

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(108).20447

С.В. ШАТИЛО

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

ПОРИСТІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИРОДА ТА ШЛЯХИ ЇЇ МІНІМІЗАЦІЇ

В статті розглянуто пористість та супутню гігроскопічність полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з вуглецевого та скловолокна, їх вплив на міцнісні показники. Наведено шляхи мінімізації впливу цих явищ на кінцеві характеристики виробів з цих матеріалів. Проблематика пористості та гігроскопічності конструкцій з ПКМ набуває актуальності з пошуками інженерних рішень із впровадження подібних матеріалів у рідинні системи машин. Розкрито вплив вище названих явищ на характеристики ПКМ на основі скловолокна та вуглецевого волокна, як основних тканин для вироблення композитних деталей у авіаційній промисловості. Наведено ряд технологій для виготовлення деталей з таких матеріалів, описані показники пористості, що вони забезпечують.

Ключові слова: ПКМ, CFRP, GFRP, пористість, гігроскопічність.

Вступ. Авіаційна галузь за останні 40 років досягла впровадження композиційних полімерних матеріалів на основі скловолокна та вуглеволокна (GFRP та CFRP відповідно) на тому рівні, коли 50% і більше від маси літака складають саме композити. Планери сучасних пасажирських на кшталт Boeing 787 та Airbus A350 майже повністю виконані з подібних матеріалів. Легша, жорсткіша альтернатива металам, вони взяли на себе не тільки декоративні, а й силові функції у конструкції літаків.

Втім є у цих матеріалів і недоліки, які обмежують їх ступінь впровадження у рідинні системи літальних апарати, такі як: складність з'єднання труб з подібних матеріалів (торцевий знос), електропровідність (у вуглеволокна), а також пористість і супутня їй гігроскопічність. У даній статті в фокус беруться саме останні два явища, а також основні методи та засоби їх зменшення у кінцевому виробі з ПКМ.

Пористість. Під пористістю полімерів, армованих вуглецевими та склотканинами, загалом мають на увазі розподіл мікроскопічних міжфазних порожнин, що розташовані у матриці між шарами волокон, розкиданих по всьому об'єму деталі (рис. 1.). Такі мікропорожнини є нічим іншим, як результатом виробничого процесу і волокнистої природи тканини [1]. Як вакансії в кристалічній структурі металів, так і порожнини у ПКМ є концентраторами напружень. Повне виключення пористості з матеріалу майже неможливе, а її відносна величина за певними межами може прямо і негативно впливати на механічні властивості деталі, виробленої з CFRP чи GFRP. Так, міжшарова міцність за зсув у виробу з карбону падає на 34% зі збільшенням вмісту пор з 0.55% до 5.60% [2]. Найважливішим же фактором, на який впливає пористість, є стійкість до розшарування, яке може привести до втрати жорсткості деталі, або навіть повного її руйнування. Також пустоти можуть утворитися у результаті потрапляння повітря у зв'язуюче під час його введення у тканину, або ж у процесі викладання шарів препрегу на матриці, в результаті

чого утворюються пустоти. Частково, в залежності від процесу виготовлення деталі, вплив цього фактору можна звести процедурою дегазації зв'язуючого, перед його нанесенням на тканину. Частково повітря із зв'язуючого витягується вакуумом під час виготовлення [1].

На кінцеву пористість матеріалу також сильно впливає плетіння таких тканин: чим більша щільність плетіння волокон, тим менше потенційного простору для утворення пор. Варто зазначити, що дефекти виникають не тільки при виробництві, а й під час транспортування та розкрою матеріалу. Не обережне поводження з тканиною, низька культура виробництва можуть призвести до її механічних пошкоджень, утворень прогалин у тканині. Процес розкроювання скло або карбонового волокна часто призводить до розшарування тканини у місцях зрізу, не обачними рухами можна випадково перемістити волокна, тим самим утворив прогалин у структурі тканини.

