

УДК 629.7.02.01 – 620.22

Я. С. Карпов, д-р техн. наук,
М. А. Шевцова, канд. техн. наук,
В. Г. Ставиченко, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМ СТАТИКИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИХ. ЧАСТЬ 1. О ПРОБЛЕМАХ СТАТИКИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Механика конструкций базируется на ряде гипотез и допущений, которые для конструкций из изотропных материалов обеспечили получение ряда замечательных результатов в виде инженерных зависимостей, являющихся основой проектирования и расчета на прочность. Например, принятие гипотезы об отсутствии надавливания «слоев», т.е. об отсутствии поперечного сжатия, при изгибе балок позволило вывести формулу Журавского, с помощью гипотезы Кирхгофа – Лява – построить инженерную теорию пластин и оболочек. Композитные материалы (КМ) в силу своей структуры имеют ряд особенностей, которые накладывают определенные ограничения на пределы применимости классических гипотез и допущений. К основным структурно-механическим особенностям КМ можно отнести:

а) наличие слоистости у большинства композитных конструкций, связанной с видом применяемого армирующего материала (лента, ткань, трикотажное полотно, плетеные рукава и т.п.);

б) наличие многочисленных зон с переменными физико-механическими свойствами, характерных для местных и кромочных усилений из-за необходимости добавления слоев с разнообразными углами армирования и иногда из другого материала. В результате имеют место скачкообразное изменение физико-механических характеристик, что требует применения обобщенного физического закона (для ортотропного или анизотропного КМ), а также появление кромочных эффектов в виде дополнительных напряжений;

в) наличие зон переменной анизотропии упругих и прочностных свойств КМ при укладке тканей на криволинейные поверхности (одинарной и двойной кривизны) и в зонах формования отверстий путем раздвигания армирующих волокон, в результате чего изменяются объемное содержание компонентов КМ и угол армирования;

г) аномальные значения коэффициентов Пуассона (больше 0,5) и линейного температурного расширения (отрицательные значения), а также характерные для КМ коэффициенты взаимного влияния 1-го и 2-го рода и Ченцова, приводящие к необходимости учета дополнительных напряжений и деформаций в конструкциях, спроектированных без учета этих специфических свойств;

д) низкая жесткость слоистых композитов на трансверсальный сдвиг, которая снижает критические усилия потери устойчивости, повышает перемещение конструкции под нагрузкой и увеличивает протяженность зоны действия принципа Сен-Венана в окрестности нерегулярного напряженно-деформированного состояния (зоны приложения эксплуатационных нагрузок и опорных реакций);

е) наличие в составе слоистого композита слоев с линейной и нелинейной диаграммой «напряжение - деформация», что существенно ограничивает применимость классической теории слоистых сред, особенно для расчета упругих констант слоистого КМ;

ж) частая невозможность обеспечения полной и гарантированной симметрии укладки слоев относительно срединной поверхности, что связано с нечетным количеством слоев определенной ориентации или с неравномерным объемным содержанием компонентов КМ в результате особенностей фильтрации связующего при формообразовании и формировании композитной конструкции. В результате возникает технологическое коробление и дополнительное внутреннее самоуравновешенное напряженное состояние, которые после сборки конструкции (путем деформирования и прижатия к каркасу) преобразуются в монтажные напряжения и деформации, отличающиеся от технологических;

и) наличие многочисленных и разнообразных соединений, начиная с соединения волокон с матрицей и слоев между собой и заканчивая соединениями и стыками деталей между собой. Особое внимание следует уделить внутренним межслойным соединениям вдоль кромок деталей из слоистых КМ и по периметру зон с добавлением или удалением слоев, для которых характерно состояние в виде дополнительных касательных напряжений между слоями и нормальных напряжений в слоях КМ;

к) изменение структуры КМ ведет к изменению коэффициентов линейного температурного расширения, что приводит к появлению температурных напряжений как в процессе формования и термообработки, так и в эксплуатации, а также к трудно прогнозируемым реологическим явлениям.

К настоящему времени многие проблемы композитов как анизотропных материалов с регулярной и однородной структурой в основном решены. Результаты подробно обоснованы и описаны в работах, ставшими классическими [1 - 12], а также в статьях и монографиях, приведенных в библиографических списках к разделам книги [13]. Непротиворечивая часть механики волокнистых композитов синтезирована в учебнике [14]. Широкий круг вопросов соединений деталей из КМ освещен в монографии [15] и в списке использованной литературы к ней.

Работоспособность и эксплуатационная пригодность конструкций из композитов определяются в основном напряженно-деформированным состоянием нерегулярных зон, где не в полном объеме соблюдаются основные гипотезы механики конструкций, что в даль-

нейшем приводит к погрешностям расчетов по классическим формулам. Рассмотрим подробнее некоторые аспекты применения известных зависимостей механики для слоистых композитных материалов в условиях отмеченных выше их особенностей.

1. Проблема трансверсальных (поперечных) сдвигов

Из-за низкой жесткости и прочности композитов на межслойный сдвиг имеют место такие явления, как увеличение прогибов, снижение критических усилий потери устойчивости, расслоение при сдвиге и изгибе и др. Классическая теория упругости, например [16, 17], для записи напряжений и деформаций оперирует элементарными объемами материала, размеры которого настолько малы, что можно использовать аппарат дифференциального исчисления. Для слоистых КМ два размера (в плоскости слоев) могут быть сколь угодно малы, а третий (в трансверсальном направлении) – всегда имеет конечный размер, равный сумме толщин слоев. Кроме того, физико-механические свойства композита в направлении нормали к слоям изменяются скачкообразно, что также ограничивает применимость основных дифференциальных зависимостей механики. Очевидно, что с этими особенностями связаны методики прогнозирования модуля сдвига слоистого композита.

При нагружении элементарного объема касательными напряжениями, как показано на рис. 1, а, можно записать, что

$$\tau_{zxi} = \tau, \quad (1)$$

где i – номер слоя КМ.

