

Contribuții la dezvoltarea structurilor din materiale celulare utilizate în echipamentele sportive

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor prof. Sorin Octavian SĂRĂNDAN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA

decembrie 2022

Teza de doctorat abordează problema dezvoltării de noi materiale bazate pe structuri celulare, denumite metamateriale, și propune utilizarea lor în fabricarea echipamentelor sportive, în particular a tălpilor de încălțăminte sportivă. Teza este structurată în șase capitole, prezentate în acest rezumat.

1. Introducere

În prima parte a introducerii este justificată alegerea temei de cercetare. În ultimele decenii, sportul profesionist a devenit o adevărată industrie susținută financiar prin semnificative programe de marketing.

Creșterea fără precedent a industriei sportului a atras dezvoltarea companiilor producătoare de echipament sportiv. Astfel, profiturile companiilor producătoare au crescut determinate de apariție retailer-ilor specializați, de accesibilitatea produselor susținută de creșterea nivelului de trai, de asociere brandurilor de echipament sportiv cu sportivii profesioniști de top etc.

În acest context, situațiile financiare excepționale au permis companiilor producătoare să aloce bugete însemnate către departamentele de cercetare și dezvoltare de noi produse. Principalele aspectele urmărite de activitățile de cercetare-dezvoltare sunt următoarele: reducerea masei echipamentelor sportive, respectiv personalizarea caracteristicilor elastice și mecanice ale acestora.

În această tendință, tema studiului constă, pe de o parte, în dezvoltarea de componente active cu densități reduse și caracteristici elastice și mecanice similare celor fabricate din materiale convenționale, iar pe de altă parte, în evaluarea posibilității de proiectare și fabricare individuală, cu determinarea comportamentului produsului.

În cea de-a doua parte a introducerii, studiul bibliografic stabilește principalele caracteristici ale echipamentelor sportive: protecția anumitor zone ale corpului, îmbunătățirea performanței individuale a sportivului și asigurarea stabilității și confortului sportivului [1]. Tendința este de înglobare de noi materiale în fabricația echipamentelor sportive, amintind EVA, PVC, poliuretan, materiale compozite și diverse combinații ale acestora [2, 3]. De asemenea, diferențierea în funcție de sport și de clasa de exerciții reprezintă o altă direcție de actualitate [4].

O categorie aparte de materiale utilizate în industria echipamentelor sportive este reprezentată de materialele celulare, în mod special cele polimerice sub formă de spume, cu bune proprietăți de amortizare și absorbția energiei cinetice la impact, înmagazinarea și returnarea parțială a acesteia [5]. În 2017 apare primul model de încălțăminte sportivă fabricat din structuri celulare printate, Adidas Futurecraft 4D. Este urmat de apariția macrostructurilor care utilizează așezarea celulelor și densitatea acestora pentru cea mai bună configurație care

să îmbunătățească performanțele. Modelul Enerzy Mizuno introduce prima spumă celulară compozită, EVA în combinație cu o zonă centrală din cauciuc. De curând, Adidas a introdus spumele de tip *boost*, granule din poliuretan termoplastic expandate pentru a realiza celule cu pereți închiși în jurul unor bule foarte mici de aer.

În ultima parte a introducerii sunt formulate obiectivele cercetării și sunt conturate etapele de parcurs pentru îndeplinirea acestor obiective. Teza de doctorat are drept scop dezvoltarea de noi echipamente sportive pe bază de structuri celulare care, pe de o parte, să posede proprietăți superioare față de echipamentele convenționale (fie proprietăți mecanice sporite la mase similare, fie mase reduse pentru performanțe similare), iar pe de altă parte, să poată fi modificate ușor în funcție de preferințele fiecărui sportiv. În atingerea acestui scop, au fost considerate o serie de etape de parcurs: investigarea proprietățile mecanice ale materialelor celulare utilizate în fabricarea echipamentelor sportive, precum și cele ale materialelor ce vor sta la baza structurilor proiectate; calibrarea modelelor constitutive cu scopul de a reproducere cât mai exact particularitățile acestei clase de materiale; investigarea mai multe tipuri de structuri de metamateriale, pentru selecția celor care vor fi implementate; modelarea structurilor selectate în scopul integrării lor în echipamente sportive; determinarea fezabilității utilizării de echipamente sportive fabricate din structuri de metamateriale pe baza rezultatelor analizelor numerice efectuate pe acestea și pe modele de referință, care au în componență materiale convenționale.

