

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 1. ДОПУСКИ НА ОТКЛОНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ  
ФОРМИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ ОТ ПРОЕКТНОГО ЗНАЧЕНИЯ**

*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 для физико-механических и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов в результате изменения толщины формируемого полуфабриката (препрега) и изделия. Полученные зависимости позволяют оценить качество технологических процессов формования полуфабрикатов и изделий из полимерных композиционных материалов по уровню геометрического вида дефекта данного класса.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, технологический процесс формования, дефекты отклонения толщины изделия, поля допусков.

**Введение**

В нашей работе [1] показано, что немалозначимыми составляющими комплексной программы научного обеспечения создания высокоэффективных агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются 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 обсуждались различные виды этих дефектов [2 - 9].

В работе [9] предложен многоуровневый классификатор дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций авиакосмической техники (АКТ) из ПКМ, включающий в себя 8 видов дефектов и 24 их класса, а также характеристики технологических операций, причины их возникновения и проявления и конечный характер влияния. В [9] отмечается, что предложенный многоуровневый классификатор позволит проводить анализ влияния всех видов дефектов и их классов на базе соответствующих математических моделей, направленных на поиск обоснованных полей допусков с целью прогнозирования технологических возможностей производства прогрессивных интегральных конструкций АКТ из ПКМ, а также динамики их снижения по мере освоения изделия. Именно эта объемная проблема ждет своего решения.

**Допуски на отклонения толщины  
формируемого изделия  
от проектного значения**

В связи с этим в настоящей статье сделана попытка рассмотреть один класс вида геометрических дефектов, возникающих в производстве конструкций АКТ из ПКМ – несоответствие ее толщины проектной, возникающее на технологических операциях пропитки препрега связующим или при формировании паковки, проявляющееся после ее формования и снижающее физико-механические характеристики (ФМХ) ПКМ в локальной зоне появления этого дефекта и несущую способность изделия (рис. 1).

Толщина формируемого изделия из ПКМ складывается из количества слоев армирующего материала

$$\delta = \delta_0 n, \quad (1)$$

где  $n$  – число слоев ленты, ткани или препрега.

Толщина монослоя  $\delta_0$  зависит от технологии формирования паковки и исходного состояния монослоя [7 - 8].

Если формирование ведется из пропитанной связующим ленты – препрега, то в ней в пределах допуска должно быть реализовано объемное содержание волокон  $\theta_v$  и связующего  $\theta_c$ . В противном случае возникает дефект «отклонение толщины от номинала  $\delta$ ». Дефект обнаруживается либо до начала формирования изделия на стадии входного контроля, либо в готовом изделии.

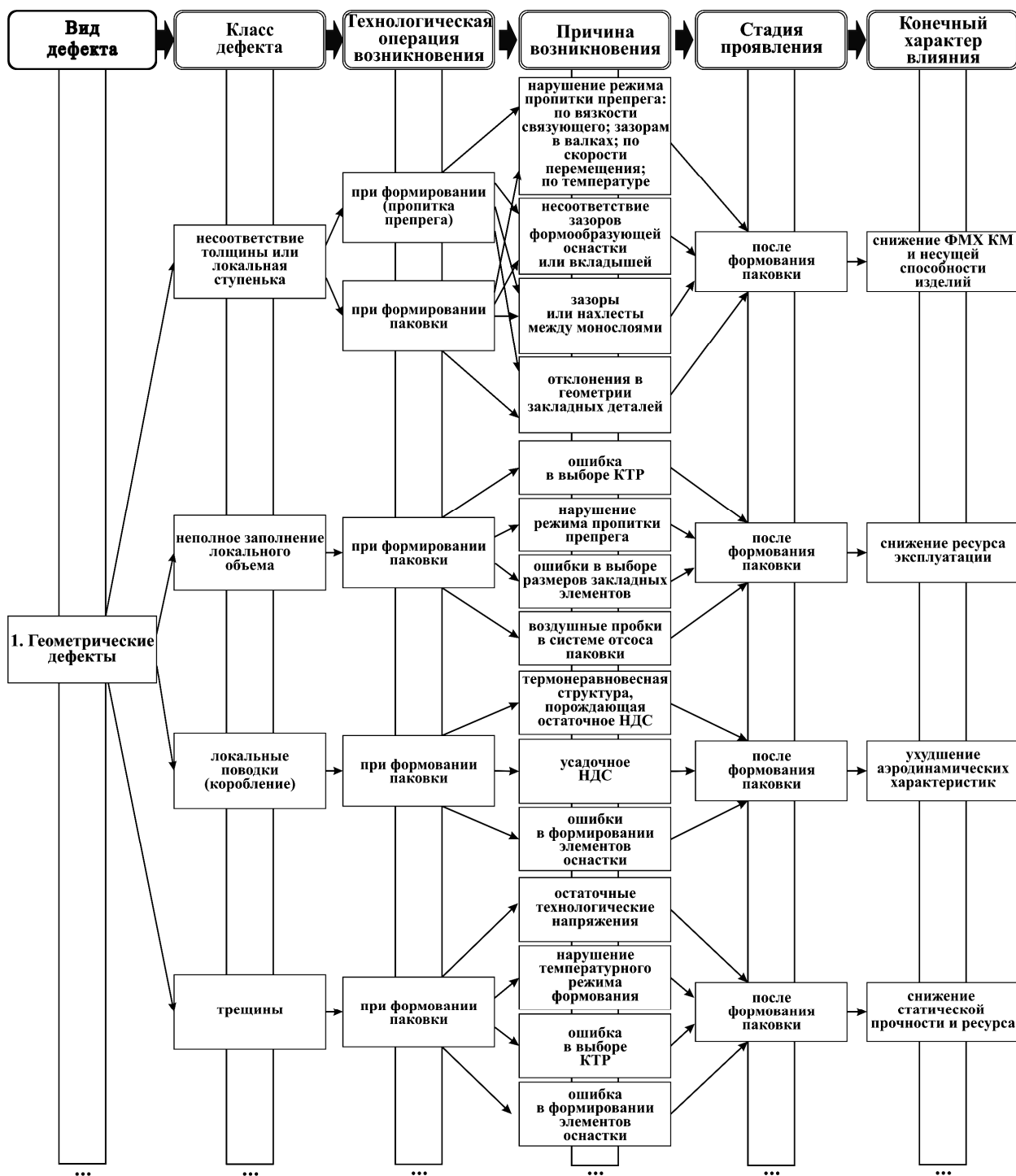


Рис. 1. Фрагмент классификатора дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из полимерных КМ

В первом случае он вызван нарушением регламентов пропитки полуфабриката (препрега), связанным с отклонением режимов «давление – время» ( $p - \tau$ ), «температура – время» ( $T - \tau$ ), совместного нарушения режима ( $p, T - \tau$ ) или отклонением скорости пропитки ( $v_{проп}$ ), т.е. режима « $\tau$ ».

При этом наиболее вероятно при любом нарушении утолщение препрега, т.е.  $+\delta$  за счет прира-

щения относительного объемного содержания связующего  $\theta_c$ , так как сдавливание волокон невозможно. Единичное сечение фрагмента толщины препрега имеет вид, показанный на рис. 2.

Нормальное поперечное сечение имеет погрешность, соответствующую допуску, гарантированному поставщиком армирующего полуфабриката  $\Delta\delta$ .

