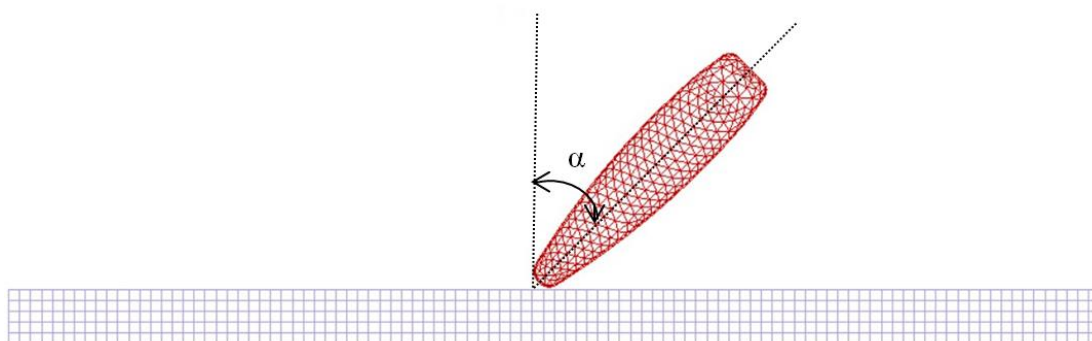
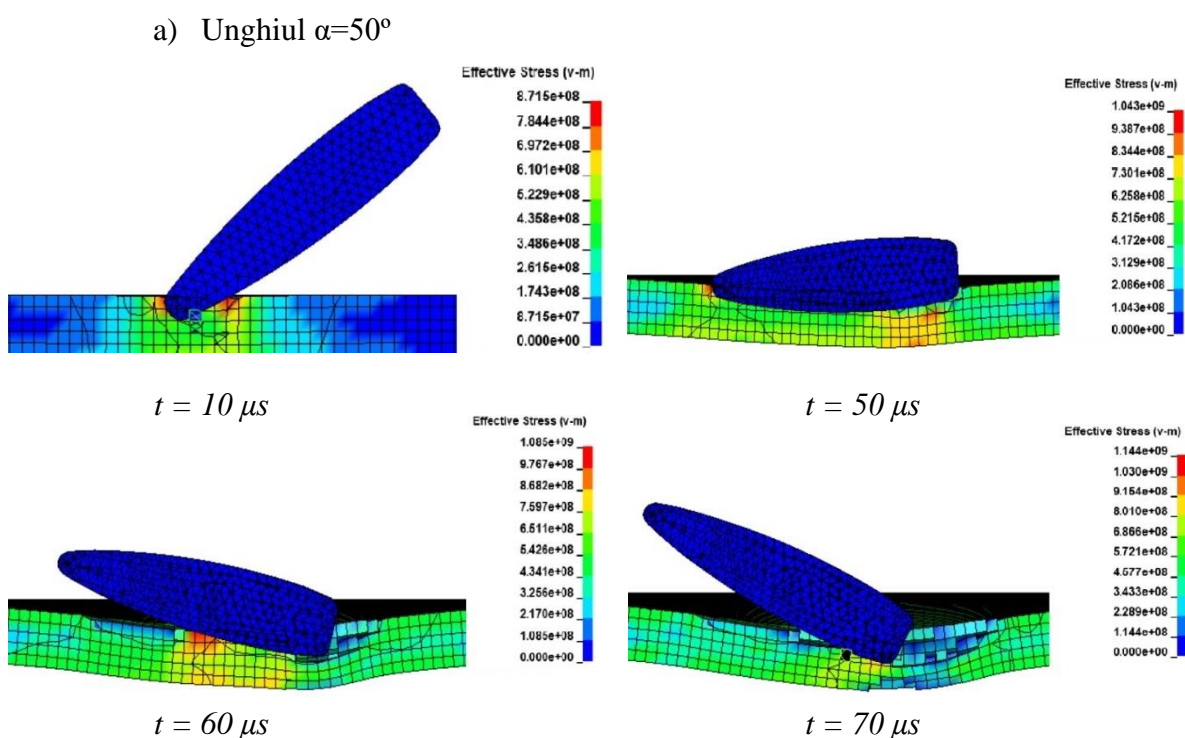


Fig. 3.11 Unghiul  $\alpha$  de incidență a proiectilului



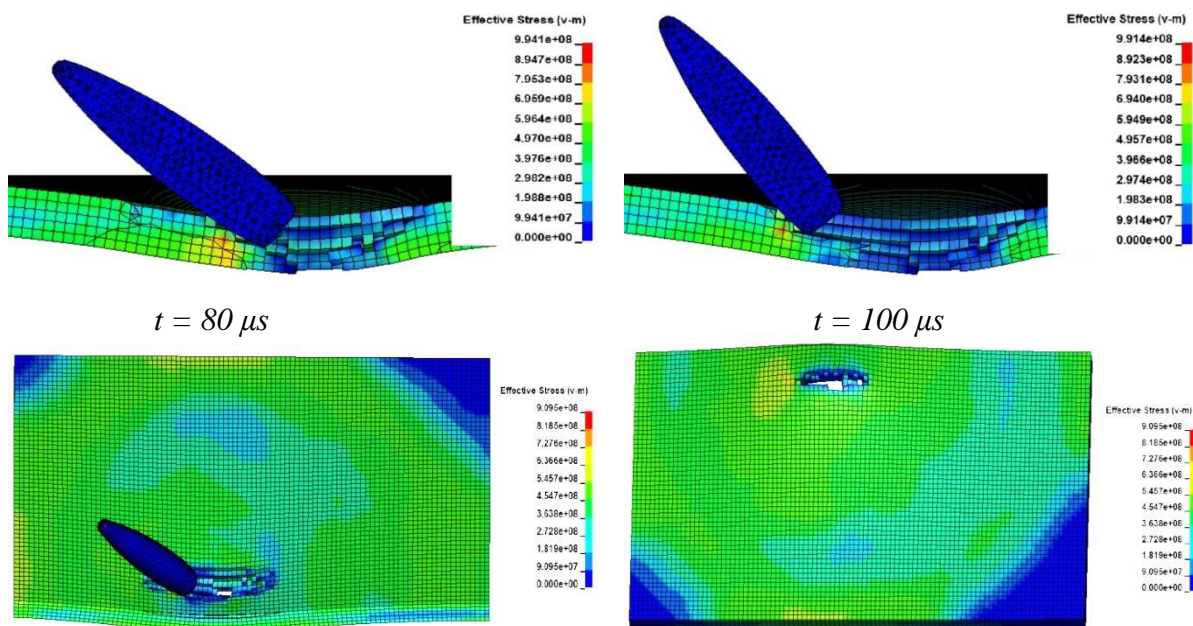


Fig. 3.12 Câmpul tensiunilor echivalente von Mises pentru  $\alpha=50^\circ$

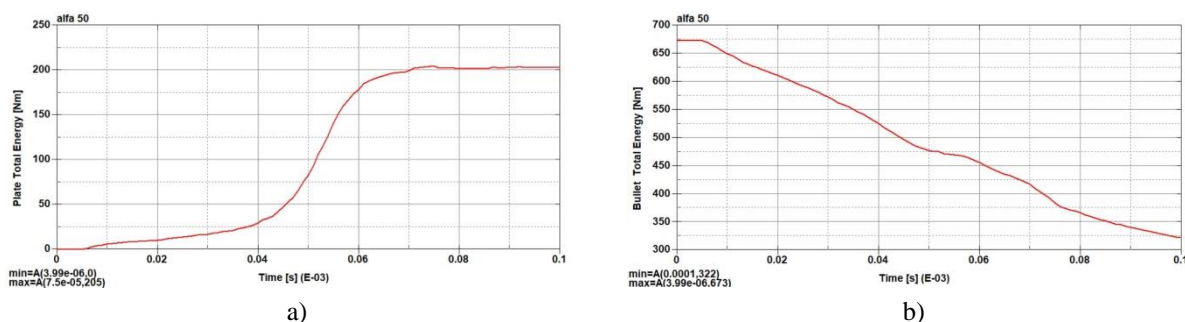


Fig. 3.13 Energia totală a plăcii (a) și a glonțului (b) pentru  $\alpha=50^\circ$

În figura 3.12 se prezintă variația tensiunilor echivalente von Mises la un unghi de incidență a proiectilului  $\alpha=50^\circ$ . Se observă faptul că, la acest unghi de incidență, apare fenomenul de ricoșet, și, în același timp, proiectilul reușește să perforzeze placa.

