MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI

Şcoala Doctorală de Inginerie Mecanică și Mecatronică

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Răzvan-Marian MIRCIOAGĂ

STUDII ȘI CERCETĂRI REFERITOARE LA DEZVOLTAREA METODELOR DE INIȚIERE PENTRU AMESTECURILE PROPULSIVE
STUDIES AND RESEARCH ON THE DEVELOPTMENT OF IGNITION METHODS FOR PROPELLANT MIXTURES

Prof. Dr. Ing. Tudor PRISECARU
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București — Conducător de doctorat

Prof. Dr. Ing. Adrian ROTARIU
Academia Tehnică Militară "Ferdinand I" București — Conducător de doctorat

BUCUREŞTI 2025

Cuprins

Capitolul 1 Stadiul actual al cunoașterii amestecurilor propulsive și analiza tipurilor de pulberi clasice....4
1.1 Introducere....4
1.2 Clasificarea materialelor energetice....4
1.3 Analiza arderii pulberilor....5
Capitolul 2 Cercetări privind metodele de inițiere a pulberilor utilizate în sisteme propulsive....6
2.1 Introducere....6
2.2 Clasificarea metodelor de inițiere a pulberilor....7
2.2.1 Inițierea electrică convențională a pulberilor....7
2.2.2 Inițierea prin frecare....7
2.2.3 Inițierea prin impact....8
2.2.4 Inițierea directă cu laserul....8
2.2.5 Inițierea prin propulsia de folii metalice cu laserul....9
2.2.6 Inițierea pulberilor prin folosirea unui gaz....9
2.3 Concluzii....10
Capitolul 3 Cercetări experimentale privind combustia amestecurilor propulsive în bomba manometrică și reacția amestecurilor propulsive la stimul termic, impact și solicitări dinamice....10
3.1 Introducere....11
3.2 Teste experimentale de determinare a presiunii. Măsurarea presiunii cu ajutorul sistemului piezoelectric....11
3.3 Teste experimentale privind sensibilitatea la impact al amestecurilor propulsive (ciocanul KAST)....12
3.4 Teste experimentale privind sensibilitatea termică a amestecurilor propulsive....12
3.5 Teste experimentale privind sensibilitatea la frecare al amestecurilor propulsive....13
3.6 Studii experimentale privind reacția pulberilor induse de solicitări dinamice prin șoc cu sistemul de bare Hopkinson....14
3.7 Discuții și rezultate....14
Capitolul 4 Cercetări experimentale privind integrarea sistemului de inițiere laser pentru amestecurile propulsive în bomba manometrică clasică....15
4.1 Introducere....15
4.2 Proiectarea sistemului de inițiere cu laser și integrarea acestuia în bomba manometrică....15
4.2.2 Inițierea directă cu laserul....15
4.2.3 Inițierea cu laserul prin intermediul tuburilor din plexiglas....16
4.3 Concluzii....17

Capitolul 5 Cercetări experimentale privind inițierea explozivilor cu laserul 18
5.1 Introducere 18
5.2 Metode experimentale 18
5.2.1 Inițierea explozivilor prin propulsia de folii metalice cu laserul 18
5.2.2 Inițierea directă a explozivilor cu laserul 20
5.3 Concluzii și discuții 21
Capitolul 6 Modelarea numerică a propulsiei de folii metalice cu laserul 22
6.1 Introducere 22
6.2 Configurația experimentală 22
6.3 Modelarea numerică 23
6.4 Rezultate 24
6.5 Concluzii și discuții 25
Concluzii 25
Rezultate obţinute 26
Contribuţii originale 27
Lista lucrărilor originale 27
Perspective de dezvoltare ulterioară 28
Bibliografie 29

Capitolul 1 Stadiul actual al cunoașterii amestecurilor propulsive și analiza tipurilor de pulberi clasice

Capitolul 1 prezintă baza teoretică privind amestecurile propulsive, cu accent pe clasificarea și analiza pulberilor clasice. Pornind de la definiția materialelor energetice și a proceselor de transformare explozivă (deflagrație, combustie, detonație), s-au detaliat cele două mari categorii: pulberile de azvârlire și pulberile propulsive.

Au fost descrise tipurile de pulberi în funcție de compoziție (simplă, dublă și triplă bază), geometrie (fulgi, sferice, cilindrice, cu canal, de tip rozetă) și tipul arderii (progresiv, neutru, regresiv), precum și principalele lor proprietăți. Studiul procesului de ardere a fost analizat pe baza legii vitezei de ardere exprimată prin trei relațiile empirice.

În final, au fost evidențiați factorii care influențează comportamentul real de ardere, sensibilitatea și riscurile asociate acestor amestecuri.

1.1 Introducere

Materialele energetice se definesc ca fiind substanțe sau amestecuri de substanțe, aflate în stări metastabile, ce pot suferi o transformare explozivă în urma acțiunii unui impuls exterior [1].

Transformarea explozivă este un process fizico-chimic autopropagabil, rapid, cu degajare de căldură și gaze, care poate lua trei forme: *deflagrație* (reacții de descompunere și reacții de oxido-reducere intens exoterme [1]), *combustie* (amorsare prin impuls termic, cu viteze de propagare de la câțiva milimetrii până la câțiva metri pe secundă [2]) și *detonație* (proces fizico-chimic rapid și exoterm, cu reacții care se propagă supersonic prin materialul energetic).

1.2 Clasificarea materialelor energetice

În vederea împărțirii materialelor energetice pe categorii s-a ținut cont de transformarea explozivă, urmată de destinația și compoziția fiecărui tip de exploziv după cum este prezentat în figura 1.2. [1]

Pulberile de azvârlire sunt amestecuri de unul sau mai mulți explozivi cu diverși plastifianți, aditivi, elaborați și prelucrați cu atenție pentru a arde ușor, fără a detuna în condițiile normale de utilizare.

În funcție de numărul bazelor energetice, pulberile de azvârlire pot fi clasificate în pulberi monobazice (NC-nitroceluloză), pulberi cu dublă bază (NC cu NG-nitroglicerină) și pulberi cu triplă bază (NQ-nitroguanidină, NC și NG) [3].

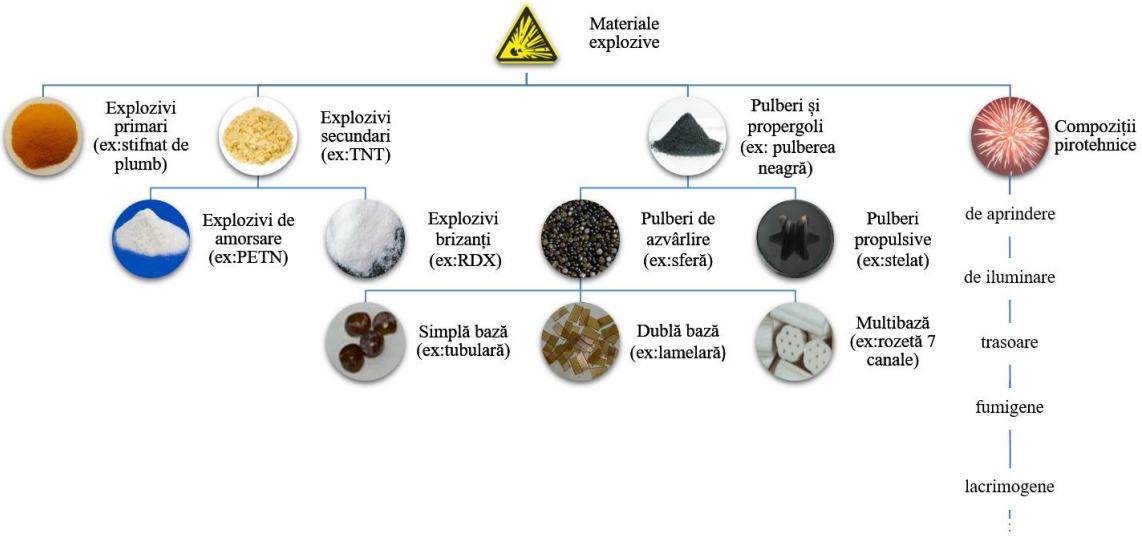


Figura 1. 1 *Clasificarea materialelor energetice din punct de vedere al transformării explozive*

Pulberile propulsive sunt explozivi proiectați să deflagreze uniform pentru a genera energie de propulsie. Aceștia se împart în propergoli lichizi (monopropergoli – un singur compus, bipropergoli – oxidant și carburant [3]) și propergoli solizi, unde toate elementele sunt deja în camera de ardere, iar controlul arderii depinde de forma suprafeței de ardere [3].

1.3 Analiza arderii pulberilor

Arderea generează produse gazoase la temperaturi ridicate. În funcție de incinta de ardere producerea acestor gaze poate conduce și la realizarea unor presiuni ridicate. În funcție de substanțele incluse în compoziție, arderea poate produce și reziduuri solide [4].

Procesul de ardere al pulberii cuprinde trei faze [5]: amorsarea (inițierea prin stimul exterior), aprinderea (propagarea reacției pe suprafața particulelor, influențată de presiune, formă și amorsa folosită) și arderea propriu-zisă (propagarea reacției în grosimea elementelor de pulbere, pe o direcție normală suprafeței elementelor).

Una dintre cele mai importante caracteristici ale unei pulberi este viteza de ardere. Fenomenul tragerii este influențat, de asemenea, de forța și covolumul pulberii, de geometria și dimensiunile elementelor de pulbere [4].

Viteza de ardere se referă la viteza de deplasare a suprafeței care arde, în grosimea elementului de pulbere, pe direcția normalei la suprafața respectivă.

Pentru descrierea legii vitezei de ardere, în literatura de specialitate, se regăsesc 3 relații empirice principale.

Prima relație se scrie sub forma:

$$u = Ap^{\nu} \tag{1.1}$$

unde A și ν depind de natura pulberii și condițiile de desfășurare a arderii.

A doua relație specifică vitezei de ardere a fost dată de către profesorul S.P.Vucalov și poate fi scrisă sub forma:

$$u = ap + b \quad (1.2)$$

Această relație se exprimă prin cei doi coeficienți a și b care depind de natura pulberii.

În paralel, un grup de cercetători francezi a propus o a treia relație specifică legii vitezei de ardere sub forma:

$$u = \theta p \quad (1.3)$$

unde θ- coeficient de proporționalitate.

După cum se poate observa această ultimă relație constituie cazul particular al primei relații pentru $\nu = 1$.

Conform clasificării realizate de Krier (1975) și Eisenreich (2002), viteza de ardere a unui element de pulbere este influențată de geometria și compoziția acestuia, precum și de proprietăți precum porozitatea, densitatea și interacțiunea termică [6].

Analiza sensibilităților materialelor energetice la diferiți stimuli evidențiază relevanța testelor pentru evaluarea riscului de inițiere accidentală. Pe baza acestor rezultate, vor fi implementate măsuri riguroase de protecție și manipulare în siguranță a materialelor energetice.

Capitolul 2 Cercetări privind metodele de inițiere a pulberilor utilizate în sisteme propulsive

Capitolul evidențiază rolul mecanismelor de inițiere, varietatea soluțiilor existente și impactul acestora asupra performanței și siguranței sistemelor propulsive. Sunt clasificate principalele metode de inițiere – prin impact, frecare, stimul termic, electric, gaz și laser – fiecare cu avantaje și limitări proprii.

