

Caracterizarea mecanică a spumelor metalice și a structurilor care conțin spume metalice

-Rezumat-

Capitolul 1 intitulat *Stadiul actual privind studiul comportării mecanice a spumelor metalice* este organizat în 4 subcapitole. În subcapitolul 1.1 se face o prezentare a materialelor celulare metalice, respectiv a spumelor metalice de aluminiu, prezentându-se un și un scurt istoric al evoluției producerii spumelor metalice de aluminiu. În subcapitolul 1.2 este prezentată tehnologia de fabricare a spumelor metalice produse de Academia Slovacă de Științe din Bratislava (SAS). În subcapitolul 1.3 sunt prezentate principalele proprietăți elastice și mecanice ale materialelor celulare de tipul spumelor metalice, evidențiind rolul important al densității asupra acestora. În subcapitolul 1.4 sunt prezentate o serie de aplicații în care sunt utilizate materialele celulare de tipul spumelor metalice de aluminiu. De menționat ar fi varietatea domeniilor în care sunt utilizate astfel de materiale, de la utilizarea în industria de automobile sau feroviară cu rol de protecție, au capacitate mare de absorbție a energie la impact ducând astfel la protecția pasagerilor, până la utilizarea inclusiv în construcții (pereții unei camere) cu rol de încălzire sau răcirea spațiilor. În urma celor prezentate mai sus, în special a proprietăților elastice și mecanice a spumelor metalice de aluminiu, dar și a utilizării lor într-o serie de aplicații legate strict de siguranța pasagerilor se poate concluziona că acest tip de materiale pătrunde tot mai mult pe piață cu tendința de a înlocui materiale convenționale.

Capitolul 2 intitulat *Determinarea proprietăților elastice și mecanice ale spumelor metalice de aluminiu* este un capitol dedicat în totalitate analizei experimentale a spumelor metalice de aluminiu cu compoziții și densități diferite. Capitolul este structurat în 4 subcapitole. În subcapitolul 2.1 a programului experimental s-a realizat identificarea tipului de spumă metalică: analiza microscopică, stabilirea compoziției spumei metalice și determinarea densității. Astfel s-a stabilit în urma analizei microscopice că structura celulară a spumelor metalice de aluminiu studiate este formată din celule închise, au fost identificate trei tipuri de compoziții (AlMg1Si0.6-**M8**; AlSi12Mg0.6-**S7**; Al 99.6% + 0.4% TiH₂-**G**), iar pentru fiecare dintre epruvete a fost necesară calcularea densității. În subcapitolul 2.2 a programului experimental s-au determinat proprietățile elastice pentru spumele metalice de aluminiu studiate: modulul de elasticitate longitudinal (E), modulul de elasticitate transversal (G), coeficientul de amortizare (Q^{-1}) și Coeficientul lui Poisson (ν). Pentru determinarea acestor proprietăți elastice a fost utilizată o metodă de testare nedistructivă, *metoda excitării prin impuls*, dispozitivul utilizat se numește Resonant Frequency and Damping Analyzer (RFDA basic) produs de firma IMCE, Genk, Belgia, acesta fiind un dispozitiv de testare nedistructiv, aflat în dotarea Laboratorului de Rezistența Materialelor “Ștefan Nădășan” din cadrul Universității POLITEHNICA Timișoara.

Au fost determinate proprietățile elastice pentru spume metalice cu două compoziții diferite, M8 și G, având densități cuprinse între 400 kg/m^3 și 900 kg/m^3 . Această metodă nedistructivă utilizată pentru determinarea proprietăților elastice a spumelor metalice este printre puținele metode de testare capabile să ofere un răspuns cu privire comportamentul elastic al spumelor metalice de aluminiu. S-a observat că din nou densitatea se dovedește a fi un parametru important, valorile modulelor de elasticitate longitudinal (E) și transversal (G) cresc odată cu creșterea densității, pe când coeficientul de amortizare (Q^{-1}) scade odată cu creșterea densității. Determinarea Coeficientului lui Poisson (ν) cu această metodă reprezintă un mare câștig, deoarece acest parametru este folosit aproape în toate calculele de proiectare și analiză numerică, s-a observat că nu are o valoare constantă, fiind dependent de structura spumei metalice studiate. Un alt mare avantaj al acestei metode este faptul că epruvetele nu necesită o pregătire deosebită înainte de testare, este suficient să îndeplinească câteva condiții legate de geometria lor.

