

УДК 629.7.01:539.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174025

Визначення впливу відхилень товщини композитного матеріалу на фізико-механічні характеристики при локальному порушенні його суцільності

А. В. Кондратьєв, В. Є. Гайдачук, Т. П. Набокiна, В. О. Коваленко

У період технологічної підготовки і початкових стадій освоєння в серійному виробництві композитних виробів має місце досить велика кількість і різноманітність технологічних дефектів. Рівень цих дефектів часто перевищує допустимий за вимогами конструкторської документації і, отже, призводить до браку виробів. Найбільш характерним технологічним дефектом для композитних конструкцій, армованих безперервними волокнами або тканинними матеріалами, є відхилення товщини формованого композиту від її проектного значення. Іншим видом характерних дефектів є локальні порушення цілісності в дискретних об'ємах полімерних композиційних матеріалів у вигляді порожнин, що виникають при формуванні його паковки в технологічному форматному оснащенні. Проведено аналіз і обґрунтування полів допусків на ці типи технологічних дефектів. Встановлено допуски на відхилення товщини виробу, що формується, від проектного значення. Показано, що вхідний контроль визначає реалізоване в препрезі відхилення товщини від номіналу для одношарового напівфабрикату. Відхилення в товщині паковки від номіналу включає складові, які виникають при її формуванні. Ці складові пов'язані з інтегральними відхиленнями технологічного режиму формування (тиск, температура та їх зміна в часі) від регламентованого відповідною документацією. Отримано аналітичні залежності щодо обґрунтованого призначення полів допусків для фізико-механічних характеристик полімерного композиційного матеріалу, що має відхилення в товщині, при наявності в ньому локальних порушень суцільності у вигляді порожнеч. На відміну від існуючих моделей отримані залежності дозволили оцінити якість технологічних процесів формування напівфабрикатів і виробів з полімерних композиційних матеріалів за рівнем дефектів розглянутого класу. Проведено аналіз впливу дефектів даного класу на фізико-механічні характеристики полімерного композиційного матеріалу. Показано, що при використанні для виготовлення виробу армуючого матеріалу з паспортними полем допуску значення об'ємного вмісту волокон завжди знаходиться в його інтервалі. У той же час відхилення об'ємного вмісту зв'язуючого може виходити за межі свого паспортного поля допуску

Ключові слова: композит, формоутворення, відхилення товщини, порушення цілісності, поля допусків, фізико-механічні характеристики

1. Вступ

Передова сучасна техніка характеризується в усьому світі постійним зростанням обсягів використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), що дозволяють розробникам досягати більш досконалих технічних і економічних

характеристик [1]. Поряд з незаперечними перевагами ПКМ перед іншими конструкційними матеріалами композитам також притаманний і ряд недоліків, в тому числі неможливість створення заздалегідь «бездефектних структур» [2]. Відомо, що різноманітні види дефектів в конструкціях з ПКМ негативно впливають на їх функціональні властивості, особливо – відповідальних виробів різного класу техніки. Елементи композитних конструкцій в процесі виготовлення зазнають різноманітних технологічних впливів, як температурних, так і механічних [3, 4]. Багато з цих дефектів є наслідком недостатнього відпрацювання ряду технологічних процесів в дослідному виробництві та помилок в конструкторській документації [5, 6]. Інша частина дефектів викликана недоробками оснащення, відхиленнями в технологічних режимах, впливом людського фактора безпосередньо у виробництві [7, 8]. Найбільш характерним технологічним дефектом для композитних конструкцій, армованих безперервними волокнами або тканинними матеріалами, є відхилення товщини формованого ПКМ від її проектного значення [9, 10]. Ця невідповідність товщини композиту проектній з'являється при технологічних операціях просочення препрега зв'язуючим або при формуванні паковки і знижує фізико-механічні характеристики (ФМХ) ПКМ в локальній зоні появи цього дефекту і несучу здатність виробу в цілому [11]. Іншим видом характерних дефектів є локальні порушення цілісності в дискретних об'ємах ПКМ у вигляді порожнин, що виникають при формуванні його паковки в технологічному формотворному оснащенні. Локальні порушення цілісності у вигляді пустот є мікроскопічні повітряні порожнини, які утворюються під час формування паковки при неповному видаленні парів розчинника з зв'язуючого [11].

Рівень технологічних дефектів, пов'язаних з цими впливами, часто перевищує допустимий за вимогами конструкторської документації і призводить до значного розкиду ФМХ ПКМ і отже, до браку композитних виробів. Тому аналіз і обґрунтування полів допусків на ці типи технологічних дефектів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У різний час рядом авторів обговорювалися обговорювані види технологічних дефектів композитних конструкцій, наприклад [12–19]. Традиційне моделювання фізичного стану ПКМ полягає в явному представленні розглянутих дефектів в моделі. Так, для дослідження впливу таких дефектів як порожнечі зазвичай використовується теорія включень, в якій включення наділяються нульовими властивостями [12]. Однак такі оцінки виявилися неадекватними в певних випадках, що було показано в роботі [13]. В роботі [13], на відміну від роботи [12], при вивченні дефекту у вигляді порожнини запропоновано для її розміщення локально зміщувати волокно ПКМ. Більш точне врахування впливу порожнечі та її розміщення на ФМХ ПКМ проведено в роботі [10]. В роботі [14] проведено систематичне числове дослідження впливу порожнини на величину розшарування, яке при цьому утворюється. В роботах [15, 16] розглядається двовимірною моделювання порушення цілісності конструктивних елементів з ПКМ. В цих роботах аналізується квазістатичне руйнування шаруватих пластин

при наявності еліптичних пустот між моношарами. У роботах [17–19] наведено аналіз випучування розшарування моношарів прямокутної форми. Робота [20] містить також результати великих досліджень, проведених за допомогою пакетів прикладних програм скінченно-елементного аналізу. У більшості моделей досліджується розвиток «допустимого» відшарування, під яким розуміється дефект, форма і розміри якого дозволяють експлуатувати виріб певний час. Протягом цього часу даний дефект розвивається, збільшуючи свої розміри аж до його руйнування.

