

УДК 677.024.1

DOI 10.47367/0021-3497_2021_4_195

**МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА
СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ 3D-ТКАНЫХ СТРУКТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОКСЕЛЬНОГО ПОДХОДА**

**METHODOLOGY FOR CALCULATING
THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS
BASED ON 3D-WOVEN TEXTURES
USING THE VOXEL APPROACH**

А.Б. БАЛАШОВ

A.B. BALASHOV

(ООО НПО "Программируемые Композиты", г. Кострома, РФ)

(ООО NPO "Programmable Composites" LLC, Kostroma, Russia)

E-mail: balashovandrej@yandex.ru

В статье сделан краткий обзор методов решения задач прогнозирования анизотропных свойств композиционных материалов. Разработан новый подход к прогнозированию свойств композиционных материалов на уровне одиночного тканого переплетения основной и уточной нитей – вокселя. Описаны преимущества предлагаемого подхода. В основе подхода учет изменения свойств композиционного материала от направления пространственной ориентации армирующей нити. Для практической реализации разработанного подхода прогнозирования свойств композиционных материалов на основе 3D-тканых структур использовано ПО "Преформа". Предложена методология расчета композиционных деталей в САЕ-системах на основе разработанного подхода определения свойств материала с формированием конечно-элементной модели для заданной детали идентичной по геометрии воксельной модели преформы. Для расчета свойств композиционного материала в вокселях применен метод многомасштабной гомогенизации. Разработано соответствующее программное обеспечение для создания цифрового двойника детали в программном обеспечении LS-Dyna. Приведены результаты моделирования.

The article provides a brief overview of methods for solving problems of predicting the composite materials anisotropic properties. A new approach has been developed to predict the properties of composite materials at the level of a single woven weave of the main and weft threads – voxel. The advantages of the proposed approach are described. The approach is based on taking into account changes in the properties of the composite material from the direction of the spatial orientation of

the reinforcing thread. For the practical implementation of the developed approach to predicting the properties of composite materials based on 3D-woven structures, the Preform software was used. A methodology for calculating composite parts in CAE systems is proposed based on the developed approach for determining material properties with the formation of a finite element model for a given part of a preform voxel model identical in geometry. To calculate the properties of the composite material in voxels, the method of multiscale homogenization is used. The corresponding software has been developed to create a digital double of the part in the LS-Dyna software. The simulation results are presented.

Ключевые слова: свойства композиционных материалов, 3D-ткачество, математическое моделирование, метод конечных элементов, гомогенизация, программирование.

Keywords: properties of composite materials, 3D-weaving, mathematical modeling, finite element method, homogenization, programming.

К наиболее важным и трудным теоретическим проблемам в области композиционных материалов на текстильной основе относятся моделирование сложных и разнообразных структур переплетений нитей, моделирование прогрессирующих повреждений и отказов, прогноз конечных напряжений и деформаций. Для решения задач определения напряженно-деформированного состояния заданной композитной детали необходимо знание свойств ее структурных составляющих. Получение полного набора предельных характеристик разрушения для каждого текстильного композита само по себе является большой проблемой. Сегодня наиболее изученными данные вопросы являются для однонаправленных (UD) композиционных материалов и ламинатов на основе соединения в общий пакет однослойных армирующих текстильных структур с дальнейшей их пропиткой связующим [1...6]. Композиционные материалы на основе 3D-текстильных структур отличаются особой сложностью в моделировании их геометрической структуры и прогнозирования их свойств в связи с реальной трехмерностью исследуемого объекта и практически неограниченным многообразием вариантов построения текстильных структур для обеспечения заданных свойств. Это можно сделать либо экспериментальным способом, путем проведения механических испытаний, как это описано в работе [7], либо с помощью кодов