2. Caracterizarea mecanică a materialelor utilizate în fabricarea echipamentelor sportive

Ținând cont de caracteristicile spumelor flexibile și ale elastomerilor, o caracterizare exhaustivă a inclus testele monotone (tracțiune și compresiune), testele de lungă durată (relaxare), respectiv testele la solicitări ciclice.

Testele au fost efectuate pe două tipuri de epruvete, și anume, epruvete cilindrice de compresiune, respectiv epruvete de tip *dogbone* destinate încercărilor de tracțiune. Au fost testate două categorii de materiale: epruvete prelevate din cinci modele diferite de încălțăminte sportivă și epruvete fabricate prin prototipare rapidă din materialele TPU și Agil-U (figura 1).



Fig.1. Epruvete tip dogbone (a) prelevate din încălțăminte sportivă (b) fabricate prin prototipare rapidă

Testele statice de compresiune s-au efectuat în condițiile: viteza de deplasare a traversei de 10 mm/min, temperatura ambiantă. Materialele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă au prezentat un comportament neliniar similar, cu două regiuni distincte: o zonă mai compliantă, determinată de deformarea pereților celulei, și o zonă mai rigidă, caracterizată de colabarea celulei. La deformația specifică de 80%, valoarea medie a rezistenței mecanice a atins 1,93 MPa. Elastomerul TPU a prezentat o rigiditate semnificativ mai ridicată, decât cea determinată pentru Agil-U (figura 2). Rezistențele mecanice determinate sunt semnificativ mai mari pentru cei doi elastomeri, la o deformație specifică similară.

Testele statice de tracțiune s-au efectuat în condițiile: viteza de deplasare a traversei de 10 mm/min, temperatura ambiantă. Deformația epruvetelor s-a determinat utilizând metoda *mark tracking*. Curbele caracteristice tensiune-deformație specifică pentru materialele prelevate din tălpile încălțămintei sportive demonstrează un comportament ușor diferit pentru acestea, cu

o împrăștiere mai mare a rezultatelor (figura 3). Rezistența mecanică medie a atins nivelul 1,96 MPa, cu o deformație specifică medie la rupere egală cu 216,9 %



Fig.2. Curbele tensiune-deformație pentru testele de compresiune (a) epruvete prelevate din încălțămintea sportivă (b) elastomeri fabricați prin prototipare rapidă

Pentru cei doi elastomeri, pentru TPU testele au indicat o rezistență mecanică, egală cu 28,21 MPa, și o deformație specifică mai ridicate, ultima explicată de direcția de printare utilizată. Rezistența mecanică a materialului Agil-U este de aproximativ două ori mai mică, egală cu 0,80 MPa, dar deformația specifică este de același ordin de mărime cu cea determinată pentru materialele prelevate din tălpile de încălțăminte sportivă.





Fig.4. Variația modulului de relaxare normalizat e(t) pentru materialele investigate

Testele de relaxare s-au efectuat prin aplicarea unei solicitări de compresiune, pentru o deformație specifică de 25 %, menținută pentru o perioadă de timp egală cu 60 min. În figura 4 sunt prezentate comparativ variațiile modulului de relaxare normalizat e(t) pentru materialele investigate. Comportamentul este similar, elastomerul Agil-U prezentând cel mai redus modul de relaxare normalizat, iar spuma de talpă de încălțăminte sportivă cea mai ridicată valoare [6].

Încercările ciclice s-au efectuat în solicitare de compresiune pentru trei niveluri ale solicitării, definite prin deformația specifică egală cu 25%, 50% și 75%. Pentru fiecare nivel sau efectuat câte 50 de cicluri de solicitare la o frecvență de 0,5 Hz. Curbele tensiune-deformație descrise de testele monotone sunt tangente la curbele descrise de solicitările ciclice. Efectele viscoelastice sunt mai pronunțate la valori relativ mici ale tensiunii aplicate.

Analizând rezultatele testelor ciclice s-a concluzionat că materialele investigate prezintă cele trei caracteristici specifice efectului Mullins: o scădere treptată a rigidității cauzată de solicitări ciclice multiple în aceleași intervale de tensiuni, reluarea traseului descris de un test monoton după ce s-a depășit valoarea maximă a tensiunii determinate în ciclurile anterioare și o buclă de histerezis descrisă în timpul descărcărilor [7, 8].

