

EXPRIMĂRI COMPARATIVE PRIVIND EVALUAREA TENSIUNILOR MAXIME DIN COMPOZITELE ARMATE CU FIBRE LUNGI

COMPARATIVE EXPRESSIONS REGARDING THE EVALUATION OF MAXIMUM STRESSES IN LONG FIBER REINFORCED COMPOSITES

RADU I. IATAN¹, NICOLETA SPOREA¹, CARMEN T. POPA³, LUMINIȚA
GEORGIANA ENĂCHESCU¹, COSMIN CIOCOIU¹, MELANIA CORLECIUC
(MITUCĂ)⁴, ANDREEA - SILVIA NIȚU²

¹ „Politehnica” University of Bucharest, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics,
Spl. Independenței Street, 313, Bucharest, Romania

² Ministry of the Environment, Romania

³ University “Valahia” of Târgoviște

⁴ National Agency for Environmental Protection, Romania

Rezumat.

Prezentul articol se înscrie în domeniul preocupărilor actuale privind cercetarea științifică și tehnică referitoare la construcțiile practice realizate din materiale compozite, cu performanțe deosebite remarcate în practica industrială. În acest caz studiul se caracterizează prin analiza solicitării maxime a unor compozite: a) cu fibre solicitate în lungul lor, b) după o direcție oarecare c) una perpendiculară, d) stabilitatea structurii în lungul fibrelor, e) în direcție perpendiculară sau f) o solicitare combinată.

Cuvinte cheie: compozite armate, fibre lungi, capacitate portantă

Abstract.

This paper is in line with current concerns regarding scientific and technical research on practical constructions made of composite materials, with outstanding performance noted in industrial practice. In this case the study is characterized by the analysis of the maximum stresses of some composites: a) with fibers required along them, b) after a certain direction c) a perpendicular, d) stability of the structure along the fibers, in a perpendicular direction or a combined stress.

Keywords: reinforced composite, long fibers, bearing capacity

1. INTRODUCERE

Dezvoltarea permanentă a civilizației umane, atât numerică cât și a preferințelor vieții, a impus continuu găsirea a noi bunuri de consum, cu un grad tot mai ridicat de complexitate. Acest lucru nu se poate realiza fără construirea unor echipamente industriale performante din punctul de vedere al prelucrării substanțelor necesare, în condiții destul de dificile din punctul de vedere al atacului chimic, mecanic și termic, singular sau combinate. Această stare a impus cercetătorilor din domeniul proceselor tehnologice chimice, dar și al construcției echipamentelor mecanice specifice și al tehnologiilor de fabricare, să găsească soluții tehnice optime din punct de vedere economic și tehnic. Materialele clasice, naturale, limitate cantitativ, sau pentru a căror fabricare este necesar un consum ridicat de energie, sunt înlocuite din ce în ce mai mult cu materiale compozite. Astfel, aceste materiale au fost numite “**materiale compozite**”, “**materialele viitorului**”, “**materiale din generația a doua**”, respectiv “**materiale din generația a treia**”.

Trebuie remarcat faptul că astfel de materiale au o structură în care componentele își păstrează identitățile, chiar și după procesul de formare.

Literatura de specialitate a acordat mare atenție pentru alcătuirea și calculul necesar proiectării de structuri mecanice din astfel de materiale [1 – 22, 66]. Existența pe piață a unui număr tot mai mare de structuri compozite implică dificultatea de a alege combinația optimă pentru obținerea unui stratificat apt care să satisfacă cerințele dorite, atât tehnice, cât și economice. În prezent, industria este acaparată de “*sindromul minimizării*” maselor structurilor mecanice [21], cu reacții în lanț pe toate treptele conceperii, fabricării și utilizării produselor, pentru a realiza componente finite mai ușoare, consumuri mai mici de combustibili și energie, încărcătură utilă sau autonomie mai mare (în transporturi, de exemplu), durată de serviciu cât mai îndelungată, combinată cu cheltuieli de producție și de exploatare mai mici, poluare redusă a mediului exterior. Una dintre caracteristicile cele mai avantajoase ale unui material compozit este flexibilitatea / adaptabilitatea în proiectare, ceea ce permite inginerului modelarea acestuia în forma structurală și arhitecturală, obținând cea mai bună performanță. În general, structurile compozite sunt fabricate, de regulă, prin dispunerea fibrelor de armare în mod predeterminat. Straturile individuale sunt astfel organizate încât fibrele de armare, existente în matrice, sunt fie paralele, fie încrucișate, fie sub formă de țesătură, cu dispunere egală pentru urzeală și bătătură (acestea asigurând rezistența și rigiditatea structurii). Nu sunt neglijate și structuri cu fibre tocate, dispuse la întâmplare, în masa matricei (cu ajutorul unui pistol special).