În subcapitolul 2.3 a programului experimental s-a realizat o caracterizare mecanică completă a spumei metalice de aluminiu M8, au fost efectuate teste de compresiune și încovoiere în trei puncte în regim static. În cazul testelor de compresiune statică s-a studiat influența asupra proprietăților mecanice a următorilor parametri: densitatea, temperatura și învelișul spumei metalice. Încercările experimentale au fost efectuate în timpul efectuării unui stagiu la Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden. Echipamentul utilizat în programul experimental a fost o mașină de încercat la tracțiune-compresiune Zwick/Roell 10 kN dotată cu incintă termică fapt ce a permis testarea pe o plajă largă de temperatură, de la $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ până la $500 \text{ }^\circ\text{C}$, viteza de încărcare fiind de 10 mm/min , epruvetele având forma cilindrică $25 \times 25 \text{ mm}$, densitatea epruvetelor studiate este cuprinsă între 400 kg/m^3 și 700 kg/m^3 , toate testele fiind realizate conform standardului International Standard for Compression Test of Porous and Cellular Metals. Principalele caracteristici mecanice determinate au fost rezistența la compresiune, σ_c , energia de absorbție pe unitatea de volum.

Influența densității. S-a prezentat variația rezistenței la compresiune, calculată la 20% și 50% din deformație, funcție de densitate și variația energiei de absorbție pe unitatea de volum, calculată la 50% din deformație, funcție de densitate. S-a observat că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel densitatea are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune.

Influența temperaturii. S-a prezentat variația rezistenței la compresiune funcție de temperatură și variația energiei de absorbție pe unitatea de volum, calculată la 50% din deformație, funcție de temperatură. S-a observat că odată cu creșterea temperaturii se obține o scădere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel temperatura are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune. Influența cea mai importantă asupra caracteristicilor mecanice se poate observa după temperatura de 100°C , când are loc o scădere semnificativă a acestora.

Influența învelișului. S-a realizat un studiu al influenței învelișului pe epruvete cu și fără înveliș la temperaturile de 20 și 100°C . S-a prezentat variația rezistenței la compresiune funcție de densitate pentru epruvete cu și fără înveliș și variația energiei de absorbție pe unitatea de

volum, calculată la 50% din deformație, funcție de densitate pentru epruvete cu și fără înveliș. Se poate observa că odată cu păstrarea învelișului se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel învelișul are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune. În urma testelor de compresiune statică s-a constatat că spuma metalică cu compoziția M8 prezintă un comportament ductil.

Tot în regim static au fost realizate și încercări de încovoiere în trei puncte, unde s-a urmărit studierea influenței învelișului asupra caracteristicilor mecanice. S-a observat că valoarea modului de elasticitate calculat la încovoiere în trei puncte pentru direcția de încărcare perpendiculară pe înveliș este de două ori mai mare față de valoarea modului de elasticitate calculat la încovoiere în trei puncte pentru direcția de încărcare paralelă pe înveliș.

În subcapitolul 2.4 a programului experimental s-a realizat o caracterizare mecanică a spumei metalice de aluminiu S7 solicitată la compresiune dinamică și o caracterizare a spumei metalice de aluminiu cu compoziția M8 solicitată la oboseală.

Încercările experimentale de compresiune dinamică s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității Tehnice din Lublin, Polonia. Testele s-au realizat pe o mașină de încercat Instron-Dynatup, la temperatura ambiantă cu viteza de încercare de 3.5 m/s, densitatea epruvetelor studiate este cuprinsă între 350 kg/m³ și 800 kg/m³. Scopul acestor teste de compresiune dinamică a fost găsirea unei corelații între rezistența la compresiune, σ_c , determinată la solicitarea de compresiune statică și rezistența la compresiune, σ_c , determinate la solicitarea de compresiune dinamică pentru cât mai multe valori ale densității spumei metalice studiate. De precizat că testele de compresiune statică au fost realizate la Academia Slovacă de Științe din Bratislava (SAS). Epruvetele semicilindrice au fost tăiate din același cilindru, astfel o jumătate a fost solicitată la compresiune statică iar cealaltă jumătate a fost solicitată la compresiune dinamică. S-a realizat corelarea rezistenței la compresiune, σ_c , determinată la solicitarea de compresiune statică și dinamică calculată la 20% și 50 % din deformație.