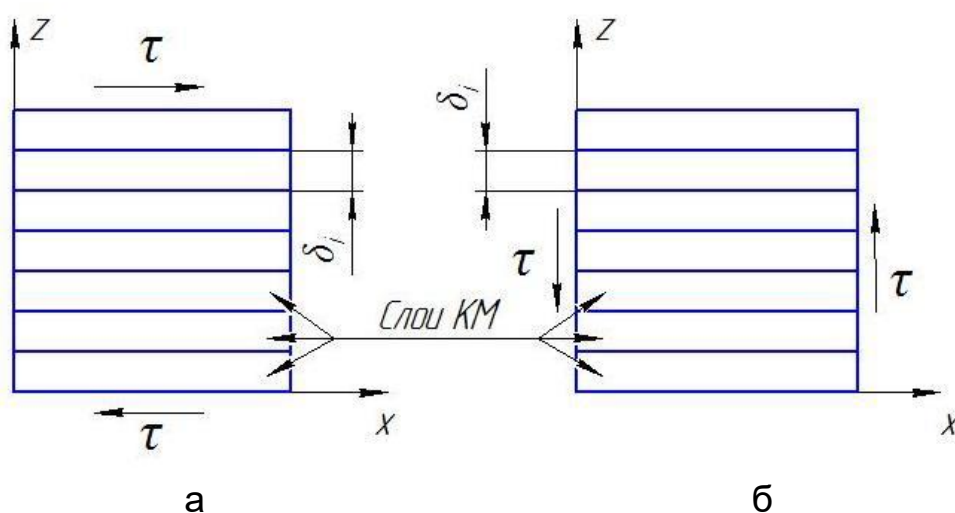


Рисунок 1 – К определению модуля сдвига слоистого КМ

Каждый слой получает сдвиговую деформацию

$$\gamma_{zxi} = \frac{\tau_{zxi}}{G_{zxi}} = \frac{\tau}{G_{zxi}}. \quad (2)$$

Модуль сдвига трактуется как отношение

$$G = \frac{\tau}{\gamma_{cp}}, \quad (3)$$

где γ_{cp} – средняя деформация сдвига пакета слоев, равная

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{xzi} \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} = \frac{\tau}{\delta_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{xzi}}. \quad (4)$$

Отсюда

$$G_{zx} = \frac{\delta_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{xzi}}}. \quad (5)$$

При нагружении по схеме (рис. 1, б) сдвиговые деформации слоев одинаковы и равны

$$\gamma_{xzi} = \frac{\tau_{xzi}}{G_{xzi}} = \gamma, \quad (6)$$

где τ_{xzi} – напряжения в слоях, удовлетворяющие уравнение равновесия

$$\sum_{i=1}^n \tau_{xzi} \delta_i = \tau \delta_{\Sigma}. \quad (7)$$

Подставим в (7) соотношение (6)

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot G_{xzi} \cdot \gamma = \tau \delta_{\Sigma}. \quad (8)$$

Отсюда

$$G_{xz} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{\delta_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \delta_i G_{xzi}. \quad (9)$$

Сравнение результатов (5) и (9) показывает, что модули сдвига совершенно различны и условие равенности $G_{xzi} = G_{zxi}$ не может быть принято, как это было согласно [8]:

$$\frac{1}{G_{xzi}} = \frac{\cos^2 \varphi}{G_{13i}} + \frac{\sin^2 \varphi}{G_{23i}}, \quad (10)$$

где G_{13i}, G_{23i} – модуль сдвига слоя в местной системе координат, связанной с направлением армирования (ось 1 – вдоль волокон (основы ткани), ось 2 – поперек (по утку), ось 3 – в трансверсальном направлении).

В действительности, с учетом такого фундаментального фактора, как парность касательных напряжений, имеют место деформации сдвига

в «двух направлениях» (рис. 2,а). Из условия равновесия этого элемента КМ следует, что

$$\tau_{zx} dx \delta_{\Sigma} = \tau_{xz} \delta_{\Sigma} dx \quad \text{или} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}. \quad (11)$$

Средняя деформация сдвига от касательных напряжений τ_{zx} (см. рис. 2, б) равна

$$\operatorname{tg} \gamma_{zx} = \frac{\Delta_{zx}}{\delta_{\Sigma}} \approx \gamma_{zx}, \quad (12)$$

где

$$\Delta_{zx} = \sum_{i=1}^n \Delta_{zxi} = \sum_{i=1}^n \gamma_{zxi} \delta_i = \tau_{zx} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{zxi}}. \quad (13)$$

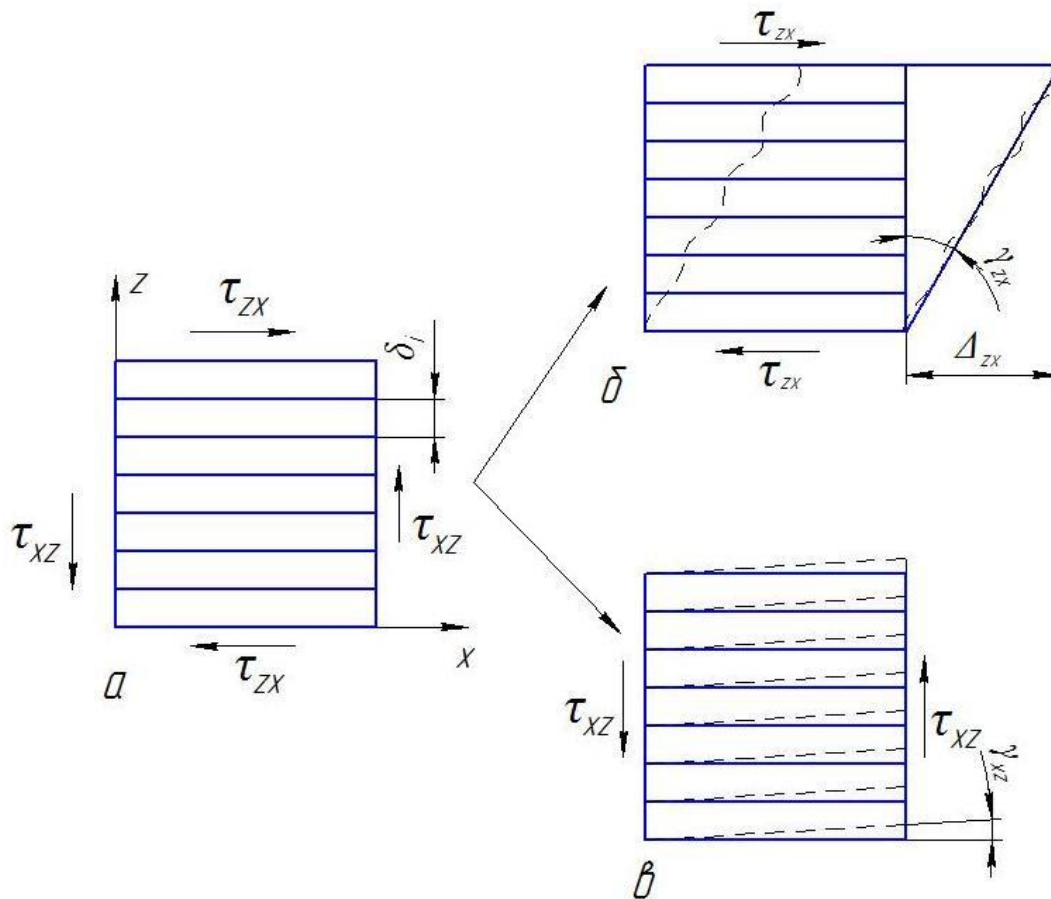


Рисунок 2 – Схема деформирования элемента слоистого композита под действием касательных напряжений

