

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

PRACTICAL WAYS TO EVALUATE THE ADMISSIBLE MECHANICAL STRENGTH OF COMPOSITES REINFORCED WITH CHOPPED FIBERS OR PARTICLES

Radu I. Iatan¹, Andreea - Silvia Nițu^{2*}, Nicoleta Sporea¹, Luminița Georgiana Enăchescu¹, Melania Corleciuc (Mitucă)³

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

² Ministry of the Environment, Romania

³ National Agency for Environmental Protection, Romania

Rezumat: Încă de la apariția primară a compozitelor, acestea s-au impus în practica industrială, oferind caracteristici mecanice, termice și de rezistență chimică sau erozivă, remarcabile. În acest caz studiul din acest articol se caracterizează prin analiza: a) rezistenței la întindere a compozitelor cu armătură dispersată (fibre tocate); b) rezistenței mecanice a compozitelor cu particule, c) rezistenței mecanice a compozitelor cu fibre whiskers / mustăți / filamente. Sunt evidente combinațiile necesare pentru realizarea unor compozite cu performanțe mecanice, cunoscând realitatea influenței legăturilor între componente, în procesele de fabricare.

Cuvinte cheie: capacitate portantă, compozite cu fibre tocate sau cu particule.

Abstract: Since the primary appearance of composites, they have prevailed in the industrial practice, offering remarkable mechanical, thermal and chemical or erosive resistance characteristics. In this case, the study in this article is characterized by the analysis of: a) the tensile resistance of composites with dispersed reinforcement (chopped fibers); b) mechanical resistance of composites with particles, c) mechanical resistance of composites with whiskers fibers / whiskers / filaments. The combinations necessary for the realization of composites with mechanical performances are obvious, knowing the reality of the influence of the connections between components, in the manufacturing processes.

Keywords: load - bearing capacity, composites with chopped fibers or particles

1. INTRODUCERE

De-a lungul timpului societatea umană a impus permanent găsirea unor materiale noi care să răspundă condițiilor practice tot mai diversificate.. Materialele clasice, tradiționale, s-au dovedit insuficiente, în unele situații. În acest sens, compozitele cu fibre tocate sau cu particule au găsit un loc binemeritat. Componentele unor astfel de materiale își păstrează caracteristicile individuale în amestec, chiar și după procesele tehnologice de formare.

Pentru activitatea de proiectare sau de verificare a rezistenței admisibile a structurilor mecanice au fost elaborate multe lucrări științifice, deosebit de interesante, dintre care [1 – 14], de

exemplu. Cu mult timp în urmă s-a evidențiat “*sindromul minimizării*” maselor structurilor mecanice [14], evident cu reacții în lanț pe toate treptele conceperii, elaborării materialelor de construcție, al fabricării și al utilizării produselor. Scopul urmarit a fost acela de a realiza: componente finite mai ușoare, consumuri mai reduse de energie, încărcătură utilă sau autonomie mai mare (în transporturi, de exemplu). Totodată, trebuie asigurată o durată de serviciu cât mai îndelungată, combinată cu cheltuieli de producție și de exploatare cât mai mici, poluare redusă a mediului exterior.

În general, structurile compozite sunt fabricate, de regulă, prin dispunerea fibrelor lungi de armare în mod predeterminat. Totuși, în practica industrială sunt cunoscute și variantele de armare a materialelor compozite cu fibre tocate sau cu particule.

În perioada anterioară au fost elaborate multe lucrări științifice destinate structurilor compozite, precum: tipuri de materiale componente și caracteristici tehnice [1 – 18]; caracteristici specifice de fabricare [5, 19, 20]; metode de proiectare – metode analitice și/sau numerice; solicitări statice și dinamice, mecanice și termice [5, 21 – 33]; aspecte privind deteriorarea structurilor compozite [5, 34 – 41]; aplicații practice: generalități [42, 43]; construcții auto [44, 45]; construcții navale maritime (comerciale sau sportive) [46, 47]; industria aeronautică [48]; recipiente sub presiune [49, 50]; industria construcțiilor civile și industriale [51 – 53]; construcții pentru epurarea apelor industriale uzate [54, 55], precum și multe alte domenii tehnice.

Prezentul articol, luând în considerare comportarea legăturii dintre matricea compozitului și elementele de armare, prezintă unele rezultate ale cercetărilor privind capacitatea portantă a structurilor compozite armate cu fibre tocate sau cu particule.

