

УДК 678.027

МНОГОУРОВНЕВАЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОРОТКОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2017 В.А. Комаров, Е.И. Куркин, М.О. Спирина, В.О. Чертыковцева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 20.12.2017

Разработана многуровневая расчетно-экспериментальная система для анализа прочности и жесткости элементов конструкций из короткоармированных композитов, объединяющая модели ориентации армирующих волокон, механических характеристик анизотропного материала, конечно-элементную модель изделия. Экспериментальное подтверждение системы представлено на основе исследования жесткости и прочности образцов проушин из короткоармированного композиционного материала РЕЕК 90НМF20 двух типоразмеров, вырезанных из пластины вдоль и поперек направления литья. В системе Moldex3D построена модель литья, предсказывающая ориентацию армирующих волокон. Верификация модели литья проведена с помощью экспериментальной оценки структуры материала на электронном микроскопе TESCAN VEGA. Механическая модель анизотропного материала построена в системе Digimat методом реверс-инжиниринга на основе результатов обработки экспериментов по изучению характеристик плоских образцов, вырезанных из пластины под углами 0°, 45° и 90° к направлению литья. Конечно-элементная модель проушин, учитывающая анизотропию материала в каждой ячейке, создана в системе ANSYS Workbench с подключением модуля Digimat CAE. Показано, что критерий Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D), с использованием постановки первого разрушенного псевдо-зерна FPGF позволяет достоверно предсказывать несущую способность конструкций, изготавливаемых литьем из короткоармированных материалов. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60093 мол а дк. Ключевые слова: композиционный материал, проушина, короткие волокна, напряженно-деформированное состояние

> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60093 мол а дк.

1. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение перспективных композиционных материалов позволяет повысить весовую эффективность конструкций [1]. Актуальность использования короткоармированных композиционных материалов обусловлена тем, что слоистые композиты не могут быть использованы в узлах навески, подверженным сложным пространственным нагружениям вследствие низкой прочности при их расслоении. Термопластичные композиционные материалы, армированные короткими высокопрочными волокнами, обладают высокими удельными характеристиками (прочность, жесткость), технологичностью, стойкостью к воздействию агрессивных сред, высокой ударной вязкостью. Однако, высокая зависимость характеристик материала от параметров литья изделий повышает требования к используемым при проектировании моделям и контролю постоянства разработанной технологии производства [2]. Исследование механических характеристик короткоармированных композитов проведено на основе полиэфирэфиркетона, армированного короткими угольными волокнами с содержанием 20% (PEEK 90HMF20) [3].

Используемый материал хорошо зарекомендовал себя в авиационной и космической промышленности [4, 5] ввиду своих высоких механических характеристик, а также весовой эффективности. Жесткость и прочность короткоармированного материала зависит от ориен-

Комаров Валерий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов.

E-mail: vkomarov@ssau.ru

Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru Спирина Мария Олеговна, магистрант. E-mail: maryspirina@gmail.com Чертыковцева Владислава Олеговна, магистрант. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru

тации волокон в изделии. Управление течением расплава позволяет влиять на расположение волокон в таких материалах [6]. Сравнение данных, получаемых в программных комплексах, моделирующих литье, с экспериментальными данными показывают хорошую сходимость [7]. Для подробной оценки напряженно-деформированного состояния сложных изделий используется многоуровневых подход [8].

В качестве объекта исследования в статье рассмотрены проушины, поскольку они содержат концентраторы напряжений и являются типовыми элементами аэрокосмических конструкций. В статье [9] разработана методика оценки соответствия расчётных и экспериментальных значений разрушающих нагрузок для образцов регулярных и нерегулярных зон конструкций из слоистых композитов на примере проушин. Представленная далее работа посвящена развитию данной методики – распространению ее на случай композиционных материалов, армированных короткими высокопрочными волокнами.

Целью работы является определение путей настройки теоретической модели и экспериментальных методик для повышения точности моделирования структуры повышаемого материала. Для решения этих задач применен многоуровневый подход, реализованный в совместном использовании программных комплексов Moldex3D, DIGIMAT и ANSYS. Схема многоуровневого подхода представлена на рис. 1.