Из формул (11) и (12) получим, что модуль «межслойного» сдвига равен

$$G_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{\gamma_{zx}} = \frac{\delta_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{zxi}}}. \quad (14)$$

Деформация сдвига от касательных напряжений τ_{xz} (см. рис. 2, в) во всех слоях одинакова и равна

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xzi}}{G_{xzi}} = \gamma, \quad (15)$$

где напряжения в слоях τ_{xzi} находим из уравнения равновесия

$$\sum_{i=1}^n \tau_{xzi} \delta_i = \tau_{xz} \delta_{\Sigma} = \gamma_{xz} \sum_{i=1}^n \delta_i G_{xzi}. \quad (16)$$

Тогда модуль трансверсального сдвига равен

$$G_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{xz}} = \frac{1}{\delta_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \delta_i G_{xzi}. \quad (17)$$

Эта формула совпадает с зависимостью, приведенной в [18] и полученной в результате рассмотрения трехмерного деформирования слоистого КМ.

Принимая во внимание, что

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{xz} + \gamma_{zx} = \tau_{xz} \frac{\delta_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \delta_i G_{xzi}} + \frac{\tau_{zx}}{\delta_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{zxi}}, \quad (18)$$

и учитывая условие (10), получим формулу для определения действительного модуля сдвига слоистого композита – «трансверсального» модуля сдвига

$$G_{\Sigma} = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{\Sigma}} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{G_{zxi}} + \frac{\delta_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \delta_i G_{xzi}}} = \frac{1}{\frac{1}{G_{zx}} + \frac{1}{G_{xz}}}. \quad (19)$$

Анализ литературных источников показывает, что зависимости типа (5) и (14) являются следствием принятия гипотезы Кирхгофа – Лява [5, 8], а (9) или (17) получены на основе уравнений равновесия и совместности деформаций элементарного объема слоистого композита. Использование тех или других зависимостей для модуля сдвига необходимо увязать с решаемой задачей механики композитных конструкций. При расчете конструкций, подверженных изгибу от поперечных сил, для которых справедлива гипотеза Кирхгофа – Лява, следует пользоваться формулой (5) (или (14)), а при анализе напряженного состояния объема слоистого композита – формулой (9) (или (17)). Заметим, что по формуле (5) определяется модуль сдвига приведенного соединительного слоя [14, 15] на основе гипотезы Фолькерсена, когда касательные напряжения постоянны по толщине соединительного слоя. В действительности спра-

ведливой является зависимость (19), учитывающая полную деформацию рассматриваемого объема КМ, от равновесной системы парных касательных напряжений.

Из приведенных выше выкладок и анализа следует, что в общем случае слоистые композитные материалы характеризуются тремя модулями сдвига (см. формулы (14), (17) и (19)), каждый из которых справедлив при решении задач механики на базе тех или иных гипотез.

Основным способом экспериментального определения модуля трансверсального (поперечного) сдвига является трехточечный изгиб короткой шарнирно-опертой балки с прямоугольным поперечным сечением [19]. Длина балки выбирается из условия надежного измерения доли прогиба от сдвига, который аналитически вычисляют по формуле

$$W_{\text{сдв.ш.}} = W_{\Sigma} - \frac{P\ell^3}{48EI} = \frac{kP\ell}{4GF}, \quad (20)$$

где W_{Σ} – суммарный прогиб, измеряемый в эксперименте;

P – прикладываемая сила по середине пролета (рис. 3, а);

F – площадь поперечного сечения;

EI – изгибная жесткость балки;

$k = 1,2$ – коэффициент формы поперечного сечения [17].

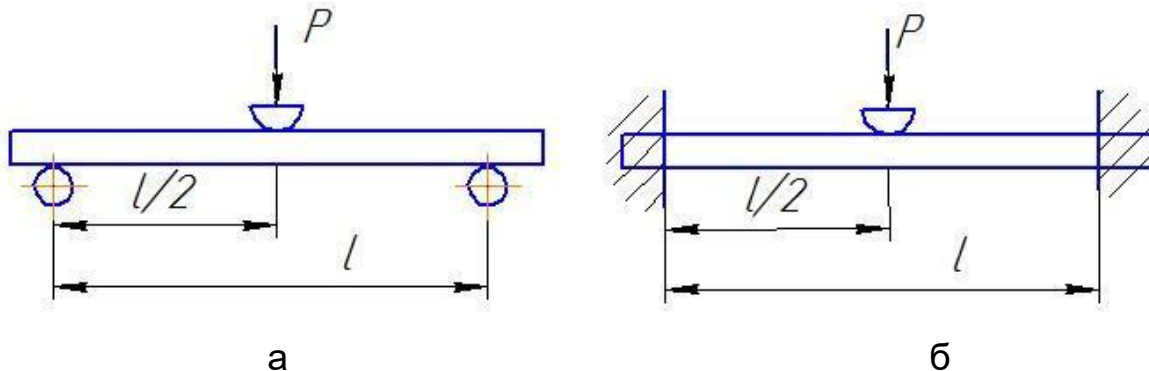


Рисунок 3 – Схемы испытаний образцов композита на трансверсальный сдвиг

Так как балка короткая, то при нагружении поперечной силой имеют место два трудноучитываемых явления:

- смещение положения опоры при изгибе [19];
- смятие материала на опорах и в точке приложения силы [20].

Устранение этих факторов возможно путем испытания защемленной с двух концов короткой балки вместо шарнирно-опертой (рис. 3, б). В таком случае увеличивается также доля «сдвигового» прогиба в измеряемой величине суммарного прогиба, так как

$$W_{\text{сдв.з}} = W_{\Sigma} - \frac{P\ell^3}{192EI} = \frac{kP\ell}{4GF}, \quad (21)$$

что повышает надежность эксперимента.