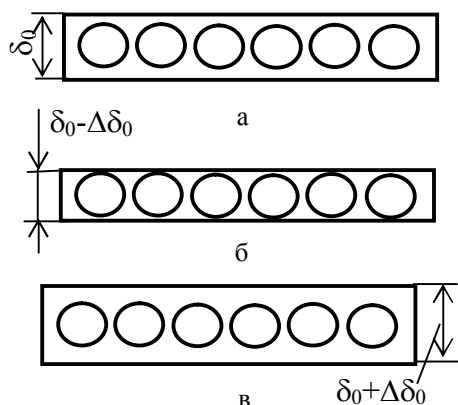


Рис. 2. Возможные виды поперечного сечения препрега после пропитки:

- а – нормальное:  $\Delta\delta = 0, \Delta\theta_c = 0$ ;
- б – с утонением:  $\Delta\delta < 0, \Delta\theta_c < 0$ ;
- в – с утолщением:  $\Delta\delta > 0, \Delta\theta_c > 0$ .

Этот допуск связан с отклонением линейной плотности армирующего полуфабриката (количеством нитей на 10 см ширины) и, как следствие, с объемным содержанием армирующего полуфабриката  $\theta_v$  при контрольном (паспортном) изготовлении однонаправленного препрега. В качестве примера эти допуски приведены для углеродных лент [10] и углеродных лент и тканей на эпоксидном препреге (таблицы 1 и 2)

Легко устанавливается связь между приращением толщины и относительным объемным содержанием волокон и связующего.

Объем единичного конструктивного элемента (КЭ) равен

$$V = \delta \cdot l \cdot l. \tag{2}$$

Приращение объема единичного КЭ

$$\Delta V = \Delta\delta \cdot l \cdot l. \tag{3}$$

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 <sup>3</sup>	Количество нитей на 10 см, не менее	Свойства эпоксидного углеволоконита					
					$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Содержание наполнителя, % об.	$\sigma_{ви}$ , ГПа	$\sigma_{вр}$ , ГПа	$E_{ви}$ , ГПа	Толщина монослоя, мм
ЛУ 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

Таблица 2

Свойства углеродных лент и тканей и эпоксидных углепластиков (связующее ЭНФБ, КМУ-4) на их основе

Показатели свойств	Ленты и ткани								
	УОЛ-300-1	УОЛ-300-2	УОЛ-300-1К	УОЛ-300-2К	ЛЖУ-0,25П	ЛЖУ-0,32П	УТ-900-2,5		
							Марка А	Марка Б	Марка В
Линейная плотность, г/м	80±5	62±5	73±3	58±3	68±10	100±30	240±30	240±30	240±30
Плотность на 10 см по основе по утку	62±1 10±1	100±1 10±1	60±1 10±1	100±1 10±1	107±1 -	85±1 -	60±2 60±2	60±2 60±2	60±2 60±2
Углепластики:									
$\sigma_p$ , МПа	1100...1400	1200...1500	1150...1300	1150...1400	1200...1300	1200...1300	400	550	600
$\sigma_{и}$ , МПа	950...1100	1000...1200	800...1000	900...1100	800...1000	800...1000	400	550	600
Толщина монослоя, мм	0,235±0,015	0,175±0,015	0,235±0,015	0,175±0,015	0,22±0,03	0,32±0,04	0,22±0,02	0,22±0,02	0,22±0,02

Объем единичного КЭ состоит из объемов волокон и связующего:

$$V = V_B + V_C. \quad (4)$$

Соответственно из (2) и (4) следует, что

$$\delta = V_B + V_C. \quad (5)$$

В общем случае

$$\Delta\delta = \Delta V_B + \Delta V_C. \quad (6)$$

Разделив (6) на (2), получим

$$\frac{\Delta\delta}{V} = \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\Delta V_B}{V} + \frac{\Delta V_C}{V}$$

или

$$\Delta\bar{\delta} = \Delta\theta_B + \Delta\theta_C. \quad (7)$$

Известно, что

$$\theta_B + \theta_C = 1. \quad (8)$$

В то же время

$$(\theta_B \pm \Delta\theta_B) + (\theta_C \pm \Delta\theta_C) = 1 \pm (\Delta\theta_B + \Delta\theta_C).$$

Искомая связь между  $\Delta\delta$  и приращениями  $\Delta\theta_B$  и  $\Delta\theta_C$  следует из (7):

$$\Delta\delta = (\Delta\theta_B + \Delta\theta_C)\delta. \quad (9)$$

Анализируя табл. 1, легко установить, например для препрега на основе ленты ЛУ:

$\Delta\delta = \pm 0,01$  мм при  $\delta = 0,1$  мм,  $\theta_B = 0,63 \pm 0,04$ , где  $\Delta\theta_B = \pm 0,04$ . Из (10) получим  $\Delta\theta_C = \pm 0,06$ .

Следовательно, возможен случай, когда при  $\Delta\theta_B = 0,04$ ,  $\Delta\theta_C = 0,06$   $(\theta_B + \theta_C) + (\Delta\theta_B + \Delta\theta_C) = 1,1$  и  $(\theta_B + \theta_C) - (\Delta\theta_B + \Delta\theta_C) = 0,9$ .

Таким образом, поле допуска на препрег из данной ленты составляет по объемному содержанию волокон  $\theta_B = 0,63_{-0,04}^{+0,04}$ , а по связующему  $\theta_C = 0,37_{-0,06}^{+0,06}$ .

А в общем случае  $\theta_B = \theta_{B\text{пасп}} + \Delta\theta_{B\text{п}}$ ,  $\theta_C = \theta_{C\text{пасп}} - \Delta\theta_{C\text{п}}$ . При этом  $\Delta\delta_0 = \delta_0(\Delta\theta_{B\text{п}} + \Delta\theta_{C\text{п}})$ , где  $\Delta\theta_{B\text{п}}$  и  $\Delta\theta_{C\text{п}}$  – паспортные значения приращений  $\Delta\theta_B$  и  $\Delta\theta_C$ .

При изготовлении препрега с паспортным полем допусков значение  $\Delta\theta_B$  всегда находится в интервале  $-\Delta\theta_{B\text{п}} \leq \Delta\theta_B \leq \Delta\theta_{B\text{п}}$ , в то время как  $\Delta\theta_C$  может выходить за пределы интервала паспортных значений:

$$-\Delta\theta_{C\text{п}} \leq \Delta\theta_C \leq \Delta\theta_{C\text{п}}, \quad (10)$$

что имеет место при выходящем за регламентное значение давлении между вальками при прокатке препрега (перепрессовка)  $r_{\text{вал}} > [r_{\text{вал}}]$  либо при повышенной вязкости связующего в момент пропитки  $\eta_c > [\eta_c]$ .

Вязкость связующего может быть выше регламентной, если температура прокатки меньше регламентированной  $T < [T_{\text{пр}}]$ . Наконец, неравенство (9) может также иметь место, если в процессе прокатки армирующего полуфабриката между вальками скорость  $V_{\text{пр}} < [V_{\text{пр}}]$ .