Для предсказания прочности конструкции использовались критерии эквивалентных напряжений, а также критерий Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D), с использованием постановки первого разрушенного псевдо-зерна FPGF

$$f_i = \sqrt{F_i(\sigma)}, \qquad (1)$$

где

$$F_{i}(\sigma) = \frac{\sigma_{11}^{2}}{\sigma_{X}^{2}} - \frac{\sigma_{11}(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{\sigma_{X}^{2}} + \frac{\sigma_{22}^{2} + \sigma_{33}^{2}}{\sigma_{Y}^{2}} + \frac{1}{\sigma_{X}^{2}} - \frac{2}{\sigma_{Y}^{2}} \sigma_{22} \sigma_{33} + \frac{\sigma_{12}^{2} + \sigma_{13}^{2}}{\sigma_{S}^{2}} + (\frac{4}{\sigma_{Y}^{2}} - \frac{1}{\sigma_{X}^{2}}) \sigma_{23}^{2}, (2)$$

 $\sigma_{11}...\sigma_{13}$ – компоненты тензора напряжений в главных осях,

 σ_X – предел прочности при растяжении в направлении армирования,

 σ_{γ} – предел прочности в трансверсальном направлении,

 $\sigma_{\rm s}$ – предел прочности при сдвиге.

Постановка FPGF (рис. 2) предполагает использование модели первого разрушенного псевдо-зерна для армированных пластиков [10]. Конечно-элементная модель изделия разделяется на ячейки представительного объема (элементы сетки), которые в свою очередь делятся на псевдо-зерна. При расчете полностью разрушенное зерно исключается. Наступление разрушения всей ячейки периодичности определяется массовой долей разрушенных псевдо-зерен PGA, которая рассчитываются по формуле:

$$PGA = \frac{\sum_{k=1}^{N} \omega_k F_k}{PGA_{critical}} , \qquad (3)$$

где N – общее число псевдо-зерен;

 ω_k – вес одного псевдо-зерна, который отражает ориентацию волокна;

 F_k – значение метки, которое равно 0 при целом псевдо-зерне и 1, если зерно разрушено;

*PGA*_{critical} – критическое значение массовой доли разрушенных псевдо-зерен.



Рис. 1. Схема многоуровневого подхода



Рис. 2. Схема концепции FPGF

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ ПЛАСТИНЫ И РАСЧЕТ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН

Для определения ориентации волокон внутри пластины проводилось моделирование её литья в системе Moldex 3D. Моделирование позволяет сократить многочисленные итерации по подбору технологического режима и сократить срок изготовления продукции. Размеры пластины выбраны с учетом возможности расположения проушин двух размеров в разных направлениях. На рис. 3 представлены размеры изготавливаемой пластины и проушин.

Сетка пластины построена в Rhinoceros – программе, позволяющей создавать сложные



Рис. 3. Размеры изготавливаемой пластины и проушин двух размеров

структурированные сетки и назначать атрибуты граничных условий литья: место входа расплава, определять литниковую систему и полость для заполнения расплавом. Сетка имеет 20 слоев с ячейками размером 0,5х0,2 мм. Расчетная сетка пластины в различных областях представлена на рис. 4.

Параметры неньютоновского материала РЕЕК 90HMF20 построены по аналогии с имеющимся в базе данных Moldex 3D РЕЕК 90HMF40, с учётом поправок, определяемых разницей значениях их ключевых характеристик, определяемых спецификациями [3] и [11]. Технологические параметры процесса литья [12] заданы в системе Moldex 3D на основе спецификации используемого для литья термопласт автомата Negri Bossi VE 210-1700 (табл. 1).

При моделировании литья конструкций под давлением задан ступенчатый профиль изменения объемной скорости впрыска расплава в зависимости от позиции поршня литьевой машины (рис. 5) соответствующий процессу литья



Рис. 4. Конечно-элементная модель пластины в различных областях

Параметр	Значение
Диаметр шнека, мм	60
Скорость вращения шнека, об/мин	25
Инжекционное давление, МПа	150
Сила зажима, тс	210

Таблица 1. Основные параметры технологического процесса литья

Скорость впрыска, мм/с



Рис. 5. Ступенчатый профиль изменения объемной скорости впрыска расплава в зависимости от позиции поршня литьевой машины

пластин, изготовленных для эксперимента. Расплав подается в форму со скоростью впрыска 10 мм/с, температура формы составляет 220 °С, а температура расплава – 400 °С.

Результатом расчета является поля распространения фронта литья, давлений и температур, а также значений компонент тензора ориентации армирующих волокон в каждой точке изделия. Расчет показал полное заполнение литьевой формы, время литья составило 5,2 с. На рис. 6 показаны фронты литья пластины в зависимости от времени.

Для сравнения полученной картина вероятностного распределения волокон в пластине материала с проведенным моделированием было проведено исследование среза проушин на электронном микроскопе TESCAN VEGA. На рис. 7 видно, что в структуре проушин S₉₀ при литье образуется ярко выраженный средний слой волокон, которые направлены хаотично. Для проушин S₀ волокна в ядре ориентированы по направлению литья (рис. 8).

