

УДК 629.7.002: 624.016

А.В. Гайдачук, д-р техн. наук,
В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,
В.А. Коваленко, д-р техн. наук,
А.В. Кондратьев, д-р техн. наук,
М.А. Шевцова, канд. техн. наук

**СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА АГРЕГАТОВ АВИАЦИОННОЙ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.
СООБЩЕНИЕ 2**

Как уже сообщалось в работах [1 – 3], в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» на протяжении ряда лет проводится комплекс исследований, связанных с научным обеспечением оптимального проектирования и производства агрегатов авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В сообщении [4] кратко изложены основные результаты, полученные в 2015 году в рамках этого комплекса исследований. Было показано, что немалозначимой составляющей комплексной программы научного обеспечения создания высокоэффективных агрегатов АРКТ из ПКМ является разработка методов и способов оценивания точности (качества) реализации технологических процессов производства агрегатов из этих материалов путем выявления возникающих дефектов и анализа их влияния на эксплуатационные характеристики изделий. В разное время рядом авторов анализировались различные виды этих дефектов, например [5, 6] и др. В работах [7, 8] обсуждались различные классификации дефектов, возникающих в производстве конструкций из ПКМ. Наиболее полная классификационная схема этих дефектов была предложена нами в работе [9]. Разработанный многоуровневый классификатор дефектов включает в себя 8 видов дефектов и 24 их класса, а также характеристики технологических операций, причины их возникновения и проявления и конечный характер влияния. Несколько отличающаяся от этой классификации схема приведена в работе [10]. Основное ее отличие состоит в том, что все производственные дефекты, в большинстве своем содержащиеся и в схеме [9], разделены на микродефекты, минидефекты и макродефекты, причем последние в эксплуатации изделия могут развиваться в эксплуатационные повреждения [11 – 13].

Именно анализу и обоснованию полей допусков на все эти виды дефектов был посвящен заключительный этап рассматриваемого комплекса исследований в 2016 году. Ниже дан краткий анализ полученных результатов.

Первым типом рассмотренных дефектов являлись отклонения толщины формуемого изделия от ее проектного значения, которые имели структуру, описываемую зависимостью

$$\Delta\delta = (\Delta\theta_{\text{е}} + \Delta\theta_{\text{с}}) \delta_0 n, \quad (1)$$

где $\Delta\theta_{\text{е}}, \Delta\theta_{\text{с}}$ – приращение объемного содержания волокон и связующего; δ_0, n – толщина монослоев и их число.

В результате исследований было показано, что при изготовлении препрега с паспортным полем допусков значение $\Delta\theta_{\text{е}}$ всегда находится в допустимом интервале в то время как $\Delta\theta_{\text{с}}$ может выходить за пределы интервала паспортных значений

$$-\Delta\theta_{\text{сп}} \leq \Delta\theta_{\text{с}} \leq \Delta\theta_{\text{сп}}, \quad (2)$$

что случается при перепрессовке или недопрессовке формуемого изделия. Причинами отклонений по толщине монослоя являются в основном отклонения технологических параметров при пропитке армирующего материала и формовании изделия.

При перепрессовке имеет место выходящее за регламентное значение давление между валками при прокатке препрега $p_{\text{вал}} > [p_{\text{вал}}]$ либо повышенная вязкость связующего в момент пропитки $\eta_{\text{с}} > [\eta_{\text{с}}]$. Вязкость связующего может быть выше регламентной, если температура прокатки меньше регламентированной $T < [T_{\text{пр}}]$. Наконец, неравенство (2) может иметь место, если в процессе прокатки армирующего полуфабриката между валками скорость $V_{\text{пр}} < [V_{\text{пр}}]$.

Недопрессовка ($\Delta\theta_{\text{с}} > \Delta\theta_{\text{сп}}$) имеет место, если:

– $p_{\text{вал}} < [p_{\text{вал}}]$, $T = [T_{\text{пр}}]$ (причина – низкое $p_{\text{вал}}$);

– при $p_{\text{вал}} = [p_{\text{вал}}]$ $T < [T_{\text{пр}}]$ (причина – низкая T), при этом $\eta_{\text{с}} > [\eta_{\text{с}}]$.

Нарушение технологического режима формования изделия может привести к уменьшению физико-механических свойств ПКМ в изделии, которые будут отличаться от соответствующих паспортных характеристик ПКМ, пример которых приведен в табл. 1 [14].

На основе известных формул теории армирования были получены поля допусков на физико-механические характеристики (ФМХ) монослоя ПКМ. Свойства однонаправленного ПКМ определялись на основе математических моделей теории армирования с добавлением в них приращений соответствующих характеристик в пределах их паспортного интервала допусков.

