

ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ АРМОВАНОГО ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО ВІДШАРУВАННЯ

A. Savin^{1,2}, R. Steigmann¹, M.D. Stanciu², C.I. Moraras³, G. Dobrescu¹

¹Nondestructive testing Department, National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania. E-mail: asavin@phys-iasi.ro

²Faculty of Mechanical Engineering, Transilvania University of Braşov, Romania

³Faculty of Mechanical Engineering, Technical University Gh. Asachi Iasi, Romania

У категорії нових і передових матеріалів композиційні матеріали з армованого вуглецевим волокном пластику (АВВП) використовуються в таких сферах, як конструкційні матеріали в авіонавтиці, транспорті тощо. Двофазна структура АВВП вимагає знання властивостей як волокна, так і матриці. В умовах, коли можливе відшарування відбувається під час використання, це залежить як від властивостей на їх границях, так і від прошарку. Відповідні методи ультразвукового (УЗ) контролю дозволяють визначити швидкість поширення поздовжніх і поперечних хвиль, які використовуються для оцінки модуля пружності E , модуля зсуву G у трьох основних напрямках. Ультразвукове С-сканування з використанням фазованої решітки дозволяє виділити та описати місця з пористістю, які з'являються під час виготовлення композиту або через локальний перегрів. При порівнянні з результатами, отриманими за допомогою динамічного механічного аналізатора (ДМА), виявлено хорошу кореляцію. Ці процедури дозволяють також виявити пошкодження матриці внаслідок використання високої температури або встановити максимальну температуру для використання. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: пластик, армований вуглецевим волокном; неруйнівний контроль, ультразвуковий контроль, динамічний механічний аналізатор

Вступ. Зменшення ваги комплектуючих, що використовуються в авіаційній промисловості, а також в автомобілебудуванні, спрямоване на зменшення споживання енергії та спонукає використовувати композитні матеріали в якості модульних конструктивних елементів. Вибір і використання композитів, пов'язаних з продуктивністю та вартістю [1, 2], є нагальною проблемою. Збільшення терміну експлуатації транспортних засобів і вплив вібрацій та шумів на зовнішню ізоляцію, а також поглинання енергії удару також є проблемами, які стосуються автомобільної промисловості і не тільки її [3].

За результатами аналізу механічних властивостей цих модульних компонентів, а також з'єднань між композитними та металевими конструкціями, з метою попередження поломки, формуються відповідні процедури. Армвані вуглецевим волокном композити (АВВП) використовуються в більшості галузей завдяки їхній низькій щільності, зниженому впливу явищ механічної втоми та високому відношенню міцності до ваги [4, 5].

Однак композити мають низьку ударостійкість у напрямку, перпендикулярному до площини волокна, здатні викликати розшарування/розрив волокна при високих енергіях. Поведінка міжшарових руйнувань композитів потребує експериментального дослідження як армування, так і

матриці. Це можна зробити за допомогою методів неруйнівного контролю на основі ультразвуку, вихрових струмів тощо.

Епоксидна смола є найпоширенішою матрицею для вуглепластиків [6], її властивості кращі, але в процесі старіння вони чутливі до водопоглинання [7] через полярну гідроксильну групу всередині [8]. Незважаючи на те, що ці матеріали використовуються у значній кількості, вони, як і будь-який новий матеріал, мають недоліки, пов'язані з продуктивністю, обробкою та вартістю [9, 10].

Існує багато досліджень, які аналізують явища розшарування в шаруватих композитах, багато з них викликані ударами, але напруження всередині матеріалів, які з'являються протягом їхнього життя і постійно контролюються, визначають момент, коли деталь, конструкція чи вузол більше не можуть задовольняти своїм проектним характеристикам. Стійкі напруження компонентів з'єднання композитів або адгезивів можуть бути не діагностованими причинами, які викликають утворення тріщин [11]. Просторове розташування, а також розміри виробу іноді можуть врятувати композитну конструкцію від поломки.

Метою статті є представлення взаємодоповнюючих результатів (з використанням теоретичних та експериментальних методів), отриманих при

A. Savin – <https://orcid.org/0000-0001-9863-3110>, R. Steigmann – <https://orcid.org/0000-0003-1618-7650>,
M.D. Stanciu – <https://orcid.org/0000-0001-6414-9427>, C.I. Moraras – <https://orcid.org/0000-0001-6300-2255>
© A. Savin, R. Steigmann, M.D. Stanciu, C.I. Moraras, G. Dobrescu, 2024

комплексному дослідженні пружних властивостей композитів, армованих вуглецевими волокнами.