Sunt prezentate fundamentele teoretice, modelele matematice și procedurile de testare, precum și factorii care influențează aceste procese. Exemplele includ analiza pierderilor de căldură în bomba manometrică și studiul parametrilor specifici inițierii cu laser, unde accentul cade pe utilizarea laserelor Nd:YAG și a diodelor laser.

În final este realizată o sinteză a studiilor de specialitate și a concluziilor desprinse din acestea.

2.1 Introducere

Materialele energetice tradiționale care inițiază aprinderea pulberilor sunt pulberea neagră, azotatul de bor-potasiu (BKNO3), amestecul de nitroceluloză și pulbere neagră (benită) sau un aprinzător, a cărui componență este de 98% nitroceluloză.

Aceste materiale energetice inițiază aprinderea combinând transferul termic prin convecție de la gazele fierbinți și conducția termică a particulelor fierbinți depuse pe suprafața grăunților de pulbere.

2.2 Clasificarea metodelor de inițiere a pulberilor

2.2.1 Inițierea electrică convențională a pulberilor

Bombele manometrice sunt echipamentele folosite în scopul analizării arderii pulberilor și procesului de formare al gazelor la volum constant. În bomba manometrică se obține variația presiunii gazelor raportate la timp p=f(t).

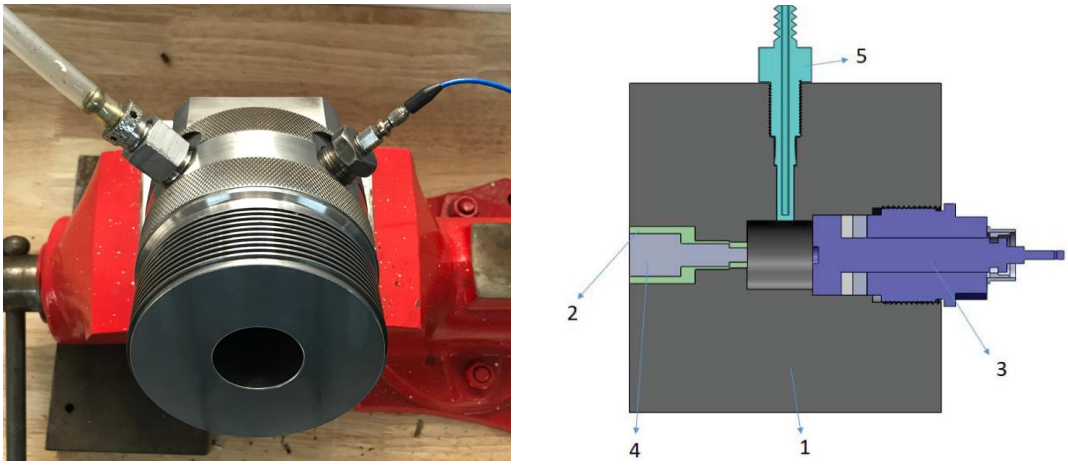


Figura 2. 1 *Componentele principale ale bombei manometrice, cu volumul de 40 cm^3, reprezentate în solidworks* [7]

Influența pierderilor de căldură în bomba manometrică

În cadrul testelor experimentale în bomba manometrică, nefiind condiții ideale, prin încălzirea pereților bombei se pierde o parte din energia termică eliberată prin arderea pulberilor. Acest lucru duce la o scădere a presiunilor maxime față de situația în care nu ar exista pierderi [5].

Pierderile prin cedare de căldură sunt cuantificate prin intermediul formulei lui Newton [5]:

$$dQ = \alpha_t S_b (T_g - T_p) dt \tag{2.3}$$

unde : dQ reprezintă cantitatea de căldură cedată pereților bombei manometrice, α_t- coeficientul de transfer termic, S_b- suprafața interioară a camerei bombei, T_g- temperatura gazelor de pulbere iar T_p- temperatura peretului bombei.

2.2.2 Inițierea prin frecare

În situația în care două suprafețe alunecă una față de cealaltă, energia disipată de frecare devine sursa de căldură la interfața dintre cele două suprafețe. Intensitatea frecării este influențată de sarcina cu care se acționează asupra suprafeței, viteza de alunecare și rugozitatea materialului [8].

Sensibilitatea la frecare reprezintă unul dintre cei mai importanți factori de testat în cadrul evaluărilor de compoziții explozive noi și se determină cu ajutorul aparatului BAM, figura 2.2. Materialul destinat încercării este așezat între două

plăcuțe de porțelan, asupra cărora se acționează cu o sarcină prin intermediul unui motor electric alternativ [9]. În momentul în care este acționat sistemul, se observă comportamentul materialului testat și se clasifică ca fiind "cu reacție" sau "fără reacție".

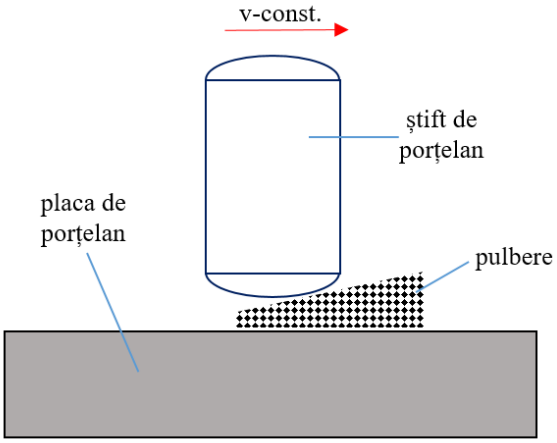


Figura 2. 2 *Poziția plăcuței de porțelan înainte de acționarea aparatului BAM*

2.2.3 Inițierea prin impact

Inițierea explozivilor prin impact rămâne un subiect de actualitate în domeniul pirotehniei. Pentru a spori siguranța muniților, explozivii trebuie să fie suficient de insensibili la stimuli imprevizibili. Totuși, dacă sensibilitatea este redusă, presiunea aplicată trebuie mărită pentru a asigura inițierea sigură a încărcăturii principale. Din acest motiv, modelele de inițiere prin șoc sunt utilizate pentru a evalua atât riscurile, cât și fiabilitatea explozivilor [10].

Sensibilitatea la impact reprezintă proprietatea explozivilor de a detona prin impact și constituie un parametru care caracterizează siguranța acestora la manipulare și transport. Ea se exprimă în Jouli (J), reprezentând practic energia minimă de impact la care are loc explozia probei de exploziv [11].

Testul de determinare a sensibilității la impact a explozivilor se face folosind un dipozitiv de tip ciocan (ciocanul Kast) respectând normele din STANAG 4489 [12]. Metoda constă în căderea unui ciocan cu masă specificată, de la o înălțime fixă, peste proba de exploziv testată și determinarea energiei minime de impact la care se obține cel puțin o reacție, din șase încercări [12].

2.2.4 Inițierea directă cu laserul

Studiile din domeniu au analizat comportamentul materialelor energetice la impulsuri diferite și varietatea structurilor lor chimice, incluzând pulberi, elemente pirotehnice și explozivi primari sau secundari. Pentru alegerea unui sistem laser adecvat, sunt analizate aspectele procesului și principalii parametri ai radiației, precum lățimea pulsului, profilul și frecvența de repetiție a fasciculului, respectiv puterea acestuia.

Alegerea laserului pentru inițierea materialelor energetice depinde de cerințele aplicației, cele mai utilizate fiind **laserele Nd:YAG** și **diodele laser**. Laserul Nd:YAG este preferat datorită eficienței, costurilor reduse și versatilității (1064 nm, mod pulsat sau continuu), iar diodele laser funcționează pe bază de joncțiuni semiconductoare p-n. Cercetările au vizat experimente folosind diverse tipuri de laseri (UV, laseri în vizibil, IR apropiat și IR). În cadrul lucrării de doctorat, testele experimentale și evaluările de performanță au fost axate pe inițierea cu laser de tip Nd:YAG.

2.2.5 Inițierea prin propulsia de folii metalice cu laserul

Tehnica de inițiere a explozivilor prin propulsia de folii metalice cu laserul este o metodă indirectă de aprindere a materialelor energetice folosind un sistem laser.

Principiul constă într-un fascicul laser pulsat, dat de un sistem laser tip Nd-YAG, care este focalizat prin substratul transparent (sticlă) de care a fost lipită o folie de aluminiu (figura 2.6). Zona iradiată se încălzește rapid și este eliminată sub formă de plasmă. Acest lucru determină încălzirea suplimentară a stratului de dedesubt al foliei de aluminiu și atribuie o forță mecanică suficientă pentru a desprinde o secțiune a foliei de aluminiu. Folia metalică desprinsă se deplasează prin aer cu viteze mari, până la 1,6 km/s.

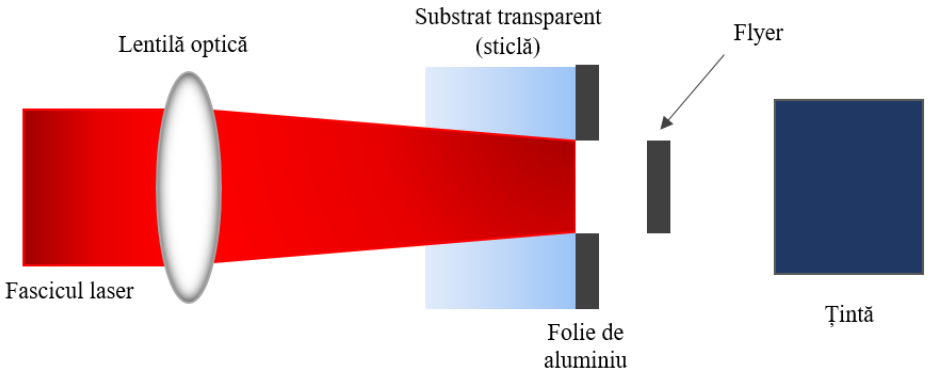


Figura 2. 3 *Schema de inițiere a explozivilor prin propulsia de folii metalice cu laserul*

Viteza unui „flyer” poate fi descrisă sub o formă dublă exponențială astfel:

$$u(t) = A_1\left(1 - e^{-B_1(t-t_0)}\right) + A_2(1 - e^{-B_2(t-t_0)}) \quad (2.13)$$

unde: A_1, A_2, B_1, B_2 *și* t_0 sunt parametrii de potrivire iar B_1, B_2 reprezintă accelerația ridicată din faza inițială, respectiv accelerația redusă din fazele ulterioare

2.2.6 Inițierea pulberilor prin folosirea unui gaz

Studiile anterioare, precum cel realizat de Leciejewski [13], au investigat prin teste comparative în bomba manometrică arderea pulberilor cu simplă bază, comparând inițierea clasică (electrică), cu plasmă și cu gaz. Rezultatele arată că

inițierea cu gaz și plasmă accelerează aprinderea, iar în cazul plasmei apar efecte dinamice legate de mișcarea rapidă a fluxului de plasmă [13]. Proprietățile balistice depind semnificativ de condițiile de aprindere, vitezele de ardere variind cu până la 20%. Pentru pulberile fine, cantitatea de pulbere neagră utilizată influențează modul de aprindere, fiind necesară o doză mai mare pentru a crea condiții similare cu aprinderea simultană [13]. Metodele de inițiere cu gaz și plasmă, alături de poziționarea probei în bomba manometrică, apropie procesul de aprindere cât mai aproape de cel ideal [13].

