

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/76/12

Численное моделирование процесса изготовления крупногабаритного композитного кокона с учетом термовязкоупругости

Ляйсан Рамилевна Сахабутдинова¹, Олег Юрьевич Сметанников²,
Глеб Валентинович Ильных³

^{1, 2, 3} Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

¹ lyaysans@list.ru

² vmm@pstu.ru

³ ilinykh.pnpu@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты моделирования основных этапов технологического процесса производства крупногабаритной оболочки методом непрерывной намотки. Сформулирована система граничных и начальных условий для конечно-элементного анализа. На основе экспериментальных данных и концепции многоуровневого моделирования получены эффективные вязкоупругие характеристики для материала оболочки. Описана физическая модель из пакета ANSYS Mechanical APDL для имитации термомеханического поведения материалов оправки и оболочки, получены параметры выбранной модели.

Ключевые слова: термовязкоупругость, метод непрерывной намотки, слоистый композиционный материал, многоуровневое моделирование, Prony series, Williams–Landel–Ferry shift function

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Для цитирования: Сахабутдинова Л.Р., Сметанников О.Ю., Ильных Г.В. Численное моделирование процесса изготовления крупногабаритного композитного кокона с учетом термовязкоупругости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 165–181. doi: 10.17223/19988621/76/12

Numerical simulation of the process manufacture of large-scale composite shell taking into account thermo viscoelastic

Lyaysan R. Sakhabutdinova¹, Oleg Yu. Smetannikov², Gleb V. Il'inykh³

^{1,2,3} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

¹ lyaysans@list.ru

² vmm@pstu.ru

³ ilinykh.pnpu@yandex.ru

Abstract. The aim of this work is to obtain the evolution of contact pressure on the surface of the forming mandrel during the manufacture of large-scale composite shells by continuous winding. A numerical analogue of a real structure is built in the form of a system of assembly equipment, a forming mandrel and a shell. Effective viscoelastic characteristics for the shell material are obtained on the basis of experimental data and the concept of multilevel modeling. A series of computational experiments has been carried out to verify the model of thermoviscoelastic behavior of a composite material; the model is a combination of anisotropic elastic behavior of a medium with one independent viscoelastic operator. It has been found that, at the stage of winding, the influence of the behavior model of the shell material is not significant because viscoelasticity of the mandrel material makes the greatest contribution to the reduction of the contact pressure on the mandrel surface. Based on the data obtained, a conclusion is made that it is advisable and important to take into account the rheological properties not only of the material of the forming mandrel but also of the multilayer shell. The methods of finite element analysis presented in the work and the computational modules and programs implemented on their basis, as well as the calculation results, are of great practical importance for automating the process of predicting the evolution of the stress-strain state at the technological stages of manufacturing structures of the mandrel-shell type.

Keywords: thermoviscoelasticity, continuous winding method, laminated composite material, multilevel modeling, Prony series, Williams-Landel-Ferry shift function

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 20-48-596009.

For citation: Sakhabutdinova, L.R., Smetannikov, O.Yu., Il'inykh, G.V. (2022) Numerical simulation of the process manufacture of large-scale composite shell taking into account thermo viscoelastic. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 76. pp. 165–181. doi: 10.17223/19988621/76/12

Введение

Полимерные композиционные материалы занимают одно из лидирующих мест среди конструкционных материалов. Улучшенные физико-механические и эксплуатационные характеристики позволили значительно расширить применение полимерных композитов в машиностроении [1], строительстве [2], авиастроении [3], недропользовании [4] и других отраслях промышленности. Полимерные

материалы применяются в качестве защитных и защитно-упрочняющих покрытий и прослоек [5], для создания элементов конструкций [6], а также для создания изделий с использованием метода намотки [7–8]. Намотка – это процесс изготовления высокопрочных армированных изделий, форма которых определяется вращением произвольных образующих (оправок). Для связующей матрицы выбирают эпоксидные или полиэфирные смолы, полимеры сложных виниловых эфиров. Выбор связующего зависит от типа армирующего материала [9–10]. Оправки для намотки должны иметь форму и размеры, точно соответствующие внутренней поверхности наматываемых изделий, эффективно воспринимать силовые и температурные воздействия при намотке и отверждении связующего. При производстве крупногабаритных изделий преимущественно используются разрушаемые оправки, для их изготовления возможно применение песчано-полимерных смесей или легкоплавких материалов [11].

В процессе роста объемов производства изделий из композитных материалов, в том числе и способом мокрой намотки, актуальной становится проблема точного прогнозирования несущей способности конструкций, что тесно связано с разработкой эффективных математических моделей поведения как композиционных материалов в целом, так и матрицы, связующего и армирующих элементов в частности. Качественные модели поведения композитов позволят оценить влияние наиболее значимых конструктивных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние и прочность конструкций [12].

На протяжении последних десятилетий многие группы и отечественных, и зарубежных ученых занимались исследованием проблем, связанных с изготовлением намоточных изделий. Основные исследуемые вопросы можно разделить на три группы: определение эффективных механических характеристик [13]; определение усилий, реализуемых в материале в процессе намотки армирующих волокон на формообразующую оправку [14]; определение остаточных напряжений после изготовления [15]. Отдельно стоит проблема изучения термовязкоупругого поведения материалов, используемых в процессе производства конструкций [16]. В силу особенностей процесса изготовления крупногабаритных намоточных изделий, таких как длительность процесса намотки (от 10 до 15 суток) и высокотемпературный режим полимеризации связующего (до 170°C), целесообразно учитывать реологические процессы, протекающие в материале песчано-полимерных оправок и наматываемых оболочек, поскольку они оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние изделия. Экспериментальные методы определения характеристик достаточно дорогостоящие и имеют ряд физических ограничений, не позволяющих установить весь набор необходимых для проектирования характеристик [17]. Поэтому развитие численных моделей является перспективным и быстроразвивающимся направлением в вопросах изучения и применения полимерных композиционных материалов.

