UNIVERSITATEA "LUCIAN BLAGA" DIN SIBIU FACULTATEA DE INGINERIE "HERMANN OBERTH" CATEDRA ȘTIINȚA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR

Ing. SORIN CRISTEA

CONTRIBUȚII LA STUDIUL COMPORTĂRII UNOR MATERIALE DE BLINDAJ, LA IMPACTUL CU PROIECTILUL

Rezumatul tezei de doctorat

Conducător științific: Prof. univ. dr. ing. VALERIU DEAC

SIBIU - 2008

Cuprins

	Teză	Rezumat
Introducere	4	4
1 Realizări și tendințe în construcția blindaielor		
masinilor de luptă	7	7
· · ·		
1.1. Conceptul de protecție în domeniul tehnicii blindate	7	7
1.2. Protecția prin blindaj	8	7
1.3. Scurt istoric al autovehiculelor blindate	11	8
1.4. Clasificarea autovehiculelor blindate	14	9
1.5. Competiția protecție prin blindaj – muniție antitanc	15	9
1.5.1. Performanțe ale munițiilor antitanc	15	10
1.5.1.1. Acțiunea muniției antitanc	16	-
1.5.1.2. Muniția antitanc pentru armamentul principal	17	-
1.5.1.3. Rachete antitanc dirijate	20	-
1.5.1.4. Rachete sol – sol	21	-
1.5.1.5. Rachete aer – sol	21	-
1.5.2. Arme antitanc aflate în studiu	21	10
1.6. Solutii constructive de blindaje	23	11
1.6.1. Blindaje pentru autovehicule usoare si grele	24	12
1.6.2. Blindaje omogene	25	12
1.6.3. Blindaje stratificate (neomogene)	27	12
1.6.3.1. Blindaie stratificate, în pachet omogen		-
1.6.3.2. Blindaie stratificate, în pachet neomogen		-
1.6.3.3. Blindaie cu plăci alunecătoare		-
1.6.4. Blindaje spatjale		13
1.6.5. Blindaje reactive		13
1.6.6. Tendinte în construcția blindaielor		-
1.7. Materiale pentru blindaie		13
1.8 Elemente de calcul a blindaielor	36	16
1.8.1. Fenomenul de penetrare a blindaiului, la impact		-
1.8.2 Relatii de calcul a blindaielor	41	17
1.8.3. Aplicatii software destinate modelării și simulării		- /
fenomenelor din domeniul mecanic	43	18
1.8.4. Aplicatii software destinate modelării comportării		10
materialelor, pe baza structurii acestora		18
1.9. Concluzii. Obiective ale cercetării	46	-

asupra efectului Hopkins și asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj	49 49
 modernizare a protecției prin blindaj 4.1. Moduri de penetrare a blindajului 4.2. Cercetări asupra relevanței și utilității relațiilor experimentale de calcul a blindajului 2.2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului 2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale 2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 	49 40
 Moduri de penetrare a blindajului Cercetări asupra relevanței şi utilității relațiilor experimentale de calcul a blindajului 2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului 2.2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului 2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale 2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 3.1. Fronturi de undă 3.2.2.2. Tensiuni în frontul de undă 3.3. Definirea funcțiilor de scop 3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 	10
 Cercetări asupra relevanței și utilității relațiilor experimentale de calcul a blindajului	47
 de calcul a blindajului 2.2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului 2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale 2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 	
 2.2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului 2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale 2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 	53
 2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale	53
 2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	55
 parametru experimental 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	
 2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un singur parametru – studii de caz	57
dependente de un singur parametru – studii de caz	
 2.2.2.3. Analiza relațiilor dependente de mai mulți parametri experimentali	59
 experimentali	
 2.2.2.4. Analiza funcției Tomson	62
 3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	62
 Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică	
 2.3.1. Fronturi de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	65
 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.2. Tensiuni în frontul de undă 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	65
 2.3.2. Pensitin in nontar de didal 2.3.3. Definirea funcțiilor de scop 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	70
 2.3.4. Studiu de caz 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	72
 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj	74
 4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	, .
a protecției prin blindaj 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de	
 2.4.1. Modelul de evaluare TASCFORM 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate 2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de 	78
 2.4.2. Modelul TASCFORM – ARMOUR pentru blindate	78
2.4.3. Modelul de Evaluare a Tancurilor (MET) elaborat de	79
Academia Tehnică Militară	80
2.4.4. Studiu de caz	81
.5. Concluzii	82
Modelarea în element finit a fenomenului de impact,	
cu aplicarea unor condiții experimentale	85
1 Metoda elementelor finite	85
2 Analiza anlicatiilor disponibile. Caracteristicile si performantele	00
anlicatiei utilizate	86
3 Stabilirea modelului	88
4 Algoritm și particularități de calcul	90
5 Rezultate obtinute	91
6 Concluzii	10

4. Cercetări experimentale privind impactul unei plăci	
de blindaj cu un penetrator cinetic122	48
4.1. Condiții de desfășurare a cercetării experimentale	49
4.2. Analiza dimensională și macroscopică a zonei de impact 124	50
4.3. Evaluarea relevanței unui control radiografic la recepția	
tablelor de blindaj137	54
4.4. Analiza metalografică a zonei de impact	56
4.5. Studiul microdurității în zona de impact	60
4.6. Studiul fisurilor identificate în zona de impact	61
4.7. Considerații asupra fenomenului de fisurare la impact, prin	
studierea fisurilor identificate și aplicarea teoriei fractale 153	65
4.7.1. Elemente teoretice privind ruperea metalelor	-
4.7.2. Elemente de teorie fractală	65
4.7.3. Studiu de caz: determinarea dimensiunii fractale a unei	
fisuri identificate, produsă la impactul unei table	
de blindaj cu un penetrator cinetic	66
4.8. Concluzii rezultate din cercetările experimentale161	69

5. Considerații și concluzii finale, contribuții originale. Direcții de valorificare și dezvoltare a rezultatelor cercetărilor

5.1. Considerații și concluzii finale	71
5.2. Contribuții originale	76
5.3. Direcții de valorificare și dezvoltare a rezultatelor	
cercetărilor173	78

Bibliografie		80
Anexe		-
Anexa 1	Glosar de prescurtăriI	-
Anexa 2	Începuturile tehnicii blindate VI	-
Anexa 3	Tancuri participante la cel de Al Doilea Război Mondial VIII	-
Anexa 4	Transportoare blindate de trupe și autovehicule	
	blindate ale infanterieiX	-
Anexa 5	Tabele cu valori numerice obținute prin modelare	
	În element finitXII	-
Anexa 6	Exemple de valori numerice obținute experimental XXIV	-

Introducere

La începutul mileniului, o evaluare a conflictelor desfășurate sau în curs de desfășurare scoate în evidență noile orientări privind acțiunile militare. Astfel, acestea sunt caracterizate de mobilitate, dinamism, și utilizarea tehnologiilor de ultimă oră [149].

Forțele angajate, cel mai adesea profesionalizate, desfășoară acțiuni intr-un câmp de luptă integrat, extins pe fronturi discontinue, împotriva unor grupări militare, paramilitare sau teroriste. Astfel, adeseori dispar diferențele între înaintea/înapoia aliniamentului de contact, acțiunile fiind deosebit de dinamice, cu o durată mică de pregătire, cu un grad ridicat de angajare a forțelor și urmărind limitarea capacității de ripostă a inamicului.

Câmpul de luptă al viitorului este caracterizat de sisteme de armament automatizate, de o coordonare integrală a tuturor categoriilor de forțe și de utilizarea sistemelor cibernetice care să completeze limitele fiziologice ale luptătorilor și operatorilor de tehnică. Pe acest fond, rolul tehnicii blindate, chiar dacă în istoria sa a avut si scăderi, își păstrează o poziție dominantă prin putere de foc, mobilitate și grad de protecție.

Practic, **istoria tehnicii blindate este o istorie a competiției proiectil/blindaj.** Astfel, deși întotdeauna au existat piese de artilerie, muniții sau mine capabile să distrugă blindatul, deși adesea acesta a fost declarat ca inutil și perimat, niciodată nu s-a renunțat la el. Deci, *mijloacele blindate rămân cele mai eficiente arme ale forțelor terestre, realizând o "combinație unică de forță de asalt și de forță de rezistență pe poziții fixe"* [149].

Integrarea României în structurile militare europene și nordatlantice, ne obligă la alinierea nivelului tehnic al blindatelor la cel al altor armate ale alianțelor. Dar, în această etapă de *reorientări*, de *reașezări conceptuale*, de *restructurări* ale forțelor, aspectele prioritare devin administrarea mai inteligentă, comunicațiile avansate, software-ul de ultimă generație și, nu pe ultimul loc, cercetarea științifică și tehnologică. Aceste "*arme"* sunt primele care, în anii care vor urma, pot garanta României un rol important pe scena politică, economică, socială și, nu în ultimul rând, militară.

În acest context creionat succint, pornind de la elementul de bază al duelului proiectil/blindaj care este impactul penetrator/placa de blindaj, lucrarea își propune ca, bazându-se pe principiile ingineriei sistemelor în modul de abordare a problemelor de impact, aplicând elementele sintezei optimale în evaluarea și integrarea rezultatelor, să scoată în evidență particularități și restricții de evaluat la proiectarea de blindaje și de materiale pentru blindaje. Astfel, lucrarea este structurată pe cinci capitole care sunt subordonate obiectivului general propus. *Primul capitol* al lucrării stabilește cadrul general actual, conceptual, istoric și constructiv, locul și rolul tehnicii blindate, dar mai ales al protecției prin blindaj. Având la bază o amplă documentare, este trecut în revistă conceptul de protecție și modul de materializare al acestuia. Amintind succint repere istorice ale tehnicii blindate, sunt tratate în detaliu amenințările existente, cu identificarea tendințelor de evoluție a acestora.

O atenție deosebită se acordă soluțiilor constructive și materialelor utilizate pentru construcția blindajului. Abordând fenomenul de penetrare, a devenit necesară evaluarea elementelor de calcul a blindajelor și a tendințelor acestora.

Ca urmare a rezultatelor obținute în etapa de evaluare a nivelului actual al cunoașterii în domeniul protecției prin blindaj și al blindajului, în *capitolul al doilea* sunt prezentate investigații teoretice ale unor elemente caracteristice identificate. Astfel, se face o analiză comparativă a relațiilor experimentale din literatura de specialitate, în scopul identificării nivelului de utilitate al acestora, prin prisma datelor care însoțesc publicarea lor.

Tot aici, apreciindu-se că *fenomenul Hopkins* este un factor de risc major pentru o tablă de blindaj, acesta este investigat cinematic și se stabilesc funcții de scop pentru evaluarea și, ulterior, evitarea lui.

De asemenea, este investigată valoarea gradului de protecție asigurat de blindaj în cadrul valorii tactice a unei arme, utilizând o metodă recunoscută de evaluare a capabilității tehnicii. Obiectivul îl reprezintă identificarea de argumente pentru balanțele cercetări teoretice/cercetări experimentale și reproiectare/ modernizare, ceea ce ne permite stabilirea direcției celei mai probabile a derulării, în viitor, a cercetărilor în domeniu.

Capitolul al treilea reprezintă etapa de elaborare și realizare a unui model pentru prelucrarea în element finit a fenomenului de impact. Elementul de particularitate îl reprezintă utilizarea unor date de calcul ce pot fi aplicate experimental. După validarea modelului, sunt analizați parametrii a căror măsurare experimentală ar necesita aparatură de înaltă precizie și deci, deosebit de scumpă.

Cel de-*al patrulea capitol* prezintă pe larg modul de desfășurare a testării unor table de blindaj prin tragere reală, în poligon, și rezultatele obținute. Conform principiilor sintezei optimale care presupun ca un prim pas stabilirea mai multor criterii de evaluat, investigarea zonei de impact s-a realizat macroscopic, radiologic, metalografic și prin studiul câmpurilor de microduritate. Ca urmare a identificării unor fisuri în zona de impact, acestea au fost analizate în raport de modul în care au traversat structura, cu sau fără traversarea grăuntelui cristalin.

Datele obținute experimental au permis abordarea problematicii fisurării prin prisma *teoriei fractale*. Astfel, este evaluată o metodă de determinare a dimensiunii fractale a unei fisuri și se identifică restricții și particularități ale unei astfel de abordări. *Ultimul capitol al lucrării* prezintă în mod sistematizat concluziile rezultate în urma cercetărilor prezentate în capitolele anterioare. De asemenea, sistematizează elementele care se constituie în contribuții ale autorului la domeniul abordat.

O particularitate a acestui capitol o reprezintă faptul că, analizând cadrul general conceptual al problematicii fisurării materialelor metalice, în particular a tablelor de blindaj, rezultatele obținute prin analiza teoretică, prin modelare în element finit și prin cercetările experimentale, creionează direcții de abordat, restricții și particularități de interpretare care se apreciază că pot duce mai departe cunoașterea domeniului.

La final, mulțumesc pe această cale domnului **prof.univ.dr.ing. Valeriu Deac** pentru tot sprijinul acordat pe parcursul documentării, a desfășurării cercetării și elaborării lucrării, pentru sfaturile, îndrumările și încrederea acordată, pentru răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă, pentru modul în care m-a călăuzit în ceea ce am realizat.

De asemenea, aduc mulțumiri membrilor *Catedrei de Știința și Tehnologia Materialelor* a Facultății de Inginerie a Universității "Lucian Blaga", pentru sprijinul acordat privind accesul la laboratoare și aparatură, pentru observațiile constructive și obiective. Pentru sprijinul acordat în realizarea cercetărilor experimentale, mulțumesc Serviciului CTC și Comisiei Militare de Recepție a *Întreprinderii Mecanice Moreni*. Pentru ajutorul acordat în desfășurarea cercetărilor teoretice aduc mulțumiri domnilor *prof.univ.dr.ing*. *Cherecheş Tudor*, *conf.univ.dr.ing*. *Gheorghian Sorin, conf.univ.dr.ing*. *Pleşanu Toma și domnului prof.univ.dr.ing*. *Popa Mircea Virgil*.

Capitolul 1.

Realizări și tendințe în construcția blindajelor mașinilor de luptă

Protecția luptătorilor constituie o preocupare permanentă a fabricanților de arme. Pe parcursul evoluției societății, protecția luptătorilor s-a realizat prin haine din piei mai dure, urmate de scutul din piele, din lemn, din lemn acoperit cu placă metalică subțire sau zale metalice și scutul din metal.

Dacă luptătorul era protejat de scut, coif sau armură, tehnica de luptă era apărată de construcții din lemn sau din lanțuri de scuturi purtate de luptători.

Protecția tehnicii blindate a fost apreciată inițial [3, 108, 119, 192] ca fiind reprezentată de totalitatea aptitudinilor autovehiculului de a rezista la agresiuni executate cu o gamă largă de mijloace, la acțiunile diverselor muniții (mine, grenade), a armelor de nimicire în masă, și de a asigura echipajului condiții corespunzătoare de ducere a luptei.

1.1. Conceptul de protecție în domeniul tehnicii blindate

În prezent, în domeniul tehnicii blindate, *protecția* este definită ca fiind ansamblul măsurilor constructive și tactice care urmăresc evitarea descoperirii tehnicii de către inamic, evitarea lovirii acesteia prin mobilitate sau prin mijloace active de ascundere și apărare și, în cele din urmă, supraviețuirea acesteia după lovirea de către mijloacele inamicului.

1.2. Protecția prin blindaj

Practic, blindajul este considerat ca fiind ansamblul de plăci metalice destinate să asigure protecția împotriva gloanțelor, a proiectilelor inamicului sau schijelor acestora.

Pe parcursul evoluției conceptului, protecția prin blindaj s-a materializat în următoarele forme:

- protecția *totală*;
- protecție *globală*;
- protecție *diferențiată*;
- protecție generală.

În prezent, mai ales în scopul asigurării unei anumite capacități de supraviețuire, nu se mai pune problema realizării doar a unor blindaje invulnerabile prin caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor sau prin soluția constructivă a plăcii de blindaj. Posibilitatea realizării unor *blindaje active* sugerează capacitatea asigurării unei protecții totale a tancului, nu doar datorită rezistenței mecanice a unor blindaje, ci și datorită unor contraacțiuni declanșate împotriva elementului atacator.

Protecția diferențiată prin blindaj ține seama de densitatea probabilă a atacurilor executate împotriva anumitor suprafețe expuse, de probabilitatea de lovire și de probabilitatea tactică de executare a unor agresiuni din anumite direcții, cu anumite categorii de armament. Se definește astfel noțiunea de grad de protecție, aceasta punând în legătură un anumit tip de agresiune, cu o anumită suprafață a autovehiculului blindat. Apar termenii de protecție frontală, laterală, posterioară, la atacul aerian, împotriva elementelor explozive plantate în sol.

Protecția tehnicii blindate, raportată la suprafețele expuse, a stat la baza unei strânse colaborări între constructorii de tehnică și tacticieni, colaborare materializată în modificări majore a modului de elaborare a algoritmilor de colaborare dintre arme și, în mod special, a modului de pregătire și sprijinire a acțiunilor tehnicii blindate.

1.3. Scurt istoric al autovehiculelor blindate

Se spune adeseori că *utopiile fac istoria* [9]. Aceste cuvinte sunt foarte bine ilustrate de istoria autovehiculelor blindate. La sfârșitul secolului al XIX-lea, când motorul cu aburi a fost înlocuit de motorul cu benzină, mai puternic, ideea construirii de vehicule blindate, vehicule care să asigure protecția unui trăgător printr-o placă metalică, a trecut de la utopie la realitate.

Astfel, putem discuta despre *autovehicule blindate atunci când autovehiculul este echipat cu plăci metalice care oferă echipajului protecție împotriva gloanțelor de mitralieră sau a proiectilelor de tun.*

Primul astfel de vehicul a fost desenat în anul 1896 de către E.J. Pennington. Cu patru roți protejate cu plăci metalice de blindaj și echipat cu mitraliere, acest proiect nu a fost realizat niciodată [34]. Doi ani mai târziu, în 1898, la Richmond, F.R. Simms prezintă un cvadriciclu echipat cu o mitralieră Maxim și cu motor De Dion-Bouton. Trăgătorul este protejat de o placă din oțel. Acest cvadriciclu este considerat primul vehicul blindat [34].

Primul tanc recunoscut de literatura de specialitate rămâne însă cel conceput de către colonelul englez Ernest Swington spre sfârșitul anului 1914. Propunerea lui nu a găsit însă audiență în rândul militarilor și, abea la 2 februarie 1916 a fost prezentat Ministerului de Război britanic un prototip. Impresionați de această realizare, cei prezenți promovează ideea și sunt comandate primele 150 de bucăți. Numele cu care a fost botezat tancul a fost *Litlle Wilie* dar, pentru a putea fi o surpriză pentru spionajul inamic la momentul apariției pe câmpul de luptă, s-a

hotărât ca acest tip de tehnică să fie construit sub denumirea conspirativă de *tank* - cazan pentru locomotivele cu aburi.

La data de 15 septembrie 1916, primul tanc își face apariția pe câmpul de luptă în cadrul bătăliei de pe râul Somme. Prima luptă în care tancurile au luat parte într-un mod masiv a avut loc pe 20 noiembrie 1917 la Cambrai când, prin utilizarea a 378 de tancuri, apărarea a fost ruptă pe un front de 16 kilometri și o adâncime de 9 kilometri, fiind capturați 8000 de prizonieri și 100 de tunuri. Acesta a fost un prim succes pentru noul tip de tehnică de luptă. Specialiștii militari realizează importanța acestor arme și se trece la fabricarea de noi modele.

În ceea ce privește armata României, prima comandă privind achiziționarea de tehnică blindată s-a făcut la 13 august 1916, în Franța, pentru achiziționarea a 30 de automobile blindate. La 8 septembrie 1916 armata primește cadou de la guvernul francez două automobile mitralieră, iar la 22 octombrie 1916 două autoblindate Peugeot (cu motor de 18 CP), și două Renault. Urmare a campaniei din 1916 - 1917, la începutul anului 1917 se mai achiziționează 34 de automitraliere. Prima formațiune tehnică de blindate este o companie de motomitraliere și tunuri autoblindate din cadrul *Regimentului de Tracțiune Automobilă*, înființat la 10 martie 1917.

1.4. Clasificarea autovehiculelor blindate

Tratatul cu privire la forțele armate convenționale din Europa, semnat la Paris la 19 noiembrie 1990, stabilește cinci categorii de sisteme de armament convenționale: tancuri de luptă; vehicule blindate de luptă; artilerie; avioane de luptă; elicoptere de luptă.

Totodată, documentul definește tehnica blindată astfel:

- *tancul de luptă* este vehiculul blindat de luptă autopropulsat, cu mare capacitate de foc, dispunând de un tun principal pentru foc direct, cu viteză inițială ridicată (a proiectilului), necesar pentru a angaja ținte blindate sau alte obiective, cu o mare mobilitate în orice teren, asigurând un nivel ridicat de protecție și care nu este conceput și nici echipat în mod special pentru transportul de efective de luptă;
- *vehiculul blindat de luptă* este un vehicul autopropulsat, cu protecție prin blindaj și cu capacitate de deplasare în orice teren. În această categorie sunt incluse: transportoarele blindate de trupe; vehiculele blindate de luptă ale infanteriei; vehiculele de luptă cu armament greu.

1.5. Competiția protecție prin blindaj – muniție antitanc

Generalul Bertrand (Franța) spunea [148]: "tancul a fost regele bătăliilor în cel de-al doilea război mondial. Sfârșitul dominației sale este anunțat periodic. Aceasta constituie însă o gravă eroare deoarece tehnologia actuală permite sporirea puterii și mobilității lui, concomitent cu reducerea vulnerabilității." Tehnica blindată, considerând aici toate tipurile de autovehicule cu blindaj, cu propulsie pe roți sau șenile (tancuri, autotunuri, mașini de luptă ale infanteriei, mașini de luptă pentru vânătorii de munte, transportoare amfibii blindate, tractoare blindate de evacuare, autospeciale pe carcase blindate din nomenclatura diferitelor specialități militare), reprezintă unul din factorii principali care influențează capacitatea de luptă a tuturor categoriilor de forțe ale armatei [190].

Specialiștii militari [108, 144] consideră că, atât în prezent cât și în viitor, tehnica blindată rămâne singura care îmbină într-un mod eficient puterea de foc cu mobilitatea și protecția echipajului și aparaturii.

1.5.1. Performanțe ale munițiilor antitanc

Rolul tactic important al autovehiculelor blindate de luptă, în special al blindatelor grele (tancuri), face ca acestea să fie vizate în mod deosebit pentru a fi distruse. Lupta cu blindatele se duce începând de la distanțe mari față de aliniamentul de contact, pe adâncimi de zeci și chiar sute de kilometri.

Luând în considerare distanța până la care armamentul antiblindate este eficace, acesta poate fi grupat astfel [191]:

- aruncătoare de grenade antitanc portabile: până la 500 600 m;
- arme antitanc fără recul: până la 900 1000 m;
- tunuri dispuse pe tehnica blindată, cu muniție antitanc și calibre între 90 și 125 mm: până la 3.000 – 4.000 m (cu precizie de peste 50 % la distanța de tragere prin ochire directă);
- rachete antitanc de diferite tipuri: până la 5.000 m;
- aruncătoare, tunuri și obuziere cu bătaie mare, cu proiectile de artilerie cu submuniții cu autoghidare pe ultima porțiune a traiectoriei: până la 30 – 40 km;
- rachete sol sol cu submuniții autoghidate (elemente din cadrul complexelor de cercetare lovire): până la 150 200 km.

Se poate deci concluziona că, atât în prezent cât și în viitorul previzibil, lovitura cu proiectil perforant subcalibru cu elemente detașabile și stabilizare prin ampenaj constituie și va constitui muniția de bază pentru tunurile de pe tanc. Proiectilele perforante de tip cumulativ sau cu explozivi plastici, având o putere de perforare superioară, au fost introduse în unitatea de foc a unor tancuri moderne (AMX-Leclerc, AMX-40, Leopard-2, Challenger 1 și 2, T-80) deși, după cum se afirmă în literatura de specialitate, eficacitatea acestora împotriva blindajelor stratificate recent realizate precum și împotriva blindajelor reactive (active) este redusă.

1.5.2. Arme aflate în studiu

Obiectivele aflate în atenția specialiștilor sunt realizarea unor tunuri clasice cu performanțe superioare celor existente, a muniției aferente, și realizarea unor sisteme de armament principial noi. Acestea din urmă vizează obținerea unor viteze inițiale a proiectilelor semnificativ mai mari: se are în vedere propulsia cu combustibil lichid și propulsia electromagnetică.

Ca urmare a evaluării posibilităților de sporire a performanțelor tunurilor clasice, existente pe tancurile aflate în înzestrarea diferitelor armate, s-au evidențiat următoarele direcții de perfecționare:

- sporirea eficacității la țintă a proiectilului prin creșterea energiei cinetice a acestuia;
- utilizarea de încărcături de azvârlire care să asigure presiuni ale gazelor arse apropiate de valoarea maximă admisă de soluția constructivă a țevii;
- realizarea unor tunuri cu calibre mai mari.

1.6. Soluții constructive de blindaje

Pentru clasificarea blindajelor se folosesc o serie de criterii [86].

Astfel, în funcție de comportarea la impact întâlnim următoarele tipuri de blindaje:

- blindaje *pasive*;
- blindaje active (reactive) care, la rândul lor pot fi:
 - blindaje *reactiv explozive* (BRE sau ERA);
 - blindaje *cu plăci alunecătoare*.