Итак, (10) может иметь место:

– при  $r_{\text{вал}} = [r_{\text{вал}}]$ , но  $T < [T_{\text{пр}}]$  (причина – низкая  $T$ ), т. к. при этом  $\eta_c > [\eta_c]$ ;

– при  $r_{\text{вал}} > [r_{\text{вал}}]$ ,  $T = [T_{\text{пр}}]$  (причина – высокое  $r_{\text{вал}}$ );

– при  $r_{\text{вал}} < [r_{\text{вал}}]$ , но  $T > [T_{\text{пр}}]$  (причина – заброс  $T$ ), т. к. при этом  $\eta_c < [\eta_c]$ .

Неравенство (10) имеет место при

$$\Delta\delta_0 = \delta_0(\Delta\theta_{B\text{п}} - \Delta\theta_C),$$

где  $\Delta\theta_{B\text{п}}$  – паспортное значение  $\Delta\theta_B$ ;

$\Delta\theta_C$  – значение  $\Delta\theta_C$  в результате прокатки армирующего полуфабриката (препрега).

При недопрессовке

$$\Delta\theta_C > \Delta\theta_{C\text{п}}, \quad (11)$$

что имеет место, если:

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

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

Соответствие непропитанного армирующего наполнителя паспортным данным проверяется при входном контроле взвешиванием партии его образцов длиной 1 м при заданной ширине  $(b \mp \Delta b)$ . Разделив среднюю массу партии образцов на площадь  $S = (b \pm \Delta b)(1 \pm \Delta)$ , где  $\Delta$  – допуск на отрезаемую ширину образца в 1 м, получим линейную плотность  $(\rho_{\text{л}} \mp \Delta\rho_{\text{л}})$ , соответствующую регламентированной в паспорте на поставку армирующего материала. Линейная плотность  $(\rho_{\text{л}} \mp \Delta\rho_{\text{л}})$  должна соответствовать регламентированному в паспорте значению. Если она меньше этого значения (масса образца больше регламентного значения), значит количество нитей на 10 см ширины превышает его паспортное значение и наоборот.

Например, для ленты ЛУ  $[\rho_{\text{л}} \mp \Delta\rho_{\text{л}}] = 35 \pm 3$  м/г. При входном контроле партии образцов оказалось, что  $(\rho_{\text{л}} \mp \Delta\rho_{\text{л}}) = 35 \pm 8$  м/г. Следовательно, количество нитей в ленте превышает соответствующее паспорту значение 460 штук на 10 см.

Известно, что увеличение относительного объема содержания волокон в ПКМ повышает его

ФМХ, если это значение  $\theta_B < \theta_{\text{вкрит}}$ . При достижении  $\theta_{\text{вкрит}}$  ПКМ перестает быть монолитным, так как относительного объемного содержания связующего  $\theta_c = (1 - \theta_B)$  не будет достаточно для полного покрытия поверхности волокон.

В связи с этим превышение линейной плотности над паспортным значением, как правило, является недопустимым, так как поставщик стремится обеспечить  $\theta_B$ , максимально приближающееся к  $\theta_{\text{вкрит}}$  (по-видимому,  $\theta_{\text{вmax}} = [\theta_B + \Delta\theta_B]$ ), то есть для ЛУ  $\theta_{\text{вmax}} = (63 \pm 4)\%$ .

При  $(\rho_L \mp \Delta\rho_L) > [\rho_L \mp \Delta\rho_L]$ , например для ЛУ  $(\rho_L \mp \Delta\rho_L) = 34 \pm 6$  м/г ФМХ ПКМ будут ниже гарантированных паспортом, например  $E_{\text{из}} < (165 \pm 20)$  ГПа (см. табл. 1).

Если потребителю поставляется препрег, в паспорте указывается регламентируемое значение его толщины при формовании монослоя  $[\delta_0 \pm \Delta\delta_0]$  и ожидаемые (гарантируемые) ФМХ ПКМ.

Так, например, для эпоксидного углепластика ЛУ-П-0,1-А (см. табл. 1) гарантируется при  $[\delta_0 \pm \Delta\delta_0] = 0,1 \dots 0,12$  мм пределы прочности при растяжении  $\sigma_B = 0,7$  ГПа и при сжатии  $\sigma_{-B} = 0,7$  ГПа и модуль упругости при изгибе  $E_{\text{из}} = 157 \pm 25$  ГПа. При этом  $[\theta_B + \Delta\theta_B] = (62 \pm 4)\% = 0,62 \pm 0,4$ .

При входном контроле соответствие паспортным характеристикам проверяется испытанием изготовленных из поставляемого препрега партии образцов по технологии, обеспечивающей  $[\theta_B \pm \Delta\theta_B]$  путем реализации их толщины, равной

$$\delta = (\delta_0 \pm \Delta\delta_0)n,$$

где  $n$  – число монослоев и соответствующих паспортному значению ФМХ ПКМ с предусмотренными для них допусками (см. табл. 1 и 2).

ФМХ однонаправленного ПКМ определяются по приближенным формулам на основе теории армирования [11, 12] с добавлением в них приращений соответствующих характеристик в пределах их паспортного интервала допусков.

Модуль упругости однонаправленного ПКМ вдоль волокон

$$\begin{aligned} (E_{\text{X KM}} \pm \Delta E_{\text{X KM}}) &= E_B \frac{+\Delta E_B^n}{-\Delta E_B^n} \cdot \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} + \\ &+ E_C \frac{+\Delta E_C^n}{-\Delta E_C^n} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент Пуассона при растяжении-сжатии вдоль волокон

$$\begin{aligned} (v_{\text{ХУ KM}} \pm \Delta v_{\text{ХУ KM}}) &= v_B \frac{+\Delta v_B^n}{-\Delta v_B^n} \cdot \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} + \\ &+ v_C \frac{+\Delta v_C^n}{-\Delta v_C^n} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Предел прочности при растяжении-сжатии вдоль волокон:

- для хрупких связующих (при  $\varepsilon_{\text{предс}} < \varepsilon_{\text{предв}}$ )

$$\begin{aligned} (\sigma_{\text{ВХ KM}} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ KM}}) &= \\ &= \frac{\sigma_{\text{BC}} \frac{+\Delta\sigma_{\text{BC}}^n}{-\Delta\sigma_{\text{BC}}^n}}{E_C \frac{+\Delta E_C^n}{-\Delta E_C^n}} \left[ E_B \frac{+\Delta E_B^n}{-\Delta E_B^n} \cdot \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right] + \\ &+ E_C \frac{+\Delta E_C^n}{-\Delta E_C^n} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right) \approx \\ &\approx \sigma_{\text{BC}} \frac{+\Delta\sigma_{\text{BC}}^n}{-\Delta\sigma_{\text{BC}}^n} \frac{(E_{\text{X KM}} \pm \Delta E_{\text{X KM}})}{E_C \frac{+\Delta E_C^n}{-\Delta E_C^n}}; \end{aligned} \quad (14)$$

- для пластичных связующих (при  $\varepsilon_{\text{предс}} > \varepsilon_{\text{предв}}$ )

$$\begin{aligned} (\sigma_{\text{ВХ KM}} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ KM}}) &= \\ &= \frac{\sigma_{\text{BB}} \frac{+\Delta\sigma_{\text{BB}}^n}{-\Delta\sigma_{\text{BB}}^n}}{E_B \frac{+\Delta E_B^n}{-\Delta E_B^n}} \left[ E_B \frac{+\Delta E_B^n}{-\Delta E_B^n} \cdot \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right] + \\ &+ E_C \frac{+\Delta E_C^n}{-\Delta E_C^n} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right) \approx \\ &\approx \sigma_{\text{BB}} \frac{+\Delta\sigma_{\text{BB}}^n}{-\Delta\sigma_{\text{BB}}^n} \frac{(E_{\text{X KM}} \pm \Delta E_{\text{X KM}})}{E_B \frac{+\Delta E_B^n}{-\Delta E_B^n}}. \end{aligned} \quad (15)$$

В формулах (12) – (15) обозначено:  $E_C, v_C, \sigma_{\text{BC}}$  - модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности связующего (матрицы);  $E_B, v_B, \sigma_{\text{BB}}$  - модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности волокна;  $\pm R^n$  - паспортное отклонение  $R$ -го свойства в допустимом диапазоне.

