

УДК 539.3:677.024

EDN FEMHJM (<https://elibrary.ru/femhjm>)

DOI 10.33113/mkmk.ras.2023.29.04.02



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТКАЧЕСТВА И ДЕФОРМАЦИИ ТКАНИ НА УПРУГИЕ МОДУЛИ 3D ТКАНОГО КОМПОЗИТА*

Маслов Л.Б.^{1,2}, Ломов С.В.³, Пирогов Д.А.⁴¹Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново, Россия²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия³KU Leuven, г. Лювен, Бельгия⁴Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены компьютерные модели трехмерных композитов с эпоксидным связующим, армированных тканями с трехмерным переплетением «интерлок с послонной перевязкой» из углеволокна, для типичного композита этого класса. На мезоуровне проведён параметрический анализ геометрических характеристик армирования и упругих свойств композита от плотности ткани по утку и угла сдвига ткани. Расчёты проведены с помощью программ WiseTex и TexComp для практически достижимых диапазонов изменения плотности ткани по утку и угла сдвига. Получены количественные оценки параметров строения ткани и механических свойств композитов. Показано, что повышение плотности трехмерной структуры по утку предсказуемо ведет к существенному увеличению модуля Юнга в направлении утка, незначительному повышению в направлении, перпендикулярном основной поверхности ткани, но при этом имеет место снижение в направлении основы. Модули сдвига и коэффициенты Пуассона не претерпевают больших изменений при повышении объемной доли волокон в композите, при этом коэффициент Пуассона в плоскости ткани значительно меньше двух других. Оценка изменения упругих характеристик при сдвиге армирования может быть использована для расчета локальных свойств композитов при драпировке армирования на форме.

Ключевые слова: композиты; углеродные волокна; трехмерные тканые переплетения; гомогенизация; эффективные упругие модули

WEAVING PARAMETERS AND FABRIC DEFORMATION INFLUENCE ON ELASTIC MODULES OF 3D WOVEN COMPOSITE

Maslov L.B.^{1,2}, Lomov S.V.³, Pirogov D.A.⁴¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia³KU Leuven, Leuven, Belgium⁴Ivanovo State Polytechnic Engineering University, Ivanovo, Russia

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта №20-41-370002.

ABSTRACT

The paper considers computer models of three-dimensional composites with epoxy binder reinforced with fabrics with three-dimensional interlocking interlock with layered dressing made of carbon fiber for a typical composite of this class. A parametric analysis of the geometric characteristics of reinforcement and elastic properties of the composite on the weft density and the shear angle of the fabric was carried out at the mesolevel. The calculations were carried out using the WiseTex and TexComp programs for practically achievable ranges of tissue density variation by weft and shear angle. Quantitative evaluation of the parameters of the fabric structure and mechanical properties of composites is obtained. It is shown that the density increase of the three-dimensional structure along the weft predictably leads to a significant increase in the Young's modulus in the weft direction, a slight increase in the direction perpendicular to the main surface of the fabric, however at the same time there is a decrease in the direction of the warp. Shear modulus and Poisson coefficients do not undergo large changes with an increase in the volume fraction of fibers in the composite, while the Poisson ratio in the fabric plane is significantly less than the other two. The estimation of the change in elastic characteristics during the reinforcement shift can be used to calculate the local properties of composites when draping reinforcement on the mold.

Keywords: composites; carbon fibers; three-dimensional weaves; homogenization; effective elastic modules

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перспективным направлением при разработке композитных материалов является использование в качестве армирования объемного текстильного материала [1]. Отмечаются преимущества подобных материалов: низкая анизотропия, обеспечивающая равномерное проявление механических характеристик во всех направлениях; исключение риска расслоения, локализация трещин и высокая стойкость к удару; повышение сопротивления межслойному сдвигу и радиальному напряжению, стойкости к деформациям и высокотемпературным воздействиям. Форма тканой заготовки может практически соответствовать конечной геометрии конструкции и требует минимальную обработку после пропитки связующим материалом. С точки зрения технологии – улучшение воспроизводимости процесса производства композитных изделий, возможность обработки композитного материала резанием, уменьшение трудоёмкости и стоимости изготовления серийно выпускаемых изделий. Применение трехмерных тканых композитов расширяется при разработке сильно нагруженных деталей в автомобилестроении, энергетике, авиастроении [2].

Актуальным направлением в области механики композитов на основе тканых переплетений является изучение зависимости макроскопических физико-механических свойств периодической структуры композита на мезоуровне ячейки периодичности от параметров ткачества и ткацкого переплетения. Это необходимо для обеспечения возможности проектирования механических свойств композитов с учетом внешних статических и динамических нагрузок.