Объединение в единый расчетный модуль задач по определению эффективных характеристик материалов, усилий, реализуемых в процессе укладки армирующих материалов, температурных полей и деформаций в процессе отверждения позволит рассмотреть поведение конструкции с технологической оснасткой на всех ключевых этапах процесса производства, а также локализовать зоны возникновения дефектов.

Объект исследования

Объектом данного исследования является крупногабаритное намоточное изделие, представляющее собой пластиковую оболочку типа «кокон» с технологической оснасткой, состоящей из вала, песчано-полимерной оправки и прижимающего устройства, обеспечивающего фиксацию оправки. На рис. 1 представлены схема рассматриваемой конструкции и модель для решения тестовых задач в виде трехслойного сегмента цилиндра. Поскольку поставлена задача разработки комплексной методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе изготовления, то в качестве предмета исследования выбраны два этапа технологического процесса – намотка и отверждение связующего.

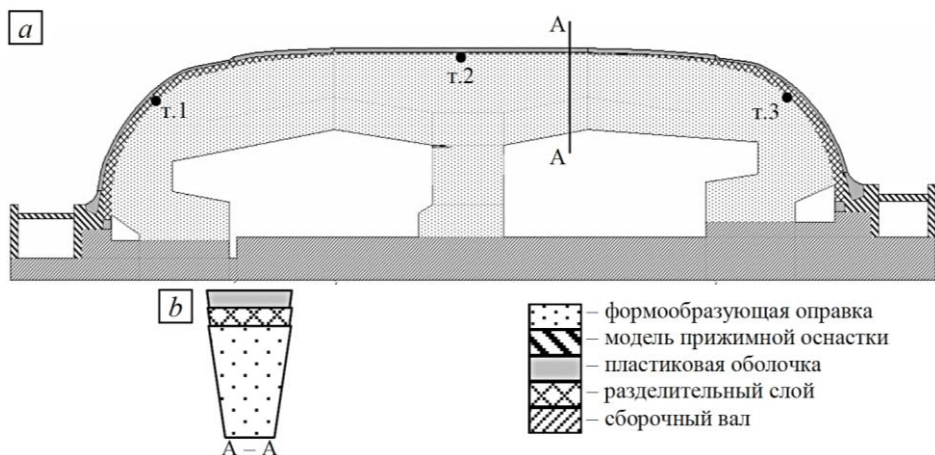


Рис. 1. Расчетная схема конструкции:

a – схема реальной конструкции; *b* – тестовая модель

Fig. 1. Scheme of the construction:

(*a*) real construction and (*b*) simplified model

Реальная конструкция не осесимметрична, так как секции формообразующей оправки укреплены ребрами жесткости и имеют технологические отверстия. Поэтому при численном моделировании разработан трехмерный конечно-элементный аналог, учитывающий не только габариты конструкции, но и ее технические особенности. Конечно-элементная модель параметризирована по размерам, углам, схеме армирования оболочки, усилиям и режиму полимеризации, что значительно расширяет ее применимость на производстве.

Подобные крупногабаритные изделия, как правило, малосерийные. К готовой оболочке предъявляются повышенные требования по прочности и точности геометрической формы. Особенно важно, что готовое изделие не должно иметь геометрических дефектов на внутренней поверхности. На появление таких отклонений, прежде всего, влияют свойства и поведение оправки в процессе производства. Поэтому при проектировании изделий данного класса важно вычислить зависимость нормального давления на поверхности оправки от условий техноло-

гического процесса. Для этого применяют упрощенные модели в упругой постановке, поскольку экспериментально измерить значения контактного давления на производстве трудоемко, нетехнологично и финансовозатратно [18]. Использование численных моделей позволяет как оценить эволюцию нормального давления в конкретных точках на поверхности оправки, так и получить интегральные оценки. В рамках исследования для первого этапа валидации модели выбрано три ключевых точки на поверхности оправки, обозначенные на рис. 1, для количественной и качественной оценки эволюции нормального давления. Точки 1 и 3 расположены на полусферических донных участках, точка 2 – на цилиндрическом.

Таким образом, разработка трехмерного численного аналога – новый этап для повышения точности расчетов и численных исследований напряженно-деформированного состояния систем «оправка–оболочка». Основываясь на особенностях технологического процесса изготовления пластиковых оболочек, построены расчетные схемы этапов технологического процесса. Определена система внешних силовых и температурных воздействий.

Постановка задачи

Поскольку технологический процесс сопряжен с температурным воздействием, необходимо последовательно решать два типа задач. Для определения изменения температурных полей в конструкции на протяжении процесса полимеризации решается задача нестационарной теплопроводности в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой. Общая постановка представлена в [19]. Для определения эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе изготовления решается квазистатическая краевая задача. В общем случае постановка задачи без учета объемных сил описана в [20]. В качестве исходных данных для описания поведения материалов выступали экспериментальные кривые релаксации материалов оправки [21], однонаправленного пластика и эпоксидного связующего, полученные при различных температурах. Согласно [22] рассматриваемые материалы можно принять линейновязкоупругими и термореологически простыми. В качестве определяющих соотношений выбрана вязкоупругая модель Пропу, использующая в качестве релаксационного ядра сумму экспонент с постоянным модулем объемного сжатия.

В выбранной модели предполагается, что материал испытывает только сдвиговую релаксацию при постоянном значении модуля объемного сжатия. Для получения экспериментальных параметров удобно использовать данные испытаний на одноосное растяжение–сжатие. Модуль релаксации для одноосного растяжения–сжатия имеет вид:

$$E(t) = E_0 \left[c_0 + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t}{\beta_i}\right) \right] \quad (1)$$

здесь c_i – относительные модули растяжения–сжатия для времен релаксации β_i , N_e – количество времен релаксации растяжения–сжатия.