Модуль сдвига однонаправленного ПКМ  $G_{\text{ХУ KM}}$  и предел его прочности на сдвиг  $\tau_{\text{В KM ХУ}}$  определяются зависимостью

$$\begin{aligned} (G_{\text{ХУ KM}} \pm \Delta G_{\text{ХУ KM}}) &= \\ &= \frac{G_B \frac{+\Delta G_B^n}{-\Delta G_B^n} \cdot G_C \frac{+\Delta G_C^n}{-\Delta G_C^n}}{G_C \frac{+\Delta G_C^n}{-\Delta G_C^n} \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} + G_B \frac{+\Delta G_B^n}{-\Delta G_B^n} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta\theta_B^n}{-\Delta\theta_B^n} \right)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как волокна армирующего материала и матрица изотропны, что позволяет считать

$G_B = \frac{E_B}{2(1+\nu_B)}$  и  $G_C = \frac{E_C}{2(1+\nu_C)}$ , и кроме того в паспортах на армирующие материалы и связующее чаще приводятся допуски на их модули упругости и коэффициенты Пуассона, чем на  $G_B$  и  $G_C$  вместо формулы (16) лучше пользоваться аналогом этой формулы:

$$\begin{aligned} (G_{xy\text{ км}} \pm \Delta G_{xy\text{ км}}) &= \\ &= \frac{1}{2} E_B \frac{+\Delta E_B^{\text{II}}}{-\Delta E_B^{\text{II}}} \cdot E_C \frac{+\Delta E_C^{\text{II}}}{-\Delta E_C^{\text{II}}} \times \\ &\times \left[ \frac{E_B \frac{+\Delta E_B^{\text{II}}}{-\Delta E_B^{\text{II}}} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta \theta_B^{\text{II}}}{-\Delta \theta_B^{\text{II}}} \right) \left( 1 + \nu_C \frac{+\Delta \nu_C^{\text{II}}}{-\Delta \nu_C^{\text{II}}} \right) +}{E_C \frac{+\Delta E_C^{\text{II}}}{-\Delta E_C^{\text{II}}} \left( 1 + \nu_B \frac{+\Delta \nu_B^{\text{II}}}{-\Delta \nu_B^{\text{II}}} \right) \theta_B \frac{+\Delta \theta_B^{\text{II}}}{-\Delta \theta_B^{\text{II}}} } \right]^{-1} \quad (17) \\ (\tau_{\text{в км ху}} \pm \Delta \tau_{\text{в км ху}}) &= \\ &= \tau_{\text{вв}} \frac{+\Delta \tau_{\text{вв}}^{\text{II}}}{-\Delta \tau_{\text{вв}}^{\text{II}}} \theta_B \frac{+\Delta \theta_B^{\text{II}}}{-\Delta \theta_B^{\text{II}}} + \frac{E_C \frac{+\Delta E_C^{\text{II}}}{-\Delta E_C^{\text{II}}} \left( 1 + \nu_B \frac{+\Delta \nu_B^{\text{II}}}{-\Delta \nu_B^{\text{II}}} \right)}{E_B \frac{+\Delta E_B^{\text{II}}}{-\Delta E_B^{\text{II}}} \left( 1 + \nu_C \frac{+\Delta \nu_C^{\text{II}}}{-\Delta \nu_C^{\text{II}}} \right)} \quad (18) \end{aligned}$$

Модуль упругости однонаправленного ПКМ поперек волокон при растяжении-сжатии определяется формулой

$$\begin{aligned} (E_{y\text{ км}} \pm \Delta E_{y\text{ км}}) &\approx E_B \frac{+\Delta E_B^{\text{II}}}{-\Delta E_B^{\text{II}}} \times \\ &\times \left[ \theta_B \frac{+\Delta \theta_B^{\text{II}}}{-\Delta \theta_B^{\text{II}}} + \frac{E_B \frac{+\Delta E_B^{\text{II}}}{-\Delta E_B^{\text{II}}} \left( 1 - \theta_B \frac{+\Delta \theta_B^{\text{II}}}{-\Delta \theta_B^{\text{II}}} \right)}{E_C \frac{+\Delta E_C^{\text{II}}}{-\Delta E_C^{\text{II}}} \left( 1 + \nu_C \frac{+\Delta \nu_C^{\text{II}}}{-\Delta \nu_C^{\text{II}}} \right)} \right]^{-1} \quad (19) \end{aligned}$$

Предел прочности однонаправленного ПКМ поперек волокон при растяжении-сжатии с учетом формы волокна приближенно можно определить по формуле\*):

$$(\sigma_{\text{в у км}} \pm \Delta \sigma_{\text{в у км}}) = 0,7 \sigma_{\text{вс}} \frac{+\Delta \sigma_{\text{вс}}^{\text{II}}}{-\Delta \sigma_{\text{вс}}^{\text{II}}} \quad (20)$$

В случае формирования, а затем формирования паковки из однонаправленных препрегов в замкнутой форме, не исключающей вытекание из нее связующего, ФМХ структуры, состоящей из трех направлений армирования\*\*): вдоль направления волокон  $\varphi_0 = 0^\circ$ , под углом  $\pm\varphi$ , поперек волокон  $\varphi_{90} = 90^\circ$  при количестве соответствующих этим углам монослоев  $n_0, 2n_{\pm\varphi}, n_{90}$

\*)) Более точные формулы приведены в [12].

\*\*)) Количество структур более трех направлений практически не используется, хотя это не вносит принципиальных особенностей в определение ФМХ паковки.

$$n_0 + 2n_{\pm\varphi} + n_{90} = n$$

определяются формулами [12]:

$$\begin{aligned} (E_x \pm \Delta E_x) &= \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0) n} \times \\ &\times \left[ (B_{11} \pm \Delta B_{11}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})} \right]; \\ (E_y \pm \Delta E_y) &= \frac{1}{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0) n} \times \\ &\times \left[ (B_{22} \pm \Delta B_{22}) - \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})^2}{(B_{11} \pm \Delta B_{11})} \right]; \quad (21) \\ (G_{xy} \pm \Delta G_{xy}) &= \frac{(B_{33} \pm \Delta B_{33})}{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0) n}; \\ (\nu_{xy} \pm \nu_{xy}) &= \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})}{(B_{22} \pm \Delta B_{22})}; \\ (\nu_{yx} \pm \nu_{yx}) &= \frac{(B_{12} \pm \Delta B_{12})}{(B_{11} \pm \Delta B_{11})}, \end{aligned}$$

где  $(B_{ij} \pm \Delta B_{ij})$  - обобщенные жесткости многослойного пакета (паковки) и их приращения в осях ортотропии.