3. Calibrarea modelelor de material visco-hiperelastic

În prima parte a capitolului au fost prezentate modelele matematice utilizate în simularea comportamentului materialelor hiperelastice și a spumelor flexibile. Deși prezintă caracteristici similare în timpul deformației, principala diferență dintre aceste două clase de materiale este dată de variația volumului în timpul deformației. Materialele hiperelastice, precum cauciucul, prezintă deformații volumice foarte mici în timpul solicitărilor (fiind considerate incompresibile în unele aplicații), pe când spumele flexibile prezintă deformații volumice foarte mari în timpul solicitărilor, coeficientul lui Poisson prezentând valori foarte mici (aproape de 0 pentru anumite tipuri de spume flexibile).

Spre diferență de materialele convenționale (precum metalele, ceramicele și unii polimeri), care prezintă o variație liniară a tensiunii cu deformația în prima parte a solicitărilor (comportament fiind modelat prin intermediul legii lui Hooke), analiza rezultatelor experimentale a expus faptul că materialele hiperelastice și spumele flexibile prezintă o curbă caracteristică neliniară. Pentru aceste clase de materiale, modelarea comportamentului mecanic implică o abordare diferită, implicând energia specifică de deformație (potențialul elastic al materialului). Astfel, tensiunea determinată de o anumită deformație se obține prin derivarea energiei specifice în raport cu deformația.

Variația energiei specifice cu deformația se determină din datele experimentale, prin integrarea valorilor tensiunii în raport cu deformația. De-a lungul anilor, s-au dezvoltat mai multe modele matematice (numite și funcții hiperelastice) de exprimare a variației energiei specifice cu deformația sau cu alte mărimi convenționale utilizate în cuantificarea modificării dimensiunilor corpurilor (precum extensiile specifice). Calibrarea acestor modele implică determinarea constantelor de material prezente în aceste funcții pe baza datelor experimentale, astfel încât variația analitică a energiei specifice cu deformația să se apropie cât mai mult de variația experimentală. Drept exemple de astfel de modele pentru materialele hiperelastice s-ar putea aminti funcția polinomială (relația 3.1) și funcția Ogden (relația 3.2). Pentru spumele flexibile modelul utilizat în simularea comportamentului spumelor este funcția Ogden modificată cu un element care să țină cont de deformațiile volumice (relația 3.3), [9].

$$\psi = \sum_{i+j=1}^{n} C_{ij} (I_{\lambda} - 3)^{i} (II_{\lambda} - 3)^{j} + \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{D_{k}} (J - 1)^{2k}$$
(3.1)

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 \right]$$
(3.2)

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left\{ \hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} \left[(J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right] \right\}$$
(3.3)

Modelarea comportamentului acestor materiale la solicitări ciclice presupune diminuarea răspunsului elastic instantaneu al materialului pe regiunea de descărcare, generând astfel un fenomen de histerezis. Una dintre cele mai utilizate formulări este Ogden-Roxburgh, care implică înmulțirea energiei specifice de deformație cu un factor ce ține cont de valoarea maximă a energiei specifice înregistrate în timpul solicitărilor anterioare și trei constante de material (relația 3.4), [10].

$$\begin{cases} \psi = \eta \Psi, \ \eta \in (0, 1] \\ \eta(\Psi) = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf}\left(\frac{\Psi^{max} - \Psi}{m + \beta \cdot \Psi^{max}}\right) \end{cases}$$
(3.4)

Efectul solicitărilor de lungă durată asupra comportamentului mecanic al materialelor se poate modela prin mai multe abordări, bazate pe principiul lui Boltzmann (principiul superpoziției), legi de fluaj sau modele reologice. Formularea utilizată în acest studiu a fost bazată pe modelul reologic Kelvin-Voigt generalizat, exprimat matematic prin seria Prony (relația 3.5). Acest model exprimă modulul de elasticitate normalizat ca o funcție de timp și de un număr de constante de material. Principiul modelării fenomenelor viscoelastice este similar cu cel utilizat în solicitările ciclice, și anume, în timpul solicitărilor, răspunsul elastic instantaneu al materialului este diminuat prin intermediul coeficientului adimensional determinat de seria Prony, [11].