прогнозного анализа [8...10]. Для прогнозирования упругих свойств и анализа напряжений и деформаций различных типов текстильных композитов доступно множество моделей и вычислительных инструментов [11...14]. Эти методы варьируются от относительно простых аналитически и недорогих в вычислительном отношении методов, хотя и ограниченных в их точности из-за чрезмерно упрощенного представления геометрии волокна и механистической гипотезы, до специализированного трехмерного вариационного анализа и инструментов метода конечных элементов. Возможно, рациональным подходом при выборе метода для решения задач прогнозирования свойств композиционных материалов является оптимальное сочетание и теоретических и экспериментальных методов с применением приближенных методов на стадии проектирования структуры армирующей основы композита, а затем вычисление свойств композита более точными методами. Сложность задач прогнозирования свойств композиционных материалов связана с их существенной анизотропией. Анизотропия свойств на примере углепластика приведена в табл. 1 [15], которая показывает определяющую роль направления ориентации армирующих нитей на его свойства в различных направлениях при различных видах напряженно-деформированного состояния.

Наименование показателя	Единица измерения	Направление нагрузки	Значение показателя
Прочность при растяжении	МПа	Вдоль волокон	1500
		Поперек волокон	32
Прочность при сжатии	МПа	Вдоль волокон	1200
		Поперек волокон	140
Модуль упругости при растяжении	ГПа	Вдоль волокон	140
		Поперек волокон	9

Учитывая данный факт, можно сказать, что прочностные свойства армирующей структуры будут закладываться на уровне переплетений нитей основы и утка, которые меняют свою ориентацию по своей длине в детали в зависимости от видов тканых переплетений. Для разработки новой методологии с точки зрения детального описания тканой структуры целлотканой преформы лучше всего подходит программное обеспечение "Преформа" [16],

[17] с воксельным подходом к описанию тканой структуры. Преимущество данного подхода заключается в описании тканой структуры, с одной стороны, для всей заданной детали, а с другой стороны, с детализацией ее до уровня одиночного переплетения уточной и основной нити (рис. 1: а) воксельное представление тканой структуры [16]; б) примеры тканых переплетений в вокселе в ПО "Преформа") [16]).

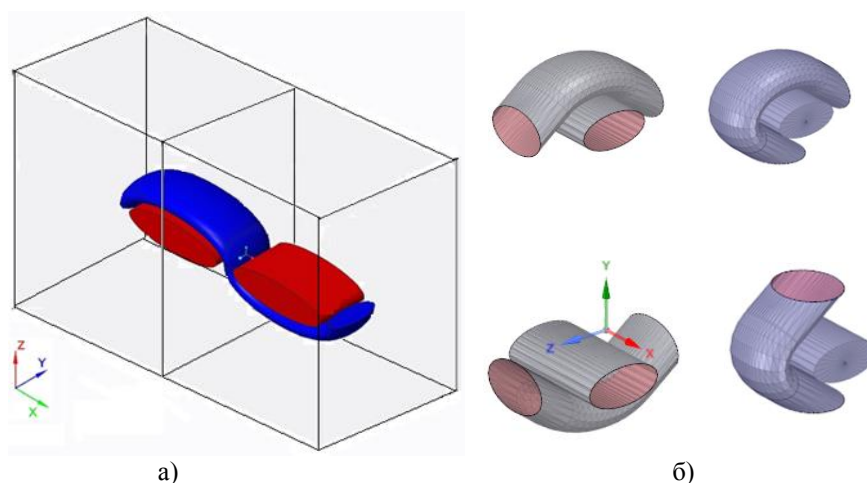


Рис. 1

Применение воксельного подхода для прогнозирования свойств композиционных материалов является более перспективным, чем традиционный подход с использованием метода гомогенизации для "представительского объема" материала по следующим причинам.

1. Он является более универсальным по отношению к подходу выделения "представительского объема" материала. "Представительский объем" не может быть далее детализирован обычными программными

средствами, в то время как на основе воксельной модели структуры ткани он может быть собран из отдельных вокселей.