В случае трех направлений армирования ( $n_0, 2n_{\pm\varphi}, n_{90}$ )

$$\begin{aligned} (B_{11} \pm \Delta B_{11}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left( 1 + \nu_{12} \frac{+\Delta \nu_{12}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{12}^{\text{II}}} \cdot \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \right)} \times \\ &\times \left\{ n_0 (E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) + n_{90} (E_2 \pm \Delta E_2^{\text{II}}) + 2n_{\varphi} \times \right. \\ &\times \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) + \left[ (E_2 \pm \Delta E_2^{\text{II}}) \times \right. \right. \\ &\left. \left. \times \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + 2(E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \right. \\ &\left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left( 1 + \nu_{12} \frac{+\Delta \nu_{12}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{12}^{\text{II}}} \cdot \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \right) \times \right. \right. \\ &\left. \left. \times \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right] \right\}; \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (B_{22} \pm \Delta B_{22}) &= \frac{(\delta_0 \pm \Delta \delta_0)}{\left( 1 + \nu_{12} \frac{+\Delta \nu_{12}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{12}^{\text{II}}} \cdot \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \right)} \times \\ &\times \left\{ n_0 (E_2 \pm \Delta E_2^{\text{II}}) + n_{90} (E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) + 2n_{\varphi} \times \right. \\ &\times \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + \left[ (E_2 \pm \Delta E_2^{\text{II}}) \times \right. \right. \\ &\left. \left. \times \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) + 2(E_1 \pm \Delta E_1^{\text{II}}) \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \right. \\ &\left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left( 1 + \nu_{12} \frac{+\Delta \nu_{12}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{12}^{\text{II}}} \cdot \nu_{21} \frac{+\Delta \nu_{21}^{\text{II}}}{-\Delta \nu_{21}^{\text{II}}} \right) \times \right. \right. \\ &\left. \left. \times \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi) \right] \right\}; \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (B_{33} \pm \Delta B_{33}) = & \frac{(\delta_0 \pm \Delta\delta_0)}{\left(1 + v_{12} \frac{+\Delta v_{12}^n}{-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n}\right)} \times \\
 & \times [(n_0 + n_{90})(G_{12} \pm \Delta G_{12}) \times \\
 & \times \left(1 + v_{12} \frac{+\Delta v_{12}^n}{-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n}\right) + \\
 & + 2n_\varphi \left\{ \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^n) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n} \right] \times \right. \\
 & \times \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \\
 & \left. \left. + (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12} \frac{+\Delta v_{12}^n}{-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n}\right) \times \right\} \right]; \quad (24) \\
 & \times \cos^2 2(\varphi + \Delta\varphi)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (B_{12} \pm \Delta B_{12}) = & \frac{(\delta_0 \pm \Delta\delta_0)}{\left(1 + v_{12} \frac{+\Delta v_{12}^n}{-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n}\right)} \times \\
 & \times \left[ (n_0 + n_{90})(E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n} + \right. \\
 & + 2n_\varphi \left\{ \left[ (E_1 \pm \Delta E_1^n) + (E_2 \pm \Delta E_2^n) \right] \times \right. \\
 & \times \sin^2(\varphi + \Delta\varphi) \cos^2(\varphi + \Delta\varphi) + \\
 & \left. + (E_1 \pm \Delta E_1^n) v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n} \left[ \sin^4(\varphi + \Delta\varphi) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \cos^4(\varphi + \Delta\varphi) \right] - \right. \\
 & \left. - (G_{12} \pm \Delta G_{12}) \left(1 + v_{12} \frac{+\Delta v_{12}^n}{-\Delta v_{12}^n} \cdot v_{21} \frac{+\Delta v_{21}^n}{-\Delta v_{21}^n}\right) \times \right\} \right]; \quad (25) \\
 & \times \sin^2 2(\varphi + \Delta\varphi)
 \end{aligned}$$

Здесь от направления оси упругости 1 отсчитывается угол армирования  $\varphi$ . Эта ось соответствует направлению  $x$ , а ось упругости 2 - направлению  $y$ . В формулах (22) – (25) знак допуска на толщину монослоя  $\Delta\delta_0$  определяется конечным значением толщины паковки: при  $\delta_{\text{форм}} > \delta_{\text{теор}}$  знак  $\Delta\delta_0$  положительный, при  $\delta_{\text{форм}} < \delta_{\text{теор}}$  – отрицательный. В этих формулах

$$\Delta\delta_0 = \frac{\delta_{\text{форм}} - \delta_{\text{теор}}}{n}, \quad (26)$$

где  $\delta_{\text{форм}}$  – толщина паковки после формования;  $\delta_{\text{теор}}$  – расчетная толщина паковки, определяемая паспортным значением монослоя без учета отклонений от номинала, умноженная на число монослоев.

В этих формулах отклонение параметров ФМХ монослоя  $\pm \Delta R_i^n$  соответствует допустимым паспортным значениям.

Если модуль отклонения толщины монослоя  $\Delta\delta_0$  может быть обоснованно принят постоянным

для любого монослоя паковки, то такая гипотеза применительно к отклонению в  $i$ -м слое  $\Delta\varphi_i$  является весьма грубой при ручной выкладке монослоев паковки.

При автоматизированной выкладке  $\Delta\varphi_i$  может быть принято постоянным, определяемым полем допуска, регламентированным для данного оборудования, равным  $[\pm \varphi]$ .

При оговоренных выше условиях зависимости (22) – (25) позволяют определить поле допуска любой ФМХ из (21)  $R_i$  как

$$\Delta R_i = \frac{(R + \Delta R) - (R - \Delta R)}{2} \quad (27)$$

для последующего принятия решения о допустимости отклонения ФМХ.

Более сложной задачей является установление полей допусков паковки, составленной из трех систем однонаправленных монослоев, соответствующих рассмотренным выше при определении  $\Delta R_i$  других ФМХ. Здесь имеют место три возможных варианта (модели), два из которых изложены в [12], а третий, наиболее простой, но и приводящий к большим погрешностям, основан на применении правила смесей.\*)

Вариант, дающий наиболее точные результаты, основан на использовании тех или иных критериев прочности ПКМ. В [12] исследована реализация трех критериев: максимальных напряжений, максимальных деформаций и критерий Мизеса - Хилла для определения прочностных свойств слоистых ПКМ, состоящих в общем случае из  $i$  направлений монослоя.

Учитывая, что в расчетах на прочность агрегатов РКТ чаще всего используется критерий Мизеса - Хилла, ниже для определения отклонений прочностных свойств пакета ПКМ от их средних значений  $\Delta R_i$  применен этот критерий.