În figura 3.13 se observă caracterul puternic local al impactului și se constată că energia totală absorbită de placă a crescut considerabil, până la valoarea de 205 Nm, față de valoarea de 32,8 Nm, la un unghi incidență  $\alpha=45^\circ$ .

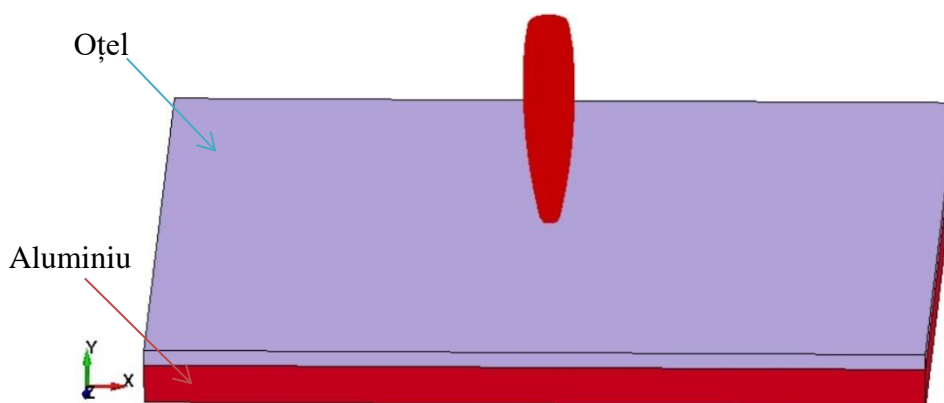
*Această metodologie de calcul poate fi folosită pentru aflarea unghiului de ricoșet la orice problemă, doar că, din considerente de diferențe de material și de viteza glonțului, acesta va fi diferit pentru fiecare caz în parte.*

### 3.1.3. Impactul proiectil-placă din compozit multistrat

În continuare, este prezentată analiza numerică în cazul unui proiectil reprezentat de glonțul perforant cal. 7,62 mm, în interacțiune cu o placă din material compozit, în două versiuni constructive: placă multistrat cu straturi omogene și izotrope și placă multistrat cu miez de tip fagure.

Pentru cercetarea impactului proiectil-placă multistrat, s-a început cu studierea unei plăci cu două straturi omogene și izotrope, un strat din aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm și un strat din oțel, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 2 mm (figura 3.14).

Impactul a fost unul normal, cu viteza variată, crescând de la 200 m/s, când glonțul doar penetrează placa, până la o viteză în care glonțul penetrează și perforază placa.



**Fig. 3.14** Model 3D impact glonț-placă multistrat

De asemenea, au fost prezentate și cele două variante constructive ale plăcilor, când acestea sunt solidarizate (cuplate) / nesolidarizate (necuplate). În plus, au fost comparate energiile cinetice ale glonțului și plăcilor, precum și viteza glonțului la care acesta nu mai perforază placa.

#### **Placă multistrat cu miez de tip fagure**

În continuare, este prezentată analiza numerică în cazul unui proiectil reprezentat de glonțul perforant cal. 7,62 mm, în interacțiune cu o placă compozită, în două versiuni constructive: placă multistrat cu straturi omogene și izotrope și placă multistrat cu miez tip fagure.

Impactul proiectil-placă multistrat cu miez de tip fagure, exemplul care va fi prezentat, se referă la impactul normal dintre un glonț rigid, cu o viteză de 500 m/s, viteză folosită anterior, cu o placă multistrat formată din două plăci de aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 2 mm, unite de un miez de fagure din aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm.

Modelele de material folosite la placă au fost plastic kinematic, iar la glonț a fost folosit un material rigid.

Impactul proiectil-placă a fost simulat prin MEF, modelul cu elemente finite este prezentat în figura 3.15.

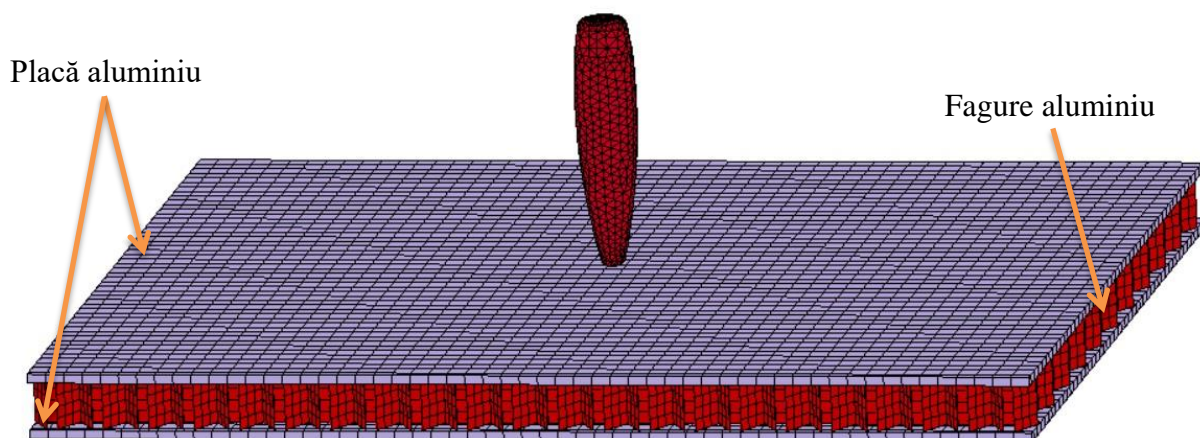


Fig. 3.15 Modelul cu elemente finite placă multistrat cu miez de tip fagure

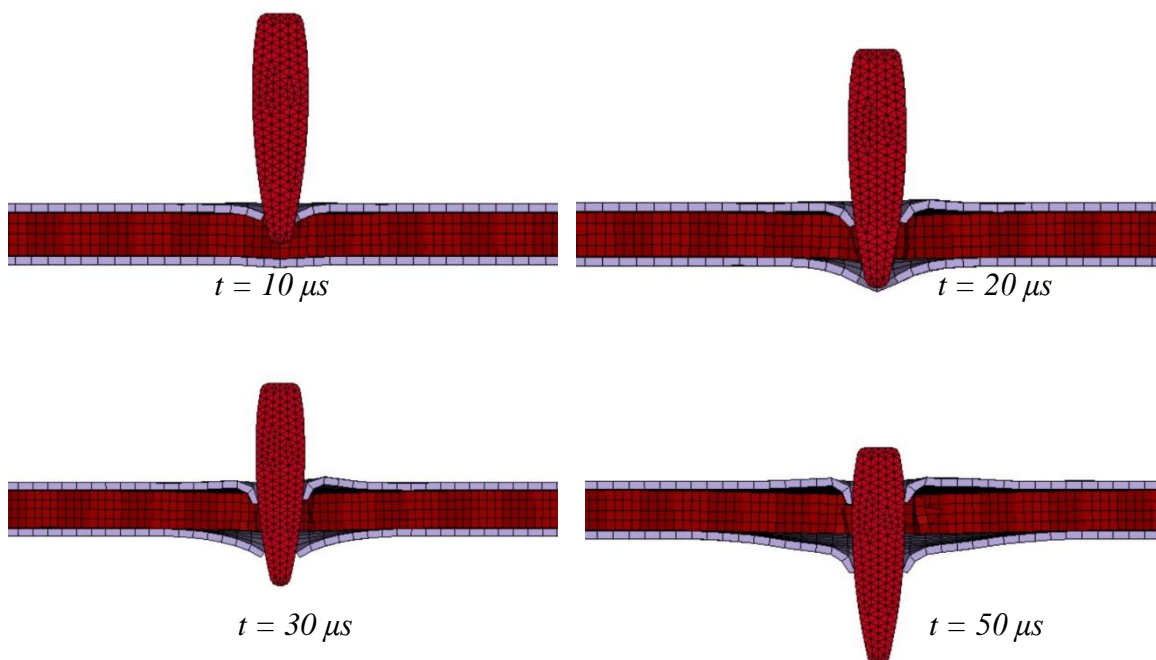


Fig. 3.16 Evoluția în timp a impactului proiectil-placă multistrat cu miez de tip fagure

În figura 3.16 este prezentată evoluția impactului, cu efectele sale (deformarea cu perforare a plăcii), prin prezentarea stării deformate pe durata analizei de 50 microsecunde.