Определяющее соотношение для одноосного случая:

$$\sigma(t) = \int_0^t \left[E_\infty + E_0 \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t-\tau}{\beta'_i}\right) \right] d\varepsilon(\tau), \quad (2)$$

где $\beta'_i = \frac{\beta_i}{A(T)}$ – приведенное время, $A(T)$ – функция сдвига. Поскольку материал

предполагается терморелогически простым, то используется функция сдвига Вильямса–Ланделла–Ферри

$$\lg(A(T)) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (3)$$

где T – текущая температура, T_r – постоянная базовая температура, C_1 , C_2 – эмпирические постоянные для материала.

Механическое поведение материалов в среде ANSYS Mechanical можно описать средствами модели Pgonu, предполагающей для среды наличие одного вязкоупругого оператора. При этом данная модель допускает описание поведения материала в виде сочетания ортотропно-упругих характеристик и релаксации компонент пропорционально упругим значениям [23]. Параметрами модели Pgonu являются c_i, β_i – коэффициенты аппроксимации обобщенной функции релаксации (1). Учет влияния температуры на скорость протекания релаксационных процессов описывается моделью Shift (в документации описана как Williams–Landel–Ferry Shift Function) с параметрами модели Вильямса–Ланделла–Ферри (3).

Особенности численного решения задачи

Для разработки численного аналога исследуемой конструкции предложено несколько новых подходов к конечно-элементному моделированию ключевых технологических этапов изготовления оболочки вращения, получаемой методом непрерывной намотки. Одной из рекомендаций является разделение процесса изготовления оболочки на два основных этапа: намотку высокомодульных лент на формообразующую оправку и полимеризацию связующей матрицы оболочки в печи. Такой подход позволяет проводить последовательные расчеты и оперативно варьировать параметры технологических процессов – усилия натяжения армирующих лент, усилия в прижимной оснастке, а также режим полимеризации.

При численном моделировании процесса изготовления композиционной оболочки необходимо определение эффективных вязкоупругих характеристик материала. Исходя из особенностей армирования, материал оболочки на макроуровне конструкции принято считать ортотропным. Для решения проблемы прогнозирования характеристик оболочки при изменении схемы армирования была разработана и предложена комплексная экспериментально-расчетная методика, основанная на решении краевых квазистатических задач термомеханики и принципах многоуровневого моделирования [24].

Моделирование технологического процесса изготовления осуществляется в четыре последовательных этапа. На первом этапе определяются усилия, возникающие в конструкции при натяжении высокомодульных армирующих лент на формообразующую оправку. Для реализации первого этапа моделирования на тестовой схеме (см. рис. 1, б) решена квазистатическая задача механики деформируемого тела в упругой постановке, имитирующая послойное наращивание толщины оболочки с применением технологии «оживления» конечных элемен-

тов. В каждом элементе слоя оболочки в качестве начальных условий вносились значения компонент тензора напряжений, возникающих от усилий наматывания армирующих лент. Для оценки возможности рационализации процедур численного моделирования проведено исследование влияния послойного и одномоментного оживления наматываемых слоев на изменение значения контактного давления по толщине оболочки и на поверхности оправки во время процесса намотки (рис. 2).

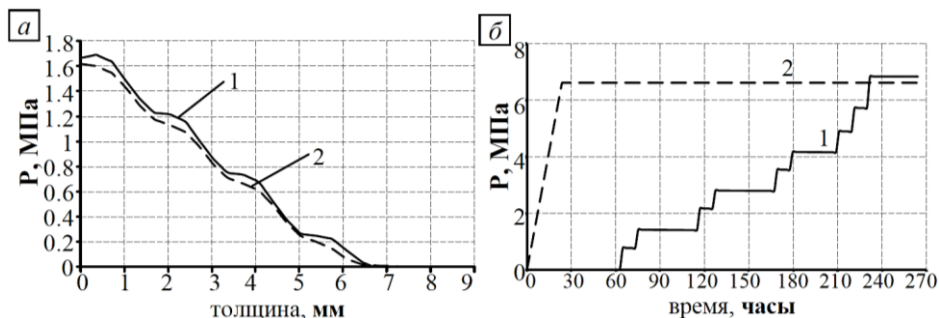


Рис. 2. Динамика контактного давления: а – по толщине; б – в процессе намотки; 1 – послойное оживление; 2 – одномоментное оживление

Fig. 2. Contact pressure curve: (a) by the thickness and (b) on the surface of the mandrel during winding; (1) layer-by-layer activation; (2) single-step activation

При одномоментном оживлении всех слоев значение максимального давления получилось на 10% ниже эталонного. Для коррекции данного значения было предложено ввести поправочный коэффициент для значений компонент тензора напряжений. На основе полученных данных сделан вывод о целесообразности объединения отдельных слоев в один слой с эффективными характеристиками и эффективными начальными напряжениями, которые обеспечивают необходимый уровень давления от оболочки на оправу. Для исследования реальной конструкции реализован параметризованный модуль для вычисления начальных напряжений в многослойной оболочке от действия силы натяжения армирующих волокон.

На втором этапе решается нестационарная задача теплопроводности для определения эволюции температурных полей в конструкции «оправка–оболочка» на протяжении полимеризации. При решении задачи теплопроводности реализуются граничные условия третьего рода, определяющие нагрев оболочки путем конвективного теплообмена с окружающей средой. Значения температуры внешней среды задаются на внешней поверхности оболочки и технологической оснастки, начальное распределение температур в конструкции постоянно. Коэффициенты конвективного теплообмена определены из серии вычислительных экспериментов, в рамках которых проводилось сравнение получаемого решения с термометрией реальной конструкции в процессе полимеризации.

Третий этап включает моделирование начального напряженного состояния в оболочке, возникающего от усилия натяжения ленты в процессе намотки, и расчет релаксации напряжений в материалах оправки и оболочки на протяжении времени, соответствующего процессу намотки. Вычисленные начальные деформации учитываются в материале оболочки как преднапряженное состояние.