În funcție de soluția constructivă, blindajele pot fi:

- blindaje omogene care, în raport de tehnologia de fabricare, pot fi:
 - blindaje *turnate*;
 - blindaje *laminate*;
- blindaje stratificate:
 - în pachet omogen;
 - în pachet neomogen;
 - cu plăci alunecătoare.

În raport cu soluția de montaj pe tehnică, blindajele pot fi:

- blindaje de bază (constructive);
- blindaje *amovibile*.

Soluțiile cel mai des întâlnite în prezent sunt blindajul de bază pasiv, omogen, laminat, cu blindaj suplimentar pasiv, amovibil, stratificat în pachet neomogen, sau reactiv-exploziv, amovibil.

Blindajele participă la masa autovehiculului blindat, în medie cu 50 % [143]. Deoarece o primă direcție de mărire a gradului de protecție o reprezintă mărirea grosimii blindajelor, inițial s-a optat pentru această soluție. Creșterea greutății duce însă la creșterea vulnerabilității prin scăderea mobilității, la o aceeași putere a agregatului energetic. De asemenea, scade transportabilitatea și capacitatea de trecere. Necesitatea creșterii grosimii blindajului a dus la apariția noțiunii de blindaj echivalent.

Capitolul 1 – *Realizări și tendințe în construcția blindajelor mașinilor de luptă.*

Dacă ne raportăm la scăderile de masă și la eficacitatea globală a sistemului de armă, va trebui să ținem seama și de probabilitățile de lovire a blindatului de către armamentul advers.

Tabelul 1.2

Grosimea reală a plăcii de blindaj la grosime echivalentă 100 mm.						
Grosimea blindajului [mm]	m] 100 93.969 76.604 64.278 50					
Unghiul de incidență [⁰]	0	20	40	50	60	

Concluzia care se impune de la sine este că înclinarea plăcii de blindaj permite asigurarea unei protecții mai bune (echivalente, la aceeași grosime reală) și, prin soluția constructivă adoptată (păstrarea grosimii echivalente, deci a gradului de protecție echivalent, cu înclinarea plăcii), se poate obține o creștere a mobilității autovehiculului.

1.6.1. Blindaje pentru autovehicule uşoare şi grele

Pentru autovehiculele ușoare, blindajul de bază (constructiv, pentru cutia blindată și turelă), este destinat să asigure protecția împotriva gloanțelor armamentului de infanterie, în general până la calibrul de 12,5 mm, trase de la distanța loviturii directe, precum și protecția împotriva schijelor.

1.6.2. Blindaje omogene

Din punct de vedere cronologic, blindajele omogene au fost primele tipuri de blindaje utilizate. Cerințele impuse acestora au avut adeseori un caracter contradictoriu, încercându-se găsirea unui raport optim între:

- tenacitate, pentru a absorbi energia cinetică a proiectilului;
- duritate, pentru a sparge proiectilul sau subelementele dure ale acestuia;
- un comportament la rupere cu un pronuntat caracter ductil, pentru a nu forma schije sau fragmente de rupere în cazul perforării.

Tehnica blindată grea (tancurile), realizată până la sfârșitul celui de al doilea război mondial și chiar în primii ani postbelici, utiliza numai blindaje omogene, turnate sau laminate.

1.6.3.Blindaje stratificate (neomogene)

Blindajele neomogene sunt blindaje alcătuite din mai multe straturi. Neomogenitatea este dată, nu de structura diferită a unui material, ci de existența unor straturi de materiale diferite. Rezistența blindajului este dată atât de rezistența mecanică a materialelor, cât și de modul în care variază densitatea întregului ansamblu, altfel spus de succesiunea straturilor, dinspre exterior spre interior, pe o traiectorie probabilă a unui penetrator.

Un astfel de blindaj stratificat are în compunere materiale diferite. Acestea

pot fi:

- oțel de blindaj, omogen;
- materiale ceramice;
- materiale compozite;
- straturi de aer;
- materiale polimerice de densitate mică, cu sau fără inserții din table subțiri sau pulberi metalice;
- material plastic dur (ca ultim strat).

1.6.4. Blindaje reactive

Blindajele reactive sunt acele blindaje care, în momentul impactului penetratorului, declanșează o contraacțiune în scopul perturbării fenomenului de penetrare. Această contraacțiune constă, de regulă, în declanșarea unei explozii. O astfel de explozie are ca efect modificarea unghiului de incidență al penetratorului, uneori până la anularea totală a eficacității acțiunii acestuia.

Cunoscute ca blindaje reactiv - explozive (BRE sau ERA – Explosive Reactive Armor), au fost utilizate pentru prima dată de către armata israeliană în 1982, în cadrul operațiunii din Liban *Pace pentru Galileea*, pe tancurile M-60 A1 și Centurion. Întâlnit și sub numele de blindaj *Blazer*, blindajul reactiv exploziv a fost fabricat inițial de *Israel Military Industries* și comercializat prin *Rafael Armament Development Authority*.

Combinat cu blindajul stratificat, BRE este, deocamdată, cea mai performantă soluție de sporire a gradului de protecție prin blindaj.

1.6.5. Tendințe în construcția blindajelor

Pentru autovehiculele blindate ușoare, transportoare de trupe și mașini de luptă, se folosesc din ce în ce mai mult aliaje din materiale cu densitate mică. De asemenea, soluțiile testate până în prezent indică tendința folosirii blindajelor multistratificate de grosime mică și a maselor plastice. Creșterea gradului de protecție prin blindaj, pentru aceste tipuri de autovehicule, se realizează tot mai des prin folosirea blindajelor spațiale suplimentare, realizate cu panouri profilate, din aliaje de aluminiu, acordându-se atenție și blindajelor BRE de grosime mică.

Din materialele publicate până în prezent se poate aprecia că, pentru tehnica blindată grea - tancurile de luptă, cercetările specialiștilor se desfășoară în direcția perfecționării blindajelor stratificate, în mod special a celor în pachet neomogen.

1.7. Materiale pentru blindaje

Obținerea elementelor de protecție tip blindaj se realizează prin turnare sau laminare. După metoda de obținere, acestea sunt clasificate în *blindaje turnate* și

blindaje laminate. Până la sfârșitul celui de al doilea război mondial, blindajele au fost numai turnate. În prezent predomină blindajele laminate.

În ultimii ani, unul din producătorii importanți de plăci de blindaj laminate, firma *Swedish Steel Oxelosund AB*, comercializează plăcile de blindaj *AMOX* atât pentru blindatele ușoare, cât și pentru tancuri. Livrat mai multor țări, caracteristicile acestuia sunt funcție de comanda beneficiarului. Câteva date comerciale referitoare la blindajele AMOX sunt prezentate în tabelul 1.5.

Tabelul 1.5

Tip blindaj	Grosime [mm]	Duritate [HB]
AMOX 300 S	5 60	280 340
AMOX 400 S	5 40	400 460
AMOX 500 S	5 30	480 540
	30 50	460 520
	50 80	440 500
AMOX 560 S	10 25	530 590
	25 50	500 560
	50 100	480 540

Caracteristici dimensionale și de duritate pentru blindaje AMOX

Blindajul din plăci omogene, din oțel laminat și tratat termic, continuă să fie utilizat la un mare număr de tipuri de autovehicule blindate ușoare.

În funcție de duritatea lor, acestea se clasifică în *blindaje de duritate mică, de duritate medie* și *de duritate mare*.

Oțelurile sudabile pentru blindaje sunt, de obicei, oțeluri slab aliate și, în unele cazuri, mediu aliate. Compoziția chimică a acestor oțeluri este, în general, următoarea: 0,23...0,34 % C; 0,18...1,60 % Si; 0,30...1,60 % Mn; 0,30...2,30 % Cr; 0,15...0,38 % Mo; 0,1...3,50 % Ni.

Cele mai utilizate oțeluri sudabile, rezistente la șocuri, se prelucrează sub formă de profile, de regulă table cu grosimi de la 8 la 160 mm.

Principalele oțeluri folosite în România pentru fabricarea tablelor de blindaj, sunt notate în caietele de sarcini OB 1 ... OB 6. Compoziția chimică a acestora, așa cum o întâlnim în literatura cu acces nerestricționat [86], este prezentată în tabelul 1.7.

Tabelul 1.7

	,	3			3 - P		<i></i>	
Tin atal	Compoziție chimică [%]							
T IP Oţei	С	Si	Mn	Cr	Мо	Ni	Р	S
OB 1	0.23 0.29	1.2 1.6	1.20 1.6	0.30 0.5	0.15 0.25	Max.0.5	0.035	0.030
OB 2	0.25 0.31	0.18 0.35	0.30 0.55	1.80 2.3	0.25 0.35	Max.0.5	0.030	0.030
OB 3	0.28 0.34	0.18 0.35	0.30 0.55	1.40 1.9	0.25 0.35	1.00 1.5	0.030	0.030
OB 4	0.28 0.34	0.18 0.35	0.30 0.50	1.80 2.3	0.28 0.38	1.50 1.9	0.030	0.030
OB 5	0.27 0.33	0.18 0.35	0.30 0.50	1.80 2.3	0.28 0.38	1.80 2.3	0.030	0.030
OB 6	0.24	0.20	0.30	1.20	0.25	3.00	0.025	0.025

Compoziția a șase tipuri de oțeluri românești pentru table de blindaj.

În tabelul 1.8 sunt prezentate caracteristicile mecanice ale oțelurilor OB 2 ... OB 6.

Tabelul 1.8

	R _{p 0,2}	R _m	Α	Z	KCU		
Tip oțel	[daN /	' mm ²]	[%]		[daJ / cm ²]	HB	HRC
OB 2	100	110	15	55	612	285341	28.3 35.0
OB 3	70110	105120	1015	3050	911	285341	28.3 35.0
OB 4	90110	100120	1215	4555	711	285341	28.3 35.0
OB 5	90110	105115	1215	2425	1014	285341	28.3 35.0
OB 6	7478	9194	17.5	3439	56	262311	24.8 31.5

Caracteristicile mecanice ale oțelurilor OB 2 ... OB 6

Aceste oțeluri se pot durifica prin tratament termic (călire și revenire), obținându-se durități de 28 ... 35 HRC . Durități mai mari se pot realiza prin ecruisarea materialului prin explozie. Acest procedeu prezintă avantajul că se poate aplica numai pe suprafețele care prezintă interes tehnologic sau funcțional, la un preț de cost relativ mai redus decât cel al tratamentului termic.

Prima realizare a unui *blindaj din aliaj pe bază de aluminiu* aparține firmei *Kaiser Aluminium & Chemical Corporation* – SUA. Acesta a fost produs la comanda firmei *FMC Corporation*, firmă care și-a înscris ca realizare de pionierat fabricarea transportorului blindat M-113, transportor utilizat pe scară largă și în prezent, cu modernizările inerente. Blindajul transportorului M-113 este realizat din aliaj de Al – Mg – Mn (aliaj 5083). Acest aliaj s-a dovedit mai eficace împotriva schijelor decât blindajul laminat, omogen, din oțel. Datorită durității de 75 HB, acest blindaj este mai puțin eficace împotriva gloanțelor cu viteză mare.

Protecția antiglonț slabă a acestui aliaj a dus la apariția aliajelor din seria 7000, aliaje Al – Zn – Mg. Dintre acestea putem aminti: aliajul 7039, aliaj produs de firma *Aluminium Company of America* – ALCOA, aliajul 7017 produs de firma *ALCAN* – Anglia și aliajul 7020 produs de *Pechine* - Franța. Eficacitatea masică a cestor aliaje, la agresiunea gloanțelor perforante calibrul 7,62 mm, la impactul normal pe blindaj, atinge valoarea de 1,4 în primul rând datorită durității lor (duritate care ajunge la 150 HB). Utilizarea aliajelor din seria 7000 a dus la importante reduceri de masă, la același grad de protecție asigurat.

Utilizarea asociată a două materiale diferite a dus, începând cu anii 1960, la realizarea blindajelor stratificate. Materialele utilizate au fost: oțel de duritate mare la exterior și aliaj de aluminiu la interior. Ulterior, s-a trecut la utilizarea de *materiale ceramice* ca strat exterior dur, destinat spargerii proiectilelor în momentul impactului, și suport de material tenace la interior, necesar pentru a absorbi energia cinetică a proiectilului. Cu durități între 2000 și 3000 HV, materialele ceramice au o eficacitate masică ce depășește valoarea 2,0 în raport cu oțelul, evaluată la agresiunea gloanțelor perforante de calibru 7,62 mm.

Alte materiale, care se folosesc din ce în ce mai frecvent la realizarea blindajelor stratificate, sunt *materialele compozite*. Acestea sunt:

- compozite structurale, cu matricea din rășini epoxidice armate cu fibre de sticlă și fibre de carbon (au avantajul unei greutăți reduse cu 30 – 50% față de oțel);
- compozite carbon carbon, cu matricea din grafit, armată cu fibre de carbon structurate în țesături (prezintă avantajul unei comportări foarte bune la temperaturi ridicate);
- compozite ceramică ceramică, cu matrice executată din amestecuri de carburi, nitruri, boruri, sau fibre de carbon (au avantajul unei greutăți reduse); spre exemplu, la utilizarea oxidului de aluminiu, greutatea unei plăci de blindaj se reduce, față de cazul utilizării oțelului, cu până la 55 % la același grad de protecție, deci se obține o eficacitate masică de până la 2,2.

Pentru blindajele spațiale se folosesc table subțiri din oțeluri slab aliate sau din aliaje de aluminiu.

În construcția autovehiculelor blindate ușoare, transportoare de trupe și mașini de luptă, se folosesc din ce în ce mai mult aliaje din materiale cu densitate mică. Soluțiile testate până în prezent indică tendința folosirii blindajelor multistratificate de grosime mică și a maselor plastice. Creșterea gradului de protecție prin blindaj, pentru aceste tipuri de autovehicule, se realizează tot mai des prin utilizarea blindajelor spațiale suplimentare, blindaje realizate cu panouri profilate, din aliaje de aluminiu, acordându-se atenție și blindajelor BRE de grosime mică.

Referitor la materiale, se tinde spre **extinderea utilizării uraniului sărăcit**, atât pentru muniții, cât și pentru blindaje. Dacă până în prezent s-a urmărit folosirea de materiale cu densitate mică, în scopul reducerii masei autovehiculului echipat de luptă, utilizarea uraniului sărăcit (material cu densitate de cca 2,5 ori mai mare decât a oțelului) are în vedere și *capacitatea unui blindaj cu uraniu de a absorbi radiațiile neutronice și ale exploziei nucleare*.

1.8. Elemente de calcul a blindajelor

Știind că efectul perforant este dependent de energia cinetică a proiectilului și de dimensiunile sale, puterea de perforare este bine exprimată de legea lui *de Marre* [10]:

$$V_p = k \cdot \frac{d^{0,75} \cdot e^{0,7}}{m_p^{0,5}}$$
(1.2)

unde:

 V_p = viteza de impact a proiectilului; d = calibrul proiectilului; e = grosimea tablei de blindaj;

 m_p = masa proiectilului;

 k = factor care exprimă proprietățile materialului proiectilului și ale tablei de blindaj.

Se observă că puterea de perforare, exprimată prin grosimea tablei de blindaj *e*, se poate crește sporind viteza de impact a proiectilului. Acest lucru este limitat deoarece presupune creșterea vitezei la gura țevii, deci creșterea performanțelor gurii de foc.

Pentru studiul impactului proiectil – blindaj, la viteze mici, de până la 1.500 m/s, trebuie avut în vedere, în primul rând, mecanismul perforării aerodinamice, dar și elemente ale mecanismului perforării în zona domeniului de trecere de la perforarea aerodinamică la perforarea hidrodinamică (domeniile I și II conform figurii 1.8.).

1.8.2. Relații de calcul a blindajelor

Un model matematic pentru studiul acțiunii proiectilului asupra blindajului, trebuie să furnizeze rezultate cât mai exacte referitoare la:

- adâncimea de perforare;
- viteza rămasă a proiectilului în cazul unei perforări complete;
- durata perforării;
- capacitatea unui anumit proiectil de a străpunge un blindaj, în condiții date.

Complexitatea fenomenelor care se produc la impactul proiectil-blindaj rezultă din multitudinea de procese care au loc la nivelul structurii materialului, însoțite, de regulă, de creșteri însemnate ale temperaturii într-un timp extrem de scurt. Această comportare a blindajului la impact, implică un model de calcul cu un grad sporit de generalitate, *model care să permită analiza stării spațiale de deformații și tensiuni ce apare în corpul plăcii de blindaj*.

Deoarece fenomenele de impact dintre proiectil și blindaj sunt fenomene tranzitorii (nestaționare), însoțite de viteză, de transfer termic, de deformații elastoplastice sau de curgeri hidrodinamice, o formulare matematică exactă a problemei conduce la un model matematic tridimensional, model care introduce (sub forma lor cea mai generală), ecuațiile de conservare din mecanica mediilor continue.

În plus, la acest sistem de ecuații se mai adaugă:

 o ecuație de stare care definește comportarea materialelor la compresiune și întindere, ținând cont de deviatorii de tensiune, de influența ecruisării și a vitezei de deformație; criterii specifice, pe de o parte de tranziție elasto-plastică (criteriul Von Mises sau criteriul lui Tresca), și pe de altă parte, condiții de ecruisare și respectiv de propagare a fisurilor.

Astfel, legile de conservare din mecanica mediilor continue, cu neglijarea fenomenelor de conducție termică, se scriu în raport cu timpul astfel: [10, 167]

- conservarea masei:
- conservarea cantității de mișcare:
- conservarea energiei totale:

La aceste ecuații se adaugă legile de comportament ale materialului, legi care, în spațiu, adaugă sistemului nouă ecuații cu nouă necunoscute.

Se obține astfel un sistem de 14 ecuații cu 14 necunoscute:

Rezolvarea acestui sistem de ecuații diferențiale depinde în mare măsură de modul în care se explicitează legea de variație a caracteristicilor materialului, și de *criteriile specifice pe baza cărora se stabilesc condițiile matematice ce exprimă tranziția elasto-plastică, ecruisarea și propagarea fisurilor.*

1.8.3. Aplicații software destinate modelării și simulării fenomenelor din domeniul mecanic

Ca în orice domeniu tehnic, utilizarea modelării și simulării este elementul care permite stabilirea de soluții constructive cu reducerea semnificativă a cercetărilor experimentale, deci și a costurilor de proiectare.

Încercarea de a trece în revistă aplicațiile realizate pentru modelarea fenomenelor aparținând diverselor domenii și specialități, ne aduce în contact cu un spectru larg de abordări.

1.8.4. Aplicații software destinate modelării comportării materialelor, pe baza structurii acestora

La nivel de material observăm (în special în ultimele trei decenii), o tendință de schimbare a opticii privind abordarea comportării acestuia [96, 100]. Această schimbare implică un nivel sporit de complexitate prin prisma abordării sinergetice a materialului. Direcția este impusă de dezvoltarea unor materiale noi, cu performanțe net superioare materialelor utilizate pe scară largă în prezent. *Realizarea materialelor compozite, stratificate, cu structuri neomogene controlate, armate cu materiale nemetalice, a dovedit că abordarea prin evaluarea grosieră a proprietăților mecanice (elasticitate, duritate, tenacitate, rezistențe etc.) este*

Capitolul 1 – *Realizări și tendințe în construcția blindajelor mașinilor de luptă.*

insuficient de relevantă, și cu un grad insuficient de certitudine privind comportarea în exploatare.

Astfel, specialiștii s-au orientat spre abordări care vizează nu doar mecanica ruperii, teoria plasticității etc., ci și *interacțiunile sinergetice* dintre acestea [38, 97]. Un prim exemplu al importanței ce se acordă domeniului îl regăsim în Synergy Ceramics Projects, [S. Kanzaki, M. Shimada, K. Komeya, A. Tsuge – *Recent progress in the synergy ceramics project*, Kez Eng Mater, pp. 161-163, 437-442, 1999], dezvoltate de câteva universități și firme japoneze. Necesitatea acestei abordări o reprezintă faptul că mecanismul fizic al comportării materialelor nu mai poate fi analizat cu modelele simple, existente în prezent, ci necesită modelări și simulări ale interacțiunilor dintre fenomene, la diferite scări [38]. Se poate remarca faptul că, indiferent de nivelul de abordare, baza o reprezintă analiza în element finit (FEA). Se încearcă și o abordare la nivel nanometric, dar acesta nu are încă suport într-o aplicație recunoscută. Elementele de particularitate pentru toate aceste noi modele, sunt condițiile la limită și modul de abordare a omogenității structurale a materialelor studiate.

Perfecționând modelul pentru analiza materialelor multifază prin MEF, aplicația ABAQUS, provenită din LASTRAN, a fost transformată pentru analiza eforturilor locale pentru structuri reale cu carburi, în aplicația CRACKAN. Rămasă însă de bază, ABAQUS a fost utilizată cu modelul VCFEM - Voronoi Cell Finite Element Model (fiecare poligon conține o incluziune care este utilizată ca element finit), și a corelat rezultatele experimentale prin analiza micrografiilor cu VDC - Verborde and Digit Codes.

Se pare că, în prezent, cea mai nouă aplicație orientată pe subiect, în zona analizei în element finit, o reprezintă OOFEA - Object – Oriented Finite Element Analysis [Carter,W.C., S.A. Langer, jr. E.R. Fuller – The OOF Manual, version 1086, 2000 (www.ctcms.nist.gov/oof/download/manual/manual.html)], dezvoltată pe platforma C++ [38]. Această aplicație realizează discretizarea pe baza imaginii unei microstructuri, și simulează deformările termice în domeniul elastic pe baza structurii reale.

Capitolul 2

Investigații asupra evaluării penetrabilității unui blindaj, asupra efectului Hopkins și asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj

2.1. Moduri de penetrare a blindajului

Pentru a putea face evaluări pertinente asupra impactului proiectil / blindaj și asupra modului de străpungere a unei plăci de blindaj, este importantă detalierea fenomenelor care se produc în cazurile penetrării acesteia de către proiectilul cumulativ, de către proiectilul exploziv și de către proiectilul cinetic.

A) La penetrarea plăcii de blindaj de către jetul cumulativ, se poate aproxima adâncimea de perforare a jetului cumulativ cu ajutorul relației lui Bernoulli din dinamica fluidelor:

$$P = L \cdot \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_b}} \tag{2.0}$$

unde:

P = adincimea de penetrare [mm];

L = lungimea jetului [mm] ;

 ρ_j = densitatea jetului [g/cm³];

 ρ_b = densitatea materialului tablei de blindaj [g/cm³].

Din relația (2.0) se observă că, cu cât densitatea materialului jetului este mai mare în raport cu cea a materialului blindajului, cu atât puterea de penetrare este mai mare. Dacă luăm în calcul faptul că materialul care formează jetul este necesar să fie și ductil, putem face observația că ar fi avantajos ca încărcătura să fie din aur sau platină. Cum însă prețul acestora este mare, cel mai frecvent se utilizează cuprul de înaltă puritate. La acest mecanism al procesului de străpungere a plăcii de blindaj se poate remarca faptul că *adâncimea de penetrare nu este dependentă de unghiul de impact*. Aceasta poate fi însă redusă dacă forma pâlniei este afectată de impactul cu diverse materiale înainte de detonarea încărcăturii explozive, impact ce are ca rezultat imposibilitatea formării unui jet cu parametrii corespunzători de formă și viteză. La trecerea dintr-un mediu cu o anumită densitate în unul cu o densitate diferită, continuitatea jetului este afectată dacă aceasta din urmă este semnificativ mai mică decât densitatea primului mediu. Deci, puterea de penetrare este diminuată de suprafețele de separație dintre medii cu densități mult diferite.

Este de remarcat faptul că mijloacele de luptă împotriva unei lovituri cumulative nu sunt deosebit de complexe și beneficiază de avantajul posibilității folosirii unor materiale de densitate mică, ieftine.

C) Pentru proiectilul cinetic evaluarea fenomenului perforării unei plăci de blindaj presupune o analiză a următoarelor fenomene:

- propagarea undelor de eforturi în corpul proiectilului și al blindajului;
- exfolierea plăcii de blindaj pe suprafața opusă perforării;
- mișcarea oscilatorie a plăcii de blindaj;
- realizarea penetrării plăcii de blindaj în zona de contact direct dintre proiectil și placă (prin deformări plastice urmate de ruperi).

Situațiile prezentate mai sus demonstrează complexitatea fenomenelor care au loc la impactul penetrator – blindaj, complexitate rezultată din multitudinea de procese care au loc la nivelul structurii materialului, al rețelei sale cristaline, însoțite de regulă de creșteri însemnate ale temperaturii într-un interval de timp extrem de scurt. Pentru studiul acestor fenomene, abordările teoretice existente sunt diferențiate prin scara la care operează. Pentru fiecare dintre aceste scări, aparatul matematic necesar pentru evaluări analitice crește în complexitate pe măsura profunzimii intimităților studiate și, totodată, crește complexitatea și sensibilitatea aparaturii de experimentare necesare.

2.2. Cercetări asupra relevanței și utilității relațiilor experimentale de calcul a blindajului

Pentru determinarea capacității de rezistență la impact a unei plăci de blindaj, studiile întreprinse pe plan mondial au urmărit evaluarea și calculul următorilor parametri:

- adâncimea de perforare;
- viteza rămasă a penetratorului, în cazul unei străpungeri complete;
- timpul de străpungere;
- capacitatea penetratorului de a străpunge o placă cu caracteristici cunoscute, în condiții de experimentare date.