2. Точное выделение в сложной структуре преформы для детали только регулярными ткаными структурами невозможно в связи со сложным объемным профилем детали. Это приводит к появлению части одиночных вокселей, не связанных с регулярной структурой, но присутствующих в структуре детали с неопределенными свойствами. При использовании воксельного

подхода описание свойств всех тканых переплетений происходит на 100% по объему преформы для заданной детали.

3. Размер вокселя существенно меньше размера "представительского объема" и тогда можно ожидать меньшего порядка разрешающей системы уравнений, а следовательно, и более быстрого решения задачи. Конечно, оригинальных вокселей в реальной модели будет больше, чем различных "представительских объемов" материала, но с точки зрения вычислительных затрат существенно быстрее решать множество задач с низким порядком системы уравне-

ний, чем малое количество систем уравнений с высоким порядком, особенно для динамических задач. Поэтому можно ожидать ускорения решения задачи с применением воксельного подхода.

4. Возможность учета свойств вокселей, описывающих классическую кромку на границах детали. Применение подхода с применением "представительского объема" в данном случае невозможно.

Представление 3D-раппорта в виде совокупности оригинальных вокселей представлено на рис. 2.

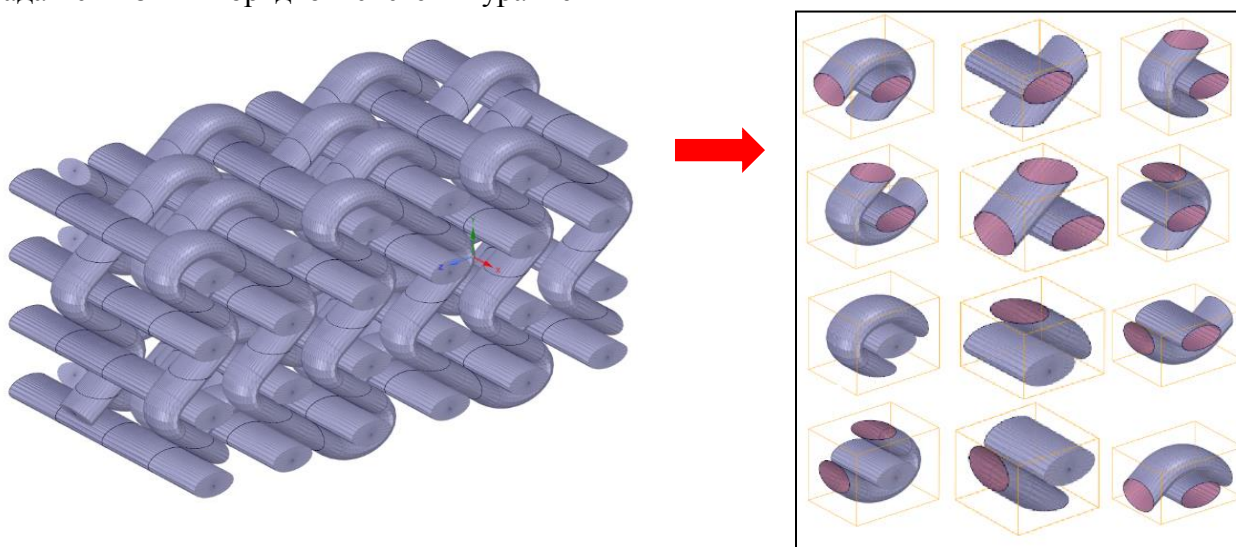


