

## **АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ И ОТКЛОНЕНИЙ В СООТНОШЕНИЯХ И СВОЙСТВАХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Известно, что разнообразные виды дефектов в конструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) негативно влияют на их функциональные свойства, в особенности – ответственных изделий авиакосмической техники (АКТ) [1–8].

В связи с этим реализованы попытки многих исследователей разработать различные классификаторы типовых дефектов, возникающих в производстве интегральных конструкций АКТ из ПКМ [5–9]. Наиболее информативным из известных классификаторов представляется многоуровневый классификатор [9], содержащий 8 видов дефектов, включающих в себя 24 класса.

Следуя этому классификатору, нами начат анализ влияния всех содержащихся в нем видов дефектов и их классов на основе соответствующих математических моделей, позволяющих установить обоснованные поля допусков в целях прогнозирования технологических возможностей серийного производства изделий АКТ из ПКМ.

В наших статьях [10–11] исследованы технологические дефекты, относящиеся согласно классификатору [9] к классам дефектов геометрического вида.

В [10] 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 формуемого полуфабриката (препрега) и изделия. Эти зависимости позволяют оценить качество технологических процессов формования композитных изделий по уровню геометрического дефекта данного класса.

В [11] 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.

Ниже проведен анализ последующих видов дефектов, содержащихся в многоуровневом классификаторе [9].

#### 1. Механические дефекты

Этот вид дефектов включает в себя 4 класса:

- отклонения в схеме армирования ПКМ;
- складки;
- зазоры или нахлесты монослоев;
- нарушения порядка укладки монослоев (структуры пакета).

Влияние отклонений в схеме армирования исследовано в нашей работе [10].

Анализ влияния складок отдельных слоев армирующего материала на ФМХ ПКМ и характер напряженно-деформированного состояния изделия на основе конечноэлементных моделей нашел отражение в [12]. В ней установлен не критичный уровень влияния снижения приведенного модуля упругости ПКМ в дефектной зоне и требующий учета уровень повышения напряженности композита в локальной области при проектировании ответственных изделий.

Дефекты в виде зазоров и нахлестов монослоев соподчинены с аналогичными дефектами класса «Несоответствие толщины или локальная ступенька» геометрического вида, допуски на которые установлены в [10].

Дефекты класса «Нарушение порядка укладки монослоев» являются одной из первопричин класса дефектов «локальные поводки (коробление)», допуски на которые установлены в [11].

Таким образом, механические дефекты в ПКМ в большинстве своем соподчинены с геометрическими, допуски на которые исследованы в наших работах [10–11]. Степень этого соподчинения для разных классов дефектов механического вида различна. Имеет место либо прямое (непосредственное) соподчинение, когда тот или иной класс дефектов механического вида является первопричиной соответствующего класса геометрического дефекта. Имеется и опосредствованное соподчинение, при котором тот или иной класс дефектов механического вида является одним из следствий соответствующего класса геометрического дефекта.

Непосредственное соподчинение имеет место в случаях таких классов механического вида, как складки армирующего материала в монослое, а также зазоры или нахлесты монослоев, приводящие к локальной разнотолщинности (геометрический дефект).

Опосредствованное соподчинение имеет место, как уже отмечалось, в случае дефектов в виде отклонения в схеме армирования монослоев (разориентация) и нарушения порядка их укладки, приводящих к геометрическому дефекту в виде локальных поволодок (коробления).

Однако, несмотря на имеющее место прямое или опосредствованное соподчинение тех или иных классов дефектов механического или геометрического вида, между ними существует существенное различие,

проявляющееся на уровне подклассов, не выявленных в классификаторе [9], но отражающихся частично в причинах их возникновения.

Так, геометрический дефект в виде локального несоответствия толщины ПКМ на уровне подклассов пересекается с механическими дефектами в виде зазоров или нахлестов монослоев и складок. Причины возникновения этих механических дефектов проявляются в указанном классе геометрического дефекта в качестве его частного случая (локального утонения или утолщения).

Причинами некоторых классов видов дефектов (например, класс «Несоответствие толщины или локальная ступенька» в виде геометрических дефектов; класс «Отклонения в объемном содержании связующего» и «Отклонения в объемном содержании армирующего материала» и составляющих вида «Отклонения в соотношениях компонентов КМ») являются классы вида дефекта «Погрешности технологического режима формования».\*)

## 2. Отклонения в соотношении компонентов ПКМ.

Дефекты этого вида «Отклонения в соотношении компонентов ПКМ» являются одной из первопричин дефекта геометрического вида класса «Несоответствие толщины или локальная ступенька», допуски на которые обоснованы нами ранее в [12].

3. Дефекты вида «Отклонения в рецептуре связующего» подразделяются в [11] на два класса: «Технологические отклонения режима» и «Химические отклонения». Рассмотрим их последовательно.