На базе критерия Мизеса - Хилла получим [12]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x \leq & \left[ \frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{11i} + v_{21i} a_{21i})}{\sigma_{\text{вxi}}^2} - \right. \\
 & \left. - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{11i} + v_{21i} a_{21i})(v_{12i} a_{11i} + a_{21i})}{\sigma_{\text{вxi}} \sigma_{\text{вyi}}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (v_{12i} a_{11i} + a_{21i})^2}{\tau_{\text{вxyi}}^2} + \frac{G_{12i}^2 a_{31i}^2}{\tau_{\text{вxyi}}^2} \right]^{-0,5}; \quad (28)
 \end{aligned}$$

\*) Грубое приближение при реализации этого варианта предопределено неучетом совместности деформаций трех семейств монослоев, однако этот вариант рекомендован в Руководящих технических материалах ГП «Антонов» [13].

$$\sigma_{\text{вх}} = \min_{(i)} \left[ \frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{11i} + v_{21i} a_{21i})^2}{\sigma_{\text{вxi}}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (v_{12i} a_{11i} + a_{21i})^2}{\sigma_{\text{выi}}^2} + \frac{G_{12i}^2 a_{31i}^2}{\tau_{\text{вxyi}}^2} - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{11i} + v_{21i} a_{21i})(v_{12i} a_{11i} + a_{21i})}{\sigma_{\text{вxi}} \sigma_{\text{выi}}} \right]^{-0,5}, \quad (29)$$

где  $\sigma_{\text{вxi}}$  и  $\sigma_{\text{выi}}$  определяются из условий:

- при определении предела прочности на растяжение  $\sigma_{\text{вх}}$  характеристики монослоев  $\sigma_{\text{вxi}}$ ,  $\sigma_{\text{выi}}$  равны:

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{11i} + v_{21i} a_{21i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{11i} + v_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad (30)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{11i} + a_{21i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0, \end{cases} \quad (31)$$

а для нахождения предела прочности на сжатие  $\sigma_{-\text{вх}}$

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{11i} + v_{21i} a_{21i}) > 0; \\ \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{11i} + v_{21i} a_{21i}) < 0; \end{cases} \quad (32)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{11i} + a_{21i}) > 0; \\ \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{11i} + a_{21i}) < 0. \end{cases} \quad (33)$$

$$\sigma_{\text{вы}} = \min_{(i)} \left[ \frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{12i} + v_{21i} a_{22i})^2}{\sigma_{\text{вxi}}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (v_{12i} a_{12i} + a_{22i})^2}{\sigma_{\text{выi}}^2} + \frac{G_{12i}^2 a_{32i}^2}{\tau_{\text{вxyi}}^2} - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{12i} + v_{21i} a_{22i})(v_{12i} a_{12i} + a_{22i})}{\sigma_{\text{вxi}} \sigma_{\text{выi}}} \right]^{-0,5}, \quad (34)$$

где  $\sigma_{\text{вxi}}$  и  $\sigma_{\text{выi}}$  определяются согласно условиям, приведенным ниже.

Для определения предела прочности на растяжение  $\sigma_{\text{вы}}$

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{12i} + v_{21i} a_{22i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{12i} + v_{21i} a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad (35)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{12i} + a_{22i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{12i} + a_{22i}) < 0, \end{cases} \quad (36)$$

а для нахождения предела прочности на сжатие  $\sigma_{-\text{вы}}$

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{12i} + v_{21i} a_{22i}) > 0; \\ \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{12i} + v_{21i} a_{22i}) < 0; \end{cases} \quad (37)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{12i} + a_{22i}) > 0; \\ \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{12i} + a_{22i}) < 0. \end{cases} \quad (38)$$

$$\tau_{\text{вxy}} = \min_{(i)} \left[ \frac{\bar{E}_{1i}^2 (a_{13i} + v_{21i} a_{23i})^2}{\sigma_{\text{вxi}}^2} + \frac{\bar{E}_{2i}^2 (v_{12i} a_{13i} + a_{23i})^2}{\sigma_{\text{выi}}^2} + \frac{G_{12i}^2 a_{32i}^2}{\tau_{\text{вxyi}}^2} - \frac{\bar{E}_{1i} \bar{E}_{2i} (a_{13i} + v_{21i} a_{23i})(v_{12i} a_{13i} + a_{23i})}{\sigma_{\text{вxi}} \sigma_{\text{выi}}} \right]^{-0,5}, \quad (39)$$

где  $\sigma_{\text{вxi}}$  и  $\sigma_{\text{выi}}$  определяются согласно условиям\*):

- при  $\tau_{\text{вxy}} = \tau_{\text{вxy}}^{(+)}$

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{13i} + v_{21i} a_{23i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{13i} + v_{21i} a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad (40)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{13i} + a_{23i}) > 0; \\ \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{13i} + a_{23i}) < 0, \end{cases} \quad (41)$$

а при  $\tau_{\text{вxy}} = \tau_{\text{вxy}}^{(-)}$

$$\sigma_{\text{вxi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{вxi}} & \text{при } (a_{13i} + v_{21i} a_{23i}) > 0; \\ \sigma_{\text{вxi}} & \text{при } (a_{13i} + v_{21i} a_{23i}) < 0; \end{cases} \quad (42)$$

$$\sigma_{\text{выi}} = \begin{cases} \sigma_{-\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{13i} + a_{23i}) > 0; \\ \sigma_{\text{выi}} & \text{при } (v_{12i} a_{13i} + a_{23i}) < 0. \end{cases} \quad (43)$$

В формулах (28) – (43) в целях сокращения их записей все входящие в них ФМХ и прочностные характеристики представлены их средними значениями  $R_i$  без учета поля их отклонений ( $R_i \pm \Delta R_i$ ) или  $R_{i-\Delta R_i}^{+\Delta R_i}$ . Кроме того вместо модулей упругости  $i$ -го направления вдоль армирующих волокон  $E_{1i}$  и поперек волокон  $E_{2i}$  эти формулы содержат их значения, отнесенные к параметру  $(1 - v_{12} v_{21})$ :  $\bar{E}_{1i} = \frac{E_{1i}}{(1 - v_{12} v_{21})}$  и  $\bar{E}_{2i} = \frac{E_{2i}}{(1 - v_{12} v_{21})}$ .

Параметры податливостей  $a_{jk}$  ( $j=1,2,3$ ;  $k=1,2,3$ ) также приведены в виде их средних значений.

Так как в осях  $x, y$  ПКМ является ортотропной средой, то пределы прочности определяются по приведенным выше зависимостям, в которых коэффициенты податливости равны:

$$a_{11i} = \frac{\cos^2 \varphi_i - v_{xy} \sin^2 \varphi_i}{E_x};$$

$$a_{12i} = \frac{\sin^2 \varphi_i - v_{yx} \cos^2 \varphi_i}{E_y};$$

\* В [12] критерий Мизеса - Хилла использован для случая, когда ПКМ имеет различные пределы прочности на сдвиг при противоположных направлениях парных касательных напряжений.



$$\begin{aligned}
 a_{13i} &= \frac{\sin 2\varphi_i}{2G_{xy}}; a_{23i} = \frac{\sin 2\varphi_i}{2G_{xy}}; \\
 a_{21i} &= \frac{\sin^2 \varphi_i - v_{xy} \cos^2 \varphi_i}{E_x}; \\
 a_{22i} &= \frac{\cos^2 \varphi_i - v_{yx} \sin^2 \varphi_i}{E_y}; \\
 a_{31i} &= \frac{(1 + v_{xy}) \sin 2\varphi_i}{E_x}; \\
 a_{32i} &= \frac{(1 + v_{yx}) \sin 2\varphi_i}{E_y}; \\
 a_{33i} &= \frac{\cos 2\varphi_i}{G_{xy}}.
 \end{aligned} \tag{44}$$