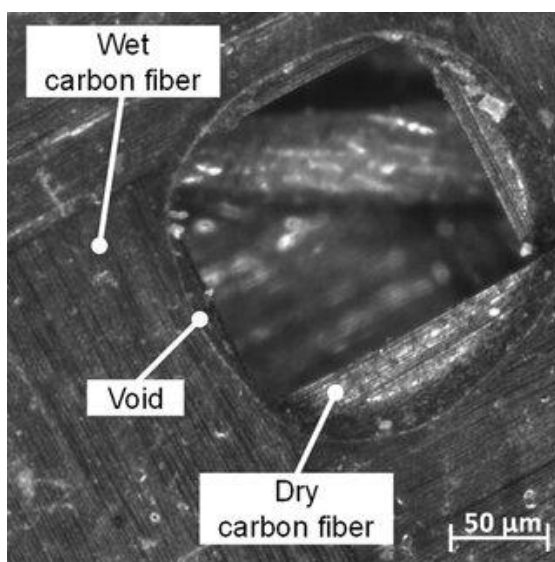


Рис.1. Порожнина між плетінням волокон у карбоновому ПКМ під мікроскопом. [3]

Гігроскопічність. Гігроскопічністю називають властивість матеріалів до просочування рідиною і її утримання. Ця властивість прямо пов'язана з пористістю, а також, у випадку CFRP і GFRP, із армуючим матеріалом, тобто тканиною, через яку, в тому числі, рідина просочується вглиб матеріалу. Поглинання води, або інших рідин, призводить до ще більшого негативного впливу на міцнісні характеристики, пластифікує тканину, чим сильно зменшує довговічність деталі [4]. Дослідження показують, що як мінімум у випадку скловолокна можна спостерігати деградацію границі міцності на 28,5% та 38,4% від вимочування композиту у деіонізованій воді та солоній воді відповідно, протягом 90 днів [5]. Ще одним негативним фактором є те, що вже просочені композити повністю не висихають [6]. Попри це, деталі, що виробляються для авіакосмічної галузі, все одно постійно працюють в широкому діапазоні вологості та температур, у якому піддаються постійним циклам просочування та висихання, що прямо впливає на втому матеріалу [4]. Через такі умови експлуатації у авіакосмічній галузі дуже жорсткі вимоги до пористості у виробі з ПКМ, не більше 1% [7]. У випадку інтеграції подібних матеріалів, наприклад,

у паливну чи гідравлічну системи, це означало б, що трубопровід, або ж елемент агрегату, постійно піддається впливу просочування агресивною робочою рідиною, гідравлічною, або ж паливом, в широкому робочому діапазоні температур, що неодмінно призвело б до передчасного старіння і втрати працездатності подібних деталей у вимогливій та життєво важливій системі.

Технології виробництва, шляхи мінімізації пористості. На сьогоднішній день існує ряд технологій для виробництва деталей з CFRP та GFRP. Для кожного застосування і вимог до деталі можна підібрати відповідну технологію, від майже повністю ручного процесу з нанесення в'язучого на тканину, з подальшим її вакуумуванням, до автоматизованих процесів і спікання у автоклаві. У авіакосмічній індустрії, з огляду до її жорстких умов, в основному використовують, самі дорогі та високорезультативні технології. До таких можна віднести автоклавне спікання (autoclave curing), вакуумна інфузія та RTM (Resin Transfer Molding).

Автоклавне спікання – процес виготовлення деталі з полімерного композиту у автоклавній печі, під високим тиском і температурою. Цей метод вважається найбільш вдалим і дозволяє отримувати високоякісні вироби, з мінімальною пористістю, а гігроскопічність при ньому майже відсутня. Цим методом вдається досягти концентрації пор у матеріалі приблизно на рівні 0,05% [8], що є майже ідеальним вирішенням проблеми пористості та гігроскопічності. До недоліків такої технології можна віднести її вартість. Саме обладнання, автоклав, супутня автоматизація викладання препрегу, AFP (Automated Fiber Placement)/ ATL (Automated Tape Laying). Альтернативою є використання спеціальних «гарячих препрегів». Це робиться для мінімізації фактору людської помилки, так як використання подібних технологій диктує високу культуру виробництва. До того ж, габарити деталі, що виробляється, обмежені габаритами наявного автоклаву.

