Шабалин Л.П., Пузырецкий Е.А., Халиулин В.И., Батраков В.В. Моделирование процессов 3D-печати композитной оснастки и трансферного формования сетчатых конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. С. 159–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.15

Shabalin L.P., Puzyretskiy E.A., Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Modeling of 3D printing processes for composite tooling and transfer molding of grid structures. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 1, pp. 159-172. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.15

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.15
УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ 3D-ПЕЧАТИ КОМПОЗИТНОЙ ОСНАСТКИ И ТРАНСФЕРНОГО ФОРМОВАНИЯ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Л.П. Шабалин, Е.А.Пузырецкий, В.И. Халиулин, В.В.Батраков

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 30 ноября 2022 г.
Одобрена: 20 марта 2023 г.
Принята к публикации:
05 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

аддитивные технологии,
композиционный материал,
цифровой паспорт материала,
цифровой двойник изделия,
трансферное формование,
сетчатая конструкция, коробление.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается методика получения цифрового паспорта материала и разработки цифрового двойника изделия на различных этапах его изготовления. Объектом исследования является коническая сетчатая структура. Предмет исследования – процессы, происходящие в изделии на этапах изготовления.

В работе были рассмотрены следующие основные этапы создания сетчатой конструкции: 3D-печать заготовки оснастки изделия, выкладка углеродного однонаправленного материала, нагрев и пропитка преформы связующим, полимеризация связующего и коробление геометрии изделия.

Описан алгоритм определения свойств материалов и их калибровки с использованием современных программно-аппаратных средств и универсальных оснасток. Моделирование процесса 3D-печати оснастки производилось в программном комплексе Ansys. Поэтапное технологическое моделирование процесса трансферного формования производилось в программном комплексе ESI PAM-COMPOSITE. Результатом моделирования являются технологические параметры изготовления и геометрия формообразующей оснастки с упреждением на коробление.

© ПНИПУ

© **Шабалин Леонид Павлович** – к.т.н., доц., e-mail: leonid.shabalin@gmail.com.
Пузырецкий Евгений Александрович – инж., e-mail: ea.puzyretskiy@mail.ru.
Халиулин Валентин Илдарович – д.т.н., проф., e-mail: pla.kai@mail.ru.
Батраков Владимир Владимирович – доц., e-mail: vvbatrakov@kai.ru.

Leonid P. Shabalin – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, e-mail: leonid.shabalin@gmail.com.
Evgeniy A. Puzyretsky – Engineer, e-mail: ea.puzyretskiy@mail.ru.
Valentin I. Khaliulin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: pla.kai@mail.ru.
Batrakov V. Vladimirovich – Associate Professor, e-mail: vvbatrakov@kai.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MODELING OF 3D-PRINTING PROCESSES FOR COMPOSITE TOOLING AND TRANSFER MOLDING OF GRID STRUCTURES

L.P. Shabalin, E.A. Puzyretskiy, V.I. Khaliulin, V.V. Batrakov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 November 2022
Approved: 20 March 2023
Accepted for publication:
05April 2023

Keywords:

additive technologies, composite material, digital material passport, digital twin of the product, transfer molding, grid structure, warpage.

ABSTRACT

The paper discusses the method of obtaining a digital passport of the material and the development of a digital twin of the product at various stages of its manufacture. The object of research is a conical mesh structure. The subject of research is the processes occurring in the product at the manufacturing stages.

The following main stages of creating a mesh structure were considered in the work: 3D printing of a workpiece tooling, laying out a carbon unidirectional material, heating and impregnation of the preform with a binder, polymerization of the binder, and warpage of the product geometry.

An algorithm for determining the properties of materials and their calibration using modern software and hardware and universal equipment was described. Modeling of the tooling 3D printing process was carried out in the Ansys software package. Step-by-step technological modeling of the transfer molding process was carried out using the ESI PAM-COMPOSITE software package. The result of the simulation is the optimal technological manufacturing parameters and the geometry of the shaping tooling with anticipation of warping.

© PNRPU

Введение

Построение виртуальных двойников и проведение технологических расчетов является необходимым этапом разработки изделий из композиционных материалов. Это позволяет спрогнозировать и оптимизировать параметры технологических процессов и обеспечить высокое качество и точность изготовления конструкций [1; 2]. Кроме того, проведение серии вычислительных экспериментов приводит к существенному сокращению временных и финансовых затрат за счет уменьшения количества натурных испытаний и опытной отработки [3; 4].

Основной особенностью расчета процессов изготовления является технологическая наследственность этапов. Эта особенность подразумевает перенос результатов расчёта из одного технологического этапа на другой. В данном исследовании рассматриваются следующие этапы технологического процесса:

Изготовление оснастки:

- расчет послойной 3D-печати заготовки оснастки наполненным композитным материалом с использованием роботизированного комплекса;
- моделирование усадки и остаточных напряжений.

Изготовление сетчатой конструкции:

- создание углеволоконной преформы однонаправленной лентой;
- нагрев оснастки с преформой с учетом нестационарного теплового поля;
- пропитка преформы связующим;
- оценка отверждение и коробления;
- упреждение оснастки на коробление.

3D-печать, также известная как аддитивное производство, может использоваться для печати различных металлических, полимерных и композитных деталей со сложной геометрией при минимизации технологических отходов [5; 6]. За последние несколько лет отмечается значительный рост популярности технология 3D-печати, и, по прогнозам, она произведет революцию в обрабатывающей промышленности для создания высокоэффективных материалов нового поколения [7]. Основные рабочие процедуры создания изделия с использованием технологии 3D-печати одинаковы для всех доступных технологий и состоят из трех основных этапов, а именно: создание 3D-модели, разбиение её на слои и печать [8].

Классическая технология изготовления композитных изделий или их оснасток трехмерной печатью состоит в следующем: на традиционный 3D-принтер устанавливается модифицированная печатающая головка, имеющая две отдельные подачи: для связующего и армирующего материалов. После чего они поступают в сопло, где соединяются, осаждаются на печатном слое и быстро застывают [9; 10].

Широкое применение для изготовления 3D-печатных композитных оснасток нашла технология LSAM (Large Scale Additive Manufacturing), запатентованная производителем станков Thermwood [11]. Данная технология объединяет 3D-печатные и 5-осевые обрабатывающие центры с ЧПУ, что позволяет изготавливать крупногабаритные изделия методом послойного наплавления.

Для изделий в виде сетчатых конструкций основными методами изготовления являются намотка, выкладка и плетение с последующим формованием. Наиболее распространённым методом служит процесс намотки. Процесс представляет собой наматывание армирующего материала (нити, ленты, жгута или ткани)

на вращающуюся оправку, которая определяет геометрию изделия [12]. Для более точного получения сетчатой структуры применяют оправку с канавками [13; 14].

В работах [15–18] приводится информация по разработке сетчатых конструкций. Описаны основные конструктивные параметры оказывающие значительное влияние на эксплуатационные характеристики конструкции. Из наиболее важных выделяются такие, как углы φ_i между стержнями, линейная масса и размеры одной ячейки.

Авторы исследований [19–28] описывают различные подходы к моделированию задач статической прочности и жёсткости, ударной прочности и устойчивости сетчатых структур. Стоит отметить, что зачастую при разработке расчётных моделей не учитывается влияние остаточных напряжений и искривления геометрии на несущие способности конструкции.

Целью данного исследования является разработка методики поэтапного расчёта процессов 3D-печати оснастки и изготовления сетчатой конструкции из композиционного материала методом вакуумной инфузии.

В рамках данного исследования разрабатываются следующие расчётные модели:

- расчётная модель процесса 3D-печати оснастки. Данная модель используется для анализа тепловых эффектов, происходящих в процессе послойного нанесения материала. Для моделирования используется твердотельная 3D-модель оснастки и ложемента. В модели учитывается анизотропия свойств композиционного материала и теплоперенос между оснасткой и окружающей средой;
- расчётная модель процесса усадки и деформирования оснастки в процессе 3D-печати. Данная модель необходима для прогнозирования усадки и деформирования материала оснастки при печати. Для моделирования используются результаты теплового анализа оснастки, а также физико-механические характеристики материала для печати;
- расчётная модель нагрева и пропитки композитной преформы. Необходима для анализа качества пропитки сухой преформы связующим. Используется твердотельная 3D-модель, характеристики проницаемости преформы, а также реологические характеристики связующего. Для учёта теплообмена с окружающей средой используется закон конвективного теплообмена;
- расчётная модель отверждения и коробления. Необходима для анализа полимеризации и коробления композитного изделия. Используется твердотельная 3D-модель изделия и оснастки. Учитываются физико-механические характеристики композита в полностью отверждённом и гелеобразном состояниях.

