

Упруго-прочностные характеристики монослоев *in situ* в композиционном пакете

© А.И. Олейников¹, Т.А. Кузьмина²

¹ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский, 140180, Россия

²МФТИ, г. Долгопрудный, 141701, Россия

При расчете тонкостенных конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в качестве упруго-прочностных характеристик их монослоев принимаются данные, полученные в результате испытаний соответствующего отдельно заподимеризованного однонаправленного листа. Свойства такого листа существенно отличаются от характеристик монослоя, заподимеризованного и работающего вместе с соседними слоями разной ориентации в составе композиционного пакета. В статье представлены результаты решения задачи об определении упругих и прочностных характеристик монослоев по данным прямых испытаний на растяжение — сжатие образцов ПКМ из деталей-свидетелей. Рассмотрены ПКМ, монослои которых имеют одинаковые или различные характеристики. Даны формулы для расчета механических свойств монослоев в составе многонаправленного композиционного пакета. Проведено сравнение результатов расчетов с данными испытаний. Использование действительных характеристик монослоев позволяет рассчитывать реальное поведение ПКМ в конструкции, связать ее поверочный и проектировочный расчеты.

Ключевые слова: слоистые композиты, монослой, упругость, прочность

Введение. Результаты испытаний образцов из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) свидетельствуют о существенном отличии упруго-прочностных свойств слоя в изолированном виде и в составе пакета из слоев разной ориентации [1–5]. Расчеты конструкции из многонаправленных ПКМ на основе характеристик изолированного однонаправленного слоя могут быть сопряжены с большими погрешностями. Некоторые подходы к учету этого различия представлены, например, в [6–10].

Полимерный композиционный материал и конструкция из него изготавливаются и оптимизируются одновременно. Вследствие чего характеристики монослоев оказываются, строго говоря, уникальными и присущими только этому конкретному изделию, те же характеристики отличают далее в процессе эксплуатации и конструкцию. Способ, основанный на прямых испытаниях образцов ПКМ из деталей-свидетелей, представляется наиболее верным для нахождения свойств монослоев в составе пакета. Для типовых ПКМ, симметрично армированных в четырех направлениях, минимальное число искомым характеристик монослоя равно десяти: четыре упругие технические константы, пять разрушающих напряжений и толщина монослоев.

Задача определения характеристик монослоев из свойств пакета является обратной задачей, которая вообще некорректна. В частности, полученным в эксперименте с пакетом данным может отвечать неединственный набор различных упруго-прочностных характеристик монослоев. В то же время, малым изменениям данных испытаний пакета могут отвечать большие изменения свойств монослоев. Регуляризация решения обратной задачи может быть достигнута на основе простых моделей монослоя, которые, с одной стороны, достаточно полно описывают его поведение, а с другой — определяются минимальным числом параметров.

В [11] разработан метод определения упруго-прочностных характеристик монослоев *in situ* в композиционном пакете по данным прямых испытаний на растяжение — сжатие образцов ПКМ из деталей-свидетелей.

Цель данной работы — представить результаты применения метода определения упруго-прочностных характеристик монослоев в типовых композиционных пакетах ПКМ из высокомодульных волокон.

Формулы для расчета упругих характеристик монослоев в составе пакета. Здесь и далее рассматриваем типовые композиционные пакеты $(0, \pm\varphi, 90)$, $\varphi = 45^\circ$, высокомодульных ПКМ типа углепластика. В монослоях этих материалов модуль упругости поперек волокон и модуль сдвига в плоскости слоя намного меньше по сравнению с модулем упругости вдоль волокон, так что первый коэффициент матрицы жесткости является определяющим [12, 13]. Возможны два характерных случая соотношения упругих свойств монослоев в пакете. В первом случае все слои в отношении упругих свойств одинаковы, это обычный случай, обозначим его как случай А. Во втором случае (Б) характеристики упругости слоев по отношению друг к другу могут быть различными. Очевидно, что второй случай является общим и включает в себя первый как частный случай. В обоих случаях предполагается, что толщины монослоев известны.

