УДК 539.4

Вплив кута укладки шарів композиційного матеріалу на основі вуглецю на його механічні характеристики при чистому розтязі

Тимошенко О.В.; Коваль В.В.; Фам Д.К.; Мусієнко О.С..
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: *В роботі представлені результати експериментальних досліджень по визначенню механічних характеристик (коефіцієнт Пуассона, модуль пружності, границя міцності при розтязі) композиційних матеріалів на основі вуглецю, що мають різне компонування за кількістю шарів та напрямком волокон у ньому. Запропоновано математичну модель, що дозволяє, у першому наближенні, визначати основні механічні характеристики композиційного матеріалу та враховує його структуру (максимальна кількість шарів композитного матеріалу, який було розглянуто в роботі - 7). За допомогою проведеного регресійного аналізу визначено параметри моделі. Проведено порівняння результатів аналітичного розрахунку за запропонованою моделлю з експериментально отриманими величинами механічних характеристик. Показано, що максимальна похибка при цьому не перевищує 12%.*
Ключові слова: механічні характеристики; композиційні матеріали; міцність.

Однією з найбільш важливих проблем, що виникає при проектуванні сучасної авіакосмічної техніки є завдання зменшення ваги її елементів, вузлів та агрегатів без зниження загальної міцності конструкції [1]. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є широке застосування композиційних матеріалів (КМ) на основі вуглецю, зокрема – шаруватих. Але при їх використанні досить актуальним постає питання визначення основних механічних характеристик композита, оскільки вони значною мірою залежать як від кількості шарів так і від їх схеми укладки [2]. Вибір найбільш оптимальної, з точки зору забезпечення міцності конструкції, схеми укладки, для заданого режиму та виду навантаження, дозволяє відповідним чином мінімізувати її вагу[3–7]. В свою чергу, застосування будь-якої композиційної схеми КМ потребує експериментального обгрунтування.

Таблиця 1. Величина факторів у вигляді кута відповідного шару КМ в умовах розтягу

№ листа КМ	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6	Фактор 7	μ	E, МПа	$\sigma_в$, МПа
1	0	40	-40	0	-40	40	0	0,91	75188	1334
2	0	45	-45	0	-45	45	0	0,75	74195	1076
3	0	60	-60	100	-60	60	0	0,35	51862	884
4	100	0	50	100	-50	0	100	0,54	70973	1229
5	90	-50	50	90	50	-50	90	0,25	15977	181
6	90	-45	45	90	45	-45	90	0,26	23919	236
7	90	-30	30	100	30	-30	90	0,36	46570	374
8	100	90	-40	100	40	90	100	0,2	24065	260

Тому актуальнім є визначення залежності, що дозволяє прогнозувати величини механічні характеристики композитного матеріалу в залежності від схеми укладки.

В роботі розглянуто комплекс експериментальних досліджень за результатами яких були визначені механічні характеристики шаруватого КМ на основі вуглецю в залежності від його компонування, для випадку простого розтягу, а саме: μ - коефіцієнт Пуассона, E – модуль пружності, $\sigma_в$ – границя міцності, значення яких наведені в таблиці 1.

В таблиці 1 наведено 8 схем укладок волокон, де кожен шар представлений у вигляді фактора (7 шарів відповідають 7 факторам). Додатково вводиться параметр фактора який представлений у вигляді кута між напрямком дії зовнішнього навантаження та напрямком волокна шару α_i. Зміна кута укладки шару відбувається в межах від -90 до 90 градусів, тому для КМ де певний шар відсутній – параметр цього шару дорівнює 100 градусів .

Експериментальні значення дають змогу, у першому наближенні, побудувати аналітичну модель у вигляді лінійної функції, яка дозволяє визначити основні механічні характеристики КМ та враховує структуру шаруватого композиційного матеріалу:

$$\mu(\alpha_i)\cdot 10^3 = b_0^{\mu} + \sum_1^7 b_i^{\mu}\cdot\alpha_i \tag{1}$$

$$E(\alpha_i) = b_0^{E} + \sum_1^7 b_i^{E}\cdot\alpha_i \tag{2}$$

$$\sigma_B(\alpha_i) = b_0^{\sigma} + \sum_1^7 b_i^{\sigma}\cdot\alpha_i \tag{3}$$

де $b_0^{\mu}, b_i^{\mu}, b_0^{E}, b_i^{E}, b_0^{\sigma}, b_i^{\sigma}$ - параметри матеріалу, що можуть бути визначені на основі регресійного аналізу експериментальних даних з таблиці 1

Визначені параметри моделей (1)–(3) представлені в таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри матеріалу

Параметр / Механічна характеристика	b_0^j	b_1^j	b_2^j	b_3^j	b_4^j	b_5^j	b_6^j	b_7^j
$\mu(\alpha_i)\cdot 10^3$	554,57	0,00	-4,59	-5,92	-5,88	-5,11	0,00	6,14
$E(\alpha_i)$, МПа	3035,03	0,00	-1333,49	-1914,98	-520,67	-1102,69	0,00	1606,19
$\sigma_B(\alpha_i)$, МПа	854,44	0,00	1,93	3,21	-4,58	-9,48	0,00	1,98

В таблиці 2, індекс j приймає значення μ, E, σ відповідно до механічної характеристики, що визначається.