2.3 Concluzii

Analiza metodelor de inițiere a pulberilor evidențiază tranziția de la tehnicile clasice (electrice, prin frecare) la soluții moderne (laser, gaz). Metodele tradiționale, deși utilizate, prezintă limite de siguranță și integrare, în timp ce inițierea modernă oferă precizie, rapiditate și reducerea riscului de declanșare accidentală. Inițierea cu laser se remarcă prin controlul riguros al parametrilor și tehnici inovatoare, precum propulsia foliilor metalice. În acest context, direcția de cercetare aleasă în teză se justifică prin potențialul superior al metodei laser, următorul capitol fiind dedicat cercetărilor experimentale asupra comportamentului pulberilor la diferiți stimuli.

Capitolul 3 Cercetări experimentale privind combustia amestecurilor propulsive în bomba manometrică și reacția amestecurilor propulsive la stimul termic, impact și solicitări dinamice

Capitolul 3 prezintă cercetările experimentale privind caracterizarea pulberilor prin metode clasice. Testele în bomba manometrică au evidențiat influența grosimii și densității asupra timpilor de ardere: pulberile lamelare NBL, cu elemente mai subțiri, au reacționat mai rapid, în timp ce pulberile tubulare și cele cu 7 canale au prezentat cea mai lentă creștere a presiunii.

Determinările de sensibilitate au completat aceste rezultate, arătând că pulberile cu dublă bază (în special MBG) sunt mai sensibile la impact și frecare, în timp ce cele cu simplă bază se dovedesc mult mai sigure, fiind chiar încadrate ca insensibile la frecare. Din punct de vedere termic, majoritatea pulberilor au prezentat stabilitate acceptabilă, cu temperaturi de descompunere în jur de 180 °C.

O altă serie de teste, realizată pe pulberile cu 7 canale prin sistemul de bare Hopkinson, a confirmat sensibilitatea scăzută a acestora, reacțiile observate fiind doar de natură mecanică și termică, fără inițiere.

În ansamblu, capitolul oferă o caracterizare detaliată a pulberilor prin metode standardizate, constituind o bază de comparație pentru tehnicile moderne de inițiere.

3.1 Introducere

În capitolul anterior s-au prezentat diferite metode de inițiere a materialelor energetice. O etapă esențială în procesul de evaluare al performanței, fiabilității și siguranței sistemelor pirotehnice și de propulsie este reprezentată de caracterizarea comportamentului materialelor energetice la diferiți stimuli. Acești stimuli pot proveni din surse mecanice sau electrostatice. Prin urmare, este importantă cunoașterea sensibilităților compușilor explozivi. Valorile semnificative care trebuiesc determinate sunt legate de sensibilitatea la impact, la frecare, electrostatică și termală [14].

3.2 Teste experimentale de determinare a presiunii. Măsurarea presiunii cu ajutorul sistemului piezoelectric

Studiul arderii materialelor energetice joacă un rol important în cadrul fenomenului tragerii. Dat fiind faptul că procesul este complex, pentru determinarea legilor de ardere a compozițiilor precum și a formării gazelor, se realizează teste experimentale. Dispozitivul cu ajutorul căruia se pot realiza testele experimentale poartă denumirea de bombă manometrică.

Au fost efectuate teste experimentale folosind șapte tipuri de pulberi, la densități de încărcare diferite (100 kg/m^3, 150 kg/m^3 și respectiv 200 kg/m^3) împărțite pe categorii după cum urmează:

- Pulberi cu simplă bază
  - 7 canale (elemente cilindrice de tip multicanal)
  - tubulară (elemente cilindrice cu un singur canal)
- Pulberi cu dublă bază
  - NBL-11, NBL-42, NBL-62 (elemente lamelare)
  - MBG (pulbere grafitată, lamelară)
  - Nitrochemie (elemente cilindrice mici)

Arderea fiecărei compoziții explozive ne-a dat rezultate sub forma profilului p=f(t). Figura 3.5 afișează într-o manieră comparativă graficul cu evoluția presiunilor în timp pentru fiecare tip de pulbere utilizate, la densitatea de încărcare de 100 kg/m^3.

Rezultatele arată că timpii de ardere ai pulberilor cresc în funcție de grosimea elementelor de pulbere și scad în funcție de densitatea de încărcare. Pulberile cu 7 canale și cele tubulare ard cel mai lent, atingând presiunea maximă după 22,67 ms, respectiv 32,98 ms, în timp ce celelalte tipuri ating această valoare în mai puțin de 6 ms.

Pulberea MBG are cea mai rapidă creștere a presiunii, atingând valoarea maximă în mai puțin de 3 ms datorită particulelor fine și distribuției uniforme care favorizează arderea accelerată.

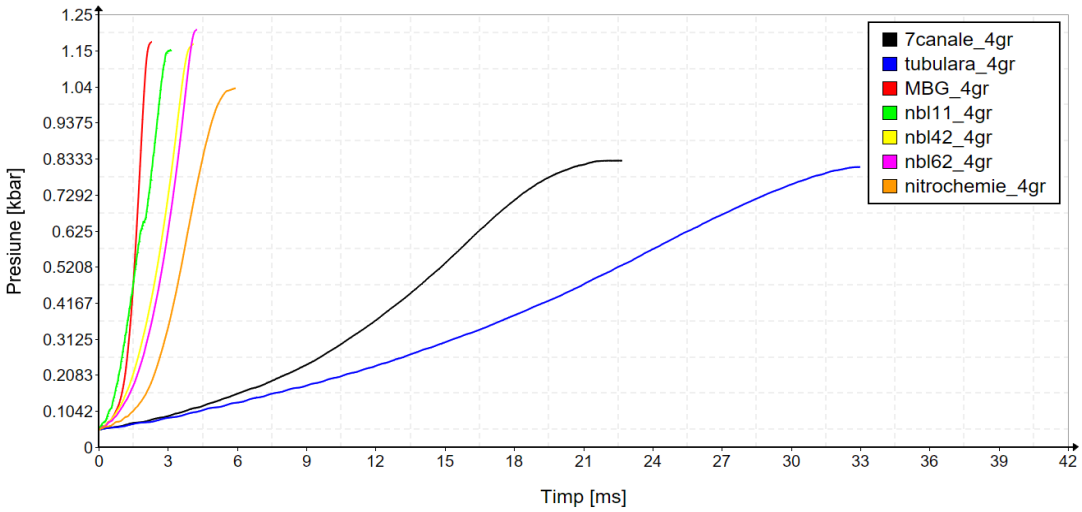


Figura 3. 1 *Grafic comparativ al profilurilor presiunii specifice diferitelor tipuri de pulberi la densitatea de încărcare de 100 kg/m^3*

3.3 Teste experimentale privind sensibilitatea la impact al amestecurilor propulsive (ciocanul KAST)

Sensibilitatea explozivilor la impact a fost evaluată prin testul cu ciocanul de cădere Kast [12], pornind de la o energie de 10 J și reducând treptat până la absența reacției. Rezultatele au arătat că probele testate prezintă sensibilități cuprinse între 3 și 20 J, cu diferențe semnificative între tipurile de pulberi: pulberea MBG s-a dovedit cea mai sensibilă, confirmând comportamentul observat și în testele cu bomba manometrică, în timp ce pulberile monobazice (tubulară și cu 7 canale) au prezentat cea mai mică sensibilitate, necesitând energii minime de inițiere mai mari. Corelarea rezultatelor sugerează că mecanismele de inițiere prin șoc mecanic sunt comparabile cu cele ale propagării arderii, iar sensibilitatea la impact este strâns legată de cea electrică, ambele fiind influențate de structura și morfologia pulberilor.

3.4 Teste experimentale privind sensibilitatea termică a amestecurilor propulsive

Pentru o analiză cât mai cuprinzătoare a dispozitivelor explozive din punct de vedere al siguranței și performanțelor este necesară cunoașterea caracteristicilor termice ale materialelor explozive.

Scopul efectuării acestor tipuri de teste îl constituie stabilirea modului de caracterizare termică a unui material exploziv cu ajutorul analizei termice diferențiale.

Analiza termică diferențială (DTA) înregistrează diferența de temperatură dintre o substanță și un material de referință, inert din punct de vedere termic. Pulberile utilizate în cadrul experimentelor au fost descrise în secțiunea anterioară.

Analiza termică diferențială (DTA) a demonstrat faptul că, comportamentul termic al pulberilor folosite este direct dependentă de compoziția chimică a acestora.

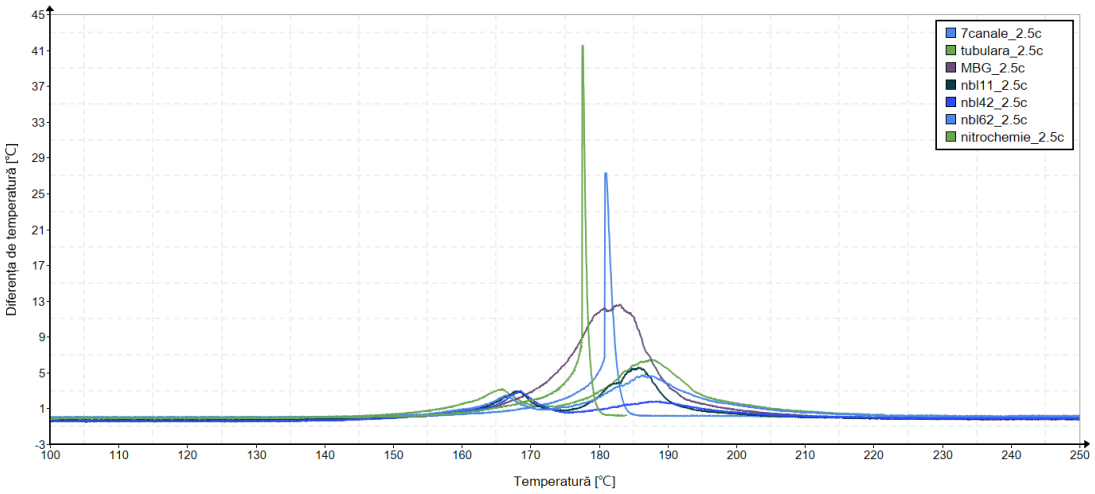


Figura 3. 2 *Termograma DTA corespunzătoare vitezei de creștere a temperaturii* $(2.5℃/\boldsymbol{min})$

Caracterizarea formulărilor prin analiza DTA a arătat faptul că, comportamentul la stimulul termic este strict dependent de compoziția chimică a acestora. Pulberile cu simplă bază (tubulară și cu 7 canale) prezintă cea mai mare diferență de temperatură față de materialul de referință. După cum se observă, pulberile utilizate prezintă o sensibilitate termică acceptabilă, aceasta regăsindu-se în jurul valorii de 180 °C, indiferent de viteza de creștere a temperaturii (*2.5 sau* $5\ ℃/min$).

3.5 Teste experimentale privind sensibilitatea la frecare al amestecurilor propulsive

Cea mai cunoscută metodă de testare și determinare a sensibilității unui material energetic la frecare este Dispozitivul BAM de determinare a sensibilității la frecare conform STANAG 4487 [9]. Una dintre cele mai frecvente cauze ale exploziilor accidentale se datorează sensibilității la frecare.