Рис. 2

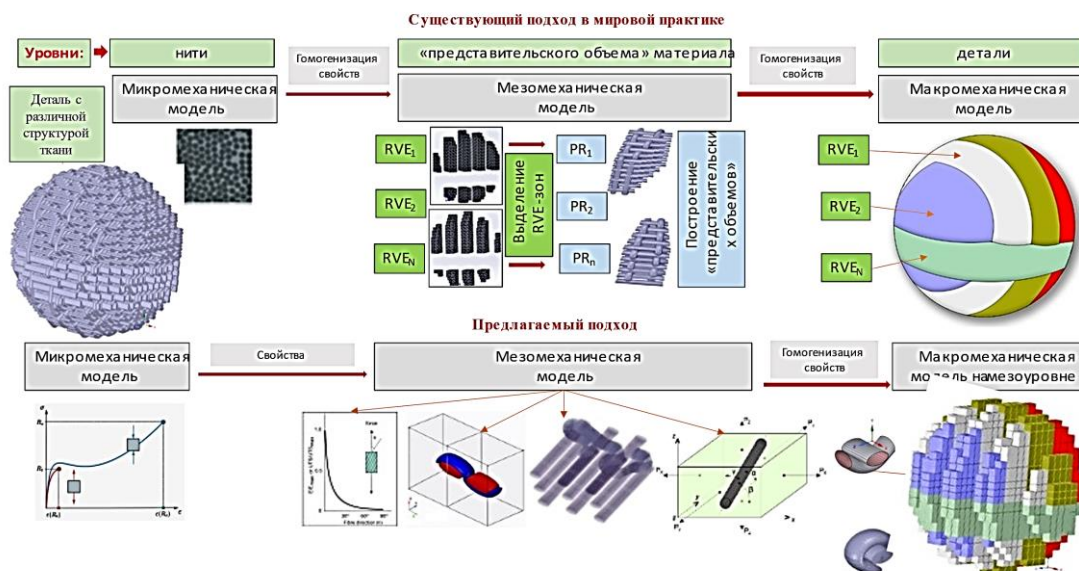


Рис. 3

Для решения задачи прогнозирования свойств композиционного материала в вокселе возможны два подхода – упрощенный с применением правила смеси через объемное соотношение армирующего материала и материала связующего и более точный – прямое применение метода конечных элементов. Тогда общую методологию предлагаемого подхода к прогнозированию свойств композиционных материалов можно изобразить схемой на рис. 3. На ней же показано отличие предлагаемой методологии от существующей традиционной в мировой практике.

Безусловно, при определении свойств армирующих нитей необходимо учитывать пространственную ориентацию нитей в вокселе. При этом, даже в одном вокселе,

можно наблюдать очень большие изменения ориентации нитей основы, а потенциально и утка в пространстве, что не может не сказаться на свойствах нитей в вокселе. Можно вычислить точку входа и выхода нитей основы и утка в воксель, но это даст большую погрешность в решении задачи, поскольку внутри вокселя ориентация может существенно меняться. Для более точного учета изменения свойств нитей в зависимости от ориентации нитей в пространстве применим мозаичный подход, изложенный в [18]. Сущность данного метода схематично изображена на рис. 4 (мозаичный подход к прогнозированию свойств композиционного материала с учетом ориентации нитей в пространстве).

