

© Суворов И. А., Ершов С. В.,
Кузнецов В. Б., Калинин Е. Н., 2020

Суворов Иван Александрович

Аспирант,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>
E-mail: suvorov@live.it

Suvorov Ivan Alexandrovich

Postgraduate student,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0002-1824-0737>
E-mail: suvorov@live.it

Ершов Сергей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>
E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru

Ershov Sergey Vladimirovich

PhD in Technology, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>
E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru

Кузнецов Виктор Борисович

Доктор технических наук, профессор,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

Kuznetsov Victor Borisovich

Doctor of Technology, Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

Калинин Евгений Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>
E-mail: enkalini@gmail.com

Kalinin Evgeny Nikolaevich

Doctor of Technology, Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0002-6253-2227>
E-mail: enkalini@gmail.com

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТКАНОЙ
АРМИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО
МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
УПРАВЛЯЮЩИХ ПЕРЕМЕННЫХ**

**DESIGNING A SOLID-STATE MODEL
OF A FABRIC REINFORCEMENT
STRUCTURE OF A POLYMERIC
COMPOSITE MATERIAL USING
CONTROL VARIABLES**

Аннотация. Авторы статьи создали 3D-модель тканой армирующей структуры полимерного композитного материала с использованием разработанной программной системы для расчета глобальных переменных. В полученной 3D-модели управляющие параметры выражены с помощью глобальных переменных; таким образом, соз-

Abstract. The authors built a 3D model of a woven reinforcing structure of a polymer composite material using the developed software system for calculating global variables. In the developed 3D model, the control parameters are expressed using global variables, thus, the resulting model can be completely changed by varying the values of

данная модель может быть полностью изменена путем варьирования значений одной или нескольких управляющих переменных.

one or more control variables.

Ключевые слова: полимерный композитный материал, армирующая текстильная структура, геометрическая модель ткани, твердотельное моделирование

Keywords: polymer composite material, reinforcing textile structure, geometric model of fabric, solid modeling

Введение

Полимерные композитные материалы (далее – ПКМ) представляют собой многокомпонентные структуры, состоящие, как правило, из матрицы, армированной наполнителями. ПКМ как конструкционные материалы являются основой для создания изделий с высокими физико-механическими свойствами, что определяет их востребованность во многих отраслях промышленного производства. Значительное количество композитов превосходит традиционные материалы и сплавы по своим как функциональным, так и конструктивным параметрам.

В настоящее время совершенствование методов синтеза изделий из ПКМ является одной из наиболее перспективных областей научных исследований, а оптимизация параметров ПКМ на этапе их проектирования представляет собой приоритетную задачу при разработке их производственного процесса.

Основная часть

Целью исследования является разработка программного средства для расчета управляющих параметров геометрической модели тканой структуры, формирующей основу технологического процесса создания трехмерной твердотельной модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала.

Традиционно для построения трехмерных моделей тканых структур используются геометрические модели тканой структуры, спроектированные для нитей с круглым, эллиптическим и линзовидным сечениями¹. Нами разработаны геометрические трехмерные твердотельные модели тканых структур с упомянутыми типами сечений², однако они были реализованы для ограниченного перечня геометрических параметров единичной армирующей структуры и не позволяли выполнять их коррекцию без существенного редактирования самой модели. Такой подход к методике

¹ Суворов И. А., Ершов С. В., Кузнецов В. Б., Калинин Е. Н. Создание параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры композиционного материала // Физика волоконистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сборник материалов XXII Международного научно-практического форума «SMARTEX – 2019», 25–27 сентября 2019 г. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 2. – С. 194–198.

² Суворов И. А., Ершов С. В., Кузнецов В. Б. Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции / под редакцией А. Ю. Матрохина, П. Б. Разговорова. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 1. – С. 310–312.

моделирования тканой армирующей структуры ПКМ оказался неэффективным с точки зрения решения задач моделирования и проектирования изделий из ПКМ в широком диапазоне изменяющихся параметров характеристик армирующей структуры. По этой причине в настоящей работе нами представлено создание программного средства для расчета управляющих параметров геометрической модели тканой структуры, которые напрямую связаны с внешней базой данных и программным инструментом, ориентированным на синтез геометрической трехмерной модели.