Разом з тим, необхідно забезпечити умови виготовлення композитних конструкцій, які б не призводили до значного збільшення розмірів дефектів та їх кількості. Тобто залишати розміри і кількість дефектів в полі допустимих значень протягом всього терміну служби виробів для забезпечення регламентованого розкиду ФМХ ПКМ. В цьому випадку моделювання фізичного стану ПКМ повинно полягати в усередненні неоднорідностей без явного уявлення дефектів в моделі, як це робиться, наприклад в роботах [21, 22]. Так, в роботі [22] усереднення дефекту проводиться через їх об'ємний вміст. Але отримані в цій роботі результати стосуються лише композиційних матеріалів, які одержуються карбонізацією із перетворенням їх у вуглець-вуглецевий матеріал.

Лише такий підхід до моделювання дозволяє провести оцінювання властивостей ПКМ і конструкцій на їх основі в цілому. При цих умовах можна встановити обґрунтовані допуски для ФМХ моношару і паковки композиту, що дозволить оцінити якість його технологічних процесів формування.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є виявлення закономірностей технологічних процесів формування композитів, що забезпечать зниження впливу технологічних дефектів ПКМ на розкид їх ФМХ.

Для досягнення цієї мети було поставлені наступні задачі:

- виявити взаємодію технологічних чинників процесів формування ПКМ та їх сумісний вплив на їх кінцеві ФМХ;
- отримати аналітичні залежності для обґрунтованого призначення полів допусків для ФМХ моношару і паковки композиту, що мають відхилення в товщині, при наявності в них локальних порушень суцільності у вигляді порожнеч.

4. Матеріали і методи досліджень взаємодії технологічних чинників виробництва композитів на їх фізико-механічні характеристики

Дослідження технологічних дефектів ПКМ і причин їх виникнення проведено на основі методів технологічної механіки композитів. При цьому ФМХ однонаправленого ПКМ визначались на основі математичних моделей теорії армування з додаванням у них приростів відповідних характеристик у межах їх паспортного інтервалу допусків. Для структур, що складаються з трьох напрямів армування (0° , $\pm\varphi^\circ$, 90°), поля допусків визначались на основі залежності, що впливає з моделі В. В. Васильєва [22, 23].

5. Виявлення взаємодії технологічних чинників виробництва композитів на їх фізико-механічні характеристики

Товщина моношару δ_0 залежить від технології формування паковки і вихідного її стану [4, 10]. Якщо формування ведеться із просоченням зв'язуючим стрічки – препрега, то в ньому в межах допуску має бути реалізовано об'ємний вміст волокон Θ_f і зв'язуючого Θ_b . В іншому випадку виникає дефект відхилення товщини від номінальної. Дефект виявляється або до початку формування виробу на стадії вхідного контролю, або в готовому виробі [24, 25]. Одиничний переріз фрагмента товщини препрега має вигляд, показаний на рис. 1.

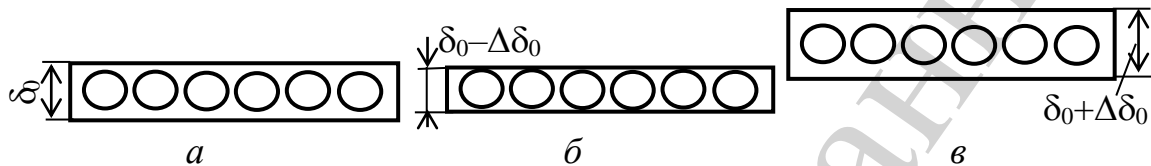


Рис. 1. Можливі види поперечного перерізу препрега після просочення: *a* – нормальне: $\Delta\delta=0$, $\Delta\Theta_b=0$; *b* – з утонщенням: $\Delta\delta<0$, $\Delta\Theta_b<0$; *v* – з потовщенням: $\Delta\delta>0$, $\Delta\Theta_b>0$

У першому випадку він викликаний порушеннями регламентів просочення напівфабрикату (препрега), пов'язаних з відхиленням режимів «тиск – час» (p - τ), «температура – час» (T - τ), спільного порушення режиму (p , T - τ) або відхиленням швидкості просочення, тобто режиму « τ » [5, 9, 12]. Як приклад, ці допуски приведені для вуглецевих стрічок (табл. 1) [26].

Нормальний поперечний переріз має похибку, відповідну допуску, гарантованого постачальником армуючого напівфабрикату $\Delta\delta$. Цей допуск пов'язаний з відхиленням лінійної щільності армуючого напівфабрикату (кількістю ниток на 10 см ширини) і, як наслідок, з об'ємним вмістом армуючого напівфабрикату Θ_f при контрольному (паспортному) виготовленні односпрямованого препрега.

Легко встановлюється зв'язок між приростами товщини і відносним об'ємним вмістом волокон і зв'язуючого.

Таблиця 1

Властивості вуглецевих стрічок і односпрямованих епоксидних углеволоконітів на їх основі

Тип стрічки	Ширина стрічки, мм	Лінійна щільність, г/м	Щільність нитки в стрічці, г/см ³	Кількість ниток на 10 см, не менше	Властивості епоксидного углеволокніта					
					Щільність ρ , г/см ³	Вміст наповнювача Θ_f , % об.	Межа міцності при вигині F , ГПа	Межа міцності при розтягненні F^+ , ГПа	Модуль пружності при вигині E , ГПа	Товщина моношару δ_0 , мм
ЛУ-П	255±25	35±3	1,69	460	1,53	63±4	–	–	165±20	0,10±0,01 0,13±0,02
ЛУ-П-0,1-А	255±20	30±5	1,69	460±25	1,49	62±4	0,7	0,7	157±25	0,1...0,12
ЛУ-П-0,1-Б	255±20	30±5	1,69	460±25	1,49	62±4	0,6	0,7	157±25	0,1...0,12
ЛУ-П-0,2-А	255±20	30±5	1,69	485±25	1,49	62±4	0,7	0,7	157±25	0,11...0,15
ЛУ-П-0,2-Б	255±20	30±5	1,69	485±25	1,49	62±4	0,6	0,7	157±25	0,11...0,15
ЭЛУР-П-А	245±30	30±5	1,71	420±25	1,50	63±4	0,9	0,9	145±(20...25)	0,11...0,13
ЭЛУР-П-Б	245±30	30±5	1,71	420±25	1,50	63±4	0,8	0,8	145±(20...25)	0,11...0,13