Модуль трансверсального (поперечного) сдвига вычисляют по следующим формулам:

а) для шарнирно опертой балки (без учета смещения точек опирания и смятия КМ)

$$G = \frac{4F}{kP\ell} \left(W_{\Sigma} - \frac{P\ell^3}{48EI} \right); \quad (22)$$

б) для защемленной с двух концов балки (без учета смятия КМ)

$$G = \frac{4F}{kP\ell} \left(W_{\Sigma} - \frac{P\ell^3}{192EI} \right). \quad (23)$$

Заметим, что при испытании защемленной балки можно использовать более длинные образцы, что также повышает точность и надежность эксперимента за счет снижения влияния эффекта принципа Сен-Венана.

Применение этих способов экспериментального определения модуля трансверсального сдвига слоистых композитов не дает ответа на вопрос: какой же модуль определяется – модуль межслойного сдвига (14), трансверсального сдвига (17) или суммарный (19)?

Рассмотрим испытание короткой балки на двух опорах, нагруженной сосредоточенной силой по середине пролета и для которой протяженность зоны нерегулярного напряженного состояния соизмерима с длиной балки (принцип Сен-Венана не соблюдается на значительной части длины балки). Отсюда следует, что справедливым, вероятно, является утверждение о том, что в этом эксперименте речь может идти о суммарном модуле сдвига (см. формулу (19)), который для неоднородных слоистых композитов (с разными углами армирования слоев) зависит от двух исходных модулей сдвига – G_{13} и G_{23} (см. формулу (10)). Из одного эксперимента их определить невозможно, поэтому для сложно-армированных КМ необходимо испытывать две разные балки – с разными размерами поперечного сечения. Строгость соблюдения принципа Сен-Венана останется неудовлетворительной. Договоренность инженерного сообщества сможет послужить основанием для экспериментального определения модуля трансверсального сдвига (19).

2. Проблема неоднородной (переменной) анизотропии физико-механических свойств слоистых композитов

Практически все детали и агрегаты из слоистых композитов содержат зоны с переменными свойствами, формирующиеся в результате плавного изменения толщины (рис. 4, а), при намотке оболочки с криволинейной образующей (рис. 4, б), в окрестности формируемых отверстий (рис. 4, в) и т.п. В этих зонах изменяются количество слоев и (или) их углы армирования, что приводит к ступенчатому или квазиплавному изменению модулей упругости, коэффициентов Пуассона и линейного тем-

пературного расширения, к появлению коэффициентов взаимного влияния и Ченцова. На криволинейной части оболочки (см. рис. 4, б) изменяются толщина стенки и углы укладки жгутов (нитей), что обуславливает изменяемость свойств вдоль образующей. При формировании отверстий без разрезания волокон (см. рис. 4, в) имеют место искривление и уплотнение, в результате чего изменяются местные углы армирования и объемное содержание волокон и, как следствие, весь комплекс физико-механических свойств.

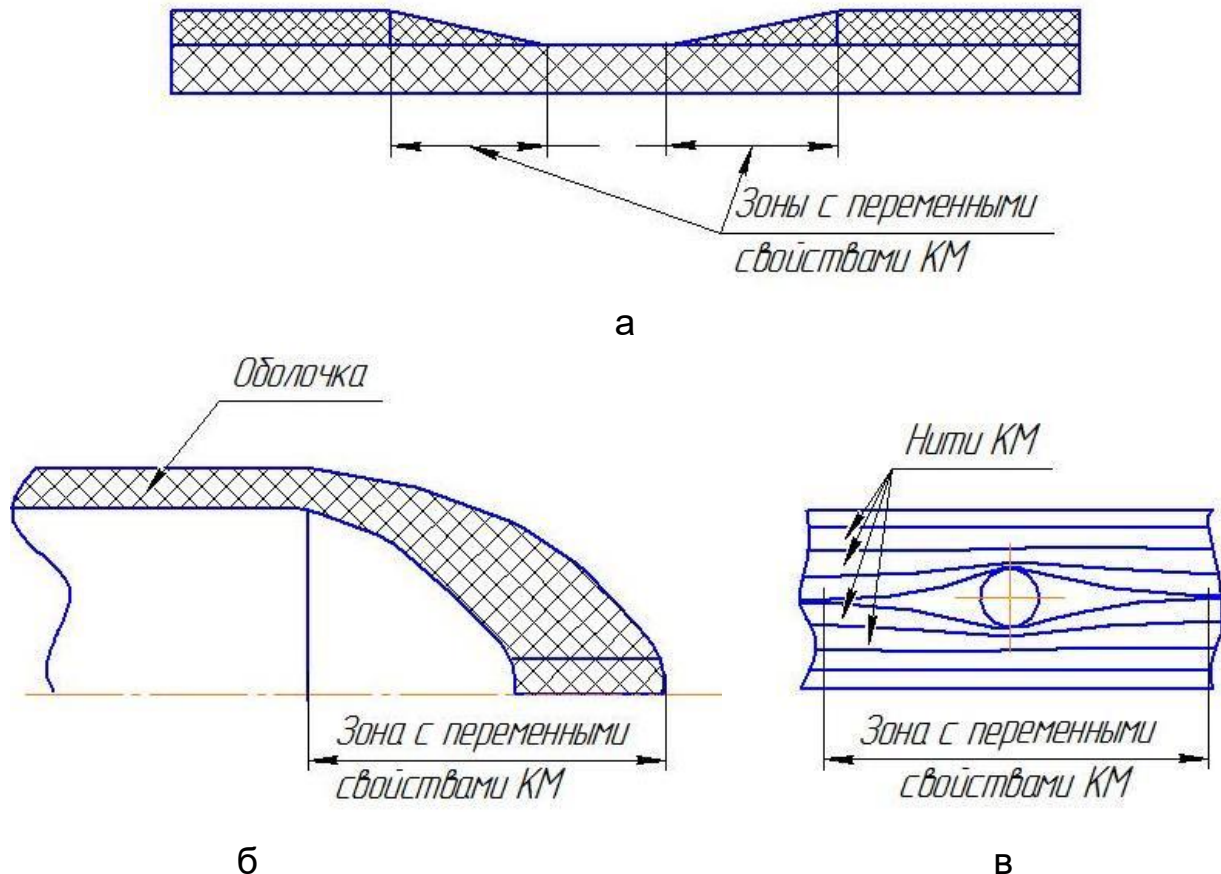


Рисунок 4 – Примеры конструкций с переменными свойствами композитного материала

Переменные (неоднородные) свойства композита накладывают определенные ограничения на форму записи дифференциальных уравнений совместности деформаций через напряжения [16]. Если эти условия записываются через деформации, например,