Для математического описания моделируемой тканой армирующей структуры полимерного композита на данном этапе нами был использован тип параметрической модели с линзовидным поперечным сечением нити¹. Такая модель обладает возможностью более точного математического описания и характеризуется более адекватным соответствием геометрических параметров реальной тканой структуре, поэтому средствами приведенных математических представлений можно получить математическое описание для иных видов геометрических моделей тканых армирующих структур ПКМ².

Система уравнений для линзовидной геометрической модели имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= (l_2 - D_2) \cos \theta_2 + D_2 \sin \theta_2, \\ h_2 &= (l_2 - D_1 \theta_1) \sin \theta_1 (1 - \cos \theta_1), \\ D_1 &= 2R_2 + b_1, \\ a_2 &= 2d_2 + \sin \theta_1, \\ b_2 &= 2d_2 + \cos \theta_1, \\ e_2 &= a_1 / b_1, \\ \sin \phi_1 &= 2e_1 / (1 + e_1^2), \\ h_1 + h_2 &= b_1 + b_2, \\ l_2 &= D_1 \theta_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где h_1, h_2 – высота нитей основы и утка; a_1, b_1 – высота / ширина линзовидного сечения нити; D – сумма диаметров нитей основы и утка; d_1, d_2 – диаметры нитей основы и утка соответственно; p_1, p_2 – расстояние между нитями основы и уточной нитью соответственно; l_1, l_2 – длины нитей основы и утка; θ_1, θ_2 – углы плетения нитей основы и утка, e – степень смятия нити. Индексы «1» и «2» в приведенных выше переменных относятся к деформации основы и утка соответственно³.

Для разработки программного средства, необходимого для определения значений

¹ Суворов И. А., Ершов С. В., Кузнецов В. Б. Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции / под редакцией А. Ю. Матрохина, П. Б. Разговорова. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 1. – С. 310–312.

² Modelling and predicting textile behavior / edited by X. Chen. – Cambridge; New Dehli: Woodhead Publishing; Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. – 536 p.

³ Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art // Advances in Modern Woven Fabrics Technology / edited by S. Vassiliadis. – Rijeka, Croatia: Books on Demand, 2011. – P. 41–61.

глобальных управляющих переменных в качестве среды для проектирования и реализации геометрической модели, нами использованы пакеты расширения системы программирования сверхвысокого уровня MATLAB¹. Выбор программной среды расчета параметров геометрической модели тканой структуры ПКМ обусловлен необходимостью и возможностью математического анализа и передачи для дальнейшего изучения обработанных данных в CAD / CAM-комплексе твердотельного моделирования SolidWorks², обладающем рядом достоинств (возможностью тонкой настройки шага сетки, опциональных модулей, позволяющих расширить базовые функции модели, возможностью системной интеграции с другими внешними приложениями и возможностью организованного взаимодействия разработанных твердотельных моделей в системе MATLAB)³.

В ходе создания программного средства для определения его характеристик нами построен алгоритм его реализации. Блок-схема этого алгоритма, состоящая из трех ключевых структурных блоков (операции по анализу данных, обработка данных, построение трехмерной модели тканой структуры), представлена на рис. 1.

Разработанное нами программное средство выполняет обработку заданных параметров структуры ПКМ и вычисление основных параметров нитей, образующих ее, а также осуществляет дальнейшую загрузку результатов вычислений во внешнюю базу данных. При этом дополнительное преобразование полученных сведений под спецификацию программного комплекса SolidWorks осуществляется перед загрузкой во внешнюю базу данных.

¹ Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x.: в 2 т. – Москва: Диалог-МИФИ, 1999. – Т. 1. – 366 с.

² Кузнецов В. Б., Кожевников С. О., Малов М. С. Анализ технических возможностей SOLIDWORKS при моделировании движения жидкости в устройствах для механоактивации коллоидных систем // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов V Международной молодежной научно-практической конференции (Курск, 14 ноября 2018 г.): в 2 т. / под редакцией Е. В. Павлова. – Курск: Университетская книга, 2018. – Т. 1. – С. 335–341.

