

УДК 629.735.33.023: 620.22-419

А.В. Андреев, канд. техн. наук,
Я.С. Карпов, д-р техн. наук
И.М. Тараненко, канд. техн. наук
М.А. Шевцова, канд. техн. наук

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ИХ РЕШЕНИЯ

Качество серийно выпускаемой авиационной и ракетно-космической техники в основном определяется стабильностью свойств материалов (низким коэффициентом разброса физико-механических характеристик), постоянством параметров деталей при их изготовлении каким-либо технологическим процессом и неизменяемостью свойств материалов и параметров деталей в процессе их активной и пассивной эксплуатации. Применительно к конструкциям из композитных материалов (КМ) проблема обеспечения надлежащего качества усложняется тем, что свойства материала формируются одновременно с процессом изготовления детали и возможные несоответствия характеристик принятым при проектировании практически невозможно устранить. Кроме того, прямое подтверждение свойств композита возможно только при вырезании образцов для испытания из детали, что не всегда разрешено, а использование для этих целей образцов-свидетелей больше соответствует косвенному подтверждению.

Качество композита в виде стабильности его свойств определяется надежным прогнозированием и обеспечением объемного содержания компонентов композитного материала, постоянством свойств материалов волокон и матрицы, точностью структуры пакета слоев КМ (углов армирования и последовательности укладки слоев, а также однородности объемного содержания связующего по толщине пакета) и требуемыми параметрами вязкости и смачиваемости связующего при соблюдении нормированных параметров технологического процесса (давления, температуры и их изменений во время формования).

Ведущие производители армирующих и матричных материалов для композитов гарантируют стабильность и повторяемость их свойств, а использование многочисленных средств автоматизации и механизации операций раскроя полуфабрикатов и укладки слоев решают задачи обеспечения точности структуры пакета. Таким образом, качество КМ зависит в основном от объемного содержания связующего и армирующего материала по всему объему детали. Эти параметры структуры КМ наиболее сильно влияют на все его физико-механические свойства. Например, пятипроцентное отклонение объемного содержания волокон приводит к десятипроцентному изменению модуля упругости и прочности вдоль волокон, а его неоднородность распределения по толщине

детали приводит к ее короблению (поводкам). Важностью объемного содержания компонентов КМ как базового структурного параметра обусловлено внимание технологов к разработке таких процессов и выбору таких термобаровременных параметров, которые гарантированно обеспечивали бы их нормативное значение.

Решение фундаментальной проблемы обеспечения стабильности объемного содержания волокон и связующего в композите осуществляется в нескольких направлениях, среди которых выделяются следующие:

а) применение современного усовершенствованного оборудования, соответствующих связующих (с минимальными выделениями побочных продуктов при отверждении) и армирующих материалов (с хорошей смачиваемостью) для вакуумной пропитки и пропитки под давлением. В этих процессах не всегда обеспечивается оптимальное объемное содержание армирующего материала, но всегда реализуется его постоянное значение, т.к. пропитка осуществляется в жестких замкнутых формах. Вакуумная пропитка позволяет изготавливать крупногабаритные детали, например круговые оболочки конструкций, такие, как носовые обтекатели самолетов и ракет, характеризующиеся минимальными изгибными деформациями;

б) использование технологических слоев, препятствующих удалению части связующего при вакуум-автоклавном формовании из препрегов. Этого можно добиться за счет сплошного разделительного слоя, расположенного между формируемым изделием и дренажным слоем (рис. 1), при этом отверждение связующего не должно сопровождаться газовыделением, приводящему к образованию пор;