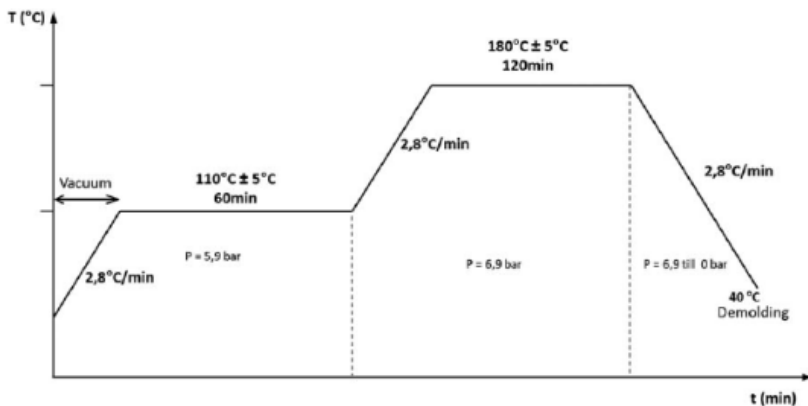


Рис. 2. Цикл автоклавного спікання ПКМ [8]

Вакуумна інфузія – це технологія, при якій у викладені на матриці шари тканини вакуумом всмоктується в'язуче. До переваг такої технології можна віднести її простоту та меншу вимогливість до обладнання, дешевизну. Також вакуумна інфузія не накладає таких жорстких умов на габарити деталі, що виготовляється, як автоклавна. До мінусів можна віднести те, що гарну гладкість

поверхні деталь, виготовлена таким методом, буде мати тільки зі сторони матриці. При цьому технологія дозволяє досягти вмісту пор у кінцевій деталі приблизно до 4,5%, що суттєво більше, ніж при автоклавній [9], вакуум просто не дозволяє досягти такого щільного заповнення в'язучим, як автоклав. Такий показник пористості, при всій зручності використання подібної технології, не дозволяє її використання для потенційного створення на її основі деталей для рідинних систем ЛА.

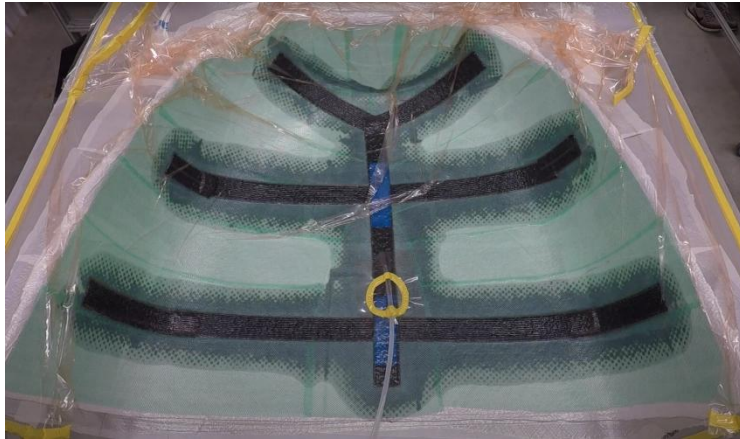


Рис. 3. Процес створення капоту літака малої авіації з карбонового композиту шляхом вакуумної інфузії [10]

RTM – технологія схожа на вище розглянуту вакуумну інфузію, але має суттєві відмінності. На відміну від вакуумної інфузії, в'язуче у тканину заганається не вакуумом, а тиском. Для цієї технології використовуються у якості в'язучого використовується поліестер, вінілестер, або ж епоксидна смола, змішана з каталізатором. Тиск, з яким в'язуче вганяється у армуючу тканину, варіюється від 4 до 10 бар. Затвердіння, в залежності від в'язучого, може проходити або при кімнатній температурі, або ж в печі при 120°C. [11]. В цілому процес RTM є більш складним, ніж інфузія, потребує більш складного обладнання і більш обмежений у розмірі деталей. Між автоклавним спіканням та вакуумною інфузією, технологія RTM є чимось середнім, як за складністю і вимогами для її використання, так і за показниками пористості, які вона надає, приблизно 2% [12], що хоч кращий показник, ніж у інфузії, але при цьому все одно будуть мати місце процеси просочування рідини у деталей.