Таблица 1 – Свойства углеродных лент и однонаправленных эпоксидных углеволоконитов на их основе

Тип ленты	Ширина ленты, мм	Линейная плотность м/г	Плотность нити в ленте, г/см ³	Количество нитей на 10 см, не менее	Свойства эпоксидного углеволоконита					
					ρ , г/см ³	Содержание наполнителя, % об.	$\sigma_{ву}$, ГПа	$\sigma_{вр}$, ГПа	$E_{ву}$, ГПа	Толщина монослоя, 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
ЭЛУР-0,08 П-А	220±30	15±5	1,71	570±25	1,50	63±4	0,9	0,9	145 ±(20...25)	0,07...0,109

Например, поля допуска модуля упругости и предела прочности однонаправленного хрупкого ПКМ вдоль волокон определялись формулами

$$(E_{x\text{КМ}} \pm \Delta E_{x\text{КМ}}) = E_{\epsilon}^{+\Delta E_{\epsilon}^n} \cdot \theta_{\epsilon-\Delta\theta_{\epsilon}^n}^{+\Delta\theta_{\epsilon}^n} + E_{c-\Delta E_c^n}^{+\Delta E_c^n} (1 - \theta_{\epsilon-\Delta\theta_{\epsilon}^n}^{+\Delta\theta_{\epsilon}^n}); \quad (3)$$

$$(\sigma_{\epsilon x\text{КМ}} \pm \Delta \sigma_{\epsilon x\text{КМ}}) = \frac{\sigma_{\epsilon c}^{+\Delta\sigma_{\epsilon c}^n}}{E_{c-\Delta E_c^n}^{+\Delta E_c^n}} \left[E_{\epsilon}^{+\Delta E_{\epsilon}^n} \cdot \theta_{\epsilon-\Delta\theta_{\epsilon}^n}^{+\Delta\theta_{\epsilon}^n} \right] + E_{c-\Delta E_c^n}^{+\Delta E_c^n} (1 - \theta_{\epsilon-\Delta\theta_{\epsilon}^n}^{+\Delta\theta_{\epsilon}^n}), \quad (4)$$

где индексы «в» и «с» соответствовали модулям упругости и их паспортным допускам для волокна и связующего, объемному содержанию волокон θ_{ϵ}^n и его паспортному допуску $\Delta\theta_{\epsilon}^n$.

Аналогичные зависимости были получены для остальных ФМХ и пределов прочности при растяжении, сжатии и сдвиге вдоль и поперек волокон однонаправленного ПКМ. Для структур, состоящих из трех направлений армирования (0° , $\pm\phi$, 90°), поля допусков определялись на основе зависимостей, вытекающих из модели В.В. Васильева [14]. Например, поле допуска модуля упругости E_x определялось формулой

$$(E_x \pm \Delta E_x) = \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta\delta_0)n} \left[(B_{11} \pm \Delta B_{11}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})} \right], \quad (5)$$

где n – общее количество монослоев в структуре ($n_0 + 2n_{\pm\phi} + n_{90}$) = n ; δ_0 , $\Delta\delta_0$ – толщина монослоя и паспортный допуск на ее отклонение; B_{ij} , ΔB_{ij} – обобщенные жесткости многослойной структуры ПКМ и их

приращение в осях ортотропии ($i = 1, 2; j = 1, 2$), зависящие от полей допусков на толщину монослоев, паспортных допусков на входящие параметры и углы разориентации монослоев.

Далее были синтезированы поля допусков на прочностные свойства той же структуры ПКМ с отклонениями в толщине монослоев. На основе критерия Мизеса – Хилла пределы прочности i -го монослоя в направлении осей x и y при растяжении и сжатии определялись соотношениями

$$\sigma_{ex} = \min_{(i)} \left[\frac{\bar{E}_{1j}^2 (a_{11j} + \nu_{21j} a_{21j})^2}{\sigma_{exi}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (\nu_{12i} a_{11j} + a_{21j})^2}{\sigma_{eyi}^2} - \frac{\bar{E}_{1j} \bar{E}_{2i} (a_{11j} + \nu_{21j} a_{21j})(\nu_{12i} a_{11j} + a_{21j})}{\sigma_{exi} \sigma_{eyi}} + \frac{G_{12i}^2 a_{31j}^2}{\tau_{exyi}^2} \right]^{-0.5} ; \quad (6)$$

$$\sigma_{ey} = \min_{(i)} \left[\frac{\bar{E}_{1j}^2 (a_{12i} + \nu_{21j} a_{22i})^2}{\sigma_{exi}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (\nu_{12i} a_{12i} + a_{22i})^2}{\sigma_{eyi}^2} - \frac{\bar{E}_{1j} \bar{E}_{2i} (a_{12i} + \nu_{21j} a_{22i})(\nu_{12i} a_{12i} + a_{22i})}{\sigma_{exi} \sigma_{eyi}} + \frac{G_{12i}^2 a_{32i}^2}{\tau_{exyi}^2} \right]^{-0.5} , \quad (7)$$

где $\nu_{jki}, k = 1, 2$ – коэффициенты Пуассона i -го монослоя, $a_{jki}, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$ – коэффициенты податливости. Здесь все параметры в целях сокращения записей приведены в виде их номиналов без указания соответствующих полей допусков, то есть любой параметр R_i представлен как его номинал R_i вместо $(R_i \pm \Delta R_i)$ или $R_i^{+\Delta R_i}$.