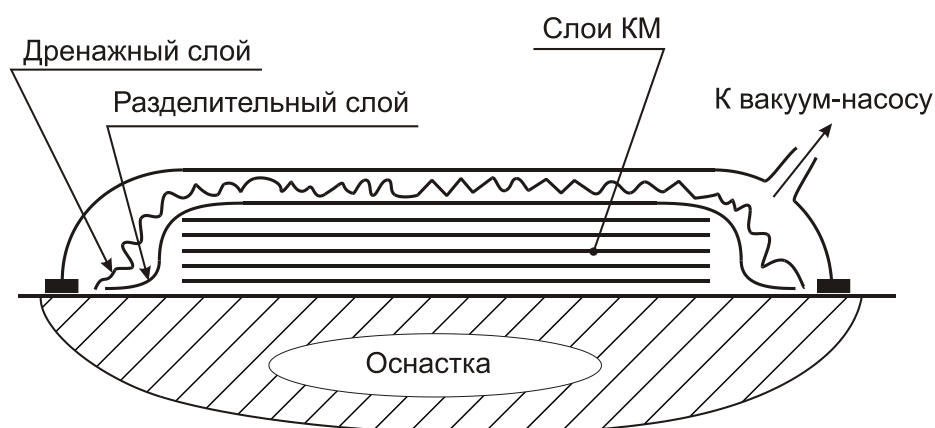


Рисунок 1 – Схема укладки технологического пакета с сохранением объемного содержания связующего

в) отключение вакуумирования после достижения связующим минимальной вязкости, уплотнения пакета и удаления воздушных включений. Автоклавное давление подается согласно техпроцессу для данного

связующего. Аналогичный техпроцесс применяется для композита SP-313 [1];

г) реализация намотки с управляемым усилием натяжения по слоям в целях минимизации выдавливания связующего из нижележащих слоев. Из-за неоднородности усилия натяжения в слоях и, соответственно, объемного содержания связующего в конструкции постоянной толщины имеют место остаточные напряжения, которые приводят к деформированию в сторону уменьшения радиуса для профилей с открытым контуром поперечного сечения или к короблению оболочечных конструкций после их разреза по образующей (рис. 2);

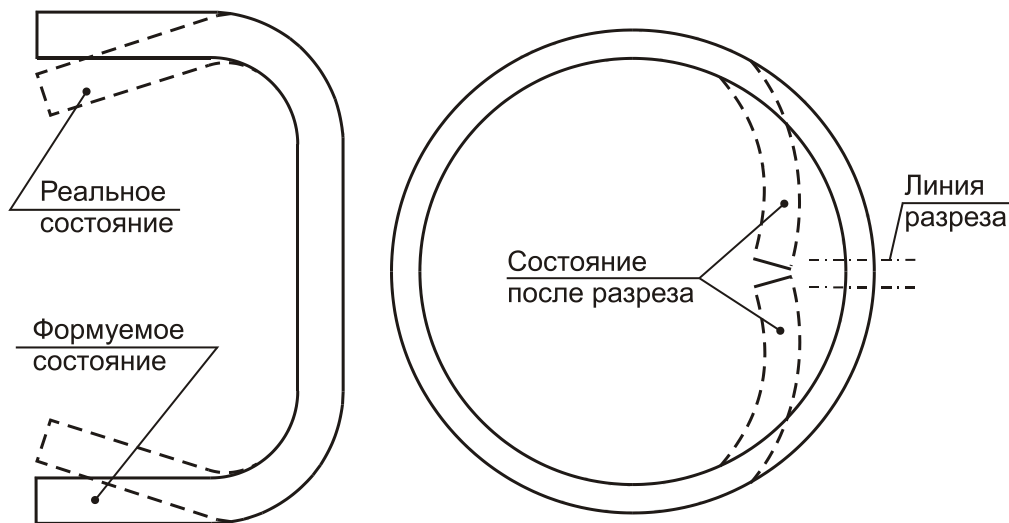


Рисунок 2 – Схема остаточного деформирования конструкций постоянной толщины а - профиль, б - оболочка после разреза

д) применение термопластичных связующих в виде встроенных волокон в нитях или жгутах армирующего материала (как по основе тканей, так и по утку), пленок или готовых препрегов.