Această metodă permite obținerea un blindaj care să reziste impactului și care poate fi adaptat oricăror cerințe, prin schimbarea materialelor și prin creșterea/scăderea grosimii, ajungând astfel la o economie de timp și de resurse.

### 3.3. Concluzii

Chiar dacă sunt aplicate la problemele clasice ale elasticității sau ale teoriei plasticității, calculele moderne ale rezistenței materialelor sunt de neconceput fără utilizarea metodelor numerice și a modelelor de material. Acest lucru este rezultatul direct al progreselor tehnologice și software realizate în domeniul calculatoarelor.

Metoda cea mai frecvent utilizată pentru analiza numerică și pentru modelarea comportării mediilor continue este metoda elementelor finite. Performanța metodei

elementelor finite este strâns legată de performanța programelor și a computerelor. Dimensiunea problemei nu mai este un obstacol de netrecut, deoarece produsele de analiză software de astăzi oferă performanțe ridicate.

În vederea descrierii fenomenelor cât mai aproape de realitate, au apărut metode noi de analiză și de simulare numerică.

O metodă relativ nouă este metoda SPH, fiind utilizată pentru integrarea aproximativă a ecuațiilor diferențiale parțiale. Aceasta se încadrează în categoria metodelor de tip mesh free, care utilizează pseudoparticule.

Metoda elementului liber Galerkin se bazează pe o serie de ecuații ale teoriei elasticității, folosite în condițiile speciale de aproximare numerică prin metoda celor mai mici pătrate în mișcare ( “Mooving Least Squares” sau MLS).

În acest capitol a fost prezentată analiza numerică în cazul unui proiectil reprezentat de glonțul perforant cal. 7,62 mm, în interacțiune cu o placă cu diferite versiuni constructive (placă omogenă și izotropă, placă multistrat și placă multistrat cu miez de tip fagure). Cercetările numerice efectuate au avut în vedere interacțiunea proiectil-placă, atât în condițiile impactului normal, cât și al impactului oblic, la diferite viteze de impact.

Cercetarea numerică efectuată s-a bazat pe utilizarea programului Ansys LS-Dyna, luând în considerare mai multe modele de material din cadrul bibliotecii acestuia.

S-a prezentat studiul la impact al unui proiectil cu o placă omogenă și izotropă din aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm, cu o viteză a glonțului de 500 m/s, simulat prin MEF, metoda EFG și prin metoda SPH. Rezultatele obținute prin cele trei metode au fost apropiate, cu erori relativ mici, sub 5%, acest lucru reprezentând o concordanță foarte bună a valorilor obținute, implicit o analiză corespunzătoare.

S-a continuat studiul prin simularea, tot prin intermediul celor trei metode (MEF, EFG și SPH), a impactului proiectil-placă omogenă și izotropă din aluminiu, cu un proiectil cărui s-a aplicat un unghi de înclinare. Și în acest caz s-au obținut valori apropiate, cu erori de sub 5%. Mărind unghiul de incidență a proiectilului, s-a determinat, doar prin MEF, faptul că, după unghiul  $\alpha=50^\circ$ , în cazul modelului studiat, apare fenomenul de ricoșet.

Prezentul capitol prezintă o serie de cazuri concrete și de modele de analiză numerică, în diferite condiții. Concluziile sunt utile, atât în ceea ce privește modelarea, desfășurarea calculului, cât și în interpretarea rezultatelor. Rezultate obținute în calculul numeric arată valabilitatea și utilitatea metodelor de tip mesh free.

Prin studiul și prin simulările prezentate în acest capitol, este de reținut faptul că sunt oferite modele de postprocesare și de interpretare a unor rezultate, care pot fi îmbogățite și particularizate pentru alte situații, similare sau mai puțin similare.



## CAPITOLUL IV

### CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA PROTECȚIEI PRIN BLINDAJ A ELICOPTERULUI IAR 330

#### 4.1. Introducere

Sistemele de protecție balistică sunt folosite în domeniile de transport sau de luptă pentru a evita sau pentru a reduce pagubele create de către focul inamicului. Acestea sunt supuse la diferite solicitări dinamice, în funcție de tipurile de amenințări din teatrele de operații. Astfel, proiectarea sistemelor de protecție balistică trebuie să se realizeze în contextul mecanismelor de distrugere, pe tipuri de amenințări și pe niveluri de protecție.

Cercetările experimentale care urmează a fi prezentate în acest capitol au ca scop validarea modelului numeric, care poate fi îmbogățit și particularizat pentru alte situații, similare sau mai puțin similare. Implicit, se pune la dispoziție modalitatea găsirii unui răspuns rapid la anumite întrebări.

Cercetările experimentale au avut în vedere interacțiunea proiectil-placă în condițiile impactului normal, proiectilul fiind reprezentat de glonțul perforant cal. 7,62 mm x 39 mm, în interacțiune cu următoarele tipuri de plăci:

- placă oțel-aliaj aluminiu-miez de tip fagure din aluminiu-aliaj aluminiu (figura 4.1);



Fig. 4.1 Placă OI-Al-Fagure Al-OI

- placă aliaj aluminiu-miez de tip fagure din aluminiu-aliaj aluminiu (figura 4.2);



Fig. 4.2 Placă Al-Fagure Al-Al

- placă oțel-miez de tip fagure din aluminiu-oțel (figura 4.3).



**Fig. 4.3** Placă OI-Fagure Al-OI

Pe timpul executării testelor experimentale, plăcile au fost introduse într-un suport proiectat de către doctorand și creat special pentru acest plan de testare (figura 4.4). Suportul de testare are patru picioare detașabile și poate fi ajustat pe înălțime.

Pentru a oferi o stabilitate suplimentară, tăpile picioarelor au un orificiu prin care se poate introduce un element de fixare în pământ (melc/țepușă).

Suportul plăcilor, dispus în partea de sus, oferă încadrare pe toate laturile pentru plăcile introduse. De asemenea, acestuia i se pot aplica patru unghiuri de incidență:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  și  $45^\circ$ .



**Fig. 4.4** Suport plăci pentru testare în poligon

## 4.2. Analiza experimentală a impactului

Scopul cercetărilor experimentale care urmează a fi prezentate în acest capitol este de a urmări evaluarea capabilităților balistice pentru anumite configurații experimentale de materiale și de a valida modelul numeric, implicat metoda și rezultatele cercetărilor numerice, model numeric care poate fi îmbogățit și particularizat pentru alte situații.

În vederea validării modelului numeric, s-au analiza atât efectele, cât și parametrii dinamici ai impactului (viteza de impact, viteza rămasă după impact - viteza reziduală, diametrul găurii, aspectul găurii).

Activitatea de cercetare experimentală s-a desfășurat într-un poligon militar omologat, care a asigurat condițiile de siguranță și de performanță necesare. Pentru instrumentarea testelor au fost utilizate dispozitive, instalații și echipamente din dotarea Academiei Tehnice Militare Ferdinand I.

La efectuarea testelor experimentale au participat reprezentanți ai Academiei Tehnice Militare “Ferdinand I” și personalul instruit cu atribuții, prevăzute în procedurile operaționale.



**Fig. 4.5** Organizare experiment

Pentru început, s-a pregătit zona de testare (raionul de tragere), s-a amplasat suportul de testare, iar distanța de tragere a fost stabilită la 10 m, după cum se poate observa în figura 4.5.

Camera de filmare a fost dispusă lateral stânga, la o distanță de 15 m față de locul de testare, cu obiectivul centrat către suportul de testare.

Programul de testare-evaluare a constat în cercetarea impactului proiectil-placă, prin efectuarea de două trageri cu glonțul perforant cal. 7,62 mm x 39 mm și o tragere cu glonțul cal. 5,56 mm x 45 mm NATO, în epruvete formate din următoarele învelișuri (straturi):

- oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu (două plăci);
- aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu (două plăci);
- oțel-fagure aluminiu-oțel (două plăci).

Primul set de teste s-a efectuat pe plăcile formate din straturile oțel- aliaj aluminiu-fagure aluminiu- aliaj aluminiu. În figurile 4.6 și 4.7 se pot observa cele două plăci (vedere din față și vedere din spate), în care s-a tras cu glonțul cal. 7,62 mm x 39 mm, glonțul reușind să le perforoze. Figurile prezintă plăcile cu sistemul de încastrare superior eliminat, în vederea demontării/schimbării acestora.