Было показано, что в качестве определяющих характеристик прочности всей структуры паковки должны быть приняты биминимальные значения полей допусков пределов прочности монослоев структур $0^\circ, \pm 45^\circ$ и 90° , формально определяемой структурной зависимостью

$$\min \min \left\{ \begin{array}{l} \min \left[(\sigma_{ex0} \pm \Delta \sigma_{ex0}), (\sigma_{ey0} \pm \Delta \sigma_{ey0}), (\tau_{exy0} \pm \Delta \tau_{exy0}) \right] \\ \min \left[(\sigma_{ex90} \pm \Delta \sigma_{ex90}), (\sigma_{ey90} \pm \Delta \sigma_{ey90}), (\tau_{exy90} \pm \Delta \tau_{exy90}) \right] \\ \min \left[(\sigma_{ex45} \pm \Delta \sigma_{ex45}), (\sigma_{ey45} \pm \Delta \sigma_{ey45}), (\tau_{exy45} \pm \Delta \tau_{exy45}) \right] \end{array} \right\} . \quad (8)$$

Следующим рассмотренным классом дефектов являлись локальные нарушения сплошности материала в виде пустот и микротрещин. Локальные нарушения сплошности в виде пустот, обнаруживаемые в

изделии методами неразрушающего контроля [6], представляют собой микроскопические воздушные полости, образующиеся во время формования паковки при неполном удалении паров растворителя из связующего [15]. Этот дефект моделировался введением в относительное объемное содержание компонентов ПКМ – волокон θ_ε и связующего θ_c третьей составляющей – относительного объемного содержания пустот θ_n . С учетом этого поле допуска, например, для модуля упругости однонаправленного ПКМ вместо (4) было записано в виде

$$\left(E_{\chi \text{ КМ} - \Delta E_{\chi \text{ КМ}}}^{+\Delta E_{\chi \text{ КМ}}}\right) = E_{\varepsilon - \Delta E_{\varepsilon}}^{+\Delta E_{\varepsilon}^n} \cdot \theta_{\varepsilon 0 - \Delta \theta_{\varepsilon}^n}^{+\Delta \theta_{\varepsilon}^n} + E_{c - \Delta E_c}^{+\Delta E_c^n} \left(\chi - \theta_{\varepsilon 0 - \Delta \theta_{\varepsilon}^n}^{+\Delta \theta_{\varepsilon}^n}\right), \quad (9)$$

а для предела прочности однонаправленных хрупких ПКМ вместо (4) в виде

$$\left(\sigma_{\varepsilon \text{ КМ} - \Delta \sigma_{\varepsilon \text{ КМ}}}^{+\Delta \sigma_{\varepsilon \text{ КМ}}}\right) = \frac{\sigma_{\varepsilon - \Delta \sigma_{\varepsilon}}^{+\Delta \sigma_{\varepsilon}^n}}{E_{\varepsilon - \Delta E_{\varepsilon}}^{+\Delta E_{\varepsilon}^n}} \left[E_{\varepsilon - \Delta E_{\varepsilon}}^{+\Delta E_{\varepsilon}^n} \cdot \theta_{\varepsilon 0 - \Delta \theta_{\varepsilon}^n}^{+\Delta \theta_{\varepsilon}^n} + E_{c - \Delta E_c}^{+\Delta E_c^n} \left(\chi - \theta_{\varepsilon 0 - \Delta \theta_{\varepsilon}^n}^{+\Delta \theta_{\varepsilon}^n}\right) \right], \quad (10)$$

где $\chi = 1 - \theta_n = \theta_\varepsilon + \theta_c$.

Аналогичные формулы были получены для допусков всех остальных характеристик ПКМ.

Был проведен анализ влияния наличия пустот на изменение полей допусков «теоретического безпористого ПКМ». Как оказалось, относительные потери величины этих характеристик не велики и не превышают 3%.

Исследование этого класса дефектов завершилось разработкой предлагаемой схемы обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ методами контроля степени дефектности (рис. 1):

I уровень – степень монолитности – поры и микротрещины;

II уровень – степень трещиностойкости, предполагающая сопротивление ПКМ росту микротрещин;

III уровень – степень долговечности, определяемая пределом усталости и другими признаками фундаментальной характеристики ПКМ – старения, ползучести, химической деструкции.