В статье рассмотрены компьютерные модели композиционных материалов, имеющие ячейки периодичности с внутренней структурой, образованной трехмерными переплетениями нитей из углеродных волокон. Подобные структуры с данным типом переплетения и армирования применяются, например, в производстве турбинных лопаток авиационных двигателей. С помощью аналитических методов на основе гомогенизации Мори-Танака рассчитаны

эффективные упругие свойства разработанных моделей тканых композитов в зависимости от характерных технологических параметров ткачества. Метод Мори-Танака, реализованный в связке программ WiseTex – TexComp [3,4], показал свою эффективность и достоверность при расчете различных переплетений 3D тканых композитов, включая тканое армирование с послойной перевязкой, аналогичное рассмотренному в настоящей статье [5,6].

1. МОДЕЛИ ТРЕХМЕРНЫХ ТКАНЫХ ПЕРЕПЛЕТЕНИЙ

Параметрическое исследование проводится для трехмерного армирования со структурой переплетения, обеспечивающей послойную перевязку типичную для такого вида армирования (рис.1). Армирующие нити основы и утка HexTow, 12К образованы углеродными волокнами IM7; связующее представляет собой эпоксидную смолу. Основные характеристики тканей взяты из спецификации материалов (таблица 1). Отсутствующие свойства, такие как поперечный модуль Юнга и коэффициенты Пуассона волокна, определены из литературы [7]. Получаемые в результате ткачества размеры сечения нити в композите вычислены по микрофотографии среза ткани [8]. Принято, что объёмная доля волокна 60%.

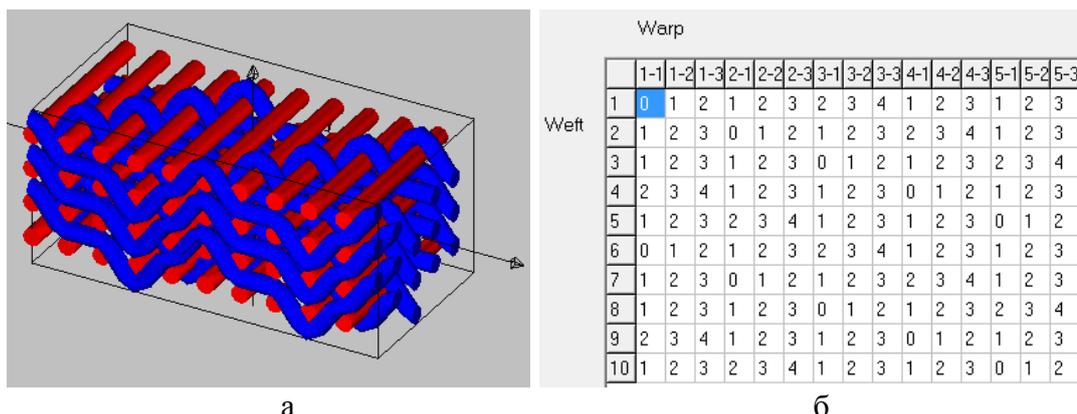


Рис.1. Внутреннее строение 3D армирования: а) пространственная схема переплетения; б) кодировка переплетения [8].

В графическом редакторе WiseTex [3] разработана кодировка переплетения (рис.1б) и параметрические модели, в которых приняты вариации шага по утку: 1.45; 1.6; 1.78; 2.0 мм при сохранении неизменного значения шага по основе. Рассмотрен также случай возникновения сдвига нитей в плоскости ткани в 5° и 10° для базового варианта ткани, что актуально при проектировании деталей, в которых армирование драпируется на трёхмерной форме [9].

Таблица 1.

Значения геометрических и физических параметров компонент композита.

	Волокно	Нити	Связующее
Диаметр, мкм	5,2		
Плотность материала волокна, г/см ³	1,78		1,2
Модуль Юнга, ГПа			3,0
	вдоль волокна	276	
	поперёк волокна	15	

Коэффициент Пуассона			0,40
в поперечной плоскости	0,23		
при растяжении вдоль волокна	0,30		
Количество волокон		12000	
Линейная плотность нити, текс		454	
Размеры сечения в композите, мм			
меньший диаметр		0,23	
большой диаметр		1,5	
Базовый шаг по основе и утку, мм		1,6	
Поверхностная плотность ткани, г/м ²		2000	

Было проведено компьютерное моделирование равновесного состояния элементарной ячейки ткани размером 16×8 мм при заданной схеме трехмерного переплетения при различных параметрах ткачества (рис.2). Рассчитанные параметры геометрических моделей рассматриваемого трехмерного армирования при варьировании плотности по утку и сдвигу собраны в таблице 2. Искривлённое состояние нити в ткани характеризуется *уработкой*, т.е. относительной разницей длины искривлённой нити и расстоянием между её концами в плоскости ткани.