Au fost propuse și două relații privind corelarea rezistenței la compresiune, σ_c , determinată la solicitarea de compresiune statică și dinamică calculată la 20% și 50% din deformație.

Încercările experimentale de oboseală pentru spuma metalică de aluminiu cu compoziția M8 au fost realizate pe o mașină pentru încercări statice și de oboseală Walter Bay de 10 kN din dotarea Laboratorului „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara. Testele au fost realizate la temperatura ambiantă și la o frecvență de 10 Hz, epruvetele utilizate având formă cilindrică, 25x25 mm, coeficientul de asimetrie fiind de 0.1. Densitatea spumei metalice investigate este de aproximativ 500 ± 15 kg/m³. S-a constatat în cazul testelor de oboseală (compresiune – compresiune) că principalul mecanism de degradare a structurii celulare la acest tip de spumă metalică este apariția unei singure benzi în zona în care spuma prezintă densitatea cea mai scăzută, confirmând comportamentul ductil al spumei metalice de aluminiu cu compoziția M8.

Capitolul 3 intitulat *Utilizarea metodei corelării de imagini digitale pentru investigarea degradării spumelor metalice* prezintă analiza a două tipuri de spume metalice, S7 și M8,

solicitate la compresiune statică. Utilizând sistemul optic ARAMIS 2D au fost realizate hărțile deformațiilor principale pentru fiecare compoziție. De asemenea cu ajutorul sistemului optic ARAMIS 2D a fost calculat și Coeficientul lui Poisson pentru cele două compoziții. Încercările experimentale au fost efectuate în Laboratorul „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara pe o mașină de încercări de tracțiune – compresiune LBG A009 de 100 kN utilizând sistemul optic ARAMIS 2D, sistem aflat în dotarea Laboratorului de Rezistența Materialelor al Universității Tehnice din Lublin, Polonia. Epruvetele testate au formă semicilindrică ,datorită sensibilității unui astfel de sistem de măsurare, a fost necesară pregătirea suprafeței epruvetelor analizate: inițial epruvetele prezintă goluri destul de mari, fapt ce a dus la umplerea acelor goluri cu plastilină, odată creată suprafața plană s-a aplicat un strat de vopsea sub forma unui nor de puncte pentru a crea un contrast cât mai bun în vederea măsurătorilor. S-au realizat hărțile deformațiilor principale pentru spuma metalică M8 și S7 solicitate la compresiune statică. În cazul spumei metalice cu compoziția M8 se observă apariția la început a mai multor benzi de deformații în zona unde structura prezintă o densitate mai scăzută, care mai apoi se transformă într-o singură bandă cu orientarea perpendiculară pe planul de încărcare, în cazul spumei metalice cu compoziția S7 se observă apariția de la început a unei singure benzi de deformații în zona unde structura prezintă o densitate mai scăzută, care mai apoi se dezvoltă la aproximativ 45° față de pe planul de încărcare. De asemenea cu ajutorul acestei metode de măsurare a deformațiilor a fost determinat și Coeficientul lui Poisson pentru cele două compoziții a spumelor metalice analizate.

Capitolul 4 intitulat *Caracterizarea mecanică a structurilor de tip sandwich care conțin spume metalice* prezintă caracterizarea unor structuri compozite de tip sandwich cu miez din spumă metalică solicitate la încovoiere în trei puncte în regim static și dinamic cât și analiza unor tuburi metalice subțiri umplute cu spumă metalică solicitate la compresiune statică, realizându-se și o analiză numerică pentru acest tip de structură. În subcapitolul 4.1 sunt prezentate principalele proprietăți ale structurilor de tip sandwich cu miez de spumă metalică și o schemă de asamblare a structurilor de tip sandwich. În subcapitolul 4.2 sunt prezentate principalele aplicații ale structurilor de tip sandwich, acestea fiind utilizate pe scară tot mai largă în diferite domenii: domeniul construcției de mașini (lagăre, roți dintate, rotoare de compresoare centrifugale, palete de ventilatoare, biele etc.); domeniul aerospațial (structuri de aeronave, componente ale motoarelor funcționând în regim termic ridicat, sisteme de frânare etc.); domeniul transportului naval (structuri pentru ambarcațiuni sportive și nave ușoare etc.); domeniul transportului rutier (caroserii pentru autovehicule, etc.). Spre exemplu, ponderea materialelor compozite în structura avioanelor a depășit 50% la multe tipuri de avioane moderne civile sau militare, 20 % la multe tipuri de elicoptere și cu o pondere de peste 80 – 90 % pentru palele rotoarelor elicopterelor sau cele pentru generarea de energie electrică. Toate aceste aplicații, amintite mai sus, evidențiază foarte clar importanța utilizării materialelor compozite din punct de vedere socio-economic, ducând totodată la necesitatea studierii acestora din punct de vedere științific la un nivel mult mai amplu.