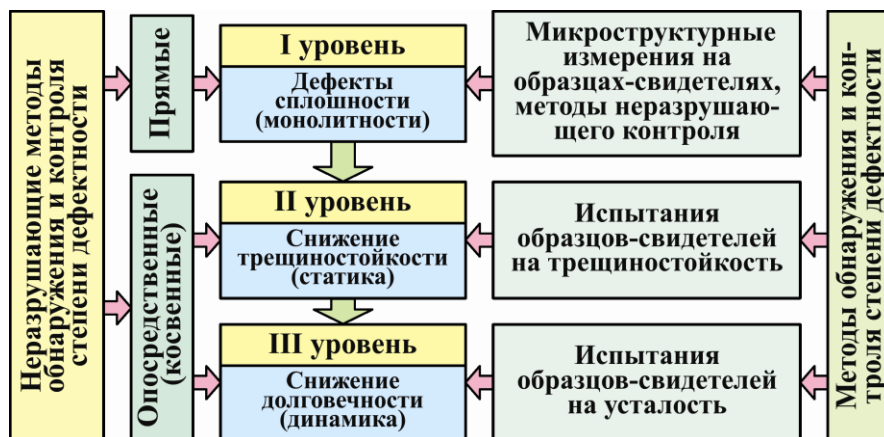


Рисунок 1 – Схема обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ методами контроля степени дефектности

Следующим этапом работ стала разработка концептуального подхода и реализующего его метода нормирования полей допусков на макродефекты, отнесенные классификатором [9] к классу короблений конструкций. Эти дефекты связаны с термонеравновесностью структуры изделий, возникающей вследствие несимметричности армирующих слоев [11, 16]. Поводки (прогибы) W таких панелей, подлежащих после их изготовления монтажу в жестком каркасе сборной конструкции, регламентируют исходя из уровня напряженности ψ_j – численного значения правой части принятого критерия прочности ПКМ, в данном случае Мизеса – Хилла.

В качестве условной степени термонеравновесности ξ было принято отношение суммарного отстояния пар монослоев от геометрической срединной плоскости паковки к ее толщине (рис. 2)

$$\xi = \sum_{j=1}^k n_j \delta_j \cdot \left(\sum_{i=1}^m n_i \delta_i \right)^{-1}, \quad (11)$$

где n_j , δ_j – номер и толщина j -го термонеравновесного монослоя; k – количество пар термонеравновесных монослоев в паковке (отсчет пар термонеравновесных слоев ведется от срединной плоскости); m – общее число монослоев в паковке; δ_i – толщина i -го монослоя.

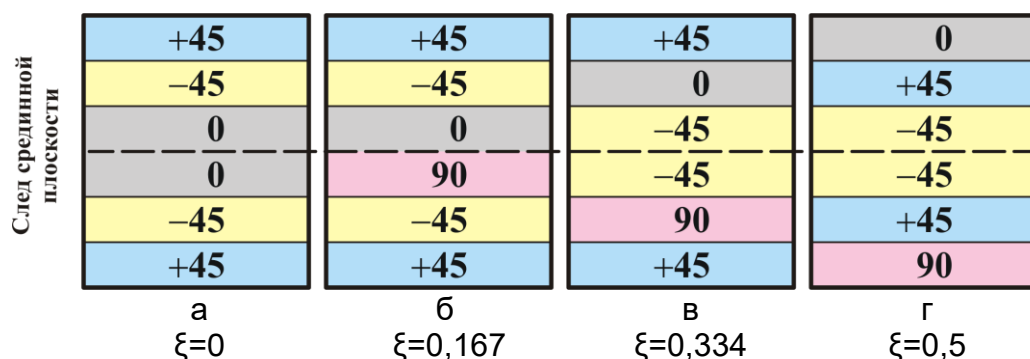


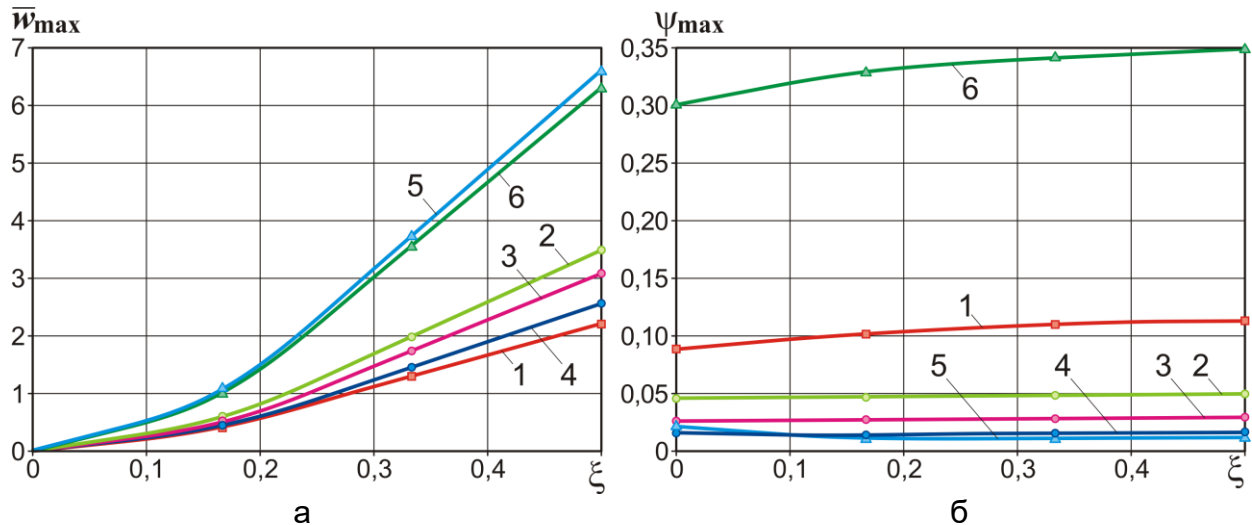
Рисунок 2 – Рассматриваемые структуры пакета ПКМ с разной степенью условной термонеравновесности:

а – терморавновесная; б – минимальная; в – средняя; г – высокая

Были рассмотрены одна симметричная терморавновесная структура (рис. 2, а) и три несимметричные с разной степенью термонеравновесности (рис. 2, б – г).