Об'єм одиничного конструктивного елемента дорівнює

$$V = \delta \cdot 1 \cdot 1. \quad (1)$$

Приріст об'єму одиничного конструктивного елемента

$$\Delta V = \Delta \delta \cdot 1 \cdot 1. \quad (2)$$

Об'єм одиничного конструктивного елемента складається з об'ємів волокон і зв'язуючого:

$$V = V_f + V_b. \quad (3)$$

Відповідно з (1) і (3) отримаємо

$$\delta = V_f + V_b. \quad (4)$$

У загальному випадку

$$\Delta \delta = \Delta V_f + \Delta V_b. \quad (5)$$

Розділивши (5) на (1) отримаємо:

$$\frac{\Delta \delta}{V} = \frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{\Delta V_f}{V} + \frac{\Delta V_b}{V}$$

або

$$\Delta \bar{\delta} = \Delta \theta_f + \Delta \theta_b. \quad (6)$$

Відомо що [27, 28]

$$\theta_f + \theta_b = 1. \quad (7)$$

В той же час

$$(\theta_f \pm \Delta \theta_f) + (\theta_b \pm \Delta \theta_b) = 1 \pm (\Delta \theta_b + \Delta \theta_f).$$

Бажаний зв'язок між $\Delta \delta$ і приростами $\Delta \theta_f$ і $\Delta \theta_b$ отримаємо з (6):

$$\Delta \delta = (\Delta \theta_f + \Delta \theta_b) \delta. \quad (8)$$

Аналізуючи табл. 1, легко встановити, наприклад, для препрега на основі стрічки ЛУ: $\Delta \delta = \pm 0,01$ мм при $\delta = 0,1$ мм, $\theta_f = 0,63 \pm 0,04$, де $\Delta \theta_f = \pm 0,04$. З (8) отримаємо $\Delta \theta_b = \pm 0,06$.

Отже, можливий випадок, коли при $\Delta\Theta_f=0,04$, $\Delta\Theta_b=0,06$
 $(\theta_f + \theta_b) + (\Delta\theta_f + \Delta\theta_b) = 1,1$ і $(\theta_f + \theta_b) - (\Delta\theta_f + \Delta\theta_b) = 0,9$.

$$(\theta_f + \theta_b) - (\Delta\theta_f + \Delta\theta_b) = 0,9.$$

Таким чином, поле допуску на препрег з даної стрічки становить за об'ємним вмістом волокон $\theta_f = 0,63_{-0,04}^{+0,04}$, а за зв'язуючим $\theta_b = 0,37_{-0,06}^{+0,06}$.

А в загальному випадку $\theta_f = \theta_{f-\Delta\theta_f}^{n+\Delta\theta_f^n}$, $\theta_b = \theta_{b-\Delta\theta_b}^{n+\Delta\theta_b^n}$. При цьому

$$\Delta\delta_0 = \delta_0(\Delta\theta_f^n + \Delta\theta_b^n),$$

де $\Delta\theta_f^n$ і $\Delta\theta_b^n$ – паспортні значення збільшень $\Delta\Theta_f$ і $\Delta\Theta_b$.

Дефект локального порушення цілісності у вигляді порожнин змодельовано веденням в відносний об'ємний вміст компонентів ПКМ – волокон Θ_f і зв'язуючого Θ_f третьої складової – відносного об'ємного вмісту порожнин – $\Delta\Theta_p$, аналогічно роботі [22].

Тоді відповідно до правила сумішей [27, 28] рівність (7) набуде вигляду

$$\theta_f + \theta_b + \theta_p = 1 \tag{9}$$

або

$$\theta_f + \theta_b = 1 - \theta_p = \chi, \tag{10}$$

де $\chi < 1$.

При формуванні структури ПКМ розробник прагне до реалізації в ній максимально можливого відносного об'ємного вмісту волокон, так як відомо, що саме армована складова ПКМ забезпечує композиту високий рівень ФМХ [3, 11, 12]. Однак в залежності від виду розташування волокон в перерізі ПКМ (щільності упаковки) в матеріалі може бути реалізовано цілком певний $\theta_{f\max}$, після перевищення якого він перестане бути монолітним. Його ФМХ спрямовуються до нульових значень (рис. 2) [3, 9, 12].

Відомо, що при ідеальному тетрагональному розташуванні волокон в перерізі ПКМ $\theta_{fcr}=0,785$, а при гексагональному – $\theta_{fcr}=0,907$ [23]. Однак внаслідок завжди наявних в практиці технологічних обмежень, пов'язаних з методами формування виробу і можливими відхиленнями, зазвичай регламентований максимальний відносний об'ємний вміст волокон $\theta_{f\max} < \theta_{fcr}$. Це виключає потрапляння в закритичну область ФМХ ПКМ. Зазвичай $\theta_{f\max}$ лежить в межах 0,55...0,65 [23, 26].