2. REZISTENȚA LA ÎNTINDERE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE

Pentru lungimi ale fibrelor l_f mai mici decât valoarea critică l_{cf} ($l_f < l_{cf}$), determinată cu expresia **Kelly A. - Tyson W. R.** [10, 17, 21, 47, 48]:

$$l_{cf} = 0,5 \cdot d_f \cdot \left[(\sigma_f)_M / (\tau_m)_M \right], \quad (1)$$

în care: d_f – diametrul fibrei ; $(\sigma_f)_M$ - rezistența de rupere la întindere a materialului fibrei; $(\tau_m)_M$ - rezistența de rupere prin forfecare a materialului matricei.

Pentru un compozit cu umplutură / armătură dispersată, tensiunea de întindere se poate evalua cu relația [20, 47, 49]:

$$\sigma_{tc} = 2 \cdot \sigma_{tf} \cdot p_{vf} \cdot \left(2 - l_{cf} / l_f \right) + \sigma_{tm} \cdot \left(1 - p_{vf} \right), \quad (2)$$

în timp ce în cazul fibrelor discontinue cu lungimea mai mare decât valoarea critică - ($l_f \geq l_{cf}$) - poate fi utilizată expresia [47, 49]:

$$\sigma_{tc} = \left(l_f \cdot \tau_{fm} / d_f \right) \cdot p_{vf} + \sigma_{tm} \cdot \left(1 - p_{vf} \right), \quad (3)$$

cu τ_{fm} notându-se tensiunea de forfecare de rupere dintre materialul fibrelor și cel al matricei.

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

Nota 1: Lucrarea [50] prezintă pentru tensiunea de întindere din fibre discontinue, pe lungimea lor, următoarea formulare (**Cox H. L.** – 1952):

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_1 \cdot \left\{ 1 - c h \left[\beta \cdot \left(l_f / 2 - x \right) \right] / c h \left(\beta \cdot l_f / 2 \right) \right\}, \quad (4)$$

în care:

$$\beta = \sqrt{2 \cdot G_m / \left[E_f \cdot r_f^2 \cdot \ln \left(R / r_f \right) \right]}, \quad (5)$$

cu notațiile corespunzătoare: ε_1 – deformația specifică liniară a compozitului (aceeași pentru fibre și matrice); x – distanță măsurată în lungul fibrei, de la marginea acesteia către centrul său ($0 \leq x \leq 0,5 \cdot l_f$); G_m – modulul de elasticitate transversală (forfecare) a materialului matricei; E_f – modulul de elasticitate longitudinală a materialului fibrelor; R, r_f – distanța dintre centrele a două fibre învecinate, respectiv raza secțiunii transversale circulare a fiecăreia dintre ele.

În același context, tensiunea de forfecare dintre fibre și materialul matricei are egalitatea [50]:

$$\tau_{fm} = 0,5 \cdot E_f \cdot \varepsilon_1 \cdot \beta \cdot r_f \cdot \left\{ s h \left[\beta \cdot \left(l_f / 2 - x \right) \right] / c h \left(\beta \cdot l_f / 2 \right) \right\}. \quad (6)$$

Nota 2: În lucrarea [51] se indică următoarele expresii pentru compozitele armate cu fibre, caracterizate prin ($l_f \leq l_{cf}$):

$$\sigma_{tc} = \alpha_a \cdot \tau_{fm} \cdot p_{vf} \cdot l_f / d_f + \sigma_{tm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (7)$$

pentru **fibre cu secțiune transversală circulară (fibre cilindrice)**, unde α_a este un coeficient de corelare:

$$\sigma_{tc} = 0,5 \cdot \alpha_a \cdot \tau_{fm} \cdot p_{vf} \cdot l_f \cdot \left[\left(L_{fd} + H_{fd} \right) / \left(L_{fd} \cdot H_{fd} \right) \right] + \sigma_{tm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (8)$$

pentru **fibre cu secțiune transversală dreptunghiulară**, cu lățimea L_{fd} și înălțimea H_{fd} , respectiv:

$$\sigma_{tc} = \alpha_a \cdot \tau_{fm} \cdot p_{vf} \cdot l_f / L_{fp} + \sigma_{tm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (9)$$

pentru fibre cu **secțiune transversală pătrată** cu latura L_{fp} .

Nota 3: Lucrarea [53] recomandă următoarele expresii pentru evaluarea tensiunilor dezvoltate în compozitul conținând fibre de sticlă, cu matrice polimerică:

$$\sigma_{tc} = \sigma_{tf} \cdot p_{vf} \cdot l_f / d_f + \sigma_{tm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (10)$$

cu fibre pentru care $l_f < l_{cf}$, respectiv:

$$\sigma_{tc} = \sigma_{tf} \cdot p_{vf} \cdot \left(1 - 0,5 \cdot l_{cf} / l_f \right) + \sigma_{rm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (11)$$

pentru fibre caracterizate de $l_f \geq l_{cf}$, σ_{rm} reprezentând tensiunea de deteriorare a materialului matricei.