Pentru a obține rezultate relevante în care peste 50% din cazuri sunt favorabile, se efectuează un număr de 25-30 încercări pentru fiecare probă la diferite forțe de apăsare. Este cântărit un volum de pulbere de 10 mm^3, care va fi așezată pe plăcuța de porțelan sub formă de releu de 10 mm lungime, dispus perpendicular pe semnele de rugozitate ale plăcuței de porțelan [9]. Compozițiile de pulbere au fost de tip lamelar, granule și discuri, aceleași pulberi folosite și prezentate în secțiunile anterioare.

Rezultatele obținute în urma testelor pot fi de forma: fără reacție, descompunere, inițiere, pocnete și explozie în funcție de sensibilitatea fiecărei pulberi testate.

Rezultatele au arătat că majoritatea probelor sunt sensibile la sarcini de frecare între 168 și 252 N, cu excepția pulberilor cu simplă bază (tubulară și cu 7 canale), care nu au reacționat nici la valoarea maximă de 360 N. Testele confirmă tendința observată și la sensibilitatea la impact: compozițiile sensibile la impact manifestă aceeași comportare și la frecare. Pulberea MBG s-a dovedit cea mai sensibilă, în timp

ce pulberile lamelare (NBL-11, NBL-42, NBL-62) au prezentat praguri apropiate, inițiindu-se la circa 216 N, iar pulberea nitrochemie a fost cea mai puțin sensibilă, necesitând peste 252 N pentru inițiere. Inițierea s-a manifestat prin zgomote de tip pocnet sau prin urme de descompunere vizibile pe plăcuța de porțelan.

3.6 Studii experimentale privind reacția pulberilor induse de solicitări dinamice prin șoc cu sistemul de bare Hopkinson

Sistemul de bare Hopkinson este utilizat pentru studierea comportamentului materialelor la solicitări dinamice, prin transmiterea și reflexia undelor de compresiune într-o epruvetă cilindrică. Unda reflectată și unda transmisă sunt proporționale cu valorile deformației și tensiunii din epruvetă [15].

În cadrul testelor efectuate pe pulberi cu sensibilitate redusă și formă cilindrică cu șapte canale, la viteze de 5–20 m/s, s-au observat variații de temperatură cauzate de frecare internă și de fisurarea particulelor. Totuși, aceste solicitări nu au condus la inițierea reacției pulberii, demonstrând stabilitatea compozițiilor testate în condiții dinamice.

3.7 Discuții și rezultate

Rezultatele din tabelul 3.9 arată diferențe clare între pulberile cu simplă și dublă bază în ceea ce privește sensibilitatea la impact, frecare și comportamentul termic (DTA). Pulberea MBG s-a dovedit cea mai sensibilă, inițiindu-se la numai 3 J la testele de impact și menținând aceeași tendință și la frecare, unde pragul de inițiere a fost sub 216 N. În contrast, pulberile tubulare și cele cu 7 canale au fost cele mai sigure, nereacționând nici la sarcina maximă de 360 N, iar pulberea nitrochemie a prezentat cea mai scăzută sensibilitate la frecare, necesitând peste 252 N pentru inițiere.

Testele termice au indicat pentru majoritatea pulberilor o stabilitate acceptabilă, cu temperaturi de descompunere în jur de 180 °C, cele mai mari diferențe fiind observate la pulberile cu simplă bază. În ansamblu, rezultatele confirmă corelația dintre sensibilitatea mecanică și cea termică, subliniind influența decisivă a structurii și morfologiei particulelor asupra comportamentului pulberilor.

Tabelul 3. 1 *Rezultatele testelor de sensibilitate*

	7 canale	**tubulară**	**MBG**	**NBL-11**	**NBL-42**	**NBL-62**	**nitrochemie**
Sensibilitatea la impact [J]	6	8	3	5	6	6	6
Sensibilitatea la frecare [N]	insensibilă	insensibilă	168	216	216	216	252
Sensibilitatea termică [℃]	180.9	187.9	182.8	185.6	168.4	186.1	177.5

Capitolul 4 Cercetări experimentale privind integrarea sistemului de inițiere laser pentru amestecurile propulsive în bomba manometrică clasică

Capitolul 4 prezintă cercetările privind integrarea unui sistem laser în bomba manometrică. A fost dezvoltat un sistem optic care a permis atât inițierea directă a încărcăturii energetice, cât și inițierea indirectă prin intermediul unui amorsor. Rezultatele au arătat că metoda indirectă favorizează propagarea rapidă și uniformă a arderii, reducând timpii de întârziere și confirmând fezabilitatea utilizării laserului ca mijloc de aprindere.

O altă direcție experimentală a vizat transmiterea fasciculului prin tuburi de Plexiglas, demonstrând posibilitatea inițierii chiar și cu tuburi curbate sau cu capete ascuțite, care concentrează energia laserului. Testele pe pulberi cu simplă bază au evidențiat o creștere mai rapidă a presiunii odată cu mărirea masei încărcăturii, performanțele fiind îmbunătățite prin utilizarea tuburilor.

Compararea cu metodele clasice a arătat că inițierea electrică rămâne superioară, dar inițierea cu laser oferă avantaje precum precizia și controlul parametrilor, în ciuda limitărilor legate de pierderile optice și de necesitatea optimizării configurațiilor.

4.1 Introducere

Motivația pentru cercetarea în aprinderea cu laser a materialelor energetice este derivată din nevoia de dispozitive adaptabile, cu acțiune rapidă și extrem de fiabile, care pot îndeplini criteriile specifice unor tipuri de muniție insensibilă.

Inițierea cu laser a pulberilor a urmat două direcții principale. În primul rând, măsurarea sensibilității grăunțelor de pulbere la energia transmisă de fasciculul laser (efectele caracteristicilor fizice și chimice ale materialului) și în al doilea rând, dezvoltarea și testarea unui sistem practic de aprindere cu laser.

4.2 Proiectarea sistemului de inițiere cu laser și integrarea acestuia în bomba manometrică

4.2.2 Inițierea directă cu laserul

Inițierea materialelor energetice a fost realizată experimental prin integrarea unui sistem laser în bomba manometrică, conectată la un sistem de achiziție a datelor (traductor, condiționer, osciloscop și software Picoscope). În mod comparativ, au fost efectuate teste de inițiere cu promotor laser cu și fără a utiliza un amorsor (pulbere neagră). În figura 4.4 b se evidențiază noul subansamblu capac al bombei, prevăzut cu vizor și lentilă de sticlă, a permis trecerea fasciculului laser, reglarea focalizării și menținerea alinierii pe direcția de inițiere.



(a) (b)

Figura 4. 1 *(a) Bomba manometrică, (b) Sistemul laser integrat în componența bombei manometrice* [16]

În cadrul testelor au fost utilizate trei tipuri de pulberi: PR-1 (pulberea lamelară NBL-11), PR-2 (pulberea lamelară NBL-42) și PR-3 (pulberi de formă cilindrică de mici dimensiuni).

În cadrul graficului din figura 4.8 se poate distinge faptul că în cazul aprinderii indirecte cu laserul, aprinderea încărcăturii a fost mai rapidă iar presiunea maximă atinsă a depășit valoarea presiunii obținute în mod normal.

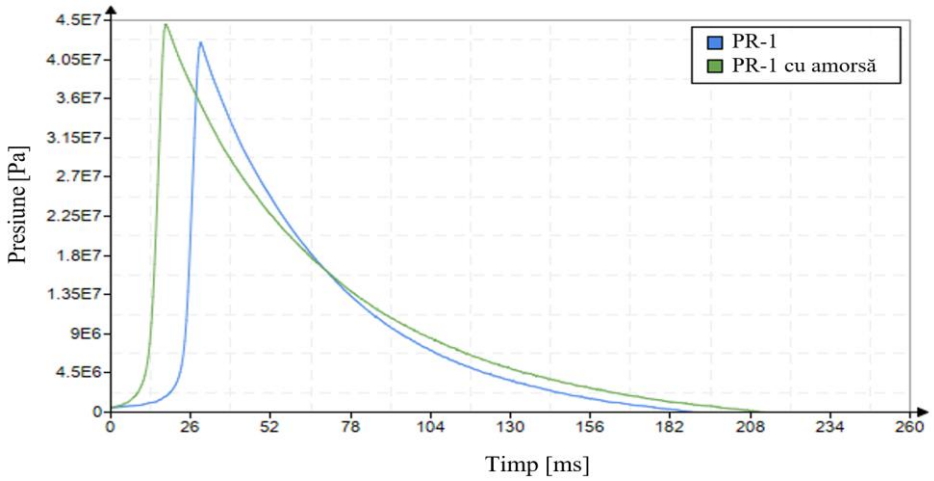


Figura 4. 2 *Analiză comparativă compoziție PR-1între aprinderea directă și indirectă* ***[16]***

4.2.3 Inițierea cu laserul prin intermediul tuburilor din plexiglas

În scopul transmiterii fasciculului laser către materialul energetic, s-au folosit tuburi din plexiglas, o soluție ieftină și ușor de integrat în bomba manometrică. Testele au utilizat un laser cu lungimea de undă de 520 nm, puterea de 3 W, cu funcționare în regim continuu, iar pentru amorsare s-a folosit pulbere neagră, având în vedere insensibilitatea explozivilor militari la stimulul laser. Pulberile testate au fost monobazice, cilindrice, cu o singură perforație. Experimentele au început cu inițiere într-un singur punct și au evoluat spre stabilirea unor sisteme multi-point. În plus,

datorită flexibilității tuburilor de plexiglas, s-a încercat inițierea compoziției prin curbarea acestora (figura 4.15), iar testele au demonstrat succesul inițierii.



(a) (b)

Configurația experimentală din timpul testelor

Figura 4. 3 *Configurațiile experimentale cu tubul din Plexiglas dispus: orizontal (a) și (b) curbat*

Testele de inițiere cu laserul prin tubul din plexiglas au fost efectuate pe încărcături de pulbere de 4 g și respectiv 6 g, în care pulberea neagră a fost utilizată ca amorsor, reprezentând 10% din încărcătură

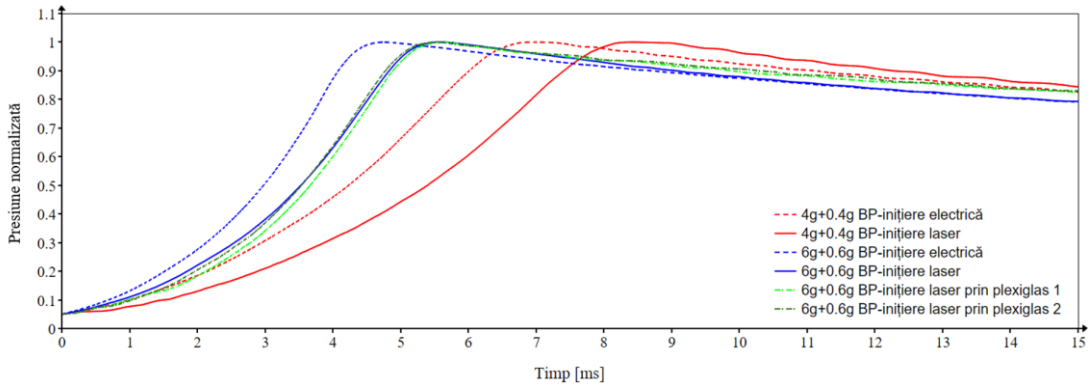


Figura 4. 4 *Evoluția presiunii la diferite densități de încărcare și diferite metode de inițiere: inițierea electrică clasică (liniile punctate), inițierea cu laserul (liniile continue) și inițierea cu laserul prin tuburi de plexiglas (liniile cu marcatori)*

În figura 4.18 se observă faptul că viteza de creștere a presiunii depinde în principal de masa încărcăturii, inițierea electrică fiind cea mai rapidă, urmată de inițierea cu laser, inclusiv prin tuburile din plexiglas. La încărcături mari, toate metodele produc reacții rapide, iar la încărcături mici diferențele devin mai evidente, confirmând că inițierea electrică are avantaj la mase reduse.

