

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Сахабудинова, Л. Р. Моделирование процесса изготовления оболочек методом непрерывной мокрой намотки / Л. Р. Сахабудинова, О. Ю. Сметанников. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2024.4.03 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2024. – № 4. – С. 34–51.



**ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ**

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.03

УДК 51-74



Моделирование процесса изготовления оболочек методом непрерывной мокрой намотки

Л.Р. Сахабудинова, О.Ю. Сметанников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 20 ноября 2024
Одобрена: 11 декабря 2024
Принята к публикации:
28 декабря 2024

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2023-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Ключевые слова:

термовязкоупругость, эффективные характеристики, метод непрерывной намотки, давление, оправка, численное моделирование, технологический процесс, Prony series, Williams – Landel – Ferry shift function

АННОТАЦИЯ

В статье представлены основные положения разработанной комплексной расчетно-экспериментальной методики описания поведения и исследование на ее основе напряженно-деформированного состояния системы «оправка – композиционная оболочка» в процессе изготовления оболочки с учетом термовязкоупругого поведения материалов.

Использованы результаты экспериментального исследования релаксации материалов оправки и оболочки при нормальных и повышенных температурах и аппарат механики деформированного твердого тела. Численное моделирование осуществлено методом конечных элементов, реализованным в среде ANSYS Mechanical средствами параметрического языка программирования APDL. Стандартные механические испытания образцов материала оправки, связующего и образцов однонаправленного ПКМ проводились в Центре экспериментальной механики ПНИПУ на сертифицированной универсальной электромеханической системе Instron 5882. Расчетно-экспериментальная методика включает в себя: численную процедуру идентификации термомеханических параметров для описания поведения изотропного материала оправки с учетом реологии при нормальной и повышенных температурах; модель термовязкоупругого поведения композиционного материала в процессе намотки и термообработки, сочетающую анизотропию упругого поведения среды с одним независимым вязкоупругим оператором, реализованная в среде Ansys Mechanical APDL; алгоритм построения трехмерного конечно-элементного аналога системы «оправка – оболочка» с технологической оснасткой, который учитывает распределение начальных усилий в оболочке и фрикционный контакт со смазкой на границе сопряжения оправки со сборочным валом; алгоритм определения термовязкоупругого поведения системы «оправка – оболочка», реализованный путем последовательного решения задачи нестационарной теплопроводности и квазистатической краевой задачи механики деформируемого твердого тела.

В результате проведенных исследований получены новые данные о пространственно-временном распределении интенсивностей напряжений и нормального давления на внешней поверхности оправки, установленные в результате комплексного исследования на основе вычислительных экспериментов, в том числе при отклонениях от проектных параметров технологического процесса.

© Сахабудинова Ляйсан Рамилевна – старший преподаватель, кафедра «Вычислительная математика, механика и биомеханика», e-mail: lyaysans@list.ru, ORCID 0009-0007-4764-3563.

Сметанников Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор, кафедра «Вычислительная математика, механика и биомеханика», e-mail: vmm@pstu.ru, ORCID 0000-0003-3100-7283.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Sahabutdinova L.R., Smetannikov O.Yu. Modeling of the process of manufacturing shells by the continuous wet winding method. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2024, no. 4, pp. 34–51. DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.03

MDPI and ACS Style: Sahabutdinova, L.R.; Smetannikov, O.Yu. Modeling of the process of manufacturing shells by the continuous wet winding method. *Appl. Math. Control Sci.* **2024**, *4*, 34–51. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.03>

Chicago/Turabian Style: Sahabutdinova, Lyaysan R. and Oleg Yu. Smetannikov. 2024. "Modeling of the process of manufacturing shells by the continuous wet winding method". *Appl. Math. Control Sci.* no. 4: 34–51. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.03>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.03

UDC 51-74



Modeling of the process of manufacturing shells by the continuous wet winding method

L.R. Sahabutdinova, O.Yu. Smetannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 November 2024

Approved: 11 December 2024

Accepted for publication:

28 December 2024

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSNM-2021-0006.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

equivalent.

Keywords:

thermoviscoelasticity, effective characteristics, continuous winding method, pressure, mandrel, numerical modeling, technological process, Prony series, Williams – Landel – Ferry shift function

ABSTRACT

The article presents the main provisions of the developed complex calculation and experimental technique for describing the behavior and studying, on its basis, the stress-strain state of the "mandrel - composite shell" system during the shell manufacturing process, taking into account the thermoviscoelastic behavior of materials. The research was carried out using the results of an experimental study of the relaxation of the mandrel and shell materials at normal and elevated temperatures and the apparatus of mechanics of a deformed solid. Numerical modeling was carried out by the finite element method implemented in the ANSYS Mechanical environment by means of the APDL parametric programming language. Standard mechanical tests of mandrel material samples, binder and unidirectional PCM samples were carried out at the PNRPU Center for Experimental Mechanics on the certified Instron 5882 universal electromechanical system. The calculation and experimental technique includes: a numerical procedure for identifying thermomechanical parameters to describe the behavior of an isotropic mandrel material taking into account the rheology at normal and elevated temperatures; a model of thermoviscoelastic behavior of a composite material during winding and heat treatment that combines the anisotropy of the elastic behavior of the medium with one independent viscoelastic operator, implemented in the Ansys Mechanical APDL environment; an algorithm for constructing a three-dimensional finite element analogue of the "mandrel – shell" system with technological equipment that takes into account the distribution of initial forces in the shell and frictional contact with lubricant at the interface of the mandrel with the assembly shaft; an algorithm for determining the thermoviscoelastic behavior of the "mandrel – shell" system, implemented by sequentially solving the problem of non-stationary heat conductivity and the quasi-static boundary value problem of mechanics of a deformable solid. As a result of the studies, new data were obtained on the spatio-temporal distribution of stress intensities and normal pressure on the outer surface of the mandrel, established as a result of a comprehensive study based on computational experiments, including with deviations from the design parameters of the technological process.

© **Lyaysan R. Sahabutdinova** – senior lecturer, Department of Computational mathematics, mechanics and biomechanics, e-mail: lyaysans@list.ru, ORCID 0009-0007-4764-3563

Oleg Yu. Smetannikov – Doctor of Science, professor, Department of Computational mathematics, mechanics and biomechanics, e-mail: vmm@pstu.ru, ORCID 0000-0003-3100-7283.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

Методом непрерывной мокрой намотки из полимерных композиционных материалов изготавливают различные полые тела вращения, так называемые силовые оболочки, которые находят применение для хранения и транспортировки химикатов, сжиженных или находящихся под давлением газов в различных отраслях [8–13]. Намотка силовых оболочек осуществляется на специальную технологическую оснастку – формообразующую оправку. Оправки изготавливают из различных материалов, они могут быть извлекаемыми или оставаться в готовой оболочке, как при производстве магистральных трубопроводов. При производстве оболочек закрытого профиля преимущественно используются разрушаемые оправки, например из песчано-полимерных смесей. Процесс изготовления крупногабаритных оболочек занимает длительное время и является весьма дорогостоящим, поэтому важно предотвратить появление различных дефектов.