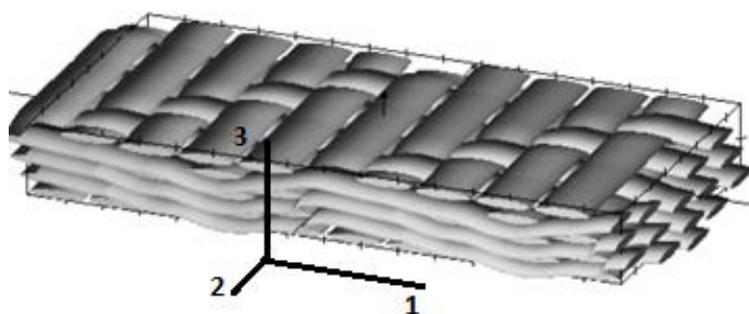


Рис.2. Геометрическая модель базового варианта армирования. Координатные оси: 1 – основа, 2 – уток, 3 – перпендикуляр плоскости ткани.

Таблица 2.

Рассчитанные параметры при варьировании плотности по утку и угла сдвига.

Угол сдвига, °	0	0	0	0	5	10
Шаг утка, мм	2	1.78	1.6	1.45	1.6	1.6
Толщина, мм	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
Поверхностная плотность, г/м ²	1808	1925	2051	2181	2059	2084
Объёмная доля волокон	0.537	0.572	0.61	0.648	0.612	0.62
Средняя уработка по основе	0.0093	0.013	0.022	0.033	-	-
Средняя уработка по утку	0.0195	0.018	0.0172	0.0165	-	-

Уменьшение шага утка соответствует увеличению плотности, что приводит для более плотной ткани по утку при сохранении плотности по основе и постоянной толщине ткани к увеличению объёмной доли волокон. При этом из-за уменьшения расстояния между нитями утка, огибаемых нитями основы, уработка (изгиб) основы увеличивается, что приводит к увеличению среднего угла наклона нитей основы к плоскости ткани. В то же время уработка утка остаётся почти постоянным. Минимальная толщина армирования, рассчитанная по модели баланса изгиба основы и утка, составила 1,87 мм.

2. АНАЛИЗ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ

Аналитическая оценка эффективных упругих свойств рассмотренных моделей композитов проведена на основе метода эффективного поля Мори-Танака с помощью компьютерного обеспечения TexComp [4]. TexComp на основании модели, включающей механические свойства волокна и данные о механических свойствах связующего, рассчитывает гомогенизованную матрицу жёсткости пропитанного композита, а затем технические константы (таблицы 3 и 4).

Таблица 3.

Упругие константы композитов с различной плотностью ткани по утку.

Шаг утка, мм	E_{11} , ГПа	E_{22} , ГПа	E_{33} , ГПа	G_{23} , ГПа	G_{13} , ГПа	G_{12} , ГПа	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}
2	61.6	51.9	8.27	3.26	3.62	3.97	0.51	0.49	0.0082
1.78	55.3	60.1	8.54	3.65	3.94	4.25	0.49	0.51	0.0017
1.6	48.1	68.6	8.77	4.09	3.95	4.56	0.47	0.50	-0.003
1.45	37.0	77.9	9.69	4.60	3.41	4.88	0.42	0.43	-0.004

Таблица 4.

Упругие константы композитов с различным углом сдвига в плоскости ткани.

Угол сдвига	E_{11} , ГПа	E_{22} , ГПа	E_{33} , ГПа	G_{23} , ГПа	G_{13} , ГПа	G_{12} , ГПа	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}
0°	48.1	68.6	8.77	4.09	3.95	4.56	0.47	0.50	-0.003
5°	48.6	63.1	8.85	4.11	4.40	4.67	0.46	0.52	-0.001
10°	49.3	50.1	8.80	3.99	4.45	4.90	0.45	0.51	0.0085

Точность расчетов продемонстрирована в имеющихся публикациях, в которых результаты расчета упругих параметров 3D тканых композитов сравниваются с экспериментальными данными и результатами конечно-элементного (МКЭ) моделирования [4,6,8]. Наиболее подробно такие расчеты сравниваются в [10], где показано, что расхождения в расчете ключевых упругих свойств для ламинатов из плоской ткани и 3D тканых композитов составляют единицы процентов; подробные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Погрешности расчета параметров тканых композитов методом Мори-Танака [10].