Показано, что для всего спектра существующих ПКМ с увеличением максимального уровня термонеравновесности ξ_{max} существенно растет уровень формонестабильности $\bar{W}_{max} = W_{max} / \delta$ (рис. 3, а), а максимальный индекс напряженности $\psi_{i max}$ практически не зависит от ξ (рис. 3, б). Поэтому при регламентировании ψ_{max} может быть разрешена произ-

вольная степень термонеровесности ξ , если последняя не ограничена иными эксплуатационными требованиями.



1 – стеклопластик; 2, 3, 4 – углепластики; 5, 6 – органопластики

Рисунок 3 – Графики зависимости относительного прогиба панели $\bar{W}_{max}$ (а) и максимального значения индекса напряженности панели ψ_{max} (б) от условной степени термонеровесности ξ структуры ПКМ

Между индексом преднапряженности ψ_{max} и уровнем формостабильности $\bar{W}_{max}$ была установлена выраженная связь. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчетов взаимозависимости параметров ξ , $\bar{W}_{max}$ и ψ_{max} для свободно опертой панели размерами 500×250 мм, изготовленной из ПКМ различных классов.

Таблица 2 – Результаты расчетов для свободно опертой панели размерами 500х250 мм различной условной термонеровесной структуры

Материал ПКМ	Степень условной термонеровесности							
	$\xi=0$		$\xi=0,167$		$\xi=0,334$		$\xi=0,5$	
	W_{max} , мм	ψ_{max}	W_{max} , мм	ψ_{max}	W_{max} , мм	ψ_{max}	W_{max} , мм	ψ_{max}
Углепластик однаправленный	0	0,047	-1,2	0,049	-4,33	0,052	-8,51	0,054
Стеклопластик однаправленный	0	0,089	-0,86	0,11	-2,84	0,12	-5,16	0,13
Органопластик однаправленный	0	0,023	-2,05	0,013	-8,14	0,014	-17,36	0,015

Так как с увеличением ξ растет уровень формостабильности $\bar{W}_{max}$, то регламентация $\bar{W}_{max}$ по каким-либо условиям должна строго согласовываться с индексом преднапряженности ψ_{max} . Иными словами, допуск

(поле допуска) на максимальную поводку $\Delta\bar{W}_{max}$ должен назначаться таким, чтобы обеспечивалось поле допуска на преднапряженность $\Delta\psi_{max}$, чаще всего связанную с ресурсом эксплуатации изделия.

Поля допусков на разориентацию углов армирования при одинаковых отклонениях во всех монослоях паковки ($+3^\circ$ и $+5^\circ$ или -3° и -5°), соответствующие механизированной и автоматизированной намотке (выкладке), не превышали 1% изменения преднапряженности $\Delta\psi_{max}$ и формостабильности $\Delta\bar{W}_{max}$ по сравнению с идеальной схемой армирования для всех уровней термонеравновесных структур в диапазоне $0,167 \leq \xi \leq 0,5$ [16]. Из этого следует, что поля допусков для ФМХ ПКМ, регламентированные по условиям технологии производства композитных изделий, не требуют расширения для обеспечения требований заданного ресурса и термостабильности.

Следующим этапом исследований стал анализ дефектов конструктивно-технологических решений, формообразующей оснастки, погрешностей технологических режимов формования конструкций из ПКМ, составляющих шестой, седьмой и восьмой виды их классификатора [9]. Было установлено, что все три класса дефектов этого вида непосредственно или опосредствованно приводят к локальному нарушению сплошности конструктивных элементов из ПКМ или на их границе [11, 17].

Были исследованы формы выпучивания непрочекля в тонкостенной балке-полоске из ПКМ при сжатии (рис. 4).