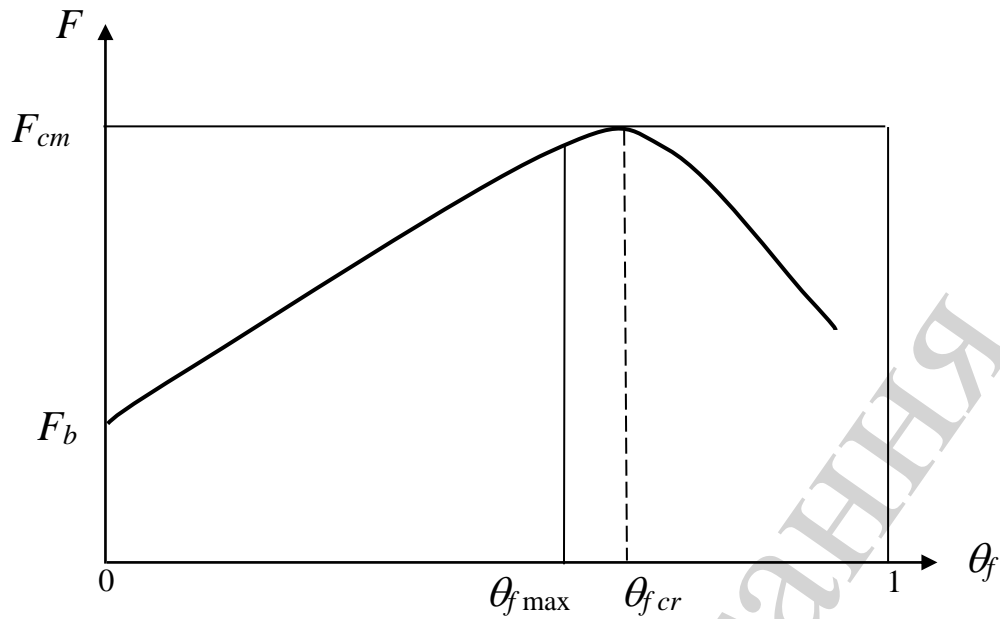


Рис. 2 Умовна залежність межі міцності ПКМ при розтягуванні F_{cm} від відносного об'ємного вмісту волокон Θ_f : F_b – межа міцності зв'язуючого; Θ_{fcr} – критичний відносний об'ємний вміст волокон

ФМХ односпрямованого ПКМ визначимо по наближених формулах на основі теорії армування [23, 28] з додаванням в них збільшень відповідних характеристик в межах їх паспортного інтервалу допусків. Так як наявність порожнеч Θ_p не змінює початкового об'ємного вмісту волокон, то відповідно до (10) ФМХ односпрямованих ПКМ з їх паспортними приростами будуть визначатися формулами із заміною одиниці на $\chi < 1$ в додатках, що відбивають внесок зв'язуючого в дану характеристику.

Модуль пружності односпрямованого ПКМ уздовж волокон

$$(E_x \pm \Delta E_x) = E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n} \cdot \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n}). \quad (11)$$

Тут і далі ΔR_i^n – паспортне відхилення від номіналу R i -ї характеристики.

Коефіцієнт Пуассона при розтягуванні-стисненні вздовж волокон

$$(v_{xy} \pm \Delta v_{xy}) = v_{f-\Delta v_f^n}^{+\Delta v_f^n} \cdot \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + v_{b-\Delta v_b^n}^{+\Delta v_b^n} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n}). \quad (12)$$

Межа міцності при розтягуванні-стисненні вздовж волокон істотно залежить від того, який компонент ПКМ руйнується раніше: волокно або зв'язуюче (матриця) (рис. 3).

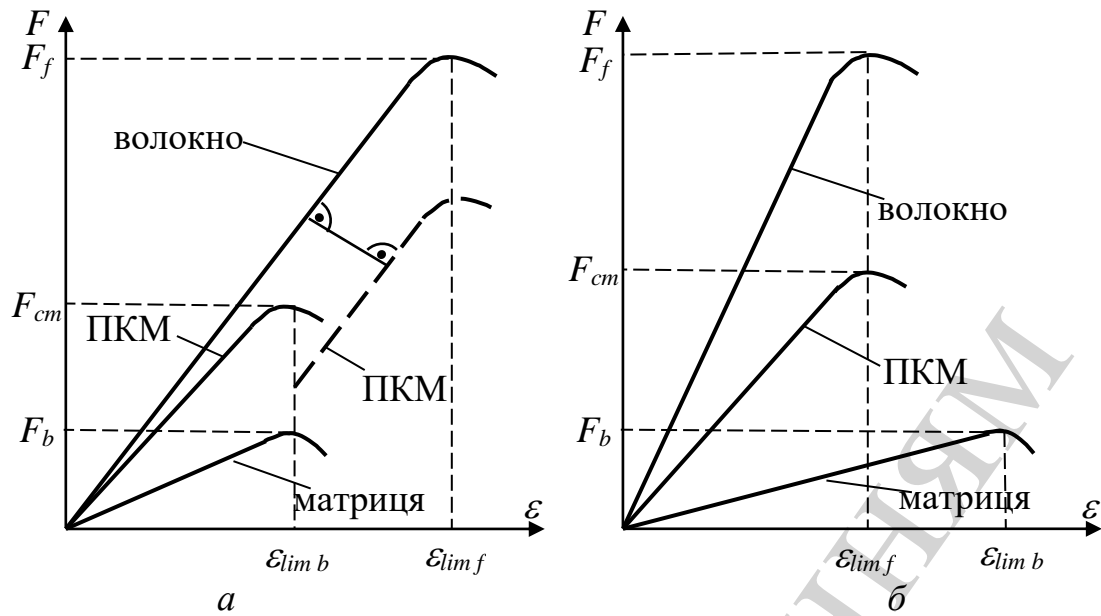


Рис. 3. Умовні діаграми навантаження односпрямованого ПКМ уздовж волокон: *a* – при $\epsilon_{lim b} < \epsilon_{lim f}$; *б* – при $\epsilon_{lim b} > \epsilon_{lim f}$

Якщо гранична деформація зв'язуючого менша ніж гранична деформація волокон $\epsilon_{lim f}$ (рис. 3, *a*), то першою руйнується матриця [30]. Тоді

$$\begin{aligned} (F_x \pm \Delta F_x) &= \frac{F_{b-\Delta F_b^n}^{+\Delta F_b^n}}{E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n}} \left[E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n} \cdot \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} \right] + \\ &+ E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n} \left(\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} \right) \approx F_{b-\Delta F_b^n}^{+\Delta F_b^n} \frac{(E_x \pm \Delta E_x)}{E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n}}; \end{aligned} \quad (13)$$

При $\epsilon_{lim b} > \epsilon_{lim f}$ (рис. 3, *б*)

$$\begin{aligned} (F_x \pm \Delta F_x) &= F_{f-\Delta F_f^n}^{+\Delta F_f^n} \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + \\ &+ \frac{E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n}}{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n}} \left(\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} \right) \approx F_{f-\Delta F_f^n}^{+\Delta F_f^n} \frac{(E_x \pm \Delta E_x)}{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n}}. \end{aligned} \quad (14)$$

У формулах (11)–(14) позначено: E_b , ν_b , F_b – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і межа міцності зв'язуючого (матриці); E_f , ν_f , F_f – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і межа міцності волокна; $\pm R^n$ – паспортне відхилення R -ої властивості в допустимих межах.

