

УДК 629.7

В.А. КОВАЛЕНКО

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепрпетровск, Украина

**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**

Проведен анализ влияния технологических дефектов геометрического вида, относящихся к классам локальной сплошности и поводок, возникающих при формовании деталей и агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Установлены поля допусков на параметры дефектов исследуемого вида пористости, трещиностойкости, долговечности и уровня напряженности деталей под воздействием температурного поля и силовых нагрузок. Показана необходимость учета влияния этих дефектов при проектировании и создании изделий ракетно-космической техники из полимерных композитов для обеспечения их высокого качества и функциональной надежности.

Ключевые слова: изделия ракетно-космической техники, полимерные композиционные материалы, технологические дефекты, локальные нарушения сплошности и поводки, поля допусков.

Введение

В первом сообщении о результатах исследования технологических дефектов, возникающих в производстве конструкций ракетно-космической техники (РКТ) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1] на основе математических моделей теории армирования однонаправленных структур и структур, армированных в трех направлениях ($0^\circ, \pm\varphi, 90^\circ$), получены зависимости для обоснованного назначения полей допусков физико-механических и прочностных характеристик ПКМ в результате изменения толщины формируемого полуфабриката (препрега) и изделия. Эти зависимости позволяют оценить качество технологических процессов формования композитных изделий по уровню геометрического вида дефекта данного класса.

Другими классами геометрического вида дефектов, многоуровневого классификатора [2] являются локальные нарушения сплошности в дискретных объемах ПКМ в виде пустот и микротрещин, а также локальные поводки (коробление) изделия, возникающие при формовании его паковки в технологической формообразующей оснастке.

Анализ влияния технологических дефектов

Локальные нарушения сплошности в виде пустот, обнаруживаемые в изделии методами неразру-

шающего контроля [3], представляют собой микроскопические воздушные полости, образующиеся во время формования паковки при неполном удалении паров растворителя из связующего. Этот дефект можно моделировать ведением в относительное объемное содержание компонентов ПКМ – волокон θ_v и связующего θ_c третьей составляющей – относительного объемного содержания пустот – θ_p .

Тогда в соответствии с правилом смесей получим

$$\theta_v + \theta_c + \theta_p = 1$$

или

$$\theta_v + \theta_c = 1 - \theta_p = \chi, \quad (1)$$

где $\chi < 1$.

При формировании структуры ПКМ разработчик стремится к реализации в ней максимально возможного относительного объемного содержания волокон, так как известно, что именно армирующая составляющая ПКМ обеспечивает композиту высокий уровень физико-механических характеристик (ФМХ) и прочностных свойств.

Однако в зависимости от вида расположения волокон в сечении ПКМ (плотности упаковки) в материале может быть реализовано вполне определенное θ_{vmax} , после превышения которого он перестанет быть монолитным: его ФМХ и прочностные свойства лавинообразно устремляются к нулевым значениям (рис. 1).

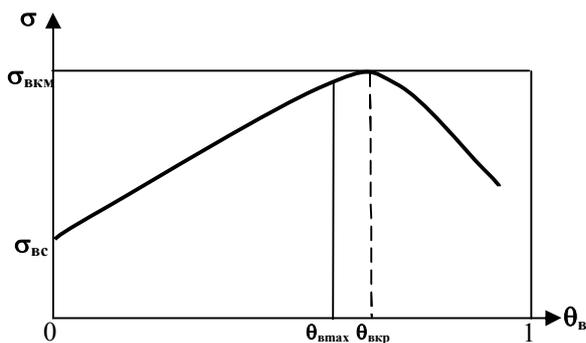


Рис. 1. Условная зависимость предела прочности ПКМ при растяжении $\sigma_{ВКМ}$ от относительного объемного содержания волокон $\theta_{В}$:
 $\sigma_{Вс}$ – предел прочности связующего;
 $\theta_{ВКр}$ – критическое относительное объемное содержание волокон

Известно [4], что при идеальном тетрагональном расположении волокон в сечении ПКМ $\theta_{ВКр} = 0,785$, а при гексагональном – $\theta_{ВКр} = 0,785$. Однако вследствие всегда имеющих в практике технологических ограничений, связанных с методами формования изделия и возможными отклонениями, в том числе и вследствие неполного удаления летучих, обычно регламентируемое максимальное относительное объемное содержание волокон $\theta_{Вmax} < \theta_{ВКр}$, исключающее попадание в закритическую область ФМХ и прочности ПКМ. Обычно $\theta_{Вmax}$ лежит в пределах 0,55...0,65.

Для анализа допусков на ФМХ и прочностные свойства ПКМ, учитывающих дефекты в виде континуального содержания пустот в ПКМ, представляется оправданным аналогично [1] исходить из приближенных формул, полученных на основе теории армирования [4, 5] с добавлением в них приращений соответствующих характеристик в пределах их паспортного интервала допусков и зависимости (1), начиная с однонаправленного армированного ПКМ, а затем переходя к ортотропным структурам $(n_0, 2n_{\pm\phi}, n_{90})$.

Так как наличие пустот $\theta_{п}$ не изменяет исходного объемного содержания волокон $\theta_{В} = \theta_{В0}$, то в соответствии с (1) ФМХ и прочностные характеристики однонаправленных ПКМ с их паспортными приращениями будут определяться формулами, аналогичными приведенным в [1] с заменой единицы на $\chi < 1$ в слагаемых, отражающих вклад связующего в данную характеристику.

Так для модуля упругости однонаправленного ПКМ вдоль волокон получим:

$$\begin{aligned} \left(E_{X_{КМ} - \Delta E_{X_{КМ}}}^{+\Delta E_{X_{КМ}}} \right) &= E_{В - \Delta E_{В}}^{+\Delta E_{В}} \cdot \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} + \\ &+ E_{С - \Delta E_{С}}^{+\Delta E_{С}} \left(\chi - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right), \end{aligned} \tag{2}$$

где, как и в [1], $\pm\Delta R_i^п$ – паспортные отклонения от номинала R (поле допуска) i-й характеристики ПКМ ($\Delta R = \Delta E_{В}^п, \Delta\theta_{В}^п, \Delta E_{С}^п$).