Висновки. Проблематика пористості та гігроскопії є серйозною перепорою на шляху впровадження полімерних композиційних матеріалів у рідинні системи літальних апаратів. Питання їх руйнівного впливу прямо пов'язано з жорсткими вимогами до даних систем. Наявні методи вироблення деталей з ПКМ хоч і здатні мінімізувати пористість готового виробу, але не здатні повністю її виключити, до того ж ці методи являються фінансово і матеріально вимогливими, що не дозволяє на даний момент створити деталь відповідної якості в умовах і культурі виробництва, відмінній від тих, що мають великі, передові авіаційні корпорації, що змушує шукати вирішення цього питання

іншими шляхами, таким як покриття, лейнери, дослідження нових технологій з виробництва деталей з ПКМ.

Список літератури

1. Bhat, M. R., Binoi, M. P., Surya, N. M., Murthy, C. R. L., & Engelbart, R. W. (2012, May). Non-destructive evaluation of porosity and its effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials. In *AIP Conference proceedings* (Vol. 1430, No. 1, pp. 1080-1087). American Institute of Physics.
2. Hakim, I. A., Donaldson, S. L., Meyendorf, N. G., & Browning, C. E. (2017). Porosity effects on interlaminar fracture behavior in carbon fiber-reinforced polymer composites. *Materials Sciences and Applications*, 8(02), 170.
3. Monticeli, F. M., Daou, D., Dinulović, M., Voorwald, H. J. C., & Cioffi, M. O. H. (2019). Mechanical behavior simulation: NCF/epoxy composite processed by RTM. *Polymers and Polymer Composites*, 27(2), 66-75.
4. Choi, H. S., Ahn, K. J., Nam, J. D., & Chun, H. J. (2001). Hygroscopic aspects of epoxy/carbon fiber composite laminates in aircraft environments. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 32(5), 709-720.
5. He, W., Li, X., Li, P., Fang, S., & Ding, A. (2022). Experimental Investigation on Hygroscopic Aging of Glass Fiber Reinforced Vinylester Resin Composites. *Polymers*, 14(18), 3828. <https://doi.org/10.3390/polym14183828>
6. Бондар Н.В. Міцність авіаційних оболонок із композитів з урахуванням робочого середовища та експлуатаційного пошкодження: дис. ...канд. техн. наук.: Бондар Назарій Вікторович. - К., 2019. – 154 с.
7. Liu, L., Zhang, B. M., Wang, D. F., & Wu, Z. J. (2006). Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite structures*, 73(3), 303-309.
8. Wiggers, H., Ferro, O., Sales, R. D. C. M., & Donadon, M. V. (2018). Comparison between the mechanical properties of carbon/epoxy laminates manufactured by autoclave and pressurized prepreg. *Polymer Composites*, 39(S4), E2562-E2572.
9. Mehdikhani, M., Gorbatiikh, L., Verpoest, I., & Lomov, S. V. (2019). Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 53(12), 1579-1669.
10. Dark Aero, Inc. (2018, October 31). *TIMELAPSE: Resin Infusion for the DarkAero 1 Lower Cowling* [Video]. Youtube. <https://youtu.be/EwLg50yiR10>
11. Mallick, P. K. (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. In *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles* (pp. 229-263). Woodhead Publishing.
12. Hamidi, Y. K., Aktas, L., and Altan, M. C. (November 9, 2004). "Formation of Microscopic Voids in Resin Transfer Molded Composites ." ASME. *J. Eng. Mater. Technol.* October 2004; 126(4): 420–426. <https://doi.org/10.1115/1.1789958>