2.2.1. Relații experimentale de calcul a blindajului

Ca urmare a testelor prin tragere reală, în poligoane, corelate cu rezultatele focului executat în diverse conflicte regionale, s-a stabilit că un penetrator dat are comportament diferit în raport cu viteza la momentul impactului și cu suma caracteristicilor fizico-mecanice ale materialelor plăcii țintă și penetratorului. În literatura de specialitate [58, 106, 115] întâlnim referiri la încercări de stabilire a mai multor relații experimentale de determinare a adâncimii de penetrare. Câteva dintre acestea sunt prezentate în tabelul 2.1.

Notațiile folosite au următoarele semnificații:

- b = adancimea de perforare;
- d = diametrul (calibrul) penetratorului;
- m = masa penetratorului;
- V = viteza de impact a penetratorului cu placa de blindaj;
- V_L = viteza limită pentru a produce perforarea;
- V_r = viteza rămasă a penetratorului;
- ρ = densitatea materialului plăcii de blindaj;
- h = grosimea plăcii de blindaj;
- c = volumul craterului produs în placă;
- θ = unghiul de înclinare a plăcii de blindaj;
- $F(e/d, \theta) =$ funcția lui Thomson;

 $a_1, ..., a_8, \alpha, \beta, \gamma, \zeta$ = parametrii experimentali (constante de caz).

Relatii experimentale de calcul a blindajului.

Tabelul 2.1

Nr. crt.	Denumirea relației	Relația de calcul
1	Ecuația fundamentală a blindajului	$\frac{b}{d} = a_1 \cdot m \cdot \frac{V^2}{d^3} \tag{2.1}$
2	Milne de Marre	$\frac{b}{d} = a_2 \cdot \left(\frac{m \cdot V^2}{d}\right)^{0.6993} \tag{2.2}$
3	Dideon	$\frac{b}{d} = a_3 \cdot \rho \cdot \ln(1 + a_4 \cdot V^2) (2.3)$
4	Jacob de Marre	$m \cdot V_L^2 = a_{5.} \cdot d^{1.5} \cdot h^{1.4}$ (2.4)
5	Helie	$c = a_6 \cdot \frac{m \cdot V}{2} \tag{2.5}$
6	Grabarek	$\frac{m \cdot V_L^2}{d^3} = a_7 \cdot \left(\frac{h \cdot \sec\theta}{d}\right)^{\alpha} \qquad (2.6)$
7	Thor	$V - V_r = a_8 \cdot h^\beta \cdot m^\gamma \cdot V^\zeta (2.7)$
8	Ecuația flotei maritime americane	$F\left(\frac{e}{d},\theta\right) = m^{0.5} \cdot V_L \cdot \frac{\cos\theta}{e^{0.5} \cdot d} \qquad (2.8)$

2.2.2. Prelucrarea relațiilor experimentale

Pentru a analiza relevanța și utilitatea relațiilor experimentale prezentate în tabelul 2.1, facem următoarele ipoteze:

- penetratorul este reprezentat de un proiectil inert;
- penetratorul este de construcție normală, din oțel cu densitatea de $\rho_p = 7,81 \text{ g/cm}^3$;
- viteza de impact este mică, având valori de până la 900 m/s (armament și muniție clasică).

Din relațiile (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) și (2.6) determinăm adâncimea de perforare.

• Pentru relația (2.7) se consideră:

h = b (grosimea plăcii egală cu adâncimea de penetrare) (2.12) $V_r = 0$ (viteza rămasă a penetratorului, după perforare este nulă) (2.20) Relatia devine:

$$V = a_8 \cdot b^\beta \cdot m^\gamma \cdot V^\zeta \tag{2.21}$$

• Pentru relația (2.8) considerăm:

 $\theta = 0$ (incidența penetratorului pe direcția normalei la suprafață)

(2.16)

 $V_L = V$ (viteza limită a penetratorului egală cu viteza de impact)

(2.13)

Relația (2.8) devine:

$$F\left(\frac{e}{d},0\right) = m^{0.5} \cdot V \cdot \frac{1}{e^{0.5} \cdot d}$$
(2.25)

Relația (2.5) – Helie – nu o vom lua în discuție deoarece face referiri la geometria deformației plăcii de blindaj, element pe care nu îl mai regăsim în celelalte relații, și deci nu avem posibilitatea să facem aprecieri comparative.

Din examinarea relațiilor (2.9), (2.10), (2.11), (2.15), (2.19), (2.22), (2.24) și (2.26) putem observa:

- relațiile (2.9), (2.10) și (2.15) sunt dependente de câte un singur parametru experimental;
- relațiile (2.11) și (2.19) sunt dependente de câte doi parametrii experimentali;
- relațiile (2.22) și (2.24) sunt dependente de câte trei parametrii experimentali;

2.2.2.1. Analiza relațiilor dependente de un singur parametru experimental

Din datele furnizate în manualul munițiilor [195], putem stabili o relație între masa penetratorului și diametrul d (calibrul) său. Astfel, rapoartele dintre dimensiunile ogivei (părții conice), corp și calibru, *în ipoteza* unei soluții

constructive obișnuite pentru un penetrator de tipul proiectil inert, sunt cele din figura 2.4.



Figura 2.4 Rapoarte între dimensiunile elementelor penetratorului considerat.

Deci, *pentru relațiile experimentale dependente de un singur parametru* avem următoarele forme:

$$b = a_1 \cdot d \cdot \frac{V^2}{d^3} \cdot 13.472 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot d^3 = 13.472 \cdot 10^{-3} \cdot a_1 \cdot \pi \cdot d \cdot V^2$$
(2.28)

$$b = 6.1633 \cdot 10^{-2.0979} \cdot a_2 \cdot \pi^{0.6993} \cdot V^{1.3986} \cdot d^{3.3007}$$
(2.29)

$$b = 12.7578 \cdot a_5^{-0.7142} \cdot \pi^{0.7142} \cdot V^{1.4286} \cdot d^{1.0714}$$
(2.30)

sau, în forma generală, în raport de materialul penetratorului, relațiile:

$$b = a_1 \cdot m \cdot V^2 \cdot d^{-2} \tag{2.9a}$$

$$b = a_2 \cdot m^{0.6993} \cdot V^{1.3986} \cdot d^{0.3007}$$
(2.10a)

$$b = a_5^{-0.7142} \cdot m^{0.7142} \cdot \pi^{0.7142} \cdot V^{1.4286} \cdot d^{1.0714}$$
(2.15a)

Din evaluarea unităților de măsură pentru relațiile (2.9a), (2.10a) și (2.15a), se poate observa că, pentru consistența relațiilor, *unitatea de măsură pentru coeficienții experimentali* este de forma unui raport

Volum / lucru mecanic de deformație

În concluzie, caracteristicile plăcii de blindaj și particularitățile condițiilor de experimentare se concretizează într-un *parametru experimental care exprimă capacitatea plăcii țintă de a absorbi energia potențială rezultată din transformarea energiei cinetice a penetratorului*, în condițiile de desfășurare a experimentului, *cu o deformare minimă a acesteia*. Altfel spus, de a permite o penetrare minimă, raportată la un volum dat.

Putem reformula: parametrii experimentali sunt caracteristici unor anumite condiții de experimentare și se interpretează ca reprezentând o capacitate specifică de disipare a unei energii potențiale, cu o deformare minimă a plăcii țintă, pentru condiții date.

2.2.2.2. Evaluarea formelor finale ale relațiilor experimentale dependente de un parametru – studii de caz

Considerând un calibru dat, se poate trasa suprafața limită a adâncimii de penetrare, calculată cu relațiile (2.28), (2.29) și (2.30), în raport cu o plajă de valori

ale parametrilor a_1 , a_2 , a_3 (notați în figură cu a) și ale vitezei V, considerând că viteza de impact este dependentă de distanța până la țintă.

Pentru trasarea suprafețelor am utilizat aplicația MATHCAD 2001 Profesional, versiunea 6.5.13, aplicație care ne permite o prezentare grafică rapidă și precisă a unor suprafețe definite sub formă analitică.

Suprafața adâncimii de penetrare și spațiul de penetrabilitate mărginit de aceasta sunt prezentate în figura 2.5, unde sunt reprezentate:

- pe axa Ox : viteza de impact V [m/s];
- pe axa Oy : parametrul *a*;
- pe axa Oz : adâncimea de penetrare *b* [mm];



Figura 2.5 Spațiul de penetrabilitate, evaluat cu relația (2.28) Prin evaluarea relației (2.29) s-a obținut suprafața (și spațiul) din figura 2.6:



Figura 2.7 Spațiul de penetrabilitate evaluat cu relația (2.30)

Apreciind că suprafețelor din figurile 2.5, 2.6 și 2.7 nu ne oferă ușor o informație suficientă privind diferențele de evaluare a adâncimii de penetrare, am

considerat că se impune trasarea curbelor de variație a acestui parametru în plan (2D), în aceleași condiții de variație a parametrului *a*. Am trasat curbele pentru o viteză V = 300 m/s. Acestea sunt prezentate în figura 2.8.



Figura 2.8 Curbele de penetrabilitate evaluate cu relațiile (2.28), (2.29) și (2.30).

Din analiza curbelor din figura 2.8. este ușor de remarcat că cele trei relații de calcul oferă rezultate semnificativ diferite, în raport cu valoarea parametrilor experimentali utilizați.

2.3. Cercetări asupra efectului Hopkins, prin prisma sintezei optimale. Stabilirea limitelor, prin analiză cinematică

Efectul de îndepărtare a materialului de pe fața posterioară a plăcii de blindaj, la impactul cu un penetrator, sub forma unor schije mari, fără străpungerea plăcii de către acesta, ca urmare a acțiunii undelor de șoc, este cunoscut în literatură sub denumirea de **efectul Hopkins**.

Exfolierea plăcilor de blindaj, ca efect al acțiunii globale a proiectilului asupra blindajului, se produce datorită interferenței undei dilataționale (longitudinale) de compresiune, incidentă, cu unda dilatațională de întindere, reflectată de suprafața opusă a blindajului, precum și datorită interferenței undei distorsionale (transversale), cu undele dilataționale. În punctele în care are loc interferența acestor unde de șoc, tensiunile se însumează algebric și apare posibilitatea ca tensiunea rezultantă să depășească valoarea tensiunii de rupere a materialului. În toate aceste puncte, în care s-a atins sau depășit valoarea tensiunii de rupere a materialului, apar microfisuri. Ca urmare a valorii eforturilor, microfisurile se transformă în fisuri care se dezvoltă și duc la ruperea materialului, cu formare de schije mari.

Evoluția în timp a eforturilor produse de unda de șoc, primară sau reflectată, de interferența acestora, permite evaluarea, într-o primă aproximație, a momentului ruperii și exfolierii suprafeței posterioare a plăcilor de blindaj.

Capitolul 2 – Investigații asupra evaluării penetrabilității unui blindaj, asupra efectului Hopkins și asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj

Deci, ca urmare a propagării în corpul blindajului, a undelor de eforturi, cele mai mari tensiuni și eventualele fisurări ale materialului, nu apar pe axul de perforare, așa cum ar fi fost de așteptat, ci într-un plan paralel cu suprafața posterioară a blindajului, situat la o distanță mică de această suprafață.

Astfel, se poate aprecia că parametrii cei mai importanți, care determină apariția exfolierilor la impact, sunt:

- viteza de impact a proiectilului;
- duritatea și rezistența la șoc a materialelor proiectilului și blindajului (rezistențe limită);
- diametrul proiectilului, prin influența undelor de șoc transversale asupra nivelului maxim al eforturilor normale, în secțiunea de fund a craterului;
- lungimea proiectilului, prin:
 - influența undelor de șoc longitudinale reflectate de suprafața din spate a proiectilului;
 - frânarea proiectilului, prin interacțiunea cu câmpul de eforturi existente în vecinătatea secțiunii de fund a craterului.

Pentru stabilirea ecuațiilor de propagare a undelor, vom porni de la condiția de echilibru mecanic a unui element infinitezimal, de formă paralelipipedică, dintrun mediu elastic infinit, aflat în echilibru sub acțiunea unui sistem de forțe exterioare. În cazul undelor longitudinale (dilataționale), mișcarea particulelor de material are aceeași direcție cu unda. Dacă unda este de compresiune, mișcarea are același sens cu mișcarea undei; dacă unda este de destindere, sensul mișcării particulelor este opus sensului de mișcare a undei [16, 45, 76, 122, 123, 146].

2.3.3. Definirea funcțiilor de scop

În analiza multicriterială, modul în care evoluează un criteriu de evaluare, raportat la condițiile concrete de existență a sistemului, este definit printr-o funcție. În cazul sintezei optimale a unui sistem, pentru aceste funcții se stabilesc limite, ecuația de variație fiind exprimată, cel mai adesea, sub forma unei inegalități. Limitele impuse reprezintă restricții și transformă ecuația într-un obiectiv pentru parametrul respectiv. Forma de reprezentare a restricției este interpretată ca o funcție de scop deoarece urmărește ca parametrul respectiv să evolueze numai în spațiul soluțiilor definite prin ecuația restricționată [126].

În continuare ne propunem să studiem cazul sintezei optimale a tablei de blindaj [40], pentru *stabilirea formei funcțiilor de scop care urmăresc evitarea efectului Hopkins*, în următoarele ipoteze:

- întâlnirea dintre primele trei fronturi de unde (undă primară şi primele două reflectate) se produce la o distanţă d > λ /2 de faţa posterioară a blindajului;
- penetratorul nu se sparge, deci la un raport $l_p > l_b$ nu se va analiza dacă prima undă reflectată de fața posterioară a blindajului va întâlni prima undă reflectată de suprafața posterioară a penetratorului la o distanță d > λ /2 de aceasta;

se vor neglija deformatiile datorită raportului mare (peste 20), între viteza de propagare a undei de soc și viteza de deformare a penetratorului și plăcii (pentru cazul analizat, al vitezelor mai mici de 600 m/s).

În aceste conditii, pentru un sistem de coordonate cu originea pe fata posterioară a penetratorului și axa ox pe axa geometrică a acestuia, se poate scrie conditia de evitare a riscului de aparitie a efectului Hopkins, sau functia de scop pentru sinteza optimală în domeniul cinematic, ca o condiție pentru ca undele să nu se întâlnescă la distanța $d = \lambda /2$ de fața posterioară a plăcii de blindaj. Ecuațiile (2.47), (2.48) și (2.49) devin:

$$t > (l_b + \lambda/2) / u_b$$
 (2.50)

sau:

(2.51) $l_{\rm h} > u_{\rm h} t - \lambda/2$ (2.52)

sau:

 $l_p > (u_p \ t_1 + u_b \ t_2 - l_b + \lambda / 2) / 2$

Al doilea moment semnificativ este:

• unda a traversat placa, s-a reflectat de fața posterioară (prima reflexie), se reflectă în fața anterioară (a doua reflexie), e reflectă din nou în fața posterioară și întâlnește unda reflectată de fața posterioară a penetratorului la distanța d = $\lambda/2$ de fața posterioară a blindajului; la limită:

$$3 l_b + \lambda / 2 = u_b t$$
 (2.53)

$$2 l_{p} + l_{b} - \lambda / 2 = u_{p} t_{1} + u_{b} t_{2}$$
(2.54)

$$t = t_1 + t_2 \tag{2.55}$$

Pentru acest moment definim funcția de scop sub forma:

$$t > (3 l_b - \lambda/2) / u_b$$
 (2.56)

(2.57)

 $l_{\rm b} > (u_{\rm b} t + \lambda/2)/3$ sau:

sau:

 $l_{p} > (u_{p} t_{1} + u_{b} t_{2} - l_{b} + \lambda/2) / 2$ (2.58)

Deoarece raportul dintre calibrul și lungimea penetratorului este de 3 ... 10 [195], calibrul minim este de 5 mm iar grosimea blindajului de minim 2 mm, apreciem că nu este necesar să analizăm și cazul în care prima undă reflectată de fata posterioară a blindajului întâlneste cea de a III-a undă reflectată de fata posterioară a penetratorului.

2.3.4. Studiu de caz

Pentru cazul practic al utilizării unui penetrator de calibru mai mare de 5 mm și al unor plăci subțiri de blindaj omogen, ne propunem trasarea suprafeței soluțiilor pentru care se produce efectul Hopkins. Pentru aceasta, vom analiza situațiile prezentate mai sus, cu restricțiile stabilite.

Vom considera următoarele ipoteze simplificatoare:

- datorită dimensiunilor cu care vom opera, undele sferice rezultate ca urmare a impactului pot fi considerate unde plane;
- nu vom evalua undele transversale;

• cunoscând că, la fiecare reflexie a frontului de undă apare, în afară de unda principală reflectată, și o undă secundară, defazată cu $\pi/4$, vom neglija cinematica acesteia.

A) Pentru primul caz, reprezentat de funcțiile de scop din relațiile 2.50, 2.51 și 2.52, spațiul parcurs de cele două fronturi de undă (primul în blindaj și cel de al doilea în penetrator), care se întâlnesc la distanța $\lambda/2$ de fața posterioară a plăcii de blindaj este:

$$S_1 = l_b + \lambda/2 = u_b t$$
 (2.47a)

și în penetrator:

$$S_2 = 2 l_p + (l_b - \lambda/2) = u_p t_1 + u_b t_2$$
(2.48a)

Din analiza acestui sistem de ecuații, se poate observa:

- caracteristicile geometrice se regăsesc în parametrii l_b = grosimea plăcii de blindaj și l_p = lungimea penetratorului;
- caracteristicile materialelor penetratorului și blindajului se regăsesc în vitezele frontului de undă în cele două medii: u_p și u_b conform relației 2.60.

B) Pentru cel de al doilea caz, reprezentat de funcțiile de scop din relațiile 2.53, 2.54 și 2.55, se poate scrie:

$$S_1 = l_b + \lambda/2 = u_b t$$
 (2.53a)

$$S_2 = 2 l_p + (l_b - \lambda/2) = u_p t_1 + u_b t_2$$
(2.54a)

Din relațiile 2.73a și 2.75 se observă că efectul Hopkins poate să apară în orice tablă de blindaj, până la grosimea maximă de 0,2 m (200 mm), pentru primul caz studiat, dacă penetratorul are o lungime mai mică de 0,3 m (300 mm, aproximativ calibrul 85 mm).

Din figurile 2.15 și 2.16 se poate remarca: *fenomenul exfolierii suprafeței posterioare a unei plăci de blindaj, la impact, poate apare pentru toată plaja de valori pentru care s-au trasat suprafețele.*

2.4. Considerații asupra direcțiilor de modernizare a protecției prin blindaj

Obiectivul prezentului capitol îl reprezintă stabilirea, cu argumente precise, a direcției probabile care va fi urmată de cercetările referitoare la perfecționarea protecției prin blindaj: *modernizare, sau blindaj nou* ?

Pentru atingerea acestui obiectiv utilizăm o metodologie care permite compararea și/sau însumarea potențialelor de luptă a unor categorii diferite de tehnică, în particular, a tehnicii blindate. O astfel de metodologie are la bază diverse modele de apreciere, modele care au ajuns uneori la complexități deosebite, evaluând până la 200 de parametri, pentru o categorie de armament. Odată cu creșterea complexității au crescut și costurile pentru menținerea în actualitate a bazei de date și, inerent, a crescut și numărul parametrilor oarecum subiectivi, parametrii care apreciază arma în raport cu doctrina țării care o utilizează, cu capacitatea de operare a personalului (capacități fizice, grad de pregătire profesională, capacitate de rezistență la factori de stres etc.) sau cu particularitățile de anotimp și relief ale zonei probabile de acțiune.

Nu în ultimul rând, creșterea gradului de generalitate al modelului a impus introducerea unor coeficienți care să asigure compatibilitatea unor modele care au drept subiect categorii total diferite de tehnică militară.

Având în vedere aceste aspecte, vom prezenta în continuare, doua modele de apreciere a tehnicii blindate elaborate, primul de *The Analysis Scientific Institute (SUA)*, iar al doilea de către *Academia Tehnică Militară* din București, *Catedra de blindate și automobile*.

2.4.4. Studiu de caz

Deoarece modelul TASCFORM – ARMOUR prezintă un număr mare de parametri subiectivi (valorile sunt stabilite de echipe mixte de specialiști), iar modelul elaborat de Academia Tehnică Militară îl apreciem ca fiind superior din punct de vedere al preciziei și simplității, considerăm avantajoasă utilizarea acestuia pentru studiul protecției prin blindaj.

Astfel, am ales două tipuri de tehnică din dotarea armatei noastre și s-a utilizat modelul MET. Am calculat potențialul sistemului de armă WSP, pentru două tipuri de tehnică. S-au considerat valorile reale ale blindajului echivalent și s-a calculat potențialul sistemului de armă. S-au considerat valorile maxime pentru același parametru (grosime blindaj echivalent) și s-a obținut o creștere a WSP de **0,12 %** și, respectiv, **0,23 %** fără evaluarea consecințelor asupra parametrilor de mobilitate și progresiune.

S-a calculat WSP pentru valorile reale ale blindajului echivalent, dar s-au adăugat avertizoare la iluminarea laser pentru ambele tipuri de tehnică. S-a obținut o creștere a WSP de 12,37 % și 14.28 %, cu observația că avertizoarele la iluminarea laser nu modifică parametrii de mobilitate și progresiune.

Se poate remarca faptul că, din punct de vedere al potențialului sistemului de armă, este mai avantajoasă modernizarea tehnicii, fără modificarea soluției de blindaj.

2.5. Concluzii

1. Relațiile experimentale stabilite în urma unui număr relevant de teste executate cu diverse calibre, la diferite unghiuri de impact și grosimi ale plăcii, în condiții variate de timp, anotimp și stare a vremii, utilizează coeficienți globali care particularizează comportarea unei plăci de blindaj prin prisma unei capacități specifice a acesteia de a absorbi energia cinetică a penetratorului, sub forma unei energii potențiale de deformare, precum și condițiile particulare de experimentare, *neprecizate* însă, *de literatură de specialitate*.

• În ipotezele de lucru stabilite la analiza relațiilor experimentale, s-au definit următoarele trei funcții scop pentru nepenetrabilitate:

$$S_1 = h(m, V, d) \ge a \cdot m \cdot \frac{V^2}{d^2}$$
(2.78)

$$S_2 = h(m, V, d) \ge a \cdot m^{0.6993} \cdot \frac{V^{1.3986}}{d^{0.3007}}$$
(2.79)

$$S_1 = h(m, V, d) \ge a \cdot m^{0.7143} \cdot \frac{V^{1.4286}}{d^{1.0714}}$$
(2.80)

• Ca urmare a celor prezentate, putem aprecia că funcțiile de scop necesare sintezei optimale la proiectarea unei table de blindaj, funcții determinate ca urmare a analizei relațiilor experimentale, *nu pot fi relevante* în prima etapă de proiectare și deci, *nu pot fi folosite ca unic criteriu de evaluare a penetrabilității* unei table de blindaj. Ele pot fi utilizate însă, ca restricții suplimentare, pentru o evaluare globală a unei soluții existente.

• Deși sunt recomandate de literatura de specialitate, relațiile experimentale de calcul a penetrabilității analizate nu pot fi folosite pentru proiectarea unui blindaj ca urmare a insuficientei prezentări a condițiilor de experimentare care au dus la stabilirea lor.

<u>2.</u> Investigațiile teoretice asupra efectului Hopkins au demonstrat că apariția acestuia este puternic influențată de raportul caracteristicilor celor două materiale, notat de noi k.

• S-au stabilit condițiile de evitare a riscului de apariție a efectului Hopkins, sau funcțiile de scop pentru sinteza optimală în domeniul cinematic, sub forma ecuațiilor 2.51, 2.52, 2.57 și 2.58.

• Prin analiza cinematicii frontului de undă, s-a demonstrat că efectul Hopkins *poate apare la orice grosime a plăcii de blindaj* și că acesta implică un spectru larg de frecvențe, care însă trebuie particularizate la geometria penetratorului, la compoziția chimică și structura materialelor proiectilului și blindajului.

• S-a demonstrat că fenomenul Hopkins poate să apară în orice tablă de blindaj, până la grosimea maximă de 0,2 m (200 mm), pentru prima funcție de scop definită, dacă penetratorul are o lungime mai mică de 0,3 m (300 mm, aproximativ calibrul 85 mm).

• Cu cea de a doua funcție definită, s-a stabilit condiția de apariție a efectului Hopkins:

 $l_p > 0.04$ m (40 mm, aproximativ calibrul 12 mm)

• Datorită riscului major pe care îl implică apariția efectului Hopkins, evaluarea acestuia *se impune ca etapă obligatorie* în proiectarea unui nou blindaj sau în modernizarea unuia existent. În prezent această evaluare se face doar în cazul unor studii independente.

<u>3.</u> Cercetările teoretice privind raportul modernizare / reproiectare pentru blindaje, au apelat la două modele multicriteriale de evaluare a capabilității tehnicii blindate. Aceasta a permis formularea unor concluzii relevante privind modelele analizate și rezultatele obținute.

• Modelul elaborat în SUA, TASCFORM – ARMOUR prezintă un număr mare de parametri oarecum subiectivi (valorile sunt stabilite de echipe mixte de specialiști). Aceasta se datorează în primul rând faptului că *modelul are un grad mare de generalitate*. Materialul publicat care a stat la baza documentării face parte din categoria informațiilor declasificate și deci, accesibile publicului larg, ceea ce presupune, în mod cert, o oarecare filtrare a elementelor de precizie.