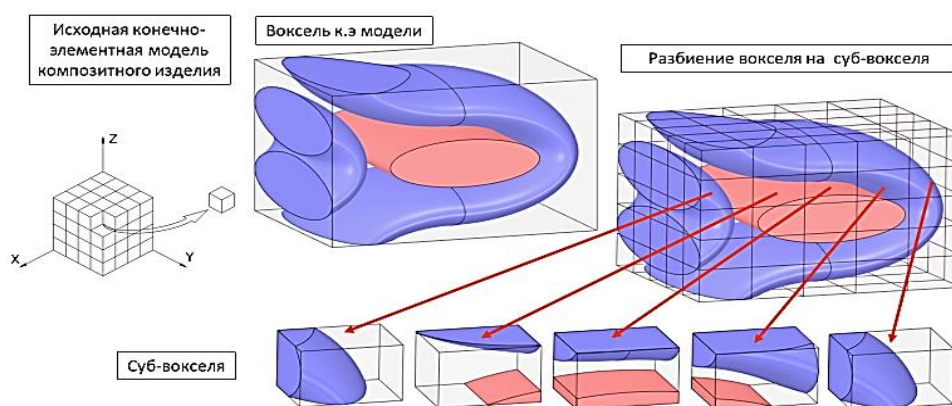


Рис. 4

Согласно данному подходу воксель делится на N субвокселей, количество которых будет зависеть от шага разбиения вокселя по координатным осям XYZ . В пределах субвокселя можно считать отрезок нити прямым и определить углы по отношению к координатным осям. Шагом разбиения вокселя на субвоксели можно управлять качеством представления описания траектории центральной линии нитей. Чем на большее число субвокселей будет разбит воксель, тем точнее будет описана траектория нитей, представленная в виде совокупности прямых отрезков, но соответственно увеличится время расчетов. Нахождение оптимальной разбивки вокселя на субвоксели могут показать только вычислительные эксперименты, которые на данном этапе не проводились. В каждом субвокселе можно

определить направление отрезка нити и, в зависимости от значений углов его ориентации в пространстве, присвоить ему свойства нити из экспериментальных или виртуальных испытаний (рис. 5 – учет положения армирующей нити в вокселе или субвокселе для последующего задания свойств материала). Таким образом, можно определить свойства всех субвокселей в вокселе. Зная свойства субвокселей, можно, применяя правила осреднения, определить свойства в вокселе, а определив свойства во всех оригинальных вокселях модели, можно подготовить модель детали для последующих расчетов в САЕ-системах, в которых останется только задать граничные и начальные условия для однозначного решения задачи.

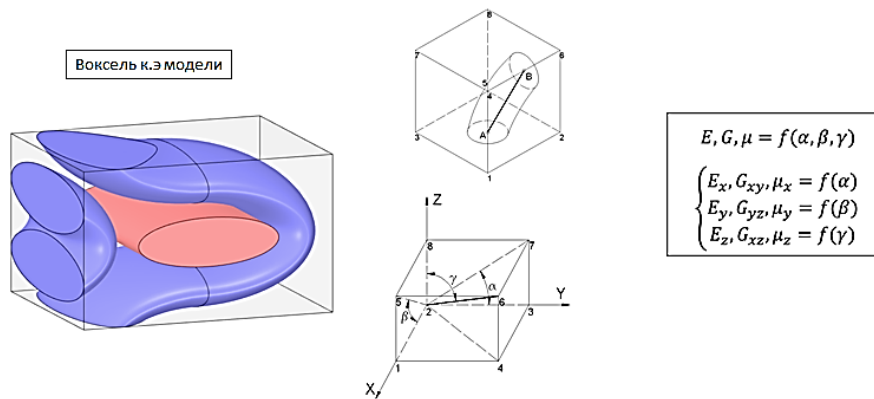


Рис. 5

Конечной целью расчета заданной детали является проверка ее работоспособности, согласно требованиям ТЗ, которая осуществляется в САЕ-системах. При этом для задания начальных и граничных условий решения задачи исходными данными для расчета является геометрическая модель заданной детали и свойства материала, из которого она выполнена. Разработанная геометрическая модель для САЕ-анализа должна быть разбита на конечные элементы, которым должны быть заданы свойства. Поэтому дальнейшей задачей ПО

"Преформа" является перенос геометрической твердотельной модели композитной детали в САЕ-систему с вычисленными, согласно разработанной методологии, свойствами вокселей. Данная задача легко решается с учетом того, что воксель, по своей сути, геометрически является полным аналогом 8-узловой типа конечных элементов, используемых в библиотеках всех распространенных САЕ-систем (рис. 6 – аналогия геометрии вокселя и 8-узловой конечного элемента в САЕ-системах).