Модуль зсуву односпрямованого ПКМ G_{xy} і межа його міцності на зсув F_{xy} визначаються залежністю

$$(G_{xy} \pm \Delta G_{xy}) = \frac{G_{f-\Delta G_f^n}^{+\Delta G_f^n} \cdot G_{b-\Delta G_b^n}^{+\Delta G_b^n}}{G_{b-\Delta G_b^n}^{+\Delta G_b^n} \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + G_{f-\Delta G_f^n}^{+\Delta G_f^n} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n})};$$

$$(F_{xy} \pm \Delta F_{xy}) = F_{xyb-\Delta F_{xyb}^n}^{+\Delta F_{xyb}^n} \left[\theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + \frac{G_{b-\Delta G_b^n}^{+\Delta G_b^n}}{G_{f-\Delta G_f^n}^{+\Delta G_f^n}} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n}) \right]. \quad (15)$$

Так як волокна армуючого матеріалу і матриця ізотропні, що дозволяє вважати $G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}$ і $G_b = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)}$ [9, 26]. Крім того в паспортах на армуючі матеріали і зв'язуюче частіше наводяться допуски на їх модулі пружності та коефіцієнти Пуассона, ніж на G_f і G_b замість формули (15) можна користуватися аналогом цієї формули [9, 28]:

$$(G_{xy} \pm \Delta G_{xy}) = \frac{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n} \cdot E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n}}{2 \left[E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n}) (1 + \nu_{b-\Delta \nu_b^n}^{+\Delta \nu_b^n}) + E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n} (1 + \nu_{f-\Delta \nu_f^n}^{+\Delta \nu_f^n}) \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} \right]}. \quad (16)$$

$$(F_{xy} \pm \Delta F_{xy}) = F_{xyf-\Delta F_{xyf}^n}^{+\Delta F_{xyf}^n} \left[\theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + \frac{E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n} (1 + \nu_{f-\Delta \nu_f^n}^{+\Delta \nu_f^n})}{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n} (1 + \nu_{b-\Delta \nu_b^n}^{+\Delta \nu_b^n})} \right]. \quad (17)$$

Модуль пружності односпрямованого ПКМ поперек волокон при розтягванні-стисненні визначається формулою

$$(E_y \pm \Delta E_y) \approx \frac{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n}}{\theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n} + \frac{E_{f-\Delta E_f^n}^{+\Delta E_f^n}}{E_{b-\Delta E_b^n}^{+\Delta E_b^n}} (\chi - \theta_{f-\Delta \theta_f^n}^{+\Delta \theta_f^n})}. \quad (18)$$

Межа міцності односпрямованого ПКМ поперек волокон при розтягванні-стисненні з урахуванням форми волокна наближено можна визначити за формулою [9, 28]:

$$(F_y \pm \Delta F_y) = 0,7 F_{b-\Delta F_b^n}^{+\Delta F_b^n}. \quad (19)$$

У разі формування паковки з односпрямованих препрегів ФМХ її структури, що складається з трьох напрямків армування: вздовж напрямку волокон $\varphi_0=0^\circ$, під кутом $\pm\varphi$, поперек волокон $\varphi_{90}=90^\circ$ визначається формулами [9, 23, 27, 28]:

$$\begin{aligned} (E_x \pm \Delta E_x) &= \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta\delta_o)n} \left[(B_{11} \pm \Delta B_{11}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})} \right]; \\ (E_y \pm \Delta E_y) &= \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta\delta_o)n} \left[(B_{22} \pm \Delta B_{22}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{11} \pm \Delta B_{11})} \right]; \\ (G_{xy} \pm \Delta G_{xy}) &= \frac{(B_{33} \pm \Delta B_{33})}{(\delta_0 \pm \Delta\delta_o)n}; (v_{xy} \pm v_{xy}) = \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})}; \\ (v_{yx} \pm v_{yx}) &= \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})}{(B_{11} \pm \Delta B_{11})}, \end{aligned} \quad (20)$$

де $(B_{ij} \pm \Delta B_{ij})$ – узагальнені жорсткості багат шарового пакета (пакування) і їх прирощення в осях ортотропії. При цьому сумарна кількість відповідних цим кутах моношарів дорівнює $n_0 + 2n_{\pm\varphi} + n_{90} = n$.

У разі трьох напрямків армування ($n_0, 2n_{\pm\varphi}, n_{90}$)

$$\begin{aligned} (B_{11} \pm \Delta B_{11}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta\delta_o)}{\left(1 + v_{12-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}^n}\right)} \left\{ n_0 (E_1 \pm \Delta E_1^n) + n_{90} (E_2 \pm \Delta E_2^n) + \right. \\ &+ 2n_\varphi \left[(E_1 \pm \Delta E_1^n) \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) + [(E_2 \pm \Delta E_2^n) \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \\ &+ 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21-\Delta v_{21}^n} \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \\ &\left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} (B_{22} \pm \Delta B_{22}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta\delta_o)}{\left(1 + v_{12-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}^n}\right)} \left\{ n_0 (E_2 \pm \Delta E_2^n) + n_{90} (E_1 \pm \Delta E_1^n) + \right. \\ &+ 2n_\varphi \left[(E_1 \pm \Delta E_1^n) \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + [(E_2 \pm \Delta E_2^n) \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \\ &+ 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21-\Delta v_{21}^n} \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \\ &\left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right] \right\}; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
(B_{33} \pm \Delta B_{33}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left(1 + v_{12-\Delta v_{12}}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n}\right)} \left[(n_0 + n_{90})(G_{12} \pm \Delta G_{12}) \times \right. \\
&\times \left(1 + v_{12-\Delta v_{12}}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n}\right) + \\
&+ 2n_\phi \left\{ \left[(E_1 \pm \Delta E_1^n) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) - 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n} \right] \times \right. \\
&\times \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \\
&\left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12-\Delta v_{12}}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n}\right) \cos^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right\} \right]; \tag{23}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(B_{12} \pm \Delta B_{12}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left(1 + v_{12-\Delta v_{12}}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n}\right)} \left[(n_0 + n_{90})(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n} + \right. \\
&+ 2n_\phi \left\{ \left[(E_1 \pm \Delta E_1^n) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) \right] \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \\
&+ (E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n} \left[\sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) \right] - \\
&\left. \left. - (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12-\Delta v_{12}}^{+\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21-\Delta v_{21}}^{+\Delta v_{21}^n}\right) \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right\} \right]. \tag{24}
\end{aligned}$$