Из-за многообразия конструкций и материалов остаются актуальными проблемы прогнозирования прочности готовых оболочек. На качество готового изделия, помимо схем армирования, оказывают влияние технологические процессы изготовления. Методы и подходы к проектированию изделий, подбору технологических параметров проверены временем и широко применяются на производстве. При этом процесс моделирование технологического процесса сопряжен с решением ряда задач: прогнозирование механических свойств изделий из полимерных композитов, описание процесса намотки армирующего материала на формообразующую оправку, определение температурных полей, прогнозирование изменения напряженного деформированного состояния конструкции в процессе намотки и термообработки. Исследование и разработка методов прогнозирования механических характеристик слоистых композиционных материалов остаются актуальными проблемами на протяжении многих лет [1–9]. Исследованиями отдельных этапов производства и эксплуатации изделий из слоистых композитов посвящены труды [10–16]. Исследованию реологии компонентов ПКМ, отысканию остаточных напряжений в композиционных материалах с учетом реологии посвящены работы [17–19]. Исследованию тепломассопереноса в процессе изготовления посвящена работа [20]. Разработке систем управления и оптимизации процесса изготовления посвящены исследования [21–23]. Вопросам исследования совместного деформирования формообразующей оправки и оболочки посвящены работы [24–27], в которых рассматриваются неразрушаемые оправки из металлов или полимерные лайнеры. Следует отметить, что в литературе слабо отражены результаты исследований, посвященных изучению поведения крупногабаритных полимерных оболочек в процессе изготовления, учитывающих их взаимодействие с технологической оснасткой. Кроме этого, при производстве новых малосерийных изделий, в которых реализуются разные схемы намотки, внедряются новые материалы для производства оболочек и оправок, что ведет к появлению таких проблем, как отклонение реальной геометрии от проекта, несовершенства структуры и, как следствие, снижение эксплуатационных характеристик готового изделия. Во многом это можно объяснить тем, что предложенные расчетные методы применимы для цилиндрических оболочек или оболочек канонической формы. Также отмечено, что во многих предложенных методиках расчета не учитывается поведение оправки либо рассматривается в упругой постановке. При проектировании крупногабаритных изделий, получаемых намоткой на разрушаемые оправки, такие допущения неприменимы. Для определения полей остаточных напряжений и деформаций в оболочке необходимо проводить исследование эволюции напряженно-деформированного состояния на протяжении всего технологического процесса с учетом совместного деформи-

рования системы «оправка – оболочка». Независимые решения, полученные для отдельных этапов технологического процесса, не позволяют с достаточной точностью прогнозировать появление дефектов и управлять параметрами процессов намотки и полимеризации. В связи с этим был поставлен вопрос о разработке методики решения краевой задачи механики для прогнозирования поведения изделия, получаемого методом мокрой намотки, с учетом структуры формируемого материала и таких технологических факторов, как режимы намотки и термообработки.

Решить сформулированную задачу прогнозирования поведения крупногабаритного намоточного изделия в условиях сложного термосилового нагружения можно с помощью метода конечных элементов, реализованного в сертифицированных пакетах инженерного анализа, с учетом физико-механических характеристик материалов конструкции, технологических параметров процесса изготовления, конструктивных особенностей оснасток. Корректная постановка краевой задачи и практически ориентированная методика ее решения дадут возможность поставить задачи об оптимизации намоточных изделий, оправок, оснасток и параметров технологических процессов – схем намотки, усилий и скорости натяжений лент, режимов термообработки.

Таким образом, в статье отражены основные подходы и результаты разработки комплексного подхода к прогнозированию поведения системы «оправка – полимерная оболочка» в процессе изготовления с учетом термовязкоупругого поведения элементов конструкции. Общий объем проведенных исследований включал в себя следующие этапы:

- 1) идентификация термомеханических параметров для описания вязкоупругого поведения материалов формообразующей оправки и полимерной композиционной оболочки;
- 2) формулировка технической и математической постановки краевой задачи механики деформируемого твердого тела, разработка численного аналога для отыскания напряженно-деформированного состояния крупногабаритных композиционных оболочек в процессе изготовления методом непрерывной мокрой намотки с учетом особенностей технологического процесса;
- 3) проведение анализа полученных температурных полей и напряженно-деформированного состояния объекта исследования для валидации и верификации предложенной методики решения поставленной задачи;
- 4) проведение комплексных численных исследований для оценки влияния основных технологических параметров процесса намотки и термообработки на поля остаточных напряжений и деформаций в системе «оправка – оболочка».

Данные и методы

Для идентификации термомеханических параметров описания вязкоупругого поведения материалов формообразующей оправки и полимерной композиционной оболочки использованы данные, полученные при экспериментальном исследовании прочности и релаксации в области растяжения-сжатия при нормальной и повышенных температурах (70, 110, 150 °C) цилиндрических образцов материала оправки и однонаправленных овальных образцов пластика. Все исследования проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5882. Для определения прочности и модуля упругости материала оправки в ходе экспериментального исследования было испытано 20 образцов, при каждой температуре было испытано по 5 образцов, скорость передвижения траверсы была 1 мм/мин и постоянна. Исследование релаксации в области сжатия проводилось в условиях нормальной и повышенных температур (70, 110, 150 °C), было испытано по 5 образцов. Время прове-

дения испытаний при комнатной температуре составило 8 ч, при повышенных температурах – 4 ч. Образцы для испытаний при повышенных температурах подвергались предварительному линейному нагреву со скоростью 10 °C в минуту и последующему термостатированию в течение 2 ч для прогрева всех элементов нагружающей цепи и температурной камеры. При проведении испытаний образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 10 мм/мин до значений напряжений, составляющих 30 % от статического предела прочности при сжатии для заданной температуры [28].

Исследования релаксации напряжений при растяжении однонаправленных образцов пластика проводились в условиях нормальной и повышенных (70, 110, 170 °C) температур. При нормальной температуре измерение деформации осуществлялось при помощи навесного экстензометра Instron 2620-601, при повышенных температурах использовался бесконтактный видеоэкстензометр AVE Instron. Испытания при комнатной температуре длились 8 ч, при повышенных температурах – 4 ч. Перед испытаниями при повышенных температурах образцы были линейно нагреты со скоростью 10 °C/мин и выдержаны при этой температуре в течение 4 ч для полного прогрева всех элементов нагружающей цепи и температурной камеры.

Полученные результаты испытания образцов в виде зависимости напряжений от времени позволили установить, что рост температуры оказывает существенное влияние на поведение материалов. Из анализа кривых релаксации напряжений сделан вывод, что при решении задач, сопряженных с температурным воздействием, необходимо учитывать реологические процессы, протекающие в материалах конструкции.