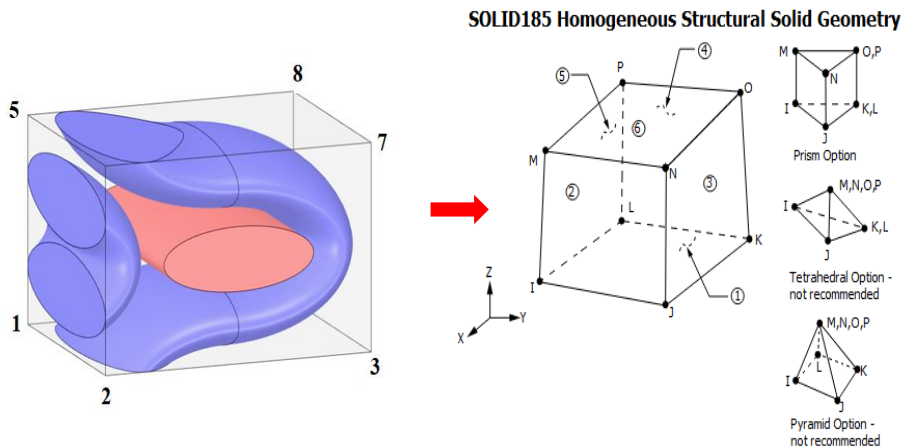


Рис. 6

Поэтому для передачи данных из ПО "Преформа" в САЕ-систему нужно только соблюдение правила обхода узлов конечных элементов, описанных для данной системы. Тогда представляется возможным сформировать автоматическую передачу из ПО "Преформа" полную геометрическую модель композитной детали со всеми свойствами вокселей – конечных элементов и

даже уже разбитую на конечные элементы. Пользователю САЕ-системы останется только лишь задать граничные и начальные условия и выполнить расчет заданной детали. В данной работе полная модель композитной детали выгружается в САЕ-систему Ls-Dyna. Необходимо отметить, что разработанный подход к решению задачи имеет еще существенное преимуще-

ство, заключающееся в том, что в САЕ-систему переносится модель с уже разбитой конечно-элементной сеткой, причем близкой к оптимальной топологии.

Пример реализации разработанной методологии для расчета заданной детали сложной формы приведен на рис. 7. В качестве армирующей основы взята углеродная нить фирмы UMATEX UMT 49-12K-EP, в качестве связующего – эпоксидная смола ЭД 20. Для каждого вокселя на основе известных свойств нити и связующего в зави-

симости от типа тканого переплетения определены свойства конечных элементов, как ортотропного материала. В частности, рассчитаны модули упругости 1 и 2 рода, соответствующие коэффициенты Пуассона и пределы прочности по всем осям координат при деформациях растяжения, сжатия и сдвига. На рис. 7 каждый воксель – конечный элемент модели имеет собственные оригинальные свойства, выделенные в LS-Dуна различными цветами.