Тут від напрямку осі пружності 1 відраховується кут армування φ . Ця вісь відповідає напрямку x , а вісь пружності 2 – напрямленню y . У формулах (21) – (24) знак допуску на товщину моношару $\Delta\delta_0$ визначається кінцевим значенням товщини пакування: при $\delta_{form} > \delta_{th}$ знак $\Delta\delta_0$ позитивний, при $\delta_{form} < \delta_{th}$ – негативний. У цих формулах $\Delta\delta_0$ дорівнює

$$\Delta\delta_0 = \frac{\delta_{form} - \delta_{th}}{n}, \tag{25}$$

де δ_{form} – товщина паковки після формування; δ_{th} – розрахункова товщина паковки, що визначається паспортним значенням моношару без урахування відхилень від номіналу, помножена на число моношарів.

6. Результати досліджень взаємодії технологічних чинників виробництва композитів на їх фізико-механічні характеристики

Визначимо математичне очікування і поле допуску модуля пружності одноступованого ПКМ уздовж волокон за формулою (11), який формується зі стрічки ЛУ-П. Відповідно до табл. 1 $\theta_f \pm \Delta\theta_f^n = 0,63 \pm 0,04$. Завдавши $\Theta_p = 0,1$ і $\chi = 1 - \theta_p$, а також $E_b = (3,3 \dots 3,58)$ ГПа і $E_f = (200 \dots 250)$ ГПа [26], отримаємо математичне очікування $E_b = 3,44$ ГПа, $\pm \Delta E_b = 0,14$ ГПа і математичне очікування $E_f = 225$ ГПа, $\pm \Delta E_f = 25$ ГПа.

Підставивши ці значення в (11), отримаємо для ПКМ з наявністю відносної кількості пустот $\Theta_p=0,1$ ($\chi=0,9$) отримаємо

$$\left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\max} = 168,61 \text{ ГПа}, \left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\min} = 118,76 \text{ ГПа},$$

що відповідає полю допуску $\pm\Delta E_x=24,93$ ГПа при математичному очікуванні $\pm E_x=143,68$ ГПа

Для модуля пружності односпрямованого ПКМ при відсутності порожнеч ($\Theta_p=0$, $\chi=1$) з формули (11) отримаємо:

$$\left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\max} = 168,97 \text{ ГПа}, \left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\min} = 119,09 \text{ ГПа}.$$

Відносна втрата $E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}$ при наявності пустот становить

$$\left(\Delta E_x\right)_{\max} = \left[1 - \frac{\left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\chi=0,15\max}}{\left(E_{x-\Delta E_x}^{+\Delta E_x}\right)_{\chi=0\max}}\right] \cdot 100\% = \left(1 - \frac{168,61}{168,97}\right) \cdot 100\% = 0,21\%;$$

$$\left(\Delta E_x\right)_{\min} = \left(1 - \frac{118,76}{119,09}\right) \cdot 100\% = 0,28\%.$$

Можна очікувати, що відносні втрати ФМХ односпрямованого ПКМ уздовж волокон будуть неістотними [29]. Так, для межі міцності односпрямованого ПКМ при значеннях $F_{f-\Delta F_f}^{+\Delta F_f} = 2,1_{-0,1}^{+0,1}$ ГПа [26] і колишніх полях допуску $E_{f-\Delta E_f}^{+\Delta E_f} = 225_{-25}^{+25}$ ГПа, $E_{b-\Delta E_b}^{+\Delta E_b} = 3,44_{-0,14}^{+0,14}$ ГПа отримаємо $\left(\Delta F_x\right)_{\max} = 0,14\%$ і $\left(\Delta F_x\right)_{\min} = 0,23\%$.

Значення $\left(\frac{\max}{\max}\right)$ відповідає підстановці в (11) $-\Delta\theta_f^n$, $(E_f + \Delta E_f^n)$ і $(E_b + \Delta E_b^n)$,

а значенням $\left(\frac{\min}{\min}\right)$ $+\Delta\theta_f^n$, $(E_f - \Delta E_f^n)$ і $(E_b - \Delta E_b^n)$.

Відносні втрати ФМХ односпрямованого ПКМ поперек його волокон при всіх колишніх полях допусків для $\Theta_p=0,1$

$$\left(\Delta E_y\right)_{\max} = 31,29\%, \text{ а } \left(\Delta E_y\right)_{\min} = 41,71\%.$$

Отримані результати свідчать про більш істотний вплив розглянутих технологічних чинників процесів формування односпрямованого ПКМ поперек волокон на відносні втрати його ФМХ. Це підтверджую деякі висновки роботи [29]

7. Обговорення результатів досліджень взаємодії технологічних чинників виробництва композитів на їх фізико-механічні характеристики

При виготовленні препрега з паспортним полем допусків $\Delta\Theta_f$ значення завжди знаходиться в інтервалі $-\Delta\theta_f^n \leq \Delta\theta_f \leq \Delta\theta_f^n$ в той час як $\Delta\Theta_b$ може виходити за межі інтервалу паспортних значень

$$-\Delta\theta_b^n \leq \Delta\theta_c \leq \Delta\theta_b^n. \quad (26)$$

Це має місце при нерегламентованому значення тиску між валками при прокатці препрега (перепресуванні) $p > [p]$, або при підвищеній в'язкості зв'язуючого в момент просочення $\eta_b > [\eta_b]$.

В'язкість зв'язуючого може бути вище регламентної, якщо температура прокатки менше регламентованої $T < [T]$. Нарешті, нерівність (26) може також мати місце, якщо в процесі прокатки армуючого напівфабрикату між валками швидкість менша ніж регламентована $V < [V]$.

Отже, (26) може мати місце:

- при $p = [p]$, але $T < [T]$, (причина – низька T), так як при цьому $\eta_b > [\eta_b]$;
- при $p > [p]$, $T = [T]$, (причина – високе p);
- при $p < [p]$, але $T > [T]$, (причина – закид T), так як при цьому $\eta_b < [\eta_b]$.