1. Цифровой паспорт материала

В данной работе предлагается следующее определение термина «цифровой паспорт материала» – это совокупность моделей материала, их валидированных параметров и методик калибровки, обеспечивающих высокую достоверность моделирования на различных этапах жизненного цикла изделия.

Отличительной особенностью цифрового паспорта материала является то, что он предлагает набор валидированных свойств, помимо исходных данных, полученных при испытании материала. Данные свойства отличаются от исходных тем, что они были скорректированы для того, чтобы обеспечить необходимую точность моделирования тех или иных физических явлений на этапах жизненного цикла изделия.

В рамках данного исследования для изготовления оснастки 3D-печатью использовался «PP 3D GF-30» – полипропилен с объёмным содержанием 30 % стекловолокна. Изготовление сетчатой конструкции производилось с помощью однонаправленной ленты из углеволокна UMT49S-12K-EP и связующего T26.

Для проведения расчётных исследований необходимо определение свойств материалов. Для учёта нестационарного теплового поля параметры изучаются при температурах от комнатной до температуры плавления.

Определение свойств наполненного стекловолокном полипропилена PP 3D GF-30. В рамках исследования проводилось исследование свойств чистого полипропилена и наполненного в направлении экструзии. Свойства наполненного полипропилена в поперечном направлении считались равными свойствам чистого. Анизотропия свойств учитывалась только для коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР), тогда как модуль упругости, теплоёмкость и теплопроводность определялись как для изотропного материала.

На рис. 1 приведена кривая теплоёмкости наполненного полипропилена. Теплоёмкость была определена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (ГОСТ Р 56754-2015 29). Физико-механические характеристики были исследованы в лаборатории Центра композитных технологий «КНИТУ-КАИ».

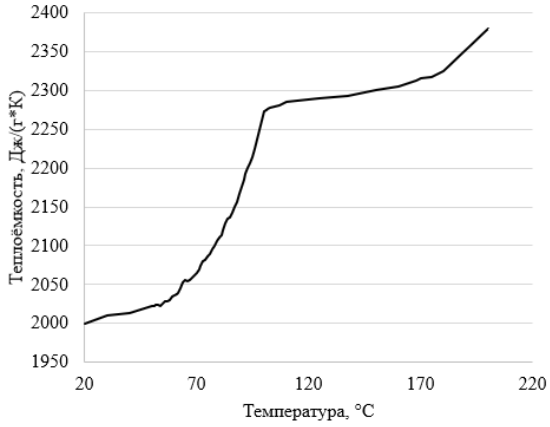


Рис. 1. Кривая зависимости теплоёмкости полипропилена от температуры вдоль направления экструзии

Fig. 1. Curve of heat capacity of polypropylene versus temperature along the direction of extrusion

Средняя величина коэффициента объёмной усадки в исследуемом температурном диапазоне составляет φ = = 1,3 %. Коэффициент объёмной усадки был определён путём сопоставления плотностей материала в жидком и твёрдом состояниях. Коэффициент линейного теплового расширения был исследован с помощью термомеханического анализатора (ГОСТ 32618.2-2014). Средняя величина КЛТР в направлении экструзии в температурном диапазоне от 30 до 200 °C составила α_x = = 12,76 · 10^{-5} K^{-1}. Для чистого же полипропилена была получена величина КЛТР $\alpha_{Y,Z} = 50 \cdot 10^{-5}$ K^{-1}.

Теплопроводность была изучена с помощью ДСК (ГОСТ Р 57830-2017). Линия на рис. 2 показывает, что изменение теплопроводности полипропилена до температуры плавления носит линейный характер.

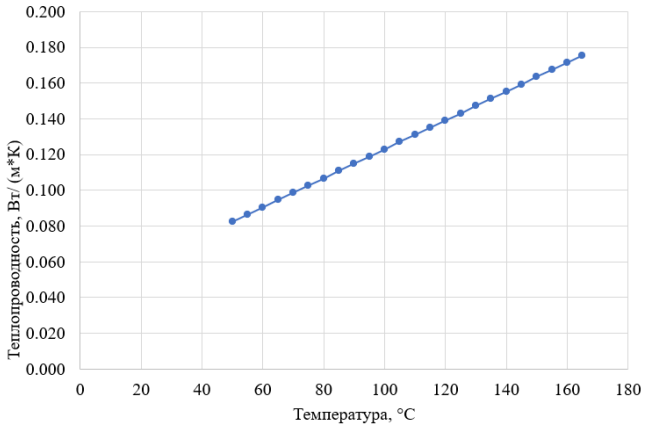


Рис. 2. Теплопроводность наполненного полипропилена в направлении экструзии

Fig. 2. Thermal conductivity of filled polypropylene in the direction of extrusion

Модуль упругости был испытан для двух точек по температуре согласно (ГОСТ 32656–2017). Остальные точки в рассматриваемом температурном диапазоне были получены из предположения о линейной зависимости модуля упругости от температуры. Результаты приведены на рис. 3.

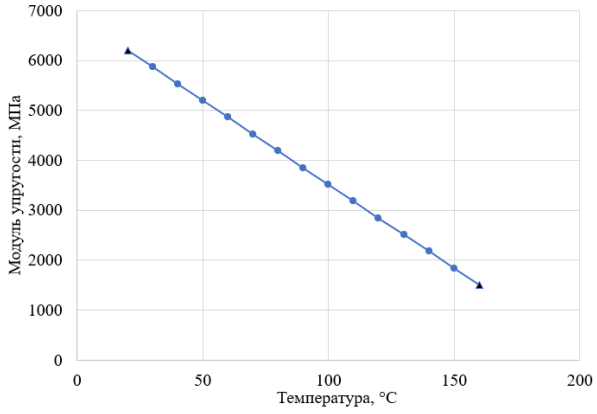


Рис. 3. Модуль упругости наполненного полипропилена

Fig. 3. Modulus of elasticity of reinforced polypropylene

Свойства полипропилена в дальнейшем используются при построении расчётной модели процесса 3D-печати, усадки и деформирования оснастки и модели отверждения, и коробления.

Определение свойств волокна UMT49S-12K-EP и связующего T26. Цифровой паспорт армирующего и связующего материалов рассматривается на различных этапах технологического процесса. Так, на этапе пропитки преформы основным параметром армирующего материала является проницаемость, связующего материала – динамическая вязкость. В табл. 1 приведена проницаемость используемого углеволокна. Так как в данном случае композиционный материал является трансверсально изотропным, то проницаемость определяется в трёх направлениях: K_x – вдоль волокна основы, K_y – вдоль волокна утка и K_z – по направлению нормали к плоскости армирования. Стоит отметить, что при рассмотрении в качестве армирующего материала однонаправленной ленты характеристики K_y и K_z принимаются эквивалентными.

Таблица 1

Коэффициенты проницаемости углеволокна

Table 1

Carbon fiber permeability coefficients

Параметр	Величина
K_X, м^2	7,45·10^{-11}
K_Y, м^2	2,12·10^{-14}
K_Z, м^2	2,12·10^{-14}

Коэффициенты проницаемости были определены методом одномерного стационарного потока [28]. Так как пропитка преформы предполагается методом вакуумной инфузии, то проницаемость определяется для преформы с толщиной монослоя эквивалентной толщине под воздействием вакуумного мешка. Давление вакуумного мешка эквивалентно атмосферному P = 101000 Па. Очевидно, существует зависимость между давлением на преформу и её проницаемостью, но в рамках данной работы задача определения проницаемости как функции давления не ставится. Проницаемость вдоль направления армирования была определена с использованием системы онлайн-мониторинга состояния связующего DiamonPlus INASCO (рис. 4).

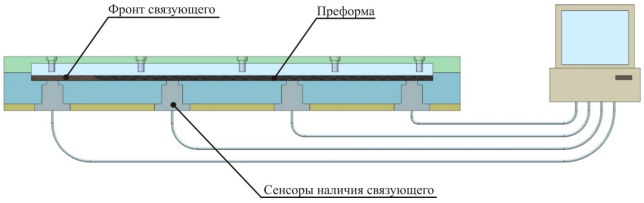


Рис. 4. Схема оснастки для определения проницаемости в плоскости армирования методом одномерного потока

Fig. 4. Tool scheme for determining the permeability in the reinforcement plane by the one-dimensional flow method

Через преформу, уложенную под необходимым углом, в оснастку пропускается специальная жидкость с постоянной вязкостью под фиксированным давлением. Диэлектрические датчики фиксируют время прибытия жидкости и заносят в базу данных вычислительной машины.

Для определения поперечной проницаемости использовался схожий метод. Вместо диэлектрических датчиков были использованы датчики давления. Разработанная оснастка изображена на рис. 5.