• Modelul elaborat de Academia Tehnică Militară București este superior din punct de vedere al preciziei și simplității, păstrând însă restricția domeniului de tehnică blindată limitat, căruia i se adresează (tancuri).

• În urma analizei a două tipuri de tehnică, devine evident că sporirea gradului de protecție prin perfecționarea blindajului, prin câștigul obținut pentru potențialul armei, nu se justifică pentru orice tip de tehnică blindată.

De asemenea, perfecționarea blindajului este mai eficientă pentru autovehicule blindate ușoare.

Direcția de perfecționare avantajoasă o constituie reproiectarea unui blindaj, sau mai precis, proiectarea de blindaje noi.

Ca urmare a celor prezentate, putem afirma că cercetările ulterioare vor aborda acele aspecte care furnizează informații relevante necesare proiectării de blindaje și de materiale pentru blindaje, și numai în cazuri particulare aspecte care vizează modernizarea blindajului tehnicii existente.

Capitolul 3

Modelarea în element finit a fenomenului de impact, cu aplicarea unor condiții experimentale

3.1. Metoda elementelor finite

FEM – Finite Element Method, sau MEF – Metoda Elementelor Finite a apărut în cea de a doua parte a secolului al XX-lea, ca urmare a necesității rezolvării pe cale numerică a problemelor de modelare a unor fenomene fizice complexe, fenomene descrise prin ecuații diferențiale sau cu derivate parțiale a căror soluții sunt greu de stabilit. Gradul mare de generalitate și spectrul larg de aplicabilitate al metodei, au impus-o în lumea științifică, răspândire și implementare favorizată de dezvoltarea tehnicii de calcul.

Cu aparatul teoretic bine pus la punct, cu suportul reprezentat de tehnica de calcul în continuă dezvoltare, o serie de firme de software promovează aplicații care excelează pe o ramură sau alta a domeniului abordat. Dintre aplicațiile cel mai des întâlnite putem enumera [38, 179, 181]: ABAQUS, ADAMS, ADINA, ANSYS, AUTODYN, CATIA, COSMOS/M, NASTRAN și PATRAN. În spatele acestor aplicații stau modele diferențiale prelucrate prin calcul variațional sau, prin metoda reziduurilor ponderate.

Dintre avantajele utilizării metodei elementului finit putem enumera:

- permite formularea matriceală a algoritmilor, asigurând suportul matematic formal necesar automatizării calculelor;
- oferă un algoritm de calcul general pentru structurile bi și tridimensionale;
- permite abordarea unitară a analizei statice și dinamice a structurilor.

Deci, modelarea fizică, cu elemente finite, a structurilor, acoperă practic, întreg domeniul de probleme inginerești ce aparțin mecanicii structurilor [70, 118, 151, 1810].

3.2. Analiza aplicațiilor disponibile. Caracteristicile și performanțele aplicației utilizate

Pentru stabilirea aplicației pe care o vom utiliza, s-au trecut în revistă câteva din aplicațiile disponibile în țara noastră.

• Pachetul de programe *ANSYS* reprezintă o aplicație robustă și flexibilă, care permite analize structurale cu capabilități de a lucra în câmp cuplat (ex. structural – termic). Modulul de analiză dinamică MS-Dyna permite analize

puternic nelineare, cu modelarea problemelor de contact. Utilizând metoda de rezolvare explicită, aplicația nu formează matrici de rigiditate, reducând semnificativ resursele de calcul necesare.

Programele permit controlul erorilor și sunt utilizate cu succes în modelarea problemelor de impact și de deformare adâncă. Dispun de 164 de tipuri de elemente, dintre care pentru 46 nu se furnizează date în literatura cu acces larg.

Este o aplicație destul de răspândită mai ales datorită politicii de vânzare, care oferă universităților facilități la achiziționarea unor versiuni cu capabilități de calcul restrânse, ceea ce face ca foștii studenți să o prefere la noul loc de muncă.

• Aplicația *AUTODYN* este una din puținele aplicații de analiză în domeniul ingineriei care asigură o rezolvare eficientă a problemelor din domeniile:

- dinamica solidelor, fluidelor și gazelor;
- deformații mari în corpuri solide;
- interacțiuni ale fluidelor;
- explozii, șocuri și distrugeri;
- probleme de impact și penetrare. Dintre capabilitățile acestui pachet de programe, putem enumera:
- integrarea preprocesării, procesării și postprocesării;
- predefinirea geometriei și grafică interactivă pentru realizarea geometriei corpului de studiat;
- reproiectare cu preluarea datelor între 2D și 3D, în ambele sensuri;
- procesare de înaltă rezoluție, incluzând tehnici de rezonanță și eroziune;
- studiul contactelor dinamice de valori mari, cu modelarea rupturilor direcționale și a efectelor cumulative.

Furnizată de firma britanică Century Dynamics, are un preț ridicat și din acest motiv, o răspândire limitată. Nu avem date despre instituții din țară care utilizează această aplicație.

• Aplicația *COSMOS/M* permite formularea de ecuații constitutive de material, de la cele mai simple la cele foarte complexe. Pentru partea geometrică utilizează primitive care pot fi aproximate modelului real. Aplicația permite o ușoară calibrare a meșei de discretizare și are o plajă largă de valori pentru parametrii acesteia. De asemenea, permite o bună modelare a condițiilor la limită (pe contur).

A pătruns în țara noastră, mai ales prin intermediul unor licențe oferite gratuit unor instituții de învățământ superior. Una din instituțiile care o folosește cu bune rezultate, este Academia Tehnică Militară București. Răspândirea este limitată și datorită unui sistem destul de bun de protecție la piratare.

• Pentru modelarea fenomenului de impact, cu realizarea unui model cât mai apropiat de posibilitățile de experimentare în poligon, am optat pentru aplicația **LSDYNA3D** [177, 178] de la Lavrence Livermore National Laboratory.

Această aplicație a apărut în 1976 sub numele de *DYNA 3D*, din necesitatea analizei eforturilor în structuri complexe, supuse la diverse solicitări, prin impact. Începuturile au fost grevate de implementarea insuficientă a metodei elementelor finite, precum și de puterea de calcul scăzută a tehnicii din acei ani, folosindu-se inițial doar elemente de tip solid, cu opt noduri.
Facilitățile privind calculul energetic, reacția unui perete rigid și analiza nelineară a planelor de plasticitate sunt completate cu o foarte bună vectorizare a forțelor și, permit realizarea aplicației comerciale *LS-DYNA*, cu versiunea *LS-SYNA3D*.

Aplicația este perfecționată succesiv, la intervale de timp de la doi la patru ani, în prezent fiind disponibilă versiunea 9.70. *Pentru modelarea fenomenului de impact studiat, am ales versiunea 9.60 definitivată în perioada 1998-2000, versiune pentru care am obținut licența în varianta numărului limitat de noduri și elemente.*

Cu 133 de tipuri de materiale disponibile (caracteristici de comportament), cu 6 posibilități predefinite de caracterizare a condițiilor de încărcare (de tip Euler – Lagrange), 16 moduri de definire generică a funcțiilor în noduri, 19 tipuri caracteristice de definire a gradelor de libertate, 7 tipuri de contact, 40 de modalități de control a discretizării și a procesului, 4 tipuri de control a părților, 10 căi de control a datelor de ieșire, 16 tipuri generice de elemente, 14 tipuri de ecuații de modelare a comportamentului (aplicabile fiecărui material și fiecărui tip de material), cu posibilitatea particularizării tenacității și vâscozității, a definirii condițiilor inițiale și a interfețelor, aplicația acoperă, practic, tot spectrul aplicațiilor inginerești.

Un avantaj pe care l-am apreciat la alegerea acestei aplicații, în afara problemelor de licență, o constituie faptul că preprocesarea, analiza și posprocesarea se por rula independent ceea ce ne-a permis, la simularea impactului, o economie de timp considerabilă.

3.3. Stabilirea modelului

În modelarea penetratorului și a plăcii de blindaj – țintă și în simularea fenomenelor la impact, ne propunem realizarea următoarelor *obiective*:

- determinarea deformațiilor remanente ale plăcii, în două variante de grosime, anume 4mm și 6mm; acestea se vor evalua în planul median, pe cele două fețe ale plăcii;
- *determinarea parametrilor cinematici ai impactului*;
- determinarea cinematicii și valorilor eforturilor totale în corpul plăcii țintă;
- analiza comportamentului plăcii, din punct de vedere al vibrațiilor.

Determinarea deformațiilor remanente ne permite compararea cu valori rezultate în urma verificării modelului prin experiment. La validarea experimentală a modelului va contribui și graficul curbei de accelerație în punctul de contact, prin compararea acesteia cu date din literatura de specialitate [19, 45, 47, 77].

Odată modelul validat, din analiza cinematicii și valorilor eforturilor, a comportamentului vibrațional al plăcii țintă, putem determina elemente de particularitate care să se constituie în restricții pentru proiectarea de noi materiale și în condiții de evaluat pentru constructorii de tehnică.

Problema de impact ne obligă la o analiză în trei dimensiuni a fenomenelor care se produc în punctul de contact și în zonele apropiate acestuia. Conform unor studii verificate experimental [106], *s-a demonstrat că la impactul cu un penetrator, zona influențată a plăcii, în general, nu depăşeşte zece diametre ale penetratorului (10 calibre).*

Modelul obținut prin discretizarea cu elemente finite a structurii și stabilirea modului de comportare a materialului, trebuie să corespundă următoarelor cerințe [12, 13, 28, 53] :

- să reprezinte cu suficientă fidelitate comportarea reală a structurii;
- să permită obținerea cu ușurință a rezultatelor exprimate ca valori ale eforturilor și deplasărilor în secțiunile semnificative;
- să nu necesite un timp exagerat pentru pregătirea datelor și pentru prelucrarea rezultatelor și,
- să utilizeze în mod eficient posibilitățile tehnicii de calcul.

La *stabilirea modelului penetratorului* am pornit de la o soluție constructivă reală, prezentată în figura 3.1. Dimensiunile sunt cele din figura 3.2, cu mențiunea că semiunghiul la vârf are valoarea de $18,7^{0}$. De asemenea, la vârful penetratorului raza de racordare a vârfului conului este de 0,5 mm.



Figura 3.1 Penetrator calibrul 7,62 mm

Pentru placa țintă, dimensiunile stabilite au fost de 150x150 mm, în două variante de grosime: 4 mm și 6 mm. Aceasta este considerată simplu rezemată, cu puncte de sprijin punctiforme, în cele patru colțuri, pe fața posterioară.

3.4. Algoritm și particularități de calcul

Pentru sistemul *penetrator – placă țintă* prezentat la punctul anterior s-au stabilit ipoteze, valori și particularități de calcul astfel:

- s-a făcut ipoteza neglijării accelerației gravitaționale, în baza masei mici a penetratorului (cca 7,8 g);
- s-au stabilit caracteristicile de material, în baza caietului de sarcini pentru placă de blindaj OB 2 și a [23, 35, 46, 105, 193], cu respectare condițiilor particulare ale aplicației LS-Dyna3D [175, 176];
- s-a stabilit viteza inițială a penetratorului, la impact, și s-a impus ca placa să fie așezată simplu rezemat cu reazeme rigide, aplicate în colțurile plăcii, pe fața posterioară;

- urmare a precizărilor din literatura de specialitate [67, 77, 184, 185, 188], s-a stabilit că elementul care respectă cel mai bine modul de comportare al plăcii în cazul studiat, este de tipul *solid*;
- pentru discretizarea sistemului fizic, *s-a apreciat că tipul de element finit cel mai potrivit este hexaedrul.* Acest tip de element finit, cu precizările din [174], îl apreciem ca fiind cel care ne permite obținerea rapidă a unor rezultate de acuratețe pentru placă, studiul acesteia fiind obiectivul nostru. Prin formele sale particulare (cub, paralelipiped dreptunghic, prismă triunghiulară sau piramidă), acesta ne permite utilizarea lui și la discretizarea penetratorului. Acest aspect reduce semnificativ resursele de memorie necesare.
- Respectând condițiile și ținând cont de o serie de elemente de particularitate din [85, 89, 169], s-au discretizat cele două elemente ale sistemului.

În ipotezele menționate și cu particularitățile expuse mai sus, s-a trecut la simularea impactului penetrator/placă de blindaj.

3.5. Rezultate obținute

S-au discretizat penetratorul (figura 3.3) și placa țintă (figura 3.4 pentru grosimea de 4mm, figura 3.5 pentru grosimea de 6mm).

Pentru discretizarea plăcii țintă, am stabilit grosimea elementului la 1mm, obținând patru straturi pentru placa de 4mm și șase straturi pentru cea de grosime 6mm. Coordonatele nodurilor aflate pe direcția mediană, în planurile suprafeței de impact și a suprafeței posterioare a plăcii, sunt prezentate în tabelul 3.1.

S-a făcut simularea impactului [95] și s-au obținut fișierele cu rezultate finale pentru noduri și elemente. Postprocesarea s-a făcut cu aplicația *Open3GL* [157, 172, 187, 190] și o serie de date au fost preluate și apoi prelucrate în *XCell*.

Primul pas în evaluarea rezultatelor l-a constituit aprecierea calitativă a modelului, prin prisma comparării rezultatelor obținute, cu cele din literatura de specialitate. Astfel, s-a trasat curba accelerației nodului central de pe fața de impact, curbă al cărei grafic este publicat și în [6, 10, 106, 146], pentru alte valori ale parametrilor de impact. Graficul accelerației este prezentat în figurile 3.6 și 3.7.

Se poate observa că graficul accelerației corespunde cu rezultatele obținute de către alți autori. Acest lucru ne confirmă corectitudinea modelului stabilit și ne permite analiza, în continuare, a rezultatelor.

Următorul pas în valorificarea rezultatelor simulării impactului, l-a reprezentat analiza deformației, cu trasarea curbelor de deformație pentru suprafețele de impact și posterioare, pentru cele două plăci de grosimi diferite. Modul de deformației este prezentat în figura 3.8, pentru placa de grosime 4mm și, în figura 3.9 pentru placa de grosime 6mm.



Figura 3.9 Modul de deformare a plăcii cu grosimea de 6mm



Figura 3.9 Modul de deformare a plăcii cu grosimea de 6mm (continuare)

Din examinarea figurilor se poate observa decalajul între deformarea penetratorului și cea a plăcii. Acest decalaj este cauzat de caracteristicile mecanice diferite ale materialelor din care sunt confecționate acestea.

Curbele de deplasare a nodurilor centrale, de pe fața de impact, sunt prezentate în figurile 3.10 și 3.11.

Pentru a putea analiza deformația plastică a plăcii țintă, trebuie să ținem cont și de deformația elastică a acesteia, în acest caz de încovoierea plăcii. Pentru aceasta, am apreciat ca necesară trasarea curbelor de deplasare a nodurilor de pe linia mediană a feței de impact, aflate la extremitatea acesteia. Graficele deplasărilor sunt prezentate în figurile 3.12 și 3.13.

Determinarea variației grosimii plăcii de blindaj ne-a condus la studiul deplasării nodurilor centrale și mediane de capăt și de pe fața posterioară a plăcilor țintă. Deplasările acestor noduri sunt prezentate în figurile 3.14, 3.15, 3.16 și 3.17.

Pentru discuții asupra comportării materialului, este important de evaluat deplasarea în timp, măsurată pe linia mediană a feței de impact (figurile 3.18 și 3.19) și a feței posterioare (figurile 3.22 și 3.23). Evaluând și deformația elastică a plăcii, am trasat curbele de variație a deformării plastice (figurile 3.20, 3.21, 3.24 și 3.25), grosimea calculată la finalul fenomenului de impact fiind măsurabilă experimental.



Figura 3.18 Deplasarea nodurilor mediane de pe fața de impact, în timp, la placa cu grosimea de 4 mm



Figura 3.19 Deplasarea nodurilor mediane de pe fața de impact, în timp, la placa cu grosimea de 6 mm



Distanta fata de punctul de impact [mm]

Figura 3.20 Variația în timp a deformării plăcii, calculată pe linia mediană, la placa cu grosimea de 4 mm



Distanta fata de punctul de impact [mm]



Deoarece studiul vitezei de deformație ne oferă date importante referitoare la comportarea materialului plăcii, precum și al plăcii ca ansamblu, s-a apreciat ca necesar studiul vitezei pe axa OZ, a nodurilor centrale, de pe fețele de impact și posterioare, ale celor două plăci. Acestea sunt prezentate în figurile 3. 26 și 3.27 pentru placa de grosime 4mm și 3.28 și 3.29 pentru placa de grosime 6mm.

Analiza dinamicii fronturilor de undă, precum și a capacității materialului plăcii țintă și al soluției constructive a acesteia, ne-a impus analiza accelerațiilor nodurilor centrale ale fețelor de impact și posterioare, comparativ, pentru cele două grosimi ale plăcii. Acestea sunt prezentate în figurile 3.29 și 3.30, pentru nodul central al feței de impact și 3.31 și 3.32, pentru nodul central al feței posterioare.

Am apreciat că analiza accelerațiilor nodurilor centrale este necesar a fi completată cu studiul accelerațiilor nodurilor mediane, de la jumătatea distanței între punctul de impact, pe linia mediană, și a nodurilor din același plan, dar de capăt (la 75mm de punctul de impact). Acestea sunt prezentate în figura 3.33, pentru placa de grosime 4mm și, în figura 3.34, pentru placa de grosime 6mm.







Figura 3.34 Variația în timp a accelerației nodurilor de pe linia mediană a feței de impact, (la 36mm și 75mm), la placa cu grosimea de 6 mm

Analiza comportării plăcilor țintă, din punct de vedere cinematic (deplasări, viteze, accelerații), s-a impus a fi completată cu analiza evoluției în timp, a eforturilor. În figurile 3.35 și 3.36 sunt prezentate, comparativ pentru cele două grosimi, evoluțiile eforturilor totale (Von Misses) pe fața de impact și pe cea posterioară. Unitatea de măsură a scării de valori a tensiunii este [10^4 daN/mm²], iar pentru timp unitatea de măsură este [10^{-7} s].



Figura 3.35 Evoluția comparativă, în timp, a tensiunii totale, pe fața de impact, la plăcile cu grosimea de 4 mm, respectiv 6mm.

Capitolul 3. Modelarea în element finit a fenomenului de impact, cu aplicarea unor condiții experimentale



Figura 3.35 (continuare).



Figura 3.35 (continuare).

Pentru a stabili cu precizie momentul la care se termină procesul de deformare plastică al plăcii, în continuare desfășurându-se doar fenomene oscilatorii, s-a apreciat ca necesară trasarea curbelor de variație a energiilor în raport cu timpul. S-au obținut astfel graficele din figura 3.37, pentru placa țintă de grosime 4mm, și figura 3.38 pentru placa țintă de grosime 6mm.



Figura 3.37 Evoluția în timp a energiilor pentru placa de grosime 4 mm

3.6. Concluzii

Din analiza rezultatelor obținute cu aplicația *LS-DYNA3D*, versiunea 9.60 se pot desprinde o serie de concluzii referitoare la:

- calitatea elaborării modelului;
- comportarea plăcii țintă și a materialului acesteia;
- modul de desfășurare a fenomenelor, la impact.
- A) Referitor la calitatea modelului elaborat, putem aprecia:
- soluția de discretizare pentru cele două componente ale sistemului studiat (penetrator și placă țintă) a fost bine aleasă și a permis un compromis foarte bun între precizie și resursele de calcul necesare;
- datorită formei geometrice a plăcii țintă, s-a dovedit mai avantajoasă soluția de discretizare la dimensiuni egale pe grosime (respectiv 1mm), pentru ambele grosimi studiate ale plăcii (4mm şi 6mm); discretizarea variabilă pe grosime ar fi complicat în mod inutil urmărirea nodurilor şi elementelor de studiat;

Modelul elaborat poate fi folosit pentru studiul fenomenului de impact, în domeniul aerodinamic, pentru placă de blindaj omogenă și penetrator cinetic. Soluția de discretizare permite extinderea modelului la plăci de blindaj multistrat. <u>B)</u> Referitor la comportarea plăcii țintă, putem constata o serie de elemente particulare solicitării.

Analiza curbelor de deplasare și de deformație, în raport cu timpul, ne-a permis să constatăm următoarele:

- *penetratorul se deformează rapid în prima etapă, într-o perioadă de timp de aproximativ 0,2 ms;* aceasta se datorează caracteristicilor materialului penetratorului în raport cu viteza de impact și cu materialul plăcii țintă;
- în intervalul de timp 0,1 0,3 ms, placa suferă o deformare locală accentuată;
- *în intervalul 0,3 0,5 ms apare încovoierea elastică a plăcii țintă, în planele mediane,* perpendiculare pe suprafața de impact (datorită condiției de contur simplu rezemat pe nodurile din colțuri, pe fața posterioară a plăcii).

<u>C)</u> Din analiza valorilor parametrilor obținuți prin simularea impactului, obținem o serie de informații referitoare la **comportarea materialului plăcii țintă**.

Astfel, din studiul graficelor vitezelor, raportate la curbele de deformație, s-a constatat că *inerția materialului la deformare plastică locală este de 2µs*.

Studiul graficelor accelerațiilor și al energiilor *ne-au permis stabilirea limitei de deformare plastică pentru materialele, geometriile și condițiile inițiale ale cazului de impact studiat, la 0,52 ms.*

<u>D</u>) În ceea ce privește evoluția fenomenului de penetrare, se pot stabili elemente de detaliu, elemente care, cu greu ar fi fost posibil de determinat experimental. Studiul graficelor vitezelor, în raport cu curba de deformație, ne-au permis următoarele constatări pentru cazul studiat:

- penetrarea se desfășoară în prima etapă (de 0,3 ms) cu deformarea plastică accentuată a penetratorului, deformare plastică locală a plăcii și îndepărtarea de material, radial față de direcția de efort;
- în următoarele 0,2 ms, fenomenul de penetrare manifestă tendința de poansonare, de penetrare cu decuparea unui dop din materialul plăcii țintă.

<u>E)</u> Din punct de vedere practic, apreciem ca importante următoarele concluzii:

- *Studiul comparativ al eforturilor totale* Von Misses, pe cele două fețe ale plăcii țintă, deschid perspectiva unor analize ulterioare dezvoltate, (analize pe care spațiul la dispoziție nu le permite), referitoare la încărcările în anumite puncte sau pe anumite secțiuni ale plăcii, raportate la fenomenul care le-a produs. Astfel, la o primă analiză este ușor de remarcat că *eforturi de valori mari, la suprafață, sunt generate de încovoierea elastică a plăcii.*

- Studiul graficelor energiilor din figurile 3.37 și 3.38, ne-au permis nu doar stabilirea intervalului de timp pe parcursul căruia se produc deformări plastice ci și aprecieri cu privire la încovoierea elastică a celor două plăci analizate. Astfel, se poate afirma că, *la stabilirea grosimii și materialului plăcii, pentru tablele destinate protecției prin blindaj, (destinate fabricării tehnicii), nu este suficientă evaluarea armei probabile și a probabilităților de lovire, pentru domeniul aerodinamic al penetrării (abordat în simulările executate) fiind deosebit de importantă analiza oscilațiilor elastice ale plăcii, la impact.*

Capitolul 4.

Cercetări experimentale privind impactul unei plăci de blindaj cu un penetrator cinetic.

La impactul cu un proiectil cinetic, deformarea și eventual străpungerea unei plăci de blindaj este dependentă de energia cinetică a proiectilului și de caracteristicile dimensionale și de material ale proiectilului și ale plăcii. În domeniul perforării aerodinamice, deformarea și străpungerea plăcii de blindaj se realizează prin diferite mecanisme, dar nu exclusiv printr-unul singur ci prin combinația acestora cu predominanța unuia dintre ele, în funcție de condiționările amintite. Aceste mecanisme pot fi următoarele [76, 146]:

- a) *exfolierea blindajului pe partea opusă perforării* (efectul Hopkins), datorită interferențelor undei de şoc incidente cu undele reflectate de fața posterioară a blindajului;
- b) *fisurarea și ruperea radială*, sub influența undei de presiune inițiale; este specifică blindajelor subțiri, confecționate din materiale fragile;
- c) *ruperea transversală* sub influența undei de presiune inițiale; este specifică blindajelor subțiri sau de grosimi intermediare, confecționate din materiale cu densitate şi rezistență mică;
- d) *extruziunea unui dop* (poansonarea); este specifică blindajelor rigide, de grosime medie, la impactul cu proiectile perforante cu cap bont (teșite);
- e) *formarea rebordurilor* sub formă de stea *pe suprafața de impact;* este specifică plăcilor de grosime mai mare;
- f) formarea rebordurilor (petalelor) pe suprafața posterioară a plăcii; este specifică plăcilor de blindaj subțiri, la impactul cu proiectile cu ogivă ascuțită;
- g) *fragmentarea cu formare de schije*, specifică blindajelor din materiale fragile; schijele formate pot distruge obiectivele din spatele blindajului;
- h) *perforarea ca urmare a unei viteze mari de impact*; este cazul cel mai des observat în practică. Proiectilul trece complet prin blindaj, iar materialul blindajului suportă o expansiune radială față de axul de perforare.

Reprezentarea grafică a acestor mecanisme este prezentată în figura 4.1.