Această stare atrage după sine investiții tot mai mari pentru cercetări teoretice și experimentale, cu o aparatură de mare performanță. Activitățile desfășurate pe parcursul timpului au adus rezultate foarte importante pentru atingerea performanțelor dorite ale structurilor realizate [23 – 37]. Caracteristicile fizico-elastice și mecanice ale materialului compozit pot fi estimate plecând de la caracteristicile individuale ale fiecăruia dintre constituenți (regula amestecului [9]). Valorile acestor caracteristici, pentru o structură dată, se determină prin încercări pe epruvete (cu geometrie bine precizată) decupate din aceeași structură, supuse la solicitări simple [24].

Materialele compozite și-au găsit utilizare în domeniul construcțiilor auto, construcții aero-spațiale, al ambarcațiunilor sportive, echipamentelor sub presiune, izolarea fonică și termică, tratarea apelor impurificate etc. [38 – 55, 66]. Pentru performanță în domeniile menționate este necesară o analiză atentă a comportării intime între matrice și materialul de armare, fibre longitudinale simple sau țesute, respectiv particule individuale sau tocătură. Un studiu în acest sens se referă la situația în care matricea are lungiri superioare celor ale fibrelor, dar și starea când materialul matricei are lungiri maxime inferioare celor ale fibrelor – articolul de față.

Prezentul articol, luând în considerare comportarea legăturii dintre matricea compozitului și elementele de armare, prezintă unele variante de analiză privind capacitatea portantă (starea maximă de tensiuni) a structurilor compozite armate cu fibre lungi.

2. MATRICE DIN MATERIALE CU LUNGIRI MAXIME INFERIOARE CELOR ALE FIBRELOR (MATRICE POLIMERICĂ SAU METALICĂ)

Notă: Se consideră aceeași deformație elastică pentru ambele componente ale compozitului (în ipoteza unui contact excelent între materialul matricei și fibre).

Exprimări comparative privind evaluarea tensiunilor maxime din
compozitele armate cu fibre lungi

În această categorie se înscriu compozitele refractare a căror distrugere este influențată de lungirea materialului matricei. Pentru un contact perfect între fibre și matrice, se poate folosi egalitatea [56, 57]:

$$\left(\sigma_{f m}\right)_M = E_f \cdot \left(\varepsilon_{t m}\right)_M, \quad (1)$$

în care se regăsesc $\left(\sigma_{f m}\right)_M$ - rezistența admisibilă la întindere a fibrelor; $\left(\varepsilon_{t m}\right)_M$ - deformația specifică maximă a materialului matricei; E_f - modulul de elasticitate longitudinală a materialului fibrelor (evaluat pe baza teoriei amestecului [6, 21, 56]).

Lucrarea [45 – cap. 15], referindu-se la structuri din beton armat cu fire din oțel, indică următoarea relație pentru evaluarea rezistenței de rupere:

$$\sigma_{c r} = A \cdot \sigma_m \cdot (1 - p_{v f}) + B \cdot \sigma_f \cdot (l_f / d_f), \quad (2)$$

care poate fi valorificată pentru compararea cu rezistența minimă, când începe deteriorarea cimentului:

$$\left(\sigma_{c r}\right)_m = A \cdot \sigma_{m r} \cdot (1 - p_{v f}) + B \cdot \sigma_f \cdot (l_f / d_f), \quad (3)$$

respectiv rezistența maximă $\left(\sigma_{c r}\right)_M$, caz în care se rup toate firele metalice din conținut:

$$\left(\sigma_{c r}\right)_M = A \cdot \sigma_{m r} \cdot (1 - p_{v f}) + B \cdot \sigma_{f r} \cdot (l_f / d_f), \quad (4)$$

unde se remarcă: A, B – constante stabilite pe cale experimentală; $\sigma_m, \sigma_{m r}$ – rezistența cimentului, respectiv valoarea de rupere; $p_{v f}$ – procentul ocupat de fibre în structura compozitului; l_f, d_f – lungimea și diametrul fibrelor / firelor din oțel; $\sigma_f, \sigma_{f r}$ – rezistența curentă și rezistența de rupere a firelor.