Нерівність (26) має місце при $\Delta\delta_0 = \delta_0(\Delta\theta_f^n - \Delta\theta_b)$, де $\Delta\theta_f^n$ – паспортне значення $\Delta\Theta_f$; $\Delta\theta_b$ – значення $\Delta\Theta_b$ в результаті прокатки армуючого напівфабрикату (препрега).

При недостатньому пресуванні

$$\Delta\theta_b > \Delta\theta_b^n. \quad (27)$$

Відповідність недостатньо просоченого армуючого наповнювача паспортним даними перевіряється при вхідному контролі зважуванням партії його зразків довжиною 1 м при заданій ширині ($b \mp \Delta b$). Розділивши середню масу партії зразків на площу $S = (b \pm \Delta b)(1 \pm \Delta)$, де Δ – допуск на відрізану ширину зразка в 1 м, отримаємо лінійну щільність ($\rho \mp \Delta\rho$) [м/г], відповідну регламентованої в паспорті на поставку армуючого матеріалу. Лінійна щільність ($\rho \mp \Delta\rho$) повинна відповідати регламентованим в паспорті значенням. Якщо вона менше цього значення, значить кількість ниток на 10 см ширини перевищує його паспортне значення і навпаки.

Наприклад, для стрічки ЛУ $[\rho \mp \Delta\rho] = 35 \pm 3$ г/м (табл. 1). При вхідному контролі партії зразків виявилось, що $(\rho \mp \Delta\rho) = 35 \pm 8$ г/м. Отже, кількість ниток в стрічці перевищує відповідне паспортну значення 460 штук на 10 см.

Як зазначалося вище, збільшення відносного об'ємного вмісту волокон в ПКМ підвищує його ФМХ, якщо це значення $\theta_f < \theta_{fcr}$. При досягненні θ_{fcr} ПКМ перестає бути монолітним, так як відносного об'ємного змісту зв'язуючого $\theta_b = (1 - \theta_f)$ буде недостатнім для повного покриття поверхні волокон. У зв'язку з цим перевищення лінійної щільності над паспортним значенням є неприпустимим. При цьому постачальник прагне забезпечити максимально наближене до θ_{fcr} , мабуть $\theta_{fmax} = [\theta_f + \Delta\theta_f]$. Тобто для стрічки ЛУ $\theta_{fmax} = (63+4) \%$. При $(\rho \mp \Delta\rho) > [\rho \mp \Delta\rho]$, наприклад, для ЛУ $(\rho \mp \Delta\rho) = 34 \pm 6$ г/м ФМХ ПКМ будуть нижче гарантованих паспортом, наприклад, модуль пружності при вигині $E < (165 \pm 20)$ ГПа (табл. 1).

Якщо споживачеві поставляється препрег, в паспорті вказується регламентоване значення його товщини при формуванні моношару $[\delta_0 \pm \Delta\delta_0]$ і очікувані (гарантовані) ФМХ ПКМ. Так, наприклад, для епоксидного вуглепластика ЛУ-П-0,1-А (див. табл. 1) гарантується при $[\delta_0 \pm \Delta\delta_0] = 0,1 \dots 0,12$ мм межі міцності при розтягуванні $F^+ = 0,7$ ГПа і при вигині $F = 0,7$ ГПа і модуль пружності при вигині $E = 157 \pm 25$ ГПа [26, 30]. При цьому $[\theta_f \pm \Delta\theta_f] = 0,62 \pm 0,4$.

При вхідному контролі відповідність паспортним характеристикам перевіряється випробуванням виготовлених з поставленого препрега партії зразків за технологією, що забезпечує $[\theta_f \pm \Delta\theta_f]$ шляхом реалізації їх товщини, рівної $\delta = (\delta_0 \pm \Delta\delta_0)n$ і відповідних паспортному значенню ФМХ ПКМ з передбаченими для них допусками (табл. 1).

Поле допуску будь-якої i -ї характеристики $\pm \Delta R_i$ ПКМ визначається при завданні (регламентації) параметра χ і відомих паспортних значеннях полів допусків, що входять в характеристику R_i компонентів односпрямованого ПКМ – волокон і зв'язуючого.

У формулах (19)–(25) відхилення параметрів ФМХ моношару $\pm \Delta R_i^n$ відповідає допустимим паспортним значенням. Якщо модуль відхилення товщини моношару $\Delta\delta_0$ може бути обґрунтовано прийнятий постійним для будь-якого моношару паковки, то така гіпотеза стосовно відхилення в i -м шарі $\Delta\varphi_i$ є вельми грубою при ручному викладенні моношарів пакування. Однак при автоматизованому викладенні $\Delta\varphi_i$ може бути прийнято постійним, визначеним полем допуску, регламентованим для даного обладнання, рівним $[\pm \Delta\varphi]$.

При обумовлених вище умовах залежності (21)–(24) дозволяють визначити поле допуску будь-якої ФМХ з (20) як

$$\Delta R_i = \frac{(R + \Delta R) - (R - \Delta R)}{2} \quad (28)$$

для подальшого прийняття рішення про допустимість відхилення ФМХ.

Встановлені також поля допусків на порушення суцільності ПКМ у виробі у вигляді пор (порожнеч) викликає незначне зниження ФМХ ПКМ при дії статичних навантажень на виріб в експлуатації. Однак пористість знижує тріщиностійкість виробу, що призводить до зниження довговічності виробу [9, 20, 22, 23].

8. Висновки

1. Виявлено та досліджено взаємодію технологічних чинників процесів формування ПКМ та їх сумісний вплив на їх кінцеві ФМХ. Показано, що вхідний контроль визначає реалізоване в препрезі відхилення товщини від номіналу для одношарового напівфабрикату ПКМ. Відхилення в товщині паковки від номіналу включає складові, які виникають при її формуванні. Ці складові пов'язані з інтегральними відхиленнями технологічного режиму формування (тиск, температура та їх зміна в часі) від регламентованого відповідною документацією). Якщо армуючий матеріал у вигляді препрега пройшов вхідний контроль, то дефекти у вигляді відхилення товщини від номіналу, що виникають в процесі виготовлення виробів з ПКМ і вимірювані після його формування, призводять до невідповідності ФМХ паспортних значень.

