

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЫ

Еремин Н.В.

Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал г. Красноярск
Институт вычислительного моделирования СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

Введение

В настоящее время слоистые полимерные композиционные материалы являются наиболее востребованными и перспективными материалами в космической, судостроительной и авиационной промышленности. Композиционные материалы имеют высокую прочность, повышенную жесткость и малый удельный вес, что повышает срок службы изделий [1-2]. Возможности композиционных материалов обширны благодаря структуре материала, которая может быть сформирована для конкретной задачи и обеспечить необходимыми механическими свойствами. Волокна в составе композиционного материала обладают более высокими физико-механическими свойствами по сравнению с другими компонентами. Когда происходит разрушение матрицы в композиционном материале, напряжения перераспределяются на соседние волокна [3]. Чем выше содержание волокон в матрице и плотность их упаковки, тем более высоким будет модуль упругости и прочность материала. Следовательно, существенную роль в составе полимерных композиционных материалов играет процентное содержание волокон.

Исследования микроструктуры слоистых полимерных композиционных материалов проводились с помощью электронно-сканирующей микроскопии (ЭСМ) [4-6]. Целью данной работы являлась оценка процентного содержания углеродных волокон в матрице, разработка численной модели композиционной ленты и определения модуля упругости слоистого полимерного композиционного материала.

Объект исследования

Объектом исследования являлась микроструктура композитной оболочки, формируемая в процессе производства металлокомпозитного бака высокого давления (МКБВД). Бак предназначен для хранения ксенона в космических аппаратах [7]. МКБВД состоит из титанового лайнера и 9-слойной композиционной оболочки (рис. 1).

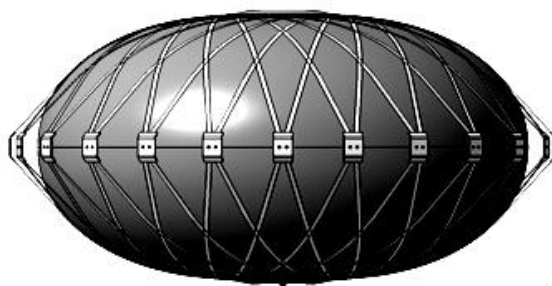


Рис. 1. Металлокомпозитный бак высокого давления

Композиционный материал, состоит из совокупности разно ориентированных композиционных лент на основе углеродных волокон T1000 и эпоксидного связующего

ЭД-И. В процессе намотки композиционные ленты укладываются на нижележащие слои под различными углами армирования (рис 2.).

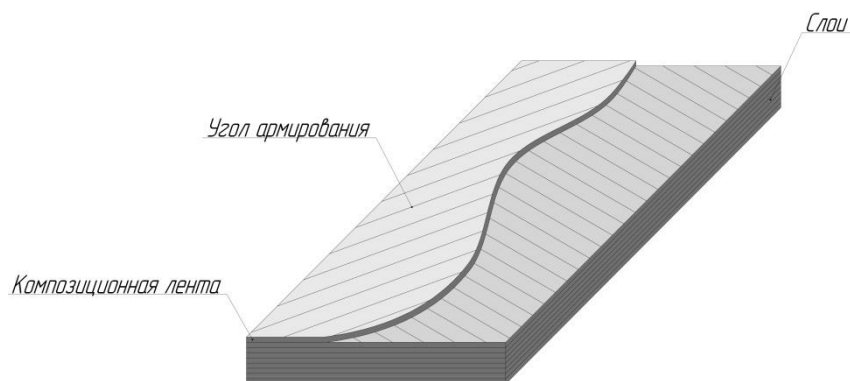


Рис. 2. Схема однонаправленного 9-слойного композиционного материала

В связи с технологической особенностью намотки композиционной ленты на лейнер, оболочка имеет переменную толщину. По мере приближения к полюсному отверстию композиционная лента все больше перекрывает нижележащие слои, образуя композитную оболочку переменной толщины, что приводит к неоднородности механических свойств, а также возникновению дополнительных изгибных усилий [8]. Вследствие данной особенности, возникает необходимость исследования микроструктуры композиционного материала в области фланца.

Для исследования микроструктуры композиционного материала на ЭСМ было изготовлено 4 шлифа, которые были вырезаны из разных зон 9-слойной композитной оболочки МКБВД.

Результаты и их обсуждение

Определение объемного содержания волокон в композитной ленте

В ходе исследований были получены изображения микроструктуры композиционной ленты МКБВД с характерным высоким уровнем контраста между волокном и матрицей. По случайно выбранным зонам была произведена оценка среднего процентного содержания волокон в матрице. В процессе исследования применялось увеличение, при котором в поле зрения попадает от 30 до 100 волокон, согласно работе [9].

Микроструктура композиционной ленты при 2000 кратном увеличении представлена на рис. 3, а. Изображение было обработано с помощью программы *ImageJ* и представлено на рис. 3, б.