$$e(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N} e_i \left(1 - e^{-t/\tau_i} \right)$$
(3.5)

Calibrarea modelelor de materiale a constat într-un proces iterativ, datorită faptului că în calibrarea funcțiilor hiperelastice este nevoie de răspunsul teoretic instantaneu al materialului (curba tensiune-deformație determinată de o viteză de deformație infinită). Astfel, în primă fază, modelele hiperelastice au fost evaluate pentru datele experimentale obținute la solicitări de compresiune la viteze de deformație relativ mici, iar testele de relaxare au fost utilizate în calibrarea seriilor Prony. Datorită efectelor viscoelastice cauzate de modelul reologic, analizele numerice pentru solicitări de compresiune utilizând cele două formulări au determinat valori mai scăzute ale tensiunii pentru aceleași deformații, în comparație cu rezultatele experimentale. Astfel, în a doua iterație de calibrare, coeficienții funcțiilor hiperelastice au fost determinați pe baza răspunsului teoretic instantaneu al materialelor, estimat din înmulțirea valorilor tensiunilor obținute experimental cu un factor determinat din raportul valorilor experimentale ale tensiunilor la valorile obținute din analizele numerice.

A doua parte a capitolului a detaliat procedurile de calibrare ale modelelor de material utilizate în simularea spumelor flexibile utilizate la fabricarea tălpilor de încălțăminte sportivă. Modelul final de material a fost evaluat prin replicarea testelor de relaxare, care au cuprins o regiune de încărcare și o regiune de menținere a deformației, obținându-se rezultate foarte bune (Figura 5a).



Figura 5. Comparație între rezultatele numerice și experimentale ale testelor de relaxare pentru spume flexibile (a), Agil-U (b), respectiv TPU (c).

În a treia parte a capitolului au fost descrise metodele de calibrare pentru elastomerii fabricați prin prototipare rapidă, utilizând aceleași proceduri descrise anterior. Și în acest caz, rezultatele obținute în urma evaluării modelelor de materiale pentru testele de relaxare au determinat rezultate exacte (Figura 5b și 5c).

4. Selecția de structuri de metamateriale destinate aplicațiilor din domeniul sportului

Metamaterialele reprezintă structuri periodice (tesalate) cu geometrii bine definite, care au proprietăți superioare spumelor de densități similare [12, 13]. Diversele structuri de metamateriale se grupează în două mari categorii, și anume, structuri întâlnite în natură, respectiv structuri antropogene [14-16]. Din prima categorie fac parte structurile cu celule cubice bazate pe rețelele cristaline (structura cubică cu fețe centrate, structura cubică cu volum centrat, structura cristalină a diamantului), iar din cea de-a doua categorie cele mai cunoscute sunt structura Kagome, structura Kelvin și structura de tip grindă octet.

Pentru aplicațiile din domeniul echipamentelor sportive s-au selectat patru tipuri de structuri pentru a fi investigate: structura bazată pe sistemul cristalin cubic diamantat, structura de grinzi octet, structura Kagome și structura Kelvin (figura 6). Elementul de volum reprezentativ s-a fost considerat compus din $2 \times 2 \times 2$ celule, cu excepția structurii Kagome unde s-au alăturat $3 \times 4 \times 2$ celule.



Fig.6. Celulele structurilor de metamateriale investigate (a) structura bazat pe sistemul cristalin cubic diamantat (b) structura de grinzi octet (c) structura Kagome (d) structura Kelvin

În prima etapă au fost dezvoltate modelele geometrice pentru cele patru structuri, încorporând racorduri între grinzi, cu scopul reducerii fenomenului de concentrare a tensiunilor [17]. Dimensiunile caracteristice (diametrul grinzilor d, lungimea grinzilor l și raza de racord) au fost parametrizate, permițându-se obținerea de densități relative diferite prin modificarea unor valori.

În cea de-a doua etapă, s-a determinat variația densității relative a structurilor cu raportul d/l. Influența razei de racord a fost eliminată prin considerarea razei maxime care determină o geometrie validă. Variația densității relative cu parametrul d/l a fost exprimată prin intermediul funcției polinomiale de forma $\rho_{rel} = f(d/l)$, raportul dintre diametrul și lungimea grinzilor fiind obținut pentru valori prestabilite ale densității relative, și anume $\rho_{rel} = 0,04; 0,06; 0,08 \dots 0,18; 0,2$. În scopul determinării variației razei de racord și a densității relative cu raportul d/l, lungimea grinzil a fost păstrată constantă, diametrului fiindu-i atribuite valori prestabilite.