Вследствие того, что предполагается, что упаковка состоит из трех систем однонаправленных слоев  $n_0$ ,  $2n_\varphi$  и  $n_{90}$ , то, расписывая тригонометрические функции, входящие в (43), в виде  $\sin(\varphi + \Delta\varphi)$ ,  $\cos(\varphi + \Delta\varphi)$  и  $\cos 2(\varphi + \Delta\varphi)$ ,  $\sin 2(\varphi + \Delta\varphi)$ , для соответствующих направлений, опуская промежуточные выкладки, получим:

- для системы монослоев  $i = 1$ , в которых  $\varphi = 0$ :

$$\begin{aligned}
 a_{110} &= \frac{\cos^2 \Delta\varphi - v_{xy} \sin^2 \Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{120} &= \frac{\sin^2 \Delta\varphi - v_{xy} \cos^2 \Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{130} &= \pm \frac{\sin 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}; \\
 a_{210} &= \frac{\sin^2 \Delta\varphi - v_{xy} \cos^2 \Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{220} &= \frac{\cos^2 \Delta\varphi - v_{xy} \sin^2 \Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{230} &= \pm \frac{\sin 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}; \\
 a_{310} &= \pm \frac{(1 + v_{xy}) \sin 2\Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{320} &= \pm \frac{(1 + v_{yx}) \sin 2\Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{330} &= \frac{\cos 2\Delta\varphi}{(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}.
 \end{aligned} \tag{45}$$

- для системы монослоев  $i = 2$ , в которых  $\varphi = 90^\circ$ :

$$\begin{aligned}
 a_{1190} &= \frac{\sin^2 \Delta\varphi - v_{xy} \cos^2 \Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{1290} &= \frac{\cos^2 \Delta\varphi - v_{xy} \sin^2 \Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{1390} &= \pm \frac{\sin 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}; \\
 a_{2190} &= \frac{\cos^2 \Delta\varphi - v_{xy} \sin^2 \Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{2290} &= \frac{\sin^2 \Delta\varphi - v_{xy} \cos^2 \Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{2390} &= \pm \frac{\sin 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}; \\
 a_{3190} &= \pm \frac{(1 + v_{xy}) \sin 2\Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{3290} &= \pm \frac{(1 + v_{yx}) \sin 2\Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{3390} &= - \frac{\cos 2\Delta\varphi}{(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}.
 \end{aligned} \tag{46}$$

Для сокращения выкладок будем считать, что третья система монослоев  $i = 3$  имеет схему укладки  $\pm\varphi = \pm 45^\circ$ \*). Тогда для этой системы:

$$\begin{aligned}
 a_{1145} &= \frac{(1 \pm \sin 2\Delta\varphi) (1 - v_{xy})}{2(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{1245} &= \frac{(1 \pm \sin 2\Delta\varphi) (1 - v_{xy})}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{1345} &= \pm \frac{\cos 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}; \\
 a_{2145} &= \frac{(1 \pm \sin 2\Delta\varphi) (1 - v_{xy})}{(E_x \pm \Delta E_x)}; \\
 a_{2245} &= \frac{(1 \pm \sin 2\Delta\varphi) (1 - v_{xy})}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \\
 a_{2345} &= \pm \frac{\cos 2\Delta\varphi}{2(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})};
 \end{aligned}$$

\*) Система монослоев ( $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ ) наиболее часто применяется на практике для формирования агрегатов РКТ из ПКМ [13].

$$a_{3145} = \pm \frac{\left(1 + v_{xy} \frac{+\Delta v_{xy}}{-\Delta v_{xy}}\right) \cos 2\Delta\varphi}{(E_x \pm \Delta E_x)};$$

$$a_{3245} = \pm \frac{\left(1 + v_{xy} \frac{+\Delta v_{xy}}{-\Delta v_{xy}}\right) \cos 2\Delta\varphi}{(E_y \pm \Delta E_y)}; \quad (47)$$

$$a_{3345} = \pm \frac{\sin 2\Delta\varphi}{(G_{xy} \pm \Delta G_{xy})}.$$

Подстановка  $a_{jk0}$  из (45) в (30) – (33), а затем результатов в (29), (34) и (39) позволяет определить минимальные значения  $(\sigma_{\text{ВХ}0} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}0})$ ,  $(\sigma_{\text{ВУ}0} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}0})$  и  $(\tau_{\text{ВХУ}0} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}0})$ , которые соответствуют пределам прочности системы монослоев ПКМ направления  $\varphi = 0$ . Аналогичная подстановка  $a_{jk90}$  из (46) в эти же формулы (30) – (33) с последующим введением результатов в (29), (34) и (39) дает минимальные значения этих параметров для направления системы монослоев  $\varphi = 90^\circ$ . Наконец, такая же операция с податливостями  $a_{jk45}$  из (47) позволяет определить  $\min(\sigma_{\text{ВХ}45} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}45})$ ,  $\min(\sigma_{\text{ВУ}45} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}45})$  и  $\min(\tau_{\text{ВХУ}45} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}45})$ ,  $\min(\sigma_{\text{ВХ}0} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}0})$ . В качестве определяющих характеристик прочности всей структуры паковки ( $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ ) должны быть приняты

$$\min \min \left\{ \begin{array}{l} \min \left[ \begin{array}{l} (\sigma_{\text{ВХ}0} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}0}) \\ (\sigma_{\text{ВУ}0} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}0}) \\ (\tau_{\text{ВХУ}0} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}0}) \end{array} \right]; \\ \min \left[ \begin{array}{l} (\sigma_{\text{ВХ}90} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}90}) \\ (\sigma_{\text{ВУ}90} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}90}) \\ (\tau_{\text{ВХУ}90} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}90}) \end{array} \right]; \\ \min \left[ \begin{array}{l} (\sigma_{\text{ВХ}45} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}45}) \\ (\sigma_{\text{ВУ}45} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}45}) \\ (\tau_{\text{ВХУ}45} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}45}) \end{array} \right]. \end{array} \right. \quad (48)$$

Промежуточный по точности результат дает стержневая математическая модель ПКМ трехнаправленной системы монослоев, предложенная В.Е. Гайдачуком и Я.С. Карповым в [14]\*).

Наконец, как уже отмечалось выше, самый грубый результат дает простая математическая модель, основанная на правиле смесей, в соответствии с которой

\* Зависимости для пределов прочности трехнаправленной структуры, вытекающие из стержневой модели, не намного проще, чем приведенные выше. Поэтому они здесь не приводятся вследствие ограниченного объема статьи.

$$(\sigma_{\text{ВХ}} \pm \Delta\sigma_{\text{ВХ}}) = \frac{(\sigma_{\text{В}0} \pm \Delta\sigma_{\text{В}0})n_0}{n} + \frac{(\sigma_{\text{В}90} \pm \Delta\sigma_{\text{В}90})n_{90} + 2(\sigma_{\text{В}45} \pm \Delta\sigma_{\text{В}45})n_{45}}{n};$$

$$(\sigma_{\text{ВУ}} \pm \Delta\sigma_{\text{ВУ}}) = \frac{(\sigma_{\text{В}0} \pm \Delta\sigma_{\text{В}0})n_{90}}{n} + \frac{(\sigma_{\text{В}90} \pm \Delta\sigma_{\text{В}90})n_0 + 2(\sigma_{\text{В}45} \pm \Delta\sigma_{\text{В}45})n_{45}}{n}; \quad (49)$$

$$(\tau_{\text{ВХУ}} \pm \Delta\tau_{\text{ВХУ}}) = \frac{(\tau_{\text{В}0,90} \pm \Delta\tau_{\text{В}0,90})(n_0 + n_{90})}{n} + \frac{2(\tau_{\text{В}45} \pm \Delta\tau_{\text{В}45})n_{45}}{n},$$

где  $n = (n_0 + n_{90} + 2n_{45})$ .