Nota 4: Lucrarea [17] indică următoarea relație de calcul (**Kelly A. – Tyson W. R.**) pentru rezistența unui compozit cu **fibre amestecate (mixtură / mat)**, de aceeași natură:

$$\sigma_{tc} = \eta_i \cdot \sigma_{tf} \cdot p_{vf} + \sigma_{rm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (12)$$

unde **factorul de influență a lungimii fibrelor** scurte are configurația:

$$\eta_i = \frac{1}{p_{vf}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{f1}} \frac{l_{fi} \cdot p_{vfi}}{2 \cdot l_{cf}} + \sum_{j=1}^{N_{f2}} p_{vfj} \cdot \left(1 - \frac{l_{cf}}{2 \cdot l_{fj}} \right) \right], \quad (13)$$

exprimare pentru lungimea critică evaluată cu relația (1), unde l_{fi} semnifică lungimea fibrelor mai scurte decât lungimea critică l_{cf} ; p_{vfi} - fracția volumetrică a fibrelor din fracția “ $i = 1, \dots, N_{f1}$ ”; l_{fj} - lungimea fibrelor cu lungimea mai mare (inclusiv) decât lungimea critică, din fracțiunea “ $j = 1, \dots, N_{f2}$ ”; p_{vfj} - fracția volumetrică a fibrelor din fracția “ $j = 1, \dots, N_{f2}$ ”.

Observația 1: Expriamarea (13) este atribuită colectivului *Yu Z., Brisson J., Ait – Kadi A.*, Polymer Composites, 15, 1994, p. 64 – 73. Lucrările autorilor *Vu – Khanh T., Denault J., Habib P., Lowe A.* (1991) și *McNally D., Freed W. T., Shaner J. R., Shell J. W.* (1978) corectează relația (13) prin introducerea egalității $\eta_i^* = \eta_{of} \cdot \eta_i$ [52].

Pe lângă influența lungimii fibrelor, în egalitățile (12) și (13) se poate ține seama și de contribuția oferită de eficiența prezenței fibrelor, k_{ef} (factor de eficiență) și orientarea acestora η_{of} (factor de orientare / poziționare în amestec), astfel încât factorul η_i se înlocuiește cu $\eta_c = k_{ef} \cdot \eta_{of} \cdot \eta_i$ [17]. Valorile acestor factori pot fi determinate, după caz, prin experimentări adecvate.

Observația 2: Se poate remarca ușor că:

$$p_{vf} = \sum_{i=1}^{N_{f1}} p_{vfi} + \sum_{j=1}^{N_{f2}} p_{vfj}. \quad (14)$$

Nota 5: Lucrarea [53], tot în cazul unor fibre de aceeași natură, arată următoarea egalitate pentru evaluarea rezistenței de rupere a compozitului care conține fibre amestecate:

$$\sigma_{tc} = \eta_{of} \cdot \eta_i^* \cdot p_{vf} \cdot \sigma_{tf} + \sigma_{rm} \cdot (1 - p_{vf}), \quad (15)$$

în care se introduce factorul de influență a numărului și a lungimii fibrelor din amestec sub forma:

$$\eta_i^* = \sum_{i=1}^{N_{f1}} \frac{l_{fi} \cdot p_{vfi}}{2 \cdot l_{cf}} + \sum_{j=1}^{N_{f2}} p_{vfj} \cdot \left(1 - \frac{l_{cf}}{2 \cdot l_{fj}} \right), \quad (16)$$

unde sunt prezente procentele volumetriche corespunzătoare fibrelor de lungimi l_{fi} , respectiv l_{fj} .

Observația 3: Lucrările [24, 52], păstrând formal exprimarea (15), recomandă valorile: $\eta_{of} = 1$; $\eta_i^* < 1$, în cazul fibrelor discontinue poziționate unidirecțional, respectiv pentru fibrele lungi:

$$\eta_i^* = l_f / (2 \cdot l_{cr}), \text{ dacă } l_f < l_{cf}; \quad \eta_i^* = 1 - l_f / (2 \cdot l_{cr}), \text{ dacă } l_f > l_{cf}, \quad (17)$$

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

pentru lungimea critică a fibrelor folosindu-se expresia:

$$l_{cf} = r_f \cdot \left[(\sigma_f)_M / \tau_{fm} \right]; \quad r_f = 0,5 \cdot d_f, \quad (18)$$

cu notațiile recunoscute din cele ce preced.