Затем проводится решение квазистатической задачи. На четвертом этапе проводится расчет по определению эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе полимеризации с использованием итерационной процедуры, в которой для последовательных моментов времени подгружается соответствующее решение задачи нестационарной теплопроводности в качестве объемной нагрузки.

Полученные таким образом результаты, основанные на экспериментальных данных и предложенных приемах конечно-элементного моделирования, позволяют оценить вклад релаксации напряжений в оправке и оболочке на эволюцию напряженно-деформированного состояния в процессе изготовления реальной конструкции.

О многоуровневом подходе к прогнозированию вязкоупругих характеристик материала оболочки

В рамках численного моделирования процесса изготовления исследуемой конструкции при изменении схемы армирования материала многослойной оболочки каждый раз необходимо решать проблему определения эффективных вязкоупругих характеристик. Выбранный метод многоуровневого моделирования позволяет выделить этот этап решения в отдельную расчетную процедуру в рамках решения общей задачи. В исследовании выбрано два масштабных уровня. На первом уровне определяются свойства ячейки периодичности однонаправленного армированного слоя. На втором уровне определяются механические характеристики пластиковой оболочки, рассмотренной на представительном объеме наматываемого композита в виде набора отдельных слоев с постоянными углами армирования.

В композиционных оболочках слои в зависимости от угла укладки арматуры разделяют на два вида – кольцевые и спиральные. Кольцевые слои – слои с арматурой, уложенной перпендикулярно оси изделия. Спиральные слои представляют собой переплетенные ленты арматуры с симметричным относительно оси оболочки углом. Традиционно [13, 25] при решении задач по определению эффективных характеристик спиральные слои принято разделять на два слоя с симметричными углами армирования. Направление армирования в каждом слое соответствует заранее определенной схеме укладки волокон. Данный подход успешно применяется при прогнозировании эффективных упругих характеристик материалов. Численная процедура прогнозирования вязкоупругих характеристик материала реализована в ANSYS Mechanical APDL. На каждом масштабном уровне решался набор квазистатических задач итерационным методом [26]. Метод основан на решении задач линейной вязкоупругости с помощью квазиконстантных операторов. При численной реализации задачи методом конечных элементов выбранный подход вырождается в решении упругой задачи на каждой итерации (каждом шаге) интегрирования по времени.

При рассмотрении первого масштабного уровня предполагаем, что волокна уложены параллельно друг другу и материал имеет однонаправленную структуру. Такой материал описывается в литературе [13, 25] как трансверсально-изотропный в плоскостях, перпендикулярных направлению армирования. В упругой постановке поведение такого композита характеризуется пятью независимыми кон-

стантами. Для определения необходимых констант формулируется три вычислительных эксперимента для трехмерной ячейки периодичности: исследование продольной, поперечной и сдвиговой продольной деформаций ячейки. Для определения коэффициентов линейного температурного расширения формулируется вычислительный эксперимент по вычислению температурной деформации. Для обобщения метода квазиконстантных операторов на данный случай упругие константы заменяются соответствующими вязкоупругими операторами. В таком случае ставятся вычислительные эксперименты на исследование релаксации ячейки периодичности при продольном, поперечном и сдвиговом продольном деформировании.

Исходными данными для моделирования ячейки периодичности выступают результаты аппроксимации экспериментальных кривых продольной релаксации однонаправленного пластика и эпоксидного связующего, полученные при различных температурах. Для материала связующего функция релаксации была построена ранее на основе экспериментальных данных [27]. Однако для численной реализации первого уровня необходимо выделить функцию релаксации волокна. При моделировании механических свойств материал волокна считается изотропным и термореологически простым. Для получения функции релаксации материала используются соотношения для определения эффективного продольного модуля однонаправленно-армированного композиционного материала в операторной форме [13, 25]. Выделенная в результате кривая функции релаксации волокна представлена на рис. 3, *а*. Результаты реализации предложенного алгоритма решения задачи по прогнозированию эффективных характеристик в виде кривой ядра продольной релаксации для однонаправленного органопластика представлены на рис. 3, *б*. Значение мгновенного модуля E_y^* в поперечном направлении однонаправленного пластика получено равным 33 ГПа, а длительного – 2 ГПа.

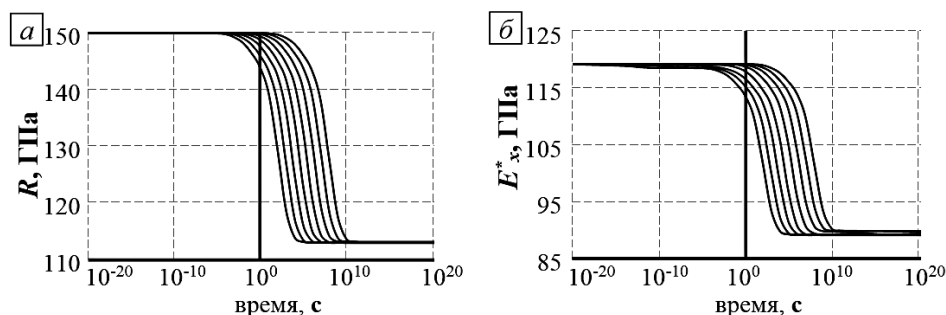


Рис. 3. Кривые ядра релаксации при различных температурах (справа налево) 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C: *а* – волокно, *б* – уровень монослоя

Fig. 3. Relaxation kernel curves at different temperatures (from right to left) 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C: (a) fiber and (b) laminar monolayer

Определение эффективных вязкоупругих характеристик материала оболочки в виде представительного объема многослойного пакета проведено на основе вычислительных экспериментов, в рамках которых исследуется эволюция напряженно-деформированного состояния с использованием метода конечных элементов. Поскольку исследуемый материал на макроуровне в глобальной системе ко-

ординат конструкции принято считать ортотропным, то для определения всех искомых операторов требуется проведение следующих вычислительных экспериментов: релаксация ячейки при деформировании в направлении кольцевого армирования; релаксация ячейки при деформировании в направлении, перпендикулярном кольцевому армированию; релаксация ячейки при деформировании в направлении, перпендикулярном плоскости слоев; сдвиговая релаксация ячейки в трех плоскостях.