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y}, \quad (24)$$

то переменность свойств не играет никакой роли, но при переходе к напряжениям с помощью физических соотношений, например для ортотропного КМ,

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \alpha_x \Delta T; \\ \varepsilon_y &= -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} + \alpha_y \Delta T; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}\end{aligned}\quad (25)$$

следует записать условие совместности деформаций как

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y} + \alpha_x \Delta T \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(-\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} + \alpha_y \Delta T \right) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \right), \quad (26)$$

т.е. через дифференцирование и деформативных свойств, а не только напряжений, как это имело бы место в случае однородного материала [16]

Другой аспект проблемы переменной анизотропии свойств композитов состоит в следующем. Использование различных численных методов расчета (методы конечных элементов, конечных разностей и т.п.) связано с необходимостью формирования матрицы жесткости некоторого объема материала. При изменяющихся свойствах по объему возникает задача вычисления осредненных характеристик, для решения которой не предложено однозначных методов. В работе [18] осреднение свойств проводится на основе постоянства деформаций (и, как следствие, переменности напряжений) или на основе постоянства напряжений с последующим осреднением деформаций (рис. 5). Результаты расчетов по этим двум схемам существенно отличаются. Например, для модулей упругости в [18] получены следующие формулы:

$$E_{xy} = \frac{\sigma_{cp}}{\varepsilon} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \int_0^{\Delta y} \frac{dy}{\int_0^{\Delta x} \frac{dx}{E_x}}; \quad E_{xH} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{cp}} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \left[\int_0^{\Delta x} \frac{dx}{\int_0^{\Delta y} E_x dy} \right]^{-1}. \quad (27)$$

Здесь пределами интегрирования служат координаты начала и конца элемента по осям x и y , а E_x – это модуль упругости пакета слоев «в точке», для определения которого, а также всех других свойств слоистого композита в работе [18] выведены все необходимые формулы.

Несмотря на наличие зависимостей типа (27), необходимы рекомендации о их применимости (в [18] отсутствуют), а постановка корректного эксперимента трудно реализуема.

Методика осреднения переменных свойств композита необходима также для обработки данных тензометрирования, ведь тензорезисторы или экстензометр откликается на величину средней деформации по его длине.

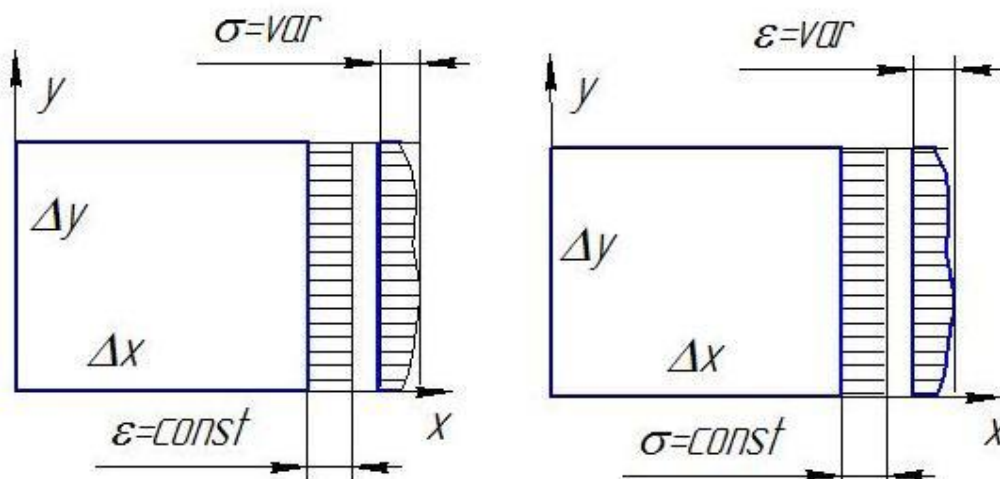


Рисунок 5 – К способам решения задачи осреднения свойств неоднородного слоистого композитного материала

3. Проблема разномодульности композитных материалов

Известно, что большинство полимерных композитных материалов имеют различные модули упругости на растяжение и сжатие, особенно поперек волокон и при повышенных температурах [21]. Например, углепластик на эпоксидном связующем характеризуется следующими данными, представленными в таблице [21], где индексы 1, 2 соответствуют свойствам вдоль и поперек волокон, а индексы «Р» и «С» относятся к растяжению и сжатию соответственно.

Таблица – Модули упругости эпоксидного углепластика

Характеристика, ГПа	Температура, °С			
	-55	22	127	177
E_{1p}	146	143	140	137
E_{1c}	151	140	136	135
E_{2p}	9,8	9,1	7,7	7,4
E_{2c}	13,0	12,1	10,5	11,0

Первые результаты систематического исследования этой проблемы проанализированы и описаны в работе [22], но впоследствии упоминание об этой особенности КМ встречается крайне редко, что может объясняться или несущественностью этого фактора или трудностью анализа напряженно-деформированного состояния материалов с разными модулями упругости на растяжение и сжатие. Очевидно, что аспект разномодульности наиболее существен для деталей, подверженных изгибу, а также для пакета с разной ориентацией слоев в условиях сложного нагружения, когда заранее неизвестно, какой слой растягива-

ется, а какой сжимается. В качестве примера для оценки влияния разномодульности рассмотрим балку прямоугольного поперечного сечения единичной ширины (рис. 6). Из уравнений равновесия сечения следуют такие зависимости для расчета деформаций $\varepsilon_{\text{в}}$ и $\varepsilon_{\text{н}}$ и напряжений $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{н}}$:

$$\varepsilon_{\text{в}} = \frac{3M}{H^2 E_{\text{в}}} \left(\sqrt{\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}} + 1 \right); \quad \varepsilon_{\text{н}} = \frac{3M}{H^2 E_{\text{н}}} \left(\sqrt{\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}}} + 1 \right); \quad (28)$$

$$\sigma_{\text{в}} = E_{\text{в}} \varepsilon_{\text{в}}; \quad \sigma_{\text{н}} = E_{\text{н}} \varepsilon_{\text{н}},$$

где $E_{\text{в}}$, $E_{\text{н}}$ – модули упругости соответственно верхней и нижней частей сечения балки.