Nota 6: În același context, lucrările [17, 54], preluând exprimarea (12), prezintă următoarea relație (**Bowyer W. H. – Bader M. G.**) de calcul al rezistenței de rupere a compozitului cu amestec de fibre:

$$\sigma_{tc} = \eta_{0f} \cdot \eta_i^{\bullet\bullet} + (1 - p_{vf}) \cdot E_m \cdot \varepsilon_c, \quad (19)$$

cu exprimarea:

$$\eta_i^{\bullet\bullet} = \sum_{i=1}^{N_{f1}} \frac{\tau_{fm} \cdot p_{vfi} \cdot l_{fi}}{d_f} + \sum_{j=1}^{N_{f2}} \left[E_f \cdot \varepsilon_c \cdot p_{vfj} \cdot \left(1 - \frac{E_f \cdot \varepsilon_c \cdot d_f}{4 \cdot \tau_{fm} \cdot l_{fj}} \right) \right]. \quad (20)$$

3. REZISTENȚA MECANICĂ A COMPOZITELOR CU PARTICULE

Tensiunea mecanică critică este aproximativ egală cu rezistența de curgere a materialului care, la rândul său, depinde de gradul de dispersare a fazei secundare (**“faza minoritară”** [55]). Legătura dintre participația volumetrică a particulelor (ceramice) p_{vp} , raza (eventual echivalentă) r și distanța dintre acestea este de forma [20, 56]:

$$\lambda = r \cdot \sqrt[3]{4,19 / p_{vp}}. \quad (21)$$

Rezistența de rupere a compozitului prin forfecare τ_{rc} se poate exprima cu relația [20, 56]:

$$\tau_{rc} = 3 \cdot \tau_p \cdot (p_{vp})^n, \quad (22)$$

în care τ_p reprezintă tensiunea de forfecare a unei particule; $n=1,0 \dots 1,5$ - exponent dependent de materialul particulelor.

Nota 7: Având în vedere structura unui compozit cu particule, lucrarea [57], pentru astfel de elemente slab legate (contact redus între particule și matrice), prezintă relația (**Danusso F., Tieghi G.** - 1986; **Levita G., Marchetti A., Lazzeri A.** - 1989):

$$\sigma_{tc} = \sigma_m \cdot (1 - p_{vp}), \quad (23)$$

ceea ce arată o scădere a capacității portante a compozitului, odată cu sporirea conținutului de particule. Argumentul este acela că ariile active din matrice se diminuează cu creșterea numărului de particule. În aceeași ordine, introducând și efectul formei particulelor, precum și modul lor de aranjare, prin prezența coeficienților a și b , egalitatea anterioară se modifică corespunzător (**Nicolais L., Narkis M., Nicodemo L.** - 1971, 1974) [57]:

$$\sigma_{tc}^{\bullet} = \sigma_m \cdot \left[1 - a \cdot (p_{vp})^b \right], \quad (24)$$

**Radu I. Iatan, Andreea - Silvia Nițu, Nicoleta Sporea,
Luminița Georgiana Enăchescu, Melania Corleciuc (Mitică)**

dezvoltată de **Bigg D. M.** (1987), prin introducerea coeficienților c și d , cu valori alese corespunzătoare cazului practic (pentru o mai bună predicție a rezistenței compozitului):

$$\sigma_{ic}^* = \sigma_m \cdot \left[1 - a \cdot (p_{vp})^b + c \cdot (p_{vp})^d \right]. \quad (25)$$

Tot în lucrarea menționată sunt date și alte relații pentru evaluarea stării de solicitare dintr-un compozit cu particule (tab. 1).

Tabelul 1. Expresii ale tensiunilor normale dintr-un compozit cu particule [57].