В случае А для нахождения продольного модуля упругости E_ψ^\pm слоев $\psi = -\varphi, 0, +\varphi, 90^\circ$ по измеренным модулям упругости \bar{E}_ψ^\pm пакета в направлении ψ можно использовать любую из следующих формул [11]:

$$E_0^\pm = \bar{E}_0^\pm \left\{ \frac{1}{H_0 + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_{90})} \right\}; \quad (1)$$

$$E_{90}^\pm = \bar{E}_{90}^\pm \left\{ \frac{1}{H_{90} + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_0)} \right\}; \quad (2)$$

$$E_{\varphi}^{\pm} = \frac{\bar{E}_{\varphi}^{\pm}}{4} \left\{ \frac{1}{H_0 + H_{\varphi} / (2 + H_{\varphi} / H_{90})} + \frac{1}{H_{90} + H_{\varphi} / (2 + H_{\varphi} / H_0)} + \frac{2}{H_{\varphi}} - \frac{2}{H_0 + H_{90} + 2H_0H_{90}/H_{\varphi}} \right\}, \quad (3)$$

где $H_{\psi} = h_{\psi} / H$ — относительная толщина монослоя ψ , H — толщина пакета в целом.

В формулах (1)–(3) через \bar{E}_0^{\pm} , \bar{E}_{90}^{\pm} , \bar{E}_{φ}^{\pm} обозначены экспериментально найденные значения модулей упругости пакета при его одноосном растяжении (+) или сжатии (–) в направлениях армирования 0, 90 и φ , соответственно.

Следует отметить, что формулы (1)–(3) весьма просты и готовы к непосредственному применению. Нахождение модулей монослоев сводится к определению из эксперимента лишь одной из величин \bar{E}_{ψ}^{\pm} , например \bar{E}_0^{\pm} .

В общем случае Б, когда опытные данные \bar{E}_0^{\pm} , \bar{E}_{90}^{\pm} , \bar{E}_{φ}^{\pm} таковы, что левые части (1)–(3) существенно различны, для нахождения характеристик упругости монослоев в составе пакета следует воспользоваться следующими соотношениями [11]:

$$E_{\varphi}^{\pm} = \frac{\sqrt{(\bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} B_{\pm})^2 + 12 \bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} - 2 \bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} B_{\pm}}}{2 H_{\varphi} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi (4 - \bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} B_{\pm}^2)}, \quad (4)$$

$$(B_{\pm} = 4 / \bar{E}_{\varphi}^{\pm} - 1 / \bar{E}_0^{\pm} - 1 / \bar{E}_{90}^{\pm});$$

$$E_0^{\pm} = \left[\bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} - 4 A_{90}^{\pm} H_{\varphi} E_{\varphi}^{\pm} \cos^4 \varphi + \sqrt{(\bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm})^2 + 16 \bar{E}_0^{\pm} \bar{E}_{90}^{\pm} (H_{\varphi} E_{\varphi}^{\pm})^2 \sin^4 \varphi \cos^4 \varphi} \right] / 2 H_0 \bar{E}_{90}^{\pm}; \quad (5)$$

$$E_{90}^{\pm} = \bar{E}_{90}^{\pm} / H_{90} - \frac{2 H_{\varphi} E_{\varphi}^{\pm} (H_0 / H_{90}) E_0^{\pm} \sin^4 \varphi}{H_0 E_0^{\pm} + 2 H_{\varphi} E_{\varphi}^{\pm} \cos^4 \varphi}. \quad (6)$$

По сравнению с (1)–(3) формулы (4)–(6) сложнее, для нахождения характеристик упругости монослоев в пакете требуется определить из эксперимента все три величины \bar{E}_0^{\pm} , \bar{E}_{90}^{\pm} и \bar{E}_{φ}^{\pm} . Тем не менее эти формулы также имеют конечный вид и готовы к непосредственному применению.

Формулы для расчета прочностных свойств монослоев в составе пакета. Для случая А при нахождении пределов прочности монослоя ψ в составе пакета по его испытаниям на одноосное растяжение — сжатие используются следующие соотношения [11]:

$$X_0^\pm = \frac{\sigma_0^\pm}{H_0 + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_{90})}; \quad (7)$$

$$X_{90}^\pm = \frac{\sigma_{90}^\pm}{H_{90} + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_0)}; \quad (8)$$