Figura 4.1. Mecanismele penetrării unei plăci de blindaj

4.1. Condiții de desfășurare a cercetării experimentale

Analiza experimentală a comportării unor table de blindaj la solicitările specifice impactului cu un penetrator, *în cazul particular al impactului cu un proiectil cinetic*, a luat în considerare desfășurarea unor teste prin *tragere reală asupra unor table subțiri de blindaj, table realizate din oțel OB 2.*

Testele au urmărit, într-o primă etapă, stabilirea precisă a deformațiilor reale a unei table de blindaj subțire, prin măsurarea deformațiilor pe ambele fețe ale a acesteia. Ulterior, s-a procedat la un *studiu radiografic, studii macro și microstructurale și la analize ale microdurității,* în zonele de impact.

S-a apreciat ca soluție adecvată studierea comportării blindajelor subțiri, ca urmare a restricțiilor privind realizarea de verificări practice în domeniul blindajelor groase (greutate în achiziționarea de plăci de blindaj de grosimi mari, accesul deosebit de restrictiv la muniție pentru lovirea blindajelor groase, datorită prețului prohibit al acestora și datorită numărului limitat de aplicații care folosesc astfel de muniții).

4.2. Analiza dimensională și macroscopică a zonei de impact

S-au stabilit următoarele obiective:

- măsurarea precisă a deformațiilor reale, pe ambele fețe ale plăcii țintă;
- evaluarea grosimii efective, după impact, și a variației acesteia în raport cu distanța față de punctul de impact;
- evaluarea profilului secțiunii zonei deformate la impact;
- identificarea de elemente de particularitate, dacă există, privind adâncimea de perforare și profilul de deformare.

S-au parcurs următoarele etape:

- s-au ales cinci foi de tablă de blindaj de grosime 4 mm și cinci foi de grosime 6 mm, toate din două loturi recepționate și care au fost acceptate;
- foile de tablă au fost notate astfel: P_{i, cu i = 1...5} foile de tablă de grosime 4 mm; T_{i, cu i = 1...5} cele de grosime 6 mm;
- s-au prelucrat zonele pentru măsurarea durității (conform caietului de sarcini pentru recepția tablelor de blindaj), și s-a măsurat duritatea;
- din fiecare foaie de tablă P_i și T_i s-au prelevat probe de dimensiuni 150x150 mm, probe notate astfel: $P_{i,j \text{ cu } i = 1...5 \text{ și } j = 1...4}$ din cele 5 foi de tablă de grosime 4 mm; $T_{i,j \text{ cu } i = 1...5 \text{ și } j = 1...3}$ din foile de tablă de grosime 6 mm;
- probele $P_{5,1}$, $P_{5,2}$, $P_{5,3}$, $P_{5,4}$, $T_{5,1}$, $T_{5,2}$, $T_{5,3}$ s-au constituit în probe martor;
- s-au efectuat încercări asupra probelor obținute: 16 încercări asupra probelor P_{i,j cu i = 1...4 şi j = 1...4} de grosime 4 mm; 12 încercări asupra probelor T_{i,j cu i = 1...4 şi j = 1...3} de grosime 6 mm;
- s-au analizat rezultatele.

Încercările au constat în solicitarea la impact prin tragere reală, câte un foc asupra fiecărei probe. Pentru tabla de grosime 4 mm s-a optat pentru un număr mai mare de probe deoarece, anticipându-se o deformare mai mare în raport cu cea de grosime 6 mm, s-a urmărit o mai bună mediere a valorilor măsurate.

Astfel, probele asupra cărora s-au efectuat încercări prin solicitare la impact au fost: 16 probe de tablă de grosime 4 mm ($P_{i,j \text{ cu } i = 1...4 \text{ și } j = 1...4}$) și 15 probe de tablă de grosime 6 mm ($T_{i,j \text{ cu } i = 1...5 \text{ și } j = 1...3}$), deci un total de 31 de încercări.

Într-o primă etapă s-a procedat la măsurarea deformațiilor în zonele de impact, în scopul stabilirii profilului real al tablei de blindaj, după impact. Pentru măsurarea deformațiilor s-a utilizat un ceas comparator cu gradații de 0,01 mm.

Acesta a fost montat pe masa unei freze. Proba de măsurat a fost fixată de masă și poziționată la orizontală. Modul de prindere și fixare sunt prezentate în figura 4.4.

Deformațiile s-au măsurat atât pe suprafața de impact cât și pe fața opusă a tablei, urmărindu-se variația grosimii tablelor, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact.

Rezultatele obținute au fost prelucrate statistic, valorile anormale fiind eliminate prin aplicarea criteriului Chauvenet. Pentru probele debitate din fiecare foaie de tablă s-au calculat valorile medii măsurate. Acestea s-au notat $PM_{i, cu i = 1...4}$ pentru foaia de tablă *i*, de grosime 4 mm; $TM_{j, cu j = 1...5}$ pentru foaia de tablă *j*, de grosime 6 mm. Valorile medii s-au calculat ca medie aritmetică a valorilor măsurate pentru probele prelevate din aceeași foaie de tablă.

S-au măsurat deformațiile rezultate ca urmare a solicitării la impact, exemple ale valorilor obținute fiind prezentate în **anexa 6** pentru probele $P_{1,1}$ de grosime 4mm (tabelul 4.1) și $T_{1,1}$ de grosime 6 mm (tabelul 4.2).

În figura 4.5 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate PM_1 pentru probele $P_{1,i cu i = 1...4}$, de grosime 4 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.6.

În figura 4.7 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate PM_2 pentru probele $P_{2,i cu i = 1...4}$, de grosime 4 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.8.

În figura 4.9 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate PM_3 pentru probele $P_{3,i cu i = 1...4}$, de grosime 4 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.10.

În figura 4.11 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate PM_4 pentru probele $P_{4,i cu i = 1...4}$, de grosime 4 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.12.

În figura 4.13 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate TM_1 pentru probele $T_{1,i cu i = 1...3}$, de grosime 6 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.14.

În figura 4.15 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate TM_2 pentru probele $T_{2,i cu i = 1...3}$, de grosime 6 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.16.

În figura 4.17 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate TM_3 pentru probele $T_{3,i cu i = 1...3}$, de grosime 6 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.18.

În figura 4.19 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate TM_4 pentru probele $T_{4,i cu i = 1...3}$, de grosime 6 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.20.

În figura 4.21 este prezentat graficul deformațiilor medii măsurate TM_5 pentru probele $T_{5,i cu i = 1...3}$, de grosime 6 mm, iar grosimea medie, după deformare, în raport cu distanța față de punctul de impact, este prezentată în figura 4.22.

Pentru a putea analiza comparativ deformațiile pentru foile de tablă studiate, se reprezintă grafic, într-o aceeași figură pentru foile de tablă de grosime 4 mm și, de asemenea, pentru cele de grosime 6 mm, deformațiile medii calculate pentru suprafața de impact, pentru suprafața posterioară, și variația grosimii medii a tablei. (figurile 4.23, 4.24 și 4.25, pentru tablele cu grosimea de 4 mm și, respectiv, figurile 4.26, 4.27 și 4.28, pentru tablele cu grosimea de 6 mm.



Figura. 4.23 Deformațiile medii PM_{i, cu i= 1...4}, măsurate pe suprafața de impact (tablă de grosime 4mm)



Figura 4.26 Deformațiile medii TM_{i, cu i= 1...5}, măsurate pe suprafața de impact (tablă de grosime 6mm)



Figura 4.28 Grosimea medie a tablelor T_{i, cu i=1...5}, după impact (tablă de grosime 6mm).

Capitolul 4 – *Cercetări experimentale privind impactul unei plăci de blindaj cu un penetrator cinetic*

Așa cum se observă în figurile 4.23, 4.24, 4.26 și 4.27, dimensiunea zonei de deformare plastică a plăcilor este invers proporțională cu deformația măsurată în punctul de impact.

De asemenea, la ambele grosimi ale tablei de blindaj s-a întâlnit situația formării în punctul de impact a unor suprafețe conice, cu vârful înspre penetrator și cu axa geometrică pe axa geometrică a penetratorului, înălțimea conului reprezentând aproximativ 10 % din grosimea tablei.

Un detaliu al acestui con de deformare este prezentat în figura 4.29 pentru o tablă de grosime 4mm, iar pentru comparație, în figura 4.30 este prezentată o zonă de impact la o tablă de grosime 6mm, unde acest con nu este prezent.



Figura 4.29 Zonă de impact la o tablă de grosime 4mm (8x)



Figura 4.30 Zonă de impact la o tablă de grosime 6mm (16x)

Se poate observa deformarea tablelor cu formarea unui profil de crater, deformare pe care o întâlnim la probele $P_{3,i}$, (de grosime 4mm), și la probele $T_{3,i}$, (de grosime 6mm), la aceasta din urmă fiind mult mai evidențiată. Apreciem că acest profil este cauzat de îndepărtarea de material dinspre punctul de impact spre exterior, ca urmare a caracteristicilor celor două materiale și a vitezei rămase a penetratorului.

Un element de particularitate la probele de 6 mm, îl reprezintă variațiile de grosime existente la aproximativ aceleași distanțe față de punctul de impact, la toate probele cu excepția probelor $T_{5,i}$. De asemenea, acestea au valori apropiate atât în ceea ce privește valoarea variației grosimii, cât și lățimea coroanei circulare pe care sunt prezente. Aceste variații au aceleași cauze ca cele descrise mai sus. Pentru Foaia de tablă T_5 , de grosime 6 mm, apreciem că duritatea accidental mai mare a penetratorului reprezintă cauza acestui profil al grosimii tablei, după impact.

4.3. Evaluarea relevanței unui control radiografic la recepția tablelor de blindaj

Cerințele privind asigurarea calității au dus la perfecționarea metodelor și tehnicilor de control nedistructiv. Una dintre aceste metode o reprezintă explorarea radiografică.

Aparatele radiografice din ultimele generații au compensat riscurile filmului și manoperei de developare prin prelucrarea digitală a imaginii, înlocuind filmul radiografic cu senzori care, nu numai că oferă o aceeași rezoluție și *finețe* a imaginii, dar permit și o prelucrare ulterioară, cu tipărirea imaginii pe film numai în cazuri de strictă necesitate.

Pentru o corectă evaluare a comportării materialului plăcii de blindaj, la impactul cu proiectilul, s-a apreciat ca necesară și explorarea radiografică.

Astfel, *ne-am propus evaluarea relevanței unui control radiografic la recepția tablelor de blindaj*, precum și stabilirea capacității acestei metode de a identifica elemente de particularitate ale materialului, de a stabili existența unei fisuri, sau de a stabili particularități ale modificărilor rezultate ca urmare a impactului, fără utilizarea, într-o primă etapă, a unui indicator de calitate a imaginii cu trepte și găuri (SR EN 14784-2:2006 Examinări nedistructive;)

Pentru verificarea probelor, s-a utilizat un aparat *ddR Multi-System*, produs în anul 2002, soluția tehnică fiind la nivelul anului 2000.

Aparatul este un aparat digital, cu raze X, pentru examinări radiografice avansate, destinat aplicațiilor plane, într-un mod digital direct, fără a folosi casete sau plăci de imagine. Imaginea este disponibilă pe o stație centrală computerizată *Swiss Vision*, la câteva secunde după expunere, eliminând manipularea și stocarea casetelor, developarea filmelor sau plăcilor fotosensibile. Aparatul este prezentat în figura 4.31. Pupitrul de comandă este prezentat în figura 4.32.

Subsistemele aparatului sunt următoarele:

- sistem de poziționare C-Arm;
- detector digital direct AddOn-Bucky;
- generator de raze X de tipul GEN-X-2000 Highliner;
- tub ultrarapid SRX 21-HS-1 (RAD-21);
- masă mobilă de tip ddR;
- sistem de procesare a imaginii Swiss Vision. Alte date tehnice necesar a fi specificate sunt:
- distanța focar detector 1500 mm;
- distanța minimă material expus detector 60 mm;
- rezoluție 5,2 Mpixeli;
- generator (80 kW) cu tehnologie de înaltă frecvență și control automat de expunere;
- tub raze X cu două focare, 100 kW și 180 Hz;
- colimator cu filtre de aluminiu și cupru;
- alimentare 380 V, 50 Hz.

Aceste date poziționează aparatul în zona aparaturii radiologice industriale destinată pieselor metalice de grosime mică.

Pentru probele analizate la studiul macroscopic al zonelor de impact (4 probe de grosime 4mm și 5 probe de grosime 6mm), s-au executat radiografii cu timpi de expunere și puteri de penetrare diferite. Astfel, s-au identificat ca parametri optimi de expunere, particularizați la tipul de aparat, următoarele valori:

- pentru grosimi ale probelor de 4mm:
 - puterea de penetrare: 75 kV;
 - contrast: timp de expunere: 57 ms; curent alimentare tub: 200 mAs;
- pentru grosimi ale probelor de 6mm:
 - puterea de penetrare: 105 kV;
 - contrast: timp de expunere: 32 ms; curent alimentare tub: 200 mAs.

Cu acești parametrii s-a executat câte o radiografie pentru fiecare probă. Imaginile s-au tipărit pe filme Agfa, cu developare uscată automată, pentru a limita eventualele erori de developare. *Deoarece calitatea imaginii obținute pe film, influențată de granulația acestuia, nu am apreciat-o ca satisfăcătoare, am trecut la prelucrarea imaginilor în format electronic*, standard DICOM (extensie fișier: .*dcm*).

Imaginile obținute, la scara 1/1, nu au permis identificarea unor particularități structurale relevante. În acest caz s-a procedat la prelucrarea grafică a imaginilor, utilizând aplicația MathCAD, printr-o filtrare de normalizare (uniformizare) în scopul eliminării inconvenientelor de rezoluție. Pentru câte o probă din fiecare grosime, zona de interes din imaginile originale este prezentată în figura 4.33, iar imaginile filtrate sunt prezentate în figura 4.34.

Imaginile filtrate au fost transformate în imagini 3D prin atașarea fiecărui pixel a unei valori pe axa OZ, valoare corespunzătoare intensității luminoase. Această valoare a fost normalizată pentru a fi adusă în plaja de valori corespunzătoare deformației măsurate, în scopul de a stabili o corespondență între cei doi parametrii. Graficele sunt prezentate în figura 4.34, pentru ambele probe.



a. placă cu grosimea de 4mm

b. Placă cu grosimea de 6mm

Figura 4.35 Imagine a zonei de impact, transformată în 3D. S-a ales reprezentarea color pentru o probă și, în nuanțe de gri pentru cea de a doua probă, în scopul de a stabili relevanta uneia sau alteia dintre variante.

Din examinarea imaginilor radiografice obținute, atât în format electronic cât și pe suport film, precum și a prelucrărilor acestora, se poate constata:

- imaginile zonei de impact fiind la scara 1/1 nu permit decât eventuale aprecieri calitative și nu cantitative ale consecințelor impactului;
- aparatul radiografic și filmele utilizate, deși de calitate foarte bună, nu au permis identificarea de fisuri, microfisuri sau neomogenități de material;
- prelucrările în 3D pot fi incerte, fiind greu de stabilit raportul între deformația reală și amplitudinea, pe axa OZ, a reprezentării;
- pentru proba de grosime 6mm prezentată, se poate presupune existența unui con în materialul tablei în punctul inițial de impact (ipoteză falsă pentru această probă);
- imaginea 3D a probei de grosime 6mm poate permite identificarea unor reborduri pe suprafaţa de impact, element de asemenea eronat. Datorită poziţionării în raport cu punctul de impact, această reprezentare nu poate fi cauzată de coroana circulară de grosime mai mare, identificată la examinarea macroscopică.

În concluzie, apreciem că *cercetarea radiografică a zonei de impact la o tablă de blindaj, nu se justifică deoarece nu oferă informații relevante* despre aceasta, chiar dacă se procedează la prelucrări complexe ale imaginilor obținute.

4.4. Analiza metalografică a zonei de impact

Pentru analiza comportării unui material la o solicitare dată, cercetarea metalografică reprezintă o etapă obligatorie. Astfel, pentru fenomenul de impact studiat, fenomen care are drept rezultat deformări plastice ale plăcii țintă, apariția de zone de ecruisare și eventuala manifestare a fenomenelor de rupere, cercetarea metalografică este metoda care poate oferi cele mai importante date despre comportarea materialului.

Ne-am propus astfel, studiul unor probe metalografice prelevate din zona de impact, în scopul identificării structurii, a modificărilor structurale locale,

precum și al identificării prezenței unor eventuale microfisuri și a modului de propagare a acestora.

Oțelul studiat, oțel de blindaj OB 2, este un oțel sudabil, cu compoziția chimică conform tabelului 4.3. Oțelul a fost tratat termic prin călire și revenire. Duritatea medie măsurată pe zonele pregătite ale probelor este de 392 HB.

Pentru examinarea probelor metalografice pregătite s-a folosit un microscop metalografic optic de tipul NEOPHOT -21 (C. Zeiss - R.D.G.), prezentat în figura 4.36.

Pentru a fotografia microstructura probelor metalografice pregătite, s-a folosit sistemul semiautomat MF–MATIC, sistem care a fost atașat microscopului metalografic NEOPHOT 21, precum și un aparat fotografic digital Kodak DC 4800.

Prelevarea probelor pentru examinare metalografică, s-a făcut cu jet de plasmă, la o distanță mai mare de 10x grosimea zonei influențată termic (ZIT) de către jet, la debitare.

Pregătirea suprafeței probelor metalografice s-a executat clasic, probele fiind înglobate în rășină epoxidică, în scopul protejării muchiilor de la limita materialului metalic. În figura 4.37 este prezentată o pereche de probe ($P_{1,2}$ și $T_{1,2}$) de grosime 4mm și, respectiv, 6mm, pregătite pentru atacul metalografic.

La o examinare preliminară a două dintre probe, s-au identificat fisuri ($P_{2,2}$ de 4mm și $P_{4,1}$ de 6mm). Studiul acestora va fi tratat la punctul 4.6. Pentru proba de grosime 4mm fisura este străpunsă, așa cum se poate observa în figura 4.38, iar pentru proba de 6mm aceasta este închisă (figura 4.39).



Figura 4.38 Fisură în materialul probei P_{2,2} de grosime 4mm (8x)



Figura 4.39 Fisură în materialul probei T_{4,1} de grosime 6mm (25x)

Structura materialului pe direcția de impact, este prezentată în figura 4.40 pentru o probă de grosime 4mm, și în figura 4.41 pentru o probă de grosime 6mm.



Figura 4.40 Structura metalografică pe direcția de impact, la o probă de grosime 4mm (400x)





Analiza metalografică efectuată a prezentat, în cazul ambelor grosimi de material, microstructuri tipice pentru un otel hipoeutectoid slab aliat cu crom, nichel și molibden. În urma tratamentului aplicat acestea au relevat o microstructură formată din sorbită și troostită de revenire.

Analizele microstructurale efectuate pe direcția de impact (și de deformare maximă) nu au relevat însă, diferențe semnificative pentru diferitele distanțe față de suprafața de impact. Ne propunem ca, într-o etapă ulterioară, să investigăm mai detaliat acest aspect, prin analize de microscopie electronică a zonelor respective.

Un element deosebit l-a reprezentat analiza microstructurii materialului în punctul de impact, la o probă la care a apărut conul de deformație cu vîrful înspre penetrator (figura 4.42).

Aici s-a putut observa, în secțiunea conului de deformație menționat, zone specifice de deformare plastică a materialului.



Figura 4.42 Structura materialului în punctul de impact la proba P_{2,1} (400x)

4.5. Studiul microdurității în zona de impact

Obiectivul acestei examinări a fost de a determina dacă există modificări structurale, neidentificate la examinarea microstructurală optică, în zona de impact a materialului cu proiectilul cinetic.

Pentru măsurarea microdurităților am utilizat un microdurimetru Micro-Vickers Hardness Tester CV-400 DAT, cu piramidă de diamant normală, cu baza pătrată și cu un unghi al fețelor, la vârf, de 136° (figura 4.43), sub o sarcină de 9,807 N, (microduritate HV 0,1).

Pentru măsurarea microdurității, s-a stabilit o grilă care presupune existența a 25 de puncte de măsurare pe axa OX și 24 de puncte de măsurare pe axa OY, așa cum este prezentată în figura 4.44.

Capitolul 4 - Cercetări experimentale privind impactul unei plăci de blindaj cu un penetrator cinetic

			Distanța față de punctul de impact, pe axa OX [mm]																											
		-15.00	-13.50	-12.00	-11.00	-10.00	-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.50	15.00
	-0.40	•	•																										•	
	-0.50	•	•	•	•																						•	•	•	•
_	-0.80	•	•	•	•	•	•																		•	•	•	•	•	
Ē	-1.10	•	•	•	•	•	•	•	•	•												•	•	•	•	•	•	•	•	
-	-1.20	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		_		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
bac	-1.30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
de im	-1.40	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	-1.50				•												•	•												
- ee	-1.00				•				•	•		•		•		•	•	•	•	•				•				•	•	
raf	-1.70																													
sup	-1.00																													
	2.00																													
ial	-2.00																													
2	-2.10																													
ota	-2.20																													
9	-2.40																													
1	-2.50																													
fa	-2.60																													
0	-2.70		_	1.1																										
axa	-2.80					•		•	•	•		•		•		•		•	•	•			•					_		
8	-2.90							•	•			•					•			•	•			•		_				
ota	-3.00								•				•					•	•		•									
ŭ	-3.10										•	•	•	•	•		•	•	•		•									
	-3.20														•	•	•													

Figura 4.44 Grila de măsurare a microdurității, pentru proba de grosime 4 mm

S-a măsurat microduritatea pentru câte o probă (probele $P_{1,1}$ și $T_{1,1}$ din foile de tablă P_1 de grosime 4mm, respectiv T_1 de 6mm. Valorile medii obținute, pentru probele evaluate, sunt prezentate în figurile 4.46 pentru tabla de grosime 4 mm și 4.47 pentru tabla de grosime 6 mm. Se observă că microduritatea se încadrează în limitele **280 – 410** HV 0,1. Analiza distribuției *microdurităților* pentru cele două grosimi de tablă permite următoarele observații:

- la tabla de grosime 4 mm se constată, în zona limitrofă punctului de impact, o reducere semnificativă a microdurității (zona roşie, figura 4.46), comparativ cu cea a metalului de bază, din zonele neafectate de impact (zona verde), exterioare zonei de deformare plastică;
- odată cu creșterea distanței față de punctul de impact, microduritatea crește, constatându-se chiar o ușoară ecruisare (zona albastră);
- pentru proba de grosime 6 mm se constată, în zona limitrofă punctului de impact, o ușoară reducere a microdurității (zona portocalie, figura 4.47), față de cea inițială a materialului;
- odată cu creșterea distanței față de punctul de impact se constată o ușoară creștere a microdurității, constatându-se chiar o zonă de relativă ecruisare (zona albastră), pe o arie mai restrânsă decât în cazul tablei de grosime 4 mm, dar pe o adâncime mai mare.

Astfel, deși analizele microstructurale optice nu au relevat aspecte semnificativ diferite în zonele de impact, determinările de microduritate sugerează existența unor modificări de structură care ar putea fi evidențiate, așa cum s-a menționat deja, prin microscopie electronică.

4.6. Studiul fisurilor identificate în zona de impact

La examinarea metalografică a unor probe au fost identificate fisuri, atât la materialul de grosime 4mm cât și la cel de grosime 6mm. S-a considerat că prin studiul detaliat al acestora se pot identifica particularități ale modului de propagare a unei fisuri, datele astfel obținute permițând să se aprofundeze elementele de intimitate ale fenomenului de fisurare, domeniu important datorită consecințelor pe care le au fisurarea și ruperea asupra unei structuri metalice.





Figura 4.47 Distribuția microdurității medii la materialul de grosime 6mm [HV 0,1]

Pentru prelucrarea imaginilor s-a folosit aplicația *Kodak Panorama Maker* 2000, aplicație care permite compunerea de imagini cu stabilirea automată și, important, manuală a reperelor de continuitate.

Pentru a obține imagini de ansamblu are fisurilor studiate, s-a procedat la parcurgerea traiectoriei fisurii.

Ca exemplu de analiză, se prezintă cercetarea efectuată asupra a două probe fisurate, de grosime 4mm (figura 4.48) și, respectiv, 6mm (figura 4.49).

S-a apreciat că prezentarea este necesar a se face la o scară adecvată, astfel încât să fie vizibile fisurile, pe toată lungimea lor. Aceste detalii sunt necesare pentru o mai bună apreciere a parametrilor corespunzători obiectivelor urmărite.



Pentru proba de grosime 6mm (figura 4.49) se poate constata:

- fisura nu ajunge la suprafața posterioară a plăcii;
- direcția de propagare a fisurii este sub un unghi de 45⁰ față de direcția de efort (figura 4.51);
- punctul de pornire al fisurii, în raport cu punctul de impact, sugerează o tendință de penetrare cu decuparea unui dop din materialul plăcii.



Figura 4.51 Traiectoria unei fisuri, la o probă de grosime 6mm - detaliu (100x)

Analiza fisurilor identificate permite câteva observații, dintre care menționăm:

• pentru proba de grosime 6mm se poate aprecia că fisura identificată nu este detectabilă decât prin analiză metalografică și, eventual, prin ultrasonografie, dacă aparatura utilizată este aparatură de precizie.

4.7. Considerații asupra fenomenului de fisurare la impact, prin studierea fisurilor identificate și aplicarea teoriei fractale

Existența fisurilor relevate de studiul metalografic al zonei de impact deschide perspectiva unei noi abordări. Astfel, din analiza traiectoriei fisurii, prezentată în figura 4.49, identificăm unele elemente de similaritate. Acestea sunt prezente, la o primă evaluare, în expunerile 2, 3, 4 și 6. Elementele de similaritate identificate la examinarea metalografică *ne deschid perspectiva abordării fenomenului de fisurare dintr-un punct de vedere diferit, mai precis prin prisma teoriei fractale*, aceasta fiind cea care abordează problematica similarității, mai precis a autosimilarității. Rezultatele vor putea fi corelate cu metoda de prelucrare a imaginilor, identificată la prelucrarea imaginilor radiografice.