Nr. crt.	Autorul/autorii	Expresie tensiunii normale	Nr. relație
1	<i>Nielsen L. E</i> (1966)	$\sigma_{ic} = \sigma_m \cdot \left(1 - \sqrt[3]{p_{vp}^2} \right) \cdot c_{imp}$	(26)
2	<i>Nicolais L. - Nicodemo L. - Narkis M.</i> (1971, 1973)	$\sigma_{ic} = \sigma_m \cdot \left(1 - 1,21 \cdot \sqrt[3]{p_{vp}^2} \right)$	(27)
3	<i>Lu S. - Yan L. - Zhu X. - Qi Z.</i> (1992)	$\sigma_{ic} = \sigma_m \cdot \left(1 - 1,07 \cdot \sqrt[3]{p_{vp}^2} \right)$	(28)
4	<i>Jancar J. - Dianselmo A. - Dibeneditto A. T.</i> (1992)	$\sigma_{ic} = \sigma_m \cdot \left(1 - 1,21 \cdot \sqrt[3]{p_{vp}^2} \right) \cdot s_r$	(29)
5 a	<i>Leidner J. - Woodhams R. T.</i> (1974)	$\sigma_{ic} = 0,83 \cdot p \cdot f \cdot p_{vp} + k \cdot \sigma_m \cdot (1 - p_{vp})$	(30)
5 b		$\sigma_{ic} = 0,83 \cdot p \cdot f \cdot p_{vp} + (k \cdot \sigma_m + c \cdot \sigma_a) \cdot (1 - p_{vp})$	(31)
6	<i>Piggott M. R. - Leidner J.</i> (1974)	$\sigma_{ic} = g \cdot \sigma_m - \sigma_a \cdot p_{vp}$	(32)
7	<i>Turcsanyi B. - Pukanszky B. - Tudos F.</i> (1988)	$\sigma_{ic} = \frac{1 - p_{vp}}{1 + 2,5 \cdot p_{vp}} \cdot \sigma_m \cdot \exp(B \cdot p_{vp})$	(33)
8	<i>Landon G. - Lewis G. - Boden G.</i> (1977)	$\sigma_{ic} = \sigma_m \cdot (1 - p_{vp}) - [c(p_{vp})] \cdot d_p$	(34)
9	<i>Hojo H. - Toyoshima W. - Tamura M. - Kawanura N.</i> (1973, 1974)	$\sigma_{ic} = \sigma_m + [c(p_{vp})] / \sqrt{d_p}$	(35)
10	<i>Young R. J. - Beaumont P. W. R.</i> (1977)	$\sigma_c = \sigma_m + \sigma_{ad} / D_s ;$ $D_s = 2 \cdot d_p \cdot (1 - p_{vp}) / (3 \cdot p_{vp})$	(36)

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

Notă:

- ▶ **Nr. crt. 1:** Coeficientul $c_{i m p}$ prezintă influența imperfecțiunilor dintre particule și materialul matricei, putând avea valoarea maximă egală cu unitatea;
- ▶ **Nr. crt. 2:** Egalitatea este admisă în condițiile în care contactul dintre particule și matrice nu mai există;
- ▶ **Nr. crt. 3:** Se acceptă un contact parțial între particule și matrice;
- ▶ **Nr. crt. 4:** Coeficientul $s_r \in [1, 0 \dots 2, 0]$ este dependent de fracții joase sau înalte de particule;
- ▶ **Nr. crt. 5:** p – presiunea dezvoltată între particule și matrice în procesul de fabricare a compozitului; f – coeficient de frecare dintre particule și matrice; k – parametru care reflectă schimbul / transferul relativ la încărcarea matricei; σ_a - rezistența / tensiunea / adeziunea dintre particule și matrice; c_σ – constantă;
- ▶ **Nr. crt. 6:** Se are în vedere că nu există contact uniform între particule și matrice; σ_a – tensiune de adeziune între componentele compozitului;
- ▶ **Nr. crt. 7:** Factorul B este dependent de aria particulelor, densitatea lor și de energia de legătură dintre acestea și matrice; pentru o lipire foarte bună, $B = 0$. Experimentările au fost efectuate pe matrice din rășină epoxy și mărgelile din sticlă, tratate și netratate, arătând efectul favorabil al tratării corespunzătoare a particulelor.
- ▶ **Nr. crt. 8:** Factorul $c(p_{v p})$ corelează rezistența particulelor cu diametrul lor d_p , reflectând faptul că adăugarea de particule în compozit conduce la diminuarea rezistenței acestuia.
- ▶ **Nr. crt. 9:** Expresia propusă în urma testării unui compozit cu matrice epoxydică și particule din silice.
- ▶ **Nr. crt. 10:** Diminuarea distanței dintre particule D_s conduce la creșterea rezistenței compozitului, efect favorabil pe care îl are și adeziunea dintre particule și matrice σ_{ad} .

Nota 8. Lucrarea [58], considerând un compozit cu matrice din sticlă în care se distribuie particule (metalice sau nemetalice), în procesul de formare se pot dezvolta tensiuni reziduale, pentru un procedeu stabil, astfel încât dimensiunea critică poate fi stabilită cu expresia (**Davidge R. W., Green J. T.**, Journal of Materials Science, 3, 1968, p. 629 – 634):

$$d_c = \frac{4 \cdot e_m \cdot [E_p \cdot (1 + \nu_m) + 2 \cdot E_m \cdot (1 - 2 \cdot \nu_p)]}{(\Delta \alpha \cdot \Delta T)^2 \cdot E_m \cdot E_p}, \quad (37)$$

în care s-au făcut notațiile: E_m, E_p – modulele de elasticitate longitudinală pentru materialul matricei și al particulelor; ν_m, ν_p – coeficienții contracției transversale a materialului matricei și particulelor; e_m – energia specifică de rupere a materialului matricei; $\Delta \alpha = (\alpha_m - \alpha_p)$ – gradientul factorilor de deformare termică: α_m pentru materialul matricei și α_p al materialului particulelor; ΔT – gradientul termic al temperaturilor celor două componente.