Notă: Din analiza expresiilor anterioare se constată că cel mai bun compozit este cel cu fibre al căror modul de elasticitate longitudinală are valoarea cea mai mare.

Lucrarea [58] atrage atenția asupra unei caracteristici foarte importante a unui compozit cu fibre de sticlă pentru armare și anume cel al uniformității / neuniformității amestecului. Pentru o astfel de structură, rezistența de rupere a compozitului $\sigma_{c r}^*$, pentru o porțiune din compozit, poate fi evaluată cu relația [58]:

$$\sigma_{c r}^* = \sigma_f \cdot \left[\alpha_d \cdot p_{v f} + p_{v m} \cdot \left(E_m / E_f \right) \right], \quad (5)$$

unde coeficientul de participare a fibrelor de sticlă $\alpha_d \in [0, 1]$; E_m, E_f – modulul de elasticitate longitudinală a materialului matricei, respectiv cel al fibrelor; $p_{v m}$ – procentul ocupat de matrice în structura compozitului;

Gradul de uniformitate / neuniformitate al repartizării fibrelor c_n , pe o anumită lungime a compozitului se poate stabili cu expresia:

$$c_n = \left(\sigma_{c r}^* / \sigma_f \right) \cdot \left[E_f / \left(\alpha_d \cdot p_{v f} \cdot E_f + p_{v m} \cdot E_m \right) \right], \quad (6)$$

sau sub o altă formă:

$$c_n = \frac{\left[\alpha_d \cdot p_{v f} \cdot (\gamma_{f m} + 0,5) + 0,5 \right] \cdot \left[1 + \gamma_{f m} \cdot p_{v f} \cdot (\alpha_d + \beta_l - \alpha_d \cdot \beta_l) \right]}{\left(\alpha_d \cdot \gamma_{f m} \cdot p_{v f} + 1 \right) \cdot (\gamma_{f m} \cdot p_{v f} + 1)}, \quad (7)$$

în care se regăsește factorul de ajustare a procentului de fibre de sticlă în amestec $\gamma_{f m}$, pe lungimea de analiză, dependent de valorile modulelor de elasticitate longitudinală ale fibrelor și matricei, respectiv :

$$\beta_l = l / l_0; \quad \gamma_{f m} = \left(E_f / E_m \right) - 1, \quad (8)$$

unde l reprezintă lungimea decupată din lungimea totală a compozitului analizat, l_0 .

3. SOLICITAREA MAXIMĂ ADMISĂ LA ÎNTINDERE, DUPĂ O DIRECȚIE OARECARE, RAPORTATĂ LA ORIENTAREA FIBRELOR LUNGI

Rezistența de rupere $(\sigma_c^\theta)_{x m a x}$, pentru *o direcție oarecare* θ , raportată la orientarea fibrelor, poate fi evaluată cu relația [9, 16, 59, 60]:

$$(\sigma_c^\theta)_{x m a x} = \frac{1}{\frac{(\cos \theta)^4}{(\sigma_c)_{x m a x}} + \frac{(\sin \theta)^4}{(\sigma_c)_{y m a x}} + (\cos \theta)^2 \cdot (\sin \theta)^2 \cdot \left[\frac{1}{\tau_{f R}^2} + \frac{1}{(\sigma_c)_{x m a x}^2} \right]}, \quad (9)$$

în care se află x, y - direcția fibrelor, respectiv direcția perpendiculară pe fibre; $(\sigma_c)_{x m a x}$, $(\sigma_c)_{y m a x}$ - tensiunile normale maxime în lungul axelor x și y ; $\tau_{f R}$ - tensiunea de rupere prin forfecare în planul fibrelor.