În subcapitolul 4.3 s-a realizat analiza unor structuri compozite de tip sandwich cu miez din spumă metalică solicitate încovoiere la în trei puncte în regim static și dinamic, pentru care se va realiza caracterizarea fețelor, caracterizarea miezului și caracterizarea întregii structuri.

S-au prezentat ecuațiile clasice de determinare a rigidității echivalente la încovoiere și forfecare pentru structurile compozite de tip sandwich. Un aspect important în caracterizarea acestor structuri de tip sandwich îl reprezintă rezistența, fiind identificate cel puțin trei moduri de rupere pentru grinzi de tip sandwich cu miez din spumă metalică: curgerea sau cedarea feței; indentarea și forfecarea miezului.

În cadrul programului experimental a fost studiată o structură de tip sandwich solicitată la încovoiere în trei puncte atât static cât și dinamic. Structura sandwich-ului este compusă din două fețe de tablă expandată de inox, miezul fiind din spumă metalică având compoziția AlSi10. Așa cum am prezentat anterior, pentru a studia în mod corect o astfel de structură trebuie cunoscute toate caracteristicile mecanice atât ale fețelor cât și ale miezului, astfel programul experimental efectuat pentru a caracteriza cât mai complet o astfel de structură cuprinde: caracterizarea mecanică a fețelor (solicitate la tracțiune), caracterizarea mecanică a miezului (solicitat la compresiune statică și dinamică) și caracterizarea întregii structuri (solicitată la încovoiere în trei puncte static și dinamic).

Caracterizarea mecanică a fețelor. Încercările de tracțiune au fost realizate pe mașina de încercat la tracțiune-compresiune Zwick/Roell 5kN, din dotarea Laboratorului „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara. Testele au fost realizate la temperatura ambiantă, materialul fețelor este tablă expandată de inox. S-a studiat influența direcției de așezare a fețelor și viteza de încărcare (2 mm/min și 30 mm/min). S-a observat că forța maximă la rupere pentru direcția B este aproximativ șase ori mai mare decât pentru direcția A, respectiv s-a constatat o creștere a proprietăților mecanice odată cu creșterea vitezei de încărcare.

Caracterizarea mecanică a miezului la compresiune. Încercările experimentale de compresiune statică au fost realizate pe mașina de încercat la tracțiune-compresiune Zwick/Roell 5kN, din dotarea Laboratorului „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara iar încercările experimentale de compresiune dinamică s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității Tehnice din Lublin, Polonia. Testele s-au realizat pe o mașină de încercat Instron-Dynatup.

Testele au fost efectuate pe direcția de creștere a spumei metalice de aluminiu la temperatura ambiantă, densitatea spumei metalice fiind de aproximativ $320 \pm 5 \text{ kg/m}^3$, epruvetele au fost de tip cub cu $l=17 \text{ mm}$, vitezele de încărcare fiind de 10 mm/min și 1 m/s. S-a observat o influență semnificativă a vitezei de încercare asupra tensiunii de curgere, tensiunea de curgere în regim dinamic fiind de aproximativ de două ori mai mare față de tensiunea de curgere în regim static.

Caracterizarea mecanică a structurii de tip sandwich. Testele de încovoiere în trei puncte pentru caracterizarea mecanică a structurii de tip sandwich, compusă din două fețe de tablă expandată de inox și miez din spumă metalică având compoziția AlSi10, s-au realizat atât

în regim static cât și dinamic. În cazul testelor efectuate în regim dinamic, pentru a evalua cât mai precis modul de degradare al structurii, a fost utilizat sistemul optic ARAMIS 2D.