În procesul de formare trebuie să se aibă în vedere și temperatura mediului exterior. Tensiunile de comprimare dezvoltate în cadrul acestei operații pot fi favorizante la solicitări de întindere a compozitului.

4. REZISTENȚA MECANICĂ A COMPOZITELOR CU FIBRE WHISKERS / MUSTĂȚI / FILAMENTE

Conform lucrării [58], în cazul compozitelor care conțin ca material de umplură (în unele situații cu rol de duritate sporită, conducând la utilizarea compozitelor în realizarea sculelor polizoare, de exemplu) sub formă de filamente, rezistența la rupere a acestora este influențată

pozitiv, așa cum arată expresia (*Becher F. P., Hsueh H. C., Angelini P., Tiegs N. T.*, Journal of the American Ceramic Society, 71, nr. 12, 1988, p. 1050 – 1061, citată în [58]):

$$\sigma_{rc} = \sigma_f \cdot \sqrt{\left\{ p_{vf} \cdot r / \left[B \cdot (1 - \nu_f^2) \right] \right\} \cdot (E_c / E_f) \cdot (e_m / e_f)}, \quad (38)$$

în componența căreia sunt implicate notațiile: σ_{rc} , σ_f – rezistența de rupere a compozitului, respectiv rezistența de rupere a filamentelor; p_{vf} – procentul filamentelor în compozit; r – raza filamentelor; ν_f – coeficientul contracției transversale a materialului filamentelor; E_c , E_f – modulul de elasticitate longitudinală a compozitului, respectiv cea a materialului filamentelor; e_m , e_f – energia specifică de rupere a materialului matricei, respectiv cea caracteristică materialului filamentelor; B – coeficient care depinde de rezistența de legătură dintre matrice și filamente (de exemplu, în cazul unui compozit cu matrice din alumina – oxid de aluminiu – și filamente din carbură de siliciu, $B = 6$ [58]).

5. CONCLUZII

Articolul și-a propus să evidențieze exprimările matematice, propuse de diferiți cercetători, care pot permite evaluarea rezistenței compozitelor cu armătură dispersată, a compozitelor cu particule și a celor fibre whisker. Se remarcă influența orientării fibrelor în structură, a numărului, al formei și a dimensiunilor particulelor. Nu se neglijează starea suprafețelor componentelor de armare, la contactul cu materialul matricei. Numărul mare al particulelor poate conduce la scăderea capacității portante a compozitului, întrucât suprafața de contact dintre matrice și componentele de armare este mai mică. Pe de altă parte diminuarea distanței dintre particule conduce la creșterea rezistenței compozitului. Relațiile de calcul al rezistenței unui compozit armat cu particule impun experimentări care să justifice valorile acesteia. Alături de cele specificate, nu se neglijează nici natura fibrelor sau a particulelor. Un rol esențial îl joacă și tehnologia de fabricare a compozitului, astfel încât contactul dintre materialul matricei și componentul de armare să fie cât mai intim.

Rezultatele obținute prin experimentări, ilustrate de articole sau de teze de doctorat, pot aduce certitudini pentru utilizări practice și în cazul structurilor acceptate pentru izolare fonică sau termică.