Для предела прочности однонаправленных хрупких ПКМ вдоль волокон

$$\begin{aligned} \left(\sigma_{ВХ_{КМ} - \Delta\sigma_{ВХ_{КМ}}}^{+\Delta\sigma_{ВХ_{КМ}}} \right) &= \frac{\sigma_{ВВ - \Delta\sigma_{ВВ}}^{+\Delta\sigma_{ВВ}}}{E_{В - \Delta E_{В}}^{+\Delta E_{В}}} \times \\ &\times \left[E_{В - \Delta E_{В}}^{+\Delta E_{В}} \cdot \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} + E_{С - \Delta E_{С}}^{+\Delta E_{С}} \left(\chi - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right) \right]. \end{aligned} \tag{3}$$

Аналогичные зависимостям (13), (17) – (20) работы [1] формулы для коэффициента Пуассона

$\nu_{ХУ_{КМ} - \Delta\nu_{ХУ_{КМ}}}^{+\Delta\nu_{ХУ_{КМ}}}$, модуля сдвига $G_{ХУ_{КМ} - \Delta G_{ХУ_{КМ}}}^{+\Delta G_{ХУ_{КМ}}}$, преде-

ла прочности на сдвиг $\tau_{ВКМХУ - \Delta\tau_{ВКМХУ}}^{+\Delta\tau_{ВКМХУ}}$, модуля упру-

гости поперек волокон $E_{У_{КМ} - \Delta E_{У_{КМ}}}^{+\Delta E_{У_{КМ}}}$, предела проч-

ности поперек волокон $\sigma_{ВУ_{КМ} - \Delta\sigma_{ВУ_{КМ}}}^{+\Delta\sigma_{ВУ_{КМ}}}$ будут иметь

место путем замены члена $\left(1 - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right)$ на $\left(\chi - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right)$.

Зависимости ФМХ паковки $(n_0, 2n_{\pm\phi}, n_{90})$,

приведенные в [1] (формулы (21)), сохраняются полностью, так как в них входят обобщенные жест-

кости $(B_{ij} \pm \Delta B_{ij})$ ((22) – (25) из [1]), содержащие

ФМХ однонаправленных слоев, которые необходи-

мо откорректировать заменой $\left(1 - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right)$ на

$\left(\chi - \theta_{В0}^{+\Delta\theta_{В}^{п}} \right)$, как отмечено выше.

Аналогично сохраняют форму записи и все ос-

тальные формулы для пределов прочности паковки,

приведенные в [1], с прежней коррекцией парамет-

ров податливости, также содержащих ФМХ однона-

правленных слоев ПКМ.

Таким образом задача определения полей до-

пусков как однонаправленных ФМХ и прочностных

свойств ПКМ, так и ортотропных структур $(n_0, 2n_{\pm\phi}, n_{90})$ решена в рамках принятых при-

ближенных зависимостей теории армирования.

Поле допуска любой i -й характеристики $\pm\Delta R_i$ ПКМ определяется при задании (регламентации) параметра χ и известных паспортных значениях полей допусков входящих в характеристику R_i компонентов однонаправленного ПКМ – волокон и связующего.

Например, для определения математического ожидания и поля допуска модуля упругости однонаправленного ПКМ вдоль волокон по формуле (2), формируемого из углеленты ЛУ-П-01А в соответствии с работой [1] (табл. 1)

$$\theta_{B0} \pm \Delta\theta_B^n = 0,63 \pm 0,04,$$

задание $\theta_\pi = 0,155$ и $\chi = 1 - \theta_\pi = 1 - 0,155 = 0,845$, а также из работы [6] (табл. 2.16)

$$E_c = (3,3-3,58) \text{ ГПа}$$

$$\text{и } E_B = (200-250) \text{ ГПа}$$

(табл. 4.15 [6]), получим математическое ожидание

$$E_c = 3,44 \text{ ГПа, } \pm\Delta E_c = 0,14 \text{ ГПа}$$

и математическое ожидание

$$E_B = 225 \text{ ГПа, } \pm\Delta E_B = 25 \text{ ГПа.}$$

Подставив эти значения в (2), получим для ПКМ с наличием относительного количества пустот

$$\theta_\pi = 0,155 (\chi = 0,845) \left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{\max} = 143,4 \text{ ГПа,}$$

$$\left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{\min} = 118,6 \text{ ГПа,}^*)$$

что соответствует полю допуска $\pm\Delta E_{X_{KM}} = 12,4$ ГПа при математическом ожидании $\pm E_{X_{KM}} = 131$ ГПа.

Для модуля упругости однонаправленного ПКМ при отсутствии пустот ($\theta_\pi = 0$, $\chi = 1$) из формулы (2) получим:

$$\left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{\max} = 144 \text{ ГПа,}$$

$$\left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{\min} = 119,1 \text{ ГПа.}$$

Относительная потеря $E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}}$ при наличии пустот составляет

$$\left(\Delta E_{X_{KM}} \right)_{\min} = \left(1 - \frac{118,6}{144,4} \right) \cdot 100\% = 0,42\% ;$$

*) Значение $\left(\begin{matrix} \max \\ \max \end{matrix} \right)$ соответствует подстановке в (2)

$-\Delta\theta_B^n$, $(E_B + \Delta E_B^n)$ и $(E_c + \Delta E_c^n)$, а значению $\left(\begin{matrix} \min \\ \min \end{matrix} \right)$ $+\Delta\theta_B^n$, $(E_B - \Delta E_B^n)$ и $(E_c - \Delta E_c^n)$.

$$\left(\Delta E_{X_{KM}} \right)_{\max} = \left[1 - \frac{\left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{0 \max}}{\left(E_{X_{KM}}^{+\Delta E_{X_{KM}}} \right)_{0 \max}} \right] \cdot 100\% =$$

$$= \left(1 - \frac{143,4}{144} \right) \cdot 100\% = 0,42\%.$$

Можно ожидать, что относительные потери и других ФМХ и прочностных свойств будут не существенными. Так, для предела прочности однонаправленного ПКМ при значениях $\sigma_{BB}^{+\Delta\sigma_{BB}} = 3,1^{+0,1}_{-0,1}$ ГПа (таблица 4.15 [6] и прежних полях допуска $E_{B-\Delta E_B}^{+\Delta E_B} = 225^{+25}_{-25}$ ГПа, $E_{c-\Delta E_c}^{+\Delta E_c} = 3,44^{+0,14}_{-0,14}$ ГПа по лучим при наличии пор

$$\left(\sigma_{X_{KM}}^{\pi} \right)_{\max}^{+\Delta\sigma_{X_{KM}}^{\pi}} = 2,29 \text{ ГПа}$$

$$\text{и } \left(\sigma_{X_{KM}}^{\pi} \right)_{\min}^{+\Delta\sigma_{X_{KM}}^{\pi}} = 1,42 \text{ ГПа,}$$