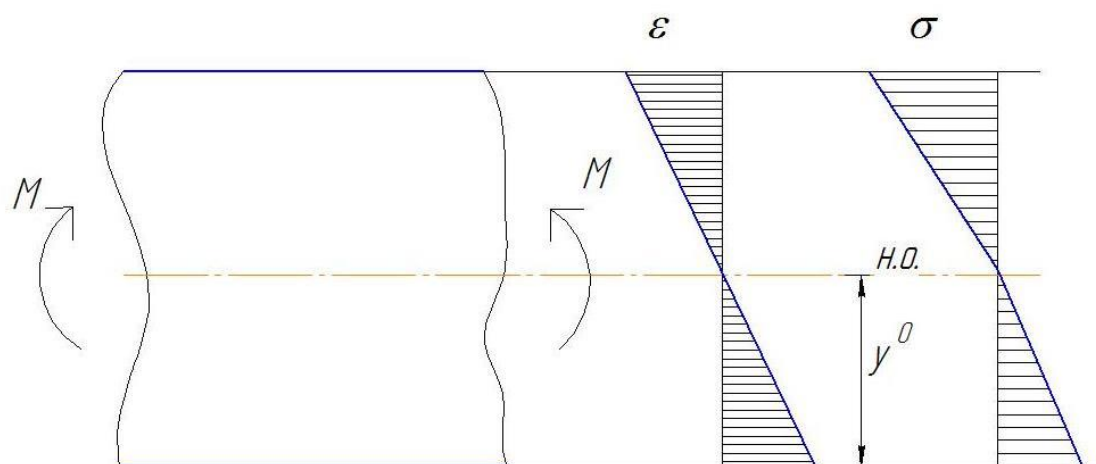


Рисунок 6 – К расчету балки из разномодульного композита

Погонная изгибная жесткость, используемая для расчета прогиба, определяется формулой

$$(EI) = \frac{H^3 E_{\text{в}}}{3 \left(1 + \sqrt{\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}} \right)^2}, \quad (29)$$

которая при $E_{\text{в}} = E_{\text{н}}$ преобразуется к известному виду [17].

Численный сравнительный анализ показывает, что при $E_{\text{в}}/E_{\text{н}} \approx 1,2$ максимальные напряжения, вычисленные с учетом и без учета разномодульности, отличаются на ~5 %, что позволяет в инженерных расчетах пренебречь этим фактором. Изгибная жесткость будет отличаться на ~10 %, что соответствует изменению прогиба на ~11 %.

Разномодульность существенно влияет на изгибную жесткость пластин с продольно-поперечным армированием. Если принято решение об учете разномодульности, то основные сложности возникают при

расчете упругих констант сложно-армированных композитов и при определении напряжений в слоях. Кроме того, в доступной литературе отсутствуют данные о том, какими модулями сдвига и какими коэффициентами Пуассона и линейного температурного расширения следует пользоваться в таких расчетах.

Особую обеспокоенность вызывает значительное отличие образцов для испытания на растяжение и сжатие [19], потому что экспериментальные данные должны максимально соответствовать условиям работы композита в конструкции. В целях обеспечения равных условий деформирования на сжатие и растяжение целесообразно испытывать балки с заполнителем и несущими слоями из исследуемого композита (рис. 7). Равномерно распределенная нагрузка обеспечивает надежный контакт несущих слоев с заполнителем. Измерив деформации слоев из системы уравнений (28), определяют искомые модули упругости.

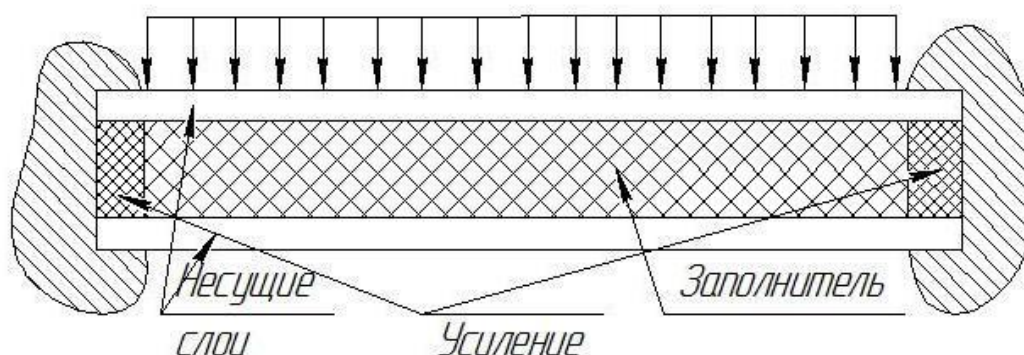


Рисунок 7 – Образец для испытания разномодульных КМ

Управляя толщиной несущих слоев, можно добиться гарантированного разрушения одного из них, что позволяет экспериментально определять пределы прочности на растяжение и сжатие. Тип заполнителя и толщина несущих слоев подбираются так, чтобы не происходила местная потеря устойчивости испытываемого материала.

4. Проблема экспериментального определения упругих, прочностных и термомеханических характеристик слоистых композитов

Экспериментальные исследования свойств материалов призвано обеспечить проектировщиков достоверной и максимально полной информацией о характеристиках, используемых для формирования облика изделия, определения его параметров и прогнозирования его несущей способности.

Применительно к слоистым композитным материалам при выборе способа испытания необходимо принять во внимание следующие факторы:

а) максимально возможное соответствие условий и характера нагружения детали (или зоны конструкций) и образца материала в испы-

тательном устройстве, на что обращалось внимание выше. Например, при проектировании и расчете на прочность панелей крыла самолета без учета кромочных эффектов используются данные о пределах прочности на растяжение, сжатие и сдвиг, полученные в результате испытаний совершенно разных образцов [19]. К тому же протяженность кромочного эффекта в стандартных образцах сложноармированных композитов соизмерима с их шириной, что существенно влияет на напряженно-деформированное состояние слоев и, как следствие, на прочностные свойства исследуемой структуры. (Конкретные данные о зоне кромочного эффекта описаны во второй части данной статьи). Целесообразно было бы определение характеристик композитов, в т.ч. сложноармированных, на трубчатых образцах, которые согласно [19] используются для исследования работоспособности в условиях сложного напряженного состояния. Длину, диаметр и толщину стенки трубчатых образцов можно подобрать так, чтобы, с одной стороны, не происходила местная потеря устойчивости при сжатии и сдвиге (кручении), а с другой – размеры образцов на растяжение, сжатие и сдвиг были бы одинаковыми. Кроме того, на трубчатых образцах можно реализовать сложное напряженное состояние, например растяжение (сжатие) со сдвигом. В силу замкнутости контура отсутствуют кромочные эффекты.

В разделе учебника [14], посвященном проектированию стержней, содержатся необходимые зависимости для определения геометрических параметров трубчатых образцов и приведены приближенные формулы для прогнозирования зоны краевого эффекта около усиления законцовок. Эти формулы и расчетные зависимости синтезированы на основе методик, изложенных в [8].