4. SOLICITAREA MAXIMA ADMISĂ LA ÎNTINDERE PE O DIRECȚIE PERPENDICULARĂ PE FIBRE

Tensiunea limită de elasticitate a compozitului, $(\sigma_c^{t r})_{x M}$, fibrele și matricea având un comportament liniar, poate fi stabilită cu egalitatea [1, 6, 12]:

Exprimări comparative privind evaluarea tensiunilor maxime din
compozitele armate cu fibre lungi

$$\left(\sigma_c^{tr}\right)_{xM} = \left(\sigma_m\right)_{el} \left[\left(E_c\right)_{tr} / E_m \right] \cdot \left(1 - \sqrt[3]{p_{vf}}\right), \quad (10)$$

în care $\left(E_c\right)_{tr}$ – limita de elasticitate transversală / normală pe lungimea fibrelor.

Lungirea specifică a compozitului $\left(\varepsilon_c\right)_{tr}$, în direcție perpendiculară pe direcția fibrelor, se poate calcula cu formula [6, 43]:

$$\left(\varepsilon_c\right)_{tr} = \varepsilon_m \cdot \left(1 - \sqrt[3]{p_{vf}}\right), \quad (11)$$

unde ε_m reprezintă deformația specifică liniară a materialului matricei.



Lucrările [21, 29, 61, 67] prezintă următoarea relație de calcul pentru cazul de solicitare menționat:

$$\left(\sigma_c\right)_{tr} = \left[1 - \left(\sqrt{p_{vf}} - p_{vf}\right) \cdot \left(1 - E_m / E_2\right)\right] \cdot \sigma_{mt}, \quad (12)$$

în care: E_2 – modulul de elasticitate longitudinală a compozitului în direcție transversală pe fibre; σ_{mt} – tensiunea limită de elasticitate a materialului matricei, la solicitarea de întindere.

5. STABILITATEA COMPOZITULUI LA COMPRIARE ÎN LUNGUL FIBRELOR

La solicitarea de comprimare a compozitului, fibrele constituente pot flamba [15], după unul sau altul dintre cele două moduri reprezentative. Unele fibre rezistă foarte puțin la o atare solicitare (exemplu este dat de fibrele de *kevlar*).

Primul mod de flambare se poate produce pentru un procent volumetric de armare mai mic de 30% ($p_{vf} < 0,2$ [15]), caz în care matricea rezistă la solicitarea de întindere – comprimare.

În cel de **al doilea mod de flambare** matricea are un procent volumetric de armare mai ridicat, caz în care aceasta rezistă la forfecare [1, 6, 15, 68]. Justificarea, pentru fiecare structură, este dată de rezultatele experimentale întreprinse [6, 9].



Pentru solicitarea **la comprimare a unui compozit armat cu fibre lungi**, evaluarea tensiunii limită de elasticitate se poate calcula cu expresia (**modul 1 de deformare**) [15, 17, 23, 29, 64, 65]:

$$\left(\sigma_c\right)_{el}^f = 1,155 \cdot p_{vf} \cdot \sqrt{p_{vf} \cdot E_f \cdot E_m / \left(1 - p_{vf}\right)}, \quad (13)$$

atribuită lui **Rosen W. B.** [15, 23, 64, 68] și, independent, lui **Scheuerch H.** [23].

Ținând seama și de influența materialului matricei se poate scrie:

$$\left(\sigma_c\right)_{el}^{\bullet} = 1,155 \cdot \left[p_{vf} + \left(1 - p_{vf}\right) \cdot \left(E_m / E_f\right) \right] \cdot \sqrt{p_{vf} \cdot E_f \cdot E_m / \left(1 - p_{vf}\right)}. \quad (14)$$

Pentru **modul 2 de deformare**, lucrările [15, 17, 23, 68] propun expresia:

$$(\sigma_c)_{el}^f = G_m / (1 - p_{vf}), \quad (15)$$

în care intervine G_m modulul de elasticitate transversală (forfecare) a materialului matricei:

$$G_m = 0,5 \cdot E_m / (1 + \nu_m), \quad (16)$$

unde ν_m – coeficientul contracției transversale a materialului matricei;

