

Universitatea POLITEHNICA Timișoara  
Facultatea de Mecanică  
Departamentul de Rezistența Materialelor

# **Disertație**

Coordonator științific,  
Șl.dr. ing. Emanoil LINUL

Student Masterand,  
Cristian CODRESCU

**Timișoara**  
**2018**

**Universitatea POLITEHNICA Timișoara**

**Facultatea de Mecanică**

**Departamentul de Rezistența Materialelor**

**Specializarea: Implanturi, Proteze și Evaluare Biomecanică**

**Disertație**

**Comportamentul la compresiune al  
tuburilor umplute cu spumă metalică**

Coordonator științific,

Șl.dr. ing. Emanoil LINUL

Student Masterand,

Cristian CODRESCU

**Timișoara**

**2018**

## CUPRINS:

Introducere .....	4
CAPITOLUL 1 GENERALITĂȚI .....	5
1.1. Scurt istoric al spumelor metalice .....	5
1.2. Obținerea spumelor metalice.....	6
1.3. Proprietățile spumelor metalice.....	9
1.4. Aplicații ale spumelor metalice.....	10
CAPITOLUL 2: Obiectivele testelor cu aplicații în automotive .....	15
CAPITOLUL 3: Programul experimental .....	18
3.1. Materiale utilizate si obtinerea epruvetelor .....	18
3.2. Calculul densității.....	19
3.3. Descrierea aparaturii de încercat .....	21
3.3.1. Mașina de încercat .....	21
3.3.2. Alte echipamente si instrumente utilizate.....	22
CAPITOLUL 4: Rezultate experimentale .....	24
4.1. Notiuni generale .....	24
4.2. Spume metalice de aluminiu (AFs).....	26
4.3. Tuburi goale (ETs) .....	28
4.4. Tuburi umplute cu spuma metalica (FFTs).....	31
4.5. Energia de absorbție .....	34
Concluzii .....	39
Bibliografie .....	40
Anexe .....	41
Declarație .....	42

## Introducere

În lucrarea de față am ales să investighez comportamentul mecanic al spumelor metalice de aluminiu cu celule închise datorită aplicabilității în diverse domenii ingineresti cum ar fi: industria automotive, industria aerospațială și industria civilă.

Pentru a analiza spumele de aluminiu am ales tema de cercetare cu titlul “Comportamentul la compresiune al tuburilor umplute cu spumă metalică”. Alegerea acestei teme a fost efectuată în urma unor discuții avute cu coordonatorul științific.

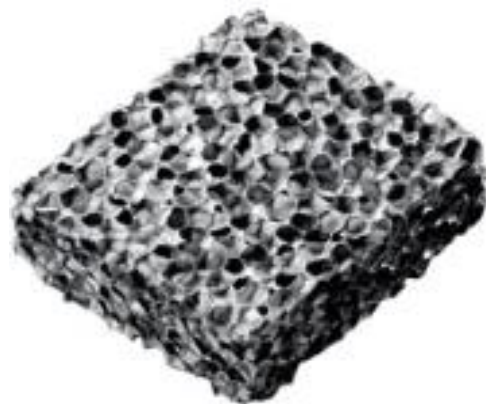
În prima parte a acestei lucrări am realizat o scurtă trecere în revistă a materialelor celulare (scurt istoric, obținerea, proprietățile și aplicațiile spumelor metalice), urmată de o prezentare detaliată a obiectivelor alegerii temei de cercetare.

În a doua parte este prezentat detaliat atât programul experimental (materiale folosite, obținerea epruvetelor, determinarea densității și descrierea aparaturii pentru testare), cât și rezultatele obținute. În capitolul 4 s-a investigat influența temperaturii de testare asupra comportamentului spumelor metalice, tuburilor goale și a tuburilor umplute cu spuma metalică. De asemenea, tot în acest capitol s-a realizat o investigație a capacității de absorbție a energiei de impact a spumelor metalice la diferite temperaturi (în domeniul de temperaturi 25°C-450°C). În foarte multe aplicații ingineresti este necesară cunoașterea capacității de a absorbi energie la impact de către spumele metalice din aluminiu, astfel în industria fabricării automobilelor sau industria feroviară cunoașterea acestei proprietăți este vitală pentru siguranța pasagerilor la impact. Întreg programul experimental s-a desfășurat în laboratorul “Stefan Nadasan” al departamentului de Mecanica și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanica Timisoara, având la dispoziție toate echipamentele necesare executării acestora.

În ultima parte a lucrării am prezentat principalele concluzii rezultate în urma investigației, am enumerat o listă cu referințe bibliografice, respectiv anexele aferente.

## CAPITOLUL 1 GENERALITĂȚI

### 1.1. Scurt istoric al spumelor metalice



de pulberi goale.

Figura 1.1 Spumă de aluminiu

Materialele au stat la baza tuturor cuceririlor industriale: oțelul pentru calea ferată, cuprul pentru electricitate, aluminiul pentru aviație, materialele plastice pentru bunurile de consum de după război, iar siliciul pentru informatică. Separarea materialelor tradiționale (metale și aliaje, ceramice și polimeri) de cele avansate este din ce în ce mai greu de făcut, pentru că un material considerat astăzi avansat, s-ar putea ca mâine să intre în categoria celor tradiționale. Folosirea materialelor noi se realizează după un scenariu clasic: pe măsură ce prețul lor scade, ele trec din industriile de vârf, în cele obișnuite.



Figura 1.2 Structura celulara a osului

Astfel, materialele folosite inițial în industriile de armament sau aerospațială, sunt preluate de constructorii de automobile și sfârșesc prin a fi bunuri de consum. De exemplu, materialele compozite au cucerit industria aerospațială, în detrimentul aliajelor de aluminiu, care înlocuiesc oțelul în construcția de automobile. În același timp, unele din aceste materiale sunt fie foarte fragile, fie foarte dure, fie foarte subțiri și nu se pot prelucra decât prin procedee neconvenționale. Obiectul disertației îl constituie materialele avansate și tehnologiile neconvenționale.

Materialele tradiționale sunt tratate foarte succint, fiind amintite materialele metalice (feroase și neferoase), plasticele și ceramicele. Ele se folosesc pe scară largă în toate domeniile

de activitate, la prețuri accesibile, în funcție de proprietățile fizico-mecanice sau chimice pe care le au.

Materialele avansate sunt tratate pe larg, cuprinzând toate cele patru tipuri de materiale utilizate în tehnică (metalice, plastice, ceramice și compozite), precum și unele tipuri care nu pot fi încadrate în nici una din aceste categorii.

Catalogul mondial al materialelor metalice cuprinde circa 18.000 de produse, din care multe sunt considerate avansate. Dintre acestea, se pot aminti oțelurile avansate de înaltă rezistență, superaliajele, spumele metalice, aliajele amorfe și aliajele ușoare.

Spuma metalică are o structură metalică de bază care încorporează o mare cantitate de pori ce pot fi închiși sau deschiși, reprezentând 75...95% din volumul total al materialului. Ea păstrează unele caracteristici fizico-mecanice ale metalului din care provine, dar în același timp este mult mai ușoară (chiar mai ușoară decât lemnul) și slabă conducătoare de căldură. De asemenea, se poate recicla, ajungându-se ușor la metalul de proveniență. Metalele care se pretează obținerii structurii celulare sunt aluminiul, titanul, magneziul, nichelul și cuprul, cele mai bune rezultate obținându-se în cazul aluminiului, datorită procedeelor mai accesibile de fabricare. Diametrul porilor este de 1...8mm, dar există și pori alungiti sau chiar invizibili cu ochiul liber.

Deși procedeul este cunoscut de prin anii 1950, el a fost aplicat industrial de abia prin anii 1990 de firma Shinko Wire din Japonia, impunându-se apoi după o expoziție de automobile din 1998, de la Detroit, când societatea Karmann și Institutul Fraunhofer IFAM din Germania au folosit spuma de aluminiu (Aluminium Foam Sandwich) ca element de amortizare la tamponarea din față a unui autoturism Mercedes. Spuma de aluminiu este cunoscută printr-o combinație interesantă a proprietăților fizice și mecanice: rigiditate mare, densitate foarte mică (10...25% din densitatea metalului de bază, astfel că poate pluti pe apă), conductibilitate termică și electrică scăzută, capacitate extraordinară de amortizare a șocurilor, blindaj electromagnetic, capacitate de izolare acustică și reducere a vibrațiilor și rezistență la foc. În același timp, are o rezistență mecanică scăzută, este scumpă și după deformarea prin șoc nu se mai poate utiliza (dar se poate recicla).

Spumele metalice sunt încă puțin cunoscute, aflându-se pe o piață emergentă, interesată mai ales de industria de automobile, dar s-ar putea ca această piață să devină atractivă și pentru alți utilizatori.

## **1.2. Obținerea spumelor metalice**

Cerințele stricte ale pieței și economia asociată cu materiale ușoare ne-au determinat eforturile de a dezvolta spume metalice cu porozitate cuprinsă între 40 și 98 vol. %. În ultimele trei decenii, s-au dezvoltat mai multe tehnici de prelucrare pentru fabricarea spumelor metalice.

Obiectivul principal din spatele acestui proces de dezvoltare este combinația unică a proprietăților fizice și mecanice așteptate de la spumă metalică, cum ar fi rigiditate ridicată, greutate specifică scăzută, permeabilitate ridicată la gaz, conductivitate termică scăzută, proprietăți acustice neobișnuite, capacitate mare de absorbție a impactului și bune proprietăți de izolare electrice.

Aplicările potențiale ale spumelor metalice au fost avute în vedere în domeniul industriei automobilelor, materialelor de construcții ușoare, amortizoarelor de zgomot, dispozitivului de oprire a flăcării, încălzitoarelor și schimbătoarelor de căldură, catalizatorilor, aplicațiilor electrochimice, vehiculelor armate militare și industriei de aeronave. În general, se înțelege că un material spumat are o fracție de volum mare de pori de gaz uniform dispersați într-un lichid. O incluziune unică a gazului este separată de un film lichid care face o celulă. Această morfologie, totuși, poate fi conservată în timpul solidificării lichidului care duce la spumă solidă. Când vorbim despre spumă de metal, se înțelege că are pori de gaz distribuiți uniform, cu o fracție de volum în intervalul 40-98%. Acest tip de morfologie este de asemenea cunoscut sub numele de structură solidă celulară.

Există trei variante de solide celulare: celule deschise, structuri celulare închise și o combinație a celor două. Structurile celulare deschise încorporează pori interconectați, în timp ce porii apropiați ai celulelor sunt înconjurați de un perete metalic. Există multe modalități prin care pot fi produse materiale metalice celulare. Există posibilitatea producerii spumelor metalice în două stări de materiale: metal lichid și metal pulverizat. Scopul principal al prelucrării spumei este de a încorpora porii de gaze mari și uniform distribuiți în materialele metalice, l-am rezumat ca sursă de gaz folosită în cele două stări de materie menționate mai sus. Sursa externă de gaze înseamnă că topitura trebuie spumată cu ajutorul unor gaze precum aerul, azotul sau argonul. Sursa de gaz dintr-un agent de suflare implică descompunerea unui produs chimic care dă naștere unui produs gazos. Gazul generat de această sursă este prins în material lichid sau semisolid, culminând cu spumă metalică. Spumarea în stare lichidă implică trei surse diferite de gaze: sursa de gaz exterioară, gazele generate de un agent de spumare și gazele dizolvate. Sursa externă de gaz pentru fabricarea spumei de aluminiu a fost patentată pentru prima dată de Alcan International și utilizată de Hydro Aluminium (Norvegia) și Cymat Aluminium (Canada) pentru producția comercială. Această tehnică a fost, de asemenea, utilizată pentru producerea spumelor din compozite cu matrice metalică.

Sursă de gaze externe. Acest procedeu constă în suflarea metalelor lichide prin gaze și în asigurarea distribuției uniforme a porilor mari de gaz în metalul lichid. Acest lucru se realizează prin crearea unor bule foarte fine de gaze în topitură prin rotoare de rotație special proiectate așa cum se arată în figura 3.