Второй фундаментальной проблемой композитных конструкций является необходимость иметь надежную и объективную систему неразрушающего контроля качества полученной композитной конструкции. В связи с одновременным получением и материала и конструкции исследуемыми должны быть как параметры структуры (объемного содержания, углы армирования, пористость), так и физико-механические характеристики (деформативные и теплофизические свойства) материала. Возможность определения прочностных свойств методами неразрушающего контроля маловероятно в обозримом будущем.

В основу большинства методов неразрушающего контроля качества КМ лежат прохождение через них различного рода волн, процессы передачи или распространение тепловых потоков или взаимодействие с электромагнитными полями [2]. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

а) скорости распространения акустических волн напрямую зависят от плотности материала и его модулей упругости и коэффициентов Пуассона. Измерение скорости позволяет косвенно (через математическое описание модели распространения волн) определить ряд свойств материала. Например, через скорость распространения продольных и поперечных волн можно определить модуль упругости и коэффициент Пуассона металлов. Для композитов все гораздо сложнее, но и возможности акустических методов шире. Главная проблема – это генерация, селекция и регистрация различных видов волн (продольных, поперечных, Лэмба (симметричные и ассиметричные), Рэлея, Лява, Стоунли, изгибные), часть из которых характеризуются поляризацией. Например, скорость распространения поперечных волн с поляризацией в плоскости слоя зависит от модуля сдвига в плоскости слоя, а с трансверсальной поляризацией – от модуля межслойного сдвига, и путем соответствующих экспериментов можно оценить те или иные свойства, естественно, при наличии адекватных математических моделей распространения волн;

б) теплоемкость КМ определяется теплоемкостью армирующего и матричного материалов, которые достоверно известны, и их объемным содержанием. Экспериментальное измерение теплоемкости позволяет оценить величину объемного содержания компонентов. Теплопроводность является анизотропной характеристикой (зависит от направления распространения теплового потока), поэтому через теплопроводность можно определить соответствие схемы армирования требуемым параметрам. Кроме того, для проектирования ряда конструктивных элементов важно знание коэффициентов теплоемкости и теплопроводности, являющихся основой расчета термостойкости;

в) измерение диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь позволяет достаточно достоверно определить величину пористости компонентов, в том числе и непрочности как волокон со связующим, так и слоев между собой. Этот способ широко используется для определения пористости керамики [3].

Третьей не менее важной проблемой композитных конструкций является организация проектировочного и поверочного расчета на прочность. Суть проблемы состоит в том, что первый базируется на паспортных физико-механических свойствах монослоев (чаще всего однонаправленных), так как неизвестна структура композита – она только проектируется, а поверочный расчет на прочность строится на свойствах уже спроектированной структуры. Таким образом, эти два обязательных этапа проектирования базируются на разных экспериментальных комплексах свойств, что увеличивает продолжительность разработки и снижает достоверность проектных работ. В таблице приведена обобщенная характеристика возможностей послойного и пакетного анализа прочности композитных конструкций [4].

При пакетном анализе прочности расчетчик оперирует средними напряжениями по толщине пакета и не может судить о таких важных аспектах, как влияние температуры на прочность (температурное НДС является самоуравновешенным), о путях модификации структуры пакета при избыточной или недостаточной прочности (это типичная обратная задача, имеющая множество решений), о прогнозировании технологических и температурных поворотов в результате наличия внутренних изгибающих и крутящих моментов и др. В работах [4, 5] предложен один из возможных путей разрешения этой дилеммы, заключающийся в том, что предварительно разрабатывается и экспериментально проверяется методика прогнозирования прочностных свойств пакета по известным характеристикам монослоев с учетом температуры (по аналогии с классической теорией определения деформативных свойств – модулей упругости, коэффициентов Пуассона и т.п.). Это позволит проводить проекторочный и поверочный расчеты на прочность по свойствам пакета, которые на первом этапе определяются теоретически, на втором – экспериментально. Включение такой методики в паспорт материала позволит максимально объединить возможности послойного и пакетного анализов прочности.