а в случае отсутствия пор

$$\left(\sigma_{X_{KM}}^{\pi} \right)_{\max}^{+\Delta\sigma_{X_{KM}}^{\pi}} = 2,3 \text{ ГПа}$$

$$\text{и } \left(\sigma_{X_{KM}}^{\pi} \right)_{\min}^{+\Delta\sigma_{X_{KM}}^{\pi}} = 1,43 \text{ ГПа,}$$

что соответствует

$$\left(\Delta\sigma_{X_{KM}} \right)_{\max} = 0,44\% \text{ и } \left(\Delta\sigma_{X_{KM}} \right)_{\min} = 0,7\%.$$

Таким образом дефект в виде наличия континуальных пор (пустот) незначительно снижает ФМХ и прочностные свойства конструкций из ПКМ, что практически не отразится на их статической несущей способности.

Однако гораздо большую опасность представляет собой снижение ресурса (долговечности) изделия при повторно-переменных нагрузках, если такой вид воздействий имеет место при эксплуатации.

При повторно-переменном нагружении поры будут играть роль источников (провокаторов) возникновения и последующего развития микротрещин. Таким образом дефекты в виде пустот (пор) смыкаются с дефектами в виде микротрещин в ПКМ, обретая тем самым механизм (модель) развития последних.

Хотя природа возникновения этих двух классов дефектов различна: поры возникают вследствие неполного выхода летучих из ПКМ в процессе полимеризации изделия, а причиной микротрещин явля-

ются, как правило, высокий уровень напряжений, возникающих и растущих в пограничных микроразделах волокна и связующего из-за усадки последнего, различия коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) матрицы и арматуры в процессе формования изделия, а также вследствие всегда имеющих место разрушенных волокон на разных стадиях технологии создания изделий из ПКМ. Установить динамику превращения дефектов пористости в дефекты в виде микротрещин по-видимому весьма сложно.

И поры и микротрещины предопределяют степень монолитности ПКМ, отсутствие их соответствует сплошности компонентов – волокон и связующего и композита в целом.

Независимо от вида последующего нагружения ПКМ условия сплошности описываются системой числовых неравенств между ФМХ и прочностными параметрами волокна и связующего, прочностью их сцепления при сдвиге и отрыве, обеспечивающих их совместную работу.

При этом обязательно выполнение всех условий монолитности [7]:

$$\frac{E_c}{E_B} \geq 0,06 \dots 0,064; \frac{\epsilon_B}{\epsilon_c} \geq 1,5 \text{ при } \epsilon_c \geq 3 \dots 5 \%;$$

$$\tau_{BC} \geq \tau_{CC} \text{ при } \tau_{BC} = (0,60 \dots 0,75) \sigma_{BC}; \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{CC}}{\sigma_{BB}} \geq 0,040 \dots 0,060; \quad \frac{\sigma_{BC}}{\sigma_{BB}} \geq 0,06 \dots 0,07,$$

где ϵ_B, ϵ_c – предельная деформация волокна и связующего; τ_{CC} – прочность на сдвиг взаимодействия (сцепления) матрицы и волокна на границе их раздела.

При одновременном нагружении и нагревании до температуры эксплуатации T учитывается и разница в коэффициентах теплового расширения α_c и α_B [7]:

$$\frac{\sigma_{BC}}{\sigma_{BB}} \geq 0,06 - (\alpha_c - 2,23\alpha_B) T \frac{E_c}{\sigma_{BB}};$$

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_B} \geq 1,5 + \frac{(0,3\alpha_c + \alpha_B) T}{\epsilon_B}; \quad (5)$$

$$\frac{\tau_{CC}}{\sigma_{BB}} \geq 0,04 + 0,06(\alpha_c - 2,33\alpha_B) T \frac{E_c}{\sigma_{BB}};$$

$$\frac{E_c}{E_B} \geq 0,064 - 1,2T(\alpha_c - 2,33\alpha_B).$$

Однако эти неравенства не вносят значимых изменений в (4).

Указанные выше требования к свойствам матриц вытекают из условий сохранения монолитности материала. Они в значительной степени превосходят уровень свойств, реализуемых в промышленно отвержденных (густосетчатых) полимерах (табл. 1) [6].

При повторно-переменных нагрузках, вызывающих усталость, в [6] отмечается, что разрушение однонаправленных ПКМ начинается с матрицы при достижении в ней напряжений предела выносливости σ_{ac} :

$$\sigma_{a,ПКМ} = \sigma_{ac} \frac{E_B}{E_C} \theta_B. \quad (6)$$

В [8] для учета влияния пористости на ФМХ и прочностные свойства ПКМ предложена приведенная в [9] формула:

$$(\text{ФМХ})_{\text{пор}} = \text{ФМХ}_0 (1 - \theta_{\text{пор}}^2) e^{-B\theta_{\text{пор}}}. \quad (7)$$

Таблица 1

Рассчитанные показатели свойств компонентов и потребные их характеристики, обеспечивающие монолитность однонаправленных ПКМ

Свойства компонентов	Показатели		Отношение реализуемых к потребным
	Реализуемые	Потребные	
Волокон			
σ_{BB} , МПа	2350	4200	0,56
E_B , ГПа	75	100	0,75
ϵ_B , %	3	3,5	0,857
Требуемые свойства матриц			
σ_{BC} , МПа	140	250 ¹⁾	0,56
E_C , ГПа	4,5	5,7	0,79
ϵ_c , %	4,5	5,25	0,857
Свойства межфазного слоя			
τ_{CC} , МПа	94	168 ¹⁾	0,56

Примечание. ¹⁾ труднодостижимые показатели.

Если паспорт на ПКМ содержит $\theta_{\text{пор}}^{\text{пасп}}$ и соответствующие этому количеству пор $(\text{ФМХ})_{\text{пор}}$, то, определяя ФМХ беспористого ПКМ по формулам теории армирования [4-5], можно получить значение коэффициента В:

$$B = \frac{1}{\theta_{\text{пор}}^{\text{пасп}}} \left\{ \ln \frac{(\text{ФМХ})_{\text{пор}}^{\text{пасп}}}{(\text{ФМХ})_0} - \ln \left[1 - (\theta_{\text{пор}}^{\text{пасп}})^2 \right] \right\}. \quad (8)$$

Это значение В может быть в дальнейшем использовано для определения $(\text{ФМХ})_{\text{пор}}$ при их значении в реальном изделии.