Результаты реализации предложенного алгоритма решения задачи по прогнозированию эффективных вязкоупругих характеристик на уровне многослойного пакета представлены на рис. 4. Для операторного продольного модуля E_x^* мгновенное и длительное значения на 40% ниже, чем у однонаправленного пластика. Мгновенное значение операторного поперечного модуля E_y^* получено на уровне 55 ГПа, а длительное значение равно 26 ГПа, что выше значений для монослоя на порядок. Таким образом, рассматриваемая схема армирования приводит к более равномерному распределению прочностных характеристик и повышению прочности при повышенных температурах и / или длительных периодах эксплуатации.

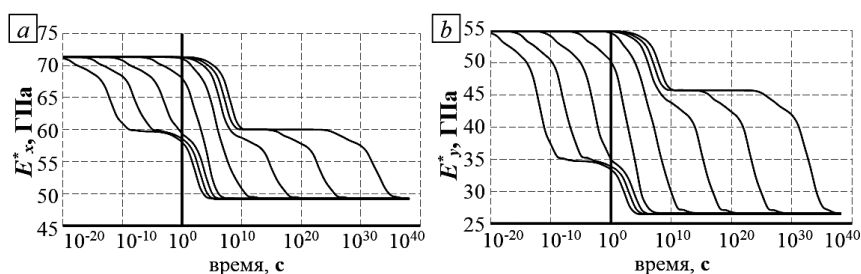


Рис. 4. Операторные ядра релаксации оболочки при различных температурах (справа налево) 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C: *a* – модуль E_x^* , *b* – модуль E_y^*

Fig. 4. Relaxation kernels at different temperatures (from right to left) 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C: Young's moduli (a) E_x^* and (b) E_y^*

Для адаптации полученных кривых релаксации в вычислительном комплексе конечно-элементного анализа выбрана методика обработки данных методами нелинейного программирования. Параметры коэффициента температурно-временного сдвига (3) определяются решением системы линейных алгебраических уравнений, составляемых из сравнения кривых релаксации при трех различных температурах. Коэффициенты аппроксимации (1) определяются минимизацией среднеквадратичной невязки.

Поскольку в ANSYS Mechanical APDL модель вязкоупругого поведения материалов Prony предполагает наличие для среды одного ядра релаксации, исходя из особенностей деформирования исследуемой конструкции сделано предположение, что наиболее существенным на эволюцию напряженно-деформированного состояния будет влияние релаксационных процессов в направлении кольцевого армирования. Параметры модели Prony определялись аппроксимацией ядра операторного модуля E_x^* . Для вычисления коэффициентов аппроксимации выбрана температура приведения $T_b = 80^\circ\text{C}$, и рассмотрен временной интервал, на котором

происходит достижение длительного модуля. Параметры аппроксимации определялись из решения задачи о поиске минимума среднеквадратичной невязки, относительная погрешность аппроксимации не превысила 0,6%.

Анализ влияния модели поведения оболочки на значение нормального давления на поверхности оправки

Для оценки влияния модели Prony с полученными параметрами на эволюцию напряженно-деформированного состояния конструкции проведено сравнение релаксации напряжений, возникающих от усилия укладки лент, на поверхности оправки при температуре 80°C. Серия вычисленных экспериментов с тремя различными вариантами представления материала оболочки выполнена на тестовой модели (рис. 1, b). Методом переменных параметров упругости были реализованы расчеты для послойного представления оболочки и оболочки с эффективными вязкоупругими характеристиками слоев. Третьим вариантом было однородное представление материала оболочки с набором упругих характеристик, описывающих ортотропность материала, и одним ядром релаксации посредством модели Prony с учетом влияния температуры на скорость протекания релаксационных процессов. Результаты решения задач представлены на рис. 5 в виде средних напряжений на поверхности оправки в трех направлениях. Обозначения соответствуют цилиндрической системе координат.

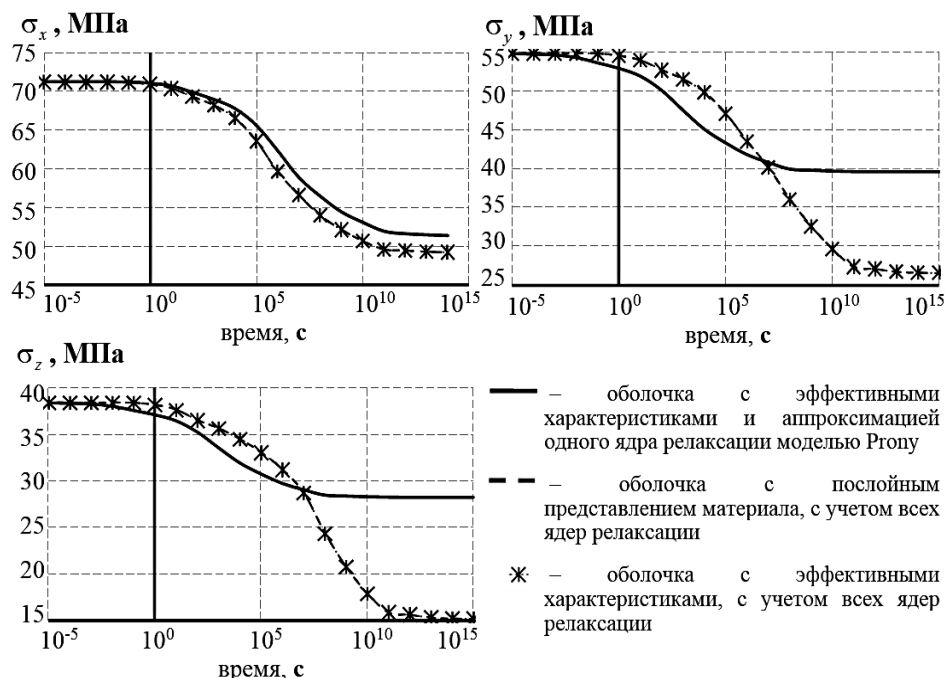


Рис. 5. Эволюция средних напряжений при температуре 80°C

Fig. 5. Evolution of mean stresses at temperature of 80°C

Решения тестовой задачи для многослойного представления и для осредненного методом переменных параметров упругости полностью идентичны. При сравнении с решением квазистатической задачи с моделью Prony получено, что отклонения длительных значений средних напряжений модели с аппроксимацией составляют: $\langle \sigma_x \rangle - 3,7\%$, $\langle \sigma_y \rangle - 23\%$, $\langle \sigma_z \rangle - 34\%$. На интервале времени до 10^7 с максимальные погрешности для разных направлений равны 3,7, 8,7 и 6,5% соответственно.