Încercările experimentale de încovoiere statică în trei puncte au fost realizate pe mașina de încercat la tracțiune-compresiune Zwick/Roell 5kN din dotarea Laboratorului „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara. Testele realizate pe grinzile de tip sandwich au fost efectuate la temperatura ambiantă la o viteză de 10 mm/min. S-a studiat influența direcției de încărcare cât și distanța dintre reazeme ($l=100, 250$ și 400 mm). S-au ridicat experimental curbele forță-deplasare studiindu-se influența distanței dintre reazeme, observându-se o scădere a proprietăților odată cu creșterea distanței dintre reazeme. S-au determinat atât forța maximă cât și forța critică la rupere, aceasta din urmă fiind definită ca prima deviație pronunțată de la liniaritate din curba forță-deplasare. S-a constatat o influență a direcției de încărcare, valorile forței maxime și forței critice la rupere fiind semnificativ mai mari în favoarea direcției B de încărcare, rezultat oarecum așteptat deoarece în momentul caracterizării fețelor s-a observat că forța maximă la rupere pentru direcția B este aproximativ șase ori mai mare decât pentru direcția A.

Ca rezultat al prelucrării rezultatelor obținute în urma testelor au fost calculate tensiunile normale pentru miez, σ_c , respectiv fețe, σ_f , și ale tensiunii tangențiale pentru miez, τ_c , respectiv fețe, τ_f . S-a evidențiat influența distanței dintre reazeme, l , și a direcției de încărcare asupra tensiunii normale pentru miez, σ_c , respectiv fețe, σ_f , rezultând că tensiunea normală, σ , în fețe crește odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 27.5 MPa, pentru $l=100$ mm, până la valoarea de 62.5 MPa pentru $l=400$ mm, pentru direcția de încărcare A, iar pentru direcția de încărcare B crește de la valoarea de 32.8 MPa, pentru $l=100$ mm, până la valoarea de 70.2 MPa pentru $l=400$ mm, pe când în miez tensiunea normală are o valoare nesemnificativă. De asemenea se poate observa tensiunea normală, σ , în fețe pe direcția B este mai mare față de tensiunea normală, σ , în fețe pe direcția A.

S-a observat că pentru direcția A modul de degradare predominant care duce la cedarea structurii este cedarea feței, iar pentru direcția B modul de degradare predominant care duce la cedarea structurii este forfecarea miezului, pentru această direcție (B) prezentându-se detaliat mecanismul de degradare pe baza unei curbe forță-deplasare rezultată în urma încercărilor experimentale de încovoiere în trei puncte în regim static, observându-se că modul predominant de cedare a structurii este dat de forfecarea miezului.

Încercările experimentale de încovoiere dinamică în trei puncte au fost realizate în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității Tehnice din Lublin, Polonia. Testele s-au realizat pe o mașină de încercat Instron-Dynatup. Pentru a evalua cât mai precis modul de degradare al structurii, pe durata testului a fost utilizată o cameră de mare viteză pentru înregistrarea imaginilor care au fost analizate utilizând sistemul optic ARAMIS 2D. Testele au fost realizate la temperatura ambiantă, distanța dintre reazeme fiind de 250 mm, viteza de încărcare fiind de 2 m/s. S-a studiat influența direcției de încărcare, identic cu testele statice se observă că proprietățile mecanice sunt semnificativ mai mari pe direcția B de încărcare. De

asemenea s-a observat că și în cazul solicitării la încovoiere în trei puncte în regim dinamic, pe direcția B de încărcare, structura prezintă ca mod de degradare predominant forfecarea miezului.

În subcapitolul 4.4 s-a realizat o analiză experimentală și numerică a tuburilor metalice subțiri umplute cu spumă metalică. Încercările experimentale pentru studiul absorbției de energie al tuburilor metalice subțiri umplute cu spumă metalică au fost efectuate în Laboratorul „Ștefan Nădășan”, al Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara pe o mașină de încercări de tracțiune – compresiune LBG A009 de 100 kN. Testele au fost efectuate la temperatura ambiantă, materialul tubului fiind oțel inox iar spuma metalică compoziția S7, viteza de încercare fiind de 10 mm/min.

Epruvetele au fost realizate din aceeași structură pentru a respecta condițiile legate de procesul de fabricație (compoziție, dimensiuni), astfel din structura inițială (tub umplut cu spumă metalică) au fost realizate prin strunjire și celelalte epruvete (spuma metalică și tubul gol). În urma testelor experimentale s-a realizat un studiu al absorbției de energie al tuburilor metalice subțiri umplute cu spumă metalică, energia absorbită de structură este cu 20% mai mare față de suma energiilor obținute individual pentru tub și spuma metalică S7.