Lucrările [1, 12, 23], ținând seama de valorile procentului volumetric al fibrelor din componența compozitului, indică relațiile:

$$(\sigma_c)_{el} = 0,917 \cdot p_{vf} \cdot \sqrt{p_{vf} \cdot E_f \cdot E_m / (1 - p_{vf})}, \text{ pentru } p_{vf} < 0,1; \quad (17)$$

$$(\sigma_c)_{el} = 0,63 \cdot G_{xy} \cdot (1 - p_{vf}), \text{ pentru } p_{vf} > 0,1. \quad (18)$$

Rezultatele experimentale sunt foarte apropiate de cele deduse cu relațiile de mai sus, cu excepția compozitelor armate cu fibre de sticlă [1].



Lucrările [43, 66] indică următoarea egalitate pentru aprecierea tensiunii limită de elasticitate a compozitului cu fibre:

$$(\sigma_c)_{el} = \min(\sigma_{fm1}, \sigma_{fm2}), \quad (19)$$

unde σ_{fm1} și σ_{fm2} se calculează cu expresiile (14) și (15).

Notă: Se remarcă diferența între exprimările (15) și (18), prin prezența coeficientului egal cu 0,63; se atrage atenția asupra conținutului de fibre.

6. LIMITA DE ELASTICITATE LA COMPRIMARE ÎN DIRECȚIE PERPENDICULARĂ PE CEA A FIBRELOR

Lucrările [29, 61] redau următoarea relație de calcul al tensiunii la comprimare transversală pentru compozitul armat unidirecțional cu fibre:

$$(\sigma_c)_{com} = \left[1 - \left(\sqrt{p_{vf}} - p_{vf} \right) \cdot \left(1 - E_m / E_2 \right) \right] \cdot \sigma_{mc}. \quad (20)$$

Similar cu relația anterioară, poate fi folosită pentru solicitarea de forfecare exprimarea [21, 29, 61]:

$$\tau_c^{com} = \left[1 - \left(\sqrt{p_{vf}} - p_{vf} \right) \cdot \left(1 - E_m / E_2 \right) \right] \cdot \tau_{mc}, \quad (21)$$

în care sunt prezente τ_c^{com} , τ_{mc} – tensiunile de forfecare pentru compozit și pentru materialul matricei.



Exprimări comparative privind evaluarea tensiunilor maxime din compozitele armate cu fibre lungi

Lucrarea [6] prezintă egalitatea de mai jos pentru evaluarea tensiunii de forfecare în planul limită $(\tau_{12})_{lim}$, considerând tensiunea de forfecare a fibrelor τ_f și a matricei τ_m , respectiv procentele volumetrice conținute de compozit:

$$(\tau_{12})_{lim} = \tau_f \cdot p_{vf} + \tau_m \cdot p_{vm} \quad (22)$$

7. REZISTENȚA COMPOZITULUI LA ÎNTINDERE TRANSVERSALĂ, LA COMPRIMARE TRANSVERSALĂ ȘI LA FORFECAREA FIBRELOR

Pentru astfel de solicitări, tensiunile induse în matrice și în fibre sunt echivalente [6] - cu observația ca tehnologia de fabricare să respecte cu strictețe cerințele impuse [n.a.]. Este evident faptul că proprietățile compozitului armat cu fibre, sub acțiunea unor astfel de solicitări, depind de valorile limită și de rezistența mecanică ale materialului matricei. Nu trebuie trecut cu vederea faptul că la solicitarea la întindere transversală a fibrelor, tensiunile admisibile sunt superioare celor corespunzătoare materialului matricei [6].

8. CONCLUZII

În conținutul articolului de față sunt prezente unele expresii pentru aprecierea solicitării maxime admisibile a materialelor compozite armate cu fibre lungi. În acest context sunt luate în discuție cazurile în care sunt prezente: a) - armarea cu fibre, caz în care materialul matricei are lungiri maxime inferioare celor ale fibrelor; b) - compozitul este solicitat la întindere pe o direcție oarecare în raport cu direcția fibrelor lungi; c) - solicitarea la întindere a compozitului, pe o direcție perpendiculară pe cea a fibrelor; d) - analiza stabilității formei compozitului în lungul fibrelor; e) - limita de elasticitate la comprimarea compozitului în direcție perpendiculară pe cea a fibrelor; f) - rezistența compozitului la întindere transversală sau comprimare transversală și la forfecarea fibrelor.