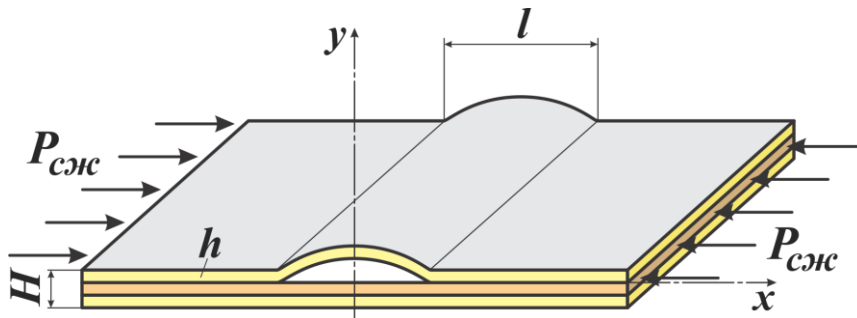


Рисунок 4 – Геометрическое представление одномерной математической модели несплошности ПКМ

Геометрическое представление одномерной математической модели несплошности позволило установить предельную длину непрочекля, расположенного на известной глубине при фиксированных полях допусков на входящие параметры:

$$l \leq \pi n_1 \delta \sqrt{\frac{\left(E_1^0 \pm \Delta E_1^0\right) \left[n_1 + (n - n_1) \frac{(E_2 \pm \Delta E_2)}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)} \right] \xi}{3n(\sigma \pm \Delta\sigma) \left[1 - (v_{12}^0 \pm \Delta v)(v_{21}^0 \pm \Delta v) \right]}}, \quad (12)$$

где σ , $\Delta\sigma$ – средние напряжения на границах дефектной зоны и допуск на их отклонения; n , n_1 – число монослоев в пакете и отслоившейся части; E_1^0 , ΔE_1^0 , E_2 , ΔE_2 – модули упругости и допуски в ПКМ отслоившейся и монолитной частей паковки; δ – толщина паковки; ν_{12}^0 , ν_{21}^0 , $\Delta\nu$ – коэффициенты Пуассона и средний допуск в отслоившейся части паковки; ξ – осредненный коэффициент повышения устойчивости при замене непроклея эллиптической формы балкой-полоской ($\xi = 1 + \exp(b/l)$).

Здесь приращения параметров ΔE_1^0 , ΔE_2 , $\Delta\nu$ и $\Delta\sigma$ определяются в соответствии с полученными выше результатами с учетом структуры (схемы армирования) отслаиваемой и лежащей под ней частей пакета ПКМ.

Двумерная модель непроклея, аппроксимированная прямоугольной пластиной (рис. 5), позволила получить формулы, определяющие условия допустимости дефекта отслоения размерами $a \times b$ при одностороннем сжатии дефектной зоны для фиксированных полей допусков на входящие параметры.

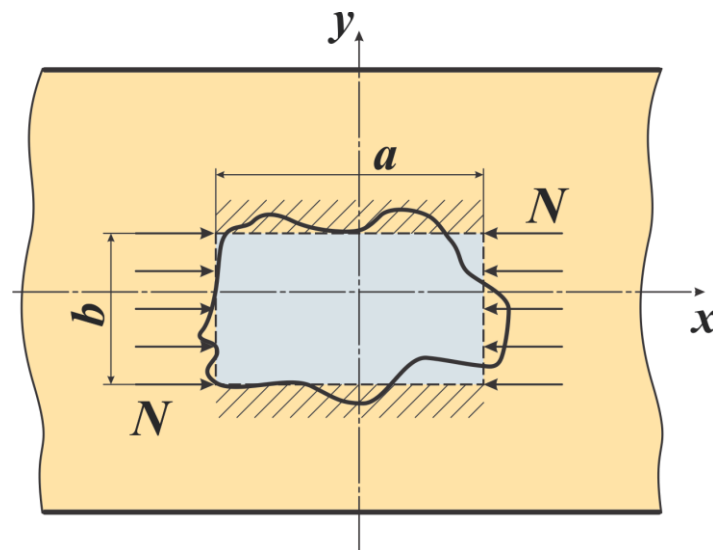


Рисунок 5 – Аппроксимация зоны непроклея в плане прямоугольной пластиной

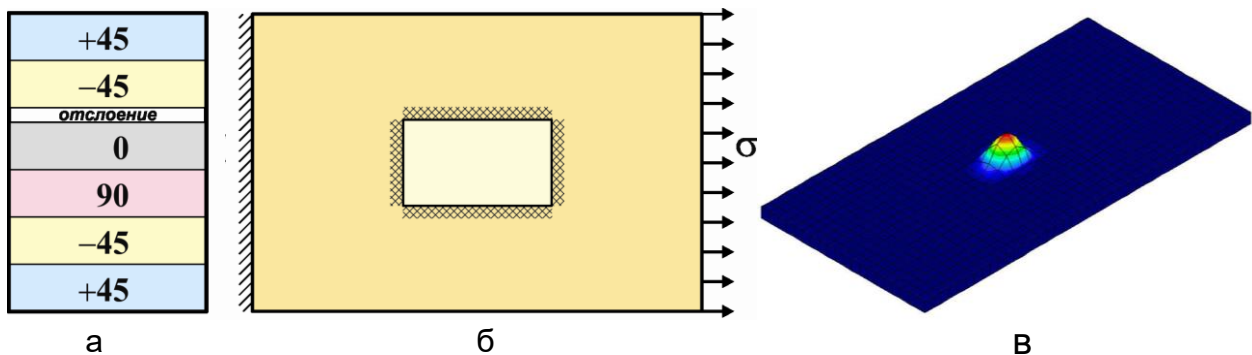
Например, выражение при числе полуволн отслоившейся части пакета $m \geq 3$, соответствующее отношению $\frac{a}{b} \geq 2,284 \sqrt{\frac{E_1^0}{E_2^0}}$, имеет представленный ниже вид (13).