4.3 Concluzii

În configurația bombei manometrice, aprinderea cu laser – atât directă, cât și prin tuburi din plexiglas – s-a dovedit eficientă, mai ales cu utilizarea unei amorse de pulbere neagră, care asigură o aprindere rapidă și uniformă. Tuburile din plexiglas permit devierea și concentrarea fasciculului, îmbunătățind performanțele, însă metoda

electrică rămâne superioară. Cercetările viitoare vizează utilizarea fibrelor optice pentru aprinderea simultană în mai multe puncte și creșterea uniformității combustiei.

Capitolul 5 Cercetări experimentale privind inițierea explozivilor cu laserul

Capitolul 5 prezintă cercetările experimentale privind inițierea explozivilor cu un laser pulsat Nd:YAG (1064 nm, spot ~3 mm), analizând două metode: propulsia foliilor metalice și inițierea directă cu laserul. Pentru foliile de diferite grosimi (40 μm, 2×40 μm, 3×40 μm, 100 μm) s-au determinat pragurile de aprindere, vitezele de impact și timpii de întârziere, observându-se că foliile mai subțiri oferă aprinderi mai rapide, la energii mai reduse. Procesul inițierii directe are loc în trei etape (formarea plasmei, aprindere și ardere) și este influențată de parametrii fasciculului, însă prezintă întârzieri mai mari.

5.1 Introducere

Inițierea materialelor energetice prin intermediul sistemelor laser a apărut la începutul anilor 1960. Au fost utilizați laseri de tip rubin, cu CO_2 și Nd:YAG, cu funcționări în regim pulsat la lungimi de undă cuprinse între 0.266 μm și 1.06 μm [17].

Utilizarea sistemelor de inițiere bazate pe laser reprezintă un progres semnificativ față de sistemele convenționale, în special datorită sensibilității reduse la interferențe electromagnetice. De asemenea, apariția noilor diode laser de mare putere permite dezvoltarea de noi sisteme de inițiere ușoare și autonome care folosesc fibrele optice [18].

5.2 Metode experimentale

Două abordări au fost utilizate pentru a iniția explozivi. În prima abordare, fasciculul laser este direct incident asupra țintei, inițiind un proces de ardere auto-susținut care, dacă condițiile sunt corecte, poate tranziționa în deflagrație și după în detonație.

A doua abordare constă în folosirea energiei create prin vaporizarea foliei metalice pentru a propulsa o bucățică din folie (flyer) către încărcătura explozivă. Unda indusă în exploziv de impactul flyer-ului va produce tranziția șocului într-un front reactiv de detonație [19].

5.2.1 Inițierea explozivilor prin propulsia de folii metalice cu laserul

Studiul impactului balistic asupra materialelor energetice a condus la utilizarea unor proiectile de tip flyer care s-au dovedit a fi o metodă eficientă pentru analiza comportamentului dinamic la stimuli de tip șoc a compozițiilor pirotehnice [20].

În figura 5.13 - detaliu a, se observă cum impulsul laser dispersează o parte solidă a suprafeței foliei de aluminiu, iar flyer-ul format lovește proba testată aprinzându-i suprafața superioară.

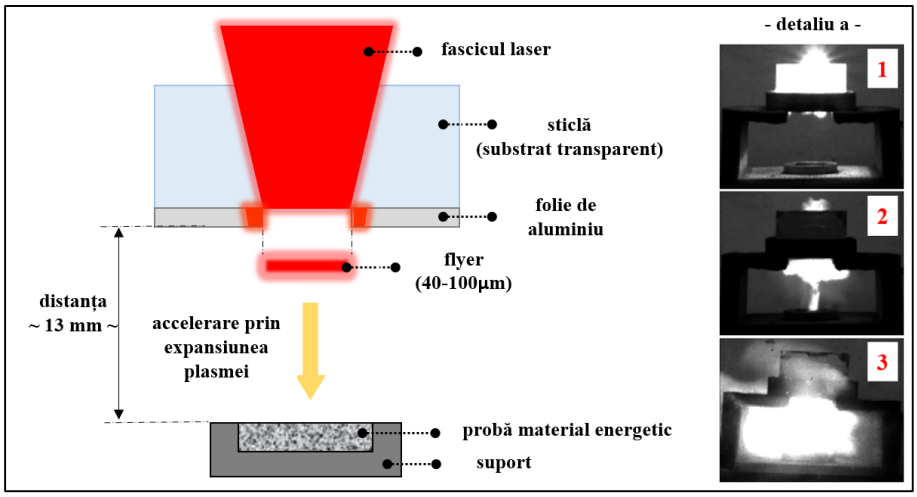


Figura 5. 1 *Inițierea prin propulsia de folii metalice cu laserul (1 - formarea plasmei; 2 - impactul probei materialului energetic de către flyer; 3 - aprinderea probei)* ***[21]***

Testarea configurației cu o folie metalică de 40µm

Testele experimentale au fost efectuate utilizând energii laser între 100 mJ și 2800 mJ.

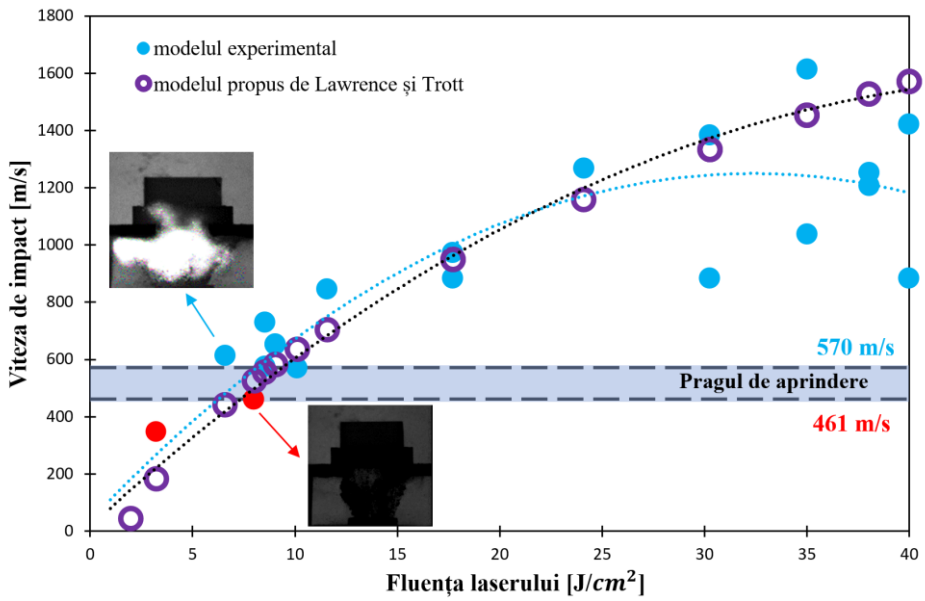


Figura 5. 2 *Analiza comparative a modelului experimental cu modelul propus de Lawrence și Trott în analiza vitezei de impact pentru propulsia unei folii de 40 µm* ***[21]***

Graficul din figura 5.14 arată o bună corespondență între modelul Lawrence–Trott și datele experimentale, cu abateri la fluențe mari (> 40 J/cm²) [22] din cauza defectării optice a sticlei și pierderilor de energie în plasmă [21]. Variațiile suplimentare se datorează calității foliei și preciziei lipirii acesteia de sticlă.

Testarea configurației cu 2-3 folii metalice de 40µm

Schema din figura 5.13 a fost modificată prin introducerea a 2–3 folii metalice de 40 µm, pentru a evalua influența asupra formării flyerului și aprinderii pulberii.

Rezultatele arată că viteza minimă necesară pentru aprindere este de 569 m/s în cazul utilizării a două folii metalice și 423 m/s pentru trei folii metalice, iar intervalul de fluență/energie este foarte îngust: sub 2801 mJ nu se formează flyerul sau nu se atinge viteza necesară aprinderii [21].

Testarea configurației cu o folie metalică de 100µm

Rezultatele experimentale arată că, pentru o folie metalică de 100 µm propulsată cu laserul, pragul minim al vitezei de impact necesar aprinderii este de aproximativ 315 m/s, valoare mai mică decât în cazurile cu 2 sau 3 folii metalice. Acest lucru se datorează faptului că o folie de aluminiu mai groasă necesită o energie laser mai mare, însă folie metalică rezultată este propulsată cu o viteză mai mică [21].

Graficul din figura 5.18 arată că viteza maximă de impact se obține la folia de aluminiu de 40 µm, iar creșterea grosimii sau a numărului de folii duce la scăderea vitezei și la necesitatea unei energii laser mai mari pentru formarea flyerului. Pragurile minime de energie sunt de 130 mJ pentru o folie de 40 µm, 90 mJ pentru o folie de 100 µm, 260 mJ pentru două folii de 40 µm și 210 mJ pentru trei folii de 40 µm.

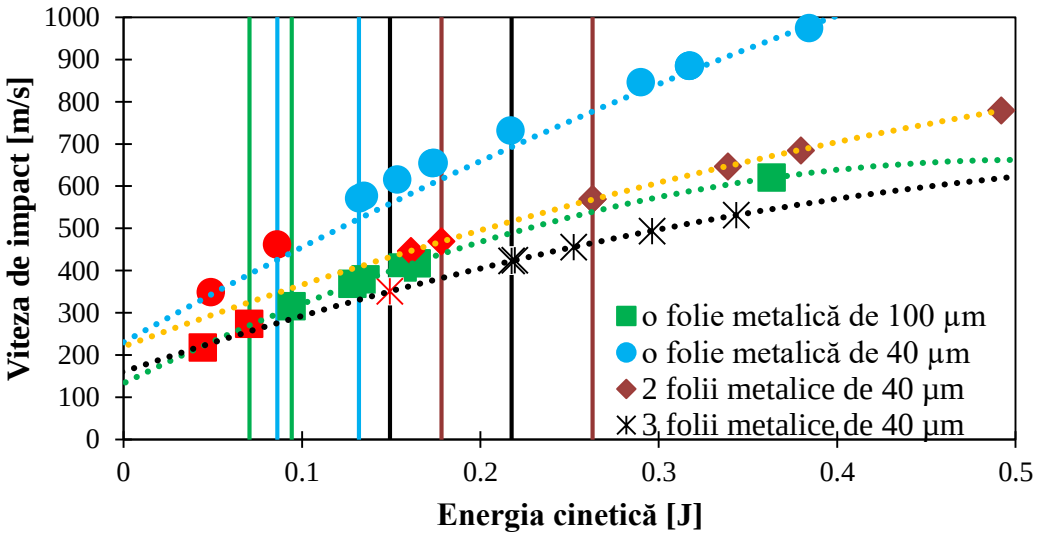


Figura 5. 3 *Evoluția vitezelor de impact obținute în cazul inițierii explozivilor prin propulsia de folii metalice cu laserul (punctele roșii semnifică inițiere nereușită)* ***[21]***

5.2.2 Inițierea directă a explozivilor cu laserul

Schema metodologiei experimentale este prezentată în figura 5.21. În acest caz, fasciculul laser este transmis direct asupra cantității de material energetic, inițiind un proces de combustie auto-susținut care poate trece de la deflagrație la detonație (DDT).