Сходимость решений по радиальному напряжению наиболее значима, поскольку оправка подвергается сжатию со стороны оболочки. Таким образом, выбранная модель описания поведения материала оболочки в исследуемой конструкции применима при решении задач по оценке прочности формообразующей оправки в процессе изготовления композиционной оболочки.

Сравнение нормального давления на поверхности оправки для двух моделей поведения оболочки

Используя вышеизложенные приемы конечно-элементного моделирования, реализовано решение комплексной задачи прогнозирования эволюции напряженно-деформированного состояния формообразующей оправки в процессе изготовления композиционной оболочки. Для оценки влияния релаксационных процессов в материале оболочки на значение нормального давления на поверхности оправки решено провести сравнение с упругой моделью, применяемой сегодня на производстве. Для этого моделирование этапов намотки и полимеризации оболочки реализовано с двумя моделями поведения материала оболочки – упругой и термовязкоупругой. Материал оправки описан как термовязкоупругий, параметры модели Prony и Shift определены по аналогичному алгоритму, что и для оболочки. В качестве исходных данных выступали результаты натурных экспериментов на сжатие при различных температурах [21]. Сравнение результатов расчетов проводится по значениям нормального давления в трех контрольных точках. Поскольку результаты, полученные для точек 1 и 3, идентичны, для качественного сравнения взято их среднее значение. Для наглядности и интерпретации полученных результатов оценка проведена для двух временных интервалов – этапа намотки оболочки и процесса полимеризации связующего. Результаты сравнения на этапе намотки представлены на рис. 6, а, на этапе полимеризации – на рис. 6, б.

На этапе намотки влияние модели поведения материала оболочки несущественно, поскольку наибольший вклад в снижение контактного давления на поверхности оправки вносит вязкоупругость материала оправки. Это подтверждается и реологическим поведением материала при нормальной температуре. По результатам экспериментальных данных при температуре 22°C снижение напряжений в образцах к моменту времени 10^5 с составило порядка 70%, с 8,5 до 2,5 ГПа.

На этапе полимеризации значения контактного давления на поверхности оправки, полученные для вязкоупругой модели оболочки, ниже на 10–15%, что также соответствует снижению продольного модуля материала многослойной оболочки. Например, для продольного модуля оболочки падение составляет 14,5% при всех рассмотренных температурах, с 70 до 60 ГПа.

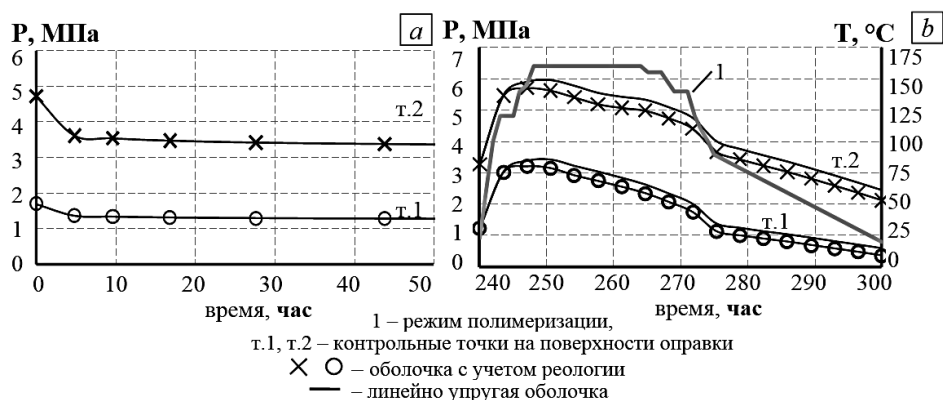


Рис. 6. Сравнение эволюции нормального давления на поверхности оправки:
 а – в процессе намотки, б – в процессе полимеризации

Fig. 6. Comparison of evolution of normal pressure on the surface of the mandrel:
 (a) winding process and (b) polymerization process

На основе полученных данных можно сделать вывод о целесообразности и важности учета термовязкоупругого поведения в композиционном материале многослойной оболочки при прогнозировании эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции в целом и оценке прочности формообразующей оправки в процессе изготовления изделий.

Заключение

В результате численного моделирования для реальной конструкции получены количественные и качественные закономерности эволюции нормального давления на поверхности формообразующей оправки на протяжении процесса намотки и полимеризации с учетом реологического поведения ключевых элементов конструкции – многослойной оболочки и оправки.

Предложенные методы и разработанные программные модули позволят в дальнейшем количественно оценивать влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции таких технологических параметров, как схема армирования, усилия натяжения армирующего материала, усилия, возникающие от действия технологической оснастки, режима термообработки. Планируемые в дальнейшем исследования по совершенствованию и верификации разрабатываемой модели позволят оптимизировать технологические процессы и повысить качество получаемых изделий. Предложенные методы и подходы к конечно-элементному моделированию дадут возможность существенно расширить области применения изделий из полимерных композиционных материалов, получаемых методом непрерывной намотки.