Fig. 4.6 Plăci OI-Al-F-Al - 2 x 7,62 mm - vedere față impactată



Fig. 4.7 Plăci OI-Al-F-Al - 2 x 7,62 mm - vedere din spate

În cadrul acestei testări experimentale au fost determinate, pentru fiecare set de plăci în parte, viteza glonțului înainte de impact, precum și viteza rămasă după perforare. De asemenea, s-a măsurat diametrul găurii plăcilor perforate. Rezultatele rezultate au fost comparate.

După cum era de așteptat, plăcile formate din straturile oțel-fagure aluminiu-oțel oferă cea mai mare protecție în cazul impactului cu un proiectil. Un randament foarte bun, asemănător celei dintâi, îl prezintă placa formată din straturile oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu.

#### 4.3. Analiza numerică a impactului

Impactul proiectil-placă reprezintă un fenomen complex, care se analizează prin metode analitice, având la bază ipoteze simplificatoare. Pe lângă utilizarea unor legi empirice, aceste aspecte ale interacțiunii proiectil-placă și efectele asupra structurii se studiază cu ajutorul metodelor numerice.

Scopul acestui subcapitol este de a studia procesul de interacțiune a unui proiectil cu anumite plăci, în diferite configurații.

Pentru analiza și simulările numerice s-a folosit metoda elementelor finite. Pornind de la configurațiile testelor experimentale desfășurate în poligon, au fost realizate simulări numerice care urmează cu fidelitate cercetarea experimentală.

Definirea condițiilor de bază, necesare analizei dinamice cu elemente finite, a fost efectuată respectând protocolul de impact folosit în partea experimentală a acestei lucrări.

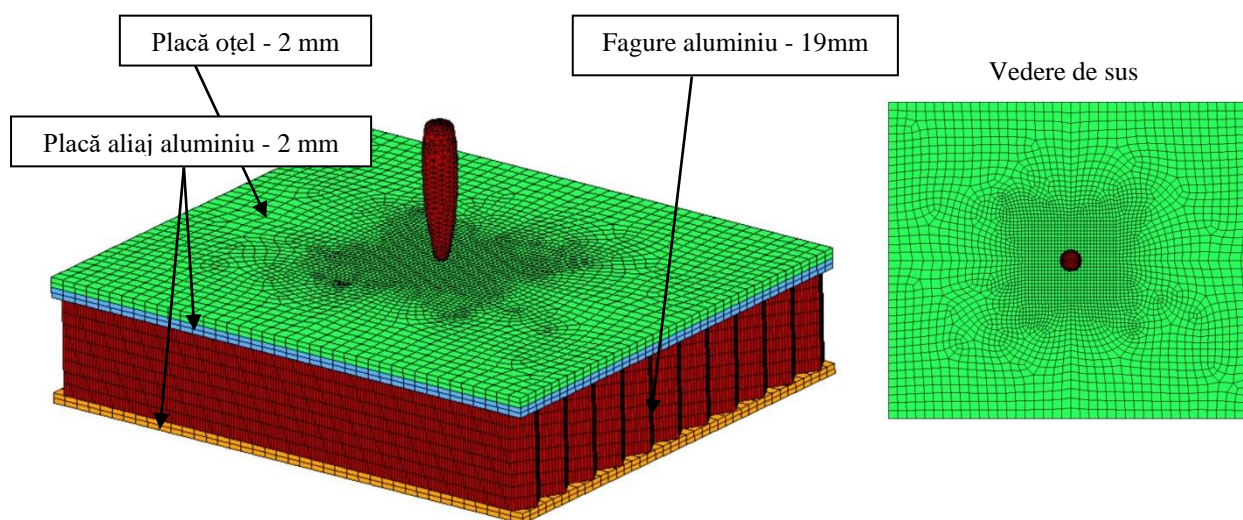
Cercetarea numerică efectuată se bazează pe utilizarea programului Ansys LS-Dyna, luând în considerare mai multe modele de material din cadrul bibliotecii de material a programului. Toate modelele de material folosite descriu atât solicitarea de impact, cât și fenomenul de rupere a materialului, la interacțiunea proiectil-placă. Modelele de material cărora li s-a acordat o preocupare deosebită sunt Johnson Cook și plastic kinematic. În urma analizelor numerice s-a constatat faptul că modelul de material plastic kinematic concordă mai bine cu realitatea.

Modelul geometric urmează cu fidelitate modelul realizat pentru testarea experimentală. Astfel, a fost proiectat modelul geometric pentru fiecare placă în parte, la dimensiunile reale de 250 mm x 250 mm.

Impactul a fost unul normal, cu viteza glonțului diferită pentru fiecare caz în parte, iar durata analizei numerice a fost de  $10^{-5}$  secunde.

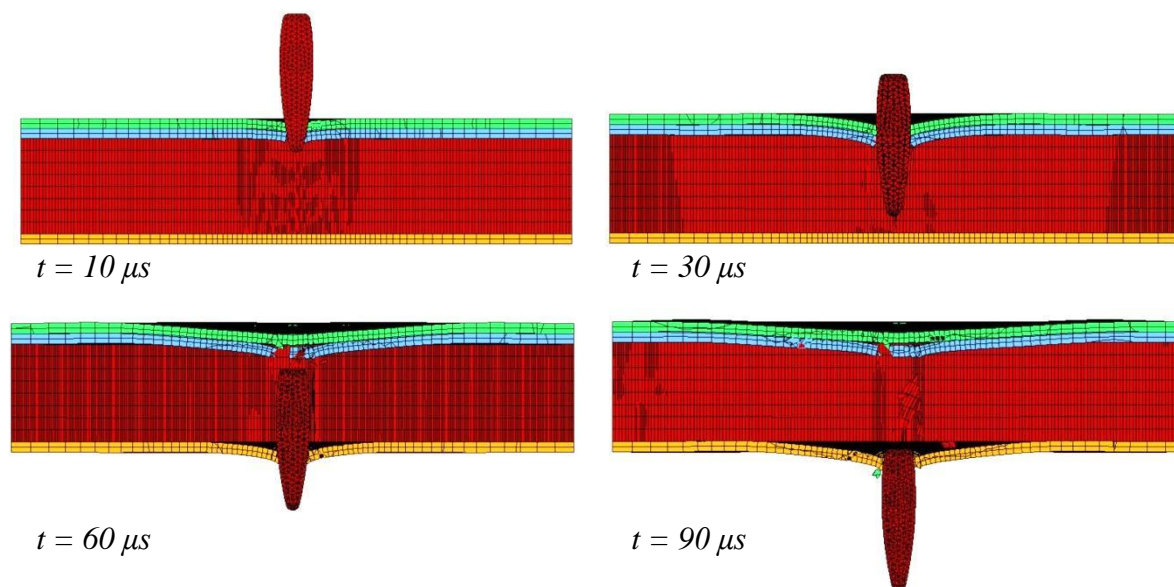
Pentru a urma cu fidelitate experimentul, a fost analizat fiecare caz în parte. Viteza glonțului a fost diferită la fiecare tragere, cu mici diferențe. Vitezele au fost măsurate la subcapitolul 4.2 și au fost introduse ca date inițiale în simulările numerice prezentate în continuare.

Impactul normal proiectil-placă formată din straturi de oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu a fost simulat prin MEF (figura 4.8), folosind ca date inițiale valorile prezentate mai sus, iar viteza inițială a glonțului a fost de 737 m/s, viteză măsurată anterior.



**Fig. 4.8** Modelul cu elemente finite placă O1-Al-F-Al

În figura 4.9 este prezentată evoluția impactului, cu efectele sale (deformarea cu perforare a plăcii), prin prezentarea stării deformate pe durata analizei de 90 microsecunde. Imaginea explică mecanismul de distrugere a plăcii de protecție, în care se observă apariția unui fenomen local, deteriorări pe anumite direcții și o forfecare de material. De asemenea, apare o îndepărtare a plăcilor din cauza faptului că acestea nu sunt solidarizate.