Технологические отклонения являются одной из трех первопричин, имеющих место в процессе приготовления связующего в реакторе. Это недостаток или избыток:

- растворителя;
- отвердителя;
- пластификатора;
- других компонентов или ингредиентов связующего.

Это весьма серьезный дефект, проявляющийся в процессе формования самого изделия и в сопровождающих его образцах-свидетелях. В случае избытка растворителя увеличивается пористость ПКМ, а также возможны отклонения толщины ПКМ в сторону утонения вследствие снижения вязкости связующего при формовании в момент подачи регламентированного давления. В случае недостатка растворителя возможно увеличение толщины ПКМ вследствие увеличенной вязкости связующего на указанной выше технологической стадии процесса формования. В некоторых случаях при избытке конкретного растворителя, не

---

\*) Это проявление закона спирального развития философии не является, на наш взгляд, недостатком классификатора. Более того, оно способствует уменьшению числа параметров (факторов), предопределяющих потребительские (эксплуатационные) свойства ПКМ.

удаленного в процессе формования ПКМ, возможно снижение эксплуатационных свойств композита.

При препреговой технологии производства изделий из ПКМ допуски на толщину препрега, учитывающие все технологические отклонения в рецептуре, а также его плотность, липкость и другие параметры, указываются поставщиком и проверяются при входном контроле потребителем. В случае же пропитки армирующего полуфабриката непосредственно на производстве изделий из ПКМ эти допуски необходимо устанавливать экспериментально путем дополнительных исследований на образцах ПКМ по регламентированным различными стандартами или техническими условиями методикам поставщика (разработчика) соответствующих препрегов. Указанное выше в полной мере относится и к установлению полей допусков на отклонения в содержании отвердителя, пластификатора и других компонентов.

Химические отклонения в составе компонентов связующего в виде полей допусков регламентируются соответствующими ТУ, ГОСТами или другими нормативными документами, в которых определены и методики установления тех или иных характеристик.

При препреговой технологии изготовления изделий из ПКМ контроль химических отклонений в составе компонентов связующего осуществляется поставщиком (изготовителем) этих полуфабрикатов, а потребитель при входном контроле в состоянии проверить их только опосредствовано путем установления соответствия паспорту допусков на отклонения характеристик самого препрега, интегрально включающих в себя допуски на исходные химические отклонения свойств составляющих (компонентов) связующего.

При совмещенной технологии производства изделий из ПКМ, когда связующее приготавливают непосредственно на участке этого же производства, выявление соответствия уровня отклонений компонентов от регламентированных разработчиком производится контролирующей службой предприятия по соответствующим производственным инструкциям, например [13].

Влияние отклонений в компонентах связующего ПКМ на ФМХ и другие эксплуатационные характеристики различно для разных конкретных случаев и определяется экспериментально. Рекомендации по определению количества отвердителя (в мас. ч. на 100 мас. ч. смолы), катализаторов (ускорителей), пластификаторов и свойства различных связующих содержатся в [14, 15].

#### 4. Отклонения в свойствах армирующего материала

Дефекты вида «Отклонение в свойствах армирующего материала» класса «Снижение ФМХ и прочности АМ» нормируются в состоянии поставки производителем и проверяются при входном контроле изготовителем изделий из ПКМ. Допуски на отклонение в свойствах армирующе-

го материала в паспорте производителя, как правило, приводятся для неполного числа ФМХ.

В качестве примера в табл. 1 приведены регламенты отклонений параметров пределов прочности при растяжении и сжатии ( $\sigma_{\epsilon}^+$ ,  $\sigma_{\epsilon}^-$ ), модуля упругости при растяжении ( $E^+$ ) для углеродных наполнителей (Россия), а в табл. 2 –  $\sigma_{\epsilon}^+$  и  $E^+$  для волокон «Panex» фирмы Stakpole Carbon Fiber (США) [14].

Таблица 1 – Свойства углеродных нитей (Россия)

Показатели свойств	Марка наполнителя (НПО «Химпром»)				
	УКН-П/2500	УКН-П/5000	УКН-5000	УКН-10000	Кулон-5000А Кулон-5000Б
Линейная плотность, м/г	205(±7...10)	410(±8...10)	410(±10)	900(±8)	480(±12)
Относительная разрывная нагрузка нити при разрыве петель, Н/текс	4,9...5,9	6...7	7	8	4,9
Содержание шлихтового состава, % мас.	3,5±1,5	3,5±1,5	2...6	2...6	–
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,73±0,03		1,73±0,05		1,9...1,93
Предел прочности при растяжении $\sigma_{\epsilon}^+$ (в микропластике), ГПа	1,8...2,6	1,8...2,6	2,5		2,3
Модуль упругости при растяжении $E^+$ (нить), ГПа	230±30		230±30		300...400
Предел прочности при растяжении $\sigma_{\epsilon}^+$ (однонаправленного эпоксидного волокнита), ГПа	1,0...1,5	1,0...1,5	–		–
Предел прочности при сжатии $\sigma_{\epsilon}^-$ (однонаправленного волокнита), ГПа	1,0...1,2	1,0...1,2	–		–