Ориентация волокон, полученная в Moldex 3D, с помощью модуля Digimat MAP, сохранена для каждой проушины в месте ее вырезки для построения многоуровневой математической модели изделия.

3. СОЗДАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА

В статье рассмотрен анизотропный материал РЕЕК 90HMF20. Для более точного учета поведения материала при прочностном расчете, а также прогнозирования прочности проектируемого изделия, необходимо создать модель на основе результатов испытаний, а также паспортных характеристик материала. Построение модели материала выполнено в программном комплексе Digimat, в котором возможно аналитическое прогнозирование нелинейного поведения материалов.

В модуле Digimat-MF создана модель материала, исходя из паспортных характеристик



Рис. 6. Фронты литья пластины из РЕЕК 90HMF20: а) на 1 секунде, б) на 2 секунде, в) на 3 секунде, г) на 5 секунде



Рис. 7. Направление волокон в торце проушин S_{90} : а) электронный микроскоп TESCAN VEGA, б) Moldex 3D



Рис. 8. Направление волокон в торце проушин S₀: а) электронный микроскоп TESCAN VEGA, б) Moldex 3D

каждого компонента. Прочностные свойства компонентов, а также композита в целом описываются с помощью критерия Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D). Критерий позволяет достоверно предсказывать разрушение конструкции при минимуме необходимых экспериментальных исследований, так как требуется определение только трех предельных параметров: пределы прочности при растяжении в направлении армирования (X) и в трансверсальном направлении (Y), а также предел прочности при сдвиге (S).

Модель материала строится на результате на основе результатов испытаний плоских образцов по стандарту ISO 527, вырезанных под различным углом относительно направления литья (рис. 9). Средние значений механических характеристик образов и коэффициенты вариации представлены в табл. 2. Полученный файл анализа материала передается в модуль Digimat-MX, в котором проходит реверс-инжинирингг – итерационный процесс поиска оптимальных проектировочных переменных, определяющих константы выбранного закона деформирования материала. Данный подход используется для сокращения разницы между аналитической моделью Digimat-MF и данными, получаемыми в результате эксперимента и добавляемыми в базу Digimat-MX в качестве тестового файла, содержащего значения напряжений и деформаций. Результаты реверсинжиниринга представлен на рисунке (рис. 10).

Результатом работы с программным комплексом DIGIMAT является модель материала, содержащая оптимизированные свойства компонентов композита. Параметры модели связующего были скорректированы в ходе реверсинжиниринга таким образом, чтобы свойства



Рис. 9. Результаты испытаний плоских образцов: а) 0°, б) 45°, в) 90°

Расположение образца на пластине	Е, МПа	CV_E , %	$\sigma_{_{ m max}}$, МПа	$CV_{\sigma_{\max}}$, %
0°	17381	3,7	205	4,2
45°	9765	5,6	144	6,2
90°	9040	9,9	128	13,2

Таблица 2. Механические характеристики плоских образцов



Рис. 10. Реверс-инжиниринг в модуле Digimat-MX

композита в целом соответствовали экспериментально полученным зависимостям напряжений от деформаций для образов вырезных под углом 0°, 45° и 90° к направляющей пластины. Результаты реверс-инжиниринга представлены в табл. 3 – 5.

Построенная модель материала использована при расчёте напряженно-деформированного проушин из материала РЕЕК 90HMF20 и позволяет учитывать зависимость его механических характеристик от направления армирования.

Таблица 3. Параметры волокна по результатам реверс-инжиниринга

Параметр	Значение		
Модуль Юнга, МПа	42000		
Коэффициент	0,2		
Пуассона			
Плотность, кг/м ³	1565		

Таблица 4. Параметры связующего по результатам реверс-инжиниринга

Параметр	Значение
Модуль Юнга, МПа	5994
Коэффициент Пуассона	0,4559
Предел текучести, МПа	20
Плотность, кг/м ³	1300
Константа упрочнения	211
Экспонента при законе	0,17
упрочнения	

Таблица 5. Параметры критерия разрушения по результатам реверс-инжиниринга

Предел прочности	225
при растяжении	
в направлении	
армирования ${\pmb \sigma}_{\! X}$, МПа	
Предел прочности	110
при растяжении	
в поперечном	
направлении $\sigma_{_{Y}}$, МПа	
Предел прочности	85
при сдвиге $\sigma_{\!_S}$, МПа	

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОУШИН

Проушины вырезаны из пластин методом гидроабразивной резки. Боковая поверхность проушин отшлифована. Отверстие проушин получено сверлением и разверткой. Проушины испытаны на растяжение с плавным возрастанием нагрузки вплоть до момента разрушения на универсальной сервогидравлической машине MTS 793. Испытания проведены по схеме, предложенной Комаровым В.А. [9]. В табл. 6 представлено номинальное напряжение в отверстии

 $\sigma_{_{H}} = \frac{F}{d \cdot h}$, где F – разрушающее усилия, H, d –

диаметр отверстия проушины, мм, h – толщина проушины, мм.

5. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОУШИН

Многоуровневый подход включает в себя конечно-элементную модель изделия. В мо-

дуль DesignModeler системы ANSYS подгружалась 3D-модель пластины, а также создавалась геометрическая модель оси, с помощью которой задавалось нагружение. Схема закрепления проушины представлена на рис. 11. Конечно-элементная модель проушины M с осью содержит 40980 конечных элемента и 180694 узла.

В расчете задавался ряд значений перемещения оси для каждого размера проушин. Для каждого значения перемещения определялась сила растяжения проушины, поля эквивалентных напряжений и деформаций, а также критерии разрушения.

Разрушающее усилие (таблица 7) соответствует толщине рассчитываемых в ANSYS проушин 3,7 мм и значению экспериментально полученных номинальных напряжений (таблица 6). На рис. 12 - 14, представлены поля перемещений, эквивалентных напряжений по Мизесу и критерия Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D) в постановке FPGF для исследованных типов проушин, нагруженных разрушающим усилием (таблица 7).

Таблица 6. Номинальное напряжение в проушинах σ_{μ} , МПа

N эксперимента	M ₀	M ₉₀	S_0	S ₉₀
1	136,6	110,1	88,3	64,7
2	137,4	96,9	86,8	70,3
3	141,0	100,9	86,7	63,8
4	128,0	114,4	86,8	73,9
Среднее значение	135,8	105,6	87,2	68,2
CV, %	4%	8%	1%	7%



Рис. 11. Конечно-элементная модель проушины и схема закрепления

Таблица 7. Разрушающее усилие для проушин толщиной 3,7	MM
--	----

Типоразмер проушины	M_0	M ₉₀	S_0	S ₉₀
Разрушающее усилие, Н	6027,3	4687,9	3870,2	3026,6



Рис. 12. Поля перемещений проушин, мм: а) M₀, б) M₉₀, в) S₀, г) S₉₀

6. ПРЕДСКАЗАНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО УСИЛИЯ

В табл. 8 приведено сравнение значений разрушающего усилия, полученных экспериментально и прогнозируемого по критериям Цая-Хилла и Мизеса в напряжениях с использованием анизотропной и изотропной моделях материалов для проушин толщиной 3,7 мм. Значение разрушающего усилия по критерию Цая-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D) в постановке FPGF получено на основе многоуровневого подхода с учетом ориентации армирующих волокон и параметров материала, представленных в таблицах 3 - 5 и соответствует минимальному усилию, когда значение критерия достигает единицы. Разрушающее усилие по критерию Мизеса соответствует значению усилия при которых максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу, рассчитанных для изотопного материала (Е = 17381 МПа), равно пределу прочности плоских образцов (таблица 2) в соответствии с направлением прилагаемой нагрузки: σ_{\max}^0 = 205 МПа для проушин S_0 и M_0 и σ_{max}^{90} = 128 МПа для проушин S_{90} и M_{90} .

Рис. 13. Поля эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа: a) M_0 , б) M_0 , в) S_0 , г) S_{00}

Рис. 14. Значение критерия Цая-Хилла в постановке FPGF: a) M₀, б) M₀₀, в) S₀₀ г) S₀₀

				Отношение пр	едсказанного	
Вид				разрушающего усилия		
проу-	Разр	ушающее усилие	е, Н к эксприментальному		нтальному	
шины		Цая-Хилл		Цая-Хилл /	Мизес /	
	Эксперимент	FPGF	Мизес	Эксперимент	Эксперимент	
M_0	6027	5521	5374	0,916	0,892	
M ₉₀	4688	4334	3346	0,924	0,714	
S ₀	3870	3628	3507	0,937	0,906	
S ₉₀	3027	2857	2189	0,944	0,723	

Таблица 8. Предсказание разрушающего усилия по критериям Цая-Хилла в постановке FPGF и Мизеса