Общая характеристика подходов к расчету на прочность конструкций и слоистых композитов

Возможность подхода	Послойный анализ	Пакетный анализ
Проектирование структуры	да	нет
Обоснование заключения о прочности	нет	да
Возможность модификации структуры по результатам исследования прочности пакета	да	нет
Оценка влияния температуры на НДС и прочность	да	нет
Оценка НДС в слоях	да	нет
Проведение и трактовка результатов неразрушающего контроля	нет	да
Построение моделей разрушения КМ	да	нет
Оценка влияния объемного содержания на свойства КМ	да	нет
Оценка влияния последовательности укладки слоев на свойства материала и конструкции	да	нет

Четвертой проблемой, органично связанной с предыдущей направленностью на обеспечение эксплуатационной пригодности компо-

зитных конструкций, является прогнозирование доверительных интервалов разброса свойств материалов, отличающихся толщиной и структурой. Физико-механические характеристики КМ определяются на основе испытания образцов, размеры которых (толщина, ширина и длина) достаточно строго регламентированы стандартами. Для композитов в силу специфики формирования их свойств, статистические характеристики результатов испытаний зависят от толщины, которая образуется из нескольких слоев, обладающих своими свойствами, поэтому определяет доверительный интервал того или иного свойства. Проблема прогнозирования коэффициентов вариации и доверительных интервалов исключительно актуальна для пакета разноармированных слоев и для гибридных композитов, так как на этапе проектирования прогнозируются параметры надежности и долговечности. Если математический аппарат третьей проблемы построен на детерминистском подходе, то для четвертой свойственен вероятностный подход. Пакет слоев КМ нельзя рассматривать ни как параллельное, ни как последовательное соединение неких элементов, что позволило бы использовать существующий аппарат теории вероятности. Необходимо разработать в комплексе вероятностную модель слоистого композита с теорией прогнозирования коэффициентов вариации и доверительных интервалов свойств материалов, отличающихся толщиной и структурой.

Следующей, пятой проблемой, основные контуры решения которой необходимо иметь уже на этапе проектирования изделия, является наличие кривых усталости материала (кривая Веллера), без которых невозможно прогнозировать долговечность конструкций. Обычно при выборе компонентов композита определяют долговечность КМ вдоль и поперек волокон (или по основе и по утку), по которой косвенно можно судить о начале усталостного разрушения пакета слоев (при наличии адекватной модели перехода от долговечности слоя к долговечности пакета). Эта проблема существенно усложняется тем, что слои в пакете находятся в условиях сложного напряженного состояния, а кривые усталости для моноармированных слоев строятся для простого нагружения, причем для вполне определенных толщин (количества слоев). Таким образом, для расчета долговечности конструкций из КМ (а надежному расчету уделяется большое внимание из-за большой стоимости испытаний на прочность конструкций в целом или (и) их элементов и узлов) необходимы:

- обоснованные модели определения пределов выносливости моноармированных пакетов в зависимости от толщины и для сложного напряженного состояния с полным спектром соотношения между компонентами напряжений;

- математические модели прогнозирования долговечности пакета слоев по свойствам слоев для интервала температур эксплуатации (для

слоистых КМ нельзя пренебрегать внутренними температурными напряжениями в слоях);

- экспериментальное обоснование этих двух теорий в целях определения пределов их применимости, а также для оценки возможности их распространения на другие составы композитных материалов.

Постоянное распространение номенклатуры волокон и связующих и недетерминированность структуры пакета слоев на этапе проектирования, а также необходимость испытания большого количества образцов в общем-то недешевого материала делают актуальной задачу оперативного определения предела выносливости (без испытаний на количество циклов до разрушения). Этому вопросу посвящено много исследований, на основании которых в статье [6] синтезирован новый метод прогнозирования долговечности КМ на основе баланса энергии деформирования и разрушения с учетом внутреннего трения.