Таблица 2 – Углеродные волокна волокон «Panex» фирмы Stakpole Carbon Fiber (США) из ПАН

Показатели свойств	30 (диаметр филамента 8 мкм)	1/4CF-30	3OR	30Y/800d <sup>2</sup>	30Y/300d <sup>2</sup>
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,74±1,75	1,73	1,75	1,75	1,75
Предел прочности $\sigma_e^+$ , ГПа	2,64±2,81	2,24±2,46	1,55±1,58	1,55±1,85	1,58
Модуль упругости $E$ , ГПа	211±222	207±211	262±267	262±267	262±267
Предельная деформация $\varepsilon$ , %	1,3	1,2	–	–	–

Поэтому для производства особо ответственных изделий РКТ службами их изготовителя необходимо проводить входной контроль всех ФМХ и прочностных свойств армирующих материалов, которые входят в формулы для определения полей допусков свойств ПКМ, приведенные в нашей работе [12]. Кроме того, входной контроль, проведенный в полном объеме, позволит выявить отклонения в теплофизических и других эксплуатационных свойствах поставляемого армирующего материала, входящих в пятый вид одноименного класса многоуровневого классификатора [9].

Установление допусков на снижение адгезионных свойств армирующих материалов является весьма сложной многоаспектной задачей, связанной с конкретным видом армирующего материала, формой его поставки на производство изделий из ПКМ и зависящими от этих факторов способов предварительной обработки. Кроме того последствия снижения адгезионных свойств арматуры проявляются в интегральном уровне снижения несущей способности и ресурса в процессе его эксплуатации. В связи с отмеченным выше непосредственное надежное нормирование этого класса дефектов не представляется возможным.

### Выводы

1. Большинство дефектов механического вида непосредственно или опосредствованно соподчинено с теми или иными классами дефектов геометрического вида, для которых ранее установлены обоснованные поля допусков [10-12].

2. Дефекты некоторых классов механического вида, таких, как отклонения в рецептуре связующего и отклонения в характеристиках армирующего материала, а также снижение его адгезионных свойств, вызывают объективные трудности надежного нормирования их полей допусков теоретическими методами. В связи с этим представляется необ-

ходимым проведение комплекса экспериментальных исследований с последующим обобщением их результатов.

3. Достижение современного мирового уровня технологии производства ответственных агрегатов АКТ из ПКМ в аспекте высокоэффективных процессов, оборудования и оснащения [7-8] существенно снизит или исключит ряд дефектов, представленных в многоуровневом классификаторе [9], и необходимость их нормирования.

#### Список использованных источников

1. 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. – Х.: ХАИ, 1981. – С. 124 – 129.

2. 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. – Х.: ХАИ, 1986. – С. 148 – 155.

3. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин и др. – Х.: Харьк. авиац. ин-т им. Н.Е. Жуковского, 1989. – 332 с.

4. Боголюбов, В.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

5. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Марин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 420 с.

6. Бугаков, И.С. Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности многослойных композиционных конструкций летательных аппаратов с учетом внутренних дефектов, определенных компьютерным томографом: дис... канд. техн. наук: 05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов / Бугаков Игорь Сергеевич. – Казань, 2006. – 171 с.

7. Коваленко, В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности. Аналитический обзор [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. –Х., 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.

8. 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 конструкции летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып. 3(67). – Х.: ХАИ, 2011. С. 7 – 18.

9. Гайдачук, А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2010. – № 3(70). – С. 40 – 49.

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

11. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2. Допуски на нарушения сплошности материала и локальные поводки изделия [Текст] / В.А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2012. – № 4(91). – С. 5 – 15.

12. Кириченко, В.В. Исследование влияния складки в полимерном композиционном материале на его упругие свойства и характер изменения локального напряженно-деформированного состояния [Текст] / В.В. Кириченко, В.А. Коваленко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х.: ХАИ, 2011. – С.127 – 132.

13. Технологическая инструкция. Приготовление связующих 5-211Б, 5-211БН, ЭНФБм, ЭНУП и изготовление препрегов на основе углеродных, стекло- и органонаполнителей на установках УПСТ-300, УПСТ-1000м, УЛС-3. – К.: АНТК «Антонов». – 1986. – 6 с.

14. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.

15. Алентьев, А.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов [Текст] / А.Ю. Алентьев, М.Ю. Яблокова. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 72 с.

*Поступила в редакцию 31.10.2012.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*