Например, снижение предела прочности ПКМ, указанного в паспорте, относительно теоретически беспористого материала, определенного по формуле правила смесей $\sigma_{\text{вх}0} = \sigma_{\text{вв}}\theta_{\text{в}} + \sigma_{\text{вс}}^*(1 - \theta_{\text{в}})$ равно

$\frac{\sigma_{\text{впор}}}{\sigma_{\text{в0}}} = \frac{1600}{1780} = 0,9$ при $\theta_{\text{пор}}^{\text{пасп}} = 0,05$ ($\sigma_{\text{вс}}^*$ - напряжение в матрице при $\varepsilon_{\text{с}} = \varepsilon_{\text{вв}}$). Тогда по формуле (8) получим $B = -2,057$. При формовании реального изделия получено $\theta_{\text{пор}} = 0,1$. Ожидаемый предел прочности этого ПКМ при зафиксированной пористости $\theta_{\text{пор}} = 0,1$ составит при $B = -2,057$

$\sigma_{\text{вх пор}} = 1780(1 - 0,1^2)e^{2,057 \cdot 0,1} = 1435$ МПа, что составляет $\frac{1435}{1600} = 0,897$ от паспортного значения этой величины. При допуске $\pm 5\%$ от средней величины 1600 МПа $\sigma_{\text{вх}} = 1520$ МПа и прогнозируемое значение $\sigma_{\text{вх пор}} = 1435$ МПа не укладывается в поле допуска.

Статическая прочность ПКМ, как известно [6], определяется условиями монолитности ПКМ, нарушения которой связаны с не только с наличием пор, но и с зональным отсутствием сцепления на границе «волокно – связующее», а также с наличием отдельных разрушенных волокон еще на стадии их предварительной технологической переработки в тот или иной вид армирующего полуфабриката.

Дефекты в виде зон отсутствия сцепления на границе «волокно – связующее» и трещин волокон в отличие от пор не имеют объема, поэтому их роль в снижении статической прочности ПКМ не может быть выявлена формулами, полученными на основе правила смесей.

Однако эти дефекты при паспортизации ПКМ в интегральном, но скрытом виде уже учитываются в ФМХ и прочностных его свойствах, регламентированных в паспорте соответствующими полями допусков, и отражены в зависимостях (7) и (8).

Их уровень предопределяет трещиностойкость ПКМ т.е. его сопротивление росту этих трещин под действием трещиноподвижных сил, вызывающих их рост [6]. Трещиностойкость ПКМ, связанная с дефектами микроуровня,^{*)} количественно определяется с помощью различных критериев. В [6] отмечается, что в соответствии с линейной упругостью механики разрушения (ЛУМР) используют критерий интенсивности напряжений $K_{\text{с}}$ как наиболее удобный для расчетов и проще определяемый экспериментально по ISO 13586 или иным стандартам путем соответствующих испытаний образцов ПКМ с нанесенными надрезами, создающими макроконцентрации напряжений. Микроконцентрации напряжений, возникающие вследствие рассмотренных выше дефектов, накладываются на макроконцентрации, которые могут быть определены аналитически исходя из гипотезы гомогенного анизотропного тела [10]:

$$\left(\frac{\sigma_{\beta}}{\sigma} \right) = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \times \sqrt{\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \left[1 + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G_{xy}} - 2 \left(1 + \sqrt{v_{xy} v_{yx}} \right) \right]}, \quad (9)$$

где σ_{β} – напряжения, возникающие на кромках эллиптического отверстия на большой полуоси при растяжении вдоль малой полуоси эллипса; σ – напряжения, возникающие вдали от концентратора в виде эллиптического отверстия; t – большая полуось эллипса; ρ – радиус возле малой полуоси.

В [10] показано, что при предельном переходе, когда $\sigma = \sigma_{\text{в}}$ – пределу прочности гладкого образца, а $\sigma_{\beta} = \sigma_{\text{вв}}$ – пределу прочности образца с надрезом коэффициент концентрации напряжений $\beta = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{вв}}} = 1,1 \dots 1,2$.

Таким образом можно принять среднее значение β равным $\beta = 1,15_{-0,05}^{+0,05}$.

Тогда поле допуска предела прочности ПКМ, определяющего его трещиностойкость, можно записать в виде $\sigma_{\text{в}+\Delta\sigma_{\text{в}}}^{+\Delta\sigma_{\text{вв}}} = 0,87\sigma_{\text{в}+\Delta\sigma_{\text{в}}}^{+\Delta\sigma_{\text{в}}}$, где поле допуска $\sigma_{\text{в}}$ определяется по паспортным данным на

^{*)} Кроме дефектов, возникающих на микроуровне, в ПКМ горячего отверждения в особенности многослойной структуры с различной схемой армирования всегда имеет место самоуравновешенное напряженное состояние, которое может явиться провокатором снижения трещиностойкости композита на макроуровне (см. ниже). Влияние этих напряжений на несущую способность ПКМ практически не нашло должного отражения в исследованиях.

ПКМ, а в случае их отсутствия – по процентному отклонению от среднего значения статического предела прочности.

Условный предел трещиностойкости является важной характеристикой усталостной прочности ПРКМ. В [10] показано, что коэффициент концентрации напряжений при повторно-переменных нагрузках на базе $2 \cdot 10^6$ циклов β_a равен

$$\beta_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{\beta a}} = (1,2 \dots 1,3) = 1,25_{-0,05}^{+0,05},$$

где $\sigma_a, \sigma_{\beta a}$ – пределы усталости при пульсирующем растяжении образца без надреза и с надрезом соответственно. Тогда $\sigma_{\beta a + \Delta\sigma_{\beta a}} = 0,8\sigma_{a + \Delta\sigma_a}$.

При этом σ_a определяется либо при паспортных

испытаниях образцов на усталость с оговоренным(или экспериментально определенным) полем допуска или приближенно, следуя рекомендациям [6, с. 43] для случая однонаправленного ПКМ, можно воспользоваться зависимостью (6).