Cu toate acestea, stabilitatea structurii spumate este un factor important. Mișcarea bulelor de gaz în lichid devine relativ ușoară atunci când vâscozitatea lichidului topit este foarte scăzută și bulele segregă și coace împreună, dând naștere la pori mari. Ținând cont de aceasta,

viscozitatea topiturii este mărită prin încorporarea unor particule ceramice de fază secundă, de ex. SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sau MgO.

În ceea ce privește procedeele de obtinere a spumelor metalice, există trei căi principale

a) –*pe cale gazoasă* se aplică mai puțin și constă în condensarea vaporilor metalici pe o structură celulară confecționată din rășini sintetice. După solidificarea metalului depus, structura initial polimerică este distrusă prin ardere sau topire.

b) –*pe cale solidă* se aplică de asemenea mai rar și îndeosebi în cazul aluminiului. Metoda constă în amestecarea pulberii de aluminiu cu hidrură de titan (TiH<sub>2</sub>), extrudarea amestecului și încălzirea produsului extrudat la 600°C. La această temperatură, hidrura de titan se descompune, punând în libertate hidrogen, care formează goluri în masa de aluminiu vâscos (aluminiul se topește la 658,60°C).

c) –*pe cale lichidă* este procedeul preponderent de obținere a spumelor metalice și se realizează prin următoarele metode:

-turnarea aluminiului topit într-o baie de săruri neutre constă în topirea unui amestec de săruri neutre într-un creuzet, după care, în baia de săruri se toarnă o cantitate determinată de aluminiu topit. Aluminiul și sărurile trebuie să aibă densități apropiate, pentru evitarea segregării la solidificare. După solidificare, sărurile se înlătură printr-o simplă dizolvare în apă;

-folosirea unui agent spumogen este aplicată de firma japoneză ShinkoWire din Amagasaki și constă în introducerea în aluminiul topit, la temperatura de 680°C, a unei cantități de 1,6% TiH<sub>2</sub>. Pentru ca aluminiul topit să fie cât mai vâscos, în prealabil, în masa lui se introduce 1,5% calciu, formându-se compusul Al<sub>2</sub>CaO<sub>4</sub>. Hidrura de titan se descompune, punând în libertate hidrogen care, la solidificare, formează goluri cu diametre de 2...10 mm în masa de aluminiu.



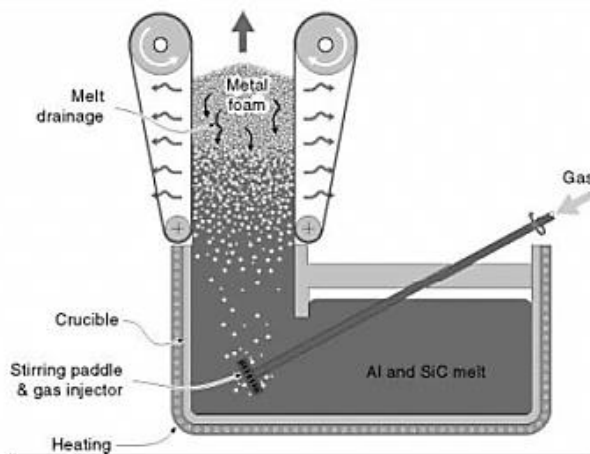


Figura 1.3 Procesul de fabricare a spumei metalice

### 1.3. Proprietățile spumelor metalice

Obținerea unor spume metalice cu proprietăți diferite a condus la diversificarea aplicațiilor spumelor metalice în inginerie. Spumele metalice au proprietăți fizice, mecanice și termice care pot fi determinate utilizând aceleași metode ca și în cazul solidelor cu densitate ridicată [Ashby și alții (2000), Davis (1983)].

În cazul materialelor celulare de tipul spumelor metalice din aluminiu, densitatea joacă un rol, în mai toate aplicațiile ea trebuie cunoscută pentru a utiliza spuma metalică cât mai eficient.

Pe lângă proprietățile elastice, modulul de elasticitate longitudinal ( $E$ ), modulul de elasticitate transversal ( $G$ ), coeficientul de amortizare ( $Q^{-1}$ ) și Coeficientul lui Poisson ( $\nu$ ), atât de necesare în proiectare sau în analiza numerică, mai apare o proprietate specifică doar materialelor celulare și anume energia de absorție. În foarte multe aplicații este necesară cunoașterea capacității de a absorbi energie la impact de către spumele metalice din aluminiu, astfel în industria fabricării automobilelor sau industria feroviară cunoașterea acestei proprietăți este vitală pentru siguranța pasagerilor la impact.

Proprietățile materialelor de tipul spumelor metalice care sunt folosite cel mai frecvent în aplicațiile ingineresti sunt prezentate în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Proprietățile materialelor

Proprietate	Simbol	Unitatea de măsură
Densitatea	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Modulul de elasticitate	E, G, K	MPa
Coeficientul lui Poisson	$\nu$	-
Rezistența la forfecare	$\tau_t$	MPa
Coeficient de amortizare	Q-1	-
Rezistența la compresiune/tracțiune	$\sigma_c$	MPa
Energia de absorbție	W/V	MJ/m <sup>3</sup>
Rezistența la încovoiere	$\sigma_b$	MPa
Rezistența maximă	$\sigma_u$	MPa
Conductivitatea termică	$\lambda$	W/mK
Coeficientul de expansiune termică	$\alpha$	K-1

O altă aplicație unde pot fi utilizate spumele metalice din aluminiu este în domniul construcțiilor, cu rol de încălzire sau răcire aspațiilor, fapt ce a dus la studierea tot mai mult a conductivității termice și a coeficientului expansiune termică, proprietăți necesare în proiectarea unor structuri de tipul pereților unei camere.

#### 1.4. Aplicații ale spumelor metalice

Spumele de metal au proprietăți care le fac potrivite pentru industria de automobile, care a fost extrem de interesată de ele de când au fost dezvoltate pentru prima dată de asemenea aplicații ale acestora sunt în construcția navelor, în industria aerospațială și în ingineria civile.

Principalele functionalitati pot fi distinse după cum urmează:

- *Construcție ușoară:* Spumele de aluminiu pot fi utilizate pentru a optimiza rigiditatea la încovoiere specifică în greutate a componentelor tehnice. Rigiditatea la îndoire a panourilor spumate plate este relativ invers proporțională cu densitatea spumei. Construcția ușoară exploatează partea cvasi-elastică și reversibilă a curbei de încărcare-deformare

- *Absorbția energiei:* datorită porozității lor ridicate, spumele de aluminiu pot absorbi o cantitate mare de energie mecanică atunci când sunt deformate, în timp ce solicitările sunt limitate la rezistența la compresiune a materialului.
- *Controlul acustic și termic:* Spumele de aluminiu pot atenua vibrațiile și pot absorbi sunetul în anumite condiții. În plus, conductivitatea termică este scăzută în timp ce acestea pot rezista la temperaturi ridicate.

#### Aplicații structurale:

Spumele metalice au combinații de proprietăți fizico-chimice și mecanice unice, care nu sunt acoperite în prezent de alte materiale. Acestea pot fi utilizate în multe aplicații, cum ar fi aplicațiile structurale, inclusiv absorbția energiei de impact și explozii (Banhart și Baumeister 1998, Körner și Singer 2000). Atunci când sunt utilizate ca miezuri de panouri sandwich structurale, acestea oferă o rigiditate ridicată în legătură cu o capacitate mare de absorbție a sunetului și o conductivitate termică scăzută. Ele pot fi de asemenea utilizate ca amortizoare de vibrații și schimbătoare de căldură / intercurenți.

Prin urmare, se pot clasifica spume metalice ca materiale de multifuncționalitate. Ele sunt, de asemenea, reciclabile și netoxice, care le fac materiale mai atractive. În figura 1.4, sunt prezentate câteva aplicații potențiale ale spumelor metalice în funcție de porii deschise, parțial deschise și închise. În timp ce spumele cu celule deschise sunt preferate în cea mai mare parte pentru aplicații funcționale, spumele cu celule închise sunt potrivite pentru aplicații structurale (Banhart 2003).



Figura 1.4 Aplicații ale spumelor metalice

Spumele de aluminiu sunt de așteptat să se găsească în aplicații structurale în care greutatea este o preocupare deosebită, de ex. caroserii auto, uși sau dispozitive electronice portabile (Banhart 1999). Alte aplicații potențiale includ nave, clădiri, industria aerospațială și inginerie civilă WEB\_3 (2005). Exemple de panouri de spumă produse pentru a fi utilizate în automobile și nave sunt prezentate în Figura 1.5 (Baumeister 2000, Banhart 1999).



Figura 1.5 Aplicații ale spumelor metalice în industria automotive

Transfer termic:

Spumele cu celule deschise sunt utilizate în mod convențional în transferal termic (Banhart 2000b). Într-un schimbător de căldură tipic, un fluid circulă prin spuma cu celule deschise și, alternativ, fluidul poate fi circulat prin material, o suprafață a cărei suprafață era în contact cu un dispozitiv electronic de putere care necesita răcire.

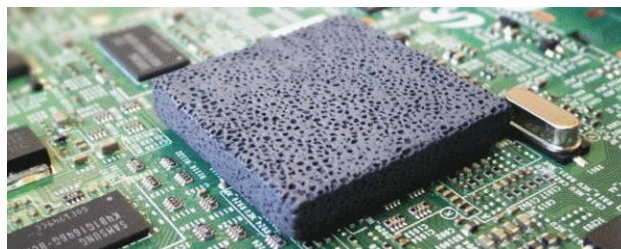


Figura 1.6 Răcirea PCBA

Spumele metalice mai sunt folosite pentru răcirea dispozitivelor microelectronice cu o densitate mare de disipare a puterii, cum ar fi chip-uri pe computer sau plăci electronice.



Figura 1.7 Răcirea chip-urilor de computer

### Atenuatoare de zgomot



Componentele pentru amortizarea sunetului, a impulsurilor de presiune sau a vibrațiilor mecanice sunt de asemenea comune în aplicațiile industriale de metalurgie a pulberilor. Materialele cu un anumit grad de porozitate deschisă pot fi adaptate pentru a umezi anumite frecvențe în mod selectiv, în timp ce permit trecerea altora.

Figura 1.8 Izolare fonică

Materialele cum ar fi spumele turnate de investiții sau spumele realizate prin depunere pot înlocui astfel de elemente tradiționale din motive de cost și eficiență (Eisenmann 1998).

### **Aplicații în automotive**

- panouri de pardoseală
- bare de protecție pentru absorbția energiei
- bare de impact laterale de pe ușă
- șine de protecție frontale
- componente de cadru spațial
- bare de rulment



Aplicate în domeniul militar:

- armuri ușoare
- rezervoare
- usi etanșe la vase



Figura 1.8 Aplicații ale spumelor metalice

Aplicate pentru industria feroviara:

- Locuri de coliziune a locomotivelor
- Zone de tampon de strivire
- Bariere laterale la impact

## CAPITOLUL 2: Obiectivele testelor cu aplicații în automotive

Un alt exemplu pentru aplicațiile din spumă de aluminiu sunt amortizoarele de impact. Întrucât companiile de asigurări aplică reguli de siguranță care protejează pasagerii în caz de coliziune și, de asemenea, reduc la minimum daunele aduse mașinii și costurile de reparații ulterioare, producătorii au folosit ideea unei cutii de avarie pentru a respecta aceste standarde. Astfel de cutii de impact sunt amplasate între faza de impact și șina frontală a mașinii. Ea se deformează pentru a absorbi toată energia unui accident de 15 km/h, protejând componentele frontale cu un cost mai ridicat față de mașina cadru.

O opțiune interesantă este integrarea unui material din spumă într-o cutie accidentală cu secțiune goală. Materialele de spumare adecvate sunt, de exemplu, spume expandate din polipropilenă, dar pot fi utilizate și spume de aluminiu. S-a demonstrat că secțiunile umplute cu spumă absorb cu mult mai multă energie de impact decât secțiunile goale de masă similară. Totuși, secțiunile multi-celulare bine concepute sunt mai eficiente pentru absorbția energiei!