Замена в зависимостях (49)  $\sigma_{\text{ВХ}}$  на  $\sigma_{-\text{ВХ}}$  и  $\sigma_{\text{ВУ}}$  на  $\sigma_{-\text{ВУ}}$ , а также  $\sigma_{\text{В}0}$ ,  $\sigma_{\text{В}90}$  и  $\sigma_{\text{В}45}$  на  $\sigma_{-\text{В}0}$ ,  $\sigma_{-\text{В}90}$  и  $\sigma_{-\text{В}45}$  с соответствующими им отклонениями от средних значений позволяет приближенно оценить и пределы прочности этой структуры при сжатии.

### Выводы

В заключение отметим следующее. Если армирующий материал в виде препрега прошел входной контроль, то дефекты в виде отклонения толщины от номинала, возникающие в процессе изготовления изделия из ПКМ и измеряемые после его формования, приводят к несоответствию ФМХ паспортным значениям. Отклонения ФМХ вызваны приращением  $\Delta\delta$ , связанным с  $\Delta\theta_{\text{В}}$  и  $\Delta\theta_{\text{С}}$  формулой (9), причем установить вклад каждого из приращений относительного объемного содержания компонентов достаточно сложно.

Если операция формования из соответствующих паспорту по допускам препрегов производится в замкнутых формах, исключающих вытекание связующего из монослоев, приводящего к утонению паковки, то  $\Delta\theta_{\text{С}} = 0$  и это утонение связано только с  $\Delta\theta_{\text{В}}$  за счет нарушения параметров формования  $p > [p]$  при  $T = [T]$  или  $p = [p]$  при  $T > [T]$ .

Значение  $\Delta\theta_{\text{В}}$  определится из соотношения, следующего из (9)

$$\Delta\theta_{\text{В}} = \frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{\Delta\delta}{\delta_0 n}. \quad (50)$$

Входной контроль определяет реализованное в препреге отклонение толщины от номинала  $\Delta\delta_0$  для однослойного полуфабриката. Отклонение  $\Delta\delta_{\text{пак}}$  паковки от номинала включает в себя составляющие  $\Delta\delta_{\text{препр}} = \Delta\delta_0 n$  ( $n$  - число монослоев в паковке) и

$$\Delta\delta_{\text{форм}} = (\Delta\delta_{\text{пак}} - \Delta\delta_{\text{препр}}). \quad (51)$$

Эта составляющая связана с интегральными отклонениями технологического режима формования от регламентированного соответствующей документацией (инструкциями, ТУ и т.д.) ( $\Delta p$ ,  $\Delta(p - \tau)$ ,  $H(T - \tau)$ ). Определить вклад в  $\Delta\delta_{\text{форм}}$  и последующие отклонения ФМХ каждой из этих составляющих является весьма сложной задачей, решаемой, очевидно, приближенно в рамках экспериментально-теоретических методов.

В то же время допустимость исследуемого вида дефекта определяется его уровнем, который находится по формуле (51), являющейся исходным шагом к нахождению имевшего место в процессе формования отклонения в объемном содержании армирующего материала по формуле, следующей из (50) и (51)

$$\Delta\theta_{\text{в форм}} = \frac{\Delta\delta_{\text{пак}} - \Delta\delta_{\text{препр}}}{\delta_{\text{форм}}}, \quad (52)$$

где  $\delta_{\text{форм}}$  – замеренная толщина в исследуемой зоне формовки.

Значение  $\Delta\theta_{\text{в форм}}$  из (52), будучи подставленным в формулы (12) – (47), позволяет определить истинные ФМХ ПКМ паковки в этой зоне для принятия последующего решения о допустимости такого уровня отклонений ФМХ ПКМ от паспортных значений или необходимости отбраковки изделия, если оно не может быть отремонтировано.

## Литература

1. Кондратьев, А.В. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(67). – X., 2011. – С. 7 – 18.

2. Гайдачук, В.Е. О возможности регламентации технологических несовершенств в конструкциях из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Н.Б. Воронцов, А.И. Рукавишников // Прочность конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. – Вып. 6. – X., 1981. – С. 124 – 129.

3. Гайдачук, В.Е. Предельные размеры локальных технологических отклонений срединной поверхности деталей из композиционных материалов

[Текст] / В.Е. Гайдачук, Л.М. Стариков // Вопросы проектирования и технологии производства конструктивных элементов летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. – X., 1986. – С. 148 – 155.

4. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин, Г.А. Молодцов. – X.: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – 332 с.

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

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

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

8. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підручник [Текст] / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.С. 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. – 2010. – № 3(70). – С. 40 – 49.

10. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

11. Гайдачук, В.Е. Механика волокнистых композиционных материалов: учеб. пособие [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 1991. – 97 с.

12. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

13. Руководящие технические материалы для конструкторов РТМ-87 [Текст]. – К.: АНТК «Антонов», 1987. – 387 с.

14. Гайдачук, В.Е. Структурная модель симметрично-армированного композиционного материала [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Прочность конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. – Вып. 6. – X., 1981. – С. 28 – 37.

Поступила в редакцию 3.04.2012

**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 ВИНИКАЮТЬ  
У ВИРОБНИЦТВІ АГРЕГАТІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ  
З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.  
ПОВІДОМЛЕННЯ 1. ДОПУСКИ НА ВІДХИЛЕННЯ  
ВІД ПРОЕКТНОГО ЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ВИРОБУ, ЩО ФОРМУЄТЬСЯ**

*V.O. Kovalenko*

На основі математичних моделей теорії армування однонаправлених структур і структур, армованих у трьох напрямках ( $0^\circ$ ,  $\pm \varphi$ ,  $90^\circ$ ), отримано залежності для обґрунтованого призначення полів допусків фізико-механічних і міцнісних характеристик полімерних композиційних матеріалів у результаті зміни товщини формованого напівфабрикату (препрегу) і виробу. Отримані залежності дозволяють оцінити якість технологічних процесів формування напівфабрикатів і виробів із полімерних композиційних матеріалів за рівнем геометричного виду дефекту даного класу.

**Ключові слова:** полімерний композиційний матеріал, технологічний процес формування, дефекти відхилення товщини виробу, поля допусків.

**RESEARCHING OF DEFECTS RESULTING IN PRODUCTION AGGREGATES OF ROCKET  
AND SPACE TECHNOLOGY MADE OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS  
REPORT 1. TOLERANCE OF MOLDED PRODUCTS THICKNESS  
FROM PROJECT VALUE**

*V.A. Kovalenko*

Dependences intended for the justified appointment of tolerances fields for physical-mechanical and strength characteristics of polymer composite materials from changes in the thickness of molded semi-finished products (prepregs) and products were obtain on the basis of mathematical models of unidirectional reinforcement structures and structures which reinforced in three directions ( $0^\circ$ ,  $\pm \varphi$ ,  $90^\circ$ ). These dependencies allow estimating the quality of technological processes molding semi-finished products and products of polymer composite materials in terms of the geometric form of this defects class.

**Key words:** polymer composite material, molding technological process, defects of deviation product thickness, tolerances field.

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