На основе полученных данных сделан выбор общих определяющих соотношений для описания поведения материалов. Согласно работам [1; 28] приняты гипотезы о линейновязкоупругом и термореологически простом поведении материалов. Кроме этого, опираясь на результаты исследований [30; 31], нелинейное поведение оболочки в первую очередь обусловлено реологическими процессами, протекающими в волокне, а не в связующем, так как его прочностные характеристики ниже на 2 порядка. В рассматриваемом типе конструкций доля материалов оправки и армирующего волокна существенно больше связующего, в процессе изготовления конструкция подвергается воздействию температур, значения которых выше точки стеклования, поэтому в качестве определяющих соотношений выбрана вязкоупругая модель максвелловского типа с реализацией рядами Прони [32; 33], использующая в качестве релаксационного ядра сумму экспонент. Предполагается, что модуль объемного сжатия постоянен, а материал испытывает только сдвиговую релаксацию. Параметры выбранной модели определены из результатов испытаний на одноосное растяжение-сжатие. Для учета влияния температур на скорость релаксационных процессов использована функция температурно-временного сдвига по формуле Вильямса – Ландела – Ферри.

Предложенное описание механического поведения материалов адаптировано в среде ANSYS Mechanical APDL с помощью модели Prony. Зависимость скорости релаксации от температуры описано с помощью функционала модели Shift.

Адаптация экспериментальных данных для предложенной модели описания поведения материалов реализована за четыре шага:

- 1) фактические экспериментальные кривые релаксации напряжений преобразовываются к функциям релаксации материала при каждой температуре и усредняются;
- 2) относительно базовой температуры 22 °C вычисляются коэффициенты температурно-временного сдвига, и данные переводятся в приведенное время;
- 3) строится обобщенная кривая релаксации материала;
- 4) для обобщенной кривой релаксации вычисляются коэффициенты аппроксимации ядра.

После обработки экспериментальных данных методами нелинейного программирования для материалов были получены значения материальных констант модели, удовлетворяющие условию минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными.

Процесс изготовления оболочек методом непрерывной намотки разделен на два этапа – намотки и термообработки. При прогнозировании поведения конструкции в процессе изготовления необходимо решать два типа задач. Первая задача – это отыскание эволюции температурных полей, реализующихся в конструкции на этапе термообработки, который представляет собой термоцикл с изменяющимися во времени температурами, которая сведена к задаче нестационарной теплопроводности. Для определения эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции «оправка – оболочка» в процессе изготовления рассмотрена квазистатическая краевая задача, учитывающая температурные деформации.

Модель

Первым этапом производства крупногабаритных намоточных оболочек является процесс укладки армирующих лент на формообразующую оправку. Данный этап происходит при постоянной температуре на протяжении нескольких суток. В процессе укладки армирующие ленты пропитываются связующей матрицей, затем укладываются по заданной траектории с предварительным натягом или начальным усилием в ленте. Согласно широко применяемым принципам, получаемую структуру можно представить в виде двух спиральных слоев с противоположными углами армирования [3]. При отыскании напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе намотки удобно воспользоваться данным принципом и рассматривать формируемую оболочку как набор отдельных однонаправленных слоев с постоянным углом армирования. Для учета угла армирования в конечно-элементном аналоге в каждом слое вводится локальная система координат, в которой задаются характеристики однонаправленного пластика. Таким образом, в конечно-элементной реализации на цилиндрическом участке рассмотрен набор слоев однонаправленного пластика. Для корректного описания поведения представительного объема конструкции применен специальный набор граничных и периодических граничных условий.

На основе данной модели сформулирована и решена задача определения напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе намотки. В ANSYS Mechanical процесс наращивания толщины оболочки реализован с помощью технологии EKILL-EALIVE, или так называемого «оживления» конечных элементов. Для учета натяжения армирующих лент использован метод INISTATE, который задает в конечных элементах начальное напряжение.

Для поиска путей экономии вычислительных ресурсов были рассмотрены две тестовые модели представления оболочки – полная послойная (рис. 1, *а*) и однородное с эффективными характеристиками (рис. 1, *б*). Эффективные упругие характеристики и осредненные начальные напряжения для оболочки определялись с помощью серии вычислительных экспериментов для представительного объема.

На основе предложенных моделей проведена оценка влияния послойного и одномоментного «оживления» слоев оболочки на распределение радиальных напряжений по толщине оболочки и зависимость радиальных напряжений на поверхности оправки от времени.

Сравнение полученных результатов представлено на рис. 2.

Полученная для однородного представления оболочки линейная зависимость радиальных напряжений по толщине является корректной, при этом максимальное и минимальное значения полностью совпадают с послойным представлением для оболочки. Таким образом, при проведении исследования термовязкоупругого поведения крупногаба-

ритного намоточного изделия в процессе изготовления материал оболочки можно рассматривать как однородный с анизотропными термомеханическими свойствами.

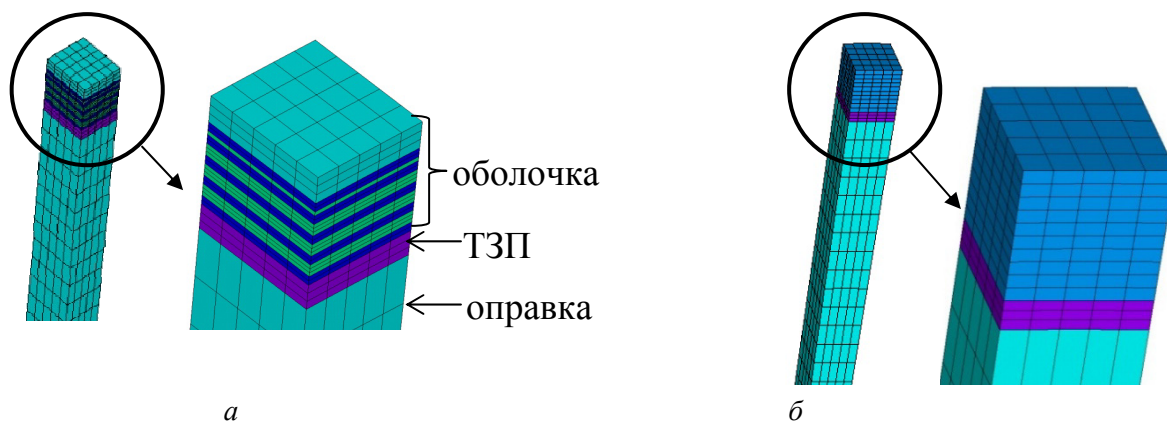


Рис. 1. КЭ-модели тестовых задач: *а* – послойное представление оболочки; *б* – оболочка с эффективными характеристиками