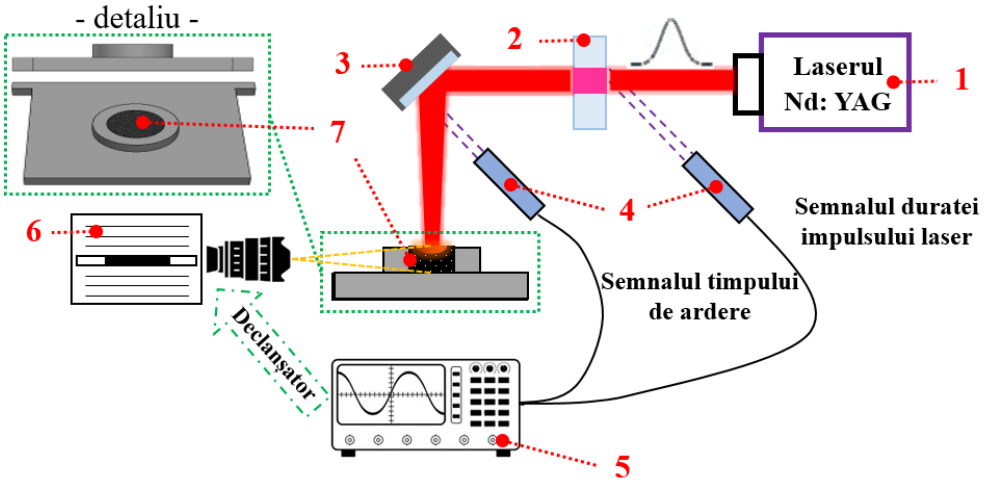


Figura 5. 4 *Configurația experimentală pentru inițierea directă cu laserul (1 – sistemul laser; 2 – lentile optice; 3 - oglindă; 4 - fotodiode; 5 - osciloscop; 6 – camera ultra rapidă; 7 – platforma de testare și proba de pulbere)* ***[21]***

În testele de inițiere directă cu laser, au fost utilizate probe de aproximativ 200 mg pulbere, plasate într-un suport cilindric. Procesul de inițiere directă cu laser s-a produs prin mecanismul de aprindere în „puncte fierbinți" [23], la fluențe între 0,71 și 15,095 J/cm². Peste valorile fluenței de 0,815 J/cm², aprinderea a avut loc în 100% din cazuri, iar energia minimă necesară a fost de 57 mJ, mai redusă decât în cazul propulsiei de folii metalice cu laserul, datorită lipsei materialului intermediar [21].

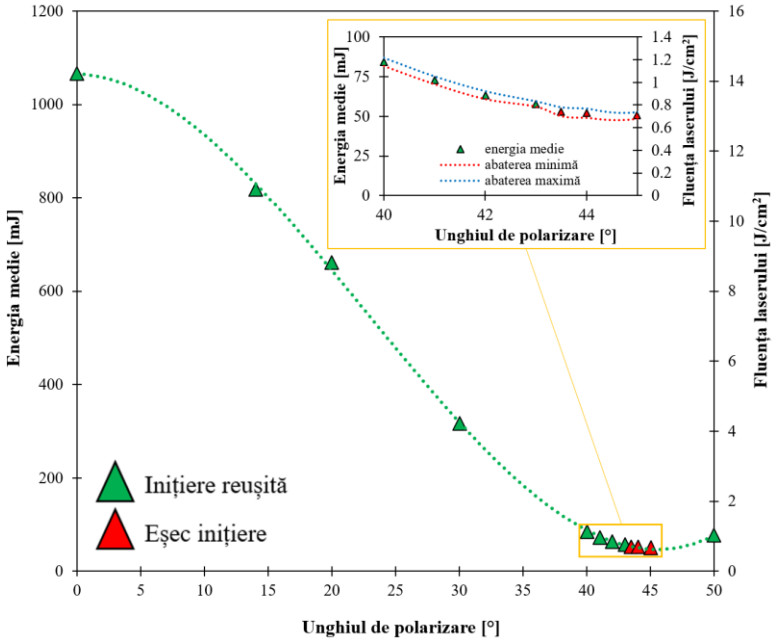


Figura 5. 5 *Dependența energiei de fluența laserului și unghiul de polarizare* ***[21]***

5.3 Concluzii și discuții

Capitolul prezintă o comparație între inițierea directă cu laser și inițierea prin propulsia foliilor metalice. Utilizarea foliilor de aluminiu asigură o aprindere mai rapidă și mai eficientă, dar necesită energii laser mai mari, iar timpii de întârziere cresc proporțional cu grosimea acestora. Inițierea directă cu laser are un prag energetic semnificativ mai mic, dar conduce la o aprindere mai lentă, cu etape bine definite. Rezultatele confirmă în linii mari modelul Lawrence–Trott și arată că parametrii fasciculului, alături de geometria și condițiile de mediu ale probelor, influențează decisiv mecanismul de aprindere. În ansamblu, propulsia foliilor demonstrează un potențial ridicat pentru inițiere rapidă și controlată, contribuind la dezvoltarea unor tehnologii avansate și sigure pentru sistemele pirotehnice.

Capitolul 6 Modelarea numerică a propulsiei de folii metalice cu laserul

Capitolul 6 a prezentat modelarea numerică a propulsiei foliilor metalice cu LS-DYNA, folosind un model 2D axial-simetric și legi constitutive specifice pentru fiecare material. Fasciculul laser a fost echivalat printr-o presiune de ablație aplicată foliei de aluminiu. Simulările au arătat formarea și ruperea flyerelor de 40 μm și 100 μm la energii de 2826 mJ, confirmând concordanța cu rezultatele experimentale. Modelul s-a dovedit valid, dar necesită ajustarea parametrilor și trecerea către simulări 3D pentru o descriere mai fidelă a fenomenului.

6.1 Introducere

Studiul impacturilor la viteze foarte mari reprezintă un domeniu esențial cu implicații directe în cercetări și aplicații de actualitate. Pentru a reproduce și analiza aceste fenomene în laborator, este necesară accelerarea diferitelor tipuri de proiectile la viteze de ordinul kilometrilor pe secundă.

O metodă promițătoare în acest sens este generarea de proiectile prin iradiere laser. Această metodă are avantajul de a obține proiectile cu geometrii variate păstrând o cadență ridicată a tragerilor

6.2 Configurația experimentală

Montajul experimental (fig. 6.1) a utilizat un laser cu diametrul spotului laser de 3 mm. Energia impulsurilor a fost măsurată cu un joulemetru și profilul temporal al intensității cu o fotodiodă, date care au permis estimarea presiunii de ablație prin codul numeric ESTHER.

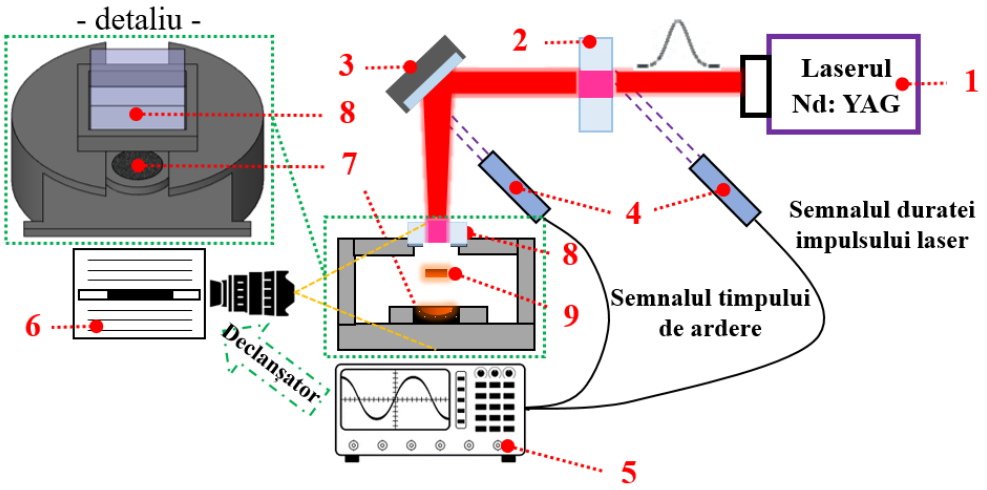


Figura 6. 1 *Configurația experimentală pentru propulsia de folii metalice cu laserul (1 – sistemul laser; 2 – lentile optice; 3 - oglindă; 4 - fotodiode; 5 - osciloscop; 6 – camera ultra rapidă; 7 – platforma de testare și proba de pulbere; 8 – sticlă; 9 – flyer)*

6.3 Modelarea numerică

Pentru analiza comportamentului foliei metalice și al ansamblului supus radiației laser, s-a utilizat metoda elementului finit (LS-DYNA). Configurația modelului din LS-DYNA, împreună cu discretizarea cu elemente finite și distribuția presiunii sunt ilustrate în figura 6.3. În cadrul simulărilor, energia laser de 2826 mJ a fost echivalată printr-o presiune de ablație aplicată foliei de aluminiu, ceea ce a dus la formarea și propulsia flyerului.

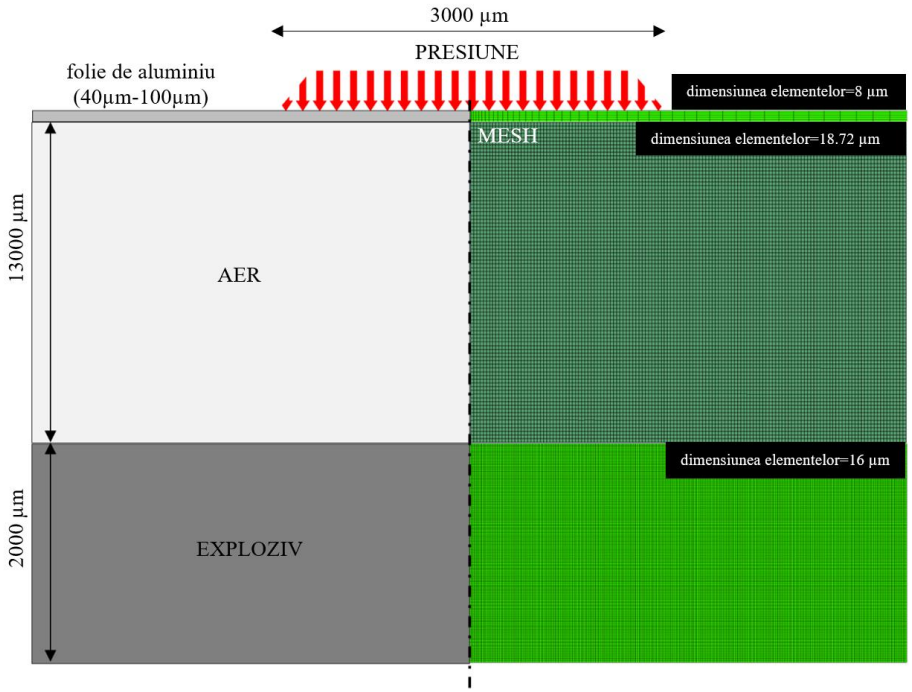


Figura 6. 2 *Modelul LS-DYNA: discretizarea cu elemente finite și distribuția presiunii*

Presiunea de ablație a fost descrisă prin relația:

$$P(x,t) = \left[1 - \frac{1}{\pi} arctan\left(-\frac{x}{R}\right)^{12}\right] \cdot A(t) \quad (6.1)$$

unde A reprezintă funcția temporală amplitudinii presiunii, x reprezintă poziția de-a lungul foliei de aluminiu care determină distribuția spațială a presiunii iar R reprezintă raza spotului laser.