$$X_\varphi^\pm = \frac{\sigma_\varphi^\pm}{4} \left\{ \frac{1}{H_0 + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_{90})} + \frac{1}{H_{90} + H_\varphi / (2 + H_\varphi / H_0)} + \frac{2}{H_\varphi} - \frac{2}{H_0 + H_{90} + 2H_0H_{90}/H_\varphi} \right\}; \quad (9)$$

$$Y_\psi^\pm = \frac{E_\psi^\pm \cos^4(\psi - \alpha_1)}{\bar{E}_{\alpha_1}^\pm} \sigma_{\alpha_1}^\pm \left[\sin^2(\psi - \alpha_1) + m_{2\psi}^\pm |\sin(\psi - \alpha_1) \cos(\psi - \alpha_1)| \right]; \quad (10)$$

$$S_\psi^\pm = Y_\psi^\pm / m_{2\psi}^\pm; \quad (11)$$

$$m_{2\psi}^\pm = \left[\sigma_{\alpha_2}^\pm \sin^2(\psi - \alpha_2) - \sigma_{\alpha_1}^\pm \frac{\bar{E}_{\alpha_2}^\pm \cos^4(\psi - \alpha_1)}{\bar{E}_{\alpha_1}^\pm \cos^4(\psi - \alpha_2)} \sin^2(\psi - \alpha_1) \right] : \left[\sigma_{\alpha_1}^\pm \frac{\bar{E}_{\alpha_2}^\pm \cos^4(\psi - \alpha_1)}{\bar{E}_{\alpha_1}^\pm \cos^4(\psi - \alpha_2)} |\sin(\psi - \alpha_1) \cos(\psi - \alpha_1)| - \sigma_{\alpha_2}^\pm |\sin(\psi - \alpha_2) \cos(\psi - \alpha_2)| \right]. \quad (12)$$

В выражениях (7)–(12) X_ψ^\pm , Y_ψ^\pm и S_ψ^\pm — искомые пределы прочности монослоя в составе пакета соответственно при растяжении — сжатии вдоль и поперек волокон и при сдвиге в плоскости монослоя; σ_0^\pm , σ_{90}^\pm , σ_φ^\pm , $\sigma_{\alpha_1}^\pm$, $\sigma_{\alpha_2}^\pm$, $\bar{E}_{\alpha_1}^\pm$ и $\bar{E}_{\alpha_2}^\pm$ — установленные в результате испытаний пределы прочности и модули упругости пакета соответственно в направлениях армирования 0, 90, φ и под углом α_1 и α_2 к слою 0. Для случаев растяжения — сжатия пакета под углом α_1 или α_2 проч-

ность пакета определяется разрушением матриц двух монослоев, включая разрушение матрицы монослоя ψ [14].

Отметим, что формулы (7)–(9) аналогично (1)–(3) также весьма просты в применении.

Пределы прочности Y_{ψ}^{\pm} и S_{ψ}^{\pm} монослоя зависят более сложно от прочностей $\sigma_{\alpha_1}^{\pm}$, $\sigma_{\alpha_2}^{\pm}$ пакета и его модулей упругости $\bar{E}_{\alpha_1}^{\pm}$, $\bar{E}_{\alpha_2}^{\pm}$. Однако, как и в классическом случае, все искомые прочности не зависят от характеристик упругости монослоев. В формулах (7)–(9) это видно непосредственно, в (10)–(12) — модули упругости сокращаются.

Обычно принимают, что все слои не только в отношении упругих, но и прочностных свойств одинаковы: $X_0^{\pm} = X_{90}^{\pm} = X_{\varphi}^{\pm}$, $Y_0^{\pm} = Y_{90}^{\pm} = Y_{\varphi}^{\pm}$, $S_0^{\pm} = S_{90}^{\pm} = S_{\varphi}^{\pm}$, поэтому нахождение Y_{ψ}^{\pm} и S_{ψ}^{\pm} сводится к определению $\sigma_{\alpha_1}^{\pm}$ и $\sigma_{\alpha_2}^{\pm}$ только для одной пары α_1 , α_2 , а для нахождения X_{ψ}^{\pm} достаточно установить из эксперимента только одну из величин σ_{ψ}^{\pm} , например σ_0^{\pm} .