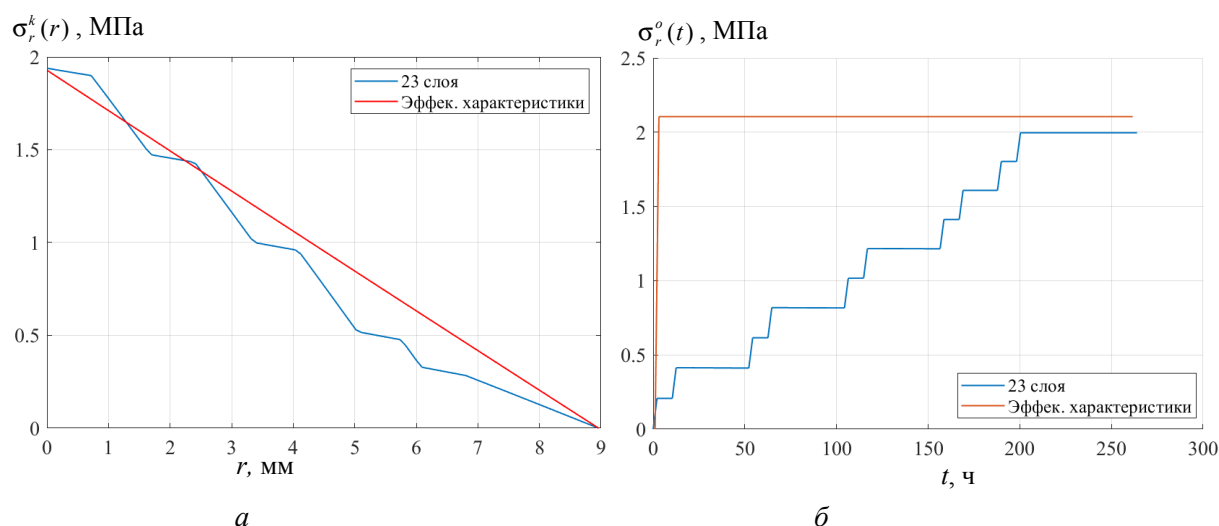


Рис. 2. Распределение радиальных напряжений в оболочке (*а*) и на поверхности оправки (*б*) для послойного представления (синяя линия) и с распределенными эффективными характеристиками (красная линия)

Для прогнозирования поведения конструкции с учетом технологической оснастки, состоящей из сборочного вала, оправки, оболочки и прижимного устройства, разработан алгоритм автоматизированного построения конечно-элементного аналога для исследуемой конструкции. Ключевые геометрические параметры определяют конфигурацию оправок – число центральных цилиндрических секций, количество ребер жесткости на сводах. Эти данные позволяют выбрать угловой сегмент периодичности конструкции и количество локальных систем координат для построения геометрического аналога. Разработанный алгоритм построения конечно-элементного аналога позволяет варьировать степень дискретизации модели и число разбиений по толщине оболочки, при этом всегда строится не менее трех элементов по толщине. Для удобства работы степень дискретизации определяется масштабным коэффициентом, от значения которого зависит число разбиений на каждой линии. На рис. 2, *а*, представлен полученный конечно-элементный аналог конструкции при масштабном коэффициенте, равном 8.

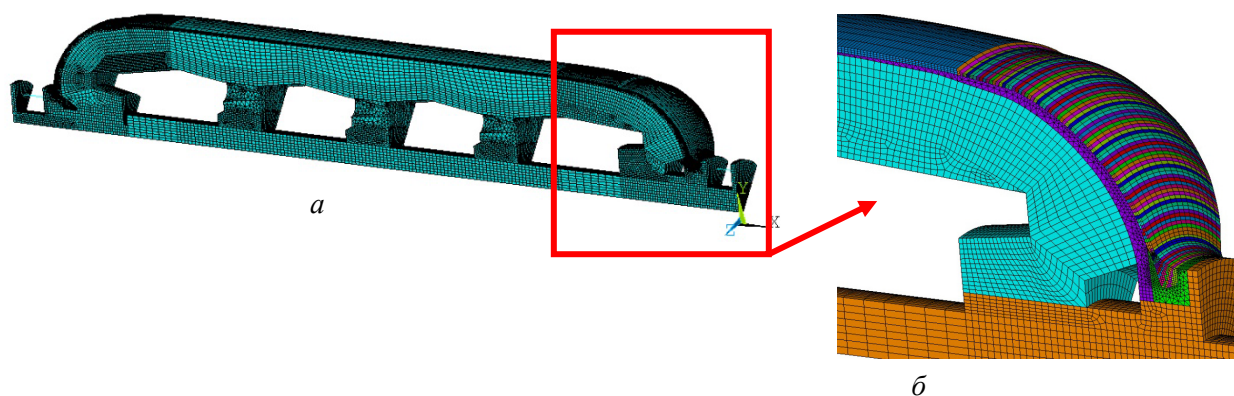


Рис. 2. Пример конечно-элементной модели конструкции

При исследовании поведения намоточных конструкций неканонических форм необходимо учитывать зависимость механических характеристик от формы оболочки. На цилиндрическом участке оболочки характеристики материала допустимо рассматривать в рамках ортотропной модели поведения, на донных участках угол армирования является переменной величиной. В точке сопряжения цилиндра и дна углы армирования равны, к зоне полюсных отверстий угол армирования стремится к 90° . Таким образом, на донных участках механические характеристики оболочки непрерывно изменяются вдоль образующей.

Для учета изменения механических характеристик материала оболочки на донных участках предложено разбить поверхность на отдельные участки вдоль оси изделия. На каждом участке предполагается постоянный радиус и механические характеристики, соответствующие углу армирования на данном радиусе. В результате реализации предложенного метода описания механического поведения композиционной оболочки при построении конечно-элементного аналога получено, что оболочка состоит из набора материалов, свойства каждого из которых описывают эффективное термовязкоупругое поведение пакета с определенной схемой армирования, которая изменяется вдоль профиля донного участка. На рис. 2, б, продемонстрирован результат работы алгоритма в виде дискретного аналога, на котором цвета соответствуют номерам материалов.

Предложенный алгоритм и полученный конечно-элементный аналог конструкции позволяют учесть на донных участках изменение угла укладки армирующих лент от экватора до полюсного отверстия, а также геометрически верное направление осей локальных систем координат, что в результате позволяет корректно учесть усилия от натяжения лент и распределения физико-механических свойств ортотропного материала. Учет сложного распределения механических характеристик ортотропной оболочки позволит получить более точное распределение напряжений в оболочке и давления на поверхности формообразующей оправки на донных участках.