4.7.2. Elemente de teorie fractală

Perioada 1875 – 1925 este o perioadă de criză în matematică. Astfel, apar forme care intră în contradicție cu conceptele despre spațiu, suprafață, distanță și dimensiune.

Astfel, concepția deterministă care, în conformitate cu teoria lui Newton și interpretarea lui Laplace, afirmă că toate evenimentele sunt determinate în raport cu timpul (cunoscând condițiile inițiale viitorul se poate prognoza), este revizuită în 1903 de matematicianul Henri Poincare, care afirmă că se poate întâmpla ca diferențe mici ale condițiilor inițiale să ducă la diferențe mari în evaluarea fenomenului, iar o eroare mică în evaluarea condițiilor inițiale să ducă la o eroare enormă a condițiilor finale. Acestea pot face ca predicția fenomenului să devină imposibilă. Teoriile mecanicii cuantice, apărute ulterior, acceptă incertitudinea și nedeterminismul.

Se ajunge la concluzia că *sistemele naturale au o evoluție aleatoare locală și un determinism global*. Evoluția aleatoare globală permite absorbirea șocurilor și supraviețuirea [88].

Limitele calculului manual împiedică progrese semnificative în perioada 1925 – 1960. În anul 1968, Aristid Lindenmayer introduce ideea automatelor celulare, în anul 1970 matematicianul John Conway crează *jocul vieții*, și, în anul 1975 Benoit Mandelbroth, în lucrarea *O teorie a seriilor fractale* pune bazele fractalilor, ca fiind elementul matematic care pune ordine în haos. Cartea manifest devine *Geometria fractală a naturii* publicată în anul 1982.

Mandelbroth crează termenul de *fractal* din latinescul *fractes* – un fragment neregulat. Îl mai numește și geometria naturii, geometria fractală fiind, spunea el, geometria omului. El afirmă că la nivelul universului proiectarea și șansa sunt sinonime, fractalii obligându-ne să acordăm mai multă atenție întregului decât părților.

Seria lui Mandelbroth lucrează în planul complex și presupune o aceeași operație aplicată în mod repetat, numerelor. Rezultatul îl reprezintă instalarea

instabilității în problemele de graniță, având totuși o regresie infinită a detaliului. Din punct de vedere geometric [90], seria este definită prin recurență.

Elementele algebrei lineare stau la baza reevaluării punctelor de vedere în problema anizotropiei. Analiza geometrică, sau a dinamicii procesului se aplică diferitelor fenomene, dintre care putem nominaliza:

- caracterizarea cantitativă, multiparametrică a imaginilor microscopice;
- diagnoza diverselor sisteme naturale sau create de om;
- modelarea proceselor de solidificare cu urmărirea germinării grăunților;

și, nu în ultimul rând,

• înțelegerea mecanicii ruperilor prin urmărirea propagării fisurii, în raport cu structura și caracteristicile materialului.

Abordarea tuturor acestor domenii utilizează un aparat matematic comun, care presupune evaluări ale mediei, dispersiei, spectrului Fourier, elemente de analiză statistică etc. [57]. În domeniul ruperii materialelor metalice, o serie de lucrări au încercat să stabilească un model care să aibă ca fundament teoria fractală [15, 24,43, 54, 68, 72, 73, 96].

În mod practic, prin analiza fractală se studiază obiectul în unitatea sa, se evaluează cantitativ procesul prin măsurători multiple, la scări (rezoluții) diferite și se caută corelații între valorile succesiv determinate. Astfel, se trece de la o evaluare de tip statistic, care uniformizează obiectul/fenomenul, la evaluarea fractală, care presupune determinarea caracteristicilor extinse ale întregului set de date.

4.7.3. Studiu de caz: determinarea dimensiunii fractale a unei fisuri identificate, produsă la impactul unei table de blindaj cu un penetrator cinetic

În ceea ce privește studiul unei fisuri, problema presupune definirea unei dimensiuni topologice a elementului de bază al construcției traiectoriei fisurii, element care are la bază nu *cantitatea* care construiește traiectoria fisurii, ci suprafața în care aceasta nu este prezentă. Această analiză geometrică nu poate fi însă completă dacă nu este corelată cu structura materialului și nu se definește foarte clar scara până la care rezultatul este relevant [96].

Deci, aplicarea teoriei fractale la studiul ruperii materialelor metalice, al fisurilor, încearcă să scoată în evidență corelații dintre macro și microfisuri, ținând cont de mecanismul producerii și propagării acestora. Elementul de particularitate al acestei abordări, îl reprezintă faptul că modelele fenomenului de fisurare sunt extrem de complexe deoarece trebuie să țină cont de fazele ruperii dar, mai ales de gradul de disipativitate a eforturilor, al structurii. Aceasta înseamnă că orice model trebuie abordat prin prisma unor cercetări experimentale care să permită particularizarea lui la materialul și la solicitarea evaluată.

Identificarea în probele analizate metalografic a două fisuri, ne deschide perspectiva evaluării rezultatelor prin prisma teoriei fractale. Deoarece problema este deosebit de complexă, ne-am propus *abordarea din punct de vedere fractal a unei fisuri, doar prin analizarea traiectoriei, și determinarea dimensiunii fractale* *prin abordare geometrică*. Spațiul la dispoziție nu ne permite continuarea analizei cu analiza energetică a fenomenului de impact, corelată cu analiza imperfecțiunilor structurale ale grăunților cristalini ai materialului utilizat în cadrul experimentului.

S-a abordat cazul fisurii din figura 4.50, fisură rezultată ca urmare a unei solicitări aplicată cu șoc, unei table din oțel de blindaj de grosime 6 mm, așezată simplu rezemat.

Calitativ, s-a determinat lungimea fisurii prin aproximarea acesteia cu o serie de segmente de dreaptă, într-o grilă de măsurare de lungime convențional aleasă ca fiind de 100 de unități, conform figurilor 4.53, 4.54 și 4.55.

S-au obținut valorile:

L1 = 104,75;	(4.16)
--------------	--------

L2 = 106,70; (4.17)

 $L3 = 108,97 \tag{4.18}$

S-a luat în considerare ipoteza că traiectoria fisurii reprezintă un fractal aleatoriu, dimensiunea fractală, de autosimilaritate, fiind un număr real, pozitiv, diferit de întreg.

Ecuația generală a unui astfel de fractal este de forma: [88]

$$L(s) = a \cdot s^{D} \tag{4.19}$$

unde:

- *s* = scara de reprezentare pe care s-a făcut măsurătoarea, ajustată cu convenția de măsurare;
- L(s) = lungimea măsurată;

 $a = \text{constant}\breve{a};$

D = dimensiunea fractală, de forma:

$$D = \frac{\ln(n(s))}{\ln(s)} \tag{4.20}$$

Pentru dimensiunea fractală, în raport de scara de măsurare s-a obținut graficul din figura 4.56.



Figura 4.56 Graficul dimensiunii fractale, raportată la scara de măsurare.



Figura 4.53 Grilă cu 10 segmente





Evaluând rezultatele obținute, se poate concluziona:

• pentru materialul și solicitarea analizate, dimensiunea fractală calculată cu relația (4.20) are o evoluție conform figurii 4.56;

• lungimea fisurii, în planul de măsurare, coplanar cu planul solicitării, este conformă cu relația (4.19).

Din studiul figurii 4.56 s-a putut aprecia că *metoda utilizată la determinarea dimensiunii fractale, nu ne oferă suficiente informații - în cazul dat - pe linie de autosimilaritate.* Rezolvarea problemei pentru parcurgerea următoarelor etape ar presupune, în primul rând, o altă abordare a determinării dimensiunii fractale, apoi o raportare la structura dată.

Pentru aceasta s-a apreciat că este potrivită *metoda determinării dimensiunii Hurst [90]*. Coeficientul Hurst are următoarele proprietăți:

- este bine definit pentru o serie dată;
- seria manifestă o mișcare browniană fracțională;
- probabilitatea distribuției este stabilă.

Altfel spus, coeficientul Hurst poate fi interpretat ca o memorie a sistemului. În continuare se poate defini dimensiunea fractală, ca fiind spațiul de probabilitate de forma (Mandelbroth, 1972):

 $D = 1 / H \tag{4.26}$

Ca urmare a rezultatelor obținute prin abordarea geometrică prezentată, se poate admite că metoda determinării coeficientului Hurst poate da rezultate mai bune.

4.8. Concluzii rezultate din cercetările experimentale

Cercetările experimentale desfășurate ne-au permis o serie de concluzii, în raport de tipul de investigație abordat.

Analiza macroscopică a permis o serie de considerații, care se pot constitui în elemente de plecare pentru evaluări analitice și experimentale ulterioare. Acestea sunt:

- prezența primei pante a conului de deformație, la tabla de grosime 4 mm este determinată de raportul mare între diametrul penetratorului și grosimea tablei (1,905 la grosimea de 4 mm față de 1,27 la grosimea de 6 mm), raport care face ca fenomenul să se apropie mai mult de modelul de penetrare cu decuparea unui "dop" de material, de către penetrator. *Ca urmare a investigațiilor radiografice*, se poate concluziona:
- examinarea radiografică a zonei de impact nu este suficient de relevantă, deoarece *acest tip de examinare nu permite identificarea unor eventuale fisuri* sau microfisuri;
- dacă rezultatele examinării nu sunt corelate cu rezultatele altor examinări, concluziile pot fi eronate.

Astfel, continuarea examinărilor cu utilizarea indicatorilor de calitate a imaginii cu trepte și găuri *nu se justifică*, acest tip de examinare nefiind suficient de relevantă.

Analizele microstructurale optică și de *microduritate* pentru cele două grosimi de tablă au permis următoarele observații:

- microstructurile sunt tipice pentru un oțel hipoeutectoid slab aliat cu crom, nichel și molibden; în urma tratamentului termic aplicat microstructura este formată din sorbită și troostită de revenire;
- analiza microstructurală optică pe direcția de impact, pentru diferite distanțe față de punctul de impact nu a relevat diferențe semnificative;
- la tabla de grosime 4 mm se constată, în zona limitrofă punctului de impact, o reducere semnificativă a microdurității (zona roșie, figura 4.46), comparativ cu cea a metalului de bază, din zonele neafectate de impact (zona verde), exterioare zonei de deformare plastică;
- odată cu creșterea distanței față de punctul de impact, microduritatea crește, constatându-se chiar o ușoară ecruisare (zona albastră);
- pentru proba de grosime 6 mm se constată, în zona limitrofă punctului de impact, o ușoară reducere a microdurității (zona portocalie, figura 4.47), față de cea inițială a materialului;
- odată cu creșterea distanței față de punctul de impact se constată o ușoară creștere a microdurității, constatându-se chiar o zonă de relativă ecruisare (zona albastră), pe o arie mai restrânsă decât în cazul tablei de grosime 4 mm, dar pe o adâncime mai mare.

Determinările de microduritate sugerează existența unor modificări de structură care ar putea fi evidențiate, așa cum s-a menționat deja, prin microscopie electronică.

Analiza prin prisma teoriei fractale a unei fisuri, așa cum s-a prezentat, permite o serie de considerații:

- abordarea doar din punct de vedere geometric a fenomenului ruperii, în particular al traiectoriei fisurii, prin prisma teoriei fractale, nu a permis obținerea de rezultate satisfăcătoare;
- analiza geometrică ar trebui completată cu analiza mecanicii ruperii, cu abordarea energetică (Mishnaevsky jr. abordează energia specifică a suprefeței fisurii în raport cu dimensiunea fractală în *Demange and Fracture of Heterogeneous Materials: Modelling and Aplication to the Improvement and Design of Drilling Tools*, Bakema, Rotterdam 1998 și în *Determination for the Time-to-Fracture of Solids*, International Journal of Fracture, vol. 79, nr. 4, 1996, pp. 342-350), și, respectiv, sinergică a procesului;
- analiza structurii materialului studiat, prin prisma capacității disipative a acestuia, este elementul care poate particulariza verosimilitatea direcției de propagare (probabilitatea direcției de propagare în raport cu valoarea dimensiunii fractale a fost studiată și de Xie Heping în *Fracture in Rock Mechanics*, Bakema, Rotterdam 1998), și apariția bifurcațiilor.

Toate aceste concluzii impun afirmația că obținerea de rezultate semnificative, în studiul fenomenelor de impact, obligă la abordări multicriteriale complexe.
Capitolul 5

Considerații și concluzii finale, contribuții originale. Direcții de valorificare și dezvoltare a rezultatelor cercetărilor

"Tancurile continuă să existe. Nu pentru că nu pot fi distruse de armele de înaltă tehnologie, ci pentru că au capacitatea să le înfrunte pe câmpul de luptă", Afirma generalul Tal (Israel). Conflictele militare din ultimii ani au scos în evidență nevoia de mobilitate, de dinamism dar, mai ales, nevoia de a proteja factorul uman, element decisiv al oricărui conflict armat. Pe această linie, tipul de tehnică ce materializează la cel mai înalt nivel puterea de foc, viteza de reacție și gradul de protecție asigurat personalului, este tehnica blindată.

5.1. Considerații și concluzii finale

Specialiștii militari [108, 116] consideră că, atât în prezent cât și în viitor, tehnica blindată rămâne singura care îmbină într-un mod eficient puterea de foc și mobilitatea, cu protecția echipajului și a aparaturii. La baza acestei opinii stau realitățile câmpului de luptă, dar și definirile conceptuale privind protecția. Pornindu-se de la principiile tactice de ducere a luptei, evoluția tehnicii blindate a fost marcată de asigurarea protecției pe următoarele direcții: camuflare (în toate spectrele), mobilitate, blindaj, și alte mijloace de protecție. Conceptul de protecție prin blindaj a fost rafinat și s-a materializat în următoarele forme: protecție totală, globală, diferențiată și generală. Soluțiile tehnice au pus în practică, pe parcursul anilor, aceste abordări, începând cu primele plăci metalice destinate protecției personalului, montate pe vehicule sau autovehicule.

Trecerea în revistă a istoricului autovehiculelor blindate, chiar succintă, a permis identificarea soluțiilor constructive de blindaje, începând cu placa metalică omogenă, laminată, tratată termic în scopul obținerii unui raport duritate / tenacitate optim, și ajungând la blindajele Chobham, de tip stratificat, în pachet omogen, având în afara blindajului de bază din oțel, casete din aluminiu sau mase plastice, materiale ceramice, rășini epoxidice.

Evoluția blindajelor trebuie privită însă, în strânsă legătură cu evoluția munițiilor antiblindaj, muniții generic numite *antitanc*. Evaluarea performanțelor acestora, a tendințelor de dezvoltare, se constituie într-o etapă obligatorie a oricărei investigații privind blindajele și materialele pentru blindaje. S-au trecut în revistă deci, munițiile existente în uz, de la aruncătoare de grenade portabile, arme antitanc fără recul, tunuri, aruncătoare și obuziere, și până la rachete sol-sol și aersol. S-a evaluat modul de acțiune a munițiilor prin prisma principiului care stă la baza acțiunii asupra blindajului: prin impact cu un penetrator dur, prin jet cumulativ de viteză mare și prin unde de șoc. S-au identificat distanțele până la care munițiile respective își păstrează eficacitatea și s-au evaluat probabilitățile de lovire a țintei. S-a constat astfel, că la distanțe mai mari de 2500 m probabilitatea de lovire scade sub 0,5 pentru o țintă fixă, și până la 0,35 pentru o țintă mobilă.

De asemenea, s-a constatat că proiectilul tip săgeată poate penetra orice tip de blindaj existent în uz, singurul blindaj care se poate opune cu oarecare succes fiind blindajul reactiv-exploziv (BRE).

S-au identificat astfel direcțiile prioritare de dezvoltare a munițiilor antiblindaj: creșterea vitezei la impact, extinderea capacităților de stabilizare sau autoghidare pe traiectorie, creșterea preciziei și optimizarea formei, mai precis a raportului lungime/diametru, raportate la materialul utilizat densitate transversală).

Cunoscându-se soluțiile constructive de blindaj și performanțele munițiilor antiblindaj, s-a acordat o atenție deosebită materialelor utilizate la construcția blindajelor moderne. Astfel , blindajele omogene, laminate, se realizează din oțeluri aliate cu crom, wolfram, molibden, mangan, beriliu. Tratamentul termic aplicat are drept scop creșterea durității și menținerea tenacității la un nivel satisfăcător unei bune rezistențe la penetrare, la impactul cu un proiectil cinetic.

S-au evaluat compozițiile chimice ale unor oțeluri pentru blindaje comercializate pe piața internațională, precum și cele ale oțelurilor românești cu aceeași destinație. S-a remarcat astfel, duritatea maximă a aliajului AMOX 560S – 540 HB și cea medie a aliajelor românești – 400 HB. Aliajele de aluminiu, utilizate tot mai mult pentru tehnica blindată ușoară, apreciate prin prisma eficacității relative (la asigurarea aceluiași grad de protecție, se exprimă prin raportul dintre masa unității de arie a aliajului și cea a unității de arie a unui blindaj omogen, laminat, din oțel), au evidențiat aliajele din seria 7000 (Al-Zn-Mg). Aici se pot aminti aliajele 7039 produs de ALCOA – SUA, 7017 produs de ALCAN – Anglia și 7020 produs de Pechine – Franța.

Utilizarea materialelor ceramice ca strat exterior dur al unui blindaj stratificat, cu duritatea de 2000 – 3000 HV, a scos în evidență eficacitatea masică de peste 2,0 în raport cu oțelul, evaluată la impactul cu gloanțe perforante de calibrul 7,62 mm. Materialele compozite structurale, carbon – carbon sau ceramică – ceramică, utilizate la diverse soluții constructive de blindaj au evidențiat eficacități masice de până la 2,2.

Datorită densității sale și a gradului mare de protecție la radiațiile exploziei nucleare, se extinde utilizarea uraniului sărăcit. Trebuie remarcat că utilizarea acestuia material și la proiectile, corelată cu legea lui *de Marre* de calcul a puterii de perforare (relația 1.2), și cu creșterea vitezei la țintă, demonstrează că fenomenul de penetrare este împins către zona interacțiunilor hidrodinamice dintre proiectil și blindaj (figura 1.8).

Problematica evaluării comportării unui material de blindaj, la impactul cu proiectilul, presupune, prin metoda analitică, rezolvarea unui sistem de 14 ecuații cu 14 necunoscute, în ipotezele omogenității și izotropiei proprietăților fizicomecanice. Complexitatea matematică a făcut ca o serie de firme să dezvolte aplicații software de modelare în element finit și de simulare, destinate modelării fenomenelor în domeniul mecanic și, in particular, în evaluarea comportării materialelor, la impact. Această evaluare, grosieră pentru materiale compozite, armate cu fibre din materiale nemetalice, cu structuri neomogene controlate, nu permit decât soluții cu un grad destul de mare de incertitudine.

Ca urmare, s-au dezvoltat o serie de aplicații dedicate, particularizate la structuri de material, dintre care amintim doar VCFEM – Voronoi Cell Finite Element Model.

Toate aceste aspecte expuse mai sus au permis formularea clară a obiectivelor cercetării, atât în domeniul teoretic cât și în cel experimental.

Un prim obiectiv, anume evaluarea relațiilor experimentale de calcul a penetrabilității unui blindaj, și a gradului de relevanță a rezultatelor, raportate la nivelul de cunoaștere a condițiilor de experimentare, a fost abordat pornind de la un număr de opt relații din literatura de specialitate. Prelucrarea acestora a permis să se stabilească faptul că trei sunt dependente de un singur parametru experimental, câte două de câte doi și, respectiv, trei parametrii, iar una face referire la geometria deformației plăcii de blindaj. Utilizând un set de valori corespunzătoare unui penetrator de oțel, s-au prelucrat relațiile dependente de un singur parametru și s-au trasat spațiile și curbele de penetrabilitate. Curbele din figura 2.8 au permis concluzia că relațiile oferă rezultate semnificativ diferite, rezultate dependente de condițiile de experimentare, condiții la care accesul este restricționat.

Deci, relațiile recomandate în literatură nu pot fi utilizate decât pentru aprecieri grosiere și nu permit obținerea de rezultate suficient de certe pentru a fi utilizate în proiectarea de materiale pentru blindaje, sau de blindaje.

O atenție deosebită s-a acordat efectului Hopkins datorită consecințelor exfolierii suprafeței posterioare a unei plăci de blindaj, sub formă de schije mari, chiar fără străpungerea acestuia. Analizându-se, din punct de vedere cinematic, deplasarea undelor de șoc generate la impact, atât în corpul penetratorului cât și în blindaj, s-au definit condițiile cinematice de evitare a efectului Hopkins (relațiile 2. 51, 2.52, 2.57 și 2.58).

Prin prisma acestora, s-a apreciat ca necesară trasarea suprafețelor soluțiilor pentru care apare acest fenomen. Pentru două cazuri de întâlnire a fronturilor de undă s-a demonstrat că exfolierea suprafeței posterioare a plăcii, la impact, poate apare pentru toată plaja de valori analizată. De asemenea, s-a demonstrat că se impune analiza detaliată a acestui fenomen, cu luarea în considerare și a reflexiilor secundare, cu particularizarea la material a lungimii de undă, și cu evaluarea energiei frontului de undă.

Pentru modelarea în element finit a fenomenelor, la impact, pentru un material utilizat ulterior în cercetările experimentale, s-au trecut în revistă avantajele și dezavantajele aplicațiilor ANSYS, AUTODYN, COSMOS/M, ADINA și LSDYNA3D. S-a optat pentru LSDYNA3D apreciindu-se că satisface foarte bine cerințele obiectivelor stabilite. Obținându-se o licență temporară, s-a elaborat modelul și s-au făcut simulări de impact pentru table de blindaj din oțel OB 2 de grosime 4mm și, respectiv, 6mm. S-au evaluat deformațiile și evoluția lor în timp, vitezele și accelerațiile nodurilor centrale ale suprafeței de impact, accelerațiile unor noduri de pe linia mediană a suprafeței de impact, eforturile totale din materialul plăcii, energiile plăcii și penetratorului.

Analiza rezultatelor a permis validarea modelului și evaluarea comportării plăcii țintă. S-au determinat și localizat în timp etapele de deformare la impact și, pentru materialul studiat, s-a determinat momentul de timp la care procesul de deformare plastică se încheie -0,52 ms de la contact.

Cercetările experimentale au avut drept obiectiv validarea modelului elaborat, analiza modificărilor structurale ale materialului studiat, în zona de impact, și identificarea de rezultate pe baza cărora să se poată formula noi cerințe pentru materialele utilizate pentru blindaje.

S-au folosit table de blindaj din aliaj OB 2, de grosime 4mm și, respectiv, 6mm. S-au prelevat 20 de probe din 5 foi de tablă de grosime 4mm și 15 probe din 5 foi de grosime 6mm, de dimensiuni 150x150 mm. S-au executat încercări prin tragere reală asupra a 16 probe de grosime 4mm și asupra probelor de grosime 6mm, cu un penetrator cinetic de calibru 7,62 mm, de masă 7,8 g și viteza de impact 680-700 m/s, normală la suprafața plăcii așezată simplu rezemat.

După eliminarea valorilor aberante s-au evaluat deformațiile, profilul tablelor după impact și grosimile efective într-un plan perpendicular pe suprafața plăcii și care trece prin punctul de impact. Analiza dimensională a permis aprecierea că modelul elaborat anterior corespunde, datele obținute fiind confirmate experimental.

S-a procedat la analiza radiografică a zonei de impact, pentru câte o probă din fiecare foaie de tablă, atât de grosime 4mm cât și 6mm. Imaginile, preluate în

format digital au fost normalizate și transformate în 3D, color și în tonuri de gri, în raport de intensitatea luminoasă a fiecărui pixel (figura 4.35). Analiza imaginilor rezultate a permis o serie de concluzii dintre care se pot aminti: imaginile nu oferă informații despre structura materialului, omogenitatea sa, sau despre existența unor fisuri; imaginile în 3D nu sunt relevante și, contrar așteptărilor, imaginile în tonuri de gri sunt mai ușor de evaluat.

Concluzia finală pentru analiza radiografică este că aceasta nu se justifică, prin prisma informațiilor asupra materialului, raportate la costuri.

Următoarea etapă în evaluarea rezultatelor experimentale a constat în analiza microstructurală optică și a microdurității. Examinarea a peste 400 de imagini metalografice, la diferite scări, a permis identificarea unei microstructuri de oțel hipoeutectoid slab aliat cu crom, nichel și molibden care, în urma tratamentului termic aplicat relevă prezența de sorbită și troostită de revenire. De asemenea, analiza microstructurii pe direcția solicitării, la diferite distanțe față de suprafața de impact, nu a relevat diferențe semnificative. Pentru o probă la care s-a format un con de deformare cu vârful înspre penetrator, s-au identificat zone specifice de deformare plastică (figura 4.42).

Studiul microdurităților în zonele de impact au scos în evidență zone de reducere a acesteia, zone de dispunere, arii și forme diferite pentru probele de grosime 4mm și, respectiv, 6mm, conform figurilor 4.46 și 4.47. Se remarcă, de asemenea, și zone de ușoară ecruisare, dar neidentificate metalografic.

Analizele microstructurale sugerează necesitatea continuării studiului prin microscopie electronică.