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] **Falascetti Pia - Maria**, *Caratterizzazione meccanica di materiali composite mediante attrezzatura CLC*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, Italia, 2013.
- [2] **Bos Louise Harriëtte**, *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*, Thesis, University Press Facilities, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, 2004.
- [3] **Durbacă C. A.**, *Cercetări teoretice și experimentale privind evaluarea caracteristicilor fizico-mecanice ale plăcilor polimerice de tip sandwich cu miez compus din celule triunghiulare (Theoretical and experimental research on the evaluation of the physical-mechanical characteristics of sandwich-type polymeric plates with a core composed of triangular cells)*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnică din București, 2018.
- [4] **Lepetit A.**, *Élaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyethylene*, Thèse, Université de Lomoges, Canada, 2017.
- [5] **Iatan I. R., Enăchescu Luminița Georgiana, Florescu Gh. P.**, *Solicitări mecanice și termice în plăci compozite stratificate (Mechanical and thermal stresses in laminated composite plates)*, Editura Matrix Rom, București, 2017.
- [6] **Kainer U. K.**, (editor), *Metal matrix composites*, WILEY – VCH Verlag GmbH and Co, KgaA, Weinheim, Germany, 2006.
- [7] **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.
- [8] **Hudișteanu Iuliana, Țăranu N., Isopescu Nicolina Dorina, Bejan Liliana, Axinte A., Ungureanu D.**, *Îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale stratificatelor compozite prin alegerea rațională a materialelor și configurațiilor corespunzătoare (Improving the mechanical characteristics of composite laminates by rational choice of appropriate materials and configurations)*, Revista Română de Materiale, 47, no. 2, 2017, p. 252 - 267.
- [9] **Minoiu Șt.**, *Încercări experimentale pentru determinarea caracteristicilor elastice ale unor materiale compozite (Experimental tests for determining the elastic characteristics of composite materials)*, Buletinul Universității Petrol – Gaze din Ploiești, vol. LII, Seria Tehnică, 2000, no. 2, p. 153 – 162.
- [10] **Al – Bahadly O. A. E.**, *The mechanical properties of natural fiber composites*, Thesis, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2013.
- [11] **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, no. 12, 2020, p. 1 – 20.
- [12] **Wu Ch. H.**, *Advanced civil infrastructure materials (science, mechanics and applications)*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2006.
- [13] **Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N., Trada M.**, *A review on the tensile properties of natural fibre reinforced polymer composites*, Composites_Part B, 42, 2011, p. 856 – 873.
- [14] ******* *Proprietà meccaniche dei composite*
(www.ing.unitn.it/~luttero/.../ProprietaMeccaniche.pdf).
- [15] **Bansal, P. N.** (editor), *Handbook of ceramic composites*, Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 2005
- [16] **Omoniyi T. E., Ajobiewe K. A.**, *Physicos-mechanical properties of wood and non-wood plaster of paris bonded composite ceiling boards*, Journal of Engineering Studies and Research (JESR), 26, nr. 3, 2020, p. 148 – 153.
- [17] **Roșu D.**, *Contribuții teoretice și experimentale la structuri din materiale compozite noi (Theoretical and experimental contributions to new composite structures)*, Teză de doctorat, Universitatea “Transilvania” din Brașov, 2010.

- [18] **Boboc (Căpățână) Ana**, *Contribuții la studiul proprietăților materialelor compozite armate cu țesături și a efectului solicitărilor ciclice asupra acestor proprietăți* (Contributions to the study of the properties of fabric-reinforced composite materials and the effect of cyclic stresses on these properties), Teză de doctorat, Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați, 2019.
- [19] **Natanail R.**, *Cercetări privind concepția și fabricația pieselor din material compozit pentru producția special din industria auto*, Teză de doctorat, Universitatea “Lucian Blaga” din Sibiu, 2011.
- [20] **Mallick K. P.**, *Fiber – reinforced composites – materials, manufacturing and design* (third edition), CRC Press Taylor&Francis Group, New York, USA, 2008.
- [21] **Alămoreanu Elena, Negruț C., Jiga G.**, *Calculul structurilor din materiale compozite* (Calculation of structures from composite materials), Universitatea POLITEHNICA din București, 1993.
- [22] **Alămoreanu Elena, Chiriță R.**, *Bare și plăci din materiale compozite* (Composite bars and plates), Editura Tehnică, București, 1997.
- [23] **Hadăr A.**, *Structuri din compozite stratificate* (Stratified composite structures), Editura Academiei și Editura AGIR, București, 2002.
- [24] **Alămoreanu Elena, Constatinescu D. M.**, *Proiectarea plăcilor compozite laminate* (Design of laminated composite plates), Editura Academiei Române, București, 2005.
- [25] **Türkmen D.**, *Compressive behavior of CFRP laminates exposed in hot – wet environments*, Thesis, University of Leicester, England, 1996.
- [26] **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.
- [27] **Ghfar 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, no. 1, 2006, pp. 227 – 236.
- [28] **Sh. Fu Z., 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, pp. 1179 – 1190.
- [29] **O'Gara F. J., Novak E. G., Wyzgoski G. M.**, *Prediction the tensile strength of short glass fiber reinforced injection molded plastics* (<https://www.google.com/search?q=O%27GARA+F.+J.+Prediction+the+tensile&ie=utf-8&oe=utf-8>).
- [30] **Fu Y. Sh., Feng Q. X., Lauke B., Mai W. V.**, *Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate – polymer composites*, Composites: Part B, 39, 2008, pp. 933 – 961.
- [31] **Tacă C. D., Păunescu Mihaela**, *Materiale compozite* (Composite materials), Editura MatrixRom, București, 2012.
- [32] **Tuttle E. M.**, *Structural analysis of polymeric composite materials*, Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 2004.
- [33] **Kaw K. A.**, *Mechanics of composite materials* (second edition), CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [34] **Talreja R., Singh V. Ch.**, *Damage and failure of composite materials*, Cambridge University Press, USA, New York, 2012.
- [35] **Crookston J. J.**, *Prediction of elastic behavior and initial failure of textile composites*, Thesis, The University of Nottingham, England, May 2004.
- [36] **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 Algerienne Democratique et Populaire, 2005.