Решение поставленной краевой задачи механики деформируемого твердого тела осуществлено методом конечных элементов в коммерческом пакете инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL. Инструментарий пакета дает возможность организовать решение задачи в автоматизированном режиме, что позволяет использовать разработанные алгоритмы для отыскания напряженно-деформированного состояния в процессе изготовления крупногабаритных намоточных изделий при различных габаритных размерах, схемах армирования и технологических параметрах. Предложенную методику решения задачи для удобства анализа можно разделить на четыре основных этапа. Первый этап предназначен для создания конечно-элементного аналога конструкции. На втором этапе вычисляется

преднапряженное состояние конструкции, возникающее в результате действия усилий в армирующих лентах и со стороны технологической оснастки. На третьем этапе определяется эволюция температурных полей конструкции в процессе термообработки. На четвертом этапе решается квазистатическая краевая задача для всего процесса изготовления с учетом преднапряженного состояния и температурных деформаций.

Для отыскания напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе изготовления проведена серия вычислительных экспериментов со сгущением сетки и при использовании конечных элементов более высокого порядка. Оценка сходимости результатов осуществлена по изменениям длины оболочки на основных этапах производства, также проведена валидация разработанной модели по результатам термометрии конструкции в процессе изготовления и данным, полученным в результате численного решения. На основе полученных результатов выбрана степень дискретизации, физические соотношения, системы начальных и граничных условий для дальнейшего исследования деформационного поведения изделия в процессе изготовления.

Полученные результаты

По результатам численного решения задачи нестационарной теплопроводности в исследуемой конструкции при естественной конвекции проведена оценка эволюции температур в элементах конструкции. Полученное решение расширило представления о реальном распределении температур в элементах конструкции по времени для рассматриваемого технологического процесса. Полученные распределения температуры по времени в секциях оправки для трех зон представлены на рис. 3.

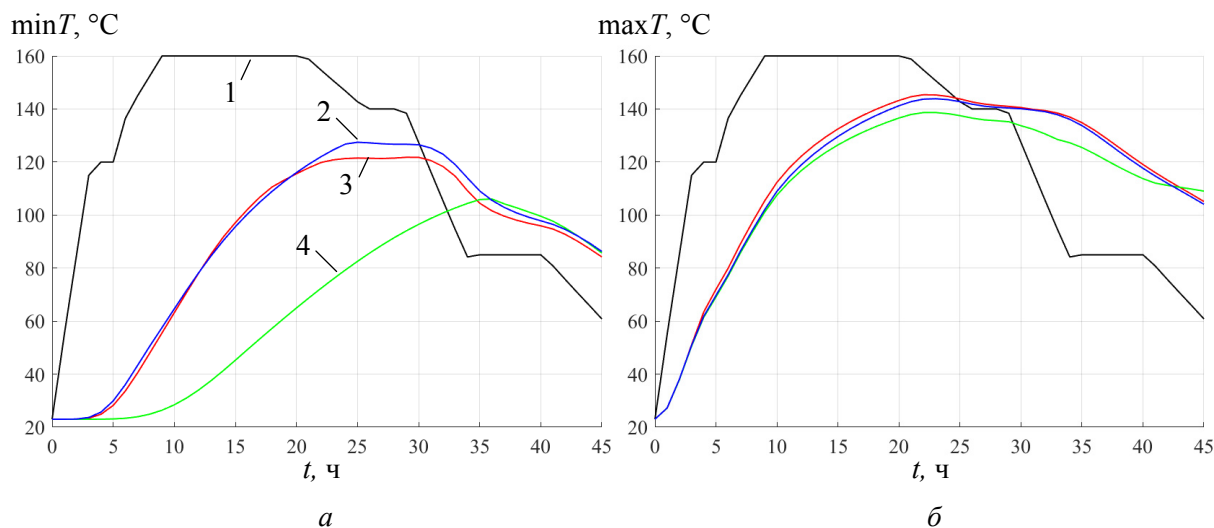


Рис. 3. Зависимости температур в оправке от времени: *а* – минимальные значения; *б* – максимальные значения; 1 – печь; 2 – правая секция; 3 – левая секция; 4 – центральная секция

Максимальные значения температур во всех зонах лежат на одном уровне. Максимальная температура в оправке составляет 145 °С. В центральной секции оправки выявлены зоны, которые прогреваются до максимального значения 110 °С. Средние температуры в донных секциях оправки совпадают и выше, чем в центральной секции, что объясняется меньшей толщиной оболочки на этих участках, а также меньшим объемом материала оправки. Наибольшее расхождение температур происходит на интервале 25–30 ч и составляет 10 °С. Весь объем материала достигает температуры 100 °С, что должно обеспечить

возможность дальнейшего разрушения оправки под действием водяного пара. Опоры центральной секции прогреваются до значения 110°C с запаздыванием в 10 ч, после чего начинается процесс охлаждения. Общее время выдержки полностью прогретой оправки при температуре выше 100°C составляет порядка 10 ч.

Также были получены распределения минимальных и максимальных температур в оболочке. Для удобства анализа оболочка была разделена на 5 зон. Рассмотрены левый и правый донные участки, цилиндрический участок и две зоны около полюсных отверстий. Максимальное расхождение температур по зонам составляет 6 %, таким образом, оболочка прогревается равномерно на всей протяженности. Минимальная температура составила 138°C , максимальная – 155°C на отдельных участках. Общее время выдержки оболочки при температуре выше температуры стеклования связующего составляет более 20 ч.

На основе анализа полученных градиентов температур конструкции установлено, что внешняя поверхность конструкции нагревается равномерно. Но за счет дополнительного прогрева донных секций оправки от сборочного вала на этапе длительной выдержки при максимальной температуре соответствующие участки оболочки прогреваются на 5°C выше, чем цилиндрический участок. Зоны с минимальными температурами расположены в опорах центральных секций оправки, к концу процесса термообработки температура в этих зонах выше, чем на внешней поверхности конструкции.

Для оценки изменения длины оболочки в процессе изготовления проведен анализ изменения осевых перемещений крайних точек; поскольку полюсные отверстия связаны с закладными элементами, то изменения длины удобно оценивать по их перемещениям. Полученное в результате решения изменение длины оболочки на 9 % ниже, чем в реальной конструкции. Изменения длины оболочки на основных контрольных моментах времени соответствуют данным, полученным с производства. Для наглядной иллюстрации механизма деформирования исследуемой конструкции на рисунке 4 представлена зависимость перемещений вдоль вала части оснастки, расположенной под левой секцией оправки.