Анализ сравнительно небольшого количества источников, например, [6, 10-12], в которых содержатся отрывочные сведения по соотношениям

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{в\text{ПКМ}}}$$

для различных ПКМ, полученные на базе 107 циклов, но при различной асимметрии цикла и не полных данных по условиям испытаний, позволяет установить коэффициенты усталостной прочности, приведенные ниже в таблицах 2 – 4 и на рис. 6, заимствованные из различных источников.

Таблица 2

Усталостные свойства углепластика. Отношение прочности после 10^7 циклов нагружения к исходному пределу прочности при растяжении ¹⁾[11]

Материал	Макро-структура	f, Гц	Отношение	Материал	Макро-структура	f, Гц	Отношение
УВ-Э ²⁾	0°	30	0,53	УВ-Э ^{4,6)}	КИ	10	0,38
УВ-Э ²⁾	±45°	30	0,56	УВ-Э ^{4,7)}	КИ	10	0,26
УВ-Э ²⁾	90°	30	0,54	УВ-Э ²⁾ (127°С)	0°	30	0,58
Алюминий 2024 ТЗ	–	–	0,28	УВ-Э ²⁾ (177°С)	0°	30	0,54
Сталь 4130	–	–	0,44	УВ-полиимид ⁸⁾	0°	30	0,67
УВ-Э ³⁾	0°	30	0,56	УВ-порлисульфон ⁹⁾	0°	30	0,56
УВ-Э ^{4,5)}	КИ ¹⁰⁾	10	0,55				

Примечания: ¹⁾ $\sigma_{в}$ определялся при комнатной температуре 22°С; ²⁾ Т300-PR313 с объемной долей волокна 61 %;

³⁾ Т300-5208 с объемной долей волокна 60...70 %; ⁴⁾ Т300-934 с объемной долей волокна 60...66 %; ⁵⁾ R=0;

⁶⁾ усталость при циклах нагружения «сжатие-растяжение» ($\sigma_{сж} = 0,15 \sigma_{в}$); ⁷⁾ То же при $\sigma_{сж} = 0,23 \sigma_{в}$.

⁸⁾ AS-4397 – полиимид с объемной массой волокна 64 %; ⁹⁾ AS-P1700 – полисульфон с объемной массой волокна 57 %;

⁹⁾ КИ – квазиизотропный пластик с ориентацией [0°;45°;90°;-45°;90°;45°).

Таблица 3

Усталостная прочность пластмасс, армированных волокном [10]

Материал		Усталостная прочность (N=10 ⁷), МПа	Прочность при статическом растяжении, МПа	Отношение усталостной прочности к статической
Смола	Армирующий материал			
Полиэфирная	Стекломат из рубленого волокна (стекло E)	28,6 ¹⁾	120,4	0,24
Полиэфирная	Мат со случайным расположением волокон (стекло E)	42,2 ¹⁾	113,7	0,37
Полиэфирная	Атласная ткань (стекло E)	85,7 ¹⁾	300,9	0,28
Эпоксидная	Нетканый материал с перпендикулярным расположением волокон в слоях (стекло E)	154,7 ²⁾	473,3	0,33
Полиэфирная	Армирование в одном направлении (углеродное волокно)	816,0 ¹⁾	1020	0,80

Примечания: ¹⁾ пульсирующие напряжения; ²⁾ знакопеременные напряжения.

Таблица 4

Усталостные характеристики стеклопластиков при знакопеременном изгибе [12]

Стеклопластик	Частота, Гц	Усталостная прочность при $N=10^7$ циклов, МПа	$m_{ц}^*$
АГ-4С однонаправленный ортогонально-армированный (1:1)	25	110	0,2
		70	0,15
ЭЗ-18С однонаправленный ортогонально-армированный (1:1)	15 50 (с теплоотводом)	170 ^{**})	0,30 ^{**}
		143	0,25
АГ-4В	25	42	0,30
Полиэфирный на основе ткани типа Т-11 и связующего ПН-3 НПС-609-21М	9	120	0,29
		100	0,25
Эпоксидно-фенольный типа СТЭР-1-30		200	0,32
ДСВ-2-Р-2М Марки Л Марки О Марки П	50	29 ^{**})	0,18 ^{**})
		56 ^{**})	0,23 ^{**})
		54 ^{**})	0,21 ^{**})

Примечания: *) коэффициент усталостной прочности $m_{ц}$ равен отношению усталостной прочности $R_N(\sigma_N)$ к разрушающему напряжению при однократном нагружении; **) испытания проводили на односторонний циклический изгиб по режиму $0-\sigma_{max}$.

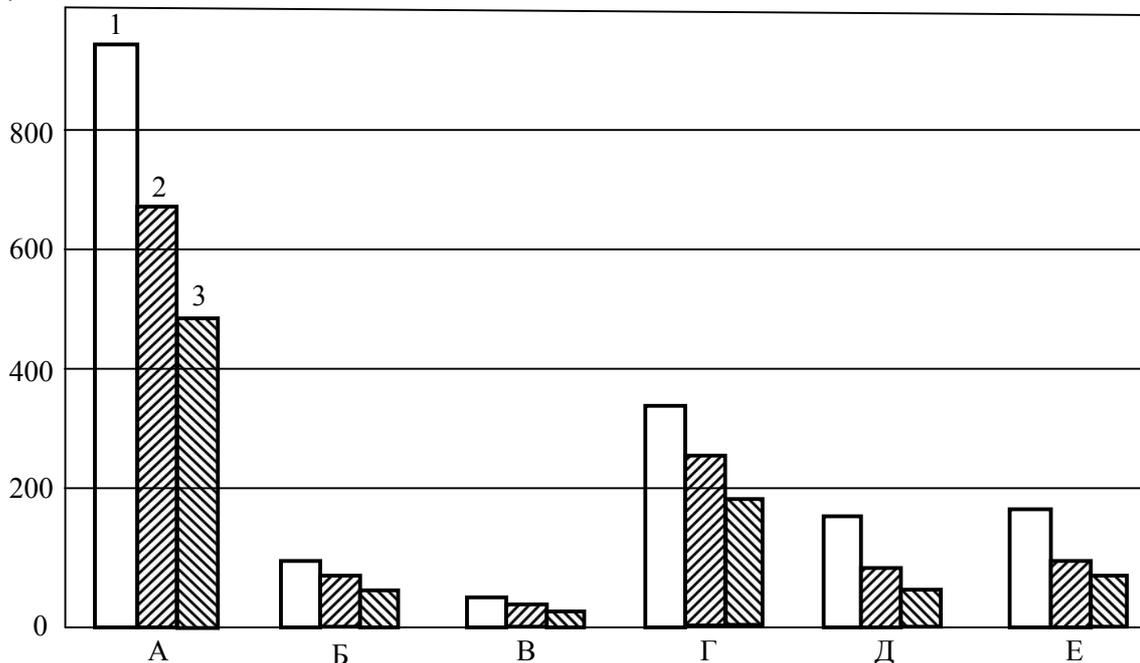
$$\sigma^+/\rho, \text{ ГПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$$