6.4 Rezultate

În această secțiune este analizată formarea și propulsia unei folii de aluminiu prin ablație, urmărind dinamica flyerului pe o distanță de 13 mm. Figura 6.9 ilustrează evoluția unei folii de 40 µm, din momentul desprinderii de folie (t=0.11989 µs) până la impactul cu stratul exploziv (t=9.3999 µs).

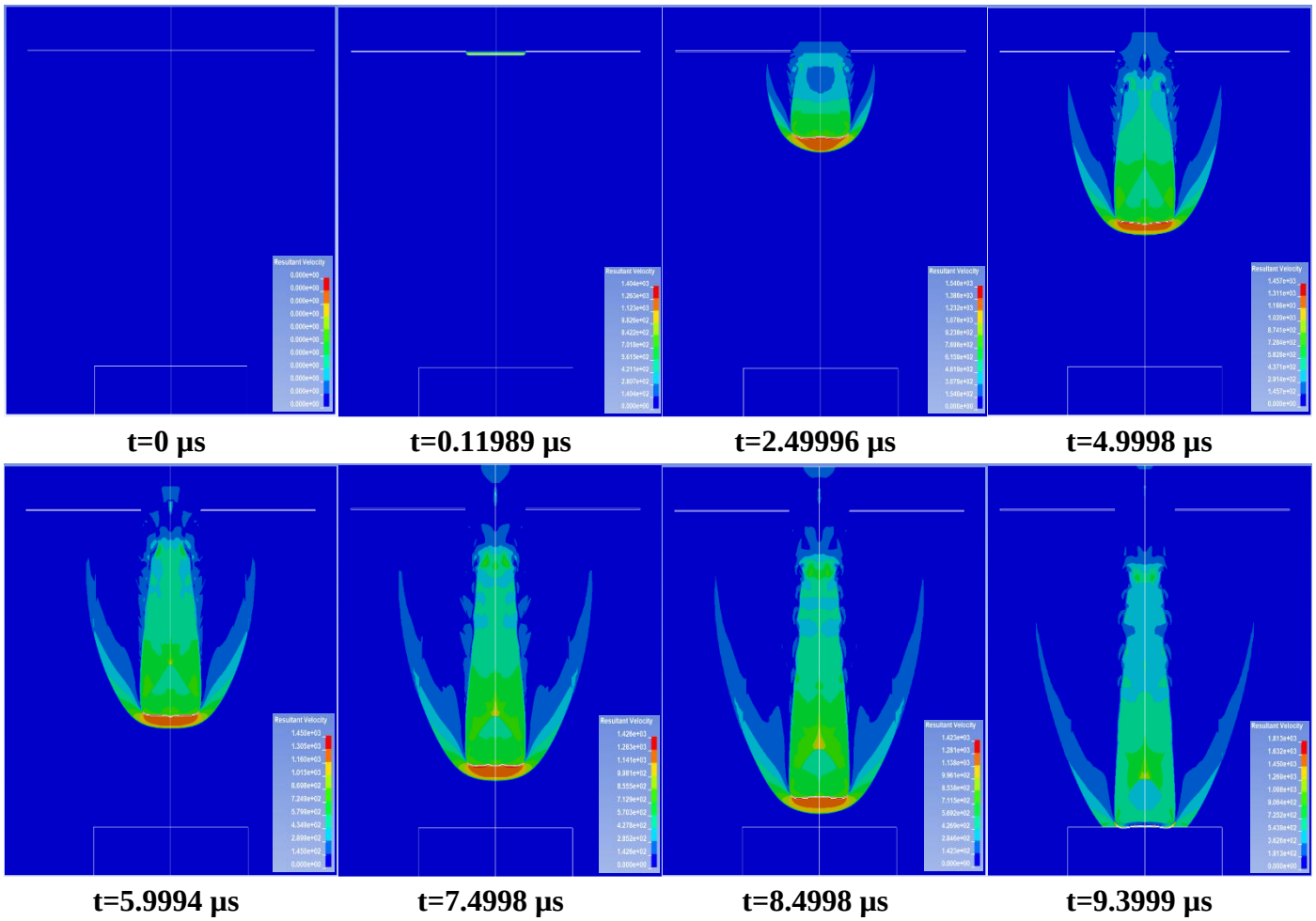


Figura 6. 3 *Rezultate numerice privind formarea flyerului de 40 µm si traiectoria acestuia până la impactul cu explozivul*

Figura 6.11 prezintă evoluția vitezelor foliilor de aluminiu de 40 µm și, respectiv, 100 µm în timp, pentru o energie laser de 2826 mJ. Se observă clar ruperea foliei în zona valorilor maxime ale celor două profiluri: la t = 0,12 µs pentru folia de 40 µm, respectiv t = 0,42 µs pentru folia de 100 µm. Aceasta se datorează masei reduse și rezistenței mecanice mai mici a foliei subțiri, care se rupe mai rapid,

influențând modul de transmitere a impulsului și dinamica foliei pe traiectorie. Viteza foliei de 40 µm este de aproximativ două ori mai mare decât cea a foliei de 100 µm, aceeași tendință fiind confirmată și în cazul experimental.

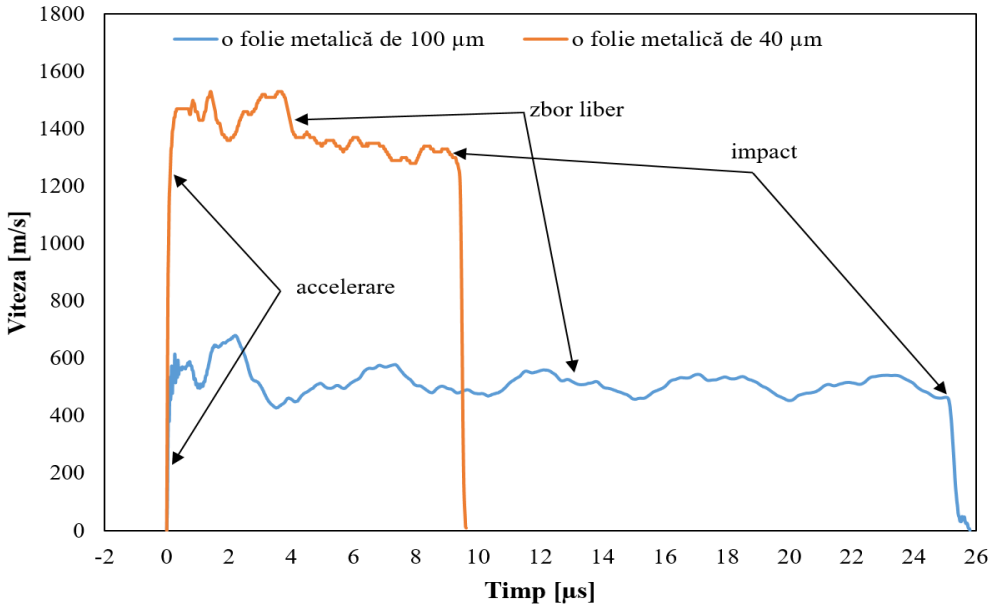


Figura 6. 4 *Viteza elementului din centrul flyer-ului pentru fiecare din cele două configurații (folie metalică de 40 µm și 100 µm) în raport cu timpul. Vitezele ajung la zero în momentul impactului cu proba*

6.5 Concluzii și discuții

Acest capitol analizează procesul de propulsie a foliilor de aluminiu prin iradiere laser, concentrându-se pe modelarea și evaluarea comportamentului mecanic al foliilor de 40 µm și 100 µm. Simulările numerice 2D axial-simetrice au reprodus corect formarea și dinamica flyer-ului, rezultatele fiind în concordanță cu datele experimentale privind viteza, impulsul și distanța parcursă. Totuși, micile diferențe observate sugerează necesitatea ajustării parametrilor, prin modele constitutive mai avansate, optimizarea discretizării și trecerea către simulări 3D. Direcțiile viitoare vizează integrarea materialelor explozive în model pentru a reproduce detonația reală și a obține o validare mai precisă a fenomenului de propulsie.

Concluzii

În cadrul tezei de doctorat ”Studii și cercetări referitoare la dezvoltarea metodelor de inițiere pentru amestecurile propulsive” au fost investigate aspecte fundamentale și aplicative privind comportamentul amestecurilor propulsive și explozivilor la inițiere clasică și inițiere laser, atât din perspectivă experimentală, cât și prin modelare numerică. Studiul a vizat etapele esențiale ale procesului de combustie și detonație, parametrii de sensibilitate la stimuli mecanici și termici, precum și integrarea tehnologiilor moderne de inițiere cu laserul, inclusiv propulsia foliilor metalice. Rezultatele obținute confirmă corelațiile dintre structura și morfologia pulberilor, parametrii fizico-chimici și dinamica procesului de ardere,

evidențiind totodată potențialul metodelor de inițiere laser în creșterea siguranței și controlului asupra reacțiilor energetice.

Rezultate obţinute

Teza de doctorat prezintă o abordare completă asupra amestecurilor propulsive și a inițierii acestora, pornind de la fundamentele teoretice până la cercetările experimentale și modelarea numerică. Sunt detaliate tipurile de pulberi energetice, clasificarea lor după compoziție, geometrie și modul de ardere, precum și legile vitezei de ardere și factorii care influențează comportamentul real, sensibilitatea și riscurile asociate.

Au fost analizate metodele de inițiere a pulberilor și explozivilor, de la impact, frecare și stimul termic sau electric, până la inițiere cu gaz ori cu laser. Pentru fiecare metodă sunt discutate principiile teoretice, modelele matematice, parametrii de influență și procedurile de testare, subliniindu-se importanța siguranței și a performanței sistemelor propulsive.

Studiile experimentale prin metode clasice, precum testele în bomba manometrică și determinarea sensibilității la impact, frecare și temperatură, au permis caracterizarea comparativă a pulberilor cu simplă bază și a celor cu dublă bază.

Rezultatele au arătat diferențe notabile de sensibilitate și comportament la ardere, confirmând, de exemplu, că pulberile MBG sunt cele mai sensibile, în timp ce pulberile cu simplă bază se dovedesc mult mai stabile. Testele dinamice cu sistemul Hopkinson au evidențiat răspunsul mecanic al pulberilor fără inițierea reacției.

Integrarea fasciculului laser ca metodă de inițiere a demonstrat fezabilitatea și avantajele acestei tehnologii, atât prin inițiere directă, cât și indirectă, precum și prin transmiterea fasciculului cu ajutorul tuburilor din plexiglas. Experimentele au evidențiat o aprindere rapidă și uniformă, cu un control mai precis al procesului, dar și limitări datorate pierderilor optice.

Cercetările aprofundate cu laserul Nd:YAG pulsat au vizat atât inițierea directă a compozițiilor energetice, cât și propulsia foliilor metalice. S-au stabilit praguri energetice și de viteză pentru diverse configurații de folii, observându-se că foliile mai subțiri permit viteze mai mari, dar necesită un control mai bun asupra energiei. Comparativ, inițierea directă necesită energii mai mici, însă cu precizie mai ridicată a spotului laser, în timp ce propulsia foliilor oferă aprinderi mai eficiente și mai rapide.