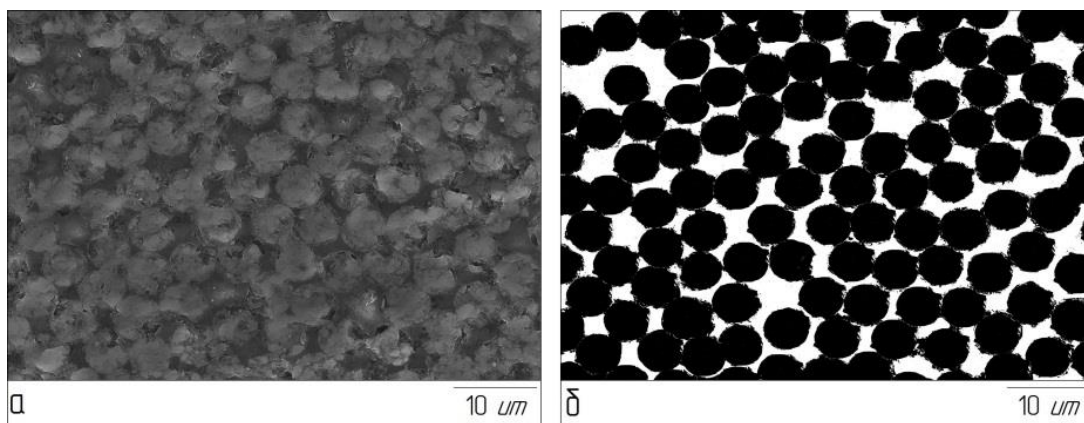


Рис. 3. Микроструктура композиционного материала при 2000 кратном увеличении до (а) и после (б) компьютерной обработки

В ходе исследования были получены средние значения процентного содержания углеродных волокон в композиционной ленте для каждого образца, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Процентное содержание углеродных волокон в композиционной ленте

Образец	Среднее значение содержания волокна, %	Коэффициент вариации, %
Композиционная лента с экватора	75,31	5,6
Композиционная лента вблизи фланца	73,46	13,1

Процентное содержание углеродных волокон в композитной ленте на экваторе и вблизи фланца соответствует оптимальным значениям по данным работы [3], которые находятся в диапазоне 65...83%.

Численный расчет композиционной ленты и определение модуля упругости

При численном расчете рассматривалась конечно-элементная модель композиционной ленты в соответствии с полученными экспериментальными данными. Была разработана трехмерная модель композиционной ленты при 75% и 73% содержании углеродных волокон. Длина композиционной ленты составила 130 мкм, толщина 50 мкм. Диаметр углеродных волокон 5,4 мкм. В модель закладывались характеристики механических свойств, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики механических свойств материалов

Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Углеродное волокно	290	0,28
Эпоксидная смола	3	0,32
Материал повышенной жесткости	1000	0,4

Расчетная схема композиционной ленты представлена на рисунке 4. Нагрузка прикладывалась вдоль оси z с усилием в 6 Н.

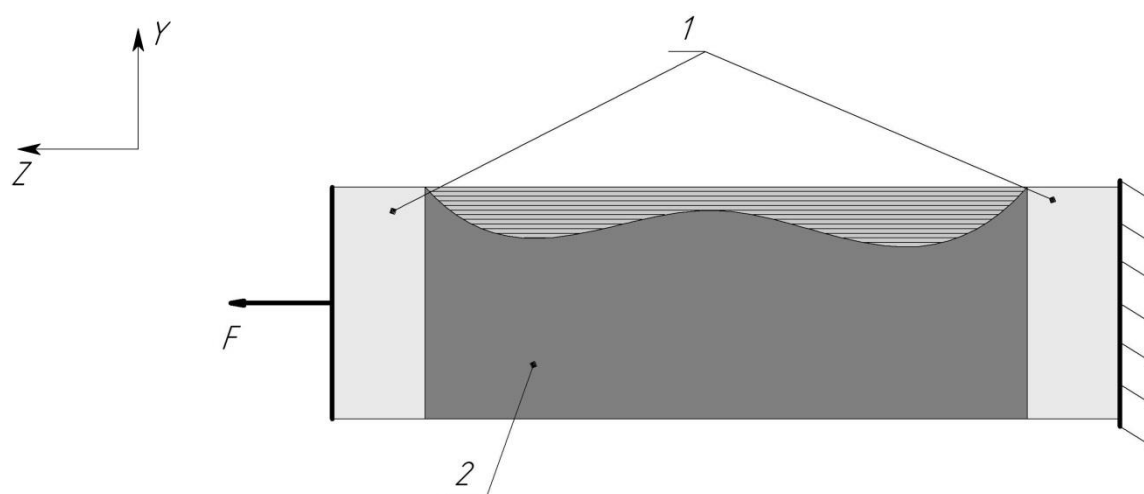


Рис. 4. Расчетная схема композиционной ленты:
1 – блоки повышенной жесткости; 2 – композиционная лента