В общем случае опытные данные могут быть таковыми, что левые части выражений (7)–(12) для монослоев неодинаковой ориентации являются существенно различными, т. е. соответствующие прочности монослоев $\psi = -\varphi, 0, +\varphi, 90^\circ$ неодинаковы. Тогда при нахождении Y_{ψ}^{\pm} и S_{ψ}^{\pm} можно также продолжать использовать соотношения (10)–(12), но уже для трех пар α_1 , α_2 . При этом в отличие от случая А величины Y_{ψ}^{\pm} и S_{ψ}^{\pm} становятся зависимыми и от характеристик упругости монослоев, которые находят согласно формулам (4)–(6), но не от самих модулей E_{ψ}^{\pm} , а только от их отношений друг к другу. От этих отношений зависят также прочности X_{ψ}^{\pm} монослоев:

$$X_0^{\pm} = \frac{\sigma_0^{\pm}}{H_0 + H_{\varphi} / \left[2E_0^{\pm} / E_{\varphi}^{\pm} + (E_0^{\pm} / E_{90}^{\pm}) (H_{\varphi} / H_{90}) \right]}; \quad (13)$$

$$X_{90}^{\pm} = \frac{\sigma_{90}^{\pm}}{H_{90} + H_{\varphi} / \left(2E_{90}^{\pm} / E_{\varphi}^{\pm} + (E_{90}^{\pm} / E_0^{\pm}) (H_{\varphi} / H_0) \right)}; \quad (14)$$

$$X_{\varphi}^{\pm} = \frac{\sigma_{\varphi}^{\pm}}{4} \left\{ \frac{E_{\varphi}^{\pm}}{\bar{E}_0^{\pm}} + \frac{E_{\varphi}^{\pm}}{\bar{E}_{90}^{\pm}} + \frac{2}{H_{\varphi}} - \frac{2E_{\varphi}^{\pm}}{H_0 E_0^{\pm} + H_{90} E_{90}^{\pm} + 2H_0 E_0^{\pm} H_{90} E_{90}^{\pm} / (H_{\varphi} E_{\varphi}^{\pm})} \right\}. \quad (15)$$

Формулы (13)–(15) являются конечными и непосредственно готовы к применению в расчетах.

Пример расчета упруго-прочностных характеристик монослоев в составе пакета. Сравнение с экспериментом. В [15] для пакета монослоев композиционного материала СУСОМ с укладкой $(0_6 / \pm 45_2 / 90_1)$ были проведены испытания на одноосное растяжение — сжатие в направлении слоев (0) и определен модуль упругости \bar{E}_0^\pm этого пакета. В [15] также приведены свойства упругости отдельно заподимеризованного однонаправленного материала СУСОМ, модуль Юнга которого в направлении волокон обозначим E_u^\pm . Используем данные \bar{E}_0^\pm для определения модулей упругости монослоев в этом пакете по формуле (1). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модули упругости пакета \bar{E}_0^\pm , монослоев E_0^\pm
и однонаправленного материала E_u^\pm

$\frac{\bar{E}_0^+}{\bar{E}_0^-}$, ГПа	$\frac{E_0^+}{E_0^-}$, ГПа	$\frac{E_u^+}{E_u^-}$, ГПа	$\frac{\delta E_u^+}{\delta E_u^-}$, %
$\frac{93,54}{89,3}$	$\frac{158,29}{151,12}$	$\frac{161,64}{131,17}$	$\frac{2}{13}$

Согласно данным, приведенным в табл. 1, модули E_0^\pm монослоев в пакете отличаются от модулей E_u^\pm в однонаправленном композите, а именно: при растяжении модуль упругости E_0^+ несколько меньше E_u^+ , а при сжатии — E_0^- существенно больше E_u^- . При растяжении в сравнении с модулем E_0^+ относительная погрешность модулей δE_u^+ незначительна — немногим больше 2 %, при сжатии δE_u^- ее значение более 13 %.

На рис. 1 приведены зависимости эффективного модуля упругости $\bar{E}_{\alpha t}^\pm$ данного пакета при его одноосном нагружении под углом α к направлению слоев (0). Эти зависимости рассчитывались по формуле (7) из [13] при E_0^\pm и E_u^\pm . На рис. 1 видно, что теоретические значения $\bar{E}_{0t}^\pm(E_0^\pm)$ в отличие от $\bar{E}_{0t}^\pm(E_u^\pm)$ совпадают с экспериментальными данными [15] как при растяжении, так и при сжатии.