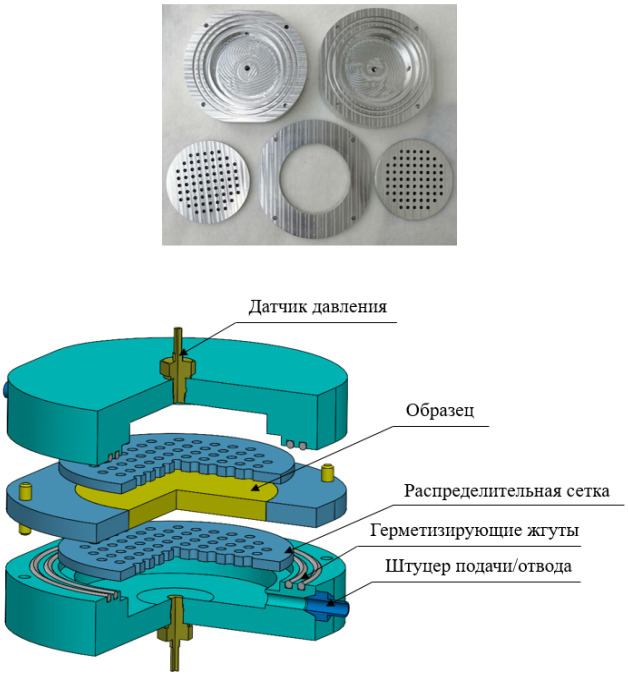


Рис. 5. Оснастка для определения поперечной проницаемости

Fig. 5. Tool for determining transverse permeability

Кривая динамической вязкости связующего приведена на рис. 6. Вязкость была определена методом ротационной вискозиметрии с помощью ротационного реометра RheoStress 6000.

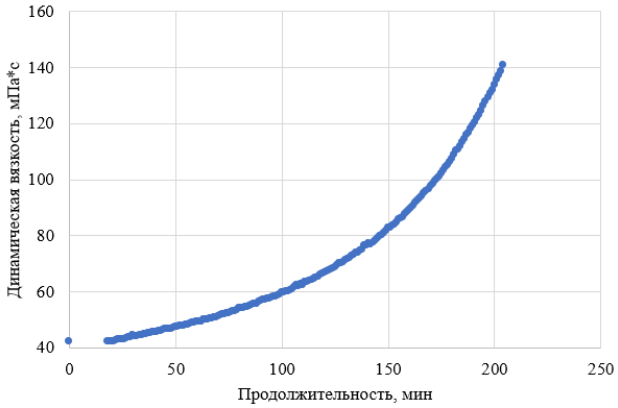


Рис. 6. Кривая динамической вязкости связующего Т26 как функции времени при Т = 100 °С

Fig. 6. Dynamic viscosity curve of resin T26 as a function of time at T = 100 °C

Проницаемость армирующего материала и вязкость связующего необходимы для построения расчётной модели пропитки композитной преформы.

На этапе отверждения ключевыми являются термические и химические параметры связующего и армирующего материалов. Для анализа процессов отверждения необходимо описание кинетики отверждения связующего. В данном исследовании кинетика отверждения Т26 была описана автокаталитическим уравнением реакции:

$$f(T,\alpha) = \mathrm{A}e^{-E_a/RT} \cdot \alpha^m \cdot (1-\alpha)^n. \qquad (1)$$

Коэффициенты уравнения (ГОСТ Р 57996-2017) и энтальпия (ГОСТ 56755-2015) реакции были определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты автокаталитического уравнения реакции Т26

Table 2

Coefficients of the autocatalytic reaction equation T26

Параметр	Величина
Предэкспоненциальный множитель A, $с^{-1}$	7061,55
Энергия активации E_a, кДж/моль	58,063
Порядок реакции m	0,7001
Порядок реакции n	1,4622
Энтальпия реакции ΔH, кДж	465

Основные физико-механические и тепловые характеристики связующего и армирующего материалов приведены в табл. 3 и 4 соответственно. Механические характеристики связующего и армирующего материалов были определены путём натурных испытаний образцов с помощью испытательной машины Instron 5882.

Таблица 3

Характеристики связующего Т26

Table 3

Characteristics of resin T26

Параметр	Величина	
	в гелеобразном состоянии	в твёрдом состоянии
Модуль упругости E, ГПа	0,0448	3,1
Коэффициент Пуассона η	0,495	0,35
Модуль сдвига G, ГПа	0,0115	1,15
Коэффициент теплового расширения φ, $К^{-1}$	$180 \cdot 10^{-6}$	$72 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент химической усадки α, %	-	-7,3
Удельная изобарная теплоёмкость Ср, Дж/кг/К	1468	1468

Физико-механические характеристики необходимы для построения расчётной модели коробления. Так как данные параметры задаются раздельно для волокна и связующего, то необходим расчёт эффективных харак-

теристик монослоя в твёрдом и гелеобразном состояниях. Эффективные характеристики в твёрдом состоянии рассчитываются по встроенным в программное обеспечение алгоритмам с помощью ячейки периодичности. Используемое программное обеспечение ESI PAM-COMPOSITES [29]. В гелеобразном же состоянии характеристики пересчитываются исходя из следующих предположений:

– КЛТР в гелеобразном состоянии в 2,5 раза больше, чем в твёрдом;

– модуль сдвига в гелеобразном состоянии в 100 раз меньше, чем в твёрдом;

– объёмный модуль упругости в 2,5 раза меньше, чем в твёрдом.

Таблица 4

Характеристики углеволокна UMT49S-12K-EP

Table 4

Characteristics of carbon fiber UMT49S-12K-EP

Характеристика	Величина
Модуль упругости вдоль волокна E_1, ГПа	260
Модуль упругости поперёк волокна E_2, E_3, ГПа	23
Коэффициент Пуассона вдоль волокна, η_{XY}, η_{XZ}	0,2
Коэффициент Пуассона в плоскости поперечного сечения волокна, η_{YZ}	0,4
Модуль сдвига в направлении волокна G_{XY}, G_{XZ}, ГПа	9
Модуль сдвига G_{YZ}, ГПа	8,214
Коэффициент линейного теплового расширения в направлении волокна α_X, °C^{-1}	$-6{,}3\cdot10^{-7}$
Коэффициент линейного теплового расширения во втором и третьем направлении α_Y, α_Z, °C^{-1}	$5{,}9\cdot10^{-6}$

Таблица 5

Эффективные характеристики композита

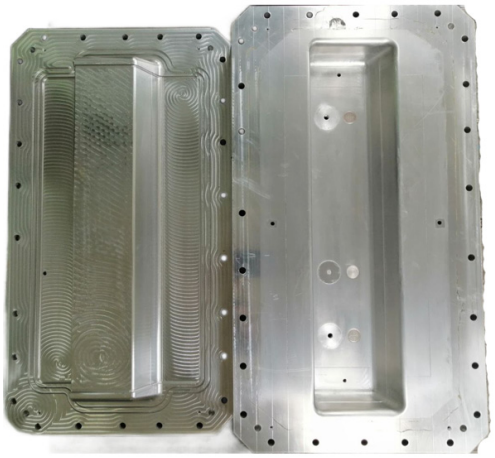
Table 5

Effective Composite Characteristics

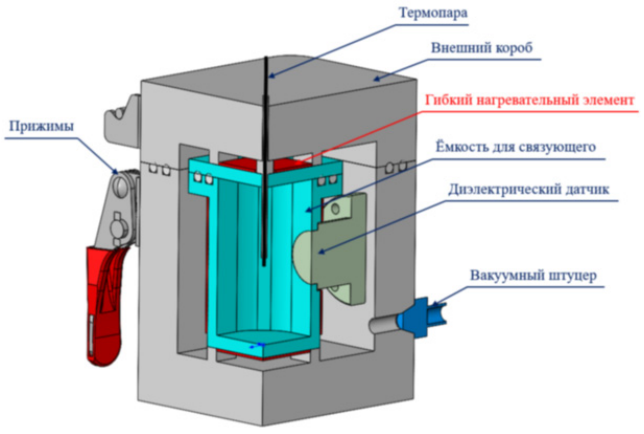
Характеристика	Величина	
	в гелеобразном состоянии	в твёрдом состоянии
Модуль упругости вдоль волокна E_1, ГПа	130,028	131,58
Модуль упругости поперёк волокна E_2, E_3, ГПа	2,38	8,73
Коэффициент Пуассона вдоль волокна η_{XY}, η_{XZ}	0,34	0,27
Коэффициент Пуассона в плоскости поперечного сечения волокна η_{YZ}	0,499	0,37
Модуль сдвига в направлении волокна G_{XY}, G_{XZ}, ГПа	0,037	2,71
Модуль сдвига G_{YZ}, ГПа	0,039	2,69
Коэффициент линейного теплового расширения в направлении волокна α_X, °C^{-1}	$-5{,}7\cdot10^{-7}$	$3{,}53\cdot10^{-7}$
Коэффициент линейного теплового расширения во втором и третьем направлении α_Y, α_Z, °C^{-1}	$13{,}51\cdot10^{-5}$	$4{,}55\cdot10^{-5}$
Коэффициент химической усадки α_X, %	0,0024	0,065
Коэффициент химической усадки α_{YZ}, %	5,35	2,67