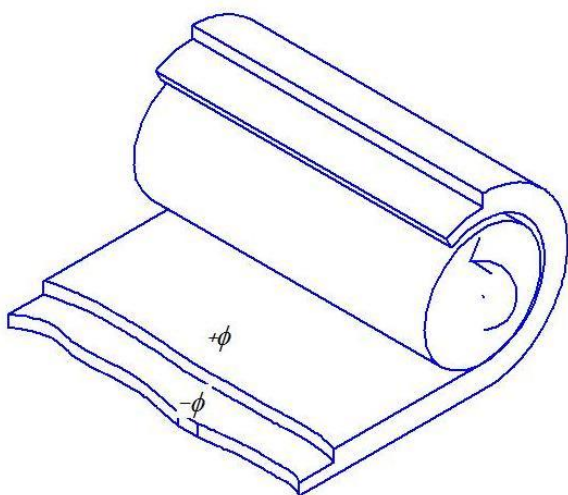


Рисунок 8 – Сема изготовления трубчатых образцов из слоев препрега

Трубчатые образцы можно изготовить или намоткой жгутами или обертыванием оправки слоями препрега (рис. 8), что обеспечивает максимальную адекватность материалов образца и проектируемой конструкции. Давление формования реализуется или применением термоусаживающихся трубок, или обмоткой с натягом жертвенных слоев из подходящего материала или по традиционному вакуум-автоклавному методу формования. Захват образца

диционному вакуум-автоклавному методу формования. Захват образца

в испытательной машине осуществляется цанговым зажимом изнутри, снаружи или с двух сторон;

б) наличие значительного масштабного фактора при испытаниях слоистых композитов, одной из причин возникновения которого является кромочное напряженно-деформированное состояние, связанное с разностью коэффициентов Пуассона и линейного температурного расширения. В связи с этим проблематично использовать результаты испытаний образцов с толщиной, например, 2 мм [19] для расчета на прочность обшивки толщиной 1 или 3 мм;

в) физико-механические характеристики слоистых композитных материалов рассчитываются по свойствам монослоев, которые получены испытанием многослойных однородноармированных образцов. Нет никаких гарантий и никаких опытных данных о том, что, например, модули упругости слоя в пакете такие же, как и определенные на стандартных образцах нормативной толщины из однонаправленного композита. В слоистых композитах, формируемых под давлением, неизбежно взаимодействие разноориентированных слоев, приводящее к нарушению прямолинейности нитей. В целях повышения достоверности и надежности расчетов необходима постановка масштабных экспериментов по установлению количественного соответствия между свойствами слоев и пакета в изолированном виде. Особенно это важно для прочностных свойств, которые на этапе проектирования принимаются для однонаправленных материалов, а на этапе поверочного расчета на прочность – для пакета спроектированной структуры [23];

г) экспериментальное определение физико-механических характеристик композитов сопровождается установлением не только абсолютных величин тех или иных свойств, но и степени их разброса (коэффициента вариации, доверительного интервала и т.п.). Совершенно очевидно, что перенос значений коэффициента вариации свойств на другие толщины неправомерен, тем более на слои сложноармированных композитов. В этом вопросе необходима методика расчета коэффициентов вариации свойств пакета слоев по данным стандартных испытаний и ее полноценная экспериментальная проверка, что позволит повысить достоверность расчетов на прочность, надежность и долговечность;

д) в сложноармированных композитах всегда присутствует самоуравновешенное температурное напряженное состояние, которое отсутствует в однонаправленных материалах. Релаксация этих напряжений, появление макротрещин из-за них и другие аспекты влияют на несущую способность конструкции. Для объективного учета всех последствий внутреннего температурного напряженно-деформированного состояния необходима разработка образцов, способов испытания и методик обработки результатов в целях косвенной оценки температурных напряжений (прямое измерение невозможно). На этих же образцах можно было бы оценить внутреннее напряженное состояние, связанное с коэффициен-

тами Пуассона и взаимного влияния 1-го и 2-го рода, появляющееся в направлениях, не совпадающих с направлением нагружения образцов;

е) необходимость использования таких образцов и способов испытания, которые позволяли бы прямое определение искомых свойств, а не косвенное, особенно через математические модели. Например, модуль межслойного сдвига, определяемого на основе испытания коротких балок, вычисляется на базе классической модели балки, а для слоистых композитов даже одноплоскостной закон распределения деформаций по сечению не соблюдается [24]. При косвенном определении какой-либо характеристики исключительно важно, чтобы во всех фирмах и странах это делалось одинаково, иначе становится невозможным сопоставление результатов проектирования и расчета на прочность.

5. Проблема нелинейности диаграммы «напряжение - деформация» для слоистых композитов

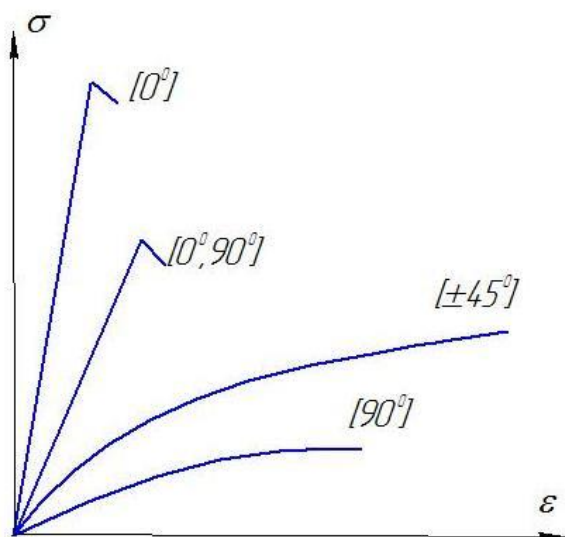


Рисунок 9 – График зависимости напряжений от деформации некоторых композитов

Известно, что композиты с углами армирования $[\pm 45^\circ]$, $[90^\circ]$ и некоторыми другими характеризуются нелинейной диаграммой $\sigma - \varepsilon$ [21] (рис. 9), т.е. они обладают физической нелинейностью. Этот фактор имеет принципиальное значение для следующего:

а) так как большинство стандартов экспериментального определения свойств композитов рекомендуют оперировать начальным модулем упругости (при $\varepsilon \rightarrow 0$) [19], то возникает проблема корректности вычисления упругих констант сложноармированных

композитов по классической методике, например как в [8], которая в этом случае справедлива для $\varepsilon \rightarrow 0$, а для других деформаций необходимо реализовать итерационный расчет с кусочно-линейной аппроксимацией диаграмм $\sigma - \varepsilon$;

б) физико-механические свойства однонаправленных композитов определяются экспериментально для направлений вдоль волокон (или по основе), поперек волокон (или по утку) и на сдвиг. Эти характеристики являются нормативными и используются для расчета других схем арми-

рования. В этой связи возникает трудность определения коэффициентов Пуассона, которые теоретически удовлетворяют равенству

$$E_1\mu_{21} = E_2\mu_{12} \quad (30)$$

и если E_2 (для угла 90° , поперек волокон) имеет переменный характер (см. рис. 9), а E_1 – постоянный, то о каких коэффициентах Пуассона идет речь при расчете реальной конструкции?