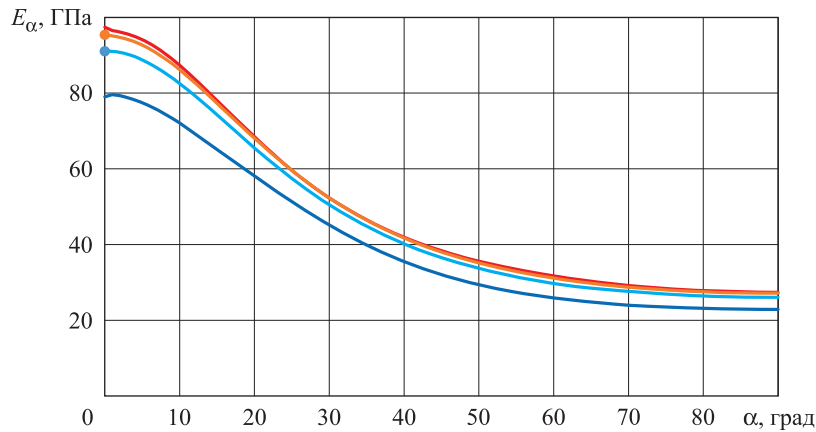


Рис. 1. Эффективный модуль упругости $\bar{E}_{\alpha t}^{\pm}$ пакета ПКМ ($0_6 / \pm 45_2 / 90_1$) в направлении α его одноосного растяжения — сжатия, рассчитанные по модулям упругости монослоев в пакете E_0^{\pm} и в однонаправленном листе E_u^{\pm} :

$$\text{—} \bar{E}_{\alpha t}^+ (E_u^+), \text{—} \bar{E}_{\alpha t}^- (E_0^+), \text{—} \bar{E}_{\alpha t}^- (E_u^-), \text{—} \bar{E}_{\alpha t}^+ (E_0^-);$$

●, ● — модули упругости пакета \bar{E}_0^{\pm} по данным испытаний [15]

Для рассматриваемого пакета в [15] были проведены испытания на разрушение при одноосном нагружении в направлении слоев (0) и определено разрушающее напряжение σ_0^{\pm} , а также приведены характеристики прочности изолированного однонаправленного материала СУСОМ, прочность которого в направлении волокон обозначим X_u^{\pm} . Используем данные σ_0^{\pm} для определения прочности X_0^{\pm} монослоя в этом пакете по формуле (7). Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пределы прочности пакета σ_0^{\pm} , монослоев X_0^{\pm} и однонаправленного материала X_u^{\pm}

$\frac{\sigma_0^+}{\sigma_0^-}$, МПа	$\frac{X_0^+}{X_0^-}$, МПа	$\frac{X_u^+}{X_u^-}$, МПа	$\frac{\delta X_u^+}{\delta X_u^-}$, %
$\frac{1323,9}{815,9}$	$\frac{2235,92}{1382,74}$	$\frac{2579,15}{1500,42}$	$\frac{15}{8}$

По данным, приведенным в табл. 2, видно, что величины пределов прочности X_0^{\pm} монослоев в пакете существенно меньше разру-

шающих напряжений X_u^{\pm} в однонаправленном композите. Наибольшее относительное снижение δX_u^+ наблюдается при растяжении — более 15 %. При сжатии такое снижение δX_u^- почти в 2 раза меньше, но также значительно — более 8 %.