**Fig. 4.9** Evoluția în timp a impactului - placă O1-Al-F-Al

Au fost determinate și prezentate pentru fiecare placă de protecție următoarele aspecte:

- evoluția impactului, cu efectele sale (deformarea cu perforare a plăcii);
- valorile și aspectul câmpului tensiunilor echivalente von Mises pentru placă (privită lateral, printr-o secțiune aflată la jumătatea acesteia și privită pe direcția impactului, vedere de jos și de sus);
- variația în timp a energiei cinetice a glonțului și variația în timp a energiei totale a plăcii;
- variația în timp a vitezei glonțului.

#### 4.4. Validarea modelului numeric

Pentru a evidenția rezultatele experimentale și pe cele numerice, s-a procedat la analiza comparativă a acestora, pentru fiecare placă în parte. Astfel, s-au comparat următoarele rezultate obținute prin cele două metode de studiu:

- viteza inițială a glonțului;
- viteza reziduală a glonțului;
- masa plăcilor testate experimental și a celor analizate numeric;
- diametrul și aspectul găurii după perforare.

Primele observații în urma testelor efectuate experimental și numeric se referă la placa de protecție formată din straturile oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu.

Vitezele reziduale ale glonțului, diametrul găurii după impact și masa plăcilor au valori apropiate, cu o eroare maximă de 3,54%. Acest lucru semnifică o bună concepere a modelului geometric și, în același timp, o validare a modelului numeric pentru placa în cauză.

A fost examinat aspectul găurilor după impact (figurile 4.10 și 4.11) și se observă asemănarea dintre modelul experimental și cel numeric. De asemenea, apare o cedare de material de tip ductilă, combinată cu o cedare de tip floare (petaling).



Fig. 4.10 Aspectul găurii după impact placă OI-Al-F-Al - testare experimentală

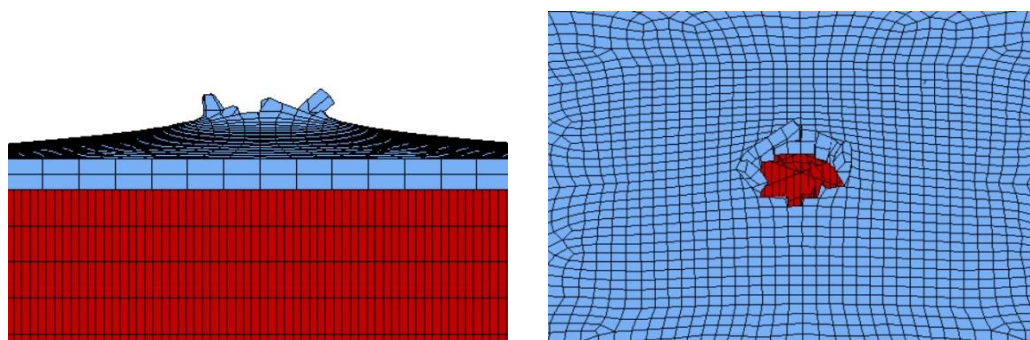


Fig. 4.11 Aspectul găurii după impact placă OI-Al-F-Al – simulare numerică

#### 4.5. Concluzii

În urma efectuării analizelor comparative între rezultatele experimentale și cele numerice, s-a constatat faptul că placa formată din straturile de oțel-fagure aluminiu-oțel prezintă cel mai bun factor de protecție, în comparație cu celelalte două tipuri de plăci dar, în același timp, prezintă o masă mai ridicată cu aproximativ 13% față de placa formată din oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu.

Deși, fiecare placă de protecție a fost perforată, nu se poate afirma faptul că acestea nu oferă protecție. *Se poate nota că fiecare dintre acestea oferă o anumită protecție, doar că acest factor este influențat de distanța de la care se trage.*

Testele experimentale au fost executate în condiții mai riguroase decât într-un caz real de atac asupra elicopterului. Este foarte puțin probabil ca într-un elicopter să se tragă de la o distanță de 10 m, pe direcție perpendiculară.

Bineînțeles, gradul de protecție a plăcilor prezentate poate fi îmbunătățit prin diferite procedee, în funcție de obiectivul dorit, raportat la masa adăugată și la costurile de producție. Astfel, printre propunerile de îmbunătățiri se numără mărirea treptată a grosimii învelișului de oțel, mărirea grosimii fagurelui, umplerea spațiilor structurii de tip fagure cu materiale plastice sau compozite, precum și schimbarea plăcilor de protecție cu alte sisteme, formate din materiale compozite noi, special create în acest scop (titan, ceramice, Dyneema, Tensylon, carbon nanotubes).

Analiza comparativă a celor două seturi de date evidențiază o corelație foarte bună între valorile experimentale și cele determinate numeric pentru parametrii analizați. Se poate afirma faptul că modelul numeric a fost validat, deoarece diferențele între datele obținute experimental și numeric sunt mici, cu erori sub 5 %.

## CAPITOLUL V

### ANALIZA UNOR NOI CONFIGURAȚII ALE PLĂCILOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ

Domeniul protecției balistice se află într-o continuă dezvoltare, prin optimizarea materialelor și structurilor de protecție și prin descoperirea de noi materiale, pentru a se realiza un echilibru între varietatea amenințărilor din teatrele de operații și protecția împotriva acestora. Se urmărește creșterea gradului de protecție și, în același timp, micșorarea masei sistemului de protecție.

Aceste sisteme au înregistrat progrese considerabile de-a lungul anilor, mai ales în aplicațiile militare. Cu toate acestea, costurile ridicate, precum și peisajul în schimbare a materialelor, au găsit necesitatea unei înțelegeri mai profunde a mecanismului de impact, precum și a noilor permutări în dezvoltarea strategiei de proiectare [55].

#### *Titan Ti6Al4V*

Aliajul de titan Ti6Al4V, cunoscut și sub numele de Ti64, Grad 5 sau TC4 este un aliaj care prezintă o rezistență specifică ridicată, densitate scăzută, duritate mare la rupere, rezistență excelentă la coroziune și biocompatibilitate superioară [56].

Recunoscut drept cel mai popular aliaj de titan, Ti6Al4V ocupă aproape jumătate din cota de piață a produselor din titan folosite astăzi în lume. Este considerat a fi unul dintre cele mai populare aliaje de titan, fiind utilizat în diferite aplicații, unde este necesar ca materialul să aibă o densitate redusă și, în același timp, o rezistență crescută la coroziune. Astfel, este utilizat în domenii precum: industria aerospațială, aplicații biomecanice (implanturi și proteze), industria navală, industria chimică.

În cele ce urmează, se propun noi variante constructive de protecție balistică, variante care au fost studiate numeric la impactul cu glonțul cal. 7,62 mm x 39 mm, rezultatele fiind comparate și analizate.

#### **5.1. Placă de protecție Ti-F-Ti**

După cum a fost menționat în capitolul anterior, *analiza numerică te ajută să salvezi timp și resurse financiare*, atunci când este vorba despre dezvoltarea unui sistem de protecție balistică și nu numai.

În vederea îmbunătățirii factorului de protecție oferit de plăcile de protecție prezentate anterior, au fost înlocuite plăcile din oțel cu plăci din aliaj de Ti6Al4V. Astfel, a fost obținut modelul cu elemente finite prezentat în figura 5.1. Impactul proiectil placă a fost simulat prin metoda elementelor finite, durata analizei numerice a fost de  $10^{-5}$  secunde, iar viteza inițială a glonțului a fost de 741 m/s și micșorată treptat, pentru a determina viteza reziduală. Pentru a urma cu exactitate modelul prezentat la capitolul anterior, au fost folosite aceleași condiții referitoare la tipurile de contacte dintre elemente, precum și aceleași condiții la limită. Plăcile din aliaj de Ti6Al4V au grosimea de 2 mm, iar fagurele 19 mm.

Modelul de material folosit pentru placă a fost, și în acest caz, plastic kinematic, iar pentru glonț s-a luat în considerare un material rigid. Din propria experiență, modelul de material plastic kinematic descrie foarte bine comportamentul la impact.

Folosind plăci subțiri, viteză mare de impact, timp scurt de execuție și efect termic



nesigur, acest model de material este cel mai potrivit în cazul nostru. Conform literaturii de specialitate [60, 61], analiza cu elemente finite a aliajului Ti6Al4V, în care este folosit modelul de material plastic kinematic, la impactul balistic, prezintă rezultate foarte bune, care concordă cu rezultatele obținute pe cale experimentală.