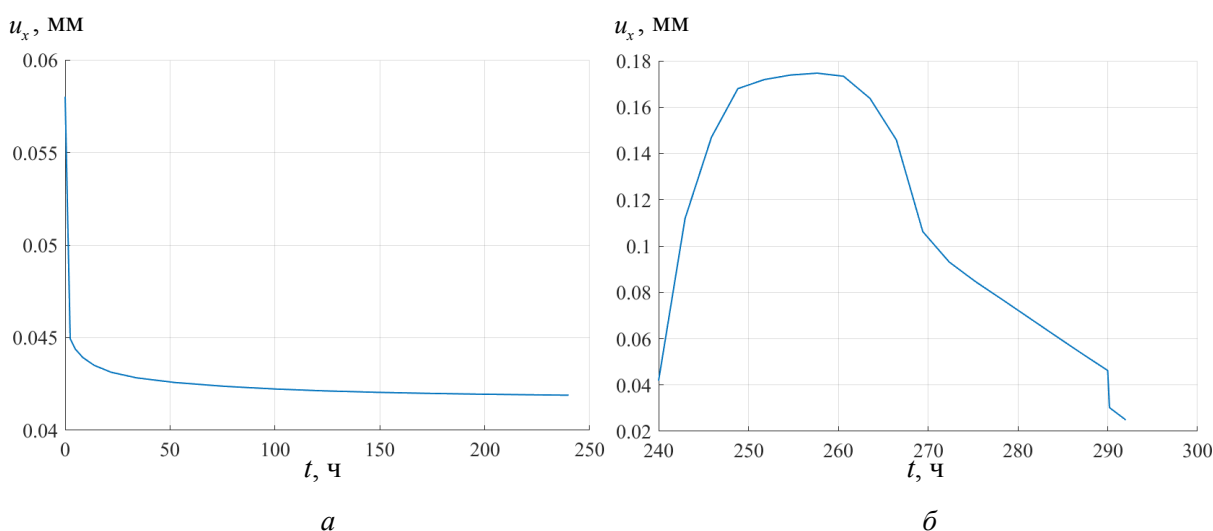


Рис. 4. Горизонтальные перемещения оснастки левого участка:
 a – этап намотки; b – этап термообработки

Для удобства анализа поведения конструкции перемещения вдоль сборочного вала представлены на двух временных интервалах: на рис. 4, a , рассмотрен этап намотки, на рис. 4, b – этап термообработки. Установлено, что под действием начальных и гранич-

ных условий конструкция сжимается, к моменту окончания процесса намотки распределение перемещений остается идентичным, при этом увеличивается максимальное значение, поскольку начальные сжимающие напряжения в оболочке продолжают воздействовать на конструкцию. К окончанию процесса термообработки перемещения левой части конструкции снижаются, это указывает на то, что данная зона стремится к начальному положению за счет расширения оправки в процессе термообработки и перераспределения напряжений в материале оболочки из-за учета ее термовязкоупругости. После удаления оправки перемещения в зоне левого полюсного отверстия незначительно возрастают, что может свидетельствовать о сжатии оболочки под действием остаточных напряжений.

Для оценки прочности оправки в процессе изготовления проведен анализ распределения и изменения первых главных напряжений в основные моменты времени. Установлено, что в начальный момент времени максимальное значение напряжения составило 71,2 МПа, что превышает полученные значения предела прочности для материала оправки. Зона с максимальными напряжениями локализована на остром конце правой секции оправки. Данный факт объясняется наличием угла, который является естественным концентратором напряжений, а также мгновенным нагружением конструкции как начальными усилиями в оболочке, так и в элементах технологической оснастки, обеспечивающих фиксацию оправки на вале. В процессе изготовления за счет термовязкоупругого характера поведения материала оболочки напряжения в ней снижаются, к моменту окончания этапа термообработки максимальные напряжения в оправке составили 9,21 МПа, что ниже предела прочности в 4 раза. Общий уровень напряжений лежит в интервале 2–4 МПа, что составляет порядка 8–10 % от предела прочности.

При исследовании поведения намоточной оболочки в процессе изготовления проведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, а также зависимость силовых параметров на поверхностях сопряжения формируемой оболочки с технологической оснасткой. Для исследования взаимодействия на границе сопряжения оправки и оболочки построены зависимости радиальных напряжений в элементах, прилегающих к внешней поверхности оправки. Полученные эпюры радиальных напряжений вдоль образующей оправки в основные моменты времени представлены на рис. 5.

На этапах намотки, нагрева и выдержки радиальные напряжения отрицательные, что указывает на всестороннее сжатие оправки со стороны изготавливаемой оболочки. Максимальные сжимающие усилия локализованы в зоне полюсных отверстий, на участке, расположенном под закладным элементом. Величина радиальных напряжений в данной зоне лежит в интервале 8–10 МПа, что составляет 25–30 % от предела прочности материала оправки. К окончанию процесса охлаждения при термообработке на донных участках формируются зоны с положительной величиной радиальных напряжений, что указывает на вероятность возникновения отслоений оболочки от оправки. В то же время в этой зоне отмечены локальные максимальные значения вертикальных перемещений оболочки. Для уточнения напряженно-деформированного состояния в данных зонах были рассмотрены поля остаточных напряжений оболочки после удаления формообразующей оправки. На основе комплексного анализа полученных результатов сделан вывод о высокой вероятности возникновения отслоения оболочки от формообразующей оправки, а также о вероятности формирования межслоевых расслоений по толщине оболочки.

Разработанная методика прогнозирования поведения намоточной конструкции в процессе изготовления позволила провести серию вычислительных экспериментов для изучения поведения конструкции при изменении параметров технологического процесса: начальные усилия

в прижимающем устройстве, силы натяжения лент на этапе намотки, максимальная температура и длительность выдержки при термообработке. Для анализа влияния технологических параметров на поведение конструкции построены диаграммы зависимости давления на внешней поверхности оправки от времени, представленные на рис. 6.