O atenție adecvată va fi acordată, într-o lucrare ulterioară, pentru compozitele armate cu fibre tocate sau cu particule, caz în care vor fi precizate rezultate oferite pentru estimarea capacității portante maxime a unor atare materiale.

REFERINȚE

- [1] Alămoreanu, Elena, Negruț, C., Jiga, G., Calculul structurilor din materiale compozite, Universitatea POLITEHNICA din București, 1993.
- [2] Ștefănescu, F. Neagu, G., Mihai, Alexandrina, Materiale compozite, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1996.
- [3] Ștefănescu, F., Compozite metalice, Editura MatrixRom, București, 1996.
- [4] Fu, Z. Sh., Lauke, B., Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short - fiber - reinforced polymers, Composites Sciences and Technology, 56, 1996, p. 1179 - 1190.
- [5] Hull, D., Clyne, W. T., An introduction to composite materials (second edition), Cambridge University Press, New York, USA, 1996.

- [6] Alămoreanu, Elena, Chiriță, R., Bare și plăci din materiale compozite, Editura Tehnică, București, 1997.
- [7] ***Aerospațiale – Composite stress manual, MTS 006Iss.B, 1999.
- [8] Harris, B., Engineering composite materials, The Institute of Materials, London, 1999.
- [9] Hadăr, A., Structuri din compozite stratificate, Editura Academiei și Editura AGIR, București, 2002.
- [10] Bataev, A. A., Batev, A. V., Kompozitionnâe materialî /stroenie, polucenie, primeneniye), Novosibirskii Gosudarstvennâi Tehniceskii Universitet, Novosibirsk, 2002.
- [11] Tuttle, E. M., Structural analysis of polymeric composite materials, Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 2004.
- [12] Alămoreanu, Elena, Constatinescu, D. M., Proiectarea plăcilor compozite laminate, Editura Academiei Române, București, 2005.
- [13] Kainer, U. K., (editor), Metal matrix composites, WILEY – VCH Verlag GmbH and Co, KgaA, Weinheim, Germany, 2006.
- [14] Kaw, K. A., Mechanics of composite materials (second edition), CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [15] Mallick, K. P., Fiber-reinforced composites-materials, manufacturing and design (third edition), CRC Press Taylor&Francis Group, New York, USA, 2008.
- [16] Tacă, C. D., Păunescu, Mihaela, Materiale compozite, Editura MatrixRom, București, 2012.
- [17] Talreja, R., Singh, V. Ch., Damage and failure of composite materials, Cambridge University Press, USA, New York, 2012.
- [18] Boufaïda, Z., Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice, Thèse, Université de Lorraine, France, 2015.
- [19] Sima, Elena, Materiale compozite - necesitate și provocare în contextual dezvoltării durabile, Buletinul AGIR, nr. 4, 2017, p. 143 – 146.
- [20] Hudișteanu, Iuliana, Țăranu, N., Isopescu, Nicolina Dorina, Bejan, Liliana, Axinte, A., Ungureanu, D., Îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale stratificatelor composite prin alegerea rațională a materialelor și configurațiilor corespunzătoare, Revista Română de Materiale, 47, nr. 2, 2017, p. 252 - 267.
- [21] Iatan, I. R., Enăchescu Luminița Georgiana, Solicitări mecanice și termice în plăci compozite stratificate, Editura Matrix Rom, București, 2017.
- [22] Gajaraj, G., Lal, P., Raguraman, M., Comparison of mechanical and flammability properties of benzoxazine and epoxy resin based carbon fibre composite sandwich structures, International Journal of Composite Materials, 10, nr. 1, 2020, p. 18 – 27.
- [23] Türkmen, D., Compressive behavior of CFRP laminates exposed in hot – wet environments, Thesis, University of Leicester, England, 1996.
- [24] Minoiu, Șt., Încercări experimentale pentru determinarea caracteristicilor elastice ale unor materiale compozite, Buletinul Universității Petrol – Gaze din Ploiești, vol. LII, Seria Tehnică, 2000, nr. 2, p. 153 – 162.
- [25] Bos, Louise Harriëtte, The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials, Thesis, University Press Facilities, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, 2004.
- [26] Crookston, J. J., Prediction of elastic behavior and initial failure of textile composites, Thesis, The University of Nottingham, England, May 2004.
- [27] Gharbi, Ab., Analyse des fissuration des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piezo-électrique, Mémoire présenté pour l'obtention de diplôme de magister-option construction mécanique, Université Mantouri-Constantine, République Algérienne Démocratique et Populaire, 2005.
- [28] Carcea, L. Materiale compozite – fenomene la interfață, Editura Politehniun, Universitatea Tehnică “Gh. Asachi”, Iași, 2008.
- [29] Boccolini, V., Dimensionamento strutturale effettuato con le norme CE 94/25 e confront atteverso il metodo degli elementi finite, Tesi di Dottorato di ricerca in Ingenera Industriale, Università degli studi di Napoli Federico II di Napoli, Italy, 2009.