Deoarece pe parcursul analizelor microstructurale au fost identificate fisuri, iar o imagine de detaliu a unei fisuri în materialul de grosime 6mm sugera elemente de autosimilaritate în traiectoria acesteia (figura 4.49), s-a procedat la analiza geometrică a acesteia, prin prisma teoriei fractale. Utilizându-se o metodă geometrică de determinare a dimensiunii fractale pentru o lungime măsurată, aplicând trei grile cu 10, 20 și respectiv 30 de elemente (figurile 4.53, 4.54 și 4.55), s-a trasat graficul din figura 4.56. Din analiza acestuia s-a constatat că metoda utilizată, pentru cazul dat, nu oferă suficiente informații pe linie de autosimilaritate.

Cercetările teoretice și experimentale desfășurate au permis identificarea de elemente caracteristice materialului studiat, privind comportarea la impact, au permis realizarea unui model ce poate fi utilizat și la analiza comportării blindajelor multistrat, și au permis creionarea unor direcții de valorificare a rezultatelor și de dezvoltare ulterioară a cercetărilor.

Se poate afirma că lucrarea și-a atins obiectivele și a demonstrat, de asemenea, că studiul comportării la impact a materialelor necesită abordări multicriteriale complexe. Aceste abordări presupun analiza cinematică, dinamică și energetică la nivel macroscopic, în ipotezele omogenității și, în unele cazuri a izotropiei, și analiză energetică, statistică și fractală la nivel microscopic, în ipotezele neomogenității structurale și anizotropiei, cel puțin pe unele direcții.

5.2. Contribuții originale

Prin cercetările efectuate și prezentate succint în lucrarea de față, prin modul de abordare a temei, prin metodologia de lucru conformă principiilor ingineriei sistemelor și prin rezultatele obținute, s-au adus o serie de contribuții originale în domeniul abordat.

Principalele contribuții sunt, în esență, următoarele:

- 1. Sistematizarea unui vast material bibliografic cu privire la tehnica blindată și la munițiile antitanc (s-au identificat: 188 tipuri cu 2587 variante constructive de tehnică blindată; 713 tipuri cu 2136 variante constructive de tehnică de artilerie; 92 tipuri cu 1407 variante constructive de tehnică de artilerie îmbarcată / autotunuri; 18 tipuri cu 480 variante constructive de rachete sol sol; 8 tipuri cu 77 variante constructive de rachete aer sol).
- 2. S-au analizat, sistematizat și prezentat într-o formă accesibilă munițiile antiblindaj, limitele și tendințele evolutive ale acestora, conceptele de protecție și protecție prin blindaj, soluțiile constructive de blindaje, cu accent pe materialele utilizate în fabricarea tablelor de blindaj. S-a identificat tendința de utilizare a materialelor compozite și ceramice, a rășinilor epoxidice, a aliajelor de aluminiu și a uraniului sărăcit. Pentru blindajele subțiri predomină aluminiul și materialele polimerice. Kevlarul, titanul și țesăturile din fibră de carbon în masă de rășină sintetică se folosesc punctual datorită prețului de cost ridicat. Pentru perspectivă nu se întrevede
- renunțarea la oțelurile aliate și tratate termic.
 3. S-a identificat tendința de realizare de noi muniții prin mărirea preciziei și a vitezei la țintă a penetratorului, tinzându-se spre perforarea hidrodinamică a blindajului.
- 4. S-a identificat tendința ca, pentru studiul comportării materialelor la diverse solicitări, să se utilizeze aplicații software dedicate, orientate pe obiect, aplicații care pot modela structuri reale , obținute prin investigații microstructurale. Nici una dintre aplicațiile întâlnite în literatura de specialitate nu a fost disponibilă, nici măcar în varianta de test.
- 5. Prin utilizarea unui model multicriterial complex, ales din două modele analizate comparativ, s-a stabilit că tendința nu este de modernizare a blindajelor existente în uz, ci de a proiecta noi blindaje și materiale pentru blindaje, cele în exploatare beneficiind de sprijinul altor forme de protecție.
- 6. S-a demonstrat că relațiile experimentale de calcul a penetrabilității unui blindaj, relații întâlnite în literatura de specialitate, nu pot fi de un real folos

fără cunoașterea în detaliu a condițiilor experimentale de determinare a lor. Deoarece aceste condiții sunt cu acces restricționat, utilizarea relațiilor analizate nu permite decât aprecieri generale, orientative. Cu toate acestea, sa demonstrat că parametrii experimentali se interpretează ca o capacitate specifică materialului blindajului, de disipare a energiei de impact, cu deformare minimă, în condiții date.

7. S-au definit, pentru două cazuri de cinematică a frontului de undă, funcțiile de scop ale sintezei optimale pentru evitarea efectului Hopkins, de forma:

$$l_b > u_b t - \lambda/2 \tag{2.51}$$

(2.52)

(2.58)

sau:

şi

$$l_{\rm b} > (u_{\rm b} t + \lambda/2)/3$$
 (2.57)

sau:

cu notatiile conform capitolului 2.2.

 $l_{p} > (u_{p} t_{1} + u_{b} t_{2} - l_{b} + \lambda/2) / 2$

 $l_{p} > (u_{p} t_{1} + u_{b} t_{2} - l_{b} + \lambda/2) / 2$

De asemenea, prin studiu de caz s-a demonstrat că acest fenomen se poate manifeste în toate blindajele cu grosime de până la 200 mm dacă penetratorul are o lungime mai mică de 300 mm (\approx calibrul 85mm) sau, în orice situație de materiale pentru blindaj și penetrator pentru calibre mai mari de 12 mm.

- 8. Cu ajutorul unei aplicații software alese dintre mai multe disponibile, s-a elaborat un model utilizat pentru simularea fenomenelor la impactul cu un proiectil cinetic. Rezultatele au permis stabilirea următoarelor elemente:
 - penetratorul se deformează rapid în prima etapă, într-o perioadă de timp de aproximativ 0,2 ms; aceasta se datorează caracteristicilor materialului penetratorului în raport cu viteza de impact și cu materialul plăcii țintă;
 - în intervalul de timp 0,1 0,3 ms, placa suferă o deformare locală accentuată;
 - *în intervalul 0,3 0,5 ms apare încovoierea elastică a plăcii țintă, în plane mediane,* perpendiculare pe suprafața de impact (datorită condiției placă simplu rezemată pe nodurile din colțurile suprafeței posterioare);
 - tot în acest interval de timp se extinde zona radială, în raport cu punctul de impact, în care apare deformarea plastică a plăcii;
 - inerția materialului plăcii la deformare plastică este de 0,2 μs, cu procesul de deformare al plăcii încheiat la 0,52 ms.
- **9.** S-au identificat o serie de restricții și particularități pentru un model din acest domeniu:
 - s-a demonstrat că, pentru problemele de contact, în particular de impact, discretizarea corpurilor trebuie să permită *contactul inițial nod cu nod*, nu nod cu suprafață (de element);
 - s-a demonstrat că, pentru studiul comportării unui material pentru o placă de blindaj, este mai avantajoasă soluția de reazem simplu la

limite, soluția de încastrare fiind avantajoasă doar la studiul unui ansamblu (eventual construcție metalică sudată).

Cercetări experimentale care au validat modelul elaborat.

- **10.** S-a demonstrat că studiul radiografic al zonei de impact nu se justifică economic; nu se pot identifica fisuri, modificări structurale, iar profilul craterului de impact obținut prin prelucrarea imaginilor în 3D nu este relevant.
- 11. S-a demonstrat că, pentru cazul studiat, analiza microstructurală optică nu pune în evidență modificări structurale semnificative, pe direcția de impact. Studiul microdurității demonstrează că astfel de modificări există, cel puțin sub forma unor zone de ecruisare ușoară.

Cele două concluzii impun necesitatea continuării explorării prin microscopie electronică.

Forma și dispunerea câmpurilor de microduritate confirmă mecanismul de penetrare identificat, pentru cazul studiat.

12. Prin analiza fisurilor identificate s-a stabilit necesitatea caietului de sarcini pentru recepția tablelor de blindaj.

Prin abordarea fractală a studiului fisurii, s-a demonstrat că abordarea geometrică a traiectoriei fisurii este insuficientă și de impune, deci, abordarea energetică.

Astfel, corelând rezultatele obținute prin modelare – simulare și experimentare, mai precis energia disponibilă pentru propagarea fisurii, direcția fisurii, prezența unui grăunte cristalin pe direcția de fisurare și bifurcarea traiectoriei, prin prisma teoriei fractale corelată cu o metodă de prelucrare grafică elaborată la studiul radiologic, s-au identificat modalități de abordare fractală a fenomenului de fisurare, cu jalonarea unor restricții.

5.3. Direcții de valorificare și dezvoltare a rezultatelor cercetărilor

Rezultatele obținute în urma cercetărilor efectuate au fost valorificate prin publicarea de 13 articole și comunicări la sesiuni de comunicări științifice, publicarea de carte în calitate de coautor (2 titluri).

Deoarece lucrarea de față și cercetările care au stat la baza ei nu au vizat decât câteva aspecte din problematica vastă a fenomenelor la impactul unui penetrator cu o placă metalică, se pot creiona unele direcții de cercetare ce se pot aborda pe baza rezultatelor obținute. Dintre acestea se pot menționa:

1. Continuarea cercetărilor referitoare la modificările structurale determinate de impactul cu proiectilul, prin efectuarea de analize de detaliu prin microscopie electronică.

- 2. Abordarea energetică a problemelor de progresie a fisurii, pentru probleme de impact, în paralel cu analiza energetică a efectului Hopkins.
- **3.** Analiza comportării materialului tablei de blindaj, la impact, prin prisma entropiei. Considerând că tenacitatea unui grăunte cristalin este mai mare (la același material) dacă gradul de organizare este mai mare, deci entropia mai mică, este important de studiat cum se modifică câmpul de probabilitate al traiectoriei fisurii, deci, care este consumul energetic la propagarea sa. Altfel spus, cum influențează scăderea entropiei rezistența la fisurare a unui material, la o solicitare dată.
- **4.** Studiul zonei disipative a eforturilor, caracteristică materialului și dinamicii solicitării, în raport de natura și densitatea defectelor structurale, și în raport de dimensiunea și dispunerea grăunților cristalini.
- **5.** Studiul fenomenului de fisurare, a modului de apariție și progresie a fisurii, în condițiile rafinării modelului creat, cu următoarele particularități:
 - discretizarea structurii cu grăuntele cristalin ca element;
 - discretizarea ca element separat a componentelor intercristaline;
 - stabilirea particularităților comportamentale la o solicitare dată, a celor două elemente, cu cuantificarea influenței defectelor structurale; *notă:* aceste trei elemente sunt întâlnite și la materialele compozite, dar defectele structurale devin neomogenități locale;
 - considerarea suprafeței exterioare a grăuntelui cristalin ca zonă de discontinuitate.

 Amorosi Angelo, ş.a. - A Generalized Backward Euler Scheme for the Integration of a Mixed Isotropic-Kinematic Hardening Model for Clays, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 136-139

- 2. Arias Irene, Jaroslav Knap, Michael Ortiz *The Noise Spectrum of High-Energy Crack Branching*, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 333-335
- **3.** Arniceru, Gheorghe Organizarea generală, blindajul, carcasa și turela blindatelor cu *şenile*, Editura Academiei Tehnice Militare, București, 1983
- **4.** Arranz A., N. Petrinic, E. Súli *Dicontinuos Element Approximation for Dynamic Fracture,* în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 234-327
- 5. Askes H., Metrikine A. V., Naaktgeboren H. *A dynamically consistent gradient model derived from a discrete microstructure: higher-order stiffness and higher-order inertia,* în Computational Modelling of Concrete Structures (EURO-C), Austria, 2003, pp. 43-52
- 6. Askes H., Aifantis E.G. Numerical modeling of size effects with gradient elasticity -Formulation, meshless discretization and examples, International Journal of Fracture, no. 117, 2002, pp. 347-358
- 7. Atluri N. Satya Computational methods in the mechanics of fracture, Tokyo, 1986
- 8. Backofen jr. Joseph E. *Shaped Charges versus Amour*, revista ARMOUR, nr. 6, vol. LXXXIX, iulie august 1980, SUA, pp. 60 64
- 9. Backofen jr. Joseph E. *Tank War Machine for Land Combat*, revista ARMOUR, nr. 4, vol. LXXXIX, ianuarie februarie 1980, SUA, pp. 10 12
- Backofen jr. Joseph E. *Kinetic Energy Penetrators versus Armour*, revista ARMOUR, nr. 5, vol. LXXXIX, martie aprilie 1980, SUA, pp. 13 17
- 11. Baek Jong-Hyun, Young-Pyo Kim, Woo-Sik Kim, Young-Tai Kho Fracture toughness and fatigue crack growth properties of the base metal and weld metal of type 304 stainless steel pipeline for LNG transmission, International Journal of Pressure Vessels and Piping 78, Elsevier Ed., 2001, pp. 351-357
- 12. Barkanov Evgeny Introduction to the Finite Element Method, Riga Technical University, Riga, 2001, 70 pag.
- **13.** Bathe Klaus-Jürgen *Finite element procedures in engineering analysis,* Perenice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982, ISBN 0-13-317305-4
- 14. Bellman R. ş.a. Programerea dinamică aplicată, Editura Tehnică, București, 1977
- **15.** Bennett Valerie, David L. McDowell *Models for small fatigue crack growth behaviour,* studio la Georgia Tech University, SUA, 200121 pag.
- **16.** Bia C., V. Ille, M.V. Soare *Rezistența materialelor și teoria elasticității*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983

17.	Bogach Andrey - <i>RVS-10000 Oil Tank Destruction</i> , CAD-FEM GmbH, pe site-ul
10	http://www.cadfem.ru, Moscow, Russia, 2003
18.	Bonet Javier, Richard D. Wood - Mechanics for Finite Element Analysis, Cambridge University Press, UK, 1997, ISBN 0 521 57272
19.	Böttcher CS., Frik S Consideration of Manufacturing Effects to Improve Crash
	Simulation Accuracy, în 4 th European LS-DYNA Users Conference, ed.
	Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2003, pp. B.I.01-
	B.I.09
20.	Bottet E., D. Pirotais - Introduction d'un modale de comportement elastoplastique dans le
	<i>code eulerien instationnaire CEE</i> , Sciences et technique de l'armement, nr.
21	04, 1965 Prank Postion Adnon Ibrahimbagavia Uras Pahina Finite Deformation Plasticity in 2D
41.	Shall Model in COMPLAS VIII VIII th International Conference on
	Computational Plasticity Parcelona 2005 pp. 204-205
22	Broek David Elementary anginagring fracture machanics Martinus Nijhoff Publishers
22.	Kluwer Academic Publishers Group 1084 ISBN 90-247-2580-1
23	Brokenbrought R I - Properties of Structural Steels Section 1 Properties of Structural
20.	Steels and Effects of Steelmaking an Fabrication R I Brockenbrought &
	Associatea Inc. SUA 2001 40 pag
24.	Bring Michael Marcilio Alves - Experiments and Numerical Analysis of Anisotropically
	Demanged Elastic-Plastic Solids in COMPLAS VIII VIII th International
	Conference on Computational Plasticity. Barcelona, 2005
25.	Burrows G. J NATO's New Organization and its Impact on and its Impact on Modeling
	and Simulation Activities, ITEC 2004 Conference London, 20 to 22 April
	2004, 31 pag.
26.	Chasek Gary, Brwnsword Lisa - A Case Study in Structural Modeling, US Department of
	Defence, SUA, 1996, ESC-TR-96-035, 64 pag.
27.	Chiriac Vasiliu, ş.a Motorizarea și mecanizarea armatei Române, Editura Transport
	Rutier, București, 2000, ISBN 973-98146-8-9
28.	Chung Christopher ş.a Simulation Modeling Handbook, CRC Press, SUA, 2004, ISBN 0-
20	8493-1241-8, 5/4 pag.
29.	Chung Unristopher A Simulation Modeling Hanabook - A Practical Approach, UKU
30	Cook Pohert D Einite Element Modeling for Strang Analysis John Wiley & Song Inc.
30.	COOK RODERT D Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Whey & Sons Inc., SUA 1004 ISBN 0.471 10774 3 330 pag
31	Cristea Sorin - Razele asigurării tehnice, Editura Academiei Fortelor Terestre, Sibiu, 2001
51.	ISBN – 973-8088-55-0
32.	Cristea Sorin Aspecte privind colaborarea și dezvoltarea de noi produse, Revista
	Academiei Forțelor Terestre, nr. 3(19), Editura Academiei Forțelor
	Terestre, Sibiu, 2000, pp. 82-88
33.	Cristea Sorin - Protecția prin blindaj - amenințări și soluții, Revista Academiei Forțelor
	Terestre, nr. 3(19), Editura Academiei Forțelor Terestre, Sibiu, 2000, pp.
~ ~	88-92
54.	Uristea Sorin - <i>Realizari și tendințe în construcția blindajelor mașinilor de luptă</i> , referat
25	Cuiston Sonin Materiale nontry blindaie referet destorat Universitated Lucian Disco
33.	Sibin 2002
36	Cristea Sorin - Comportarea unor table de blindai la solicitările specifice impactului cu
50.	proiectilul, referat doctorat, Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, 2003

81

37.	Cristea	Sorin	– Procesul	l de ingin	eria sisten	nelor și	experiența	acumulată	, Anuarul
			Academiei	Forțelor	Terestre,	nr. 2 (2002-2003),	Editura	Academiei
			Forțelor Te	restre, Sibi	u, 2004, pp	. 315-31	9, ISSN 1583	3-7823	
• •	~ •	~ •							

- 38. Cristea Sorin Asupra unor abordări a problematicii modelării şi simulării în domeniul mecanic, Revista Academiei Forțelor Terestre, nr. 2-3(30-31), Editura Academiei Forțelor Terestre, Sibiu, 2003, pp. 146-162, ISSN 1582-6384
- **39.** Cristea Sorin Restricții în sinteza optimală a blindajului, Sesiunea de comunicări științifice Provocările științei în secolul XXI a Academiei Forțelor Terestre, Sibiu, 5 decembrie 2003, pp. 139-148, ISBN 973-8088-85-2
- **40.** Cristea Sorin Asupra sintezei optimale a tablei de blindaj, A VIII-a Sesiune de comunicări științifice a Academiei Forțelor Terestre, Eficiență și calitate în învățământul superior, Sibiu, 11-12 iunie 2004, pp. 398-403, ISBN 973-8088-87-9 (sesiune), ISBN 973-8088-92-5 (secțiune)
- 41. Cristea Sorin Rezultate experimentale privind comportarea unor table de blindaj la impactul cu proiectilul, A IX-a Sesiune de comunicări ştiințifice cu participare internațională a Academiei Forțelor Terestre, *Ştiința şi învățământul fundamente ale secolului al XXI-lea, Sibiu, 25-26 noiembrie 2004, pp. 204-209, ISBN 973-7809-04-1 (sesiune), ISBN 973-7809-03-3 (secțiune)*
- **42.** Cristea Sorin Considerații asupra sintezei optimale în cazul efectului Hopkins, A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională a Academiei Forțelor Terestre, Leadership și management la orizonturile secolului al XXI-lea, vol. 11, Sibiu, 24-25 noiembrie 2005, pp. 118-126, ISBN 973-7809-29-7
- **43. Cristea Sorin** *Asupra dimensiunii fractale a fisurii materialelor metalice,* A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională a Academiei Forțelor Terestre, *Leadership și management la orizonturile secolului al XXI-lea,* vol. 11, Sibiu, 24-25 noiembrie 2005, pp. 126-137, ISBN 973-7809-29-7
- **44.** Crouch Roger S., Harm Askes *Efficient Stress Return Algorithms using Energy-Mapped Stress Space*, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 147-150
- **45.** Cyril M. Harris, C.E. Crede *Shock and Vibration Handbook*, Editura Tehnică, București, 1969, (tr. lb. engleză)
- 46. Deac Valeriu, ş.a. *Ştiinţa materialelor*, Editura Universității Lucian Blaga, Sibiu, 2000
- **47.** Demetrios R., N. Davis *Elastoplastic impact on rigid targets,* A.I.A.A. Journal, nr. 5/12, 1967
- **48.** Denyse de Araújo Tereza ş.a. *Adaptative Simulation of Elastic-Plastic Fracture Processes,* at Computational Mechanics, Barcelona, Spania, 1998, 12 pag.
- 49. Dexter Robert J., John W. Fisher Fatigue and Fracture, e-book, CRC Press, SUA, 1999
- **50.** Dieter George E. Jr. *Metalurgie mecanică*, traducele din limba engleză, Editura Tehnică, București, 1970
- **51.** Dikshit S.N. Complexity of Add-on Armour and Remedial Measures (Complexitatea blindajelor suplimentare şi măsuri de remediere a inconvenientelor), revista "Defence Science Journal", nr.2, aprilie 1996, vol.46, India, pp.109-113
- 52. Dodescu Gheorghe ș.a. Simularea sistemelor, Editura Militară, București, 1986
- **53.** Dufour Paul *The Basics of the Finite Element Method*, Belcan Engineering Group Inc., SUA, 2003, ANSYS Tips, 17 pag.
- 54. Dyskin A.V. *Cracks in fractal materials,* at Structural Integrity and Fracture, SIF 2004, www.eprint.uq.edu.au, 2004, 18 pag.

Bil	blia	gr	af	ĩe
Du	,,,,,,	81	чj	w

55.	Eftimescu Nicolae, ș.a <i>Modelarea matematică a acțiunilor de luptă,</i> Editura Militară, Bucuresti, 1983
56.	Elm Joseph P., John E. Robert - Integration of Computer-Aided Design and Finite Element Analysis Tools in a Small Manufacturing Enterprise, Carnegie Mellon University, SUA, 2003, ESC-TR-2003-015, 67 pag.
57.	Falconer Keneth - <i>Fractal Geometry</i> - <i>Mathematical Foundations and Applications</i> , editura Wiley, Marea Britanie, 2003, ISBN 0-470-84862-6, 367 pag.
58. 59.	 Farrar C.L. şi D.W. Leeming - Military Ballistics, Brassey's Publichers Limited, 1983 Feng, Y. T. ş.a Asynchronous/Multiple Time Integrators for Multi-Fracturing Solids and Discrete Systems, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 189-192
60.	Fischer Lisa L., Glenn E. Beltz – <i>Continuum mechanics of crack blunting on the atomic</i> <i>scale - elastic solutions</i> , Modelling Simulation, Matherial Science Engineering, nr. 5, IOP Publishing Ltd, Marea Britanie, 1997, pp. 517-537
01.	<i>materials,</i> în Computational Modeling of Concrete Structures (EURO-C), Austria, 2003, pp. 67-70
62.	Grexa Juraj, Josef Smolik - <i>Strela nebo pancir</i> , revista ATOM, nr.11, R.S.C., 1975, pp. 328- 330
63.	Guo Young - <i>Eight-Node Solid Element for Thick Shell Simulation</i> , în 6 th International LS- DYNA Users Conference Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 8.27-8.47
64.	Halil Bil și colectiv - 2D FE Modeling of Machining: a Comparison of Different Approaches with Experiments, în COMPLAS VIII, VIII th International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005
65.	Hallquist John O LS-DYNA, Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 1998, 498 pag.
6 6 .	Hangos K.M. ş.a The Analysis and Control of Nonlinear Process Systems, Springer- Verlag London Limited, England, 2004, ISBN 1-85233-600-5, 335 pag. Hesrn F. J. Machanics of Materials, vol. 1, An Introduction to the Machanics of Flastic
07.	and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Great Britain, 2000, ISBN 0 7506 3265 8, 481 pag.
68.	 Hogan S.J., A.R. Champneys, B. Krauskopf, M. Di Bernardo, R. E. Wilson, H.M. Osinga, M. E. Homer - <i>Nonlinear Dynamics and Chaos</i>, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, UK, 2003, ISBN 0 7503 0862 1, 366 pag.
69.	Hong Yuoshi, Yu Qiao - An analysis on overall crack-number-density of short-fatigue- cracks, Mechanics of Materials, nr. 31, Elsevier Science Ltd., Marea Britanie, 1999, pp. 525-534
70.	Hutton David B Fundamentals of Finite Element Analysis, editura Mc Graw Hill, SUA, 2004, ISBN 0-07-239536-2, 505 pag.
71.	Hyde Brian – Effects of Carbon on Fracture Mechanism in Nanocrystaline BCC Iron – Atomistic Simulations, teză de doctorat, Virginia polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2004
72.	José de Anchieta Rodrigues, Victor Carlos Pandolfelli - <i>Insights on the Fractal-Fracture</i> <i>Behavior Relationship</i> , Materials Research, Vol. 1, No. 1, 1998, pp. 47-52
73.	Kametani Hiroshi - Fractal Analysis of the Surface Cracks on Continuously Cast Steel Slabs, Metallurgical and Materials Transactions, vol. 29B, Dec-98, MMTB-9812-1261F, pp. 1261-1269