В результате вычислительных экспериментов наблюдалась линейность между усилием и перемещением, после чего был определен модуль упругости композиционной ленты для каждого образца. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения модулей упругости композиционной ленты

Зона композиционной ленты	Модуль упругости, ГПа
Экватор	193000
Вблизи фланца	189870

Для определения модуля упругости композиционного материала МКБВД на экваторе и вблизи фланца использовался модуль *ANSYS Composite PrepPost*. В программу закладывались 18 композиционных лент (9-слойный композиционный материал) под различными углами армирования. Для композиционного материала на экваторе угол армирования составляет 10° , а вблизи фланца 45° . Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения расчетных модулей упругости 9-слойного композиционного материала

Зона композиционного материала	Модуль упругости, ГПа
Экватор	176015
Вблизи фланца	16212

Полученные значения расчетных модулей упругости композиционного материала МКБВД отличаются от экспериментальных данных представленных в работе [10] на 33%. Обусловлено это тем, что при модельных расчетах не учитываются: поры, дефекты волокон, особенности намотки композиционной ленты на лайнер, а также несовершенство связи между волокнами и матрицей.

Заключение

Исследование микроструктуры композиционного материала показало, что процентное содержание углеродных волокон в композиционной ленте МКБВД соответствует оптимальным значениям.

Разработана трехмерная конечно-элементная модель композиционной ленты для определения модуля упругости. С помощью расчетно-экспериментальных данных определен модуль упругости слоистого композиционного материала в зоне экватора и вблизи фланца, разница между ними составляет 90%.

Литература

1. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М. : Машиностроение, 1990. 512 с.
2. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М. : Химия, 1981. 232 с.
3. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб пособие. СПб. : Профессия, 2008. 560 с.
4. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. М. : Химия, 1971. 334 с.
5. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродных волокон // Композиты и наноструктуры. 2011. № 3. С. 36-50.

6. Механика разрушения. Разрушение материалов: Пер. с англ. / В.Б. Литвинов, Л.П. Кобец, М.С. Токсанбаев и др.; Под ред. Р.В. Гольдштейна. М. : Мир, 1979. 240 с.
7. Moskvichev E. Numerical modeling of stress-strain behavior of composite overwrapped pressure vessel // Procedia Structural Integrity, 2016. V. 2. P. 2512-2518.
8. Еремин Н.В., Москвичев Е.В. Верификация соотношений для расчета толщины композитной оболочки металл-композитного бака высокого давления // Конструкции из композиционных материалов. 2017. № 3. С. 3-7.
9. Composite material handbook. V. 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. 2002. 586 p
10. Москвичев Е.В., Еремин Н.В. Оценка механических свойств и толщины композитной оболочки металлокомпозитного бака высокого давления // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 12. С. 40-45.

УДК 531.620.17

ВЛИЯНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95

Ермишкин В.А., Соловьева Ю.Б., Минина Н.А., Кулагин С.П., Томенко А.К.
Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, г. Москва

Хорошо известно, что конструкции из тонколистовых материалов типа оболочек, обшивки каркасных сооружений и пластин, как правило, под нагрузкой работают в условиях изгиба [1, 2]. При этом наибольшую опасность для развития разрушения представляет растянутая поверхность листа, на которой достигаются максимальные напряжения [3]. При исчерпании деформационной способности материала в областях действия максимальных растягивающих напряжений появляются микротрещины. Кинетика развития поверхностных трещин значительно опережает, развитие объемных трещин, а они согласно [4] существенно опаснее для живучести конструкций, так как эффективная длина поверхностной трещины вдвое превышает таковую у объемной трещины при равенстве их фактических длин. В связи с этим актуальным направлением конструкционной прочности является повышение прочности поверхностных слоев материалов оболочек, подвергаемых действию растягивающих напряжений. Нанесение на поверхность покрытий, в которых в результате термообработки в их поверхностных слоях образуются дисперсные частицы химических соединений из элементов, входящих в состав покрытия и сплава оболочки. Современные методы расчетов на прочность металлоконструкций позволяют выявить наиболее нагруженные локальные области, которые можно упрочнить с помощью нанесения покрытий с последующей термообработкой. Локальное легирование через нанесение покрытий может оказаться действенным средством повышения эксплуатационных качеств инженерных сооружений конструктивно оформленных в виде оболочек. В настоящей работе экспериментальная проверка возможности создания технологии локального упрочнения материалов с помощью тонких покрытий осуществлена на малогабаритных образцах из листов сплава В95 толщиной 5 мм в холоднокатаном состоянии, на одну из поверхностей которых наносилось покрытие из меди. При последующем старении в приповерхностных слоях образцов образуются мелкодисперсные выделения в виде зон Гинье-Престона. Наиболее просто оценить возможности снижения повреждаемости материалов с помощью