Матеріали та методи. Поведінка АБВП-композитів під навантаженням є корисною для розуміння того, як навантаження впливає на складні АБВП-композитні структури. Зусилля щодо досліджень за допомогою аналітичного моделювання для пояснення результатів, отриманих під час експериментальних випробувань, фактично подвоюються [12]. Під час випробувань можуть з'явитися великі концентратори напружки, що призведе до невідомого змішаного режиму навантаження, змінного вздовж зразка, що може генерувати несподівані результати.

Виготовлення зразків. Композиційні матеріали, запропоновані для теоретичного та експериментального аналізу, належать до типу АБВП, виготовленого з використанням вуглецевих/епоксидних ламінатів, отриманих за технологією автоклавної обробки. Дослідження конструктивної поведінки композитів АБВП показали, що їх властивості залежать від застосованої технології [13, 14]. У [15] представлено метод отримання ламінатів, використаних у випробуваннях, представлених у статті, АБВП з 8-ми шарів тканини полотняного переплетення GG200P-PL1/1 (група SLG) з діаметром волокна 7 мкм Тогауса T300 [16] з різними послідовностями укладання шарів $[0]_8$ і $[(45/0)2]_8$ і смоли ЕТ445. Виготовлена у вигляді дошок розміром 295×205 мм², завтовшки 2,2 мм і з об'ємним коефіцієнтом $V_f = 0,45$, щільністю 1,58 кг/дм³, реалізована конфігурація забезпечує ламінату квазіізотропну структуру з модулем пружності $0,44 \pm 0,03$. У ви-

падку аналізованого композиту полімерна матриця забезпечує адгезію між волокнами та матрицею та надає їй структуру, яка чинить опір, поки волокна не розірвуться. Звичайна тканина забезпечує простий повторюваний малюнок (рис. 1).

Окрім умов роботи та ступеня навантаження, структура композиту, полімерна матриця та розподіл волокон можуть визначати вклад до загального механізму пошкодження на мікроструктурному рівні.

Скінченно-елементний аналіз (CEA). Аналіз скінченних елементів дозволяє отримати детальну інформацію про розподіл напружень і деформацій у композиті в залежності від оптимізації конструкції та її характеристик. Тривимірну графічну модель, створену в SolidWorks, було імпортовано в програмне забезпечення Ansys версії R17.0 (рис. 2).

Для моделювання використовувався метод чотирикутної дискретизації. Дані, наведені в таблиці, були уніфіковані та була введена функція розміру елементів 1 мм для забезпечення точності, отримуючи геометрію перерізу, що має 22505 вузлів і 3936 елементів. Зразок розглядався без розривів, з його поверхні (тієї, що потрапила між торцями) у дослідженні використовувалася лише частина (рис. 2), моделювання проводилося для випробування на розтяг. На рис. 2, б показано напружений стан зразка, що розтягується. Можна спостерігати розподіл напружень по всьому його поперечному перерізу по всьому об'єму з максимальними значеннями на рівні виступів, які продовжуються до центральної області.

Методи. Наявність пористості в композитному матеріалі аналізували за допомогою ультразву-

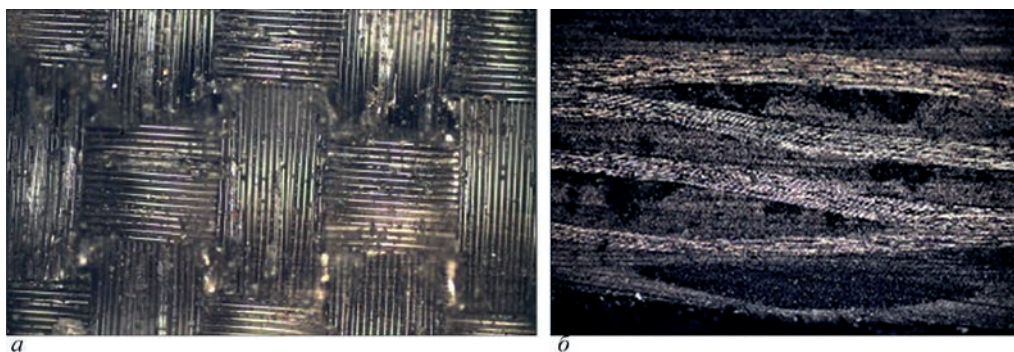


Рис. 1. Досліджувані зразки: зразок передньої поверхні, $\times 10$ (а); переріз під оптичним мікроскопом (б)