Рис. 2. Усталостные свойства – отношение удельного предела прочности при растяжении σ^+/ρ к плотности

при статическом (1) и многоцикловом (2 – циклическая долговечность после 10^5 циклов нагружения; 3 – циклическая долговечность после 10^7 циклов нагружения) нагружении конструкционных материалов [6, 11]: А – однонаправленный эпоксидный углеволокнит $[0^\circ]$; Б – эпоксидный углеволокнит $[\pm 45^\circ]$; В – эпоксидный углеволокнит $[90^\circ]$; Г – алюминий 2024Т3; Д – сталь; Е – эпоксидный углеволокнит $[0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; -45^\circ]$ и $[-45^\circ; 90^\circ; +45^\circ; 0^\circ]$

Из табл. 2 – 4 и рис. 2 следует, что для однонаправленного углепластика

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{в\text{ПКМ}}} = (0,53...0,58) = 0,555^{+0,025}_{-0,025},$$

для однонаправленного стеклопластика

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{в\text{ПКМ}}} = (0,22...0,3) = 0,26^{+0,04}_{-0,04};$$

для изотропных материалов (алюминий, сталь)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{в}} = (0,28...0,44) = 0,36^{+0,08}_{-0,08}.$$

В [18] для изотропных материалов приведен

$$\text{диапазон } \frac{\sigma_a}{\sigma_{в}} = (0,2...0,4) = 0,3^{+0,1}_{-0,1}.$$

Считая, что это соотношение справедливо для предела усталости ПКМ, воспользуемся формулой (6) для прогнозирования, например, предела усталости углепластика КМУ-9: углеродная лента ЭЛУР-ПР-0,80 ($\sigma_{в}=1500$ МПа; $E_{в}=130$ ГПа на эпоксидном связующем ЭН9Б ($\sigma_{вс}=80$ МПа; $E_{с}=3600$ МПа) имеем:

$$\sigma_{а\text{КМУ-9}} = 0,3 \cdot 81 \frac{130000}{3600} = 878 \text{ МПа};$$

$$\frac{\sigma_{а\text{КМУ-9}}}{\sigma_{в\text{КМУ-9}}} = \frac{878}{1500} = 0,585,$$

что соответствует диапазону экспериментальных значений $0,555^{+0,025}_{-0,025}$.

Для однонаправленного высокопрочного стеклопластика [14]

$$\sigma_{в\text{СП}} = (1600...2100) \text{ МПа} = 1800 \text{ МПа}; E_{в} = 80 \text{ ГПа};$$

$$\sigma_{а\text{СП}} = 0,3 \cdot 61 \frac{80000}{3600} = 410 \text{ МПа};$$

$$\frac{\sigma_{а\text{СП}}}{\sigma_{в\text{СП}}} = \frac{410}{1800} = 0,228,$$

что соответствует диапазону экспериментальных значений $0,26^{+0,04}_{-0,04}$, приведенному выше.

Остановимся на анализе дефектов геометрического вида, отнесенных классификатором [2] к классу локальных поводок (коробление). Известно, что локальные поводки изделий РКМ из ПКМ связаны в первую очередь с термонеуравновешенностью их структуры, имеющей место вследствие несимметрии армирующих слоев относительно срединной поверхности, применения поливолоконистых (гибридных) материалов, а также из-за отклонений в ориентации армирующих слоев и влияния градиента температурных полей от формообразующей оснастки к наружным слоям паковки.

Поводки локальных зон интегральных конструкций, расположенных внутри зоны, ограниченной жесткими продольно-поперечными подкрепляющими элементами, регламентируют допустимой величиной нормального к срединной поверхности максимального перемещения (прогиба) исходя из условий гладкости внешней поверхности изделия.

Поводки агрегатов (панелей), подлежащих после деформирования монтажу в жестком каркасе сборной конструкции регламентируют, исходя из допустимого уровня остаточных (монтажных) напряжений, возникающих в панели после частичной ликвидации перемещений (коробления) монтажными средствами. Прогиб подкрепленной зоны интегральной конструкции может быть регламентирован исходя из уровня (индекса) напряженности ψ . Под индексом напряженности будем понимать численное значение правой части принятого критерия прочности ПКМ $\psi \leq 1$, который при исчерпании несущей способности материала в рассматриваемой точке равен 1 [15].

В пакетах, реализующих метод конечных элементов, в качестве критерия прочности чаще всего используется критерий Мизеса-Хилла, для которого [15]:

$$\psi_i = \frac{\sigma_{1i}^2}{\sigma_{в1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{\sigma_{в1i}\sigma_{в2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{\sigma_{в2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{\tau_{в12i}^2}, \quad (10)$$

где σ_{1i} , σ_{2i} , τ_{12i} , $\sigma_{в1i}$, $\sigma_{в2i}$, $\tau_{в12i}$ – действующие напряжения в i -м слое ПКМ и его пределы прочности в системе координат 102. где направление 1 соответствует расположению армирующих волокон однонаправленного монослоя.

Относительный максимальный прогиб равен

$$\bar{w}_{\max} = \frac{w_{\max}}{\delta}, \quad (11)$$

где δ – толщина пакета ПКМ.

Значения индекса напряженности различны в различных монослоях. Поэтому необходимо определять его в каждом i -м слое и выявить $\psi_{i\max}$.

В термонеуравновешенном незаневоленном пакете напряженное состояние в значительной степени нейтрализуется короблением. Поэтому максимальный индекс напряженности $\psi_{i\max}$ является односторонней характеристикой прогиба \bar{w}_{\max} .