În final, modelarea numerică a procesului de propulsie a foliilor metalice prin metoda elementului finit a confirmat corelația bună cu rezultatele experimentale, reliefând totodată limitele abordării 2D și necesitatea efectuării de simulări 3D pentru o descriere mai fidelă a fenomenului.

Contribuţii originale

Contribuțiile originale ale acestei teze se regăsesc atât în partea experimentală, cât și în cea de modelare numerică, vizând caracterizarea pulberilor, dezvoltarea și testarea unor metode moderne de inițiere cu laser și validarea acestora prin comparație cu metodele clasice și cu modele teoretice. În continuare sunt prezentate principalele contribuții aduse prin această cercetare:

1. Caracterizarea experimentală completă a pulberilor de simplă și dublă bază prin teste standardizate (bombă manometrică, sensibilitate la impact, frecare și termică) [2,3];
2. Testarea pulberilor cu 7 canale prin sistemul de bare Hopkinson (SPHB), demonstrând lipsa inițierii la șocuri dinamice (5–20 m/s) și caracterizarea comportamentului mecanic al acestora la solicitări dinamice [4];
3. Integrarea și testarea unui sistem de inițiere cu laser în bomba manometrică clasică, atât prin inițiere directă, cât și indirectă (folosind un amorsor), precum și transmiterea fasciculului laser prin intemediul tuburilor din plexiglas [5];
4. Demonstrarea posibilității transmiterii și devierii fasciculului laser prin curbarea tuburilor din plexiglas și analiza performanțelor obținute;
5. Compararea inițierii electrice, inițierii directe cu laser și inițierii cu laser prin tuburi din Plexiglas, cu evidențierea avantajelor și limitărilor fiecărei metode;
6. Studiul inițierii explozivilor cu laser prin două abordări: propulsia de folii metalice cu laserul și inițierea direct cu laserul, prin stabilirea pragurilor de inițiere, cu valori specifice ale energiei, timpului de aprindere și vitezelor de impact asociate [6,7];
7. Validarea datelor experimentale prin raportare la modele analitice și evidențierea mecanismelor de aprindere (impact vs. efect termic) [7];
8. Dezvoltarea unui model numeric, 2D axial-simetric în LS-DYNA, pentru procesul de propulsie a foliilor metalice, prin echivalarea energiei laserului cu o presiune de ablație și validarea rezultatelor obținute în raport cu datele experimentale.

Lista lucrărilor originale

1. **Răzvan Mircioagă**, Liviu Matache, Adrian Rotariu, Marius Cîrmaci, Pamfil Șomoiag, Laviniu Haller, Alexandru Rancea, "Burning law determination using numerical simulation of propellants burning in the closed vessel," IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering, vol. 916, 2020.

2. **Răzvan Mircioagă**, Adrian Rotariu, Tudor Prisecaru, Florin Dîrloman, Bogdan Pulpea, Ionuț Predescu, Experimental study regarding burning process specific to different types of propellants by means of closed vessel tests, UPB Scientific Bulletin, Series D:Mechanical Engineering, Vol.85, Iss.2, 2023, ISSN 1454-2358

3. Florin Dîrloman, Traian Rotariu, Tudor Țigănescu, **Răzvan Mircioagă**, Considerations Regarding Modern Solid Rocket Propellants, Journal of Military

Technology, 17-24, Vol.6, Iss.1, 2023, ISSN 2601-6613
4. **Răzvan Mircioagă**, Tudor Prisecaru, Adrian Rotariu, Julien Le Clanche, Baptiste Reynier, Michel Arrigoni, " Experimental study on the dynamic behavior of low-sensitivity propellant grains with the split hopkinson pressure bar," in Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies”, Schumen, 2024.
5. **Răzvan Mircioagă**, Adrian Rotariu, Bogdan Pulpea, Florin Dîrloman, Study of the gun powders ignition by laser beam in closed vessels, New Trends in Research of Energetic Materials, 2024, ISBN 978-80-7560-507-8
6. Baptiste Reynier, **Răzvan Mircioagă**, Julien Le Clanche, Lorenzo Taddei, Jean-Marc Chevalier, David Hébert, Michel Arrigoni, "High-velocity laser-driven flyer impact on paraffin gel," International Journal of Impact Engineering, vol. 202, 2025.
7. **Răzvan-Marian Mircioagă**, Baptiste Reynier, Tudor Prisecaru, Adrian-Nicolae Rotariu, Florin-Marian Dîrloman, Liviu-Cristian Matache, Laviniu Haller, " Advancing ignition techniques for energetic materials: A comparative study of direct laser ignition and laser-driven flyer methods", Defence Technology Journal, Advance online publication, 2025, https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.005.

Perspective de dezvoltare ulterioară

Rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat ”Studii și cercetări referitoare la dezvoltarea metodelor de inițiere pentru amestecurile propulsive” oferă o bază solidă pentru continuarea cercetărilor. Principalele direcții de dezvoltare viitoare sunt:

- **Extinderea studiilor experimentale**: testarea pulberilor de triplă bază, compozite și eco-friendly; analiza explozivilor de uz militar și civil (RDX, HMX, PETN); corelarea sensibilității cu parametrii microstructurali;
- **Optimizarea configurațiilor de testare** prin utilizarea fibrelor optice pentru divizarea fasciculului laser și obținerea unei aprinderi simultane și uniforme în mai multe puncte ale încărcăturii. Utilizarea altor tipuri de lasere (CO_2);
- **Perfecționarea modelării numerice** prin folosirea simulărilor numerice 3D cu integrarea reacției de detonație, pentru o validare mai riguroasă a modelelor și o înțelegere detaliată a fenomenelor de propulsie;
- **Investigarea aplicabilității sistemelor de inițiere laser** în condiții reale de utilizare industrială și militară, cu accent pe siguranță, fiabilitate și costuri;
- **Crearea unor metode combinate de inițiere** (laser–electric sau laser–chimic) pentru creșterea flexibilității și fiabilității sistemelor de aprindere.

Bibliografie

[1] T. Rotariu, Chimia explozivilor, București, 2010.

[2] T. Trușcă, Pirotehnie și explozivi, București: Editura tehnică, 1984.

[3] A. Bailey, S. G. Murray, Explosives, Propellants and Pyrotechnics, London: Technology & Engineering, 2000.

[4] A.-N. Rotariu, L.-C. Matache, Metode de calcul în balistica interioară, Bucuresti: Editura Academiei Tehnice Militare, 2017.

[5] V. Titică, Balistica interioară a gurilor de foc, București: Editura Academiei Tehnice Militare, 1993.

[6] B. v. Tonder, Characterisation of Propellants for Interior Ballistic Simulation, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2021.

[7] R.M. Mircioagă, L.C. Matache, A. Rotariu, M. Cîrmaci, P. Șomoiag, L. Haller, A. Rancea, „Burning law determination using numerical simulation of propellants burning in the closed vessel," *IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering,* vol. 916, 2020.

[8] M.-C. Gwak, T.-Y. Jung, J. Yoh, "Friction-induced ignition modeling of energetic materials," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 23, pp. 1779-1787, 2009.

[9] „STANAG 4487-Ed.2 EXPLOSIVES, FRICTION SENSITIVITY TESTS," NATO Standardization Agency, Brussels, 2009.

[10] F. Miao, L. Zhou, X. Zhang, T. Cao, "Simulation of shock initiation in explosives using a model combining high computational efficiency with a free choice of mixture rules," AIP Advances, vol. 8, no. 12, 2018.

[11] C. Rădeanu, D. C. Rus, I. C. Jitea, C. Miron, G. Vasilescu, "Assessing the impact sensitivity of explosives using the BHF-12A equipment," in MATEC Web of Conferences, 2020.

[12] „STANAG 4489 Ed.1 EXPLOSIVES, IMPACT SENSITIVITY TESTS," NATO Standardization Agency, Brussels, 1999.

[13] Z.K. Leciejewski, Z.D. Surma, R.K. Trębiński, "Influence of the Ignition Method on the Characteristics of Propellant Burning in the Context of the Geometric Burning Model," Energies, vol. 16, no. 9, 2023.

[14] T. M. Klapötke, Chemistry of High-Energy Materials, De Gruyter, 2022.

[15] H.I. Voichița, Sisteme dinamice cu interacțiuni percutante. Aplicații în cazul barelor de lungimi mari, Timișoara: Universitatea "Politehnica" Timișoara, 2006.

[16] R. Mircioagă, A. Rotariu, B. Pulpea, F. Dîrloman, "Study of the gun powders ignition by laser beam in closed vessels," in New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, 2024.

[17] L. de Yong, T. Nguyen, J. Waschl, "Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A review," DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1995.

[18] L. de Yong, B. Park, F. Valenta, "A study of the radiant ignition of a range of pyrotechnic materials using a CO2 laser," DSTO Materials Research Laboratory, Maryland, 1991.

[19] S.J. Jacobs, T.P.Liddiard Jr.,B.E.Drimmer, "The shock-to-detonation transition in solid explosives," Symposium (International) on Combustion, vol. 9, no. 1, pp. 517-529, 1963.

[20] B. Reynier, R.M. Mircioagă, J. Le Clanche, L. Taddei, J.-M. Chevalier, D. Hébert, M. Arrigoni, "High-velocity laser-driven flyer impact on paraffin gel," International Journal of Impact Engineering, vol. 202, 2025.

[21] R.-M. Mircioagă, B. Reynier, T. Prisecaru, A. Rotariu, F. Dîrloman, L. Matache, L. Haller, "Advancing ignition techniques for energetic materials: A comparative study of direct laser ignition and laser-driven flyer methods," Defence Technology, Advance online publication, no. https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.005, 2025.

[22] K. E Brown, W. L Shaw, X. Zheng, D. D Dlott, "Simplified laser-driven flyer plates for shock compression science," Review of Scientific Instruments, vol. 83, no. 10, 2012.

[23] L. Yang, Z. Zhang, W.Du, J. Li, Q. Ma, "Developing a highly scalable synthetic strategy for 5-amino-4-nitrobenzo[1,2-c:3,4-c']bis([1,2,5]oxadiazole)1,b-dioxide (CL-18) and investigating the influence of crystal engineering and positional isomerization on its safety and laser ignition performanc," Defence Technology, vol. 41, pp. 13-21, 2024.

[24] A. A. L. Michalchuk, Mechanochemical Processes in Energetic Materials-A computational and experimental investigation, Edinburgh: Springer, 2019.

[25] A. Davenas, Technologie des propergols solides, Sablons: MASSON, 1988.

[26] S R. Ahmad, M. Cartwright," Laser Ignition of Energetic Materials, pp. 247-268, 2014.

[27] F. W. Marrs, V. W. Manner, A. C. Burch et al, "Sources of Variation in Drop-Weight Impact Sensitivity Testing of the Explosive Pentaerythritol Tetranitrate," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 60, pp. 5024-5033, 2021.

[28] R. Mircioagă, T. Prisecaru, A.Rotariu, J. Le Clanche, B. Reynier, M. Arrigoni, " Experimental study on the dynamic behavior of low-sensitivity propellant grains with the split hopkinson pressure bar," in Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies”, Schumen, 2024.