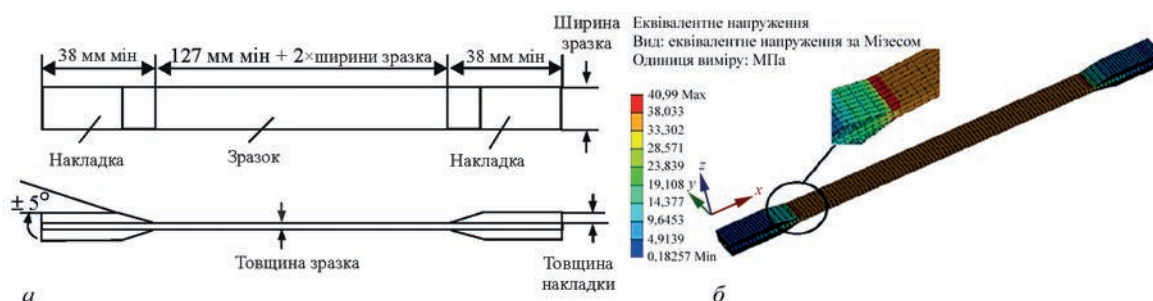


Рис. 2. 3D модель, створена в SolidWorks (а); зразок із сітчастою структурою та зрізом, що аналізується (б)

кового (УЗ) методу, пружні хвилі створювалися в АБВП за допомогою обладнання Phasor XS у поєднанні з матрицею датчиків із центральною частотою 5 МГц і лінією затримки.

Ультразвукове затухання в композитах є мірою ступеня пористості. Аналіз швидкості поширення УЗ хвиль в композитах був отриманий за допомогою перетворювачів, підключених до US PR 5073 Pulser Receiver – обладнання Panametrics.

Оскільки композитні пластини є тонкими, для аналізу відбитих УЗ хвиль була застосована лінія затримки з оргскла. Хвилі стиснення збуджували перетворювачем G5KB GE з центральною частотою 5 МГц, зсувні – перетворювачем MB4Y з центральною частотою 4 МГц, сигнали аналізували на екрані цифрового осцилографа Le Croy Wave Runner 64Xi. Значення модуля пружності та пружних властивостей композиту визначаються за швидкостями поширення хвилі:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}; C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

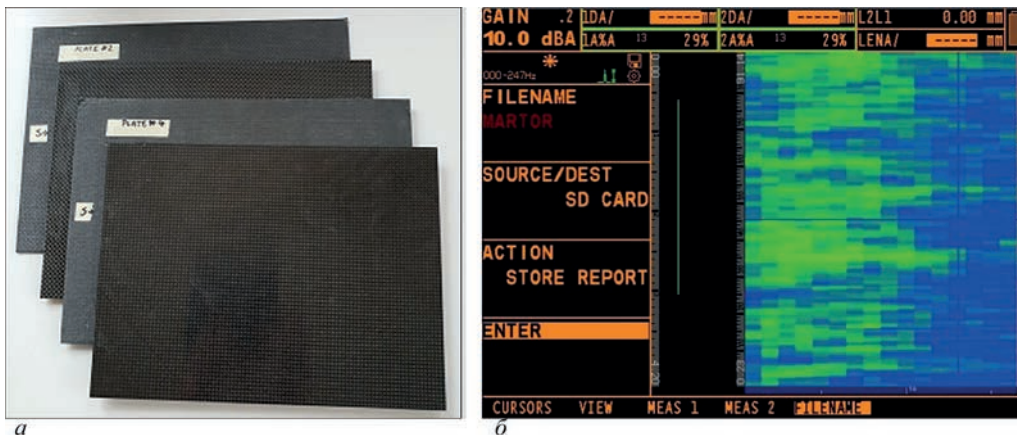


Рис. 3. Зразки АБВП (а), С-скан з модами поширення УЗ хвиль (б)