Figura 2.1 Profile extrudate umplute cu spumă de aluminiu pentru cutiile de impact

Un avantaj mai important al cutiilor de impact din spumă este, prin urmare, îmbunătățirea absorbției de energie a impactului în coliziuni în afara axei. În practică, avantajele rezultate din proiectarea secțiunilor speciale s-au dovedit a nu fi rentabile. Dar, de asemenea, în acest caz, posibilitatea unor variații ale grosimii pereților adaptate la extrudările de aluminiu oferă un anumit potențial de optimizare. Adăugarea de materiale acolo unde este necesar permite o îmbunătățire semnificativă a performanței.





Figura 2.2 Colțurile armate măresc capacitatea specifică de absorbție a energiei a extrudărilor de aluminiu

Amplasarea cutiilor de impact în automotive:

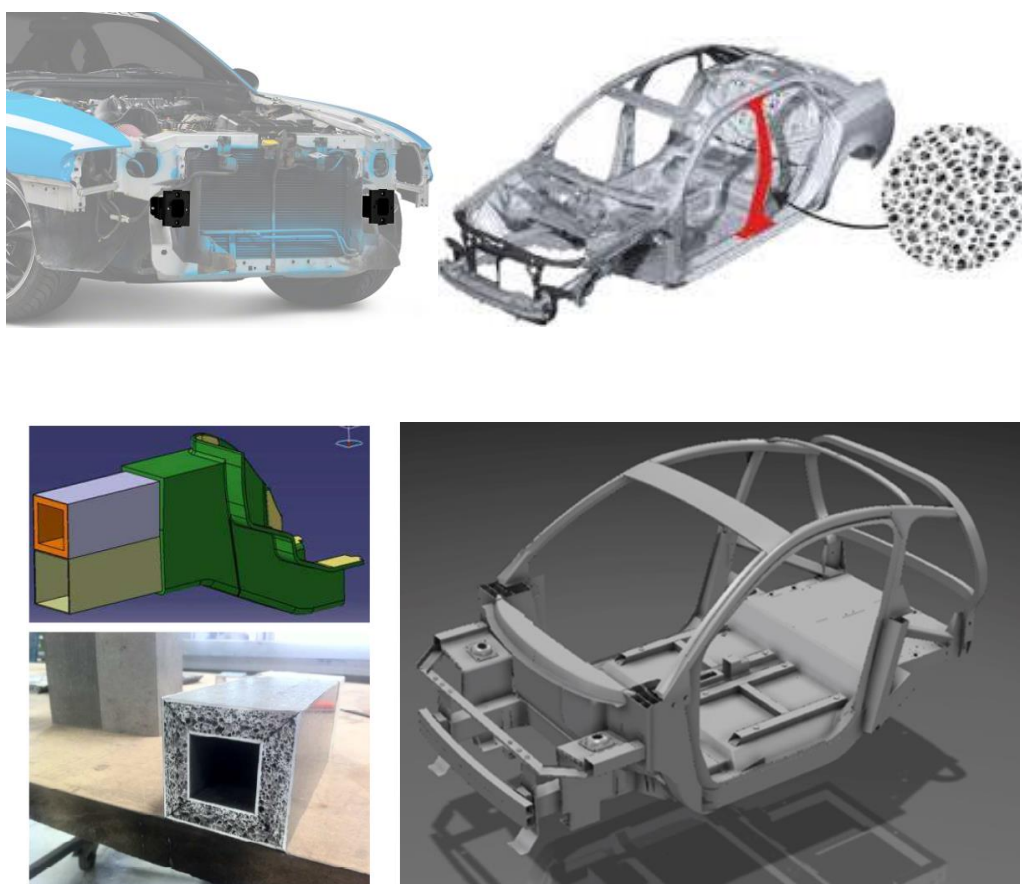


Figura 2.3 Aplicații ale spumei metalice

În timpul unui accident de mașină, toată energia cinetică trebuie disipată. Pentru vehicul, energia va fi disipată prin mișcarea și deformarea structurii sale. Există, de asemenea, unele componente care acționează în mod pasiv pentru a proteja pasagerii în timpul unui accident coliziune, cum ar fi cutiile de accident.





Figura 2.4 Aplicații ale spumei metalice

## CAPITOLUL 3: Programul experimental

### 3.1. Materiale utilizate si obtinerea epruvetelor

Materialele utilizate pentru obtinerea epruvetelor de testare au fost urmatoarele:

**-bare (tuburi) de otel (304)** cu diametrul interior  $\varnothing 20$ , diametrul exterior de  $\varnothing 22$  si lungimea de 1m. Otelul utilizat este un otel inoxidabil austenitic cu continut scazut de carbon, usor sudabil, rezistent la coroziune intergranulara si de înaltă rezistență la temperaturi scăzute. Este cel mai versatil și utilizat pe scară largă de toate gradele de oțel inoxidabil .

**-spume metalice** obtinute sub forma de blocuri (45 mm x 200 mm x 200 mm) in urma unui proces de turnare. In acest caz s-au folosit spume metalice din aliaje de aluminiu (A356) cu celule inchise, obtinute in urma procesului de turnare.

#### 1. Pregatirea tuburilor pentru epruveta

Se debiteaza teava la lungimea de 20 mm cu ajutorul unui strung.

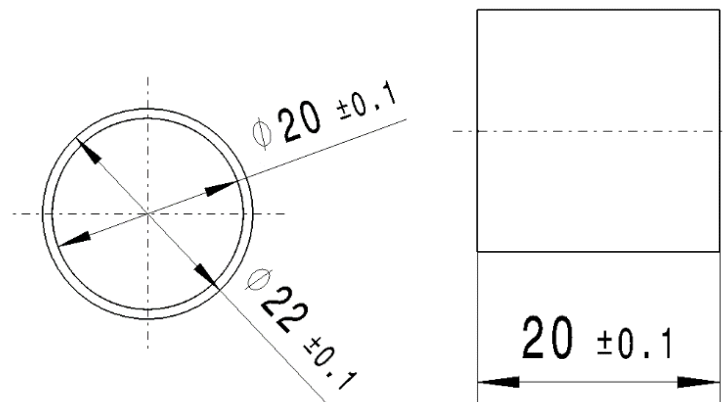


Figura 3.1 Dimensiuni teava

#### 2. Pregatirea spumei de aluminiu

Pentru a evita ruperea sau deformarea celuleor spumei, acestea au fost taiate cu fir sub forma de cilindri, avand dimensiunile: 20 mm (lungimea) si  $\varnothing 20$  mm diametrul.

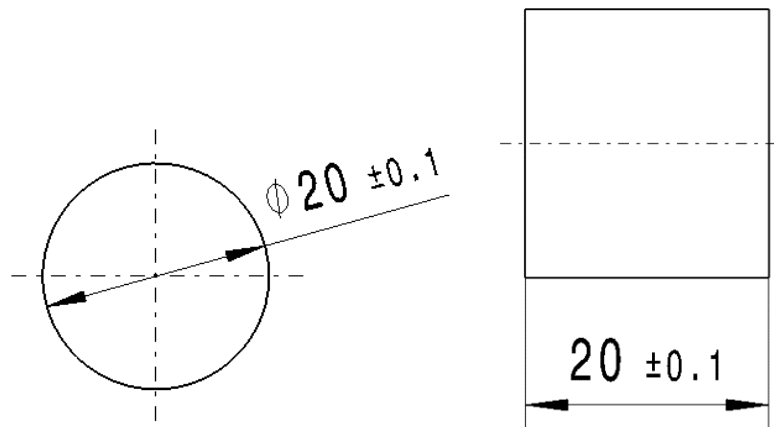


Figura 3.2 Dimensiuni spuma de aluminiu

În urma operațiilor amintite mai înainte s-au obținut epruvetele prezentate în figura 3.3. Testele experimentale s-au concentrat pe investigarea comportamentului mecanic pentru 3 configurații diferite de epruvete:

- AFs-epruvete cilindrice din spuma metalică de aluminiu cu celule închise (Fig. 3.3a);
- ETs-tuburi goale obținute din oțelul inoxidabil 304 (Fig. 3.3b);
- FFTs-tuburi din oțel 304 umplute cu spuma metalică de aluminiu (Fig. 3.3c).



Figura 3.3 Epruvetele de încercat

Epruvetele FFTs au fost obținute prin presarea spumei de aluminiu în interiorul tubului de oțel. După cum se poate vedea din figura 3.3c, s-a avut grijă ca celulele spumei să nu se deformeze plastic ca urmare a procedurii de presare mecanică.

### 3.2. Calculul densității

Pe baza celor prezentate, din materialele studiate, (plăci din spumă metalică), s-au prelevat probe în vederea stabilirii densității. Densitatea s-a determinat conform standardelor în vigoare.

Densitatea, (sau mai exact densitatea de masă, numită și masă specifică) este o mărime fizică folosită pentru descrierea materialelor și definită ca masa unității de volum. Astfel,

densitatea unui corp este egală cu raportul dintre masa și volumul său. Densitatea se notează de obicei cu litera grecească  $\rho$  (ro) sau cu inițiala cuvântului, litera d.

Relația de calcul a densității este următoarea:

$$\rho = \frac{m}{V} = m \times V^{-1} \quad (1)$$

În cazul corpurilor cu formă geometrică regulată (paralelipiped, cilindru etc.) se mai poate folosi formula:

$$\rho = \frac{m}{V} = m \times V^{-1} = m \times (k \times l^{-3}) \quad (2)$$

unde, k este coeficientul volumic al formei geometrice respective, iar  $l^{-3}$  este inversul produsului lungime x lățime x înălțime a corpului.

Unitatea de măsură a densității în SI (Sistemul Internațional de Măsurări și Greutăți) este raportul dintre unitatea de măsură a masei (kilogram) și unitatea de măsură a volumului (metru la puterea a treia, sau metrul cub), deci este kilogram pe metru cub,  $\text{kg/m}^3$ .

$$[\rho] = [d] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \text{ kg} \times \text{m}^{-3} \quad (3)$$

Alte unități folosite sunt gramul pe centimetru cub ( $\text{g/cm}^3$ ), kilogramul pe litru ( $\text{kg/L}$ ) etc.

Dimensional, densitatea se poate scrie sub forma monomului  $M \times L^{-3}$  (dimensiunea masei, M, înmulțită cu puterea a treia negativă a dimensiunii lungimii L, sau altfel exprimat, dimensiunea masei, M, împărțită la puterea a treia a dimensiunii lungimii L):

$$[\rho] = [d] = M \times L^{-3} = \frac{M}{L^3} \quad (3.4)$$

Densitatea se poate măsura cu picnometrul, cu densimetrul (areometru), cu balanța, (folosind forța lui Arhimede), cântarul sau la fluide în curgere pe fluxuri industriale cu debitmetrul Coriolis.

În cazul de față, pentru determinarea greutății probelor s-a folosit un cântar electronic de laborator, (figura 3.4), foarte precis, ( $10^{-4}$  g).

Volumul probelor s-a determinat prin măsurarea celor trei dimensiuni cu ajutorul unui șubler cu precizie de 0.01 mm.



Fig. 3.4. Cântar de laborator pentru determinarea greutății probelor

Condițiile pentru eșantionul de testare au fost cele de laborator: temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $[73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}]$ , respectiv umiditatea relativă  $50 \pm 5\%$ , cu cel puțin 24 de ore înainte de testare. Numărul de probe utilizat a fost de 5 pentru fiecare densitate. Pentru fiecare dimensiune s-au făcut câte trei măsurători.

În urma efectuării calculului mai sus menționate s-a aflat că spuma de aluminiu investigată are o densitate de  $420 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3. Descrierea aparaturii de încercat

#### 3.3.1. Mașina de încercat

Mașina de testare universală computerizată electromecanică, test unic pentru tuburi din seria TC, dezvoltată pentru măsurarea rezistenței mecanice a materialelor sub sarcină. În funcție de necesități și tipurile materialelor, poate efectua teste de tracțiune, compresiune, încovoiere, teste de forfecare, îndoire etc.; toate acestea în conformitate cu cele mai comune standarde internaționale ISO, ASTM, EN și UNI.