În cea de-a treia etapă, structurile au fost supuse unor analize numerice în pachetul software Abaqus/CAE pentru solicitări de compresiune.

În analizele numerice, s-a utilizat pentru material o formulare liniar-elastică și plasticitate caracterizată de ecruisare multi-liniară izotropă. Discretizările s-au efectuat cu elemente tetraedrice C3D10 de ordinul doi, cu un minim de trei elemente finite pe secțiunea grinzilor. Structurilor le-au fost aplicate condiții pe contur periodice, cu solicitarea de

compresiune materializată prin aplicarea unei deplasări. Din deplasările și reacțiunile nodurilor înregistrate s-au calculat deformațiile și tensiunile nominale.

În final, s-a reprezentat variația rigidității relative, respectiv a rezistenței relative, cu densitatea relativă (figura 7) și curbele tensiune-deformație (figura 8).



Fig.7. Variația în funcție de densitatea relativă a rigidității relative (a) și a rezistenței relative (b)

Deoarece au demonstrat proprietăți superioare și o capacitate mai ridicată de absorbție a energiei, structurile de tip Kagome și Kelvin au fost selectate pentru implementarea în echipamentele sportive.



Fig.8. Curbele tensiune-deformație ale celor patru structuri pentru densitatea relativă egală cu 0,12

5. Implementarea noilor materiale în echipamente sportive

În scopul evaluării performanțelor noilor modele geometrice de tălpi de încălțăminte sportivă, în prima etapă a fost efectuată o analiză de referință pe o talpă cu proprietăți similare cu cele ale spumelor investigate în capitolul al doilea. Modelul tălpii a fost accesat de pe platforma GrabCAD (figura 9).



Fig.9. Modelul CAD al tălpii de încălțăminte sportivă



Fig.10. Modelul CAD al tălpii de încălțăminte sportivă

Ansamblul considerat în analiza numerică este reprezentat dintr-un indentor rigid, un suport rigid și talpa. Rolul indentorului este de a simula efectul unui călcâi uman în timpul mersului, iar suportul de a materializa contactul cu solul, Figura 10, [18].

Modelul de material utilizat pentru talpă a constat dintr-o formulare matematică pentru spumele flexibile (*Hyperfoam*), un model de relaxare și un model pentru efectul Mullins.

Discretizarea indentorului și a suportului s-a efectuat cu elemente finite rigide de tipul R3D4, utilizând o tehnică liberă de discretizare. Pentru talpă discretizarea s-a efectuat cu elemente finite C3D10 de ordinul al doilea.

Pentru contactul dintre componentele ansamblului s-au utilizat o formulare normală de tipul "contact tare" și o formulare tangențială, cu coeficientul de frecare de 0,2.

Condițiile pe contur s-au impus prin încastrarea indentorului și atribuirea unei deplasări pe verticală pentru placa rigidă după o amplitudine de tip triunghi, pentru a simula o încărcaredescărcare. Condiția de inversare a sensului de deplasare a suportului a fost atingerea unei valori a reacțiunii de 1000 (N).

Starea de tensiune și deformație, alături de curba forță-deplasare, reprezintă datele extrase din analizele numerice. Rezultatele sunt în concordanță cu cele raportate în literatura tehnică [19].

Pentru tălpile de încălțăminte sportivă proiectate pe baza structurilor Kagome și Kelvin au fost efectuate analize numerice cu metoda elementului finit în condiții similare (aceleași interacțiuni, condiții pe contur, discretizări ale componentelor rigide etc.). S-au atribuit proprietăți de material caracteristice poliuretanul termoplastic TPU. Modelul geometric al tălpii a fost generat, utilizând un negativ al acesteia, printr-o operație booleană de eliminare din structura de metamateriale a regiunilor care intră în contact cu modelul negativului.

Modelul inițial bazat pe structurile de metamateriale a fost generat astfel încât masa sa să fie egală cu a modelului de referință (materialul atribuit fiind EVA). Modelele generate din structurile de metamateriale au determinat rigidități mai ridicate cu un anumit factor k, specific fiecărei structuri.