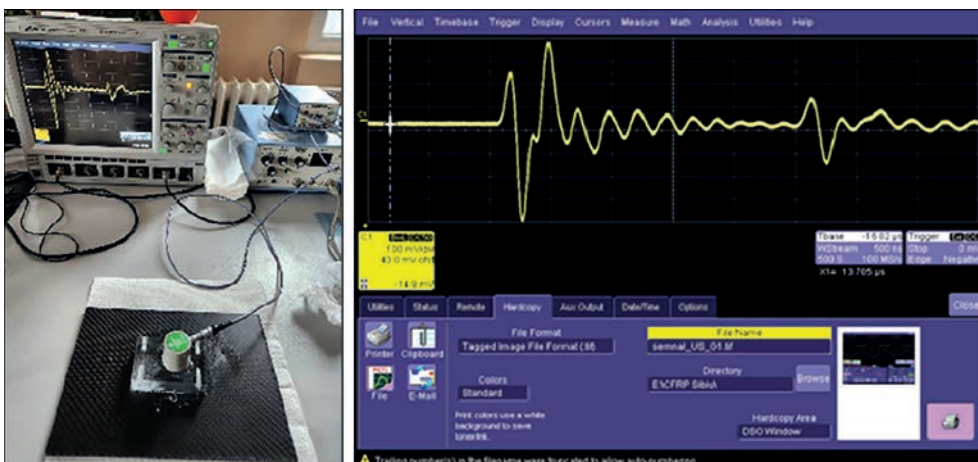


Рис. 4. Визначення швидкості поширення ультразвуку в досліджуваних зразках

де E – модуль пружності; G – модуль зсуву; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – щільність.

Динамічний механічний аналізатор DMA 242C фірми Netzsch (Німеччина) з пристроєм для триточкового згинання з використанням програмного забезпечення Protheus v.4.8.5 було використано для визначення основних характерних величин, модуля пружності вздовж головної осі (E_x , E_y , E_z). Отримані значення порівнювали з тими, що були визначені за допомогою тягових випробувань за класичною процедурою з використанням машини INSTRON E1000 з гідравлічним пристроєм.

Результати експериментів. Ступінь пористості знаходиться в лінійній кореляції з ослабленням УЗ хвиль в композитах і з механічними властивостями, тобто опором зсуву. Підготовлені таким чином пластини (&2.1) сканували з використанням сканування одним обертом ультразвукового перетворювача частотою 5 МГц, який переміщався за допомогою осьового сканера ENCSTD. Процедура, застосована до матеріалу, призводить до аналізу результатів сканування зображень, показаних на рис. 3.

Наявність локалізованої пористості означає порушення суцільності середовища. Можна помітити, що в цьому випадку записані вимірювання показують матеріал без розривів.

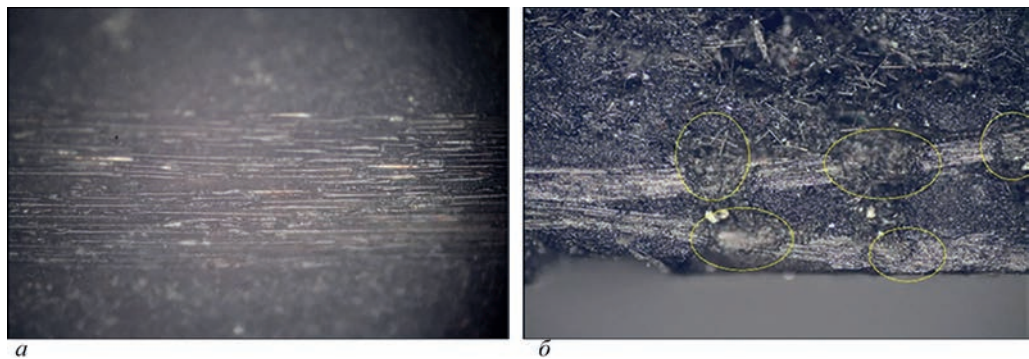


Рис. 5. Зображення під мікроскопом поперечного перерізу досліджуваних зразків ДМА

За допомогою УЗ методики визначення швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі визначено модуль пружності E_2 і модуль зсуву G_{12} . Середня швидкість поширення УЗ хвиль становила $C_1 = 2732$ м/с – для поздовжніх і $C_t = 1937$ м/с – для поперечних хвиль.

Із зразків АБВП, випробуваних УЗ на відсутність розривів, були вирізані зразки розмірами $50 \times 10 \times 2,2$ мм³ для динамічного механічного аналізу ДМА. Ці зразки були проаналізовані оптично, тому що під час процесу різання можуть з'явитися розриви, деякі ламелі можуть змінити свій напрямок орієнтації, деякі волокна можуть розірватися, можуть статися відриви від ламелей. Зразки з цим типом дефектів були видалені (рис. 5, б).