Analizele numerice au fost realizate în programul Abaqus/Explicit pentru lua în considerare caracteristicile neliniare ale deformațiilor, precum flambajul. În fiecare simulare condițiile pe contur ale modelului supus compresiunii au fost setate de către două plăci rigide de tip *Shell*, cea din partea de jos fiind încastrată iar cea din partea de sus având constrânse toate gradele de libertate în afară de deplasarea pe direcția Y. Deplasările și reacțiunile au fost obținute prin definirea punctelor de control al plăcilor rigide (superioare RP-1 și inferioare RP-2) ca seturi de înregistrare a datelor. Între modelul supus la compresiune și plăcile rigide s-a definit o interacțiune de tip Contact General (dinamic), stabilindu-se suprafețele pereche care interacționează și atribuindu-se un coeficient de frecare de 0.7.

Analiza numerică a spumei metalice S7. Respectând condițiile în care au fost efectuate încercările experimentale, modelul geometric utilizat în analiza numerică a fost cilindru cu diametru de 27.3 mm și înălțime de 24.5 mm. Discretizarea s-a făcut prin atribuirea a 30 de noduri distanțate egal pe lungimea cercurilor celor două baze. S-au folosit elemente solide de tip C3D8H discretizarea fiind realizată prin metoda *Sweep*.

Ca și model constitutiv s-a utilizat un model linear elastic-perfect plastic, cu un modul de elasticitate de 12000 MPa și un coeficient al lui Poisson de 0.35 și o densitate de $8,07 \cdot 10^{-7}$ tone/mm³. Pentru ecrusare s-a folosit modelul **Crushable Foam* implementat în Abaqus. În urma analizei curbei experimentale, s-a constatat că tensiunea de curgere este 22.8 MPa, acesta fiind punctul desemnat ca punct de inițiere a deformației plastice. Curba de plasticitate a fost definită scăzând din deformațiile curbei caracteristice valorile ultimei deformații considerate ca fiind elastice.

Analiza numerică a tubului metalic. Respectând condițiile în care au fost efectuate încercările experimentale, modelul geometric folosit în analiza numerică a tubului de oțel a constat dintr-un cilindru gol cu diametru exterior de 30 mm și diametru interior de 28 mm. Discretizarea s-a făcut prin atribuirea a 50 de noduri distanțate egal pe lungimea ambelor cercuri

(diametrul exterior și interior) ce constituie cele două baze. S-au folosit elemente solide de tip C3D8H discretizarea fiind realizată prin metoda *Sweep*. Ca și model constitutiv s-a utilizat un model elastic-perfect plastic, cu un modul de elasticitate (Young) de $2 \cdot 10^5$ MPa, un coeficient al lui Poisson de 0.3 și o densitate de $7.85 \cdot 10^{-6}$ tone/mm³. Ecrusarea fost modelată prin intermediul plasticității Von Mises și a ecrusării izotrope, curba introdusă fiind una tipică oțelurilor de uz general.

Analiza numerică a structurii formate din tubul de oțel și miez din spumă metalică. Modelul materialului structurii conține cele două modele prezentate anterior, păstrându-se discretizarea și modelele constitutive ale materialelor. Se poate observa o foarte bună corelare între rezultatele obținute prin analiza numerică și experiment.

Capitolul 5 intitulat *Concluzii. Contribuții personale* prezintă principalele concluzii contribuții ale autorului referitoare la studiul prezentat mai sus, se pot evidenția câteva dintre acestea:

- În primul capitol al lucrării s-a realizat o trecere în revistă a stadiului actual în caracterizarea mecanică a materialelor celulare metalice, prezentându-se pe scurt tehnologia de fabricare a spumelor, proprietățile, aplicațiile și avantajele utilizării spumelor metalice.
- S-a realizat identificarea tipului de spumă prin stabilirea compoziției, analiza microscopică și determinarea densității.
- Au fost identificate trei compoziții ale spumei metalice de aluminiu (M8, S7, G), toate prezentând o structură cu celule închise.
- S-au determinat proprietăților elastice (modulul de elasticitate longitudinal, E, modulul de elasticitate transversal, G, coeficientul de amortizare, Q^{-1} , Coeficientul lui Poisson, ν) utilizând metoda excitării prin impuls, o metodă de testare nedistructivă.
- S-a observat că densitatea se dovedește a fi un parametru important, valorile modulelor de elasticitate longitudinal (E) și transversal (G) cresc odată cu creșterea densității, pe când coeficientul de amortizare (Q^{-1}) scade odată cu creșterea densității.
- S-a realizat determinarea Coeficientului lui Poisson (ν) cu această metodă, ceea ce reprezintă un mare câștig, deoarece acest parametru este folosit aproape în toate calculele de proiectare și analiză numerică, s-a observat că nu are o valoare constantă, fiind dependent de structura spumei metalice studiate.
- S-au determinat proprietăților mecanice ale spumelor metalice în regim static la solicitarea de compresiune și încovoiere în trei puncte.
- La solicitarea de compresiune statică s-a analizat influența densității, influența temperaturii și influența învelișului asupra proprietăților mecanice pentru spuma metalică M8, constatându-se un comportament ductil al spumei metalice.