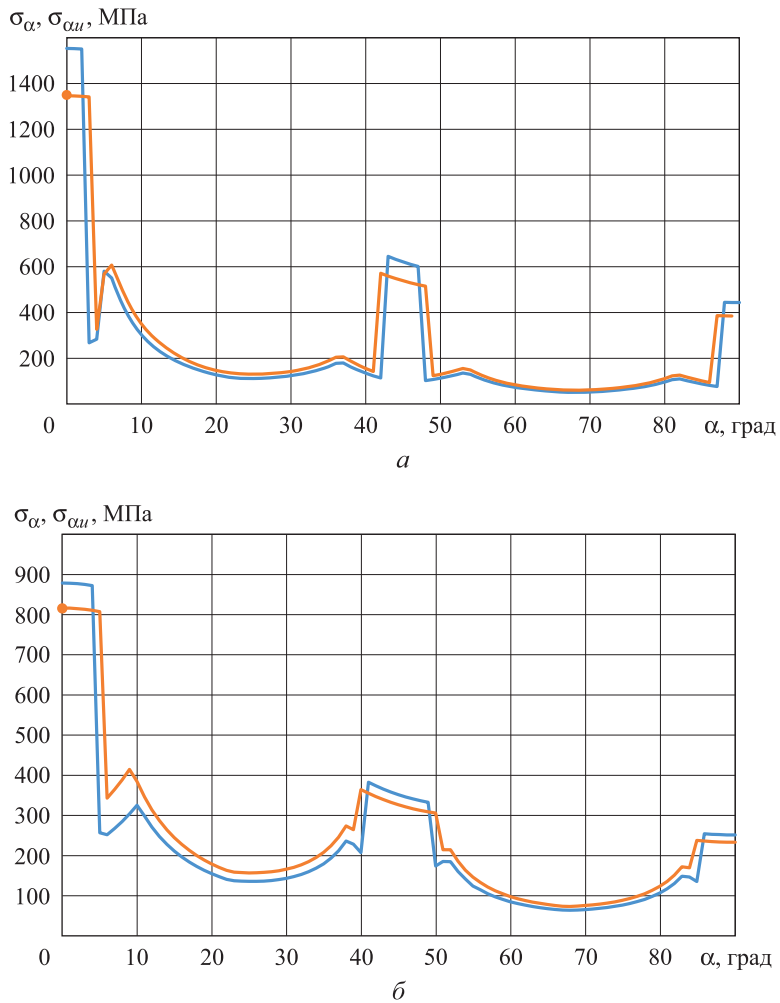


Рис. 2. Зависимость прочности пакета ПКМ ($0_6/\pm 45_2/90_1$) при его одноосном растяжении — сжатии в направлении α , рассчитанные по упруго-прочностным характеристикам монослоев в пакете $-\sigma_{\alpha}^{\pm}$ и в однонаправленном листе $\sigma_{\alphaи}^{\pm}$:

a — растяжение; b — сжатие; — $\sigma_{\alphaи}^{\pm}$, — $-\sigma_{\alpha}^{\pm}$;
 •, • — прочность пакета σ_0^{\pm} по данным испытаний [15]

Зависимости прочности σ_{α}^{\pm} данного пакета от угла его одноосного растяжения или сжатия приведены на рис. 2. Эти зависимости рассчитаны согласно формулам (6), (7) при $m_1 = 0$ [14]. Кривая прочности $\sigma_{\alpha u}^{\pm}$ соответствует случаю, когда упруго-прочностные свойства монослоев полагались равными свойствам однонаправленного листа E_u^{\pm} , X_u^{\pm} , Y_u^{\pm} и S_u^{\pm} [15]. График σ_{α}^{\pm} соответствует характеристикам монослоя $E_{\psi}^{\pm} = E_0^{\pm}$, $X_{\psi}^{\pm} = X_0^{\pm}$ (см. табл. 1, 2) и $Y_{\psi}^{\pm} = 1,15Y_u^{\pm}$ и $S_{\psi}^{\pm} = 1,15S_u^{\pm}$ [15].

На рис. 2 видно, что расчетные значения σ_{α}^{\pm} совпадают с экспериментальными данными [15] по разрушающим напряжениям пакета как при растяжении, так и сжатии.

Отметим, что в практике производства и эксплуатации конструкций из ПКМ поверочный и проектировочный расчеты должны быть взаимосвязаны. Однако до сих пор эти расчеты проводят обособленно. При выполнении проектировочного расчета основываются на механических свойствах изолированного однонаправленного материала, а при поверочном расчете — на характеристиках образцов ПКМ из деталей-свидетелей. Представленные в настоящей работе расчетные соотношения позволяют связать проектировочный и поверочный расчеты поведения ПКМ-конструкции.

Заключение. Представленные результаты исследования показывают, что полученные расчетные формулы применимы для определения упруго-прочностных характеристик монослоев *in situ* в типовых композиционных пакетах ПКМ из высокомодульных волокон.

Приведенный пример использования данных формул для конструкционного углепластика показывает, что в сравнении с листом в пакете продольный модуль упругости монослоев на сжатие более чем на 13 % больше, а пределы прочности вдоль волокон существенно меньше: при растяжении — на 15 %, при сжатии — на 8 %.