В аналізі ДМА зразок, навантажений коливальною синусоїдальною силою 6Н на різних заданих частотах, надає інформацію про в'язкопружні властивості як функцію частоти, температури та часу. Параметри, отримані під час випробувань, надають інформацію про склоутворення, яке відноситься до T_g (перехід у скло), що є результатом реакції зшивання. Визначення проводили на одній частоті 1 Гц, у температурному діапазоні (25...260 °C).

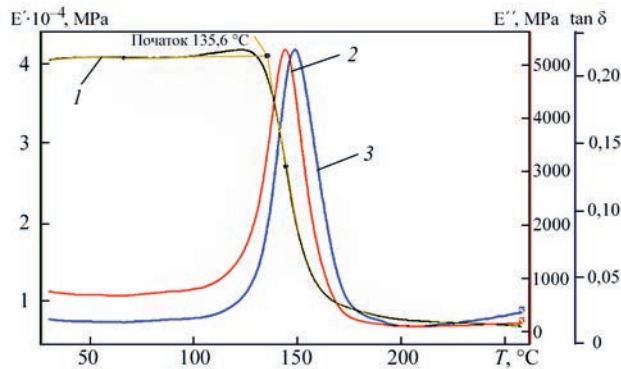


Рис. 6. Результати ДМА для зразка АБВП: 1 – E' ; 2 – E'' ; 3 – $\tan \delta$

Пружні характеристики досліджуваних зразків

E_x , ГПа	E_y , ГПа	E_z , ГПа	ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа
42	40	9	0,30	0,3	0,03	8,2	8,4	5,1

Спостерігається незначне збільшення модуля пружності E' від 40000 до 42000 МПа. Після цього збільшення досягається максимум модуля Юнга, після чого відбувається зменшення з тим самим нахилом модуля пружності E' , так що він залишається постійним навколо значення 180°C. Були виділені механізми зміни пружних і в'язкопружних механічних властивостей: модуль пружності (E'), поведінка композиту в часі при температурних змінах, модуль втрат (E''), коефіцієнт втрат ($\tan \delta$), температура склування ($T_g = 135,6$ °C).

Аналіз ДМА показує зміни динамічного модуля АБВП під навантаженням із температурою наступним чином: модуль втрат відображає адгезію матеріалу; модуль пружності відображає жорсткість матеріалу; співвідношення між модулем втрат і модулем пружності, тобто амортизація матеріалу $\tan \delta = \frac{E''}{E'}$, де δ – фазовий кут напружень і деформацій. Відношення напруги (σ) до деформації (ϵ) під дією динамічного навантаження визначається як комплексний модуль Юнга матеріалу (E^*), який можна виразити наступним чином:

$$E^* = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\delta} = E' + iE'' \quad (2)$$

Основні механічні характеристики зразків композиту E_x , E_y , E_z визначали за графіками ДМА. Коефіцієнти Пуассона ν_{xy} і ν_{yx} були визначені шляхом вимірювання швидкостей УЗ хвиль. Модуль зсуву розраховували тільки за методикою УЗ. Результати представлені в таблиці.

Дані, отримані за допомогою додаткових методів ДМА та випробувань на розтяг, доповнених даними УЗ, дозволяють повністю отримати характеристики композитів з полімерною матрицею, армованою вуглецевими волокнами.

Висновки

Характеристики вуглець-епоксидних композитів можна отримати з використанням ультразвукового методу, який доповнює руйнівний контроль за допомогою динамічного механічного аналізу. Використовуючи С-сканування, можна легко оцінити ділянки з пористістю, що виникли під час виробництва. Для визначення модулів пружності та зсуву, коефіцієнта Пуассона композиційних матеріалів з армуванням з вуглецевого волокна запропоновано використання комбінованих ультразвукових методів, а саме луна-імпульсного – для хвиль стиснення, луна-дзеркального методу – для поперечних хвиль. Чисельні аналізи та додаткові випробування необхідні для різних зразків АВВП, щоб уникнути розривів навколо кріплень і передбачити еволюцію поширення тріщин у процесі руйнування.