Exprimări comparative privind evaluarea tensiunilor maxime din compozitele armate cu fibre lungi

- [30] Roșu, D., Contribuții teoretice și experimentale la structuri din materiale compozite noi, Teză de doctorat, Universitatea "Transilvania" din Brașov, 2010.
- [31] Falaschetti, Pia - Maria, Caratterizzazione meccanica di materiali composite mediante attrezzatura CLC, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Italia, 2013.
- [32] Al – Bahadly, O. A. E., The mechanical proprieties of natural fiber composites, Thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2013.
- [33] Jamali, J., Mechanistic failure criterion for unidirectional and random fibre polymer composites, Thesis, The University of Western Ontario, Canada, 2014.
- [34] Lepetit, A., Élaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyethylene, Thèse, Université de Lomoges, Canada, 2017.
- [35] Rotaru (Paraschiv), Florentina, Fenomene de degradare la impactul mecanic al structurilor compozite de tip sandwich, Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2018.
- [36] Durbacă, C. A., Cercetări teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor fizico-mecanice ale plăcilor polimerice de tip sandwich cu miez compus din celule triunghiulare, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din București, 2018.
- [37] Boboc (Căpățână), Ana, Contribuții la studiul proprietăților materialelor compozite armate cu țesături și a efectului solicitărilor ciclice asupra acestor proprietăți, Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2019.
- [38] Pupăzan, C., Acustica în construcții (propagarea zgomotului și izolarea fonică), Editura Academiei Române, București, 1970.
- [39] Wu, Ch. H., Advanced civil infrastructure materials (science, mechanics and applications), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2006.
- [40] Ghafar, A. M., Mazen, A. A., El-Mahallawy, A. N., Application of the rule of mixture and Halpin-Tasi equations to woven fabric reinforced epoxy composites, Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Egipt, vol. 14, nr. 1, 2006, p. 227 – 236.
- [41] *** Rules for the classification and the certification of yachts, Part B (Hull and stability, chapter 12), Bureau Veritas – NR 500 DT R00 E, July 2006 (<http://www.veristar.com>; veristarinfo@bureauveritas.com).
- [42] Natanail, R., Cercetări privind concepția și fabricația pieselor din material compozit pentru producția specială din industria auto, Teză de doctorat, Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu, 2011.
- [43] Slade, A. R., Failure analysis of impact-damage metallic poles repaired with reinforced polymer composites, Thesis, University of Central Florida Orlando, USA, 2012.
- [44] Gheorghe, V., Structuri cu rigiditate ridicată, din material compozit, utilizate în construcția de autovehicule, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2013.
- [45] Bai, J. (editor), Advanced fibre – reinforced polymer /FRP) composites for structural applications, Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2013.
- [46] Eamon, D. Ch., Wu, Ch. W., Makkawy, A. A., Siavashi, S., Design and construction guidelines for strengthening bridges using fiber reinforced polymers (FRP), Final Report, Michigan Department of Transportation, USA, 2014.
- [47] Burova, I. N., Zorin, A. V., Primenenie polimernâh kompozitionnâh materialov pri proizvodstve i remonte mașin, Madi, Moskva, 2016
- [48] Bolcu, Al. Contribuții la studiul comportamentului mecanic al materialelor compozite, cu aplicații la automobile, Teză de doctorat, Universitatea din Craiova, 2018.
- [49] Gălățeanu, Magdalena, Studii asupra materialelor compozite avansate destinate reactoarelor de fuziune nucleară, Teză de doctorat, Universitatea din București, 2018.
- [50] Chung, W. S., Ju, S. G., Details of semi-membrane shell theory of hybrid anisotropic materials, International Journal of Composite Materials, 8, nr. 3, 2018, p. 47 – 56.
- [51] Drăgan, N., Elemente de calcul al eficienței tratamentelor acustice cu material compozit fonoabsorbante pentru cabinele utilajelor tehnologice mobile, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, 10, nr. 2, 2019, p. 103 – 110.