Разработанный метод учета упруго-прочностных характеристик монослоев *in situ* в композиционном пакете по данным испытаний образцов-свидетелей позволяет рассчитывать реальное поведение ПКМ в данной конструкции, связать ее поверочный и проектировочный расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chang F.K., Chen M.H. The *in situ* ply shear strength distribution in graphite/epoxy laminated composites. *J. Compos. Mater.*, 1987, vol. 21, pp. 708–733.
- [2] Dávila C.G., Camanho P.P. *Failure Criteria for FRP Laminates in Plane Stress*. NASA/TM-2003-212663, 01-11, 2003, 28 p.

- [3] Sihh S., Kim R.Y., Kawabe K., Tsai S. Experimental studies of thin-ply laminated composites. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, pp. 996–1008.
- [4] Amacher R., Cugnoni J., Botsis J. Thin ply composites: experimental characterization and modeling. In: *The 19th International Conference on Composite Materials. July 28 to August 2, 2013, Montréal, Canada*. Concordia Centre for Composites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 2013, pp. 4364–4376.
- [5] Fikry M.J.M., Ogihara S., Vinogradov V. Effect of matrix cracking on mechanical properties in FRP angle-ply laminates. In: *ECCM 2018 — 18th European Conference on Composite Materials, A. M. L., 25-28 June, 2018, Athens, Greece*. Applied Mechanics Laboratory. ISBN (Electronic) 9781510896932, 2020, pp. 793–812.
- [6] Исупов Л.П. Метод расчета упругих и прочностных характеристик симметрично — армированного композита. *Машиноведение*, 1979, № 4, с. 66–70.
- [7] Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Таирова Л.П. Идентификация упругих характеристик однонаправленного материала по результатам испытаний мультинаправленного композита. *Расчеты на прочность, т. 30*. Москва, Машиностроение, 1989, с. 16–31.
- [8] Таирова Л.П., Смердов А.А. Прочность однонаправленного слоя внутри многослойных пакетов с различными схемами армирования. В кн.: *Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций*. Москва, ИМАШ РАН, 2014, с. 20.
- [9] Каюмов Р.А., Луканкин С.А., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов. *Учен. зап. Казан. ун-та*, 2015, т. 157, кн. 4, Физ.-мат. науки, с. 112–132.
- [10] Catalanotti G. Prediction of in situ strengths in composites: some considerations. *Composite Structures*, 2019, vol. 207, pp. 889–893.
- [11] Олейников А.И., Кузьмина Т.А. Определение упруго-прочностных характеристик монослоев in situ в композиционном пакете. *Ученые записки ЦАГИ*, 2020, т. LI, № 4, с. 87–98.
- [12] Работнов Ю.Н. Прочность слоистых композитов. *Изв. АН СССР. МТТ*, 1979, № 1, с. 113–119.
- [13] Олейников А.И. Расчет характеристик упругости пакета из разномодульных на растяжение–сжатие композитных монослоев. *Ученые записки ЦАГИ*, 2018, т. XLIX, № 8, с. 78–88.
- [14] Олейников А.И. Оценка статической прочности слоистых композитов. *Ученые записки ЦАГИ*, 2019, т. L, № 4, с. 53–66.
- [15] Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. *Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов*. Москва, Физматлит, 2013, 272 с.

Статья поступила в редакцию 17.06.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Олейников А.И., Кузьмина Т.А. Упруго-прочностные характеристики монослоев in situ в композиционном пакете. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1996>

Олейников Александр Иванович — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ». Область научных интересов: модели поведения неоднородных материалов. e-mail: aleksandr.oleinikov@tsagi.ru

Кузьмина Татьяна Андреевна — магистр МФТИ.
e-mail: tatyana.kuzmina@phystech.edu

The in-situ ply elasticity and strength in laminated composites

©A.I. Oleinikov¹, T.A. Kuzmina²

¹The Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)
Zhukovsky town, Moscow Region, 140180, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

When calculating thin-walled structures made of layered polymer composite materials (PCM), data obtained as data obtained from testing a corresponding separately cured unidirectional sheet is accepted as the elastic-strength characteristics of their monolayers. Properties of such sheet significantly differ from the characteristics of the monolayer polymerized and working together with adjacent layers of different orientations as part of a composite package. The article presents the results of solving the problem of determining the elastic and strength characteristics of monolayers according to the data of direct tensile — compression tests of PCM samples from witness parts. It considers PCM which monolayers have similar or diverse characteristics. Formulas are given for calculating the mechanical properties of monolayers as part of a multidirectional composite package. Comparison of calculation results with test data is carried out. The use of the actual characteristics of monolayers makes it possible to calculate the real behavior of the PCM in the structure, to link its verification and design calculations.