Figura 3.5. Mașina universală de testare TC100; capacitate 100 kN

Are o structură formată din două coloane și capul transversal în mișcare condus de șuruburi cu bile pre-încărcate, cu o rotire zero pentru a asigura precizia mișcării. Mișcarea și viteza capului încrucișat sunt controlate electronic prin microprocesor pe 24 biți. Mașina este

controlată prin software-ul LBG HIGH TOWN pentru sistemul de operare MS® Windows 7, în toate etapele de diagnosticare, calibrare și test de performanță.

Caracteristici tehnice:

Tabelul 3.1. Caracteristicile tehnice ale mașinii

100 kN 0.01kN	Load Capacity	22481 lbf
0.5	Resolution	1 lbf
	Class	0.5
	ISO 7500-1 (dal 2% al 100% f.s.)	
350 mm/min	Maximun Speed	13.78 in./mm
0.1 mm/min	Minimun Speed	0.04 in./mm
350 mm/min	Return Speed	13.78 in./mm
120 kN/mm	Stiffness frame	655218 lbf/in.
1100 mm	Crosshead Travel without accessories	43.3 in.
390 mm	Crosshead Travel with tensile heads A009-A100	15.35 in.
390 mm	Column Spacing	15.35 in.
375 kg	Weight	827 lb
820 x 605 x 2180 mm	Dimensions width x depth x height	32.28 x 23.82 x 85.83 in.
+ 10 °C / + 35 °C	Operating Temperature	+ 50 °F / + 90°F
10 % / 80 %	Relative Umidity	
240V 1ph 50Hz + T	Power Supply*	
850 VA	Max Power Absorbed	

Testele experimentale de compresiune cvasi-statica s-au efecuat pe epruvetele mentionate (AFs, ETs, FFTs) cu o viteza de incercare de 10 mm/min, conform standardelor in vigoare. Aplicarea sarcinii exterioare s-a efectuat lateral pe epruvete, adica perpendicular pe axa longitudinala a acestora.

### 3.3.2. Alte echipamente si instrumente utilizate

Testele experimentale s-au efectuat atat la temperatura ambienta (25C) cat si la temperaturi mai mari decat aceasta (150, 300, 450C). In acest scop s-a folosit o incinta termica (Fig. 3.6), care prezinta un domeniu foarte larg de temperaturi: 25-1000C.

Epruvetele supuse testelor la temperaturi inalte au fost introduse in cuptor si preincalzite timp de 30 minute in vederea omogenizarii temperaturii in toata masa lor. Pentru a evita socul termic, epruvetele nu au fost scoase din incinta termica, ci au fost testate in interiorul cuptorului.





Figura 3.6. Incinta termica instalata pe masina de testare



Figura 3.7. Subler

## CAPITOLUL 4: Rezultate experimentale

### 4.1. Noțiuni generale

Curba tensiune-deformație la compresie pentru un material celular adesea poate fi simplificată în trei zone: o zonă liniar-elastică; o zonă de platou și densificarea. În figura 4.1 este prezentată curba caracteristică tensiune-deformație pentru o spumă metalică obținută în urma încercărilor experimentale de compresie. Această figură va fi folosită pentru definirea parametrilor amintiți mai sus.

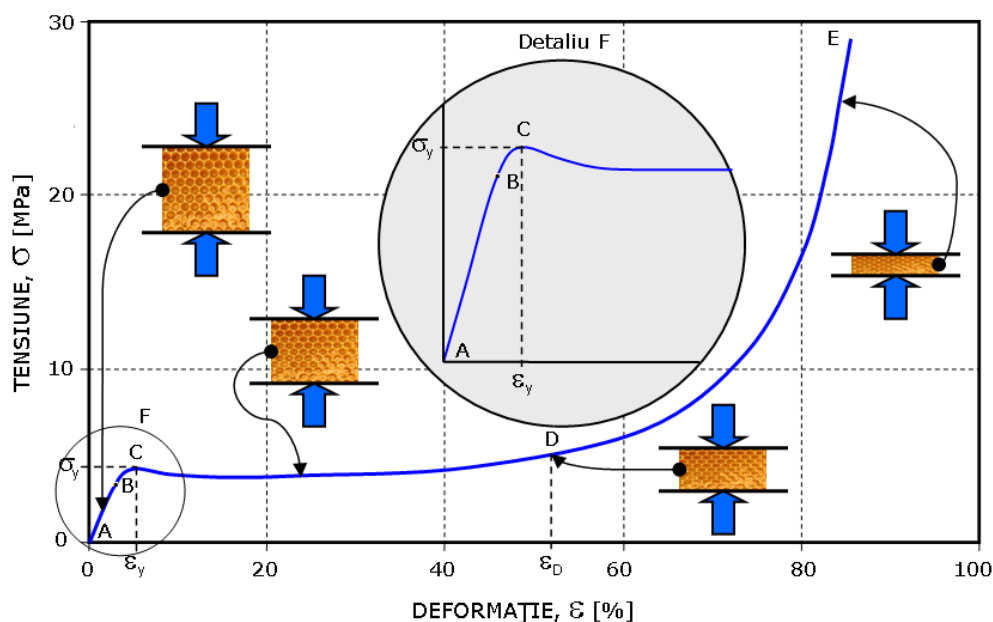


Fig. 4.1. Curba tensiune-deformație pentru un material celular

Pentru o înțelegere mai ușoară a comportamentului acestor materiale se va face o scurtă definiție și modul de determinare a principalelor caracteristici mecanice determinate în cadrul încercărilor experimentale de compresie statică. Pe această curbă prezentată în figura de mai sus sunt evidențiate detaliat zonele caracteristice care descriu direct sau indirect determinarea parametrilor amintiți mai sus.

#### Modulul de elasticitate, $E$ [MPa]

Modulul de elasticitate – este o măsură a rigidității pentru un material elastic și izotrop. Acesta este definit ca și raport între tensiunea și deformația uniaxială, unde este respectată legea lui Hooke și poate fi determinat experimental cu ajutorul pantei curbei tensiune-deformație din zona liniar-elastică.

Relația de calcul a modulului de elasticitate este dată de următoarea relație:



$$E \equiv \frac{\text{tensiune}}{\text{deformație}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} \quad (1)$$

unde :

$E$  – modulul de elasticitate;

$F$  – forța aplicată asupra epruvetei;

$A_0$  – aria inițială a secțiunii transversale asupra căreia se aplică forța  $F$ ;

$\Delta L$  – alungirea epruvetei;

$L_0$  – lungimea inițială a epruvetei.

Unitatea de măsură a modulului de elasticitate în SI este Pascalul [Pa sau  $\text{N/m}^2$  sau  $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ]. Unitățile practice utilizate sunt Megapascalul, (MPa sau  $\text{N/mm}^2$ ) sau Gigapascalul [GPa sau  $\text{kN/mm}^2$ ].

Modulul de elasticitate calculează schimbarea în dimensiune a unei epruvete realizată dintr-un material izotrop elastic sub încărcări de tracțiune sau compresiune, ajutând totodată la alegerea materialelor pentru anumite aplicații particulare.

De asemenea, modulul de elasticitate nu este întotdeauna același în toate direcțiile. Cele mai multe metale și ceramice, împreună cu multe alte materiale sunt izotrope, rezultând că proprietățile lor mecanice sunt aceleași în toate direcțiile. Anizotropia poate fi observată foarte ușor în multe compozite. De exemplu compozitele armate cu fibre de carbon prezintă un modul mult mai mare, (sunt mult mai rigide), dacă este încărcată paralel cu fibrele, (de-a lungul lor). De asemenea, în această categorie mai pot fi incluse și unele spume, lemnul, betonul armat, etc., inginerii putând folosi acest fenomen direcțional în avantajul lor.

#### Tensiunea la curgere, $\sigma_y$ , [MPa]

Tensiunea la curgere – este definită ca primul punct din curba tensiune-deformație care prezintă o creștere în deformație fără o creștere a tensiunii (punctual B din figura 4.1).

Cunoașterea punctului de curgere este vitală în momentul proiectării unui component deoarece el reprezintă, în general, o limită superioară pentru încărcarea care poate fi aplicată. De asemenea, acest punct de curgere este important pentru controlul mai multor tehnici de producție a materialelor, cum ar fi: forjarea, laminarea sau presarea.

În cadrul ingineriei structurale, limita de curgere caracterizează un mod de degradare lent, care de cele mai multe ori nu duce la o rupere cu rezultate catastrofale sau la o rupere fragilă.

#### Tensiunea de platou, $\sigma_{pl}$ [MPa]

Tensiunea de platou – este dată de o creștere a deformației la o tensiune aproape constantă. Pentru spumele metalice, zona de platou începe de la o deformație la curgere,  $\varepsilon_y$ , sau tensiune la curgere,  $\sigma_y$ , reprezentând inițierea unui nou mecanism de deformare a peretelui celulei sau ruperea peretelui celulei, și se termină la o deformație critică,  $\varepsilon_D$ , reprezentând

începutul densificării, (figura 4.1). Pentru spumele metalice tensiunea de platou se calculează ca media aritmetică a tensiunilor din dreptul deformațiilor de 20% și 40% [CS].

#### Densificarea, $\varepsilon_D$ , [%]

Dacă se continuă încărcarea depășind zona de platou, pereții celulelor vor intra în contact unii cu alții. Materialul celular este complet compact în momentul în care deformația atinge o densificare completă  $\varepsilon_D$ , producând o creștere a pantei în curba tensiune-deformație.

În cazul spumelor metalice, deformația la densificare se determină cu relația:

$$\varepsilon_D = 1.3 \cdot \sigma_{pl} \quad (2)$$

În cele ce urmează se vor prezenta rezultatele experimentale obținute pentru cele 3 configurații amintite mai sus: spuma metalică (AFs), tubul gol (ETs) și tubul umplut cu spuma (FFTs)

## 4.2. Spume metalice de aluminiu (AFs)

Din datele furnizate de mașina de încercat, s-au trasat diagramele caracteristice convenționale pentru epruvetele încercate, forța-deplasare. În figura 4.2 este prezentată o comparație a curbelor tipice forța-deplasare pentru spumele metalice testate la diferite temperaturi.

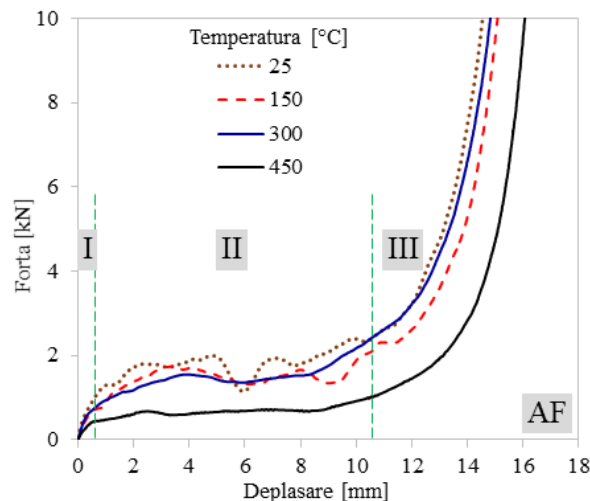


Figura 4.2. Curbele forța-deplasare pentru AFs la diferite temperaturi

De pe această diagramă se poate observa foarte ușor că odată cu creșterea temperaturii se obține o scădere semnificativă a proprietăților mecanice, ceea ce înseamnă că temperatura are un rol major în comportarea mecanică la compresie a spumelor metalice.

De pe diagrama forța-deplasare se pot identifica următoarele zone:

- I-prima parte a curbei prezintă o **zonă liniar-elastică** până la curgere;

➤ **II-o zonă de platou** după curgere care poate prezenta atât o variație aproape constantă, cu pantă egală cu zero (pentru temperaturi înalte), cât și o variație oscilatorie în cazul temperaturilor mai mici de 450°C;

➤ **III-o zonă** la sfârșitul curbei în care are loc o creștere semnificativă a forței la o deplasare aproape constantă, care poartă numele de **densificare**.