Список источников

1. Chang-Uk Kim, Jung-il Song. Development of lightweight fiber-reinforced composite pins for heavy load long pitch roller chains // Composite Structures. 2020. V. 236. Art. 111839. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111839

2. Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 15–26.
3. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 82–93. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93
4. Sebaey T.A. Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production // Energy Procedia. 2019. V. 162. P. 146–155.
5. Benea L., Simionescu N., Mardare L. The effect of polymeric protective layers and the immersion time on the corrosion behavior of naval steel in natural seawater // Journal of Materials Research and Technology. 2020. V. 9 (6). P. 13174–13184.
6. Changliang Lai, Yang Hu, Qing Zheng, Hualin Fan. All-composite flanges for anisogrid lattice-core sandwich panels to bear stretching load // Composites Communications. 2020. V. 19. P. 189–193.
7. Lei Zu, Hui Xu, Huabi Wang, Bing Zhang, Bin Zi. Design and analysis of filament-wound composite pressure vessels based on non-geodesic winding // Composite Structures. 2019. V. 207. P. 41–52.
8. Сироткин О.С., Боголюбов В.С., Малков И.В., Сыровой Г.В. Формообразование намоткой корпусных конструкций ЛА сложной формы из композиционных материалов // Авиационная промышленность. 2016. № 4. С. 29–35.
9. Воробей В.В., Евстратов С.В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, № 1. С. 61–72.
10. Русаков И.Ю., Софронов В.Л. Основы конструирования и расчета элементов оборудования отрасли : учеб. пособие. Северск : Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018. 271 с.
11. Зуев А.С., Емашев А.Ю., Шайдунова Г.И. Анализ особенностей изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки. Формообразующие оправки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 3. С. 4–13. doi: 10.18698/0236-3941-2018-3-4-13
12. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Моделирование гибких тканых композитов в системе ANSYS MECHANICAL APDL // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10, № 6. С. 789–799. doi: 10.20537/2076-7633-2018-10-6-789-799
13. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
14. Антонов В.И. Начальные напряжения в анизотропном неоднородном цилиндре, образованном намоткой // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 28–33.
15. Захарычев С.П., Иванов В.А., Отмахов Д.В., Авдеев В.А. Влияние технологических условий намотки на свойства полимерных композиционных материалов // Вестник ТОГУ. 2010. № 1 (16). С. 55–64.
16. Янковский А.П. Моделирование линейно-термовязкоупругого поведения композитов с пространственной структурой армирования // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 2. С. 3–14.
17. Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Испытания на растяжение однонаправленного высоконаполненного стеклопластика при нормальных и повышенных температурах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76, № 7. С. 57–59.
18. Суходоева А.А. Совместное деформирование оправки и композиционной оболочки при силовой намотке // Вестник ПГТУ. Вычислительная математика и механика. 2000. С. 52–55.
19. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. М. : Высшая школа, 1982. Ч. 2. 304 с.
20. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М. : Наука, 1977. 416 с.

21. Слепова А.А., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Сметанников О.Ю. Экспериментальное изучение температурных зависимостей прочностных и упругих характеристик и реологического поведения образцов песчано-полимерной композиции при сжатии // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2018. Т. 1. С. 272–276.
22. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязко-упругости. М. : Наука, 1970. 281 с.
23. Otero J.A., Rodríguez-Ramos R., Guinovart-Díaz R. et al. Asymptotic and numerical homogenization methods applied to fibrous viscoelastic composites using Prony's series // *Acta Mech*. 2020. V. 231. P. 2761–2771. doi: 10.1007/s00707-020-02671-1
24. Bednarczyk B.A., Stier B., Simon J-W., Reese S., Pineda E.J. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites // *Composite Structures*. 2015. V. 121. P. 258–270. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.11.013
25. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1984. 336 с.
26. Куликов Р.Г., Труфанов Н.А. Применение итерационного метода к решению задачи деформирования однонаправленного композиционного материала с нелинейно-вязкоупругим связующим // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2011. Т. 4, № 2. С. 61–71.
27. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклующихся телах // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2008. Т. 1, № 1. С. 92–107.

References

1. Chang-Uk Kim, Jung-il Song (2020) Development of lightweight fiber-reinforced composite pins for heavy load long pitch roller chains. *Composite Structures*. 236. pp. 111839. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111839
2. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pan'kova A.P. (2020) Numerical analysis of the geometric configuration of a spherical support part with an antifriction layer made of different materials. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 4. pp. 15–26. doi: 10.15593/perm.mech/2020.4.02
3. Doneckiy K.I., Bystrikova D.V., Karavayev R.Ju., Timoshkov P.N. (2020) Polimernyye kompozitsionnyye materialy dlya sozdaniya elementov transmissiy aviatsionnoy tekhniki (obzor) [Application of polymeric composite materials for creation of elements of transmissions of aviation engineering (review)]. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*. 3(87). pp. 82–93. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93
4. Sebaey T.A. (2019) Design of oil and gas composite pipes for energy production. *Energy Procedia*. 162. pp. 146–155.
5. Benea L., Simionescu N., Mardare L. (2020) The effect of polymeric protective layers and the immersion time on the corrosion behavior of naval steel in natural seawater. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(6). pp. 13174–13184.
6. Changliang Lai, Yang Hu, Qing Zheng, Hualin Fan (2020) All-composite flanges for anisogrid lattice-core sandwich panels to bear stretching load. *Composites Communications*. 19. pp. 189–193.
7. Lei Zu, Hui Xu, Huabi Wang, Bing Zhang, Bin Zi (2019) Design and analysis of filament-wound composite pressure vessels based on non-geodesic winding. *Composite Structures*. 207. pp. 41–52.
8. Sirotkin O.S., Bogolyubov V.S., Malkov I.V., Syrovoy G.V. (2016) Formoobrazovaniye namotkoy korpusnykh konstruksiy LA slozhnoy formy iz kompozitsionnykh materialov [Winding of aircraft complex-shaped structures made of composite materials]. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 4. pp. 29–35.
9. Vorobey V.V., Evstratov S.V. (2009) Novyye napravleniya v sovremennoy tekhnologii namotki konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov [New directions in modern technology