74.	Kapitaniak Tomasz, Steven R. Bishop - <i>The Illustrated Dictionary of Nonlinear Dynamics</i> and Chaos. John Wiley & Sons Ltd England 1998 ISBN 0-471-98323-3
75.	Kerman T.N., P.E. Duwez - The propagation of plastic deformation in solids, revista "Iournal of Applied Physic" pr 21, 1960
76	Vinslow P High valacity imaget phenomena Academia Pross New York 1070
/0.	Kinstow K High-velocity impact phenomena, Academic Pless, New York, 1970
//.	Knight Norman F. Jr. ş.a Comparison of Two Modeling Approaches for Thin-Plate
	Penetration Simulation, in 6 International LS-DYNA Users Conference
	Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology
	Corporation, SUA, pp. 9.1-9.13
78.	Komarovsky Anatoly A., Viktor P. Astakhov - PHYSICS of STRENGTH and FRACTURE
	CONTROL - Adaptation of Engineering Materials and Structures, CRC
	Press, SUA, 2003, ISBN 0-8493-1151-9, 630 pag.
79.	Krabbenhoft K. ş.a Elastoplasticity by Mathematical Programming Methods, în
	COMPLAS VIII, VIII th International Conference on Computational
	Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 361-364
80.	LaFarge Robert A., Christopher Lewis - Contact Force Modeling Between Non Convex
	Objects Using A Nonlinear Damping Model, 1998 Internatiational ADAMS
	User Conference
81.	Lampman S. s.a ASM Handbook, vol 19 - Fatigue and Fracture, ASM International
	Handbook Committee SUA 1997 ISBN 0-87170-385-8 2592 nag
82.	Lane Hakan s a - Absorbing Boundary Layers for Elastic Wayw Propagation în
0_1	COMPLAS VIII VIII th International Conference on Computational
	Plasticity Barcelona 2005 np 350-353
83	Lee HK KS Kim CM Kim - Fracture resistance of a steel weld joint under fatigue
00.	loading Engineering Fracture Mechanics 66 Pergamon Ed 2000 nn 401-
	A10
84	Leitão V M A - A Meshless Formulation for Kirchoff Plates International Conference on
04.	Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering
	and Science Shanghai China 2001
85	Lunea Julian - FFM for Impact Energy Absorption with Safety Plastic in 8 th International
05.	LS DVNA Users Conference 2.4 mai 2004 ad Livermore Software
	Technology Corporation SUA nn 5 57 5 60
86	Lungu Vladimir – <i>Dindajul – protostio si vulnovabilitato</i> Edituro Militoră Dugurosti 1080
00. 07	Maler Dradlay N. Vinhai Zhu, Junut Danamatang fan Matal Forming Simulation Haing IS
0/.	Maker Bradley N., Annar Zhu - Input Furumeters for Metal Forming Simulation Using LS-
	DINA, III 6 International LS-DYNA Users Conference Simulation 2000,
	9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp.
00	12.1-11.15 Mandalharth D. D. Franciska and and and and an it do? Deca Decarl Consists
88.	Mandelbroth B. B Fractal geometry: what is it, and what does it do?, Proc. Royal Society
00	London, A 423, Great Britain, 1989, pp 3-16
89.	Manevitz Larry, Malik Yousef, Dan Givoli - Finite-Element Mesh Generation Using Self-
	Organizing Neural Networks, Microcomputers in Civil Engineering 12,
	Blackwell Publishers, SUA, 1997, pp. 233-250
90.	Manus J. Donahue III - An Introduction to Mathematical Chaos Theory and Fractal
	<i>Geometry</i> , e-book pe site-ul www.techsightings.com, 2002, 11 pag.
91.	Marinescu Ion, și S. Verboncu - Armele antitanc moderne, Editura Militară, București, 1976
92.	Martin D., Aliabadi M.H., Leitão V.M.A Application of BEM to Elastoplastic Contact
	Problems, XVI International Conference on Boundary Element Methods,
	Southampton, 1994, pp. 337-344
93.	Massimo Cuomo, Mario Fagone - A New numerical Scheme for Large Deformation Non-
	<i>Isotropic Plasticity</i> , în COMPLAS VIII, VIII ^{II} International Conference on

Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 106-109

Bib	liog	rafie	
Dw	uogi	ujie	

94.	Mattiussi Claudio, Swiss Federal Institute of Technology - An Analysis of Finite Volume,
	Finite Element, and Finite Difference Methods Using Some Concepts from
	Algebraic Topology, la COMPLAS 2001, 21 pag.
95.	Mehta B.V. ş.a Integration of Finite Element Analysis (LS-DYNA) with Rigid Body
	<i>Dynamics (AIB) for Crash Simulation</i> , in 6 th International LS-DYNA
	Software Technology Cornoration SUA pp. 4 13-4 21
96.	Mishnaevsky Leon L. Jr. Siegfried Schmauder - Ontimization of Fracture resistance of
	Ledeburitic Tool Steels, a Fractal Approach, EUROMAT 99 - Steel and
	Matherials for Power Plants (European Congress on Advanced Materials
	and Processes), Munich, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, vol. 7, pp. 269-
07	274, 1999
97.	Mishnaevsky Leon L. Jr., M. Dong, S. Hönle, S. Schmauder - Computational
	Science nr 16 Elsevier Science B V Germany 1999 nn 133-143
98.	Mishnaevsky Leon L. Jr., N. Lippmann, S. Schmauder, P. Gumbsch - <i>In-situ observation of</i>
	damage evolution and fracture in AlSiMg0.3 cast alloys, Engineering
	Fracture Mechanics, nr. 63, Elsevier Science Ltd., Marea Britanie, 1999,
00	pp. 395-411 Mi-har and Land Land Land Land Land Land Land
99.	Misnnaevsky Leon L. Jr., Slegified Schmauder – Damage evolution and heterogeneity of materials model based on fuzzy set theory Engineering Fracture
	Mechanics, vol.57, nr. 6, Elsevier Science Ltd., Marea Britanie, 1997, pp.
	625-636
100.	Mishnaevsky Leon L. Jr Determination for time-to-fracture of solids, International Journal
	of Fracture, nr. 79, Kluwer Academic Publishers, Olanda, 1996, pp. 341-
101.	Mishnaevsky Leon L Ir – Methods of the theory of complex systems in modelling of
	fracture: a brief review, Engineering Fracture Mechanics, vol.56, nr. 1,
	Elsevier Science Ltd., Marea Britanie, 1997, pp. 47-56
102.	Moaveni S.N Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS, 2 nd
103	Edition, Prentice Hall, SUA, 2003 Morros Picardo E. Donald W. Nicholson Implementation of Constitutive Equation for
105.	Visconlasticity with Damage and Thermal Softening into the LS-DYNA
	Finite Element Code, with Application to Dynamic Fracture of Ring-
	Stiffened Welded Structures, în 6 th International LS-DYNA Users
	Conference Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software
104	Technology Corporation, SUA, pp. 6.25-6.31 Negachime T. Miure N. Electic Plantic Engeture Analysis for Surface Cuecks using Y
104.	<i>FEM</i> în COMPLAS VIII VIII th International Conference on
	Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 105-108
105.	Nanu Aurel – Tehnologia Materialelor, ed. a III-a, Editura Didactică și Pedagogică,
101	București, 1984
106.	Năstăsescu Vasile - <i>Contribuții privind calculul carcaselor blindate</i> , teză de doctorat,
107	Nicholson David W s a - Virtual Reality Visualisation (VRV) of Realistic Weapons Effect
10/0	Predicted, în 6 th International LS-DYNA Users Conference Simulation
	2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation,
	SUA, pp. 15.47-16.1
108.	Nicolițov Valentin, ș.a Protecția tancurilor, Editura Militară, București, ISBN 973-32-
	0155-9

- 109. Oliver J., Cante J.C., J.A. Hernandez A Numerical Procedure for Modeling Crack Formation in Powder Compaction Based Manufacturing Processes, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 342-345
- **110.** Onișor C. *Curs introductiv de tactica tancurilor,* Editura Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1992
- **111.** Ortiz M. *Mixed continuum/atomistic models: The quasi-continuum method,* în COMPLAS VII, VIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 7 apr. 2003, prez. ppt., 30 pag.
- **112.** Otsuka Masahiko A Study on Shock Wave Propagation Process in the Smooth Blasting *Technique*, în 8th International LS-DYNA Users Conference, 2-4 mai 2004, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 7.5-7.13
- 113. Pedersen R. R., L. J. Sluys, A. Simone Computational Study of Dynamic failure of Concrete including Viscoelasticity, Viscoplasticity and Damage, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 260-263
- **114.** Pelesko, John A. *Mathematical Modeling*, Lecture Notes for Industrial Mathematics I, ecurs, Georgia Institute of Technology, 2001, 102 pag.
- **115.** Perez E. *Etude experimentale et theorique de la penetration de cibles metaliques semiinfinies par des projectiles metaliques de grand allongement et de vitesse superieure a 2000 m/s,* revista "Sciences et technique de l'armement", nr. 56, 1982
- **116.** Petrescu Alexandru Contribuții referitoare la concepția și studiul dinamicii autoblindatelor ușoare moderne, teză de doctorat, Academia Tehnică Militară, București, 1998
- 117. Pichler Bernhard, Christian Hellmich Does Critical Mode Energy Release Govern Compressive Axial Splitting of Brittle materials? - Arguments from a Combined Fracture and Micromechanics Approach, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 265-268
- 118. Pintur David Finite Element Beginnings, e-book, MathSoft, 1997
- **119.** Pleşanu Toma *Organizarea generală a blindatelor,* Editura Academiei Tehnice Militare, București, 1998, ISBN 973-8088-55-0
- 120. Popa Vasile Radiodiagnosticul oțelurilor sudate cu arc electric, Editura Tehnică, București, 1983
- **121.** Popescu Mihail, Viorel Buța *Acțiunile militare împotriva blindatelor*, Editura Militară, București, 1999, ISBN 973-32-0552-4
- **122.** Precupanu Dan *Teoria Elasticității*, Institutul Politehnic Iași, Facultatea de Construcții, 1982
- 123. Precupanu Dan Plăci subțiri, Institutul Politehnic Iași, Facultatea de Construcții, 1981
- 124. Proft K., Wilde W.P., Wells G.N., Sluys L.J. *Combined damage-plasticity models for discontinuous fracture*, în Computational Modelling of Concrete Structures (EURO-C), Austria, 2003, pp127-132
- 125. Proft K., Wilde W.P., Wells G.N., Sluys L.J., *Discontinuous models for modelling fracture of quasi-brittle materials,* în Proceedings of the Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Egmond-aan-Zee, Olanda, 2003, CDROM, 13 pag.
- **126.** Rădulescu Octavian *Sinteze optimale în construcția de maşini*, Editura Tehnică, București, 1984

127.	Regan Jonathan	M., Fred	M. Downey	- The	TASCFORM .	Meth	odology:	A techniqu	ue for	•
		assessing	comparative	force	modernization	ı, în	"Tascform	n-Model",	ed. a	l
		IV-a, 12-H	Feb-93, pe site	e-ul wv	vw.tasc.com					

- **128.** Reid John D. *LS-DYNA, Examples Manual,* Livermore Software Technology Corporation, SUA, 1998, 296 pag.
- 129. Reyes A. Implementation of a Constitutive Model for Aluminum Foam Including Fracture and Statistical Variation of Density, în 8th International LS-DYNA Users Conference, 2-4 mai 2004, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 6.11-6.25
- 130. Ribeiro Tatiana S.A., Cristian Duenser, Gernot Beer Boundary Element Method with Automatic Progressive Cell Generation for Elastoplastic Analysis, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 61-64
- **131.** Roylance David *Mechanics of Materials, Fracture,* e-curs, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, SUA, 2000-2001, MA 02139, 357 pag.
- **132.** Saouma Victor E. *Fracture Mechanics*, e-book, University of Colorado, SUA, 2000, CVEN-6831, 446 pag.
- **133.** Scheider Ingo Cohesive model for crack propagation Analyses of structures with elasticplastic material behaviour, studio la GKSS research center Geesthacht, Dept. WMS, Germany, 2001
- **134.** Segal D., Bransky I. A method for determining crack initiation in shock impacted metals, Meas. Sci. Technol. 8, UK, 1997, S0957-0233(97)83702-2
- **135.** Seung-Eock Kim ş.a. *An Innovative design for Steel Frame Using Advanced Analysis,* e-book, cap. 28, Seoul University, South Korea, 1999, 58 pag.
- 136. Simone A., Askes H., Peerlings R.H.J., Sluys L.J. Interpolation requirements for implicit gradient-enhanced continuum damage models, Communications in Numerical Methods in Engineering, no. 19, in co-operation with group "Materials Technology", 2003, pp.563-572
- 137. Simone A., Duarte C.A., E. van der Giessen A Generalized Finite Element Method for Grain-Boundary Sliding in Polycrystals, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 126-128
- 138. Simone A., Sluys L.J. Continuous-discontinuous failure analysis in a rate-dependent elastoplastic damage model, în Proceedings of the 2nd International Conference on Structural and Construction Engineering, Roma, Italia , 2003, pp. 737-744
- **139.** Simone A., Sluys L.J. *Adaptive continuous-discontinuous modeling of crack propagation,* la 1st International Conference on Adaptive Modeling and Simulation (ADMOS 2003), Gothenburg, Sweden, 2003, CDROM, 24 pag.
- 140. Simone A., Wells G.N., Sluys L.J. From continuous to discontinuous failure in a gradientenhanced continuum damage model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, no. 192, 2003, pp.4581-4607
- 141. Skiner Jeffrey David Jr. *Finite Element Predictions of Plasticity Induced Xrack Closure in Three-Dimensional Cracked Geometries,* teză de doctorat la Mississippi State University, Mississippi, SUA, 2001, 109 pag.
- 142. Sluys L.J., Liu W.Y. Meso-level analysis to the behavior of concrete under impact loading, în Proceedings of Seventh International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS VII), Barcelona, Spania, 2003, CDROM, 11 pag.

- 143. Smith Jason R. ş.a. Preliminary Study of the Behavior of Composite Material Box Beams Subjected to Impact, în 6th International LS-DYNA Users Conference Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 11.1-11.17
- 144. Stănescu Gheorghe ș.a. Tancuri și automobile, Editura Militară, București, 1978
- 145. Steglich Dirk, Wolfgang Broks, Thomas Pardoen A Model of Anisotropic Ductile Demange Applied to Al 2024, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 51-54
- **146.** Şuvei Ştefan Contribuții privind studiul fenomenului de perforare a blindajelor maşinilor de luptă cu muniții cinetice – proiectilul săgeată, teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi", Iași, 1998
- 147. Tabiei Ala, Romil Tanov Performance Validation throught Standard Tests, part II, în 6th Internacional LS-DYNA Users Conference Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 7.17-7.29
- Tanov Romil, Tabiei Ala New Formulation for Composite Sandwich Shell Finite Element, în 6th Internacional LS-DYNA Users Conference Simulation 2000, 9-11 apr. 2000, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 8.9-8.27
- 149. Toma Gheorghe *Tactica blindatelor*, Editura Academiei de înalte Studii militare, București, 2002, ISBN 973-8317-12-16
- **150.** Terzopoulos Demetri, Kurrt Fleiseher *Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture,* Computer Graphics, Volume 22, Number 4, August 1988, ACM-0-89791-275 -6/88/008/0269, pp 269-278
- **151.** Ulm Franz-Josef Introduction to Finite Element Modeling in Solid Mechanics, Massachusetts Institute of Technology, SUA, 2002, e-curs, 17 pag.
- **152.** Urdăreanu T., gl.lt.(r)ing. *Factorul tehnic în războaiele României moderne*, Editura Militară, București, 1994, ISBN 973-32-073-4
- **153.** Wells G.N., R. de Borst, L.J. Sluijs *Analysis of cohesive cracks under quasi-static and dynamic loading*, în Analytical and computational fracture mechanics of non-homogeneous materials, Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 293-302
- **154.** Wells G.N., Remmers J.J.C., Borst R., Sluys L.J. *A large strain discontinuous finite element approach to laminated composites,* la IUTAM Symposium on Computational Mechanics of Solid Materials at Large Strains, Stuttgart, Germany, 2003, pp. 355-364
- **155.** Wiggins Stephen Introduction to Applied Nonlinear Dynamical System and Chaos, Springer-Verlag London Limited, England, 1990, ISBN 0-387-97003-7, ISBN 3-540-97003-7 (SUA), 144 pag.
- **156.** Wnuk Michael P. *A Fractal Cohesive Crack Model*, College of Engineering and Applied Science University of Wisconsin Milwaukee, 2004, SM9 10250, 6 pag.
- **157.** Wright Richard S., Jr. *OpenGL Super Bible*, Addison Wesley Publishing Company, SUA, 2000, 769 pag.
- **158.** Yang Ming-Chang *The Dynamic Problems in High Speed Transfer Stamping System*, în 8th International LS-DYNA Users Conference, 2-4 mai 2004, ed. Livermore Software Technology Corporation, SUA, pp. 13.21-13.33
- **159.** Zhu X. K., Chao Y. J. Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, Journal of Materials Processing Technology 146, 2004, pp. 263–272
- **160.** www.adina.com site al ADINA R & D, Inc., fondată în 1986, dedicat promovării aplicației de modelare simulare în element finit ADINA System

161.	www.cadfem.de - site al CADFEM GmbH, firmă se soft, cu aplicații în Finite-Element- Method (FEM) ingineria cunoasterii - Knowledge-based Engineering
	(KBE)
162.	www.crcpress.com – editura Taylor & Francis CRC Press, carte științifică, tehnică și medicală
163.	www.elsevier.com – editura Elsevier, peste 70 000 de produse și servicii de librarie și bibliotecă, în toate domeniile
164.	www.ugs.com/products/velocity/femap/ - site al companiei de soft UGS din statele Unite; software pentru prelucrari în element finit compatibil cu aplicațiile NX Nastran, MSC Nastran, Abaqus, Ansys, LS DYNA, MSC.Marc
165.	www.gnu.org - site al GNU Project lansat în 1984, distribuie software care nu necesită licență
166.	www.lstc.com - site al LTSC Livermore Software Technology group, dedicate promovării aplicației LS-DYNA
167.	www.ncees.org - site administrat de National Council of Examiners for Engineering and Surveying ® (NCEES ®)
168.	www.rta.nato.int - site al Research & Technology Agency al NATO; studii, rapoarte de cercetare, proiecte în derulare
169.	www.sei.cmu.edu/publications/pubweb.html site administrat de Software Engineering Institute, a federally funded research and development center sponsored by the U.S. Department of Defense., publicații științifice, rapoarte de cercetare
170.	* * * - ADINA - System overview, ADINAR&D, Inc., 2001, 6 pag.
171.	* * * - Description of Sample Problems - Introduction to features in LS-DYNA, e-book, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2000, 39 pag.
172.	* * * - eta/PostGL - USER TM S MANUAL, A post-processor compatible with LS- DYNA/PC, Version 1.0 GL, Engineering Technology Associates Inc., SUA, 1999, 115 pag.
173.	* * * - eta/PostGL - GRAPH TUTORIAL, A post-processor compatible with LS- DYNA/PC, Version 1.0 GL, Engineering Technology Associates Inc., SUA, 1999, 35 pag.
174.	* * * - FEMAP Structural - Element Library v.8.2., Unigraphics Solutions Inc., SUA, 2002
175.	* * * - FEMB (Finite Element Model Builder, ver. 26 NT, USER'S MANUAL, A pre- processor for use with LS-DYNA, e-book, livermore Software Technology Corporation, SUA, 2000, 336 pag.
176.	* * * - FEMB (Finite Element Model Builder, ver. 26 NT, TRAINING MANUAL, A pre- processor for use with LS-DYNA, e-book, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2000, 95 pag.
177.	* * * - Fundamentals of Engineering Supplied - Reference handbook, 5th ed., National Council of Examiners for Engineering and Surveying SUA 2001 176 pag
178.	* * * - <i>Getting Started with LS-DYNA</i> , Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2002, 17 pag.
179.	* * * - Getting Started with LS-DYNA - A step by step primer to assist you in operating the LS-DYNA finite element analysis software, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2004, 9 pag.
180.	* * * - Introduction to Matlab and Octave, e-curs pe site-ul www.gnu.org, GNU Ghostscript 8.52, 2002, CPSC 535
181.	* * * - Introduction to Finite Element Method, e-curs, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2002, 202 pag.

	Bibliografie
182.	* * * - Introduction to modeling and simulation, Massachusetts Institute of Technology, SUA 2002 open curse
183.	* * * - LS-DYNA, Keyword User's Manual, vol. 1, Livermore Software Technology Corporation SUA 2001 798 pag
184.	* * * - LS-DYNA, Keyword User's Manual, vol. 2, Material Models, References and Appendices, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2001, 544
185.	* * * - LS-DYNA, Keyword User's Manual - Elements, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2003, 1564 pag.
186.	* * * - LS-DYNA, Keyword User's Manual - Nonlinear Dynamic Analysis of Structures, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 1999, 1130 pag.
187.	* * * - <i>LS-PRE/POST, v1.0.,</i> e-book, Livermore Software Technology Corporation, SUA, 2002, 156 pag.
188.	* * * - Mechanics of Materials, vol 2 - An introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd. Great Britain, 1999, ISBN 0 7506 3266 6, 557 pag.
189.	* * * - Oasys LS-DYNA Environment 8.1, vol. 3, User Guide, Oasys Limited, SUA, 2001, 235 pag.
190.	* * * - OpenGL Programing Guide, Addison - Wesley Publishing Company, SUA, 1997, T385.N435
191.	 * * * - Regulamentul asigurării tehnice de blindate, automobile şi tractoare – TA-1, Tipografia Militară a Ministerului Apărării Naționale, Bucureşti, 1987, (în prezent abrogat şi înlocuit de Fi-11)
192.	* * * - Regulamentul de luptă al subunităților de tancuri – Tc-3, Intreprinderea Poligrafică Filaret, București, 1989
193.	* * * - Structural Welding Code - Steel, 18th ed., AWS D 1 Committee on Structural Welding, SUA, 2002, AWS D I .I/DI .I M, 543 pag.
194.	 * * * - A New Numerico-Analitical Method for the Solution of Elastoplastic Equations Based on yhe Splitting of Constitutive Equations, în COMPLAS VIII, VIIIth International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 2005, pp. 131-134





Nume E-mail **CRISTEA SORIN - VASILICĂ**

28 APRILIE 1963

scristea@armyacademy.ro (scristea@actrus.ro)

Data naşterii

EXPERIENTA PROFESIONALĂ

,	
• Perioada	IUNIE 1999 – PREZENT
• Angajator	Academia Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu" Sibiu, str. Revoluției, nr.3-5, Sibiu, cod 550170
• Funcția / postul	FEBRUARIE 2008 – PREZENT Profesor militar și șef de catedră, lector universitar asociat. MARTIE 2006 – FEBRUARIE 2008 Profesor militar și lector universitar asociat. AUGUST 2003 – MARTIE 2006 Cercetător Științific gradul II și lector universitar asociat. IUNIE 1999 - AUGUST 2003 Lector universitar.
 Activităţi didactice 	Disciplinele: Bazele reparării autovehiculelor, Fiabilitatea și diagnosticarea autovehiculelor, Bazele construcției, funcționării și exploatării autovehiculelor de artilerie, Dinamica autovehiculelor – studenți frecvență redusă, Bazele tactice ale pregătirii în armă (auto), Bazele tehnice ale pregătirii în armă (auto), Mecanisme și motoare (modulul de motoare) și Managementul sistemelor tehnice (2007-2008).
• Perioada	AUGUST 1990 - IUNIE 1999
• Angajator	Baza centrală de Reparații Autocamioane și Autospeciale, str. Calea Cisnădiei, Sibiu.
Tip activitate	Activități de planificare și mentenanță utilaje în cadrul Atelierului Mecano – Energetic și de mentenanță tehnică de BAT (blindate, automobile și tractoare) în cadrul Serviciului Tehnic.
 Funcția / postul 	AUGUST 1995 - IUNIE 1999 Şef Atelier Mecano - Energetic şi, prin cumul, Şef Serviciu Tehnic.
	AUGUST 1991 - AUGUST 1995 Şef Birou Organizarea şi Urmărirea Producției şi, prin cumul, Şef Serviciu Tehnic.
	AUGUST 1990 - AUGUST 1991 Inginer proiectant.
 Principalele activităţi şi responsabilităţi 	Responsabil de starea tehnică și de executarea lucrărilor de întreținere și reparații a utilajelor din dotarea spațiilor productive.
	Responsabil de starea tehnică și de întreținere a tehnicii proprii, de resortul blindate, automobile și tractoare.
• Perioada	OCTOMBRIE 1986 - AUGUST 1990
• Angajator	Uzina Mecanică Mizil (în prezent MIZUMEC), str. Nicolae Bălcescu, Mizil, jud. Prahova.
• Funcția / postul	1989 AUGUST 1990 Inginer tehnolog.
	1987 – 1989 Analist programator sisteme informatice şi de gestiune.
	OCTOMBRIE 1986 – 1987 Inginer tehnolog de secție, Atelierul Recondiționări Elemente Propulsie Blindate.
VALORIFICARE REZULTATE	NOTĂ: p.a. = prim autor; u.a. = unic autor; c.a. = coautor.
- sinteza $-$	 Manuale cursuri cărti
- 3 u.a., 2 p.a.	 Articole în buletine stiintifice și anuare ale universitătilor
- 3 u.a.	Articole în reviste
- 3 u.a.(p.a.), 3 c.a.	Comunicări științifice publicate la sesiuni/conferințe naționale
- 6 u.a.(p.a.), 2 c.a.	Comunicări științifice publicate la sesiuni/conferințe internaționale sau cu participare internațională.
- 1p.a., 2 c.a.	Aplicații de specialitate, laboratoare
- 3 u.a.(p.a.), 3 c.a.	Studii cu caracter specific
- 9 membru în echipă	Contracte de cercetare obținute prin concurs
Pagina 1 - Curriculum vitae al [Sorin CRISTEA]	

Pagina 1 - Curriculum vitae al [Sorin CRISTEA]