Cu ajutorul curbelor forta-deplasare s-au determinat caracteristicile mecanice ale spumelor metalice. Valorile medii ale acestor caracteristici sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Principalele proprietati mecanice ale AFs la diferite temperaturi de incarcare

Temperatura [°C]	Zona elastica (I)		Zona de platou (II)			Densificarea (III)		
	$F_y$ [kN]	$\Delta_y$ [mm]	$F_{20\%}$ [kN]	$F_{40\%}$ [kN]	$F_{pl}$ [kN]	$\Delta_D$ [mm]	$F_D$ [kN]	$W_D$ [J]
25	1.22	1.04	1.89	1.81	1.85	10.58	2.41	18.35
150	0.90	0.78	1.71	1.66	1.69	10.51	2.20	15.40
300	0.65	0.65	1.50	1.60	1.55	9.56	2.01	10.68
450	0.40	0.35	0.61	0.69	0.65	9.52	0.85	6.00

În figura 4.3a este prezentată variația forței corespunzătoare limitei de curgere cu temperatura de testare. S-a constatat că limita de curgere scade cu până la 68% în intervalul de temperaturi investigat. De asemenea, diminuări considerabile de până la 65% s-au observat și în cazul forței de platou, Fig. 4.3b. În acest caz cel mai mare salt de valori s-a obținut în intervalul de temperaturi 300-450°C.

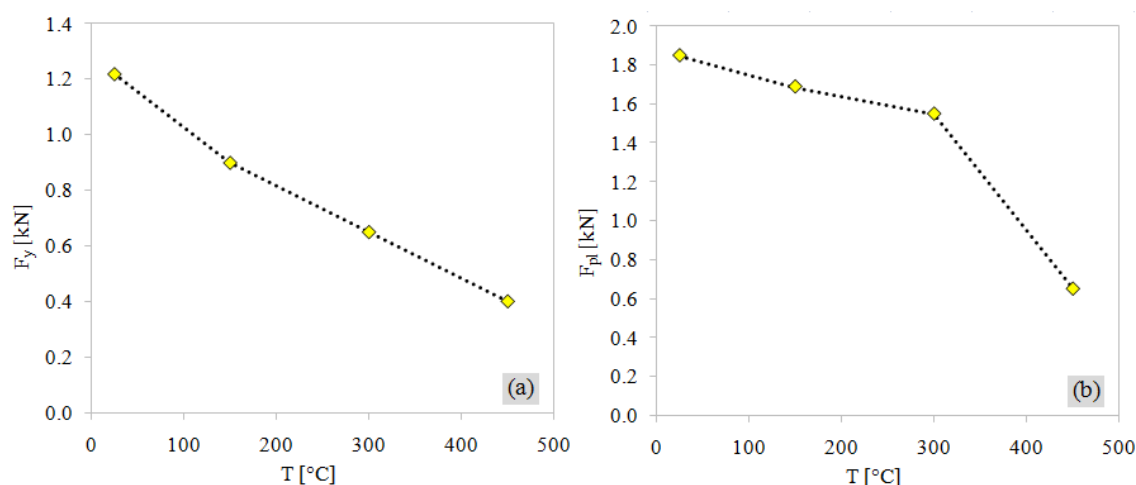


Fig. 4.3. Variația forței corespunzătoare limitei de curgere (a) și de platou (b) cu temperatura de testare

Pe de altă parte, după cum se poate vedea în figura 4.4 a, începutul densificării nu este afectat foarte tare de către temperatura de testare. Densificarea scade cu aproximativ 10% în

intervalul 25-450C. Cu toate acestea un salt mai mare este observat de aceasta data de la temperatura de 150C la cea de 300 C.

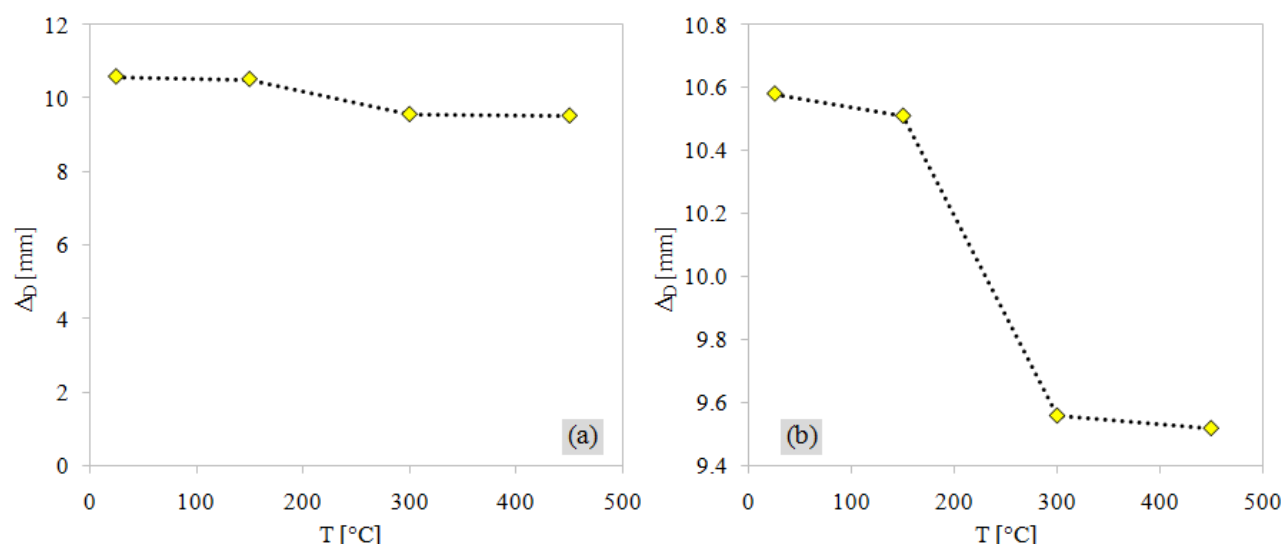


Figura 4.4. Variatia initiala (a) si detaliata (b) a densificarii cu temperatura de testare

Fora corespunzatoare inceputului densificarii, Figura 4.5, scade semnificativ cu pana la 65% odata cu cresterea temperaturii de testare. In acest caz, scaderea brusca a fortei cu 40% a fost obtinuta in intervalul 300-450C.

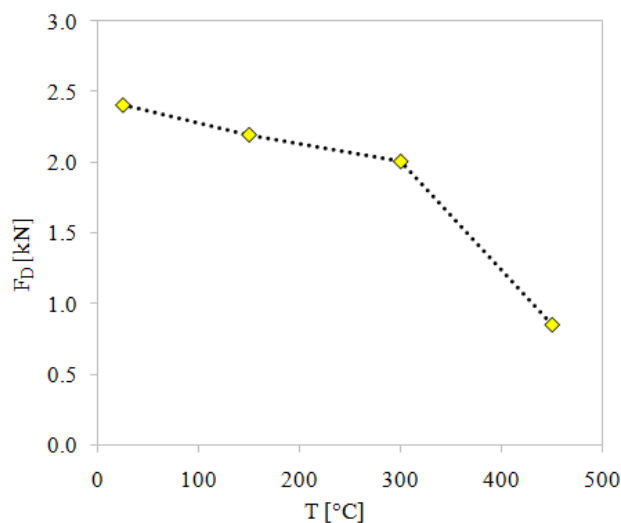


Figura 4.5. Variatia fortei la densificare cu temperatura de testare

### 4.3. Tuburi goale (ETs)

Acest subcapitol este dedicat investigarii comportamentului tuburilor goale la solicitari de compresiune. In figura 4.6.a sunt prezentate curbele forta-deplasare obtinute in urma testarii ETs

la diferite temperaturi, iar in figura 4.6 b se prezinta o epruveta in diferite stagii de deformare. Analizand aceste curbe se observa ca si in acest caz se pot identifica cele trei zone de deformatie amintite anterior: liniar-elastic, platou, densificare.

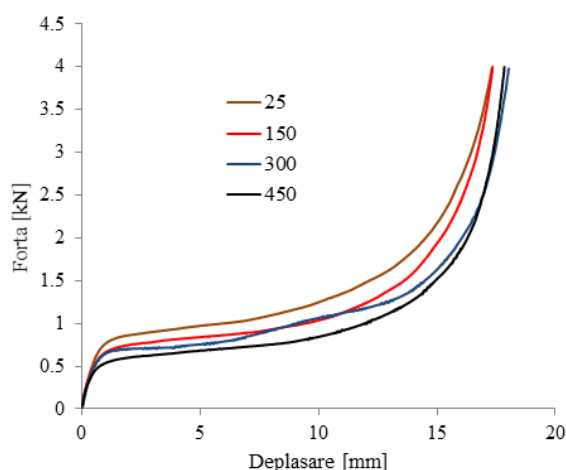


Figura 4.6.a Curbele forta-deplasare pentru ETs la diferite temperaturi

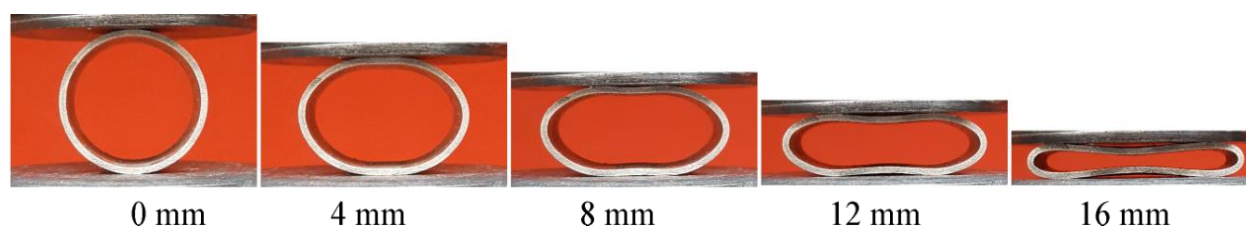


Figura 4.6.b. Epruveta ETs la diferite stagii de deformare

In tabelul 4.2 se prezinta valorile medii ale proprietatilor mecanice obtinute in urma testarii tuburilor goale.

Tabelul 4.2. Principalele proprietati mecanice ale ETs la diferite temperaturi de incarcare

Temperatura [°C]	Zona elastica (I)		Zona de platou (II)			Densificarea (III)		
	$F_y$ [kN]	$\Delta_y$ [mm]	$F_{20\%}$ [kN]	$F_{40\%}$ [kN]	$F_{pl}$ [kN]	$\Delta_D$ [mm]	$F_D$ [kN]	$W_D$ [J]
25	0.70	0.76	0.95	1.15	1.05	11.16	1.37	10.97
150	0.64	0.76	0.85	1.02	0.94	11.42	1.22	10.29
300	0.58	0.74	0.77	0.96	0.87	11.68	1.13	9.58
450	0.52	0.75	0.71	0.82	0.77	11.74	1.00	8.94

Figurile 4.7 si 4.9 prezinta variatia proprietatilor mecanice cu temperatura de testare. In acest caz se observa ca Forta corespunzatoare limitei de curgere, forta de platou si forta corespunzatoare densificarii variaza aproximativ liniar cu temperatura. Dupa cum se poate vedea atat din Tabelul 4.2 cat si figurile 4.7 si 4.9, se constata ca in acest caz scaderea proprietatilor

este mult mai ne semnificativă (maxim 27%) comparativ cu spumele metalice (maxim 68%). Acest aspect este datorat punctului de topire mult mai ridicat al tubului de oțel comparativ cu aliajul de aluminiu din care este confecționată spuma metalică. Studiind figura 4.8 se observă că densificarea crește puțin cu creșterea temperaturii (cu aproximativ 6%).