В процессе формования композитных конструкций при повышенных температурах и из-за неоднородности объемного содержания арматуры, приводящему к переменным модулям упругости, коэффициентам Пуассона и линейного температурного расширения, в них возникает так называемое технологическое напряженно-деформированное состояние, которое является предметом технологической механики. В связи с этим ряд аспектов, являющихся следствием технологии переработки КМ, составляют шестую проблему конструкций из композитов, которую необходимо рассматривать на нескольких уровнях:

- прогнозирование внутренних напряжений в слоях в конструкции нормативной конфигурации (согласно чертежу), которые необходимо учитывать при расчете на прочность и при проектировании структуры КМ;

- прогнозирование деформированного состояния конструкции после извлечения из оснастки. Это позволяет косвенно оценить качество изделия путем сравнения перемещений эталонной и реальной конструкций и может также служить для оценки реологических характеристик материала;

- прогнозирование напряженно-деформированного состояния деталей (узлов) после сборки конструкции, т.е. после ее деформирования внешними установочными усилиями и закрепления на каркас. Именно эти напряжения необходимо суммировать с силовыми эксплуатационными напряжениями и именно эти деформации следует учитывать при оценке изменения аэродинамических характеристик летательных аппаратов или внешнего вида других изделий.

Ввиду принципиальной невозможности экспериментального определения внутренних технологических напряжений исследованию этой проблемы посвящено очень много работ и в основном для первого и второго уровней проблемы технологической механики. Исследование задач прогнозирования монтажного НДС (третий уровень) только разво-

рачивается. Сложность заключается в том, что деформированную деталь вследствие не совсем детерминированных внутренних напряжений деформируют снова в целях крепления к силовому каркасу или к другим деталям и для расчета приходится оперировать не совсем объективными и достоверными исходными данными, что следует, например, из работ [7, 8].

Элементы композитных конструкций имеют, как правило, неоднородное поперечное сечение, включающее в себя слои с разной укладкой. Вследствие

этого части сечения имеют отличающиеся друг от друга упругие и теплофизические свойства, что приводит к неожиданным деформациям при изменении температуры или при эксплуатационном нагружении. Например, стрингеры уголкового типа имеют поперечное сечение, показанное на рис. 3, а. При изменении температуры в соединении слоев с армированием $[0^\circ]$ и $[\pm 45^\circ]$ возникают достаточно быстро затухающие касательные напряжения (рис. 3, б) [9].