- of winding structures from composite materials]. *Vestnik MAI – Aerospace MAI Journal*. 16(1). pp. 61–72.
10. Rusakov I.Ju., Sofronov V.L. (2018) *Osnovy konstruirovaniya i rascheta jelementov oborudovaniya otrasli: uchebnoe posobie* [Fundamentals of design and calculation of equipment items industry: study guide]. Seversk: STI NIYaU MIFI.
11. Zuev A.S., Emashev A.Yu., Shaydurova G.I. (2018) Analiz osobennostey izgotovleniya izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom namotki. Formoobrazuyushchie opravki [Analysing specifics of manufacturing items out of polymer composite materials by means of filament winding. Shaping mandrels]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 3(120). pp. 4–13. doi: 10.18698/0236-3941-2018-3-4-13
12. Kozhanov D.A., Lyubimov A.K. (2018) Import model of flexible woven composites in ANSYS Mechanical APDL. *Computer research and modeling*. 10(6). pp. 789–799. doi: 10.20537/2076-7633-2018-10-6-789-799
13. Vasil'ev V.V. (1988) *Mekhanika konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite structures]. Moscow: Mashinostroyeniye.
14. Antonov V.I. (2010) Nachal'nyye napryazheniya v anizotropnom neodnorodnom tsilindre, obrazovannom namotkoy [Initial stresses in an anisotropic inhomogeneous cylinder formed by winding]. *Vestnik MGSU*. 4. pp. 28–33.
15. Zakharychev S.P. (2010) Vliyaniye tekhnologicheskikh usloviy namotki na svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov [Influence of technological conditions of winding on properties of polymer composite materials]. *Vestnik TOGU – Bulletin of PNU*. 1(16). pp. 55–64.
16. Yankovskiy A.P. (2016) Modelirovaniye lineyno-termovyazkoupругogo povedeniya kompozitov s prostranstvennoy strukturoy armirovaniya [Modeling of linear thermoviscoelastic behavior of spatial-reinforced composites]. *Konstruksii Iz Kompozitsionnykh Materialov*. 2(142). pp. 3–14.
17. Babushkin A.V., Vil'deman V.E., Lobanov D.S. (2010) Ispytaniya na rastyazheniye odnonapravlennoogo vysokonapolnennogo stekloplastika pri normal'nykh i povyshennykh temperaturakh [Tensile testing of unidirectional highly filled fiberglass at normal and elevated temperatures]. *Industrial Laboratory*. 76(7). pp. 57–59.
18. Sukhodoyeva A.A. (2000) Sovmestnoye deformirovaniye opravki i kompozitsionnoy obolochki pri silovoy namotke [Joint deformation of the mandrel and the composite shell during power winding]. *Vestnik PGTU. Vychislitel'naya matematika i mekhanika*. pp. 52–55.
19. Belyayev N.M., Ryadno A.A. (1982) *Metody teorii teploprovodnosti. Chast' 2*. [Methods of the theory of heat conduction. Part 2]. Moscow: Vysshaya shkola.
20. Lehnitskiy S.G. (1977) *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* [The theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow: Nauka.
21. Sletova A.A., Lobanov D.S., Vil'deman V.E., Smetannikov O.Yu. (2018) Eksperimental'noye izucheniye temperaturnykh zavisimostey prochnostnykh i uprugikh kharakteristik i reologicheskogo povedeniya obraztsov peschano-polimernoy kompozitsii pri szhatii [Experimental study of temperature dependences of strength and elastic characteristics and rheological behavior of samples of sand-polymer composition under compression]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*. 1. pp. 272–276.
22. Il'yushin A.A., Pobedrya B.E. (1970) *Osnovy matematicheskoy teorii termovyazko-uprugosti* [Fundamentals of the mathematical theory of thermoviscous elasticity]. Moscow: Nauka.
23. Otero J.A., Rodriguez-Ramos R., Guinovart-Díaz R. (2020) Asymptotic and numerical homogenization methods applied to fibrous viscoelastic composites using Prony's series. *Acta Mechanica*. 231(7). pp. 2761–2771. doi: 10.1007/s00707-020-02671-1
24. Bednarczyk B.A., Stier B., Simon J-W., Reese S., Pineda E.J. (2015) Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites. *Composite Structures*. 121. pp. 258–270. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.11.013

25. Pobedrya B.E. (1984) *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.
26. Kulikov R.G., Trufanov N.A. (2011) *Primeneniye iteratsionnogo metoda k resheniyu zadachi deformirovaniya odnonapravlennoy kompozitsionnoy materiala s nelineynoy vyazkoupругim svyazuyushchim* [Application of the iteration method for solving the problem of deformation of unidirectional composites with nonlinear viscoelastic matrix]. *Vychislitel'naya mehanika sploshnykh sred – Computational Continuum Mechanics*. 4(2). pp. 61–71.
27. Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. (2008) *Chislennyy analiz tekhnologicheskikh i ostatочnykh napryazheniy v steklyuyushhihsya telakh* [Numerical analysis of technological and residual stresses in vitrified bodies]. *Vychislitel'naya mehanika sploshnykh sred – Computational Continuum Mechanics*. 1(1). pp. 92–107.

Сведения об авторах:

Сахабудинова Ляйсан Рамилевна – старший преподаватель кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: lyaysans@list.ru

Сметанников Олег Юрьевич – доктор технических наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: vmm@pstu.ru

Ильиных Глеб Валентинович – старший преподаватель кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия). E-mail: ilinykh.pnpu@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sakhabutdinova Lyaysan R. (Senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation). E-mail: lyaysans@list.ru

Smetannikov Oleg Yu. (Doctor of science in engineering sciences, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation). E-mail: vmm@pstu.ru

Ilinykh Gleb V. (Senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation). E-mail: ilinykh.pnpu@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.06.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 16.06.2021; accepted for publication 22.03.2022