2. Калибровка моделей материалов

Для калибровки моделей материалов на этапах пропитки, отверждения и коробления были использованы оснастки, изображённые на рис. 7. Данные оснастки были разработаны и изготовлены Центром композитных технологий «КНИТУ-КАИ». Обе оснастки предполагают использование в своём составе современных программно-аппаратных средств для получения фактических данных о тех или иных технологических параметрах. Так, на этапе создания преформы, для получения информации об ориентации армирующих волокон используется система машинного зрения Apodius 3D. На этапе пропитки и отверждения – система мониторинга состояния связующего DiamonPlus INASCO. Геометрия оснастки и изделия после извлечения контролируются с помощью координатно-измерительной машины HEXAGON Absolute Arm.



a



b

Рис. 7. Оснастки для калибровки моделей связующего и армирующего материалов: *a* – оснастка для калибровки моделей на этапах пропитки и коробления; *b* – оснастка для калибровки модели отверждения связующего

Fig. 7. Tool for calibrating models of resin and reinforcement materials: *a* – tool for calibrating models at the stages of impregnation and warpage; *b* – tool for calibrating the model of resin curing

Совместно с данными оснастками используется методика, предполагающая следующий алгоритм действий для калибровки модели материала:

1. Исследование физико-механических и химических характеристик используемых материалов.

2. Построение цифровых двойников образцов, используемых для калибровки моделей.

3. Проведение опытных работ по изготовления образцов и фиксации технологических параметров.

4. Сопоставление фактических и теоретических параметров изготовления.

5. Проведение оптимизационных расчётных исследований с целью калибровки параметров материалов.

Часть параметров строго должна быть определена из лабораторных исследований, часть может быть идентифицирована из литературных источников или рассчитана через известные соотношения. В рамках данной методики разбиение параметров на категории конкретизировано, исходя из степени влияния данных параметров на исследуемые технологические процессы.

Производится построение конечно-элементных моделей образцов в программном комплексе ESI PAM-COMPOSITES. Используемые при этом подходы к моделированию заносятся в паспорт материала, так как аналогичные должны в дальнейшем применяться при построении цифровых двойников изделий. Результатом моделирования являются технологические параметры. В случае с оснасткой П-образного сечения (см. рис. 5, *a*) основным исследуемым параметром является величина Spring-In эффекта. В случае же с оснасткой для калибровки модели отверждения основным параметром является температурный пик и время его достижения.

Оснастка П-образного сечения используется для калибровки параметра проницаемости на этапе пропитки и параметра химической усадки на этапе коробления. Для калибровки проницаемости используются датчики давления, фиксирующие фронт движения связующего, и датчики полимеризации, фиксирующие динамическую вязкость связующего. Имея данную информацию, появляется возможность валидирования проницаемости с помощью закона Дарси.

Для калибровки химической усадки используется система машинного зрения Apodius 3D для фиксирования фактических углов выкладки армирующего материала и координатно-измерительная машина Hexagon 8500 для измерения геометрии оснастки и полученной детали. Информация о фактических углах армирования и геометрии изделия позволяет провести ряд вычислительных экспериментов для калибровки химической усадки.

Калибровка полной энтальпии реакции и удельной теплоёмкости связующего проводится на оснастке для калибровки параметров отверждения связующего (см. рис. 5, *b*). Суть эксперимента заключается в обеспечении условий, при которых происходит неконтролируемая экзотермическая реакция связующего. С помощью термопары, помещённой в центр связующего, происходит фиксация температурного пика и времени его достижения. По величине температурного пика калибруется полная энтальпия реакции связующего, а по времени его достижения – удельная теплоёмкость.

В разделе 1 исследования приведены уже калиброванные свойства материалов.

Данный подход применим к любым конфигурациям армирующего и связующего материалов, а полученный цифровой паспорт может быть использован для построения цифрового двойника любого композитного изделия, изготавливаемого из данных материалов.

Более подробное описание процесса калибровки моделей материалов является задачей отдельной публикации и в рамках данной работы не рассматривается.

3. Моделирование этапов изготовления оснастки и сетчатой конструкции

В рамках данного исследования проводились расчёты процессов изготовления оснастки и сетчатой конструкции конусной формы (рис. 8).



a *b* *c*

Рис. 8. Объект исследования: *a* – заготовка; *b* – оснастка; *c* – сетчатая конструкция

Fig. 8. Object of research: *a* – workpiece; *b* – tool; *c* – grid structure

Анализ процессов, происходящих при 3D-печати оснастки, производился с помощью программного комплекса Ansys, а расчёт технологических процессов изготовления сетчатой конструкции в ESI Visual-Environment.

На рис. 9 представлена заготовка оснастки, расчетная модель усадки при печати, оснастка после механической обработки и моделирование остаточных деформаций в сопоставлении с фактической 3D-моделью, полученной путем прямого сканирования.

Для расчёта в среде Ansys были построены сеточные модели основания и заготовки. Под основанием понимается подложка, на которую происходит послойное нанесение материала. Характеристики материала, из которого изготовлено основание, в расчётной модели не учитываются. Предполагается, что влияние материала основания незначительно, так как процесс происходит при нормальных условиях, не в печи или другой специальной камере. Режимы печати были заданы в соответствии с фактическими. Для учёта анизотропии материала была использована функция Element orientation. Нестационарное тепловое поле учитывается с помощью

коэффициента свободной конвекции. При этом не учитывается «вытягивание» расплава при печати и механическая обработка.

Процесс 3D-печати оснастки моделировался в два этапа:

1. Решение тепловой задачи в процессе нанесения расплава.

2. Решение задачи механики деформируемого тела в процессе нанесения расплава с использованием данных, полученных на первом этапе.

Для решения тепловой задачи задавались следующие граничные условия: температура окружающей среды – T_{env} = 20 °C; коэффициент конвекции – α_{env} = 12 Вт/м^2/K, а также режимы печати: толщина наносимого за один проход слоя t_{lay} = 1,5 мм, расстояние между соседними слоями δ_{lay} = 0,13 мм, скорость нанесения υ_{lay} = 12,5 мм/с, температура нанесения T_{pr} = 165 °C.

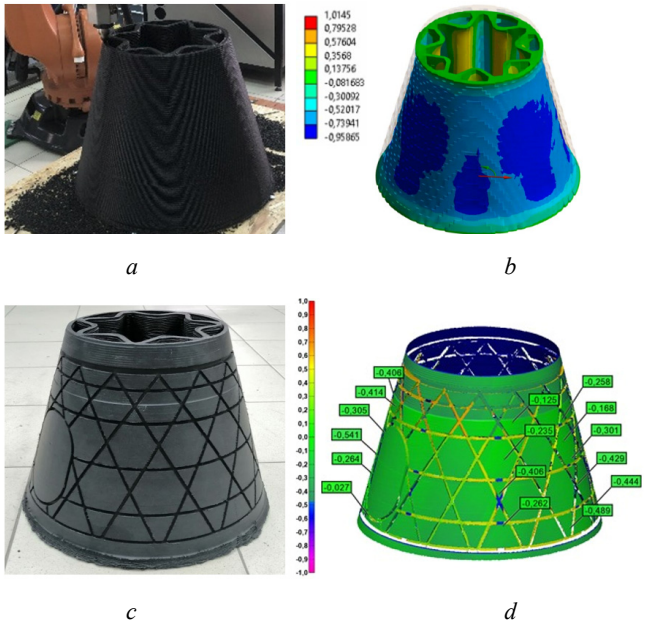


Рис. 9. Оснастка и расчетная модель усадки при печати: *a* – заготовка оснастки; *b* – расчётная модель усадки заготовки при печати (мм); *c* – оснастка после механической обработки; *d* – карта отклонений внешней поверхности оснастки от CAD модели (мм)

Fig. 9. Tool and calculation model of shrinkage during printing: *a* – tool workpiece; *b* – calculation model of workpiece shrinkage during printing; *c* – tool after machining; *d* – map of deviations of the outer surface of the tool from the CAD model

Решаемая задача может быть описана следующим образом: экструзионная головка, монтированная на роботизированный комплекс, наносит по заранее заданной траектории расплавленный наполненный стекловолокном полипропилен при температуре, близкой к температуре плавления. Материал оседает на подложке и остывает, вместе с тем меняя свой объём ввиду усадочных процессов. Головка в это время продолжает наносить последующие слои материала, то есть происходит процесс теплообмена не только с окружающей средой посредством конвекции, но и посредством диффузии между частями печатаемой оснастки. Данная задача является нестационарной, так как все процессы протекают в изменяющемся во времени тепловом поле.