В сборной конструкции, при эксплуатации которой прогибы в значительной степени нейтрализованы монтажным напряженным состоянием, накладываемым на возникающее вследствие эксплуатационных воздействий, необходимо нормировать не \bar{w}_{\max} , а $\psi_{\bar{w}_{\max}}$. Допустимым является уровень $\pm \Delta\psi_{\bar{w}_{\max}}$, при котором компоненты эксплуатации

онного напряженного состояния вместе с монтажными не будут превосходить значений [15]:

– для высоконагруженных конструкций $\psi_{\bar{\omega}} \leq 0,8$; $\psi_{M_{max}} + \psi_{\bar{\omega}_{max}} \leq 1$, где $\psi_{M_{max}}$, $\psi_{\bar{\omega}_{max}}$ – индексы напряженности в максимально нагруженном монослое от монтажных и эксплуатационных воздействий. Так как $\psi_{M_{max}} + \psi_{\bar{\omega}_{max}} < 1$, то $\psi_{M_{max}} < 1 - 0,8 \leq 0,2$.

– для средненагруженных конструкций $\psi_{\bar{\omega}_{max}} \leq 0,6$. Тогда $\psi_{M_{max}} \leq 0,4$.

– для слабнонагруженных конструкций $\psi_{\bar{\omega}_{max}} \leq 0,4$. Тогда $\psi_{M_{max}} \leq 0,6$.

Указанные выше рекомендации по величине $\psi_{\bar{\omega}_{max}}$ могут быть уменьшены, а по $\psi_{M_{max}}$ – увеличены при наличии особенностей эксплуатации или изготовления изделия. Однако в случае формования изделия из термоуравновешенного ПКМ $w=0$, но самоуравновешенное напряженное состояние все равно имеет место. Поэтому несущая способность изделия в эксплуатации будет снижаться за счет наличия этого самоуравновешенного состояния. Вследствие этого рациональность схемы армирования и (или) термического режима формования (или применения данного типа связующего) следует проверять по предыдущей схеме для конструкций различной степени ответственности по установленному уровню напряженности самоуравновешенного напряженного состояния:

- для высоконагруженной $\psi_c \leq 0,2$;
- для средненагруженной $\psi_c \leq 0,4$;
- для слабнонагруженной $\psi_c \leq 0,6$.

Если считать взаимобратимыми задачи коробления заневоленной панели в жесткой окантовке и коробления идентичной ей свободной панели по напряженному состоянию, возникающему в первом случае до выемки изделия из формообразующей оснастки, а во втором – при монтажном заневоливании ранее свободной панели, то возникает возможность обоснованного в рамках этого допущения определе-

ния поля допуска на максимальный прогиб в первой задаче («прямой») путем нахождения его аналога во второй («обратной») задаче.

Решение первой и второй задач может осуществляться при следующих условиях:

– известны (заданы) углы ориентации всех однонаправленных монослоев пакета ПКМ панели φ_i относительно фиксированного направления, общее количество монослоев n ;

– регламентированы допустимые отклонения каждого монослоя $\Delta\varphi_i$, predeterminedные реализуемой технологией формообразования изделия;

– оговорены условия расположения монослоев относительно срединной поверхности панели заданных размеров;

– принято допущение о виде закрепления панели в окантовывающем каркасе, который считается абсолютно жестким (свободное или защемление).

Известно решения обратной задачи на основе аналитической модели [16 - 19], частные случаи которых, реализованные при выполненных условиях, приведенных выше (за исключением второго) свидетельствуют о следующем [19]: чем больший разнос термонеуравновешенных монослоев относительно срединной поверхности панели, тем больше максимальный прогиб и соответственно выше индекс напряженности $\psi_{\bar{\omega}_{max}}$ в точке максимального прогиба при его устранении путем приложения монтажных усилий (рис. 3).

Рис. 3 иллюстрирует ожидаемый (прогнозируемый) результат, который, как правило, известен проектировщику априори. Поэтому будем исходить из того, что структура пакета а, б или в (рис. 3) предопределена некоторыми обоснованными аргументами, в силу чего является заданной.

Приведенные на рис. 3 результаты получены в нашей работе [20] для пакета из однонаправленных слоев углепластика, ФМХ и прочностные свойства которого приведены в табл. 5. Паковка отформована из шести монослоев толщиной 0,12 мм при температуре $\Delta T = 100K$.

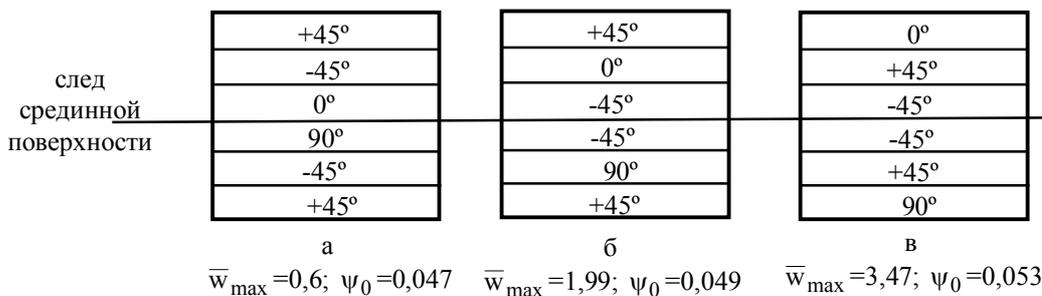


Рис. 3. Максимальные прогибы и соответствующие им максимальные индексы напряженности панели при $\Delta T = 100K$. Размер панели 500×500 мм

Таблица 5

ФМХ монослоя

Параметр	Значение
Продольный модуль упругости, ГПа	100
Поперечный модуль упругости, ГПа	10
Модуль сдвига, ГПа	6
Коэффициент Пуассона	0,35
Продольный КЛТР, 1/К	0
Поперечный КЛТР, 1/К	$30 \cdot 10^{-6}$
Продольный предел прочности, МПа	
на растяжение	900
на сжатие	700
Поперечный предел прочности, МПа	
на растяжение	50
на сжатие	120
Предел прочности на сдвиг, МПа	75

Анализ данных рис. 3 позволяет установить взаимно-однозначную связь между относительным максимальным прогибом \bar{w}_{\max} и индексом напряженности термонеуровнешенных структур ПКМ, близкую к виду

$$\Psi_{\max} = A\bar{w}_{\max}^2 + B\bar{w}_{\max} + C. \quad (12)$$

В частности, для углеродной структуры, показанной на рис. 3, а, $A=-0,0002$; $B=0,002$, $C=0,047$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,999$.