Аналогичный вопрос возникает для модуля сдвига G_{12} , который для однонаправленного композита связан с другими характеристиками соотношением [6]

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}(1 + \mu_{12}); \quad (31)$$

в) напряжения в конструкции рассчитываются, как правило, для линейного деформированного материала, т.е. по нормативным модулям упругости (при $\varepsilon \rightarrow 0$). Действительные напряжения в рассматриваемом нелинейном слое будут меньше теоретических (расчетных), но тогда из уравнения равновесия следует, что в других слоях они должны возрасти. Например, для структуры $[0, 90]$ напряжения в слоях связаны соотношением

$$\sigma_1 = \sigma_x \left(1 + \frac{\delta_2}{\delta_1} \right) - \sigma_2 \frac{\delta_2}{\delta_1}, \quad (32)$$

где δ_1, δ_2 – толщина слоев 0° и 90° соответственно;

σ_x – действующие напряжения, направленные вдоль волокон слоя с армированием $[0^\circ]$.

При двукратной «ошибке» в расчете σ_2 , т.е. когда действительные напряжения σ_2 в два раза меньше расчетных, новое значение σ_1 определяется формулой

$$\sigma_1^* = \sigma_1 \left(1 + \frac{\delta_2}{\delta_1} \right) - 0,5\sigma_2 \frac{\delta_2}{\delta_1}. \quad (33)$$

Таким образом, если для одних слоев это хорошо, то для других – плохо.

г) нелинейный характер деформирования некоторых композитов сказывается на прогнозировании характера разрушения слоев и последовательности этого процесса. Также известно, что для композитов со структурой $[0^\circ, 90^\circ]$ приводится линейная диаграмма $\sigma - \varepsilon$. Это, вероятно, связано с тем, что слой $[90^\circ]$ растрескивается между волокнами на начальных стадиях деформирования. Отсюда следует важная практическая рекомендация о целесообразности формирования необходимой структуры композита из тканых армирующих материалов. Кроме того, вероятно имеет смысл принять в расчетах, что модуль упругости и пре-

дел прочности поперек волокон для однонаправленных КМ равны нулю. Но тогда остается открытым вопрос о коэффициентах Пуассона (см. формулу (30)).

Указанные выше обстоятельства свидетельствуют о том, что практическое и теоретическое значение имеет разработка унифицированной методики и соответствующего стандарта построения диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для материалов с ее нелинейным характером.

Список использованных источников

1. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С.Г. Лехницкий – М.: Наука, 1977. – 416 с.
2. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластики [Текст] / С.Г. Лехницкий – М.: Гос. изд-во техн. лит., 1957. – 463 с.
3. Амбарцумян, С.А. Теория анизотропных пластин [Текст] / С.А. амбарцумян – М.: Наука. 1967. – 266 с.
4. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек [Текст] / С.А. Амбарцумян – М.: Наука, 1974. – 466 с.
5. Болотин, В.В., Новичков, Ю.Н. Механика многослойных конструкций [Текст] / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
6. Ашкенази, Е.К., Ганов, Э.В. Анизотропия конструкционных материалов [Текст] / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов – Л.: Машиностроение. 1972. – 216 с.
7. Ван Фо Фы, Г.А. Теория армированных материалов [Текст] / Г.А. Ван Фо Фы – Киев: Наук. думка, 1971. – 232 с.
8. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
9. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов [Текст] / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
10. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров [Текст] / А.Л. Рабинович – М.: Наука, 1970. – 482 с.
11. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю.Н. Работнов – М.: Наука, 1978. – 744 с.
12. Жигун, И.Г., Поляков, В.А. Свойства пространственно армированных пластиков [Текст] / И.Г. Жигунов, В.А. Поляков – Рига: Занатне, 1978. – 215 с.
13. Композиционные материалы: в 8 т. [Текст] / под общ. ред. Л. Браутмана, Р. Крока // Механика композиционных материалов. – М.: Мир, 1978. – Т.2. – 566 с.
14. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т». 2010, – 768 с.

15. Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композитных материалов: монография [Текст] / Я.С. Карпов – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.
16. Тимошенко, С.П., Гудьер, Дж. Теория упругости: пер. с англ [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер – М.: Наука, 1975. – 576 с.
17. Сопротивление материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка и др; под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища шк., 1986. – 775 с.
18. Физико-механические и структурные характеристики слоистых композиционных материалов, армированных трансверсальными стержнями: учеб. пособие [Текст] / Я.С. Карпов, Д.С. Кива, В.В. Канарев и др. Харьков: Харьков. авиац. ин-т, 1997. – 69 с.
19. Тарнопольский, Ю.М., Кинцис, Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков [Текст] / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис – М: Химия. 1981. – 272 с.
20. Микеев, П.В., Муранов, А.Н., Гусев, С.А. Экспериментальное определение модуля межслойного сдвига углепластика / Конструкции из композиционных материалов. – 2015, № 4. С. 46–50. [Электронный ресурс] – <http://niigrafit.ru/news/BU4.2016.pdf>
21. Гайдачук, В.Е., Карпов, Я.С. Основы конструкторской подготовки производства агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов: учеб. пособие [Текст] / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов – Харьков.: Харьков. авиац. ин-т, 1988. – 67 с.
22. Амбарцумян, С.А. Разномодульная теория упругости [Текст] / С.А. Амбарцумян – М.: Наука, 1982. – 320 с.
23. Андреев, А.А. Анализ некоторых фундаментальных проблем создания конструкций из композитных материалов и возможных путей их решения [Текст] / А.А. Андреев, Я.С. Карпов, И.М. Тараненко, М.А. Шевцова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2016. Вып. 4(88). – С. 37–49.
24. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластины [Текст] / А.Р. Ржаницын – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.

Поступила в редакцию 08.11.2017.

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