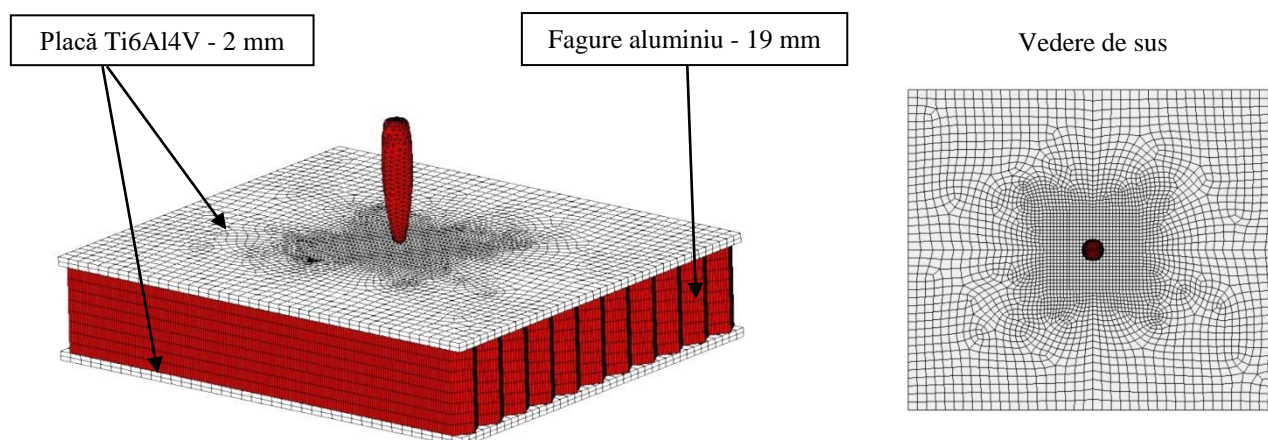


Fig. 5.1 Modelul cu elemente finite placă Ti-F-Ti

S-a observat faptul că, în acest caz, viteza glonțului s-a redus de la valoarea inițială de 741 m/s până la valoarea minimă de 254 m/s, aceasta reprezentând viteza reziduală.

Pentru determinarea vitezei glonțului la care acesta nu mai perforază placa, viteza inițială a fost micșorată treptat, acest lucru reprezentând tragerea de la o distanță mai mare.

Folosind metodologia de determinare a distanței de tragere, prezentată în capitolul al patrulea, a fost micșorată viteza inițială. Astfel, a fost constatat faptul că placa de protecție formată din straturile aliaj titan-fagure aluminiu-aliaj titan nu va mai fi perforată de glonț când acesta va avea o viteză inițială mai mică de 665 m/s, această viteză fiind corespunzătoare tragerii de la o distanță de aproximativ 41 m.

## 5.2. Placă de protecție Ti-Ti-F-Ti

În acest caz, pentru obținerea modelului geometric s-a mai adăugat o placă de aliaj de titan în partea de sus, de grosime 2 mm. Astfel, noua configurație de placă de protecție este formată din următoarele straturi: aliaj titan-aliaj titan-fagure aluminiu-titan, modelul geometric fiind prezentat în figura 5.2. În această configurație, placa nu este perforată.

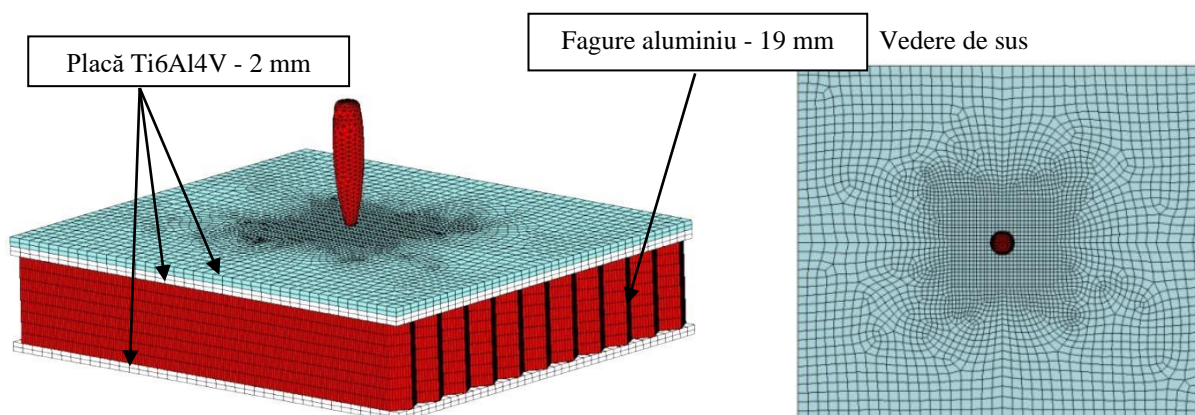


Fig. 5.2 Modelul cu elemente finite placă Ti-Ti-F-Ti

### 5.3. Placă de protecție Ti-Ti

Observând faptul că placa de protecție cu două straturi de aliaj de titan, dispuse în partea de sus, oferă cea mai bună protecție, iar stratul de aliaj de titan din partea de jos nu ajunge să fie penetrat, a fost eliminat fagurele de aluminiu și placa de jos, modelul geometric fiind constituit doar din două plăci de aliaj de titan, de grosime 2 mm fiecare, respectându-se aceleași condiții. Astfel, a fost obținut modelul cu elemente finite din figura 5.3.

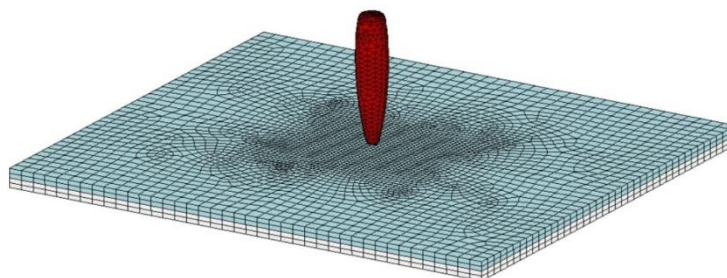


Fig. 5.3 Modelul cu elemente finite placă Ti-Ti

În acest caz, a fost observat faptul că placa de protecție formată din două straturi de aliaj Ti6Al4V este perforată de glonț, iar viteza reziduală este de 312 m/s. A fost micșorată treptat viteza inițială și a fost notat faptul că placa de protecție formată din două straturi de aliaj Ti6Al4V nu va mai fi perforată de glonț când acesta va avea o viteză inițială mai mică de 660 m/s, această viteză fiind corespunzătoare tragerii de la o distanță de aproximativ 40 m.

### 5.4. Placă de protecție Ti 4 mm

Observând faptul că placa de protecție cu două straturi de aliaj de titan, prezentată mai sus, oferă un grad de protecție ridicat, s-a considerat o placă din aliaj de Ti6Al4V, de grosime 4 mm, pentru a observa care configurație oferă cea mai bună protecție: două plăci de grosime 2 mm sau o placă de grosime 4 mm. Prin urmare, a fost obținut modelul cu elemente finite din figura 5.3.

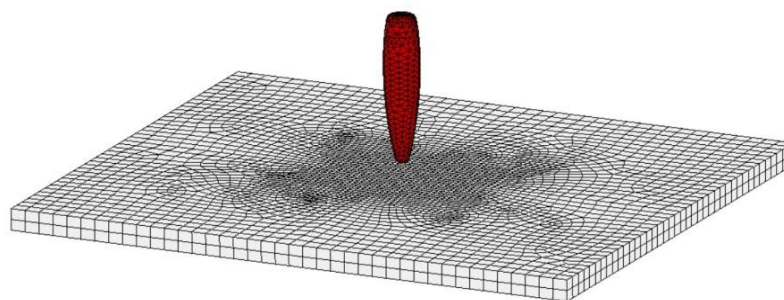


Fig. 5.3 Modelul cu elemente finite placă Ti 4 mm

Din analiza impactului se observă faptul că placa de protecție din aliaj Ti6Al4V, de grosime 4 mm, este perforată de glonț, iar viteza reziduală este de 134 m/s. Și în acest caz, a fost micșorată treptat viteza inițială și este de reținut faptul că această placă nu va mai fi perforată de glonț când acesta va avea o viteză inițială mai mică de 690 m/s, această viteză fiind corespunzătoare tragerii de la o distanță de aproximativ 34 m.