Враховуючи дані з таблиці 2 та (1)–(3), залежності для визначення механічних характеристик набувають наступного вигляду:

$$\mu(\alpha_i)\cdot 10^3 = 554,57 - 4,59\alpha_2 - 5,92\alpha_3 - 5,88\alpha_4 - 5,11\alpha_5 + 6,14\alpha_7 \tag{4}$$

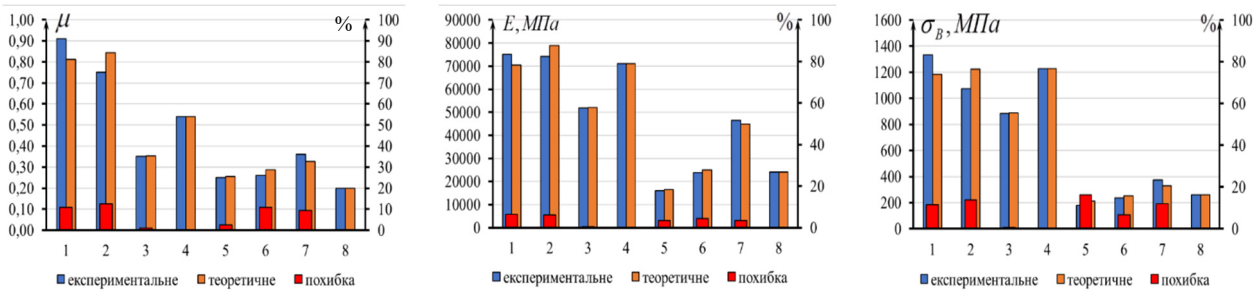
$$E(\alpha_i) = 3035,03 - 1333,49\alpha_2 - 1914,98\alpha_3 - 520,67\alpha_4 - 1102,69\alpha_5 + 1606,19\alpha_7 \tag{5}$$

$$\sigma_B(\alpha_i) = 554,57 - 4,59\alpha_2 - 5,92\alpha_3 - 5,88\alpha_4 - 5,11\alpha_5 + 6,14\alpha_7 \tag{6}$$

Порівняння теоретичних значень згідно з (4)-(6) з експериментальними даними для кожного з листів КМ, що були розглянуті в роботі, наведено на рис. 1.

Таким чином, в роботі були експериментально визначені величини коефіцієнта Пуассона, модуля пружності першого роду та границі міцності для шаруватого КМ на основі вуглецю для різних схем укладки шарів. Запропоновано математичну модель, за допомогою якої можуть бути розраховані величини вищевказаних механічних характеристик матеріалу при простому розтязі, яка враховує схему укладки. Визначені параметри цієї моделі. Проведено порівняння теоретично отриманих значень механічних характеристик з експериментальними даними, результати якого продемонстрували ефективність запропонованої моделі.

Максимальна розрахункова похибка при цьому не перевищувала 11% для прогнозування величини границі міцності, 8% для прогнозування величини модуля пружності, 12% для величини параметра коефіцієнта Пуассона



а) *б)* *в)*

Рис.1. Порівняння експериментальних та розрахункових, відповідно до залежностей (4)-(6), значень за умов чистого розтягу для: а) коефіцієнт Пуассона, б) модуль пружності, в) границя міцності

Список літератури

1. В. М. Маслєй, В. В. Кавун, А. П. Щудро, Ю.В. Сохач, О. Т. Кудреватих, В. Ф. Рожковський,С. І. Москальов, М. Г. Добрушина, А. С. Кулик Дослідження крупногабаритних конструкцій із композиційних матеріалів на терморозміростабільність // Космічна наука і технологія. 2019. Т. 25. № 3, с.32–39.
2. Ю. В. Советова,Ю. Н. Сидоренко, В. А. Скрипняк, Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические характеристики, Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2014, 2(28), 77–89
3. А.Р. Банселл, А.Тионне, С. Камара, Д.Х. Аллен Накопление повреждений и оценка долговечности углепластиковых сосудов высокого давления // Композиты и наноструктуры, 2009, №3, с. 5–17
4. Думанский А.М. Накопление повреждений и деформирование волокнистых композитов // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана «Наука и образование» , 2014, , с. 250–257.
5. Моваггар А. Энергетическая модель усталостной прочности композиционных материалов / А. Моваггар, Г. И. Львов // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Динамика и прочность машин. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 37. – С. 111–122.
6. Чеботарева Е. А. Полимерные композиционные материалы: формирование структуры и влияние её на свойства / Е. А. Чеботарева, Л. Р. Вишняков // Вісник Інженерної академії України. - 2012. - Вип. 2. - С. 157–163.
7. А.В. Нешпор, Л.Р. Вишняков, А.В. Мазная Ударопрочные слоистые полимерные композиционные материалы // Технологические системы, №47/3, 2009, с. 61–66.

Influence of angle of laying of layers of composite material on the basis of carbon on its mechanical characteristics at pure tension

Tymoshenko O.V., Koval V.V., Pham D.Q., Musiienko O.S.

Abstract: *The paper presents the results of experimental studies to determine the mechanical characteristics (Poisson's ratio, modulus of elasticity, tensile strength) of carbon-based composite materials with different compositions according to the number of layers and the direction of the fibers in it. A mathematical model is proposed, which allows, in the first approximation, to determine the main mechanical characteristics of the composite material and takes into account its structure (the maximum number of layers of composite material, which was considered in this work - 7). The parameters of the model were determined by the conducted regression analysis. The results of analytical calculation according to the proposed model are compared with the experimentally obtained values of mechanical characteristics. It is shown that the maximum error does not exceed 12%.*

Keywords. mechanical characteristics; composite materials; strength