На рис. 9, *a*, показан процесс печати заготовки оснастки с помощью уникального роботизированного комплекса. Технологическая последовательность этапов формирования оснастки выглядит следующим образом:

1. 3D-печать наполненным пластиком заготовки оснастки.

2. Черновая механическая обработка.

3. Чистовая механическая обработка и нарезка пазов для выкладки углеродной ленты.

На рис. 9, *b*, показаны перемещения модели по окончании процесса 3D-печати. В данном случае перемещения внешней поверхности заготовки лежат в диапазоне ± 1 мм. Эта информацию позволяет сделать выводы о требуемой толщине жертвенного слоя для этапа черновой механической обработки.

В данном случае не требуется введение каких-либо компенсаций на технологический процесс механической обработки оснастки, так как и печать, и механическая обработка производятся с использованием одного и того же роботизированного комплекса со сменой печатной головки на фрезерную. Таким образом, оснастка после печати не меняет своего положения относительно системы координат комплекса. Расчёт же позволяет сделать выводы о необходимом количестве жертвенного материала для механической обработки, так как его недостаток может привести к тому, что какие-то поверхности оснастки останутся необработанными, а его избыток в ряде случаев может привести к чрезмерному деформированию и перерасходу материала. Тем не менее в случае, когда необходима перебазировка оснастки после печати, перед процессом механической обработки, информация о деформациях оснастки может быть полезна для внесения компенсаций в процесс базирования.

В рамках данной работы не проводилось сопоставление эпюры перемещений поверхности оснастки, полученной в результате расчётов с фактическими данными, ввиду сложности реализации сканирования оснастки без её перестановки.

На рис. 9, *c* и *d*, изображены оснастка после механической обработки и цветовая карта отклонений внешней поверхности относительно номинальной CAD-модели. Можно заметить, что отклонения геометрии преимущественно отрицательные, что говорит о преобладании усадочных процессов в процессе печати и механической обработки.

На втором этапе технологического процесса производится моделирование изготовления сетчатой конструкции методом вакуумной инфузии связующим Т-26.

Поэтапно процесс изготовления композитного изделия методом вакуумной инфузии представляется в следующем виде:

1. Создание преформы.
2. Пропитка преформы связующим.
3. Отверждение связующего.
4. Распрессовка технологического пакета и механическая обработка изделия.

На этапе создания преформы задаются углы ориентации армирующих волокон, порядок и зоны выкладки, а также количество слоёв. Моделирование процесса формирования преформы в случае автоматизированной выкладки однонаправленной ленты в заранее подготовленные пазы не требуется, так как возможность отклонения от номинальной ориентации сведена к минимуму.

Математически моделирование пропитки преформы базируется на законе Дарси, которое описывает взаимосвязь между скоростью фильтрации жидкости в пористой среде и градиентом напора. Моделирование пропитки целесообразно в большинстве случаев. Так как даже в случае изделий небольших габаритов и простой формы необходима оценка качества пластика и/или калибровка моделей материалов.

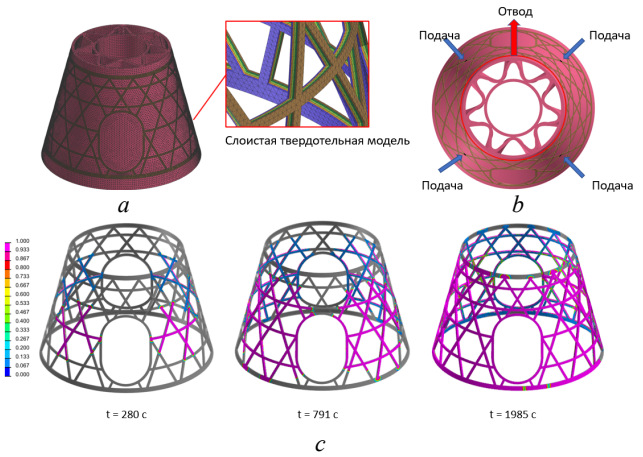
Моделирование отверждения проводится в тех случаях, когда требуется оценка количества выделяемого связующим тепла и его влияния на температурный заброс в изделии. Как правило, для связующих с температурой отверждения 180 °С температурный заброс выше 185 °С недопустим. Решение тепловой задачи с учётом выделения связующим тепла позволяет итерационным способом подобрать оптимальный режим отверждения. Также результаты анализа отверждения используются как граничные условия для дальнейшего расчёта коробления.

При моделировании пропитки сухой преформы связующим решается задача фильтрации связующего в пористом пространстве преформы. При решении данной задачи с помощью закона Дарси определяется скорость движения жидкости под действием заданного перепада давления.

Как правило, изделия методом вакуумной инфузии пропитываются по толщине. Ввиду относительно низкого давления пропитки фильтрация связующего в течении короткого промежутка времени возможна только по толщине изделия. Для учёта пропитки по толщине необходимо построение объёмной конечно-элементной модели. Также для учёта теплопереноса между оснасткой, связующим и преформой необходимо раздельное моделирование данных компонент. На рис. 10, *a*, приведена конечно-элементная модель оснастки и преформы.

В рамках данной задачи слой распределительного материала не моделируется ввиду низкой вязкости связующего и большого технологического окна. Жертвенный слой же не моделируется ввиду отсутствия необходимости в распределительной слое.

Граничные условия моделирования представляют собой совокупность точек подачи связующего, давление инжекции, зоны отвода (с указанием остаточного давления газа в преформе) и поверхности приложения поля конвекции (рис. 10, *b*).



a *b* *c*

Рис. 10. Расчётная модель объекта исследования: *a* – конечно-элементная модель оснастки и преформы; *b* – граничные условия моделирования; *c* – результат моделирования процесса пропитки

Fig. 10. Calculation model of the object of study: *a* – finite element model of tool and perform; *b* – boundary conditions of modeling; *c* – the result of simulation of the impregnation process

Давление пропитки P_{inj} = 101 325 Па равняется атмосферному давлению. Давление отвода связующего задано согласно значению остаточного давления, которое способно обеспечить вакуумная станция при температуре пропитки P_{out} = 1800 Па.

Конвективный теплообмен поверхности преформы и оснастки с воздушной средой полимеризационной печи характеризуется через коэффициент конвекции и температуру окружающей среды. В данном случае для используемого термоинфузионного центра ТИАЦ величина коэффициента конвекции составляет α = 27 Вт/м^2·К. Данная величина может быть рассчитана через имеющиеся в литературе аналитические соотношения для случая вынужденной конвекции.

Результатом расчёта процесса пропитки изделия являются цветовые карты фронта течения связующего во времени (рис. 10, *c*). Из их анализа следует, что пропитка занимает время *t* = 2560 с, что значительно меньше времени гелеобразования связующего при данной температуре. Также не наблюдается воздушных карманов, оттеснённых от зоны отвода газа и связующего, что исключает вероятность возникновения сухих участков. Анализ отсутствия воздушных карманов производится, исходя из сопоставления реализуемого в преформе остаточного давления и давления в связующем на границе фронта. В случае, если эти давления в какой-либо зоне выравниваются, то дальнейшее движение связующего невозможно.

Для моделирования отверждения связующего задаётся режим согласно паспорту на материал: нагрев до 180 °С со скоростью 0,53 °С/ мин, выдержка в течении 3 ч и охлаждение до 30 °С со скоростью 0,8 °С/мин. Граничными условиями являются температура воздуха в печи и коэффициент конвекции печи. Температура воздуха задаётся в соответствии с режимом отверждения связующего, коэффициент конвекции печи α = 27 Вт/м^2·К.

На рис. 11 приведены результаты моделирования отверждения для случайного узла на внутренней поверхности модели. Так как толщина преформы во всех точках равномерна, а граничные условия остаются постоянными, то данные графики уместны для всех точек на внутренней поверхности изделия. Помимо этапа нагрева и выдержки рассматривается также и этап охлаждения.

Можно заметить, что имеется отставание температуры на внутренней поверхности изделия от температуры печи, что вызвано, помимо прочего, учётом в модели коэффициента конвекции. Данный момент важно учитывать, чтобы не допускать больших расхождений между термометрированием фактического изделия и виртуальным моделированием.