## 5.5. Concluzii

În încercarea de a dezvolta un sistem de protecție balistică, în măsură să reziste impactului cu glonțul cal. 7,62 mm, s-au propus noi variante constructive, care au fost analizate numeric, rezultatele fiind foarte bune. Astfel, au fost analizate numeric următoarele plăci, plecând de la configurațiile prezentate ulterior:

- placă de protecție aliaj titan (2 mm)-fagure aluminiu (19 mm)-aliaj titan (2 mm);
- placă de protecție aliaj titan (2 mm)-aliaj titan (2 mm)-fagure (19mm)-aliaj titan (2 mm);
- placă de protecție aliaj titan (2 mm)-aliaj titan (2 mm);
- placă de protecție aliaj titan de grosime 4 mm;

În analiza numerică a fost utilizat cel mai răspândit aliaj de titan, Ti6Al4V, cunoscut și sub numele de Ti64, TC4 sau ASTM Grad5, fiind un aliaj cu: rezistență specifică ridicată, densitate scăzută, duritate mare la rupere, rezistență excelentă la coroziune și biocompatibilitate superioară.

Cele patru configurații de protecție balistică au fost analizate numeric și au fost constatate următoarele:

- placa din Ti-Ti-F-Ti oferă cea mai mare protecție dar, în același timp, prezintă și cea mai mare masă, comparativ cu celelalte trei configurații;
- fagurele de aluminiu are un rol important în cazul plăcilor multistrat, iar acest lucru a fost dovedit;
- placa formată din două straturi de titan, de grosime 2 mm, prezintă un comportament mai slab față de placa formată dintr-un singur strat de aliaj de Ti6Al4V, de grosime 4 mm. În plus, are un dezavantaj privind poziționarea într-un suport a celor două straturi, implicând costuri suplimentare.

Configurațiile prezentate în acest capitol prezintă un comportament foarte bun la impactul cu proiectilul cal. 7,62 mm x 39 mm, acestea fiind soluții viabile pentru montarea pe elicopterul IAR 330 Puma Socat.

## **CAPITOLUL VI**

### **CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI VIITOARE DIRECȚII DE CERCETARE**

#### **6.1. Concluzii generale**

Elicopterele militare au un rol important și integrat în operațiunile aeriene, terestre și maritime și îndeplinesc o serie de misiuni esențiale. Spectrul de amenințări este reprezentat de componentele aeriene sau terestre de lovire, mai exact, de abilitatea adversarului de a detecta, identifica și angaja elicopterele.

Ca orice alte aeronave, elicopterele prezintă zone critice, care pot pune în pericol aparatul și echipajul, dacă acestea ar fi lovite de sistemele de apărare antiaeriană sau chiar de armamentul individual de infanterie. Principalele zone critice ale elicopterului se clasifică în două categorii: compartimentul instalației de forță și al ansamblurilor mecanice și cabina piloților și compartimentul cargo.

Blindajul poate fi definit ca un ansamblu de plăci care au ca rol protecția împotriva proiectilelor sau a schijelor, iar clasificarea acestuia se face în funcție de diferite criterii. Astfel, se pot întâlni blindaje pasive și reactive, în funcție de comportarea la impact. În funcție de soluția constructivă, există blindaje omogene și stratificate, iar în raport cu locul de montare, blindajele pot fi: de bază și amovibile.

Cea mai utilizată metodă de analiză și de simulare numerică a comportării mediilor continue este metoda elementelor finite. Posibilitățile metodei elementelor finite sunt legate strâns de performanțele programelor și calculatoarelor.

Pot fi remarcate două aspecte foarte importante privind progresul în calculul numeric al structurilor: apariția unor noi modele de material și îmbunătățirea descrierii contactului dintre materiale.

În cadrul capitolului al treilea a fost prezentată analiza numerică a impactului dintre glonțul perforant calibru 7,62 mm și o placă aflată în diferite versiuni constructive (placă omogenă și izotropă, placă multistrat, placă multistrat cu miez de tip fagure etc.). Cercetările numerice efectuate au avut în vedere interacțiunea proiectil-placă, atât în condițiile impactului normal, cât și ale impactului oblic, la diferite viteze de impact. Cercetarea numerică efectuată s-a bazat pe utilizarea programului Ansys LS-Dyna.

În încercarea de a dezvolta un sistem de protecție balistică în măsură să ofere un grad ridicat de protecție la costuri minime, în cadrul capitolului al patrulea au fost concepute și realizate diferite plăci de protecție multistrat care, ulterior, au fost testate experimental.

Organizarea experimentală a permis atingerea scopului dorit, acela de a urmări evaluarea capabilităților balistice pentru plăcile propuse. În urma testării pe cale experimentală a impactului proiectil-placă se poate identifica materialul potrivit pentru a oferi o protecție ridicată, dimensionarea și, nu în ultimul rând, validarea modelului numeric, care va servi la studii viitoare, fără a mai produce consum de resurse pentru realizarea testelor experimentale.

S-a constatat faptul că placa formată din straturile de oțel-fagure aluminiu-oțel prezintă cel mai bun factor de protecție, în comparație cu celelalte trei tipuri de plăci dar, în același timp, prezintă o masă mai ridicată cu aproximativ 13% față de placa formată din oțel-aliaj aluminiu-fagure aluminiu-aliaj aluminiu.

Deși, fiecare placă de protecție a fost perforată, nu se poate afirma faptul că acestea nu oferă protecție. Se poate nota că fiecare dintre acestea oferă o anumită protecție, doar că acest factor este influențat de distanța de la care are loc tragerea.

Testele experimentale au fost executate în condiții mai riguroase decât în cazuri reale de atac asupra elicopterului, deoarece posibilitățile ca tragerea într-un elicopter să se realizeze la o distanță de 10 m, pe direcție perpendiculară, sunt foarte mici. În plus, pentru a exista o tragere pe o direcție perpendiculară, ar fi necesar ca trăgătorul să fie poziționat chiar sub elicopter. Această este o condiție foarte greu de îndeplinit, chiar ideală, iar pentru celelalte cazuri, există posibilitatea apariției fenomenului de ricoșet, studiat și prezentat.

Analiza comparativă a celor două seturi de date evidențiază o corelație foarte bună între valorile experimentale și cele determinate numeric, pentru parametrii analizați. Putem afirma faptul că modelul numeric a fost validat, deoarece diferențele între datele obținute experimental și cele rezultate pe cale numerică sunt mici, cu erori sub 5 %.

Corespondența rezultatelor a confirmat valabilitatea procedurii de testare, a legilor de material folosite și a modelului utilizat și a validat activitatea numerică folosită în dezvoltarea de modele numerice adecvate, rezultatele obținute reprezentând baza științifică pentru direcții de cercetare care pot fi abordate ulterior.

În cadrul capitolului al cincilea au fost propuse diferite configurații de plăci de protecție, plecând de la configurațiile prezentate în cadrul capitolului al patrulea, având ca material principal aliajul de titan Ti6Al4V, un aliaj cu rezistență specifică ridicată, densitate scăzută, duritate mare la rupere și rezistență excelentă la coroziune. Aceste configurații au fost analizate numeric, iar rezultatele au fost foarte bune.

În urma efectuării analizelor numerice a fost constatat faptul că, cel mai bun factor de protecție îl prezintă placa formată din straturi de aliaj titan-aliaj titan-fagure aluminiu-aliaj titan, în care glonțul nu reușește să perforzeze, dar, în același timp, prezintă și cea mai mare masă, comparativ cu celelalte trei configurații. De asemenea, placa din aliaj de titan, de grosime 4 mm, prezintă, un comportament foarte bun, cu o viteză reziduală a glonțului de 134 m/s, corespunzătoare tragerii de la o distanță de aproximativ 34 m. În plus, aceasta are o masă mică, în comparație cu celelalte plăci.

Studiile teoretice și experimentale efectuate au făcut posibilă identificarea elementelor caracteristice ale materialelor studiate în ceea ce privește comportamentul lor la impact, crearea unui model care ar putea fi folosit pentru analizarea comportamentului blindajelor multistrat și dezvoltarea unor căi de valorificare a rezultatelor și de extindere ulterioară a cercetărilor.

Se poate concluziona că această lucrare și-a îndeplinit obiectivele, indicând faptul că studiarea comportamentului la impact al materialelor necesită o abordare complexă, multicriterială.