Тип параметра	Относительная погрешность расчета методом Мори-Танака при сравнении с методами:	
	МКЭ	Эксперимент
Модуль Юнга по основе или утку	1 – 2%	2 – 4%
Модуль сдвига	5 – 10%	10 – 15%
Коэффициент Пуассона	10 – 20%	20 – 35%

На рис.3 приведены примеры зависимостей упругих констант композита от шага утка, т.е. при уменьшении плотности ткани по утку и общей плотности.

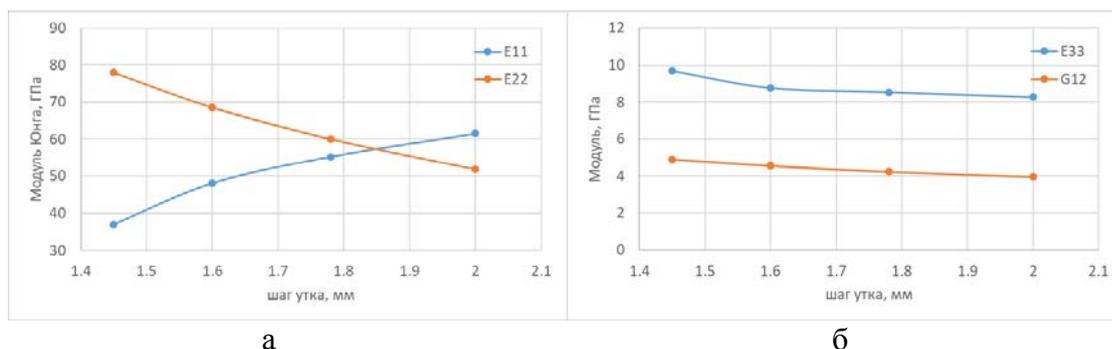


Рис.3. Упругих константы композита: а) модули Юнга вдоль основы (E_{11}) и утка (E_{22}); б) модуль Юнга поперек ткани (E_{33}) и модуль сдвига в плоскости (G_{12}).

При повышении плотности ткани (уменьшении шага по утку) модуль Юнга в направлении уточных нитей E_{22} увеличивается, что объясняется увеличением объёмной доли волокон в направлении утка и уменьшением уработки нитей утка. Модуль Юнга в направлении основы E_{11} снижается вследствие увеличения уработки нитей основы. Повышение объёмной доли волокон происходит за счёт уплотнения утка, доля волокон в направлении основы не изменяется. Уменьшение модуля E_{11} происходит пропорционально увеличению E_{22} .

За счёт варьирования плотности ткани по утку в пределах 0.8-1.1 от базовой можно получить изменение E_{22} от +10 ГПа до -15 ГПа, и изменение E_{11} от -11 до +12 ГПа. При шаге утка 1,85 мм модули Юнга при нагружении по основе и утку становятся одинаковыми. Анизотропия ткани изменяется в пределах 0.8-2.1.

Изменения модуля Юнга по основе и по утку существенно превышают оценки неопределённости, связанные с точностью модели (таблица 5), изменения модуля сдвига находятся в пределах этой неопределённости.

Модуль сдвига в плоскости ткани и модуль Юнга при нагружении поперёк ткани увеличиваются при увеличении плотности ткани по утку на 10-15%, что связано с увеличением изгиба утка. Интересно отметить, что при увеличении угла сдвига армирующей ткани, например, вследствие её драпировки на форме или искажений армирования при выкладке, модули E_{11} , E_{22} стремятся к близким значениям, снижая анизотропию. G_{12} увеличивается при сдвиге нитей в ткани.

Таким образом, варьируя плотность ткани по утку в технологически допустимых пределах, можно изменять упругие свойства композита, приспособлявая их к особенностям нагружения в различных зонах изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogdanovich A. *Solid three-dimensional woven textiles* / In book: *Advances in 3D Textiles*. – Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2015. – Pp.21-52.
2. Bogdanovich A.E., Mohamed M.H. *Three-Dimensional Reinforcements for Composites* // *SAMPE Journal*. – 2009. – Vol.45. – No.6. – Pp.8-28.
3. Lomov S.V. *WiseTex – a virtual textile composites software* / In book: *Advanced Weaving Technology*. – Springer Nature, 2022. – Pp.293-318.