Согласно рис. 11 наблюдается температурный заброс на 1 °C. Как уже говорилось, не допускается превышение температуры полимеризации более чем на 5 °C. То есть пиковая температура полимеризации не должна превышать 185 °C. Несмотря на то, что прогнозируемый заброс меньше допустимого, рекомендуемая температура отверждения – 175 °C.

Моделирование коробления проводится в два этапа: 1 – расчёт остаточных напряжений, возникающих в процессе полимеризации связующего, 2 – разгрузка изделия в процессе извлечения из оснастки и, как следствие, деформирование геометрии (рис. 12).

На первом этапе моделирования программный комплекс ESI PAM-COMPOSITES, используя информацию о степени конверсии и температуре в узлах модели, рассчитывает химические и температурные деформации. Учитываются все стадии процесса отверждения: нагрев, выдержка и охлаждение. На стадиях нагрева и отверждения происходит изменение как степени конверсии, так и температуры, тогда как при охлаждении происходит изменение только температуры.

Так как в процессе полимеризации происходит отверждение композиционного материала, необходим учёт изменения его свойств. Рассматривается три основных состояния материала:

- жидкое, когда степень конверсии связующего ниже степени конверсии гелеобразования, а температура материала превышает температуру стеклования;
- гелеобразное, когда степень конверсии связующего выше или равна степени конверсии гелеобразования, а температура материала выше температуры стеклования;
- твёрдое, когда степень конверсии связующего выше или равна степени конверсии гелеобразования, а температура материала ниже температуры стеклования.

В жидком состоянии не учитываются характеристики композиционного материала, предполагается, что жёсткость материала ничтожно мала и накопления напряжений не происходит. В гелеобразном и твёрдом состояниях материалу присваиваются соответствующие эффективные характеристики.

Химическая усадка связующего учитывается в деформациях как результат произведения степени конверсии, взятой в долях, на эффективный коэффициент химической усадки связующего:

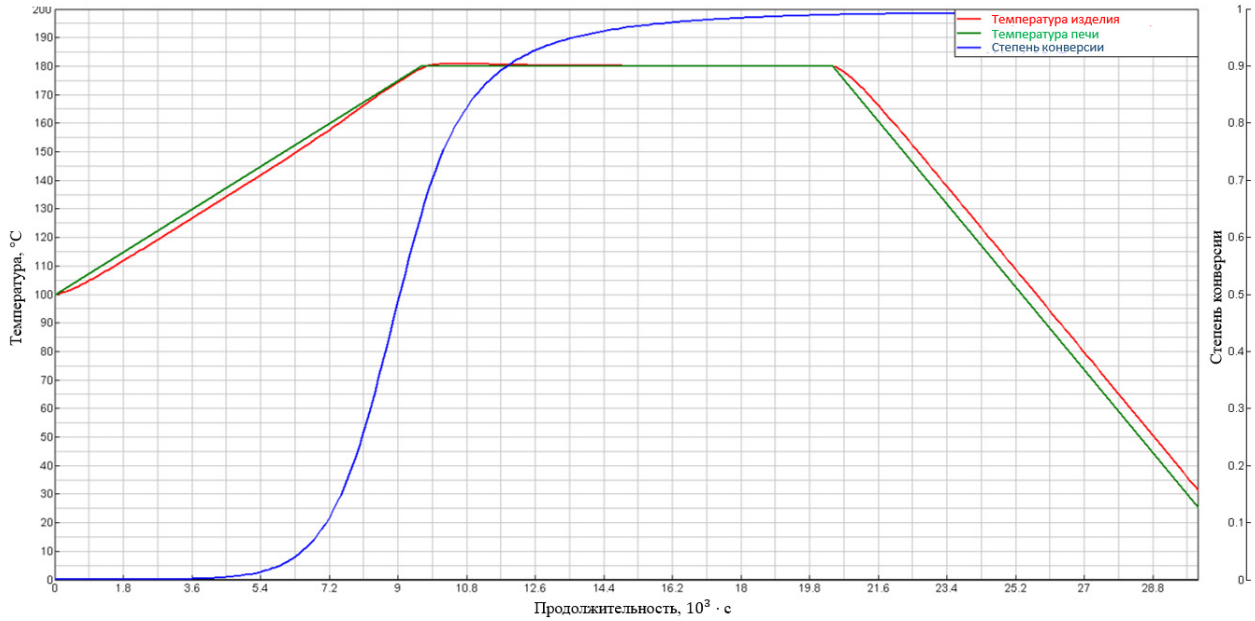
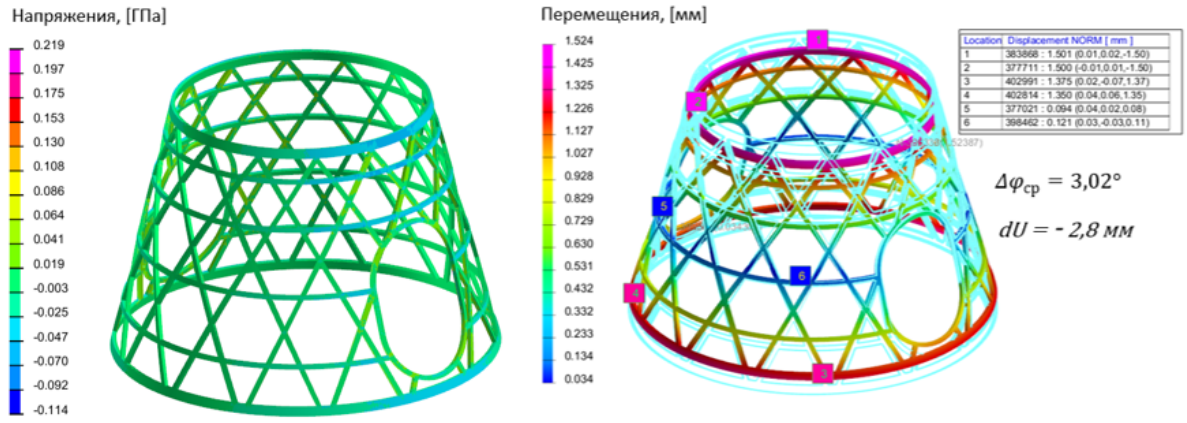


Рис. 11. Результаты моделирования отверждения связующего для узлов на поверхности изделия

Fig. 11. The results of modeling the curing of the resin



a *b*

Рис. 12. Результаты моделирования коробления: *a* – напряжения в изделии в оснастке; *b* – перемещения модели после извлечения из оснастки (коэффициент масштабирования равен 15)

Fig. 12. Warping simulation results: *a* – stresses in the product in the tooling; *b* – displacement of the model after removal from the tooling (scaling factor is 15)

$$\begin{cases} \varepsilon_X = \chi\varepsilon_X^{sh} \\ \varepsilon_Y = \chi\varepsilon_Y^{sh} \\ \varepsilon_Z = \chi\varepsilon_Z^{sh}, \end{cases}$$

где χ – степень конверсии; $\varepsilon_{X,Y,Z}^{sh}$ – эффективные коэффициенты химической усадки в направлениях X, Y и Z.

Стоит отметить, что в процессе моделирования коробления изделия учитывается анизотропия оснастки. Ориентация конечных элементов оснастки задаётся в соответствии с направлением печати, а модель материала представляется трансверсально изотропной.

На втором этапе моделирования производится решение задачи деформируемого тела. Конкретно производится расчёт разгрузки изделия. Накопленные в материале напряжения реализуются в виде остаточных деформаций при извлечении изделия из оснастки.

Напряжённо-деформированное состояние композитного изделия в оснастке и в свободном состоянии имеет кардинальные отличия. Так, изделие, будучи в оснастке, имеет малые перемещения, обусловленные в основном химической усадкой по толщине, и высокие остаточные напряжения, обусловленные ограничением перемещений оснасткой (рис. 12, *a*). В свободном же состоянии наблюдается обратная картина – большие перемещения (рис. 12, *b*) и низкие остаточные напряжения. Для рассматриваемой сетчатой структуры, как можно заметить, характерно значительное изменение габаритных размеров в процессе отверждения. В данном случае высота изделия уменьшилась в среднем на $dU = 2{,}8$ мм. В то же время произошли изменения углов в местах пересечения стержней. Средняя величина изменения составила по модулю 3,02°.