Входящие в (13) допуски, как и ранее, определяются в соответствии с полученными ранее результатами с учетом конкретной схемы армирования отслаиваемой и лежащей под ней частей пакета ПКМ:

$$\frac{(\sigma \pm \Delta\sigma)n}{n_1 + (n - n_1) \frac{(E_2 \pm \Delta E_2)}{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)}} \leq \frac{2,67\pi^2\delta^2}{n_1 b^2} \frac{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)n_1^3(n - n_1)^3}}{12[1 - (v_{12}^0 \pm v)(v_{21}^0 \pm \Delta v)]} \times$$

$$\times \left[1,73 + \frac{[(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)(v_{21}^0 \pm \Delta v) + 2(G_{12}^0 \pm \Delta G_{12}^0)[1 - (v_{12}^0 \pm v)(v_{21}^0 \pm \Delta v)]]n_1^3}{\sqrt{(E_1^0 \pm \Delta E_1^0)n_1^3(E_2^0 \pm \Delta E_2^0)(n - n_1)^3}} \right]. \quad (13)$$

Был рассмотрен пример для углеродного ПКМ и формы отслоения с заземленными границами, расчет которой по конечно-элементной модели показал возможный характер выпучивания отслоения (рис. 6).



а – рассматриваемая структура пакета ПКМ; б – рассмотренная возможная форма отслоения; в – характер выпучивания отслоения

Рисунок 6 – К исследованию отслоения

В результате расчетов была определена максимальная величина среднего по пакету напряжения, приложенного по его торцу, при котором отслоившаяся часть теряет устойчивость. Так конечно-элементные модели показали, что одномерная модель прогнозирует потерю устойчивости отслоения при средних напряжениях в пакете почти в 3 раза выше, чем определяемое методом конечных элементов. В то же время результаты, полученные по двумерной и конечно-элементной моделям, отличаются незначительно.

При анализе влияния складок отдельных слоев армирующего материала на ФМХ ПКМ и характера напряженно-деформированного состояние изделия было установлено, что уровни дефектов этого вида при статическом нагружении в локальной зоне изделия в плоскости составляющих монослоев может повысить интенсивность напряжений до 15 % по сравнению с бездефектной зоной. Это требует для особоответственных изделий назначать технологические процессы их формования, исключая возможность появления складок в монослоях либо регламентировать снижение допуска на уровень напряженности в эксплуата-

ции изделия не менее чем $\Delta\psi = 0,03$ от рекомендованного для высоконагруженного и 0,06 для средненагруженного агрегата [18].

Заключительным этапом исследований была разработка схемы взаимодействия технологических факторов и их совместного влияния на конечные характеристики изделия (рис. 7).



β – степень отверждения; η – вязкость; τ_p – время приложения давления;

τ_η – время достижения η форм;

НДС – напряженно-деформированное состояние

Рисунок 7 – Взаимодействие технологических факторов и их совместное влияние на конечные характеристики изделия

Была рассмотрена концепция взаимодействия трех основных математических моделей – хемовязкостной, тепловой и механической, которые первоначально описываются независимо одна от другой, а затем результаты, полученные по одной модели, представляются исходными данными для расчетов по другой. В этом случае связующим звеном между хемовязкостной моделью и моделью теплового воздействия являлась скорость повышения температуры в материале, между хемовяз-

костной моделью и моделью силового воздействия – вязкоупругие и вязкотекучие характеристики материала в момент приложения давления. Связь между моделями теплового и силового воздействия более значима, поскольку теплотехнические характеристики вспомогательной оснастки зависят от конструкции и материала входящей в нее цулаги, выбор которых определяется требованиями, предъявляемыми к жесткостным характеристикам цулаги.

Этот подход наиболее полно обеспечивает приближение к оптимальным параметрам процесса формования изделий из ПКМ. Он дает в руки разработчикам этого процесса для конкретного связующего инструмент, формирующий соответствующие графики изменения технологических параметров $T(\tau)$, $p(\tau)$, $V(\tau)$ и допустимые уровни их изменения (поля допусков), регламентированные в производственных инструкциях, неукоснительное следование которым на всех этапах процесса является единственным средством обеспечения высокого качества ответственных изделий АРКТ из ПКМ.

Выводы

На основе проведенного комплекса исследований были получены следующие основные результаты.

1. Проведены широкие исследования технологических дефектов в агрегатах АРКТ из ПКМ геометрического вида, относящихся к классу нарушений сплошности в дискретных объемах структур ПКМ, что позволило установить допуски на ФМХ и прочностные свойства композита, связанные с наличием в нем пористости, трещиностойкостью, а также локальными поводками изделия и соответствующей им напряженностью термонеравновесных структур.