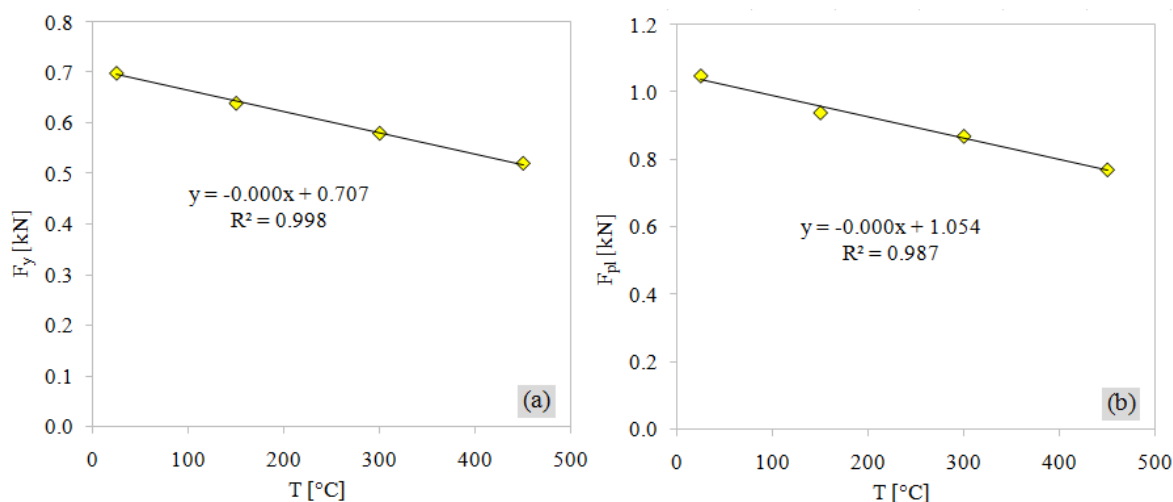


Figura 4.7. Variația forței corespunzătoare limitei de curgere (a) și de platou (b) cu temperatura de testare

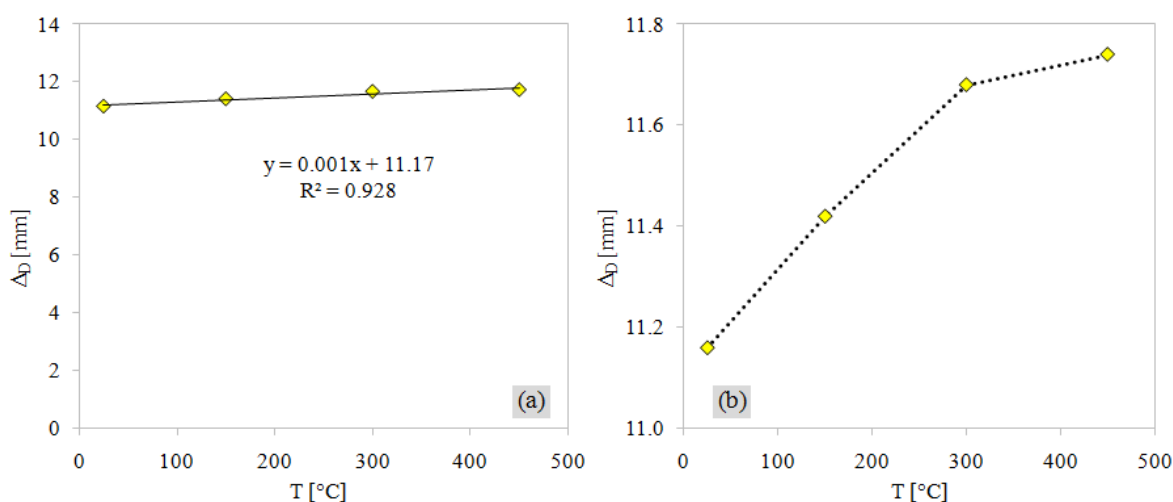


Figura 4.8. Variația inițială (a) și detaliată (b) a densificării cu temperatura de testare

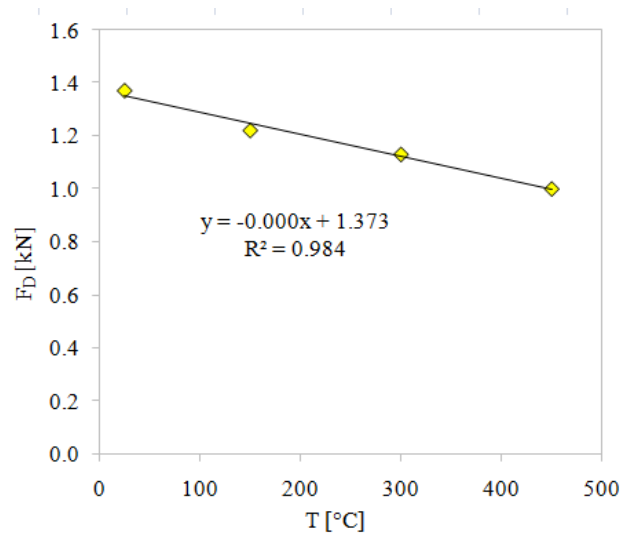


Figura 4.9. Variatia fortei la densificare cu temperatura de testare

#### 4.4. Tuburi umplute cu spuma metalica (FFTs)

Subcapitolul 4.4 prezinta rezultatele obținute in urma testelor efectuate pe tuburi umplute cu spume metalice. Astfel, figura 4.10, prezinta curbele de variate forta-deplasare a FFTs obtinute in urma testelor de compresiune, iar figura 4.10.b. prezinta epruveta FFTs la diferite stagii de deformare. Se observa ca si in acest caz au fost obtinute cele 3 zone de deformare, specifice materialelor celulare. De asemenea, tot de pe figura 4.10.a. se poate observa ca datorita comportamentului fragil al spumei metalice, primele 2 curbe (la 25 si 150C) prezinta unele oscilatii. Aceste oscilatii scad odata cu cresterea temperaturii, ajungand sa fie egale cu zero la temperatura de 450C. Acest lucru este datorat inmuierii peretilor celulelor spumelor si comportamentului ductil al intregii structuri.

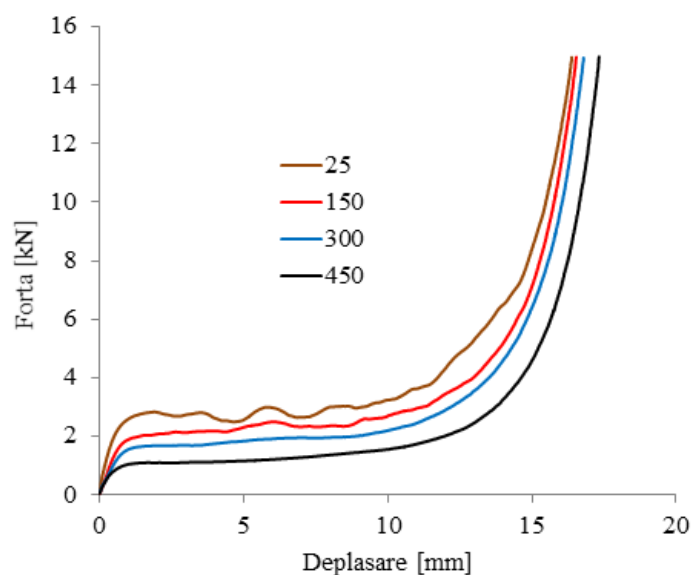


Figura 4.10.a Curbele forta-deplasare pentru FFTs la diferite temperaturi

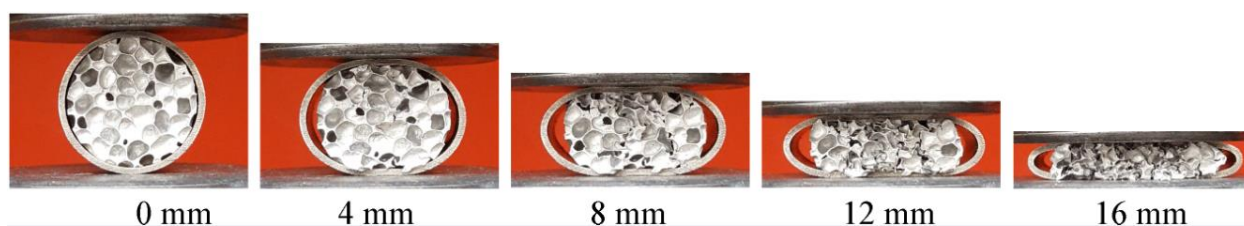


Figura 4.10.b. Epruveta FFTs la diferite stagii de deformare

Tabelul 4.3 prezinta valorile medii ale caracteristicilor mecanice obtinute in urma testelor de compresiune pe tuburile umplute cu spuma metalica.

Tabelul 4.3. Principalele proprietati mecanice ale FFTs la diferite temperaturi de incarcare

Temperatura [°C]	Zona elastica (I)		Zona de platou (II)			Densificarea (III)		
	$F_y$ [kN]	$\Delta_y$ [mm]	$F_{20\%}$ [kN]	$F_{40\%}$ [kN]	$F_{pl}$ [kN]	$\Delta_D$ [mm]	$F_D$ [kN]	$W_D$ [J]
25	2.40	0.78	2.52	2.99	2.76	10.81	3.59	29.77
150	1.97	0.77	2.15	2.41	2.28	10.84	2.96	24.73
300	1.51	0.78	1.79	1.99	1.89	10.85	2.46	18.82
450	0.97	0.78	1.14	1.44	1.29	10.87	1.68	12.97

In cazul FFTs, toate proprietatile mecanice scad odata cu cresterea temperaturii de testare (figurile 4.10 si 4.12), exceptie facand inceputul densificarii unde se observa o variatie aproximativ constanta (figura 4.11). Analizand rezultatele prezentate in Tabelul 4.3 se observa ca scaderea procentuala este mai mica decat in cazul AFs, dar mai mare decat in cazul ETs.



Acest lucru este datorat interacțiunii dintre materialul spumei metalice și peretele interior al tubului. Forța corespunzătoare limitei de curgere (figura 4.10a) și forța de platou (figura 4.10b) scad cu până la 60%, respectiv 54% odată cu creșterea temperaturii de testare.

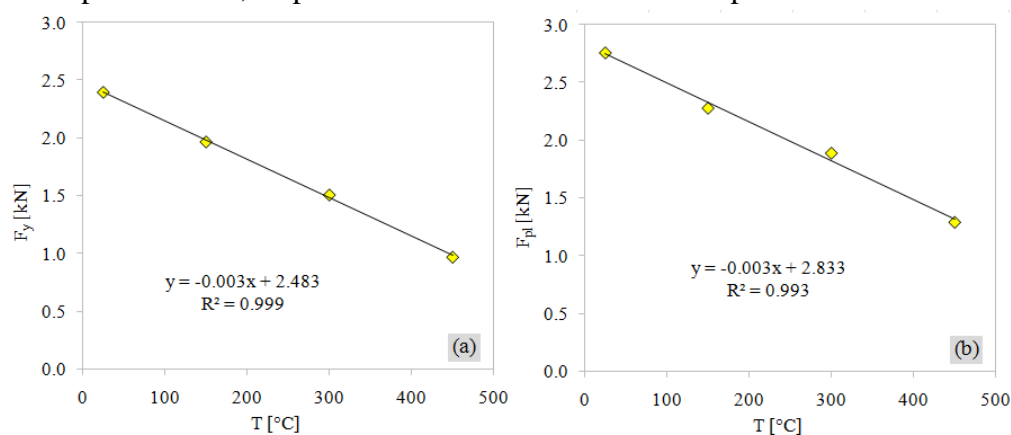


Figura 4.10. Variația forței corespunzătoare limitei de curgere (a) și de platou (b) cu temperatura de testare

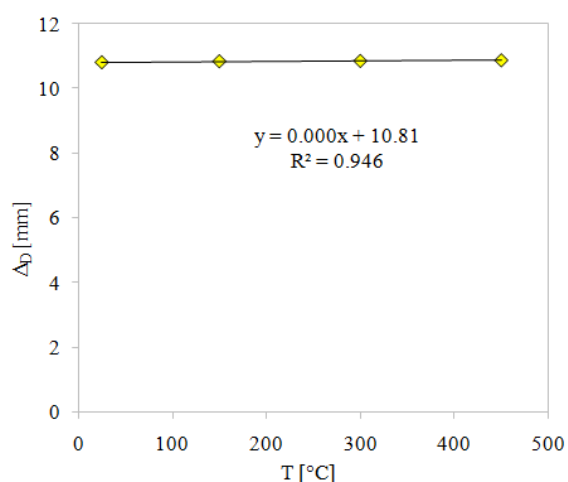


Figura 4.11. Variația densificării cu temperatura de testare

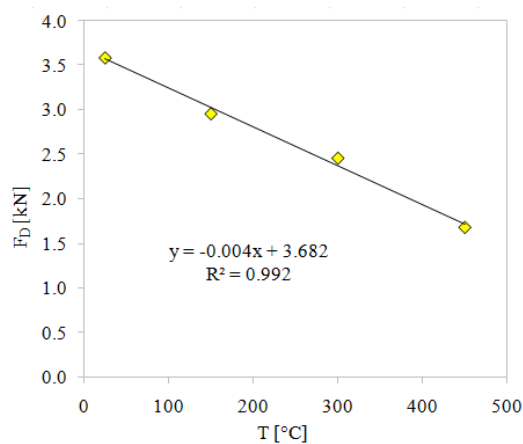


Figura 4.12. Variația forței la densificare cu temperatura de testare

În figura 4.13 este prezentată o comparație a curbelor forta-deplasare pentru două configurații diferite ale epruvetelor: tubul gol și tubul umplut cu spuma metalică. După cum se poate observa, FFTs prezintă proprietăți mecanice mai mari cu până la 2-3 ori mai mari decât ETs. Această creștere a proprietăților mecanice face posibilă creșterea tot mai mare a utilizării spumelor metalice ca material de umplutură pentru structurile metalice goale.