Искривление геометрии композитных изделий является острой проблемой в машиностроительной отрасли [30; 31]. В случае с изделиями конструкционного назначения даже небольшие искривления могут оказать значительное влияние на несущую способность конструкции. Несмотря на то, что после изъятия изделия из оснастки происходит разгрузка изделия, то не исключено, что изделие будет монтировано в конструкцию с некоторым усилием. Согласно рис. 10, *a*, максимальное напряжение в изделии – 0,114 ГПа, что уже составляет как минимум 17,5 % от предельных напряжений на сжатие для выбранного углеволокна при коэффициенте наполнения $\upsilon_f = 0{,}5$. На рис. 13 показана область действия максимальных сжимающих напряжений. Её величина составляет около 500 мм^2. Изменение же углов между стержнями, в свою очередь, может оказывать влияние на эффективную жёсткость конструкции и её устойчивость.

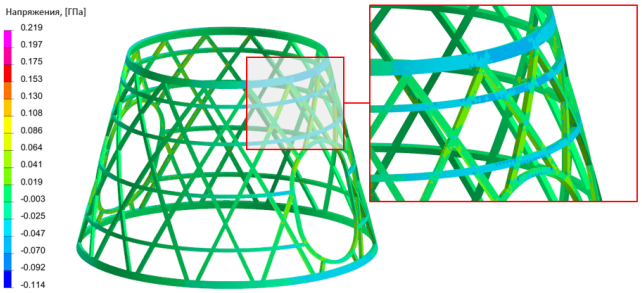


Рис. 13. Область действия максимальных сжимающих напряжений

Fig. 13. Region of maximum compressive stresses

Одним из способов решения данной проблемы является упреждение геометрии оснастки. Суть подхода заключается в изменении геометрии оснастки таким образом, чтобы геометрия изделия после извлечения из оснастки соответствовала номинальной. Корректировки в геометрию оснастки вводятся на основании конечно-элементного моделирования. Данный процесс – итера-

ционный и предполагает поэтапное изменение геометрии оснастки и расчёт коробления до получения удовлетворительного результата.

Заключение

В данной работе описана методика моделирования процесса 3D-печати композитной оснастки и последующего моделирования процесса постадийного изготовления композитного изделия. Методика определяет используемые параметры материалов и методы их испытаний и расчётов, также она включает в себя методики валидации этих параметров с использованием специальных оснасток и программно-аппаратных средств. Далее приводится перечень необходимых расчётных моделей и программных комплексов для проведения моделирования.

Описанная методика позволяет провести построение цифрового двойника сетчатой конструкции из композиционного материала на всех этапах изготовления. С помощью описанного подхода возможно точное прогнозирование технологических параметров и оптимизация режимов изготовления для повышения качества изделия.

Под цифровым двойником понимается виртуальная копия реального объекта исследования. Двойник, помимо обладания теми же геометрическими параметрами, обладает также схожими физико-механическими и химическими свойствами. На каждом этапе моделирования ему присваиваются свойства, необходимые для адекватного отражения происходящих в нём процессов, будь то физические или химические.

В рамках данного исследования был построен цифровой паспорт материалов на этапах 3D-печати оснастки, пропитки, отверждения и коробления композиционного изделия. В дальнейшем будут проводится работы по его пополнению и уточнению на всех этапах жизненного цикла изделия.

Полученные режимы пропитки и отверждения изделия будут использованы при проведении опытных работ по изготовлению. Также разработана геометрия оснастки с упреждением для минимизации остаточных напряжений и искривления геометрии относительно номинальной.

Научная новизна исследования заключается в решение комплекса задач теплофизики и механики с учётом технологической наследственности на этапах пропитки, отверждения и коробления изделия. Проведённая качественная и количественная оценки поведения сетчатой конструкции, изготовленной из отечественных материалов, является новой для данного типа конструкции. Данные оценки в дальнейшем позволят своевременно прогнозировать и минимизировать возможность возникновения дефектов.

Библиографический список

1. Закиров И.М., Алексеев Н.К., Алексеев К.А. К вопросу об упрощении методики моделирования складчатых структур // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2020. – № 2. – С. 143–146.

2. Разработка методики расчёта напряжённо-деформированного состояния, оптимизации и экспериментального исследования гибридной конструкции композит-металлической лопасти тягового винта / Л.П. Шабалин, Д.В. Савинов, Е.А. Пузырецкий, И.В. Марескин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – № 2. – С. 35–42.

3. Numerical simulation on void formation and migration using Stokes-Brinkman coupling with effective dual-scale fibrous porous media / J. Lu, S.B. Lee, T.S. Lundstrom, W.R. Hwang // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. – 2022. – Vol. 152 (12).

4. Wilkinson Simon L. Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites: A dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements for award of the degree of Doctor of Engineering in the Faculty of Aerospace Engineering. – 2021.

5. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments / Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu // Rapid Prototyping. – 2008. – Vol. 14(2). – P. 72–80. DOI: 10.1108/13552540810862028

6. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing / A.R. Torrado, C.M. Shemelya, J.D. English, Y. Lin, R.B. Wicker, D.A. Roberson // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 6. – P. 16–29. DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.001

7. Goh G.D., Yap Y.L., Yeong W.Y. Recent progress in additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composite // Advanced Materials Technologies. – 2019. – Vol. 4, iss. 1. – P. 22. DOI: 10.1002/admt.201800271

8. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective / X. Wang [et al.] // Composites Part B Engineering. – 2017. – P. 442–458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034

9. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance / C. Yang [et al.] // Rapid Prototyping. – 2017. – Vol. 23, iss. 1. – P. 209–215.

10. Kabir S.M.F., Mathur K., Seyam A-F.M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties // Composite Structures. – 2020. – Vol. 232. – P. 24. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111476

11. Patent № 20160318248 A1 (US). Int. Cl. B25J 5/04. Additive manufacturing apparatus / Kenneth J. Susnjara, Brian Scott SMIDDY; Thermwood Corp. – Appl. No.: 14/701,631; Filed: May 16, 2015; Date of Patent: Jul. 25, 2017.

12. Mechanical analysis of parameter variations in large-scale extrusion additive manufacturing of thermoplastic composites [Электронный документ] / N. Tagscherer, A. Marcel Bar, S. Zaremba, K. Drechsler // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6 (2), no. 36. – URL: https://www.mdpi.com/2504-4494/6/2/36. (дата обращения: 29.11.2022).

13. Халиулин В.И., Шапаев И.И. Технология производства композитных изделий: учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 328 с.

14. Totaro G., De Nicola F. Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launch-

ers // Acta Astronautica. – 2012. – Vol. 81, no. 2. – P. 570–571. DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.07.012

15. Vasiliev V.V., Razin A.F. Optimal design of filament-wound anisogrid composite lattice structures // Proceedings of the 16th annual technical conference of American society for composites. – Blacksburg USA. – 2001.

16. Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications // Composite Structures. – 2012. – Vol. 94, no. 3. – P. 1117–1127. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023

17. Manufacture of high performance isogrid structure by Robotic Filament Winding / L. Sorrentino, M. Marchetti, C. Bellini, A. Delfini, F. Del Sette // Composite Structures. – 2017. – Vol. 164. – P. 43–50. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061

18. Hide details. Composite grid structure technology for space applications / G. Giusto, G. Totaro, P. Spena, F. De Nicola, F. Di Caprio, A. Zallo, A. Grilli, V. Mancini, S. Kiryenko, S. Das, S. Mespoulet // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 34. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.754

19. Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance / G. Totaro, P. Spena, G. Giusto, F. De Nicola, S. Kiryenko, S. Das // Composite Structures. – 2021. – Vol. 258. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113368

20. Totaro G., Gurdal Z. Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications // Aerospace Science and Technology. – 2009. – Vol. 13, iss. 4–5. DOI: 10.1016/j.ast.2008.09.001

21. Totaro G. Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material // Composite Structures. – 2016. – Vol. 153. – P. 738–745. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.072

22. Totaro G. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells // Composite Structures. – 2012. – Vol. 94, iss. 2. – P. 446–452. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.08.002

23. Totaro G., De Nicola F., Caramuta P. Local buckling modelling of anisogrid lattice structures with hexagonal cells: An experimental verification // Composite Structures. – 2013. – Vol. 106. – P. 734–741. DOI:10.1016/j.compstruct.2013.07.031

24. Totaro G. Optimal design concepts for flat isogrid and anisogrid lattice panels longitudinally compressed // Composite Structures. – 2015. – Vol. 129. – P. 101–110. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.03.067

25. Васильев В.В. Оптимальное проектирование композитной сетчатой цилиндрической оболочки, нагруженной внешним давлением // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2020. – № 3. – С. 5–11. DOI: 10.31857/S0572329920030162

26. Расчетно-экспериментальное исследование прочности сетчатых композитных конструкций фюзеляжа / В.В. Васильев [и др.] // Прочность конструкций летательных аппаратов: сборник статей научно-технической конференции. – 2017. – Вып. 2764. – С. 75–82.