4. Lomov S.V., Verpoest I., Cichosz J., Hahn C., Ivanov D.S., Verleye B. *Meso-level textile composites simulations: open data exchange and scripting* // Journal of Composite Materials. – 2014. – Vol.48. – Pp.621-637.
5. Abaimov S.G., Akhatov I.S., Lomov S.V. *Detailed comparison of analytical and finite element-based homogenization approaches for fibre-reinforced composites* / In book: Multi-Scale Continuum Mechanics Modelling of Fibre-Reinforced Polymer Composites. – Woodhead Publishing, 2021. – Pp.141-177.
6. Ivanov D.S., Lomov S.V. *Modeling of 2D and 3D woven composites* / In book: Polymer Composites in the Aerospace Industry. – Woodhead Publishing, 2020. – Pp.23-57.
7. Kawabata S. *Measurement of the transverse mechanical-properties of high-performance fibers* // Journal of the Textile Institute. – 1990. – Vol.81. – No.4. – Pp.432-447.
8. Lomov S.V., Perie G., Ivanov D.S., Verpoest I., Marsal D. *Modelling 3D fabrics and 3D reinforced composites: Challenges and solutions* // Textile Research Journal. – 2011. – Vol.81. – No.1. – Pp.26-41.
9. Pazmino J., Carvelli V., Lomov S.V. *Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement* // Composites: Part A. – 2014. – Vol.61. – Pp.76-83.
10. Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S., Hamada K., Kurashiki T., Zako M., Karahan M., Verpoest I. *Finite element modelling of progressive damage in non-crimp 3D orthogonal weave and plain weave E-glass composites* / In 2nd World Conference on 3D Fabrics, Greenville, SC. CD edition. – 2009.

REFERENCES

1. Bogdanovich A. *Solid three-dimensional woven textiles*. In book: Advances in 3D Textiles. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, 2015, Pp.21-52.
2. Bogdanovich A.E., Mohamed M.H. *Three-Dimensional Reinforcements for Composites*. SAMPE Journal, 2009, Vol.45, No.6, Pp.8-28.
3. Lomov S.V. *WiseTex – a virtual textile composites software*. In book: Advanced Weaving Technology. Springer Nature, 2022, Pp.293-318.
4. Lomov S.V., Verpoest I., Cichosz J., Hahn C., Ivanov D.S., Verleye B. *Meso-level textile composites simulations: open data exchange and scripting*. Journal of Composite Materials, 2014, Vol.48, Pp.621-637.
5. Abaimov S.G., Akhatov I.S., Lomov S.V. *Detailed comparison of analytical and finite element-based homogenization approaches for fibre-reinforced composites*. In book: Multi-Scale Continuum Mechanics Modelling of Fibre-Reinforced Polymer Composites. Woodhead Publishing, 2021, Pp.141-177.
6. Ivanov D.S., Lomov S.V. *Modeling of 2D and 3D woven composites*. In book: Polymer Composites in the Aerospace Industry. Woodhead Publishing, 2020, Pp.23-57.
7. Kawabata S. *Measurement of the transverse mechanical-properties of high-performance fibers*. Journal of the Textile Institute, 1990, Vol.81, No.4, Pp.432-447.
8. Lomov S.V., Perie G., Ivanov D.S., Verpoest I., Marsal D. *Modelling 3D fabrics and 3D reinforced composites: Challenges and solutions*. Textile Research Journal, 2011, Vol.81, No.1, Pp.26-41.
9. Pazmino J., Carvelli V., Lomov S.V. *Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement*. Composites: Part A, 2014, Vol.61, Pp.76-83.

10. Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S., Hamada K., Kurashiki T., Zako M., Karahan M., Verpoest I. *Finite element modelling of progressive damage in non-crimp 3D orthogonal weave and plain weave E-glass composites*. In 2nd World Conference on 3D Fabrics, Greenville, SC, CD edition, 2009.

Поступила в редакцию 13 октября 2023 года.

Сведения об авторах:

Маслов Леонид Борисович – д.ф.-м.н., доц., зав.каф. «Теоретической и прикладной механики», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново, Россия; e-mail: tipm@tipm.ispu.ru

Ломов Степан Владимирович – д.т.н., professor emeritus, Department of Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), Leuven, Belgium; e-mail: stepan.lomov@kuleuven.be

Пирогов Дмитрий Андреевич – к.т.н., доц., доцент кафедры «Мехатроники и радиоэлектроники», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Россия; e-mail: pirogov81@mail.ru