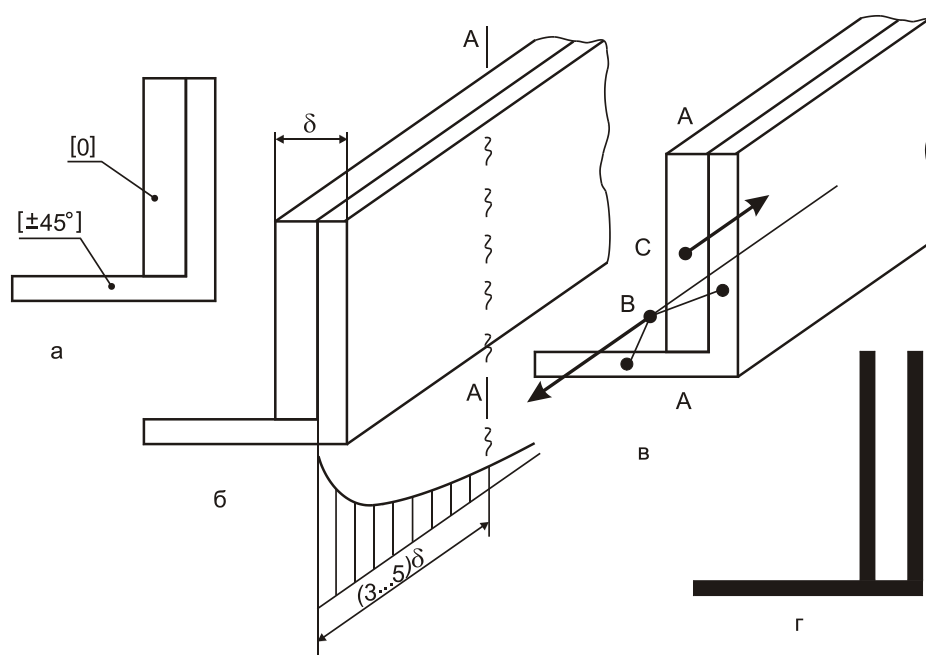


Рисунок 3 – Схема нагружения стрингера внутренними усилиями: а – поперечное сечение; б – распределение касательных напряжений в соединении слоев стрингера; в – схема внецентренного растяжения – сжатия стрингера; г – тонкостенная модель поперечного сечения

После отсечения краевой зоны получим стрингер, нагруженный внецентренно двумя равными силами – одной растягивающей, другой сжимающей, каждая из которых приложена в центре жесткости соответствующего элемента (точки В и С на рис. 3, в). В рамках теории тонкостенных стержней исходное сечение следует представлять так, как показано на рис. 3, г. Подробное исследование напряженно-

деформированного состояния таких стержней описано в работах [10, 11], в которых на основе расчетной схемы, предложенной В.З. Власовым для изотропных стержней, получены разрешающие уравнения для определения изгибных и крутильных напряжений и деформаций. Аналогичным образом можно рассматривать поведение стрингерной панели при температурном нагружении. Задача, которая ждет своего исследователя.

Панели обшивки летательного аппарата подкрепляются стрингерами разнообразного поперечного сечения, которые при сжатии панели стремятся оторваться от обшивки (отщелкиваются). Для металлических панелей это явление не играет существенной роли, так как возникающие отрывные усилия с запасом воспринимаются заклепками. Для композитных панелей с приформованными или приклеенными стрингерами напряжения отрыва соизмеримы с прочностью клеевого слоя, и при недостаточной ширине соединения стрингеры могут оторваться от обшивки при сжатии панели. На рис. 4 показана схема возникновения отрывных усилий.

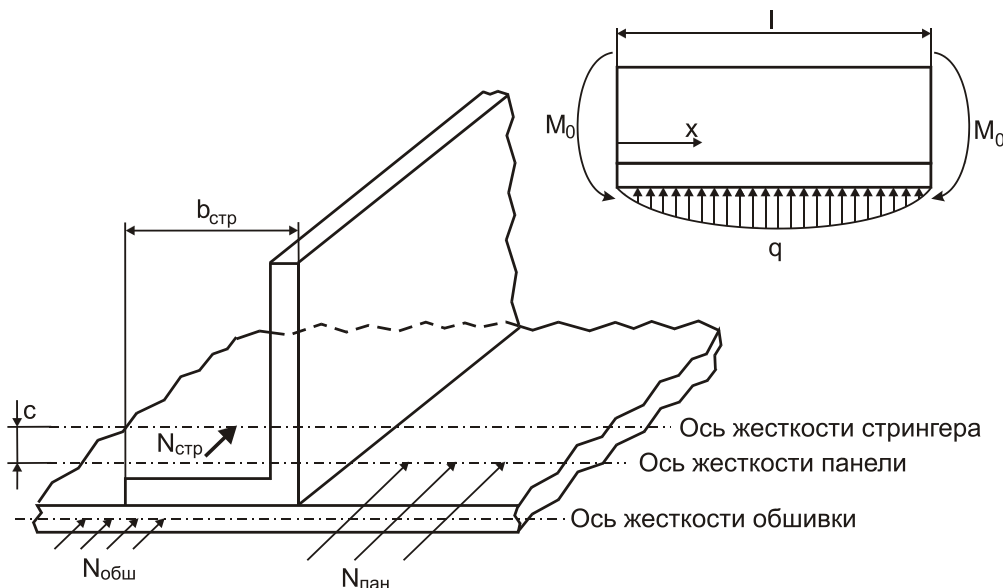


Рисунок 4 – Схема возникновения отрывных усилий стрингера при сжатии панели

Разложив усилия $N_{пан}$ на силу сжатия стрингера $N_{стр}$ и усилия сжатия обшивки $N_{обш}$ (см. рис. 4) и перенеся их статическим нулем в центры жесткости соответственно стрингера и обшивки, получим состояние изгиба стрингера двумя изгибающими моментами M_0 на концах (см. рис. 4, б). Моменты M_0 уравниваются реакцией обшивки, которая в рамках линейной механики есть не что иное, как упругое основание (относительно гипотезы Винклера). Потенциальная упругая ось изогнутого стрингера на первом этапе может быть представлена синусои-