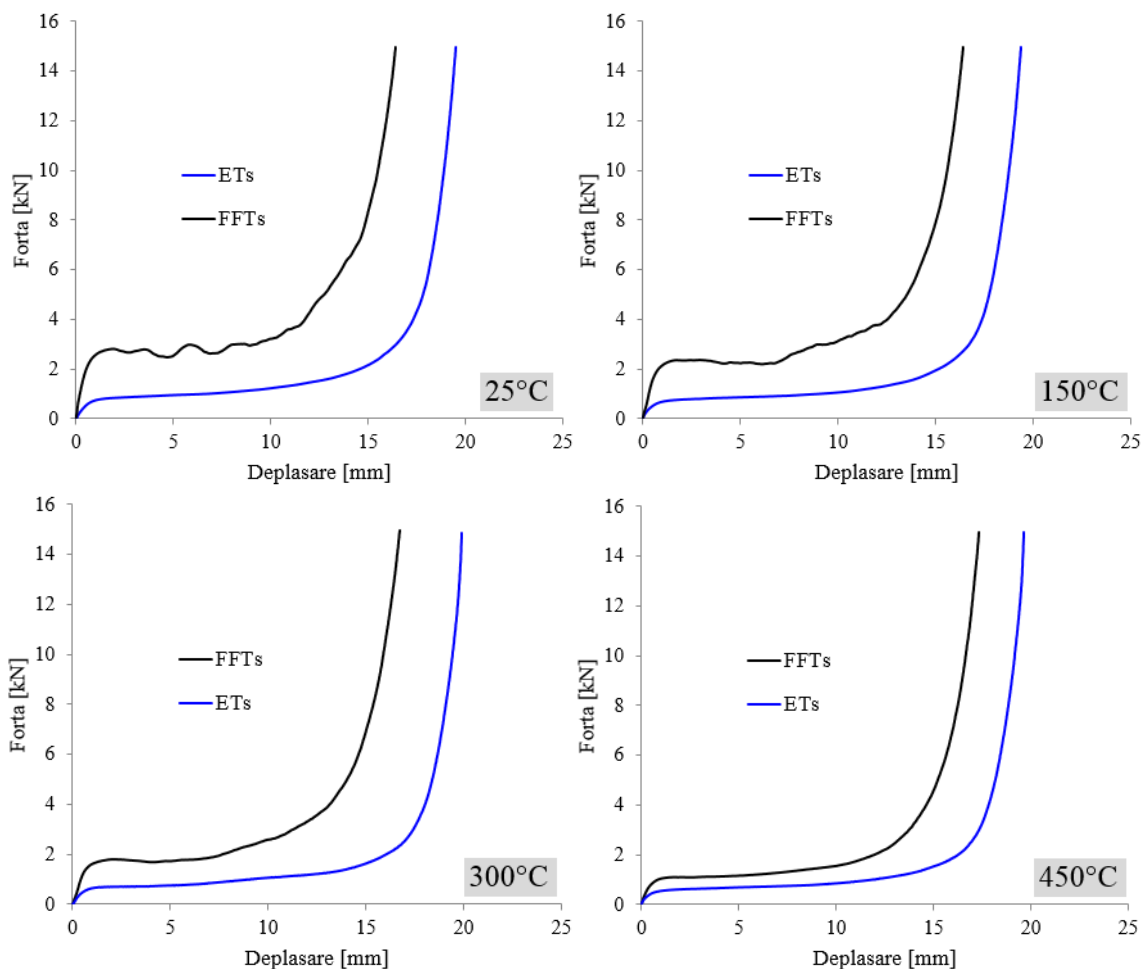


Figura 4.13. Comparatie a curbelor forta-deplasare pentru ETs si FFTs la diferite temperaturi

#### 4.5. Energia de absorbție

În momentul în care o spumă este încărcată, lucrul mecanic este realizat de către forțele aplicate. Lucrul mecanic pe unitatea de volum în deformarea spumei la o deformare  $\varepsilon$  este reprezentat de aria de sub curba tensiune-deformație până la deformația  $\varepsilon$  (figura 4.14). O cantitate foarte mică de energie este absorbită în zona liniar-elastică, deoarece această zonă este relativ mică (sub 5%). După cum se vede și în figura 4.14, marea parte a energiei este absorbită

în zona de platou, deoarece aici au loc flambajul, curgerea sau ruperea peretilor celulelor, acestea permițând o absorbție mare a energiei de impact la o încărcare aproape constantă.

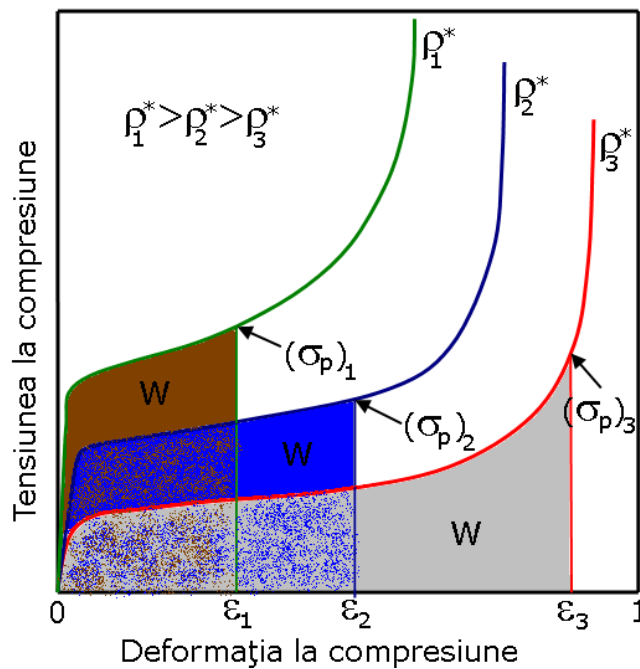


Figura 4.14. Tensiunile de vârf [  $(\sigma_p)_1$ ,  $(\sigma_p)_2$  și  $(\sigma_p)_3$  ], generate într-o spumă cu trei densități diferite, absorbind aceeași cantitate de energie W.

Spuma cu densitatea cea mai scăzută ( $\sigma_3$ ), înainte de a absorbi cantitatea de energie W, generează tensiunea de vârf cea mai mare,  $(\sigma_p)_3$ . Spuma cu densitatea cea mai mare ( $\sigma_1$ ), generează de asemenea o tensiune de vârf mare,  $(\sigma_p)_1$  înainte de a absorbi cantitatea de energie W. Se observă că între cele două extreme, se găsește o densitate optimă, ( $\sigma_2$ ), care absoarbe aceeași energie W, generând o tensiune de vârf de valoare mai mică,  $(\sigma_p)_2$ .

Energia absorbită pe unitate de volum, până la o deplasare,  $\Delta$ , este dată de relația următoare:

$$W = \int_0^{\Delta} F(\Delta) d\Delta \quad (3)$$

În urma prelucrării curbelor forta-deplasare, în figura 4.15 s-au obținut variațiile energiei de absorbție cu temperatura pentru fiecare tip de epruveta în parte (AFs, ETs și FFTs).

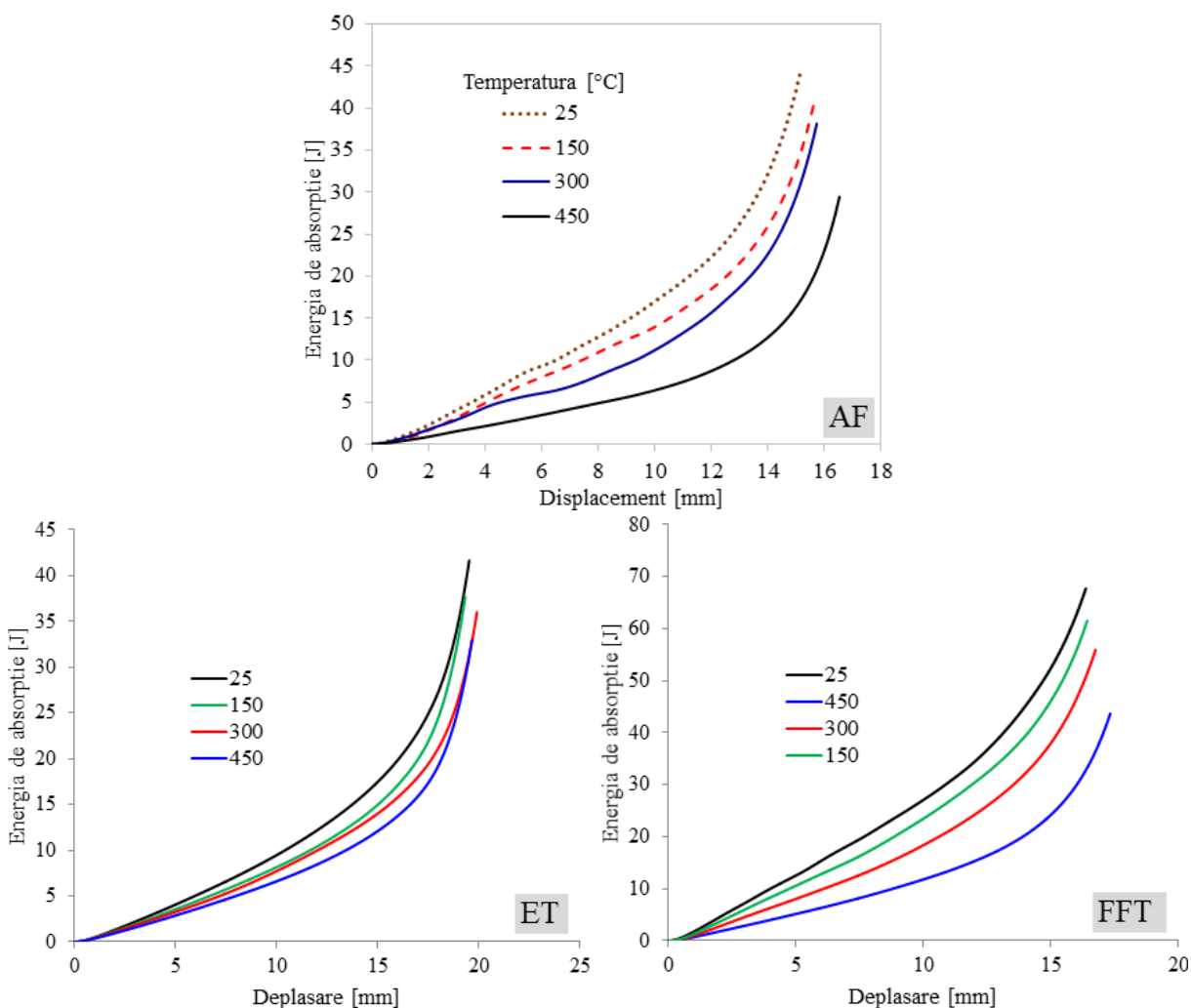


Figura 4.15. Variația energiei de absorptie cu temperatura pentru AFs, the ETs și FFTs

În tabelul 4.4 s-au prezentat valorile medii ale energiilor de absorptie extrase din curbele  $W-\Delta$  (figura 14) pentru diferite deformări, iar figura 4.16 prezintă o comparație a acestor energii pentru cele 4 temperaturi de testare investigate.