27. Исследование сопротивления композитных сетчатых конструкций ударному повреждению / А.А. Бабичев [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2021. – № 3 (163). – С. 3–6. DOI: 10.52190/2073-2562_2021_3_3

28. Continuous measurement of fiber reinforcement permeability in the thickness direction: Experimental technique and validation / P. Ouagne, T. Ouahbi, C.H. Park, J. Breard, S. Abdelghani // Composites: Part B. – 2013. – Vol. 45. – P. 609–618. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.06.007

29. ГОСТ Р 56754-2015. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 4. Определение удельной теплоемкости. – М., 2015.

30. Официальный сайт ESI Visual Environment: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.esi.com.au/

31. Анализ параметров трещиностойкости на свободной границе вслоистых композитах / Д.А. Бондарчук, Б.Н. Федулов, А.Н. Федоренко, Е.В. Ломакин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 49–59. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.05

32. Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования [0°/90°] / Д.А. Бондарчук, Б.Н. Федулов, А.Н. Федоренко, Е.В. Ломакин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 3. – С. 17–26. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.02

References

1. Zakirov I.M., Alekseev N.K., Alekseev K.A. K voprosu ob uproshchenii metodiki modelirovaniia skladchatykh struktur. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaia tekhnika №2, 2020. S. 143-146.

2. Shabalin L.P., Savinov D.V., Puzyretskiy E.A., Mareskin I.V. Razrabotka metodiki raschëta napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia, optimizatsii i eksperimentalnogo issledovaniia gibridnoy konstruktsii kompozit-metallicheskoy lopasti tiagovogo vinta. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaia tekhnika №2, 2022. S. 35-42.

3. Lu, J. Numerical simulation on void formation and migration using Stokes-Brinkman coupling with effective dual-scale fibrous porous media / J. Lu, S.B. Lee, T.S. Lundstrom, W.R. Hwang // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. – Vol. 152 (12). – Jan. 2022.

4. Wilkinson, Simon L. Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites: A dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements for award of the degree of Doctor of Engineering in the Faculty of Aerospace Engineering. – June 2021.

5. Sun, Q.; Rizvi, G.M.; Bellehumeur, C.T.; Gu, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // Rapid Prototyping. 2008, Vol. 14(2), pp. 72-80. doi: 10.1108/13552540810862028

6. Torrado, A.R.; Shemelya, C.M.; English, J.D.; Lin, Y.; Wicker, R.B.; Roberson, D.A. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing // Additive Manufacturing. 2015. Vol. 6, pp. 16-29. doi: 10.1016/j.addma.2015.02.001

7. Goh, G.D., Yap, Y.L., Yeong, W.Y. Recent progress in additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composite // Advanced Materials Technologies. 2019, Vol. 4, Iss. 1, 22 p. doi: 10.1002/admt.201800271

8. Wang, X., et al. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective // Composites Part B Engineering. 2017, pp. 442-458. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034

9. Yang, C., et al. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance // Rapid Prototyping. 2017, Vol. 23, Iss. 1, pp. 209-215.

10. Kabir, S.M.F., Mathur, K., Seyam, A-F. M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties // Composite Structures. 2020, Vol. 232, 24 p. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111476

11. Patent № 20160318248 A1 (US). Int. Cl. B25J 5/04. Additive manufacturing apparatus / Kenneth J. Susnjara, Brian Scott SMIDDY; Thermwood Corp. Appl. No.: 14/701,631; Filed: May 16, 2015; Date of Patent: Jul. 25, 2017.

12. Tagscherer, N., Marcel Bar, A., Zaremba, S., Drechsler, K. Mechanical analysis of parameter variations in large-scale extrusion additive manufacturing of thermoplastic composites // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022, Vol. 6 (2), No. 36. (https://www.mdpi.com/2504-4494/6/2/36).

13. Khaliulin V.I., Shapaev I.I. Tekhnologiya proizvodstva kompozitnykh izdelii: Uchebnoe posobie [Production technology of composite products: Manual]. Kazan: Publishing house of Kazan. state technical university, 2003, 328 p.

14. Totaro, G., De Nicola, F. Recent advance on design and manufacturing of composite anisogrid structures for space launchers // Acta Astronautica. 2012, Vol. 81, No. 2, pp. 570-571. doi: 10.1016/j.actaastro.2012.07.012

15. Vasiliev, V.V., Razin, A.F. Optimal design of filament-wound anisogrid composite lattice structures // Proceedings of the 16th annual technical conference of American society for composites. Blacksburg USA. 2001.

16. Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., Razin, A.F. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications // Composite Structures. 2012, Vol. 94, No. 3, pp. 1117-1127. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023

17. Sorrentino, L., Marchetti, M., Bellini, C., Delfini, A., Del Sette, F. Manufacture of high performance isogrid structure by Robotic Filament Winding // Composite Structures. 2017. Vol. 164, pp. 43-50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061

18. Giusto, G., Totaro, G., Spena, P., De Nicola, F., Di Caprio, F., Zallo, A., Grilli, A., Mancini, V., Kiryenko, S., Das, S., Mespoulet, S.Hide details. Composite grid structure technology for space applications // Materials Today: Proceedings. 2020, Vol. 34. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.754

19. Totaro, G., Spena, P., Giusto, G., De Nicola, F., Kiryenko, S., Das, S. Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance // Composite Structures. 2021. Vol. 258. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113368

20. Totaro, G., Gurdal, Z. Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications // Aerospace Science and Technology. 2009. Vol. 13, Iss. 4-5. doi: 10.1016/j.ast.2008.09.001

21. Totaro, G. Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material // Composite Structures. 2016. Vol. 153, pp. 738-745. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.06.072

22. Totaro, G. Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells // Composite Structures. 2012, Vol. 94, Iss. 2, pp. 446-452. 10.1016/j.compstruct.2011.08.002

23. Totaro, G., De Nicola, F., Caramuta, P. Local buckling modelling of anisogrid lattice structures with hexagonal cells: An experimental verification // Composite Structures. 2013. Vol. 106, pp. 734-741. doi:10.1016/j.compstruct.2013.07.031

24. Totaro, G. Optimal design concepts for flat isogrid and anisogrid lattice panels longitudinally compressed // Composite Structures. 2015. Vol. 129, pp. 101-110. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.03.067

25. Vasiliev V.V. Optimalnoe proektirovanie kompozitnoy setchatoy cilindricheskoy obolochki, nagruzhennoy vneshnim davleniem [Optimal Design of a Composite Grid Cylindrical Shell Loaded by External Pressure] // Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids. 2020. No. 3, pp. 5-11. doi: 10.31857/S0572329920030162

26. Raschetno-experimentalnoe issledovanie prochnosti setchatykh kompozitnykh konstrukcii fyuselyaga [Calculation and Experimental Study of Strength of Grid Composite Structures of Fuselage] V.V. Vasiliev. [et al.]// Sbornik statei nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Prochnost’ konstrukcii letatelnykh apparatov” [Proceedings of the scientific and technical conference "Strength of aircraft structures"]. 2017, Iss. 2764, pp.75-82.

27. Issledovanie soprotivleniya kompozitnykh setchatych konstrukcii udarnomu povrezhdeniyu [Research of resistance of composite lattice structures to impact damage] / Babichev A.A. [et al] // Konstrukcii iz kompozicionnykh materialov – Designs of composite materials. 2021, 3 (163). pp. 3-6. doi: 10.52190/2073-2562_2021_3_3

28. Ouagne P., Ouahbi T., Park C.H., Breard J., Abdelghani S. Continuous measurement of fiber reinforcement permeability in the thickness direction: Experimental technique and validation // Composites: Part B. – 2013. – Vol. 45. – pp. 609-618. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.06.007

29. Official website of ESI Visual Environment: [website]. URL: https://www.esi.com.au/

30. Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Lomakin E.V. Analiz parametrov treshchinostoikosti na svobodnoy granitse vsloistykh kompozitakh // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. –2020. –No 4. –S. 49–59. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.05

31. Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Lomakin E.V. Analiz ostatochnykh napriazheniy v sloistykh kompozitakh na primere simmetrichnoy skhemy armirovaniiya [0°/90°] // Vestnik Permskogo natsional′nogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2019. No 3. S. 17-26. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.02

Финансирование. Статья подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 8 декабря 2020 г. № 075-11-2020-023) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13046.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Financing. The article was prepared as part of the implementation of the Program for the Creation and Development of the Supersonic World-Class Research Center for 2020–2025. with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement dated December 8, 2020 No. 075-11-2020-023) and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 19-29-13046.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.