Cu scopul obținerii unor rezultate similare modelului de referință, s-a impus o reducere a proprietăților elastice ale tălpilor pe bază de structuri de metamateriale. Astfel, s-a redus rigiditatea relativă cu factorul k, s-a calculat densitatea relativă pentru valoarea impusă a rigidității relative, iar în final s-a determinat valoarea raportului geometric d/l corespunzător structurii actualizate. Au rezultat modele geometrice cu masa redusă, 50,7 gr. pentru structura Kelvin și 30,16 gr. pentru structura Kagome, prin comparație cu modelul de referință (EVA), a cărui masă a fost egală cu 50,7 gr.



Fig.11. Prezentarea comparativă a curbelor forță-deplasare pentru modelul de referință (EVA) și modelul pe bază de structură Kelvin (a) și modelul pe bază de structură Kagome (b)

Din fig. 11a că, deși în timpul încărcării au o pantă similară, talpa pe bază de structură Kelvin determină reacțiuni mai mari pentru aceleași deformații, deoarece talpa fabricată din spuma EVA prezintă o regiune de așezare la începutul solicitării. Totodată, talpa bazată pe structura Kelvin prezintă o buclă de histerezis mai pronunțată, efectele viscoleastice determinând revenirea elastică completă (reacțiune nulă) la o deplasare de aproximativ 1,5 mm.

În fig. 11b se prezintă comparația dintre curba forță-deplasare a modelului de referință (EVA) și cea a modelului actualizat generat din structura Kagome. Comportamentul acestui model de talpă prezintă anumite asemănări cu modelul actualizat al tălpii bazate pe structura Kelvin. Deși în parte a solicitării, panta curbei determinate de modelul de referință și cea a modelului bazat pe structura Kagome sunt asemănătoare, cea din urmă determină reacțiuni mai mari pentru aceeași valoare a deplasării. Observația este explicată de regiunea de așezare a modelului de referință. Se constată apariția unei regiuni de palier mult mai pronunțat în cazul tălpii bazată pe structura Kagome, comportamentul fiind determinat de flambajului grinzilor. Ultima regiune a curbei forță-deplasare determină o creștere progresivă a rigidității structurii, explicată de intrarea în contact a grinzilor, nivel considerat drept debutul regiunii de densificare.

Efectele viscoelastice sunt asemănătoare pentru cele două tipuri de structuri, curbele de histerezis prezentând forme similare. Revenirea completă a ambelor structuri, corespunzătoare valorii nule a reacțiunii la retragere, se înregistrează la atingerea unei deplasări de 1,5 mm.

Se poate concluziona că, deși posedă o masă mai mare, structura de tip Kelvin determină rezultate mai bune decât structura de tip Kagome, datorită uniformității răspunsului la solicitarea de compresiune. Astfel, în timpul utilizării, comportamentul tălpii generată pe structura Kelvin este mult mai previzibil. Pentru talpa generată din structura Kagome modificarea bruscă a rigidității ar putea cauza un disconfort sportivului.

6. Concluzii și contribuții personale

Teza de doctorat aduce numeroase elemente originale în domeniul investigat, fabricarea echipamentelor sportive pe baza unor materiale avansate.

În cadrul programului experimental, principalele contribuții ale autorului se referă la determinarea comportamentului mecanic al diverselor tipuri de materiale celulare utilizate în fabricarea încălțămintei sportive și a echipamentelor de protecție. Pe lângă evidențierea caracteristicilor determinate în testele de compresiune și tracțiune uniaxială monotonă, determinarea comportamentul la solicitări ciclice și la solicitări de lungă durată pentru aceste tipuri de materiale reprezintă o contribuție importantă. Totodată, determinarea proprietăților mecanice ale elastomerilor obținuți prin prototipare rapidă reprezintă un subiect de interes, ținând cont de proporția tot mai ridicată a aplicațiilor componentelor fabricate prin aceste tehnologii.

Calibrarea modelelor de materiale virtuale evidențiază câteva contribuții personale, și anume: suprapunerea diverselor modele constitutive, hiperelasticitate/spume flexibile cu seriile Prony și modelul Ogden-Roxburgh; replicarea solicitărilor monotone, ciclice și de lungă durată, cu rezultate de mare acuratețe.