## **6.2. Contribuții personale**

Prin studiile realizate și prezentate în această lucrare, prin subiectul abordat, prin metodologia de lucru și prin rezultatele obținute, poate fi remarcat faptul că au fost aduse mai multe contribuții originale în acest domeniu.

În urma activității de cercetare desfășurată în scopul realizării tezei de doctorat și atingerii obiectivelor acesteia, au rezultat o serie de contribuții personale și originale privind îmbunătățirea sistemelor de protecție balistică pentru elicoptere, dintre care se subliniază:

- sistematizarea unui studiu bibliografic cu privire la structura elicopterului IAR 330 Puma Socat și la principalele materiale din construcția acestuia;
- analiza, sistematizarea și prezentarea într-o formă accesibilă a amenințărilor balistice asupra elicopterelor, caracteristicile muniției folosite împotriva acestora, precum și cerințele și soluțiile actuale de protecție balistică;
- sistematizarea și prezentarea într-o formă accesibilă a metodelor noi de analiză și de simulare numerică, cunoscute sub numele de metode fără rețea, metode bazate pe particule sau metode cu rețea liberă;
- prezentarea unor cazuri concrete și a unor modele de analiză numerică aflate în diferite condiții, concluziile fiind utile, atât în ceea ce privește modelarea, desfășurarea calculului, cât și interpretarea rezultatelor obținute în calculul numeric, arătând valabilitatea și utilitatea metodelor SPH și EFG.
- efectuarea analizei numerice a impactului normal proiectil-placă omogenă și izotropă din aluminiu, de dimensiuni 100 mm x 100 mm x 5 mm, cu o viteză a glonțului de 500 m/s, simulat prin MEF, prin metoda EFG și prin metoda SPH și compararea rezultatelor, obținându-se valori apropiate, cu erori de sub 5%;
- continuarea studiului de impact prin înclinarea proiectilului, determinarea condițiilor și studierea fenomenului de ricoșet;
- efectuarea analizei experimentale, în poligon, a unor plăci de protecție, realizate în diferite configurații, la impactul cu glonțul cal. 7,62 mm x 39 mm, fapt care a permis determinarea atât a efectelor, cât și a parametrilor dinamici ai impactului (viteza inițială și reziduală a glonțului, diametrul și aspectul găurii);
- realizarea analizei numerice a impactului prin metoda elementelor finite, utilizând softul Ansys LS-Dyna și compararea rezultatelor numerice cu cele experimentale;
- confirmarea valabilității procedurii de testare, a legilor de material și a modelului folosit și validarea modelului numeric;
- propunerea unor noi configurații de plăci de protecție balistică, având în componență aliaj de titan și efectuarea analizei numerice, rezultatele fiind foarte bune, acestea având un raport protecție/masă/cost foarte bun.

### **6.3. Viitoare direcții de cercetare**

Plecând de la conceptul de bază al acestei lucrări, care a avut ca scop proiectarea, testarea unui sistem de protecție balistică și validarea modelului numeric, în scopul dezvoltării unui blindaj pentru elicopterele militare, capabile să reziste la impactul cu glonțul cal. 7,62 mm, tema lucrării se poate direcționa ușor către analiza altor soluții constructive, care să cuprindă materiale de ultimă generație, precum Dyneema sau Tensylon.

Pe lângă aceste sisteme clasice de protecție balistică, care prezintă un raport de protecție/cost foarte bun, au apărut sisteme mai avansate de protecție din polietilenă foarte dură, denumite fibre UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene).

În același timp, prin utilizarea metodei elementelor finite, care și-a dovedit eficiența în analiza impactului, se pot studia, proiecta și analiza noi tipuri de protecție balistică, ducând la economii de timp și de material.

## BIBLIOGRAFIE

- [3] *Vlăsceanu, N.*, Rotorul principal al elicopterului, Editura Academia Tehnică Militară, 1997;
- [4] *IAR Brașov*, IAR-330 Puma Socat, Manual de instruire , vol. 1, 2, 3, Brașov 2004;
- [5] *Oprișan, C.*, Dinamica și aerodinamica elicopterelor, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași, Iași, 2015;
- [6] *Mocanu, Șt.*, Suport de curs de Rezistența Materialelor, Facultatea de Utilaj Tehnologic, 2006;
- [10] *Andreescu, I., Mocanu, Șt.*, Compendiu de Rezistența Materialelor (curs), Ed. MatrixRom, București, 2005, ISBN 973-685-869-3;
- [17] *Alămoreanu, E., Negruț, C., Jiga, G.*, Calculul structurilor din materiale compozite, U.P.B, 1993;
- [23] *Cherecheș, T., Bunea M., Bucnaru G.*, Muniții. Cartea întâi, Editura Academia Tehnică Militară, București, 1996;
- [24] *Bucnaru, G., Cherecheș, T., Axinte, T.*, Considerații privind categoria de muniție și unele noțiuni adiacente ei, a XIV-a sesiune de comunicări științifice a Academiei Navale “Mircea cel Bătrân”, Buletin, vol. I, Editura Academiei Navale, Constanța, 1995;
- [30] *Verboncu, S., Iancu, I.*, Armament de infanterie, editura Academiei Militare, București, 1982;
- [34] *FINK B.K. 2000*, Performance Metrics for Composite Integral Armor, ARL-RP-8, Aberdeen Proving Ground, Md.:Army Research Laboratory;
- [35] *Cristea, S.*, Contribuții la studiul comportării unor materiale de blindaj, la impactul cu proiectilul, Teză de doctorat, Universitatea “LUCIAN BLAGA” Sibiu, 2008;
- [42] <https://www.armadainternational.com/2017/10/suits-of-helicopter-armor/>
- [44] <https://www.quora.com/Is-the-armor-on-an-Apache-helicopter-strong>
- [50] *Năstăsescu, V., Bârsan, G.*, Metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) Editura Academiei Forțelor Terestre „Nicolae Bălcescu“, Sibiu, 2012;
- [55] *Shastri, S., Kausalyah, V.*, Effect of Ballistic Impact on Ti6Al-4V Titanium Alloy and 1070 Carbon Steel Bi-Layer Armour Panel, International Journal of Structural Integrity · March 2020;
- [56] *Liu, S., Shin, Y. C.*, Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, Materials and Design 164 (2019) 107552;
- [60] *Zhang, T., Chen, W., Guan, Y., Gao D., Li, S.*, Study on ballistic penetration resistance of titanium alloy, TC4, Part II: Numerical analysis, Chinese Journal of Aeronautics, 2013,26(3): 606–613;
- [61] *Guanfang Zhu, Chunwang Li1, Zhongping Zhang*, Model Verification for Material Parameters of Titanium Alloy Ti-6AL-4V and Steel, MATEC Web of Conferences 227, 01005 (2018);
- [65] *Adetu C., Năstăsescu V., Adetu A.E., Vlădulescu F.*, Upon Using of Plastics Layer in Light Multilayered Armor, Revista Materiale Plastice, 57 (2), 2020, pg. 265-275;
- [66] *Zhang, T., Chen, W., Guan, Y., Gao D.*, Study on Titanium Alloy TC4 Ballistic Penetration Resistance, Part I, Ballistic Impact Tests, Chinese Journal of Aeronautics 25 (2012) 388-395;
- [67] *Vijay Sekar, K. S., Pradeep Kumar, M.*, Finite Element Simulations of Ti6Al4V

Titanium Alloy Machining to Assess Material Model Parameters of the Johnson-Cook Constitutive Equation, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering · June 2011;

[68] *Adetu C., Hadăr A., Năstăsescu V., Adetu A.E.*, Numerical evaluation of the behavior of a plate on impact with a rigid projectile using Smoothed-Particle Hydrodynamics method, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXV 2022, pg. 58-64;

[69] *Lesuer, D. R.*, Experiment investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 Aluminum, Technical report, 2000;

[70] *Yancheng Zhanga, J.C. Outeirob, Tarek Mabroukic*, On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting, International Scientific Committee of the “15th Conference on Modelling of Machining Operations doi: 10.1016/j.procir.2015.03.052;

[71] *Wang, X.M., Shi, J.*, Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment. Int. J. Impact Eng. 2013; 60: 67-75;

[72] *Adetu C., Adetu A.E.*, Ballistic threats on military helicopters, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXIII 2020, pg.191-194;

[73] *Adetu C., Adetu A.E.*, Current requirements and solutions for ballistic protection of military helicopters, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXIII 2020, pg.195-200;