2. Впервые установлен иерархический порядок трехуровневой системы обнаружения дефектов структуры ПКМ, возникающих в процессе подготовки и производства изделий из композитов. Проведен анализ причин возникновения и типовых видов дефектов сплошности ПКМ, являющихся первопричиной снижения эксплуатационного качества элементов композитных конструкций и их ресурса. Предложена схема обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ прямыми и опосредствованными методами контроля степени дефектности материала.

3. Доказана необходимость учета уровня индекса напряженности интегрально терморавновесных структур ПКМ, который вносит существенный вклад в напряженное состояние конструкций АРКТ из ПКМ от эксплуатационных воздействий. Этот вклад увеличивается при росте разности термонеравновесных слоев относительно срединной поверхности пакета интегрально терморавновесной структуры.

4. Выявлено наличие связи между индексом максимальной напряженности в определенной точке одного из монослоев паковки и ее относительным максимальным прогибом $\psi_{max} = f(\bar{w}_{max})$.

Данные результаты позволяют научно обосновать порядок выбора эффективных конструктивно-технологических решений агрегатов конструкций АРКТ из ПКМ для реализации их в процессе проектирования и производства в условиях предприятий отечественной отрасли.

Результаты проведенных исследований внедрены и используются на ряде ведущих предприятий отрасли – ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», ГП «Антонов», ПАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения», что позволило обеспечить повышение эффективности созданных на них композитных агрегатов АРКТ.

Полученные научно-практические результаты всего комплекса исследований 2015 – 2016 гг. были обобщены авторским коллективом в первом томе изданной монографии [19].

Список использованных источников

1. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів [Текст] / В.Є. Гайдачук, О.В. Гайдачук, Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №2 (69). – С. 12 – 19.

2. Научное обеспечение проектирования и производства конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2 [Текст] / Ф. М. Гагауз, А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов, В. В. Кириченко, А. В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 65(1). – Х., 2011. – С. 7 – 19.

3. Карпов, Я. С. Анализ решений некоторых фундаментальных проблем инженерии слоистых композитов учеными кафедры композитных конструкций и авиационного материаловедения Харьковского авиационного института. Часть 1. Оптимизация структуры слоистых композитов и конструктивных параметров лонжеронного крыла [Текст] / Я. С. Карпов, М. А. Шевцова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (84). – Х., 2015. – С. 21 – 38.

4. Создание научных основ проектирования и технологии производства агрегатов авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1 [Текст] / А.В. Гайдачук, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, М.А. Шевцова // Вопро-

сы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (84). – Х., 2015. – С. 7 – 20.

5. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: НОТ, 2008. – 822 с.

6. Damage identification in aircraft composite structures: a case study using various nondestructive testing techniques / A. Katunin, K. Dragan, M. Dziendzikowsk // Composite Structures. – 2015. – № 127. Pp. 1–9.

7. Ривин, Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / Г.Л. Ривин. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 75 с.

8. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підручник [Текст] / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.М. Кобрін. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

9. Гайдачук, А. В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е. В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2010. – Вып. 3(70). – С.11 – 20.

10. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 400 с.

11. Michael, C.Y. Niu Composite Airframe structures [Текст] / C.Y. Niu Michael, Conmilit Press Ltd, Hong Kong, 2010. – 357 p.

12. Астанін, В.В. Експлуатаційні пошкодження елементів конструкцій літальних апаратів із композиційних матеріалів і методи їх ремонту [Текст] / В.В. Астанін, О.В. Глоба, О.А. Шевченко // Технологические системы: Науч.-техн. журнал. - К. - №4/2011. - С. 64 – 68.

13. Андреев, А.В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Часть 2. Анализ видов, характера и частоты эксплуатационных повреждений [Текст] / А.В. Андреев, А.С. Бычков, А.В. Кондратьев // Вестник Одесского национального морского университета– 2016. – № 2(48). – С. 180 – 194.

14. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формируемого изделия от проектного значения [Текст] / В.А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3(90). – С. 10 – 21.

15. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2. Допуски на нарушения сплошности материала и локальные поводки изделия [Текст]

/ В.А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 4(91). – С. 5 – 15.

16. Коваленко, В.А. Исследование температурного напряженно-деформированного состояния композитных панелей при различной степени термонеравновесности их структуры [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, А.А. Кичка // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (70).– Х., 2012. – С. 20 – 33.

17. Коваленко, В.А. Анализ и нормирование дефектов локального нарушения сплошности, возникающих в производстве изделий авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / В.А. Коваленко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (71).– Х., 2012. – С. 7 – 22.

18. Кириченко, В.В. Исследование влияния складки в полимерном композиционном материале на его упругие свойства и характер изменения локального напряженно-деформированного состояния [Текст] / В.В. Кириченко, В.А. Коваленко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С.127 – 132.

19. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники [Текст]: моногр. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев и др.; под. ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.

Поступила в редакцию 13.12.2016.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,
ГП «Антонов», г. Киев.*