Зависимость (12) позволяет для заданной структуры и известных ФМХ ПКМ установить индекс напряженности локальной зоны, измеряя максимальный прогиб после формования.

Вид зависимости (12), как показали наши исследования [20], существенно различен для ПКМ, состоящих из однонаправленных монослоев в упаковке с разной степенью армирования, не только для угле-, стекло-, органопластиков и их гибридных сочетаний, но и для одного и того же класса композита, изготавливаемого из различных по физико-механическим и прочностным свойствам волокон и связующего.

С целью анализа влияния отклонения монослоев $\pm\Delta\varphi_i$ на $\bar{w}_{0\max}$ и Ψ в [20] были проведены численные исследования в пакете МКЭ на примере структуры ПКМ рис. 3 и его ФМХ (табл. 5) различных сочетаний в слоях $\pm\Delta\varphi=3^\circ$ и $\pm\Delta\varphi=5^\circ$ на величину w_{\max} и Ψ . Исследования показали, что наиболее неблагоприятные для прогиба сочетания отклонений в монослоях не превышают 12 % и в сторону уменьшения w_{\max} . При этом отклонение индекса напряженности не превышают 4 % от его значения при отсутствии отклонений в углах армирования структуры.

Выводы

Проведенные выше исследования технологических дефектов в агрегатах РКТ из ПКМ геометрического вида, относящихся к классу нарушений сплошности в дискретных объемах структур ПКМ и локальных поводов (коробления) позволили установить допуски на ФМХ и прочностные свойства композита, связанные с наличием в нем пористости, трещиностойкостью и усталостью, а также локальными поводками изделия и соответствующей им напряженностью термонеуровнешенных структур.

Показана необходимость учета уровня индекса напряженности интегрально терморавновесных структур ПКМ, который вносит определенный вклад в напряженное состояние конструкций РКТ из ПКМ от эксплуатационных воздействий. Этот вклад увеличивается при росте разности термонеуровнешенных слоев относительно срединной поверхности пакета интегрально терморавновесной структуры.

Литература

1. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формуемого изделия от проектного значения [Текст] / В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Вып. 3(90). – 2012. – С. 10 – 21.
2. 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*. – Вып. 3(70). – 2010. – С. 40 – 49.
3. Потапов, А.И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов [Текст] / А.И. Потапов, Ф.П. Пеккер. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.
4. Гайдачук, В.Е. Механика волокнистых композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1991. – 97 с.
5. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.
6. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: НАТ, 2008. – 822 с.
7. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров [Текст] / А.Л. Рабинович. – М.: Наука, 1970. – 482 с.
8. Порошковая металлургия. Материалы, технология, области применения [Текст] / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др. – К.: Наукова думка, 1985. – 624 с.

9. Гун, Г.С. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями [Текст] / Г.С. Гунн, М.В. Чукин. – Магнитогорск, 2006. – 323 с.

10. Фудзин, Т. Механика разрушения композиционных материалов [Текст]: пер. с японского / Т. Фудзин, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

11. Справочник по композиционным материалам [Текст]: В 2-х кн. – Кн. 1. – под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.

12. Конструкционные стеклопластики [Текст] / В.И. Альперин, Н.В. Корольков, С.Л. Рогинский и др. – М.: Химия, 1979. – 360 с.

13. Прочность. Устойчивость. Колебания [Текст]: справочник в трех томах. – Т. 1. – Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1966. – 831 с.

14. Композиционные материалы [Текст] / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

15. Гайдачук, В.Е. О допустимом уровне напряженности деталей авиаконструкций, возникающих при их производстве или ремонте упругим деформированием [Текст] / В.Е. Гайдачук // Самолетостроение. Техника воздушного флота: респ.

межвед. науч.-техн. сб. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1987. – Вып. 54. – С. 79–83.

16. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

17. Молодцов, Г.А. Напряженные элементы конструкций летательных аппаратов / Г.А. Молодцов. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.

18. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.

19. Ставиченко, В.Г. Метод учета температурного напряженно-деформированного состояния при расчетах на прочность панелей обшивки из слоистых композитов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02. – Х., 2010. – 149 с.

20. Коваленко, В.А. Исследование температурного напряженно-деформированного состояния композитных панелей при различной степени термодинамической равновесности 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.

Поступила в редакцию 7.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования ракетно-космических аппаратов В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЕФЕКТІВ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ У ВИРОБНИЦТВІ АГРЕГАТИВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ. ПОВІДОМЛЕННЯ 2. ДОПУСКИ НА ПОРУШЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ МАТЕРІАЛУ ТА ЛОКАЛЬНІ ПОВОДКИ ВИРОБУ

В.О. Коваленко

Проведено аналіз впливу технологічних дефектів геометричного вигляду, що відносяться до класів локальної суцільності та поведок, що виникають при формуванні деталей і агрегатів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. Встановлено поля допусків на параметри дефектів досліджуваного виду пористості, тріщиностійкості, довговічності та рівня напруженості деталей під впливом температурного поля і силових навантажень. Показана необхідність обліку впливу цих дефектів при проектуванні і створенні виробів ракетно-космічної техніки з полімерних композитів для забезпечення їх високої якості та функціональної надійності.

Ключові слова: виробництво ракетно-космічної техніки, полімерні композиційні матеріали, технологічні дефекти, локальні порушення суцільності та поведки, поля допусків.

RESEARCHING OF DEFECTS RESULTING IN PRODUCTION AGGREGATES OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY MADE OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS. REPORT 2. TOLERANCES FOR MATERIAL DISCONTINUITY AND THE LOCAL PRODUCT STRAINS

V.A. Kovalenko

The analysis of the impact of technological defects of geometric type was carried out. These defects belong to the classes of the local continuity and products strains that arise during forming details and aggregates of rocket and space technology made of polymer composite materials. Field of tolerances for the parameters of the investigated type of porosity defects, fracture toughness, durability and details level of tension under the influence of the temperature field and power loads have been established. The need to consider the impact of these defects in the design and creation of products for rocket and space technology made of polymer composites for their high quality and functional reliability has been demonstrated.

Key words: product space rocket technology, polymer composite materials, technological defects, local discontinuities and products strains, field of tolerances.

Коваленко Виктор Александрович – канд. техн. наук, начальник лаборатории, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.