³ Мартынов Н. Н., Иванов А. П. MATLAB 5.x. Вычисления, визуализация, программирование. – Москва: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. – 336 с.

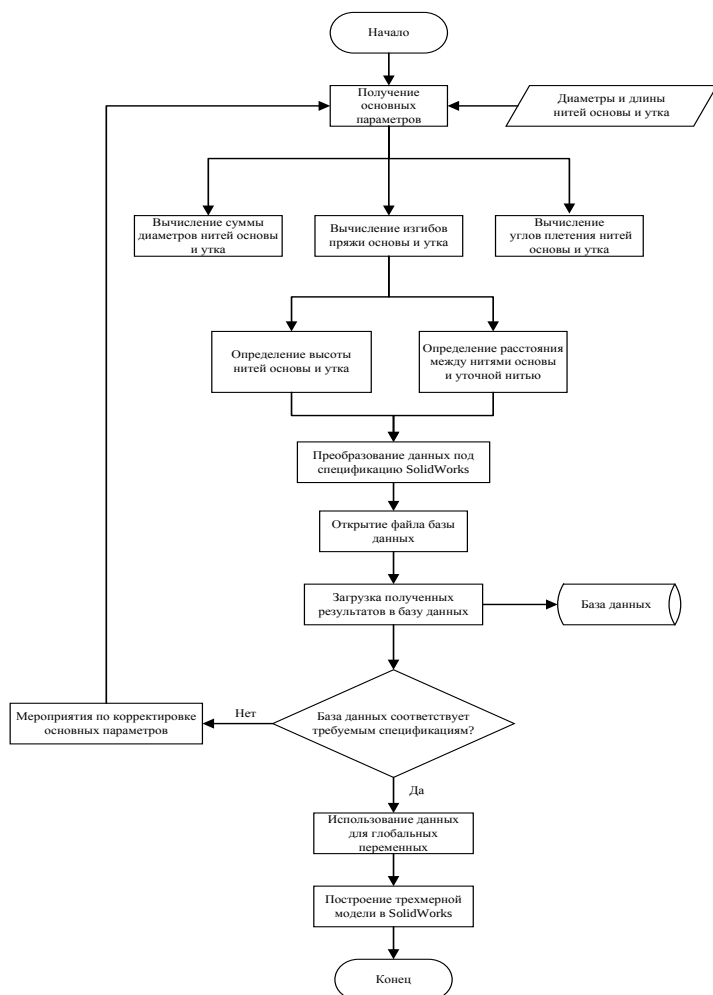


Рис. 1. Алгоритм обработки заданных параметров структуры ПКМ, основных параметров нитей и обеспечения трансляции результатов предварительных вычислений во внешнюю базу данных

По приведенным выше зависимостям системы уравнений (1) геометрической модели ткани нами была разработана параметрическая 3D-модель (см. рис. 2) двумерной элементарной ячейки тканой структуры, которая построена путем наложения линейных геометрических параметров нитей и их поперечных сечений для получения заданной конфигурации.

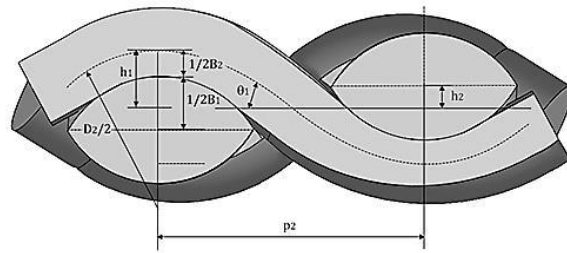


Рис. 2. Параметрическая 3D-модель двумерной элементарной ячейки тканой структуры

На рис. 3 представлены аксонометрические образы параметрических 3D-моделей элементарной ячейки тканой армирующей структуры композита. Для топологической оптимизации геометрических параметров моделей, таких как длина нити, радиусы кривизны нитей, образующих сечение элементарной ячейки, и т. д., были задействованы глобальные управляющие переменные, объединяющие все размерности модели посредством системы математических уравнений (1). Глобальные управляющие переменные могут использоваться для управления уравнениями и измерениями, поскольку обладают свойством двунаправленности (обеспечивают соответствующую изменяемость величин взаимосвязанных переменных при изменении определенной глобальной переменной).