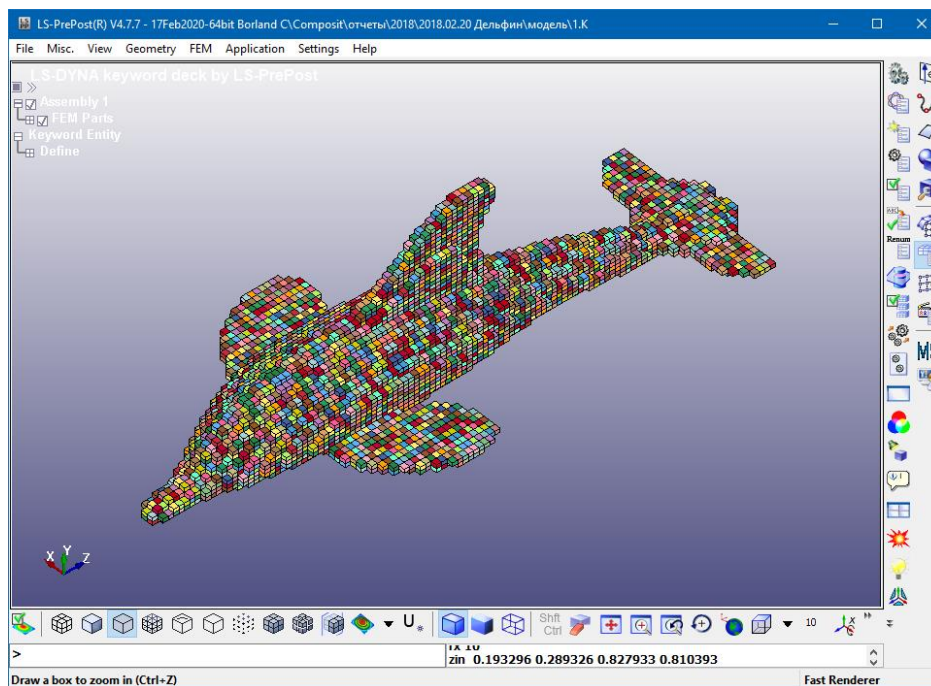


Рис. 7

Определение свойств материала с детализацией до уровня одной тканой ячейки в виде вокселя дает возможность получить высокоточный цифровой двойник заданной детали и позволяет максимально подготовить расчетную модель для получения ее напряженно-деформированного состояния в САЕ-системах.

ВЫВОДЫ

1. С применением воксельного подхода разработана новая методология прогнозирования свойств композиционных материалов на основе цельнотканых 3D-преформ, позволяющая повысить точность описания анизотропных свойств заданной детали.

2. На основе ПО "Преформа" разработана система формирования цифрового двойника композиционной детали для ее последующего расчета в САЕ-системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов И. Наполнители композиционных материалов [Электронный ресурс]: Режим доступа : <http://www.detalmach.ru/composit1.htm>. (дата обращения 20.05.2021.)
2. Behera B.K., Mishra R. 3-dimensional weaving // Indian journal of fibre & textile research. – №33, 2008. P. 274...287.
3. Fredrik S. 3D-woven reinforcement in composites // KTH school of engineering sciences. – Stockholm, 2012.
4. Mohamed M.H. Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products // Kth school of engineering sciences.