дой. Тогда для распределенных усилий упругого основания можно записать зависимость

$$q = q_0 \sin \frac{\pi x}{\ell}, \quad (1)$$

где q_0 – максимальное значение усилий в сечении $x = \frac{\ell}{2}$, которое и определяет несущую способность соединения стрингера с обшивкой.

Для определения величины q_0 составим уравнение равновесия половины длины стрингера как балки:

$$M_0 = q_0 \int_0^{\ell/2} x \sin \frac{\pi x}{\ell} dx. \quad (2)$$

Отсюда

$$q_0 = M_0 \frac{\pi^2}{\ell^2}. \quad (3)$$

Здесь (см. рис. 4)

$$M_0 = N_{стр} \cdot c = c(EF)_{стр} \frac{N_{пан} \cdot b_{пан}}{(EF)_{стр} + (EF)_{обш}}, \quad (4)$$

где $(EF)_{стр}, (EF)_{обш}$ – осевые жесткости соответственно стрингера и обшивки,

$b_{пан}$ – ширина панели (для многострингерных панелей это расстояние между стрингерами).

Максимальные отрывные напряжения в соединении стрингера с обшивкой определяют по формуле (см. рис. 4, а)

$$\sigma_{отр} = \frac{q_0}{b_{стр}}. \quad (5)$$

Из условия обеспечения прочности соединения

$$\sigma_{отр} = \frac{q_0}{b_{стр}} \leq [\sigma_{отр}] \quad (6)$$

можно определить требуемую ширину полки стрингера

$$b_{стр} \geq \frac{q_0}{[\sigma_{отр}]}, \quad (7)$$

где $[\sigma_{отр}]$ – прочность клея или связующего на отрыв.

При определении усилий в стрингере и в обшивке необходимо учесть и их температурную составляющую [10].

Из приведенного выше можно представить сложность решения задач технологической механики стрингерных панелей обшивки, особенно определение ее монтажного напряженно-деформированного состояния.

Решение перечисленных выше проблем возможно или на основе уже существующих математических моделей или на вновь разрабатываемых, и какими бы они не казались точными и полными они остаются теоретическими моделями и их необходимо проверять и подтверждать экспериментально. Для этого необходимы измерение и идентификация напряжений и деформаций. Традиционные тензорезисторы позволяют судить о деформациях на той поверхности, где они приклеены, а для слоистых композитов этого недостаточно для прогнозирования деформаций нижележащих слоев, которые в силу отличающихся модулей упругости, сложного напряженно-деформированного состояния и наличия относительно податливой прослойки между слоями не всегда равны деформации на поверхности. Экстензометры в общем измеряют удлинение определенного участка испытываемого образца, вследствие чего можно судить о средней деформации сечения, а о деформациях слоев, если и можно судить, то только через какую-либо теоретическую модель. Но даже знание деформаций слоев не позволяет достоверно переходить к напряжениям, потому что модули упругости и коэффициенты Пуассона слоев в пакете формально неизвестны – они необязательно равны найденным при испытаниях образцов из однонаправленных материалов. Таким образом, седьмая проблема заключается в возможности измерения и идентификации напряжений и деформаций как в слоях КМ, так и достаточно распространенных клеевых соединениях, являющихся основой КМ и многочисленных интегральных конструкций. Измерение деформаций склеиваемых поверхностей деталей принципиально невозможно из-за возмущения, вводимого тензорезистором. Этим можно объяснить наличие многочисленных теорий клеевых соединений и появление новых моделей. Особую важность эта проблема приобретает в связи с необходимостью развития и применения методов неразрушающего контроля качества композитных конструкций, которые базируются на основе специфических моделей и часто на эталонных образцах. Наложение этих моделей на модели деформирования явно не способствует повышению достоверности экспериментальных исследований.