7. ВЫВОДЫ

Разработана многуровневая расчетно-экспериментальная система для анализа прочности и жесткости элементов конструкций из короткоармированных композитов, объединяющая модели ориентации армирующих волокон (Moldex3D), механических характеристик анизотропного материала (Digimat), конечно-элементную модель изделия (ANSYS Workbench). Экспериментальное подтверждение системы представлено на основе исследования жесткости и прочности образцов проушин из короткоармированного композиционного материала PEEK 90HMF20 двух типоразмеров, вырезанных из пластины вдоль и поперек направления литья. Показано, что критерий Цая-Хилла для трансверсальноизотропных тел (3D), с использованием постановки первого разрушенного псевдо-зерна FPGF позволяет достоверно предсказывать несущую способность конструкций изготавливаемых литьем из короткоармированных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
- Fu S-Y, Lauke B, Mai Y-W. Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites // Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2009. 364 c.
- Основные характеристики материала Victrex PEEK 90HMF20. URL: https://www.victrex.com/~/ media/datasheets/victrex_tds_90hmf20.pdf (дата обращения 14.10.2017).
- Ready for take-off: Doors on the A350 with a primary structural component made from Victrex polymer. URL: https://www.victrex.com/en/news/2015/09/ airbus-bracket (дата обращения 14.10.2017).
- 5. Space Environmental Testing of PEEK and PFA sample (ExHAM-PEEK). URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/2009. html (дата обращения 14.10.2017).
- 6. *Tseng H.-C., Chang R.-Y., Hsu C.-H.* Numerical predictions of fiber orientation and mechanical properties for injection-molded long-glass-fiber thermoplastic composites // Composites Science and Technology V. 150, 2017. P. 181-186.

- Tseng H.-C., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Improved fiber orientation predictions for injection molded fiber, Composites Composites: Part A. V. 99, 2017. P. 65–75.
- Trzepiecińskia T., Ryzińskaa G., Biglara M., Gromadab M. Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software // Ceramics International V. 43, 2017. P. 3259–3266.
- 9. Расчётно-экспериментальный анализ прочности изделий из тканевого эпоксидного углепластика / В.А. Комаров, Е.А. Кишов, Р.В. Чарквиани, А.А. Павлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т.14, № 2. С. 106-112.
- Kammoun S., Doghri I., Adam L., Robert G., Delannay L. First pseudo-grain failure model for inelastic composites with misaligned short fibers, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, V. 42, 2011. P. 1892-1902.
- 11. Основные характеристики материала Victrex PEEK 90HMF40. URL: https://www.victrex.com/~/ media/datasheets/victrex_tds_90hmf40.pdf (дата обращения 14.10.2017).
- 12. Барвинский И. Основы инженерных расчетов литья термопластов: технологические параметры // CADmaster. 2015. № 2.

MULTI-LEVEL COMPUTATIONAL -EXPERIMENTAL SYSTEM FOR THE ANALYSIS OF STRENGTH AND STIFFNESS OF ELEMENTS OF STRUCTURES FROM COMPOSITES REINFORCED BY SHORT FIBERS

© 2017 V.A. Komarov, E.I. Kurkin, M.O. Spirina, V.O. Chertykovtseva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper describes a multi-level computational -experimental system for the analysis of strength and stiffness of elements of structures from composites reinforced by short fibers, which combines the orientation models of reinforcing fibers, the mechanical characteristics of anisotropic material and the finite element model of the product. The experimental validation of the system is presented on the basis of the research of the stiffness and strength of the samples of the lugs of two sizes from composites reinforced by short fibers PEEK 90HMF20, cut from the plate along and across the casting direction. A casting model, which predicts the orientation of reinforcing fibers, was developed in Moldex3D system. Verification of the casting model was carried out using an experimental evaluation of the structure of the material by electron microscope TESCAN VEGA. The mechanical model of anisotropic material was developed in the Digimat system by the reverse engineering method based on the processing of experimental results of the samples cut from the plate at angles of 0 °, 45 ° and 90 ° to the casting direction. The finite element model of the lugs taking into account the anisotropy of the material in each cell was developed in the ANSYS Workbench system with the connection of the Digimat CAE module. The article describes that the Tsai-Hill criterion for transversely isotropic bodies (3D), using the setting of the first pseudo-grain failure (FPGF), makes it possible to reliably predict the load-carrying capacity of designs made by casting from composites reinforced by short fibers. The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 16-31-60093 mol a dk.

Keywords: composite material, lug, short fibers, stress-strain state.

Valery Komarov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Construction and Design Department. E-mail: vkomarov@ssau.ru Evgeny Kurkin, Candidate of Technics, Associate Professor of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru Mariya Spirina, Student. E-mail: maryspirina@gmail.com Vladislava Chertykovtseva, Student. E-mail.vladislava Gevandan m

E-mail: vladislaava.s@yandex.ru