Стаття надійшла до редакції 22.09.2025

S.V. SHATYLO

VOID CONTENT IN POLYMER COMPOSITE MATERIALS: NATURE AND METHODS OF MINIMIZATION

This article is an insight on the topic void content and associated hygroscopicity of polymer composite materials (PCM), made of carbon and glass fibers, their influence on mechanical strength and provides ways to minimize such influence of those phenomena on final characteristics of parts, made out of these materials. The issue of porosity and hygroscopicity of PCM materials becoming more relevant with more searches of engineering solutions for the introduction of such materials into fluid systems of the vehicles. A disclosure is given about the influence of above-mentioned phenomena on characteristics of carbon and glass fiber PCMs, as those are main fibers used in aviation industry. A number of technologies of manufacturing parts from such fibers is provided and their void content percentage is described.

Keywords: PCM, CFRP, GFRP, void content, hygroscopicity.

Reference

1. Bhat, M. R., Binoy, M. P., Surya, N. M., Murthy, C. R. L., & Engelbart, R. W. (2012, May). Non-destructive evaluation of porosity and its effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials. In *AIP Conference proceedings* (Vol. 1430, No. 1, pp. 1080-1087). American Institute of Physics.
2. Hakim, I. A., Donaldson, S. L., Meyendorf, N. G., & Browning, C. E. (2017). Porosity effects on interlaminar fracture behavior in carbon fiber-reinforced polymer composites. *Materials Sciences and Applications*, 8(02), 170.
3. Monticeli, F. M., Daou, D., Dinulović, M., Voorwald, H. J. C., & Cioffi, M. O. H. (2019). Mechanical behavior simulation: NCF/epoxy composite processed by RTM. *Polymers and Polymer Composites*, 27(2), 66-75.
4. Choi, H. S., Ahn, K. J., Nam, J. D., & Chun, H. J. (2001). Hygroscopic aspects of epoxy/carbon fiber composite laminates in aircraft environments. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 32(5), 709-720.
5. He, W., Li, X., Li, P., Fang, S., & Ding, A. (2022). Experimental Investigation on Hygroscopic Aging of Glass Fiber Reinforced Vinylester Resin Composites. *Polymers*, 14(18), 3828. <https://doi.org/10.3390/polym14183828>
6. Bondar N.V. (2019) Strength of aviation composite shells taking into account operational environment and damage (Doctoral dissertation, National Aviation University).
7. Liu, L., Zhang, B. M., Wang, D. F., & Wu, Z. J. (2006). Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite structures*, 73(3), 303-309.
8. Wiggers, H., Ferro, O., Sales, R. D. C. M., & Donadon, M. V. (2018). Comparison between the mechanical properties of carbon/epoxy laminates manufactured by autoclave and pressurized prepreg. *Polymer Composites*, 39(S4), E2562-E2572.
9. Mehdikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I., & Lomov, S. V. (2019). Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 53(12), 1579-1669.

10. Dark Aero, Inc. (2018, October 31). *TIMELAPSE: Resin Infusion for the DarkAero 1 Lower Cowling* [Video]. Youtube. <https://youtu.be/EwLg50yiR10>

11. Mallick, P. K. (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. In *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles* (pp. 229-263). Woodhead Publishing.

12. Hamidi, Y. K., Aktas, L., and Altan, M. C. (November 9, 2004). "Formation of Microscopic Voids in Resin Transfer Molded Composites." *ASME. J. Eng. Mater. Technol.* October 2004; 126(4): 420–426. <https://doi.org/10.1115/1.1789958>

Shatilo Serhii Volodymyrovych – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State University “Kyiv Aviation Institute”, 1 Lubomyra Huzara Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0002-6963-2885>

Шатило Сергій Володимирович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного університету «Київський авіаційний інститут», проспект Любомира Гузара, 1, м.Київ, 03058, E-mail: nau12@ukr.net <https://orcid.org/0009-0002-6963-2885>