Table 4.4 Valorile medii ale W pentru AFs, ETs si FFTs pentru diferite temperaturi de testare

Tipul epruvetei	T [°C]	Energia de absorbție la diferite deformații [J]							
		@10	@20	@30	@40	@50	@60	@70	@80
AFs	25	2.29	5.86	9.30	12.78	16.99	22.30	32.21	44.72
	150	1.92	4.03	6.97	9.14	11.75	15.39	21.45	37.88
	300	1.26	3.12	6.15	8.55	10.2	14.23	21.00	35.01
	450	0.37	1.58	2.83	4.21	5.62	7.49	10.49	16.60
ETs	25	1.51	3.52	5.69	8.08	10.82	14.13	18.41	25.32
	150	1.35	3.15	5.05	7.11	9.42	12.17	15.75	21.56
	300	1.25	2.85	4.60	6.57	8.81	11.36	14.53	19.42
	450	1.18	2.73	4.41	6.20	8.19	10.58	13.67	18.64
FFTs	25	5.06	11.02	17.08	23.33	30.45	40.24	55.85	93.94
	150	4.12	9.23	14.18	19.85	26.77	35.31	49.48	86.25
	300	3.14	7.02	10.94	15.44	21.10	28.57	40.94	72.44
	450	2.02	4.47	7.07	10.00	13.43	18.01	26.16	48.08

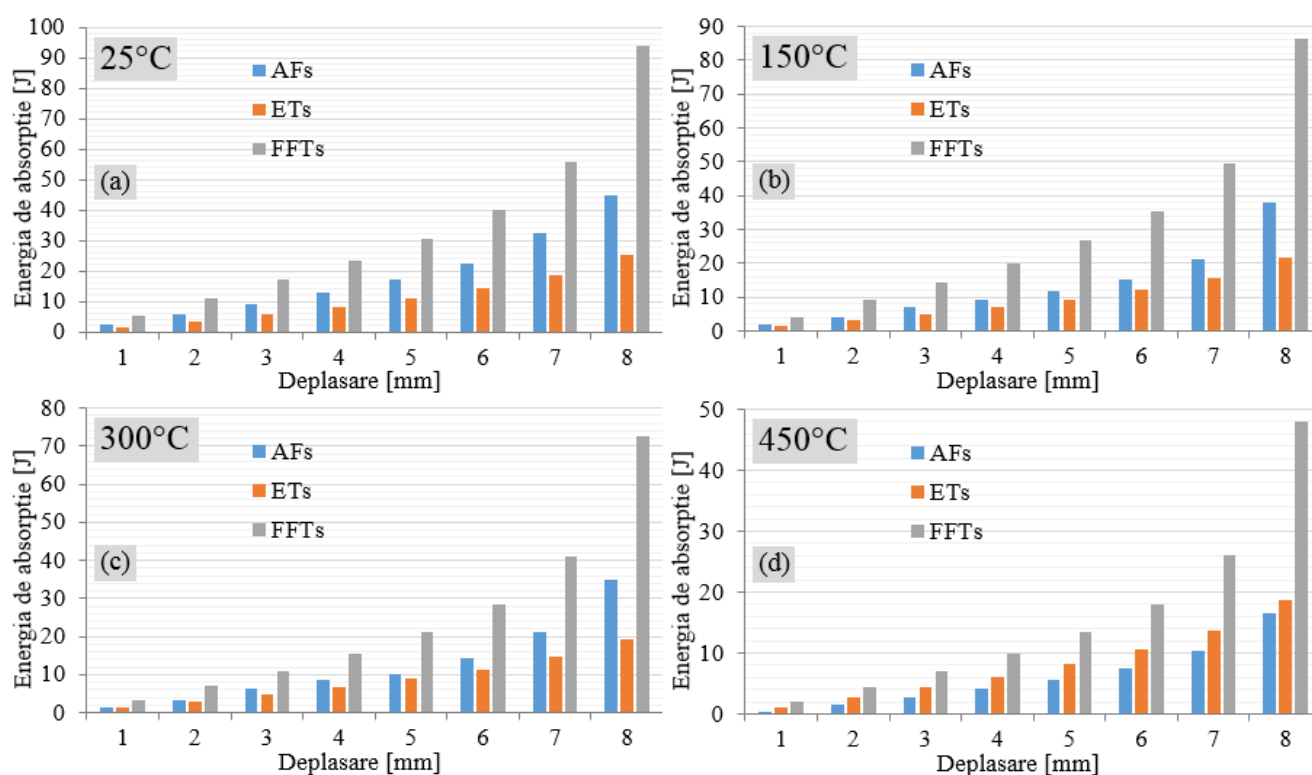


Figura 4.16. Valorile energiei de absorbție cu deplasarea pentru AFs, ETs si FFTs

De asemenea, figura 4.17 prezinta o comparatie a variatiei energiilor de absorbție atat pentru ETs cat si pentru FFTs.

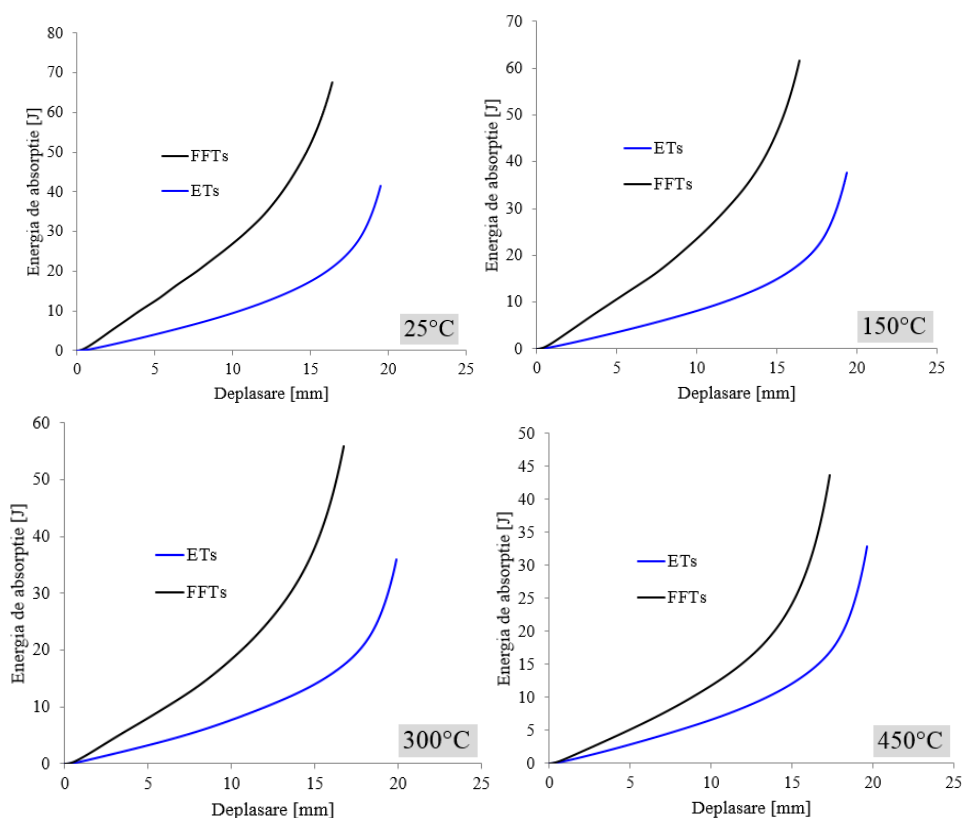


Figura 4.17. Comparatie a curbeor energie de absorptie-deplasare pentru ETs si FFTs la diferite temperaturi

Analizand atat tabelul 4.4 cat si figura 4.17 s-a observat ca la temperatura ambianta tuburile umplute cu spuma metalica absorb o cantitate de energie cu pana la 74% mai mult decat tuburile goale. Aceasta diferenta semnificativa in termenii energiei de absorptie scade odata cu cresterea, ajungand pana la 40% la temperatura de 450C.

Figura 4.18 prezinta variatia raportului energiei de absorptie ( $\Delta W = W_{FFT}/W_{ET}$ ) cu temperatura. In acest caz s-a obtinut o variatie liniara, raportul  $\Delta W$  fiind maxim la 25C si scade pana la 1.5 la o temperatura de 450C.

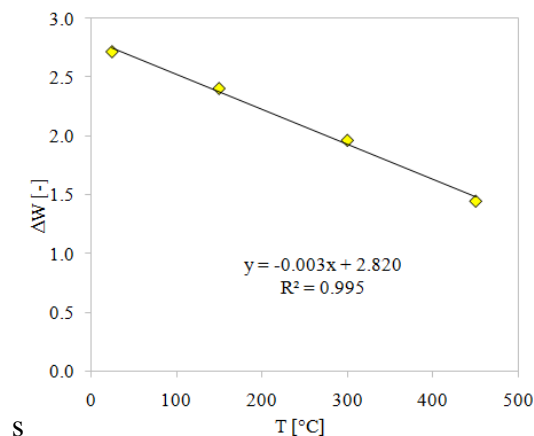


Figura 4.18. Variatia raportului energiei de absorptie ( $\Delta W = W_{FFT}/W_{ET}$ ) cu temperatura

## Concluzii

Aceasta lucrare investigheaza influenta temperaturii de testare asupra comportamentul la compresiune cvasi-statica al spumelor metalice de aluminiu (AFs), tuburilor goale (ETs) si al tuburilor umplute cu spum metalica (FFTs). In urma prelucrarii rezultatelor experimentale se pot trage urmatoarele concluzii:

- S-a determinat densitatea spumelor testate conform standardelor in vigoare, obtinandu-se o valoare medie a acesteia de  $420 \text{ kg/m}^3$ .
- S-au trasat curbele tensiune-deformație la compresiune si s-a constata ca acestea prezinta trei zone distincte: o zonă liniar-elastică; o zonă de platou și densificarea.
- S-a investigat influenta temperaturii asupra comportamentului mecanic al structurilor compozite si s-a observat ca toate proprietatile mecanice scad semnificativ odata cu cresterea acesteia.
- S-a efectuat un studiu al energiei de absorptie. S-a observat ca la temperatura ambianta tuburile umplute cu spuma metalica absorb o cantitate de energie cu pana la 74% mai mult decat tuburile goale.
- S-a constata ca tuburile umplute cu spuma prezinta proprietati mecanice (forta corespunzatoare limitei de curgere, forta de platou, densificarea) mai mari cu pana la 2-3 ori mai mari decat tuburile goale.

Ca si concluzie generala, investigatia de fata a demonstrat ca utilizarea spumelor metalice de aluminiu cu celule inchise creste semnificativ proprietatile mecanice ale structurilor compozite. Aceasta crestere a proprietatilor face posibila diversificarea utilizarii spumelor metalice ca material de umplutura pentru structurile metalice goale din diferite aplicatii ingineresti.

## Bibliografie

- [1] ASHBY, M.F., EVANS, A.G., FLECK, N.A., GIBSON, L.J., Hutchinson J.W, Wadley, H.N.G. *Metal foam: A design Guide*, Butterworth Heinemann, 2000.
- [2] DAVIES G.J., ZHEN S. *Metallic foams: their production, properties and applications*, Journal of Materials Science, 18, p. 1899-1911, 1983
- [3] SEVOSTIANOV I., KOVÁČIK J, SIMANCIK F. *Elastic and electric properties of closed-cell aluminum foams. Cross-property connection*, Materials Science and Engineering A 420, pp 87–99, 2006
- [4] Linul Emanoil, Studiul factorilor care influenteaza proprietatile mecanice ale spumelor poliuretanice rigide, Teza de doctorat, 2011
- [5] Voiconi Tudor, Caracterizarea mecanica a spumelor metalice si a structurilor care contin spume metalice, Teza de doctorat 2015
- [6] [https://www.researchgate.net/publication/318820229\\_SPUME\\_METALICE\\_UTILIZATE\\_P\\_ENTRU\\_MATERIALE\\_ECOLOGICE](https://www.researchgate.net/publication/318820229_SPUME_METALICE_UTILIZATE_P_ENTRU_MATERIALE_ECOLOGICE)
- [7] <https://www.scribd.com/doc/85457830/Materiale-Si-Tehnologii-Neconventionale>
- [8] <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/2/85>



# Anexe

## **Declarație**