- [52] Bolcu, D., Stănescu, M. M., A study of the mechanical properties of composite materials with a dammar – based hybrid matrix and two types of flax fabric reinforcement, *Polymers*, nr. 12, 2020, p. 1 – 20.
- [53] Apsar, G., Musrhak, Md., Ahmed, J., Study of factors affecting tape-mound composite helical spring prepared by E-glass/epoxy by using Taguchi method and statistical distributions, *International Journal of Composite Materials*, 10, nr. 1, 2020, p. 10 – 17.
- [54] Gomes, M. I., Nogueira, de Codes, R., Sandro de Arango Silva A., Influence of operating pressure on water absorption of a polymeric composite applied in oil pipelines, *International Journal of Composite Materials*, 10, nr. 2, 2020, p. 37 – 39.
- [55] Mahandrimanana, A., Lunard, H. A., Rado, R., Composite material based on clay and TiO₂ for wastewater treatment, *International Journal of Composite Materials*, 11, nr. 1, 2021, p. 1 – 4.
- [56] Ispas, Șt., Materiale composite. Aplicații, perspective, Tehnologii, Calitate, Mașini, Materiale – Progres Tehnic, nr. 2, Editura Tehnică, București, 1987, p. 170 – 175.
- [57] Suci Valeria, Suci V. M., Studiul materialelor, Editura Fair Partners, București, 2008.
- [58] Bolcu, D., Stănescu, M. M., Ciucă, I., Dumitru, S., Sava, Mihaela, The non-uniformity from the composite materials reinforced with fiber glass fabric, *Materiale plastice*, 51, nr. 1, 2014, p. 97 – 100.
- [59] Tuberosa, B., Proprietà meccaniche a trazione di compositi polimerici rinforzati con fibre lunghe di carbonio di interesse per il settore automotive, Tesi, Università di Bologna Anno accademico, 2011 – 2012.
- [60] Gay, D., Matériaux composites, Hermes, Paris, Franța, 1999.
- [61] Bhalchandra A. S., Shiradhonkar S. Y., Determination of properties of transversely isotropic manina using micromechanics approach, *Cement and Concret Composites*, 48, 2012, p. 9588 – 9593
- [62] Cerbu, Camelia, Curtu, I., Botiș, M., Tensiunile și deformațiile generate în materiale compozite de un mediu agresiv, *Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești, Seria Tehnică LIV*, nr. 3, 2002, p. 1 – 8.
- [63] Daniel, M. I., Ishai, O., Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press Inc., New York, SUA, 1994.
- [64] Aboudi, J., Gilat, Rivka, Buckling analysis of fibers in composite materials by wave propagation analogy, *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006, p. 5168 – 5181.
- [65] Kaw, K. A., Mechanics of composite materials (second edition), CRC Press, Taylor/Francis Group, New York, SUA, 2006.
- [66] Boteanu, A. O., Contribuții la calculul containerelor utilizate la activități logistice în armată, Teză de doctorat, Academia Tehnică Militară, București, 2009.
- [67] Bhalchandra, A. S., Shiradhonkar, Y., Daimi, S. S., Comparison of properties of transversely isotropic lamina using method of cells and composite cylinder assemblage, *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 64, 2014, p. 43 – 58.
- [68] Agarwal D. B., Analysis and performance of fiber composites (third edition), John Wiley&Sons, USA, 2006.