5. *Xin D., Shanghai Y.H.* Geometric analysis of 3D woven structures and determination of fiber volume fractioning [Electronic resource] // College of Textiles, Dong Hua University. - Access mode: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/Paper-1039.pdf>. (access date 22.05.2021)
6. *Tian W., Zhu C., Shanghai S.W.* Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Dong Hua University. P.23...27.
7. *Барышев А.Н.* Разработка экспериментально-теоретического метода анализа деформационных и прочностных характеристик высокотемпературных композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019.
8. *Скворцов Ю.В.* Механика композиционных материалов. – Самара, 2013.
9. *Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В.* Методы расчета на прочность и жесткость элементов конструкций из композитов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015.
10. *Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В.* Применение MSC Nastan для исследований краевых эффектов в слоистых композитах [Мультимедиа] // XVII Российская конференция пользователей систем инженерного анализа MSC SOFTWARE. Форум MSC 2014. – 2014.
11. *Bogdanovich A.E.* Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites // Journal of materials science. – Vol. 41. № 20, 2006. P.6547...6590.
12. *Bogdanovich A.E.* Multiscale predictive analysis of 3-d woven composites // 35th international sampe technical conference papers on CD-ROM. - Dayton. – 2003.
13. *Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I.* Meso-FE Modelling of Textile Composites: Road Map, Data Flow and Algorithms // Composites science and technology. – Vol. 67, 2007. P. 1870...1891.
14. *Bogdanovich A.E.* Computational Modeling and Analysis of Textile Composites / A.E. Bogdanovich // Accomplishments and Challenges, SAMPE'08 Conference Papers on CD-ROM. – Long Beach, CA, May 18-22, 2008.
15. *Комарова Т.В.* Получение углеродных материалов. – М.: РХТУ им. Д.И Менделеева, 2001.
16. *Киселев А.М.* Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения: Дис. ... докт. техн. наук. – Казань, 2019.
17. Свидетельство №2018618158 Преформа / А.М. Киселев, М.В. Киселев. - Зарег. В реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности 10.07.2018.
18. *Димитриенко Ю.И., Соколов А.П.* Разработка численного метода расчета эффективных упругих характеристик композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008, №2. С. 56...67.
1. *Karimov I.* Napolniteli kompozitsionnykh materialov [Elektronnyy resurs]: Rezhim dostupa: <http://www.detalmach.ru/composit1.htm>. (data obrashcheniya 20.05.2021.)
2. *Behera V.K., Mishra R.* 3-dimensional weaving // Indian journal of fibre & textile research. – №33, 2008. P. 274...287.
3. *Fredrik S.* 3D-woven reinforcement in composites // KTH school of engineering sciences. – Stockholm, 2012.
4. *Mohamed M.H. Bogdanovich A.E.* Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products // Kth school of engineering sciences.
5. *Xin D., Shanghai Y.H.* Geometric analysis of 3D-woven structures and determination of fiber volume fractioning [Electronic resource] // College of Textiles, Dong Hua University. - Access mode: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/Paper-1039.pdf>. (access date 22.05.2021)
6. *Tian W., Zhu C., Shanghai S.W.* Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Dong Hua University. P. 23...27.
7. *Baryshev A.N.* Razrabotka eksperimental'no-teoreticheskogo metoda analiza deformatsionnykh i prochnostnykh kharakteristik vysokotemperaturnykh kompozitsionnykh materialov: Dis. ... kand. tekhn. nauk. – М., 2019.
8. *Skvortsov Yu.V.* Mekhanika kompozitsionnykh materialov. – Samara, 2013.
9. *Maksimenko V.N., Olegin I.P., Pustovoy N.V.* Metody rascheta na prochnost' i zhestkost' elementov konstruktsiy iz kompozitov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2015.
10. *Dudar'kov Yu.I., Levchenko E.A., Limonin M.V.* Primenenie MSC Nastan dlya issledovaniy kraevykh effektov v sloistykh kompozitakh [Mul'timedia] // XVII Rossiyskaya konferentsiya pol'zovateley sistem inzhernogo analiza MSC SOFT-WARE. Forum MSC 2014. – 2014.
11. *Bogdanovich A.E.* Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven composites // Journal of materials science. – Vol. 41. № 20, 2006. P.6547...6590.
12. *Bogdanovich A.E.* Multiscale predictive analysis of 3-d woven composites // 35th international sampe technical conference papers on CD-ROM. - Dayton. – 2003.
13. *Lomov S.V., Ivanov D.S., Verpoest I.* Meso-FE Modelling of Textile Composites: Road Map, Data Flow and Algorithms // Composites science and technology. – Vol. 67, 2007. P. 1870...1891.
14. *Bogdanovich A.E.* Computational Modeling and Analysis of Textile Composites / A.E. Bogdanovich // Accomplishments and Challenges, SAMPE'08 Conference Papers on CD-ROM. – Long Beach, CA, May 18-22, 2008.
15. *Komarova T.V.* Poluchenie uglerodnykh materialov. – М.: RKhtTU im. D.I Mendeleeva, 2001.

16. Kiselev A.M. Razrabotka metodologii proektirovaniya geometricheskikh struktur i prognozirovaniya svoystv tekstil'nykh materialov ob"emnogo stroeniya: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. – Kazan', 2019.

17. Svidetel'stvo №2018618158 Preforma / A.M. Kiselev, M.V. Kiselev. - Zareg. V reestre programm dlya EVM Federal'noy sluzhby po intellektual'noy sobstvennosti 10.07.2018.

18. Dimitrienko Yu.I., Sokolov A.P. Razrabotka chislennogo metoda rascheta effektivnykh uprugikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. – M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2008, №2. S. 56...67.

Рекомендована заседанием научно-технического совета. Поступила 16.08.21.