Список літератури/References

- Tran, P., Wu, C., Saleh, M. et al. (2021) Composite structures subjected to underwater explosive loadings: A comprehensive review. *Composite Structures*, **263**, 113684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113684>
- Ozkan, D., Gok, M.S., Karaoglanli, A.C. (2020) Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Adv. Struct. Mater.*, **124**, 235–253. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20
- Mathes, V. (2018) The composites industry: Plenty of opportunities in a heterogeneous market. *Reinforced Plastics*, **62**(1), 44–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.05.002>
- Zorko, D., Tavčar, J., Bizjak, M. et al. (2021) High cycle fatigue behavior of autoclave-cured woven carbon fiber-reinforced polymer composite gears. *Polymer Testing*, **102**, 107339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107339>
- Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H. et al. (2018) Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review. *J. Mech. Manuf.*, **1**, 144–154.
- Kaw, A.K. (2006) *Mechanics of composite materials*. 2nd Ed. Taylor and Francis, NY.
- Sang, L., Wang, Y., Wang, C. et al. (2019) Moisture diffusion and damage characteristics of carbon fabric reinforced polyamide 6 laminates under hydrothermal aging. *Composites, Pt A: Applied Science and Manufacturing*, **123**, 242–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.023>
- Ortiz, J.D., Khedmatgozar Dolati, S.S., Malla, P. et al. (2023) FRP-reinforced/strengthened concrete: State-of-the-art review on durability and mechanical effects. *Materials*, **16**(5), 1990. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16051990>
- Hübner, M., Lepke, D., Hardi, E. et al. (2019) Online monitoring of moisture diffusion in carbon fiber composites using miniaturized flexible material integrated sensors. *Sensors*, **19**(8), 1748. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19081748>
- Lei, Y., Kang, Z., Zhang, J. et al. (2022) Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of continuous carbon fiber-reinforced polyamide 6 composites. *Polymer Testing*, **114**, 107704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107704>
- Romanowicz, M. (2012) A numerical approach for predicting the failure locus of fiber reinforced composites under combined transverse compression and axial tension. *Computational Materials Sci.*, **51**(1), 7–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.039>
- Cugnoni, J., Amacher, R., Kohler, S. et al. (2018) Towards aerospace grade thin-ply composites: Effect of ply thickness, fiber, matrix and interlayer toughening on strength and damage tolerance. *Composites Sci. and Technology*, **168**, 467–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.08.037>
- Van de Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P. et al. (2020) Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. *Add. Manuf.*, **31**, 100962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>
- Bhatt, A.T., Gohil, P.P., Chaudhary, V. (2018) Primary manufacturing processes for fiber reinforced composites: History, development & future research trends. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin.*, **330**, 012107. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012107>
- Bergant, Z., Savin, A., Grum, J. (2018) Effects of manufacturing technology on static, multi-frequency dynamic mechanical analysis and fracture energy of cross-ply and quasi-isotropic carbon/epoxy laminates. *Polymers and Polymer Composites*, **26**(5–6), 358–370. DOI: <https://doi.org/10.1177/0967391118798266>
- (2022) *Technical Information. Sigrafil® continuous carbon fiber tow*. Wiesbaden, SGL Group, August 2022.

EVALUATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CFRP COMPOSITES AND MODELING OF THE DELAMINATION PHENOMENON

A. Savin^{1,2}, R. Steigmann¹, M.D. Stanciu², C.I. Moraras³, G. Dobrescu¹

¹Nondestructive testing Department, National Institute of R&D for Technical Physics, Iasi, Romania. E-mail: asavin@phys-iasi.ro

²Faculty of Mechanical Engineering, Transilvania University of Braşov, Romania

³Faculty of Mechanical Engineering, Technical University Gh. Asachi Iasi, Romania

In the category of new and advanced materials, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite materials are used in areas such as structural materials in aeronautics, transport, etc. The bi-phasic structure of CFRP requires knowledge of both fiber and matrix properties. In the conditions where possible delamination's occur during use, these depend both on the properties of the interfaces and of the interlaminar. The appropriate ultrasound (US) techniques allow the determination of the propagation speed of the longitudinal and transverse waves which are used in the evaluation of the elastic modulus E, shear modulus G on the three principal directions. C-scan US using phased array allows the emphasizing and characterization of ones with porosities that appear during composite fabrication or due to local overheating. The results are compared with those obtained by a dynamic mechanical analyzer (DMA), being found a good correlation. These procedures allow also the emphasizing of matrix damages due to high temperature used or establishing maximum temperature for used. 16 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, nondestructive testing, ultrasound, dynamic mechanical analyzer

Отримано 31.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 12.11.2024

Прийнято 20.12.2024