- S-a costatat că odată cu creșterea densității se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel densitatea are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune.
- S-a realizat un studiu pentru cinci temperaturi diferite: -20, 20, 100, 300 și 500°C, se poate observa că odată cu creșterea temperaturii se obține o scădere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel temperatura are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune. Influența cea mai importantă asupra caracteristicilor mecanice se poate observa după temperatura de 100°C, când are loc o scădere semnificativă a acestora.
- S-a observat că odată cu păstrarea învelișului se obține o creștere semnificativă a proprietăților mecanice, astfel învelișul are un rol semnificativ în comportamentul spumelor metalice la compresiune.
- La solicitarea de încovoiere în trei puncte s-a studiat influența învelișului asupra proprietăților mecanice pentru spuma metalică M8.
- S-a costatat că învelișul are un rol important asupra caracteristicilor mecanice determinate la solicitarea de încovoiere în trei puncte în regim static, astfel valoarea modului de elasticitate calculat la încovoiere în trei puncte pentru direcția de încărcare perpendiculară pe înveliș este de două ori mai mare față de valoarea modului de elasticitate calculat la încovoiere în trei puncte pentru direcția de încărcare paralelă pe înveliș.
- S-a realizat corelarea rezistenței la compresiune, σ_c , determinată la solicitarea de compresiune statică și dinamică calculată la 20% și 50 % din deformație.
- Au fost propuse și două relații privind corelarea rezistenței la compresiune, σ_c , determinată la solicitarea de compresiune statică și dinamică calculată la 20% și 50% din deformație.
- S-au efectuat teste de încovoiere în trei puncte atât în regim static cât și dinamic pentru caracterizarea mecanică a structurii de tip sandwich compusă din două fețe de tablă expandată de inox și miez din spumă metalică având compoziția. În cazul testelor efectuate în regim dinamic, pentru a evalua cât mai precis modul de degradare al structurii, a fost utilizat sistemul optic ARAMIS 2D.
- S-au determinat atât forța maximă cât și forța critică la rupere, aceasta din urmă fiind definită ca prima deviație pronunțată de la liniaritate din curba forță-deplasare.
- S-au determinat tensiunile normale și tangențiale atât din fețele cât și din miezul grinzii.

- S-a evidențiat influența distanței dintre reazeme, l , și a direcției de încărcare asupra tensiunii normale pentru miez, σ_c , respectiv fețe, σ_f . Se poate observa foarte ușor că tensiunea normală, σ_f , în fețe crește odată cu creșterea distanței dintre reazeme de la valoarea de 27.5 MPa, pentru $l=100$ mm, până la valoarea de 62.5 MPa pentru $l=400$ mm, pentru direcția de încărcare A, iar pentru direcția de încărcare B crește de la valoarea de 32.8 MPa, pentru $l=100$ mm, până la valoarea de 70.2 MPa pentru $l=400$ mm, pe când în miez tensiunea normală are o valoare nesemnificativă. De asemenea se poate observa tensiunea normală, σ_f , în fețe pe direcția B este mai mare față de tensiunea normală, σ_f , în fețe pe direcția A.
- S-a realizat un studiu al absorbției de energie al tuburilor metalice subțiri umplute cu spumă metalică, energia absorbită de structură este cu 20% mai mare față de suma energiilor obținute individual pentru tub și spuma metalică S7.
- S-a realizat o analiză numerică pentru întreaga structură, dar și individual pentru tub și spuma metalică S7. Au fost utilizate modele geometrice identice cu epruvetele utilizate în partea experimentală. Se poate observa o foarte bună corelare între rezultatele obținute prin analiza numerică și experiment.