Keywords: composite, monolayer, strength, elasticity

REFERENCES

- [1] Chang F.K., Chen M.H. The in-situ ply shear strength distribution in graphite/epoxy laminated composites. *J. Compos. Mater.*, 1987, vol. 21, pp. 708–733.
- [2] Dávila C.G., Camanho P.P. *Failure Criteria for FRP Laminates in Plane Stress*. NASA/TM-2003-212663, 01-11, 2003, 28 p.
- [3] Sihh S., Kim R.Y., Kawabe K., Tsai S. Experimental studies of thin-ply laminated composites. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, pp. 996–1008.
- [4] Amacher R., Cugnoni J., Botsis J. Thin ply composites: experimental characterization and modeling. In: *The 19th International Conference on Composite Materials. July 28 to August 2, 2013, Montréal, Canada*. Concordia Centre for Composites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 2013, pp. 4364–4376.
- [5] Fikry M.J.M., Ogihara S., Vinogradov V. Effect of matrix cracking on mechanical properties in FRP angle-ply laminates. In: *ECCM 2018 — 18th European Conference on Composite Materials, A. M. L., 25–28 June, 2018, Athens, Greece*. Applied Mechanics Laboratory. ISBN (Electronic) 9781510896932, 2020, pp. 793–812.
- [6] Isupov L.P. *Mashinovedenie — Machine Science*, 1979, no. 4, pp. 66–70.
- [7] Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Tairova L.P. Identifikatsiya uprugikh kharakteristik odnonapravlenno materiala po rezul'tatam ispytaniy mul'tinapravlenno kompozita [Identification of the elastic characteristics of a unidirectional material from the test results of a multidirectional composite]. *Raschetny na prochnost* [Strength calculations], vol. 30. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, pp. 16–31.

- [8] Tairova L.P., Smerdov A.A. Prochnost' odnonapravlenogo sloya vnutri mnog-osloynnykh paketov s razlichnymi skhemami armirovaniya [Strength of a unidirectional layer inside multilayer packages with different reinforcement schemes]. In: *Deformirovaniye i razrusheniye kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Deformation and destruction of composite materials and structures]. Moscow, IMASH RAS, 2014, p. 20.
- [9] Kayumov R.A., Lukankin S.A., Paymushin V.N., Kholmogorov S.A. *Uchenyye zapiski Kazan. un-ta — Scientific notes Kazan. University*, 2015, vol. 157, b. 4, Phys.-Math. Sc., pp. 112–132.
- [10] Catalanotti G. Prediction of in situ strengths in composites: some considerations. *Composite Structures*, 2019, vol. 207, pp. 889–893.
- [11] Oleinikov A.I., Kuzmina T.A. *Uchenyye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2020, vol. LI, no. 4, pp. 87–98.
- [12] Rabotnov Yu.N. *Izvestiya AN SSSR, MTT — the USSR Academy of Sciences Bulletin. Mech. Solids*, 1979, no. 1, pp. 113–119.
- [13] Oleinikov A.I. *Uchenyye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2018, vol. XLIX, no. 8, pp. 78–88.
- [14] Oleinikov A.I. *Uchenyye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2019, vol. L, no. 4, pp. 53–66.
- [15] Grishin V.I., Dzyuba A.S., Dudarkov Yu.I. *Prochnost' i ustoychivost' elementov i soyedineniy aviatsionnykh konstruksiy iz kompozitov* [Strength and stability of elements and joints of aviation structures made of composites]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 272 p.

Oleinikov A.I., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Lead Research Fellow, the Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Field of research interests: models of inhomogeneous materials behaviour. e-mail: aleksandr.oleinikov@tsagi.ru

Kuzmina T.A., Master, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University). e-mail: tatyana.kuzmina@phystech.edu