Современные требования к техническим изделиям включают в себя не только условия обеспечения работоспособности и надежности, но и ряд требований по энергоэффективности производства, экологичности и возможности безопасной утилизации изделий после снятия с эксплуатации. Применительно к композитам эти требования означают необходимость:

- сокращения цикла формования, что способствует снижению энергозатрат;
- перехода к безавтоклавным методам изготовления композитных конструкций;
- отказа от препреговых технологий;
- снижения давления и температуры формования;

- оптимизации баротермовременного процесса формования композитных изделий;
- минимизации или исключения доводочных операций механообработки после формования;
- минимизации или исключения технологического коробления, требующего дополнительных затрат на сборку изделий;
- снижения доли вспомогательных расходных технологических материалов (разделительных, дренажных, впитывающих и жертвенных слоев) или обеспечение их многократного использования;
- разработки методов эффективного использования отходов производства и снятых с эксплуатации композитных изделий, включая возможность отделения волокон (арматуры) от связующего;
- всемерной механизации и автоматизации производственных процессов и др.

Решение этих проблем позволит устранить имеющиеся недоверие к композитам; обеспечить применение традиционных и привычных методов расчета, проектирования, производства и испытаний; повысить качество материалов и конструкций; реализовать высокоэффективное производство без дорогостоящего и небезопасного оборудования и др.

Весьма поверхностный анализ фундаментальных проблем композитов и конструкций из них свидетельствуют о том, что каждая из проблем может стать предметом серьезного научного исследования, а задачей данной статьи является приглашение всех заинтересованных специалистов к дискуссии в целях улучшения процесса разработки композитных технических изделий.

Список использованных источников

1. Гайдачук В.Е. Основы конструкторской подготовки производства агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст]: учеб. пособие / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1988. – 67 с.

2. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст]: учеб. пособие / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. — 189 с.

3. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирования, конструкционные материалы, технология производства, испытания [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 239 с.

4. Ставиченко В.Г. Сравнительный анализ подходов к оценке прочности слоистых композиционных материалов [Текст] / В.Г. Ставиченко, Я.С. Карпов // Проблемы прочности – №4, 2008. – С. 48–56.

5. Карпов Я.С. Исследование и анализ способов удовлетворения критериям прочности слоистого композиционного материала [Текст] / Я.С. Карпов, В.Г. Ставиченко // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им Н.Е.Жуковского «ХАИ», Вып. 1, 2004. С. 3-10.

6. Карпов Я.С. Ускоренное прогнозирование усталостной долговечности на основе энергетического подхода [Текст] / Я.С. Карпов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2011, Вып. 4 (68).– С. 23–31.

7. Карпов Я.С. Определение температурных прогибов закрепленных слоистых пластин [Текст] / Я.С. Карпов, В.Г. Ставиченко // *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2005, Вып.6. – С. 33–41.

8. Ставиченко В.Г. Моделирование остаточного напряженно-деформированного состояния панелей из композиционных материалов малой кривизны [Текст] / В.Г. Ставиченко // *Технологические системы*. – 2007, Вып. 4. – С. 7–11.

9. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст]: учебник / Я.С. Карпов – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.

10. Тараненко И.М. Исследование изгибно-деформированного состояния тонкостенных композитных профилей [Текст] / И.М. Тараненко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2001, Вып. 4(27). – С. 119 – 123.

11. Тараненко И.М. Расчет деформированного состояния z-образного композитного профиля [Текст] / И.М. Тараненко // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е.Жуковского «ХАИ». – 2003, Вып. 2(33). – С. 67–73.

Поступила в редакцию 25.11.2016.

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