MODURI PRACTICE PENTRU EVALUAREA REZISTENȚEI MECANICE ADMISIBILE A COMPOZITELOR ARMATE CU FIBRE TOCATE SAU CU PARTICULE

- [37] **Carcea L.**, *Materiale compozite – fenomene la interfață* (Composite materials - phenomena at the interface), Editura Politehnică, Universitatea Tehnică “Gh. Asachi”, Iași, 2008.
- [38] **Jamali J.**, *Mechanistic failure criterion for unidirectional and random fibre polymer composites*, Thesis, The University of Western Ontario, Canada, 2014.
- [39] **Rotaru (Paraschiv) Florentina**, *Fenomene de degradare la impactul mecanic al structurilor compozite de tip sandwich* (Degradation phenomena at the mechanical impact of sandwich composite structures), Teză de doctorat, Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați, 2018.
- [40] **Slade A. R.**, *Failure analysis of impact-damage metallic poles repaired with reinforced polymer composites*, Thesis, University of Central Florida Orlando, USA, 2012.
- [41] **Vasilie - Oprea Cleopatra, Constantinescu A., Bârsănescu P.**, *Ruperea polimerilor – teorie și aplicații* (Polymer breakdown - theory and applications), Editura Tehnică, București, 1992.
- [42] **Bai J.** (editor), *Advanced fibre – reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*, Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2013.
- [43] **Bataev A. A., Batev A. V.**, *Kompoziționnâe materialî (stroenie, polucienie, primenenie)*, Novosibirskii Gosudarstvennâi Tehnicesckii Universitet, Novosibirsk, 2002.
- [44] **Gheorghe V.**, *Structuri cu rigiditate ridicată, din material compozit, utilizate în construcția de autovehicule* (High stiffness composite structures used in the construction of motor vehicles), Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2013.
- [45] **Bolcu Al.**, *Contribuții la studiul comportamentului mecanic al materialelor compozite, cu aplicații la automobile* (Contributions to the study of the mechanical behavior of composite materials, with applications in automobiles), Teză de doctorat, Universitatea din Craiova, 2018.
- [46] **Gu P., Dao M., Asaro R. J.**, *Structural stability of polymer matrix composite panels in fire*, Marine Structures, 22, 2009, p. 354 – 372.
- [47] **Țocu Florentina**, *Contribuții privind studiul conlucrării plăcilor componente dintr-o structură navală confecționată din materiale compozite* (Contributions regarding the study of the cooperation of the component plates from a naval structure made of composite materials), Teză de doctorat, Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați, 2012.
- [48] **Cho K. H., Rhee J.**, *Vibration in a satellite structure with a laminate composite hybrid sandwich panel*, Composite Structures, 93, 2011, p. 2566 – 2574.
- [49] **Gălățeanu Magdalena**, *Studii asupra materialelor compozite avansate destinate reactoarelor de fuziune nucleară* (Studies on advanced composite materials for nuclear fusion reactors), 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, no. 3, 2018, p. 47 – 56.
- [51] **Drăgan N.**, *Elemente de calcul al eficienței tratamentelor acustice cu material compozit fonoabsorbant pentru cabinele utilajelor tehnologice mobile* (Elements for calculating the efficiency of acoustic treatments with sound-absorbing composite material for the cabins of mobile technological equipment), in Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, **10**, no. 2, 2019, p. 103 – 110.
- [52] **Iașnicu (Stamate) Iuliana, Vasile O., Iatan I. R.**, *The analysis of sound absorbing performances for composite plates containing recycled textile wastes*, U.P.B., Scientific Bulletin, Series D., 78, nr. 1, 2016, p. 213 – 220.
- [53] **Alcântara I., Teixeira – Dias F., Paulino M.**, *Cork composites for the absorption of impact energy*, Composite Structures, 95, 2013, p. 16 – 27.
- [54] **Gomes de Codes M. I., Nogueira R., Sandro de Aranjó Silva A.**, *Influence of operating pressure on water absorption of a polymeric composite applied in oil pipelines*, International Journal of Composite Materials, **10**, no. 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**, no. 1, 2021, p. 1 – 4.
- [56] **Marinciuc M.,** *Charles Augustin Coulomb*, Fizica și Tehnologiile moderne, vol. 6, no. 1 – 2, 2008, pp. 59 – 64.
- [57] **Fu Y. Sh., Feng Q. X., Lauke B., Mai W. V.,** *Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate – polymer composites*, Composites: Part B, **39**, 2008, pp. 933 – 961.
- [58] **Bansal P. N. (editor),** *Handbook of ceramic composites*, Kluwer Academic Publishers, New York, USA, 2005.