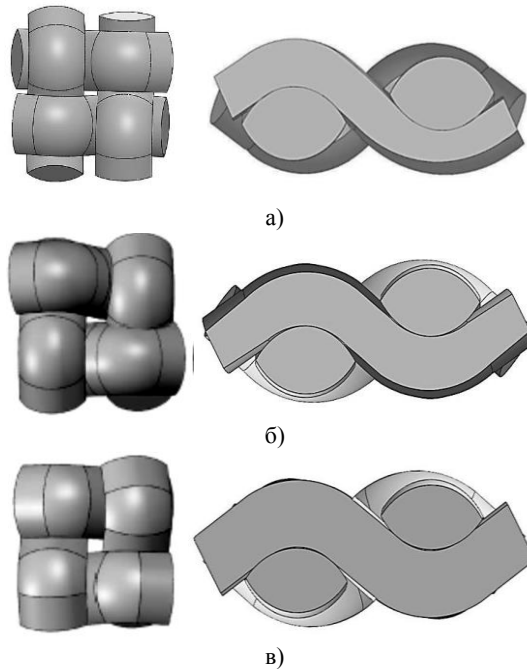


Рис. 3. Аксонометрические образы параметрических 3D-моделей тканых структур с различным раппортом переплетений а) – эксперимент № 1, б) – эксперимент № 2, в) – эксперимент № 3

По результатам вычислений геометрических параметров нами были построены 3D-модели в системе SolidWorks. В таблице приведены заданные значения, использованные в качестве основных, как глобальные переменные, загружаемые в виде файла MATLAB.

Таблица

Значения глобальных переменных, загружаемых в виде файла MATLAB

№ эксперимента	a , мм	b , мм	p_1, p_2 , мм	h_1, h_2 , мм
1	8	5	10	7,5
2	6	3,5	8	2,3
3	14	10	16	5,5

Применение геометрического моделирования с использованием глобальных управляющих переменных позволяет изменять параметры модели применительно к конкретно решаемой задаче путем варьирования значений одной или нескольких управляющих переменных, получать подробную информацию об армирующей структуре ПКМ и давать оценку погрешности выходных параметров 3D-модели армирующей структуры после ее наработки на ткацком станке.

Выводы

Таким образом, в результате выполненной работы нами решена задача по созданию и реализации программного средства, позволяющего определить глобальные управляющие переменные, используемые для создания 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала на основе интеграции системы MATLAB и комплекса твердотельного моделирования SolidWorks.

Исходя из полученных численных результатов твердотельного моделирования тканых армирующих структур ПКМ можно сделать вывод об успешном (адекватном) взаимодействии разработанного нами программного средства в виде файла MATLAB, обеспечивающего вычислительный процесс управляющих переменных геометрической модели тканой структуры, и комплекса твердотельного моделирования армирующей тканой структуры средствами CAD / CAM-комплекса твердотельного моделирования SolidWorks.

Литература

Кузнецов В. Б., Кожевников С. О., Малов М. С. Анализ технических возможностей SOLIDWORKS при моделировании движения жидкости в устройствах для механоактивации коллоидных систем // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов V Международной молодежной научно-практической конференции (Курск, 14 ноября 2018 г.): в 2 т. / под редакцией Е. В. Павлова. – Курск: Университетская книга, 2018. – Т. 1. – С. 335–341.

Мартынов Н. Н., Иванов А. П. MATLAB 5.x. Вычисления, визуализация, программирование. – Москва: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. – 336 с.

Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x.: в 2 т. – Москва: Диалог-МИФИ, 1999. – Т. 1. – 366 с.

Суворов И. А., Ершов С. В., Кузнецов В. Б. Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сборник материалов

всероссийской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции / под редакцией А. Ю. Матрохина, П. Б. Разговорова. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 1. – С. 310–312.