2. На основі формул теорії армування отримані поля допусків на фізико-механічні властивості моношару і паковки ПКМ, що мають відхилення в товщині, при наявності в них локальних порушень суцільності у вигляді порожнеч. Проведено аналіз впливу наявності пустот на зміну полів допусків «теоретичного безпористого ПКМ».

Отримані залежності дозволяють оцінити якість технологічних процесів формування напівфабрикатів і виробів з полімерних композиційних матеріалів за рівнем розглянутого класу дефектів класу.

Література

1. Slyvyns'kyu, V., Gajdachuk, V., Kirichenko, V., Kondratiev, A. (2011). Basic parameters' optimization concept for composite nose fairings of launchers. 62nd International Astronautical Congress, IAC 2011. Red Hook, NY: Curran, 9, 5701–5710.
2. Joffre, T., Miettinen, A., Wernersson, E. L. G., Isaksson, P., Gamstedt, E. K. (2014). Effects of defects on the tensile strength of short-fibre composite materials. *Mechanics of Materials*, 75, 125–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.04.003>
3. Slyvynskyi, V. I., Sanin, A. F., Kharchenko, M. E., Kondratyev, A. V. (2014). Thermally and dimensionally stable structures of carbon-carbon laminated composites for space applications. 65nd International Astronautical Congress, IAC 2014. Toronto, Canada, 8, 5739–5751.

4. MIL-HDBK-17-3F. Composite materials Handbook (2002). Vol. 3. Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. Department of Defense Handbook.
5. Kondratiev, A., Prontsevych, O. (2018). Stabilization of physical-mechanical characteristics of honeycomb filler based on the adjustment of technological techniques for its fabrication. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (95)), 71–77. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143674>
6. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 6, 89–96.
7. Barabash, A. V., Gavril'chenko, E. Y., Gribkov, E. P., Markov, O. E. (2014). Straightening of sheet with correction of waviness. *Steel in Translation*, 44 (12), 916–920. doi: <https://doi.org/10.3103/s096709121412002x>
8. Fomin, O., Kulbovsky, I., Sorochinska, E., Saprionova, S., Bambura, O. (2017). Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 11–18. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>
9. Гайдачук, А. В., Гайдачук, В. Е., Кондратьев, А. В., Коваленко, В. А., Кириченко, В. В., Потапов, А. М. (2015). Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов. Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 263.
10. Talreja, R. (2013). Studies on the failure analysis of composite materials with manufacturing defects. *Mechanics of Composite Materials*, 49 (1), 35–44. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-013-9318-6>
11. Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International, 611.
12. Berryman, J. G. (1994). Role of Porosity in Estimates of Composite Elastic Constants. *Journal of Energy Resources Technology*, 116 (2), 87–96. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2906023>
13. Huang, H., Talreja, R. (2005). Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65 (13), 1964–1981. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.02.019>
14. Ricotta, M., Quresimin, M., Talreja, R. (2008). Mode I Strain Energy Release Rate in composite laminates in the presence of voids. *Composites Science and Technology*, 68 (13), 2616–2623. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.04.028>
15. Chen, H.-P. (1991). Shear deformation theory for compressive delamination buckling and growth. *AIAA Journal*, 29 (5), 813–819. doi: <https://doi.org/10.2514/3.10661>
16. Yin, W.-L., Sallam, S. N., Simtses, G. J. (1986). Ultimate axial load capacity of a delaminated beam-plate. *AIAA Journal*, 24 (1), 123–128. doi: <https://doi.org/10.2514/3.9231>

17. Kim, H.-J. (1997). Postbuckling analysis of composite laminates with a delamination. *Computers & Structures*, 62 (6), 975–983. doi: [https://doi.org/10.1016/s0045-7949\(96\)00290-8](https://doi.org/10.1016/s0045-7949(96)00290-8)
18. Muthurajan, K. G., Sankaranarayanan, K., Tiwari, S. B., Rao Nageswara, B. (2006). Post-buckling of a Thin Film Strip Delamination in a Composite Laminate. *Trends in Applied Sciences Research*, 1 (1), 48–60. doi: <https://doi.org/10.3923/tasr.2006.48.60>
19. Kim, J.-S., Cho, M. (2003). Efficient Higher-Order Shell Theory for Laminated Composites with Multiple Delaminations. *AIAA Journal*, 41 (5), 941–950. doi: <https://doi.org/10.2514/2.2031>
20. Бохоева, Л. А. (2007). Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 192.
21. Nemat-Nasser, S., Hori, M. (1999). *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. Elsevier.
22. Gaidachuk, V. E., Kondratiev, A. V., Chesnokov, A. V. (2017). Changes in the Thermal and Dimensional Stability of the Structure of a Polymer Composite After Carbonization. *Mechanics of Composite Materials*, 52 (6), 799–806. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9631-6>
23. Vasiliev, V. V., Morozov, E. V. (2007). *Advanced Mechanics of Composite Materials*. Elsevier, 504. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-045372-9.x5000-3>
24. Воробей, В. В., Маркин, В. Б. (2006). Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Новосибирск: Наука, 400.
25. Stumpff, P. L. (2001). Visual Analysis, Nondestructive Testing, and Destructive Testing. *Composites*, 958–963. doi: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003463>
26. Михайлин, Ю. А. (2008). Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ, 822.
27. Hu, N. (Ed.) (2012). *Composites and Their Properties*. doi: <https://doi.org/10.5772/2816>
28. Harris, B. (1999). *Engineering Composite Materials*. London: The Institute of Materials, 317.
29. Slyvynskiy, V. I., Alyamovskiy, A. I., Kondratjev, A. V., Kharchenko, M. E. (2012). Carbon honeycomb plastic as light-weight and durable structural material. 63th International Astronautical Congress, IAC 2012. Red Hook, NY: Curran, 8, 6519–6529.
30. Kondratiev, A. V., Gaidachuk, V. E., Kharchenko, M. E. (2019). Relationships Between the Ultimate Strengths of Polymer Composites in Static Bending, Compression, and Tension. *Mechanics of Composite Materials*, 55 (2), 259–266. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09808-x>