Selecția structurilor optime a avut la baza analiza unor structuri descrise în literatura de specialitate. Principalele contribuții personale sunt reprezentate de determinarea variației razelor maxime de racord cu parametrii dimensionali, respectiv variația densității relative cu parametrii geometrici. Un alt element de noutate este reprezentat de analiza numerică a structurilor utilizând o formulare elastic-plastică a materialului de bază. S-a obținut variația rigidității relative și a rezistenței mecanice relative cu densitățile relative, ținând cont de stările complexe de solicitare care apar ca urmare a deformațiilor plastice.

Principala contribuție a studiului îl reprezintă generarea de componente pe bază de structuri de metamateriale și evaluarea numerică a comportamentului mecanic pentru solicitări similare cu cele observate în timpul utilizării. Analizele efectuate au evidențiat superioritatea noilor componente prin comparație cu cele convenționale, rezultând oportunități de dezvoltare pentru noi produse.

Bibliografie

[1] T.G. McPoil, "Athletic Footwear: design, performance and selection issue", *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3 (3), pp. 260-267, 2000.

[2] J. Indesteege, R.E. Camargo, P.W. Mackey, G. Bagaglio, A. Dent, "Considerations on the selection of polyurethane systems for midsole wedges in athletic footwear application", *Journal of Cellular Plastics*, 34 (4), pp. 329-348, 1998.

[3] Y. Shimazaki, S. Nozu, T. Inoue "Shock-absorption properties of functionally graded EVA laminates for footwear design", *Polymer Testing*, 54, pp. 98-103, 2016.

[4] S.I. Subotnick, C. King, M. Vartivarian, C. Klaisri "Evolution of Athletic Footwear", pp. 3-17, in: *Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine*, Ed. M.B. Werd, E.L. Knight, Springer, 2010.

[5] L. Gibson, M. Ashby, *Cellular Solids. Structure and Properties*, Cambridge University Press 2nd ed., UK, 1997.

[6] S. Boedicker, S. Hunter, P. Klesmith, T. Nearn, P. Spreen "Mechanical properties testing of running shoes", *Journal of Undergraduate Materials Research*, 4 (1), pp. 34-38, 2010.

[7] S. Cantournet, D. Desmorat, J. Besson, "Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model", *International Journal of Solids and Structures*, 46, pp. 2255-2264, 2009.

[8] A. Drozdov, N. Düşünceli, "Mullins-type phenomena in polypropilene", *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 8 (11), pp. 82-98, 2012.

[9] H. Brinson, L. Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*, Springer Science, 2008.

[10] R.W. Ogden, D,G. Roxburgh, "A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber", *Proceedings of the Royal Society of London A*, 455, pp. 2861-2877, 1988.

[11] D. Bower, An Introduction to Polymer Physics, Cambridge University Press, 2002.

[12] X. Zheng, H. Lee, T.H. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E.B. Duoss, J.D. Kuntz, M. M. Biener, Q. Ge, J.A. Jackson, S.O. Kucheyev, N.X. Fang, C.M. Spadaccini "Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials", *Science*, 344 (6190), pp. 1373-1377, 2014.

[13] R.S: Kshetrimayum, "A brief intro to metamaterials", *IEEE Potentials*, 23 (5), pp. 44-46, 2004.

[14] M. Eidini, "Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials", *Extreme Mechanics Letters*, 6, pp. 96-102, 2016.

[15] N. Engheta, R.W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-IEEE Press, 2006.

[16] K. Wang, Y.H. Chang, Y.W. Chen, C. Zhang, B. Wang "Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing", *Materials and Design*, 67, pp. 159-164, 2015.
[17] D. Şerban, R. Negru, S. Sărăndan, G. Belgiu, L. Marşavina "Numerical and experimental investigations on the mechanical properties of cellular structures with open Kelvin cells", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28 (13), pp. 1367-1376, 2021.

[18] S. Schwanitz, S. Möser, S. Odenwald, "Comparison of test methods to quantify shock attenuating properties of athletic footwear", *Procedia Engineering*, 2, pp. 2805-2810, 2010.

[19] R. Verdejo, N. Mills, "Performance of EVA foam in running shoes", in: S. Ujihashi, S.J. Haake (eds.), *The Engineering of Sport 4*, pp. 580-587, Blackwell, 2002.