Суворов И. А., Ершов С. В., Кузнецов В. Б., Калинин Е. Н. Создание параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры композиционного материала // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сборник материалов XXII Международного научно-практического форума «SMARTEX – 2019», 25–27 сентября 2019 г. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 2. – С. 194–198.

Modelling and predicting textile behavior / edited by X. Chen. – Cambridge; New Dehli: Woodhead Publishing; Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. – 536 p.

Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art // Advances in Modern Woven Fabrics Technology / edited by S. Vassiliadis. – Rijeka, Croatia: Books on Demand, 2011. – P. 41–61.

References

Kuznetsov V. B., Kozhevnikov S. O., Malov M. S. Analiz tekhnicheskikh vozmozhnostei SOLIDWORKS pri modelirovanii dvizheniia zhidkosti v ustroistvakh dlia mekhanoaktivatsii kolloidnykh sistem [Capability study of SOLIDWORKS while modeling fluid motion in devices for the mechanoactivation of colloidal systems]. *Kachestvo produktii: kontrol', upravlenie, povyschenie, planirovanie: sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kursk, 14 noiabria 2018 g.): v 2 t.* [Product quality: control, management, improvement, planning: proceedings of scientific papers of the V International youth research and practice conference (Kursk, 14 November 2018): in 2 volumes; ed. by E. V. Pavlov]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2018, vol. 1, pp. 335–341.

Martynov N. N., Ivanov A. P. *MATLAB 5.x. Vychisleniia, vizualizatsiia, programmirovaniie* [MATLAB 5.x. Computing, visualisation, software engineering]. Moscow: KUDITS-OBRAZ, 2000. 336 p.

Potemkin V. G. *Sistema inzhenernykh i nauchnykh raschetov MATLAB 5.x.: v 2 t.* [The system of engineering and scientific computations MATLAB 5.x.: in 2 volumes]. Moscow: Dialog-MIFI, 1999, vol. 1. 366 p.

Suvorov I. A., Ershov S. V., Kuznetsov V. B. Razrabotka parametricheskoi 3D-modeli tkanoi armiruiushchei struktury polimernogo kompozitsionnogo materiala [Designing a parametric 3D-model of a fabric reinforcement structure of a polymeric composite material]. *Molodye uchenye – razvitiu Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy (POISK-2019): sbornik materialov vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Young researchers – for the development of The National Technological Initiative (POISK-2019): proceedings of the All-Russian (with international participation) youth research and practice conference; ed. by A. Iu. Matrokhin, P. B. Razgovorov]. Ivanovo: IVGPU, 2019, part 1, pp. 310–312.

Suvorov I. A., Ershov S. V., Kuznetsov V. B., Kalinin E. N. Sozdanie parametricheskoi 3D-modeli tkanoi armiruiushchei struktury kompozitsionnogo materiala [Developing a parametric 3D-model of a fabric reinforcement structure of a composite material]. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy: sbornik materialov XXII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma “SMARTEX – 2019”, 25–27 sentiabria 2019 g.* [Physics of fiber materials: structure, characteristics, high technologies and materials: proceedings of the XXII International research and practice forum “SMARTEX – 2019”, 25–27 September 2019]. Ivanovo: IVGPU, 2019, part 2, pp. 194–198.

Modelling and predicting textile behavior; ed. by X. Chen. Cambridge; New Dehli: Woodhead Publishing; Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 536 p.

Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art. *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*; ed. by S. Vassiliadis. Rijeka, Croatia: Books on Demand, 2011, pp. 41–61.

Для цитирования: Суворов И. А., Еришов С. В., Кузнецов В. Б., Калинин Е. Н. Проектирование твердотельной модели тканой армирующей структуры полимерного композитного материала с использованием управляющих переменных // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 36–44. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-3

For citation: Suvorov I. A., Ershov S. V., Kuznetsov V. B., Kalinin E. N. Designing a solid-state model of a fabric reinforcement structure of a polymeric composite material using control variables. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 6 (99), pp. 36–44. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-3