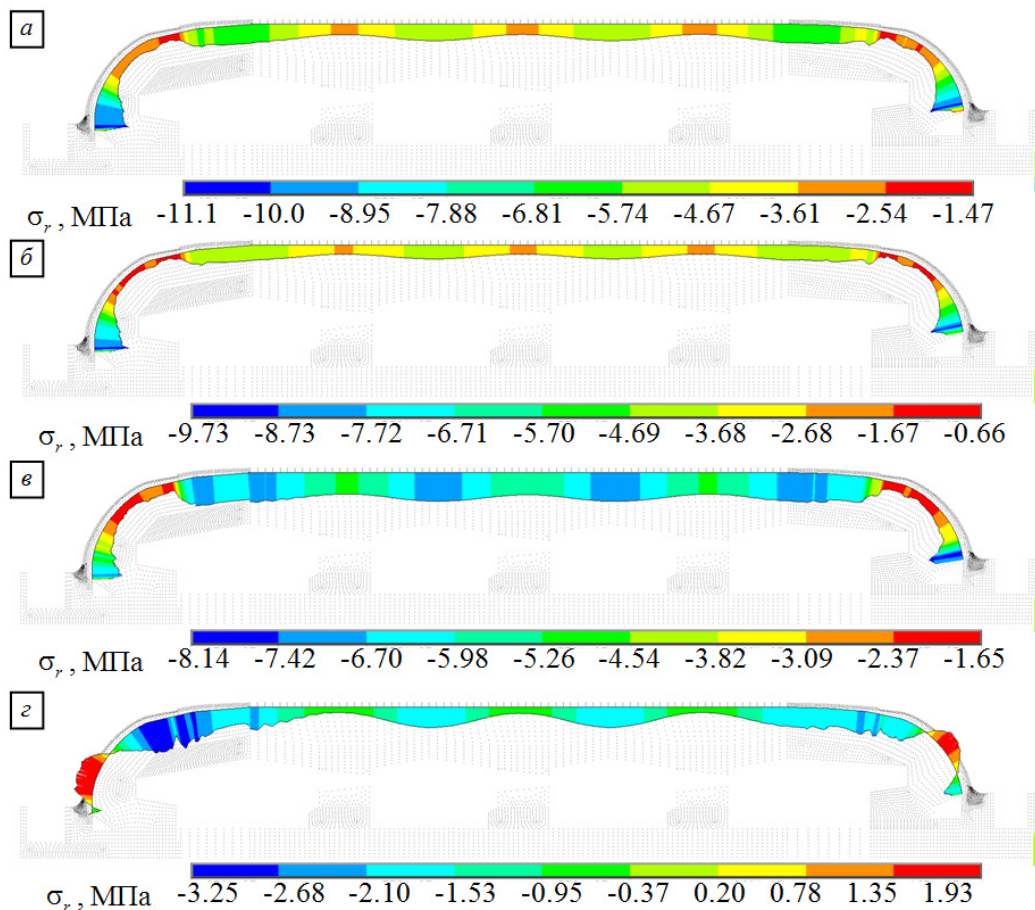


Рис. 5. Распределения радиальных напряжений по поверхности оправки: а – начальный момент времени; б – окончание намотки; в – окончание выдержки при максимальной температуре; г – окончание термообработки

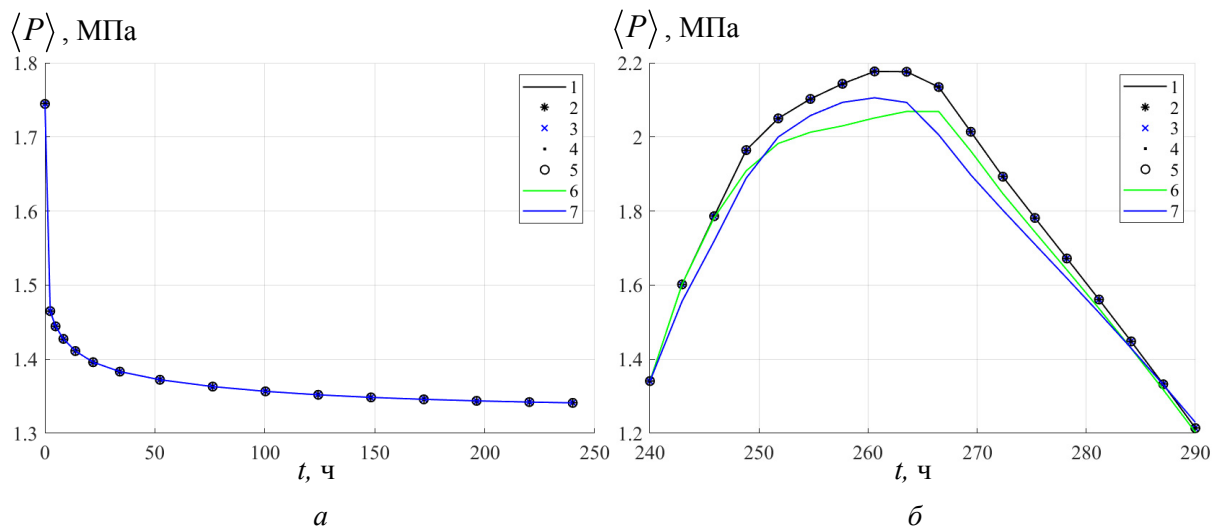


Рис. 6. Зависимости давления на поверхности центральной секции оправки от времени: а – этап намотки; б – этап термообработки

Закономерности влияния начальных параметров на контактное давление на поверхности оправки идентичны полученным изменениям напряжений. На основе полученных результатов и проведенного сравнительного анализа сделан вывод о корректности сформулированной краевой задачи и устойчивости численных процедур отыскания решения. Кроме этого, установлено, что изменение начальных термосиловых параметров в пределах 10 % не может оказать существенного влияния на эволюцию напряженно-деформированного состояния намоточной конструкции в процессе изготовления.

Заключение

Представлены и интерпретированы результаты решения задачи нестационарной теплопроводности и квазистатической задачи механики. Рассмотрены зависимости температур в элементах конструкции от времени в процессе термообработки. Проанализированы распределения температуры в конструкции в основные моменты времени, на их основе установлено, что элементы конструкции прогреваются равномерно, без резких перепадов в пространстве и по времени. Можно утверждать, что рассмотренный режим термообработки не требует корректировок или внесения существенных изменений.

Проведена оценка перемещений вдоль сборочного вала элементов конструкции. Дана интерпретация изменениям перемещений на протяжении технологического процесса. Подтвержден предполагаемый принцип деформационного поведения конструкции. Кроме перемещений, проведен анализ распределения интенсивностей напряжений в формообразующей оправке и наматываемой оболочке относительно пределов прочности. Установлено, что в процессе изготовления напряжения в основном объеме материалов на протяжении всего процесса изготовления не превышают пределов прочности. Выявлены локальные зоны формообразующей оправки, где значения напряжений превышают предел прочности материала, однако эти зоны соответствуют геометрическим концентраторам напряжений и не влияют на общую жесткость конструкции.

Детальный анализ напряженно-деформированного состояния оболочки и полученные впервые распределения радиальных напряжений на поверхности оправки позволили установить, что на донных участках в зонах ниже точки равнопрочности реализуется локальный изгиб, вызванный одновременным сжатием со стороны цилиндрического участка оболочки и смещением скользящих опор секций оправки к начальному положению. Данный локальный изгиб может стать причиной отслоения оболочки от формообразующей оправки, а также способствовать процессу появления и роста расслоений в материале оболочки. Результаты вычислительных экспериментов указывают, что изменение основных параметров технологического процесса не поможет снизить вероятность возникновения дефектов на донных участках оболочки. Одним из путей решения обнаруженной проблемы может быть изменение геометрии формообразующей оправки в зоне полюсных отверстий, но для подтверждения данной гипотезы необходимы дополнительные исследования и согласования возможных изменений с возможностями производителя формообразующих оправок.

Список литературы

1. Ильюшин, А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильюшин, Б.Е. Победря. – Изд-во «Наука», 1970. – 280 с.
2. Плумэ, Э.З. Длительная ползучесть органостеклопластика / Э.З. Плумэ, Р.Д. Максимов // Механика композитных материалов. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 435–450.

3. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Куимова, Е.В. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами / Е.В. Куимова, Н.А. Труфанов // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2009. – № 4 (70). – С. 129–148.
5. Сметанников, О.Ю. Модель вязкоупругого термомеханического поведения волокнистого композита и ее экспериментальная идентификация / О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 51–72.
6. Янковский, А.П. Определение термоупругих характеристик пространственно армированных волокнистых сред при общей анизотропии материалов компонент композиции. 1. Структурная модель / А.П. Янковский // Механика композитных материалов. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 663–678.
7. Янковский, А.П. Моделирование линейно-термовязкоупругого поведения композитов с пространственной структурой армирования / А.П. Янковский // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 2. – С. 3–14.
8. Аношкин, А.Н. Теория и технология намотки конструкций из полимерных композиционных материалов / А.Н. Аношкин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 118 с.
9. Представительный объем и эффективные материальные характеристики периодических и статистически однородно армированных волоконных композитов / В.М. Пестренин, И.В. Пестренина, Л.В. Ландик [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. – С. 103–110. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.10
10. Арутюнян, Н.Х. Контактные задачи теории ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.В. Манжиров. – Ереван: Институт механики НАН Армении, 1999. – 320 с.
11. Манжиров, А.В. Математическая теория растущих тел: уравнения, задачи, приложения / А.В. Манжиров // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1603–1605.
12. Кузнецов, С.И. Задача теплопроводности для растущего шара / С.И. Кузнецов, А.В. Манжиров, И. Федотов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 139–148.
13. Манжиров, А.В. Моделирование процессов наращивания цилиндрических тел на вращающейся оправке с учетом действия центробежных сил / А.В. Манжиров, Д.А. Паршин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2006. – № 6. – С. 149–166.
14. Манжиров, А.В. Моделирование процесса деформирования наращиваемых конических тел / А.В. Манжиров, Д.А. Паршин // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 290–303.
15. Kordkheili, S.H. On the geometrically nonlinear analysis of sandwich shells with viscoelastic core: A layerwise dynamic finite element formulation / S.H. Kordkheili, R. Khorasani // Compos. Struct. – 2019. – Vol. 230. – A. 111388.
16. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures / Yuxia Bai, Jin Liu, Yujun Cui, Xiao Shi, Zezhuo Song, Changqing Qi // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 290. – A.123237.
17. Русаков, И.Ю. Основы конструирования и расчета элементов оборудования отрасли: учебное пособие / И.Ю. Русаков, В.Л. Софронов. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 271 с.

18. Температурные напряжения в упругопластической трубе в зависимости от выбора условия пластичности / Е.П. Дац, Е.В. Мурашкин, А.В. Ткачева, Г.А. Щербатюк // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2018. – № 1. – С. 32–43.
19. Голуб, В.П. Нестационарная ползучесть линейных вязкоупругих материалов при одноосном растяжении и сжатии / В.П. Голуб, Я.В. Павлюк, П.В. Фернати // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Вып. 43. – С. 40–49.
20. Экспериментальные исследования компенсационного способа снижения напряжений в намоточных конструкциях из полимерных композиционных материалов / Р.С. Зиновьев, Ю.А. Мережко, С.Б. Сапожников, Ю.М. Хищенко // Композитный мир. – 2020. – № 4(91). – С. 54–57.
21. Зиновьев, Р.С. Использование температурного поля в качестве управляющего фактора для снижения остаточных напряжений в намоточной конструкции из армированного реактопласта / Р.С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 127–134.
22. Харинова, Ю.Ю. Методика прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки: дис. ...канд. тех. наук / Ю.Ю. Харинова. – Ижевск, 2017.
23. The role of mandrel rotation speed on morphology and mechanical properties of polyethylene pipes produced by rotational shear / H. Yang, X. Luo, K. Shen, Y. Yuan, Q. Fu, X. Gao, L. Jiang // Polymer. – 2019. – Vol. 184. – A.121915.
24. Суходоева, А.А. Совместное деформирование оправки и композиционной оболочки при силовой намотке / А.А. Суходоева // Вестник ПГТУ. Вычислительная математика и механика. – 2000. – С. 52–55.
25. Суходоева, А.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния и оценка прочности оправок для намотки композиционных оболочек: дис. ...канд. тех. наук / А.А. Суходоева. – Пермь, 2000.
26. Kugler, D. The effects of Mandrel material and tow tension on defects and compressive strength of hoop-wound, on-line consolidated, composite rings / D. Kugler, T.J. Moon // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2002. – Vol. 33. – P. 861–876.
27. Li, S. Numerical simulation and experimental studies of mandrel effect on flow-compaction behavior of CFRP hat-shaped structure during curing process / S. Li, L. Zhan, T. Chang // Arch. Civ. Mech. Eng. – 2018. – Vol.18. – P. 1386–1400.
28. Поведение образцов песчано-полимерной композиции в условиях нормальной и повышенных температур при релаксации в области сжатия / А.А. Слетова, С.А. Сафронов, Д.С. Лобанов, О.Ю. Сметанников // Математическое моделирование в естественных науках. – 2018. – Т. 1. – С. 273–277.
29. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977.
30. Endo, V.T. Linear orthotropic viscoelasticity model for fiber reinforced thermoplastic material based on Prony series / V.T. Endo, J.C.D.C. Pereira // Mech. Time-Dependent Mater. – 2017. – Vol. 21. – P. 199–221.
31. Asymptotic and numerical homogenization methods applied to fibrous viscoelastic composites using Prony's series / J.A. Otero, R. Rodríguez-Ramos, R. Guinovart-Díaz, O.L. Cruz-González, F.J. Sabina, H. Berger, T. Böhlke // Acta Mech. – 2020. – Vol. 231. – P. 2761–2771.
32. Mauro, J.C. On the Prony series representation of stretched exponential relaxation / J.C. Mauro, Y.Z. Mauro // Phys. A Stat. Mech. Its Appl. – 2018. – Vol. 506. – P. 75–87.
33. Luo, R. Development of Prony series models based on continuous relaxation spectrums for relaxation moduli determined using creep tests / R. Luo, H. Lv, H. Liu // Constr. Build. Mater. – 2018. – Vol. 168. – P. 758–770.

References

1. Il'iushin A.A., Pobedria B.E. Osnovy matematicheskoi teorii termoviazko-uprugosti [Fundamentals of the mathematical theory of thermoviscoelasticity]. Moscow, Nauka, 1970, 280 p.
2. Plume E.Z., Maksimov R.D. Dlitel'naia polzuchest' organostekloplastika [Long-term creep of organo-fiberglass]. Mekhanika kompozitnykh materialov, 2001, vol. 37, no. 4, pp. 435–450.
3. Vasil'ev V.V. Mekhanika konstruktсии iz kompozitsionnykh materialov [Mechanics of composite structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 272 p.
4. Kuimova E.V., Trufanov N.A. Chislennoe prognozirovanie effektivnykh termoviazkoupругikh kharakteristik odnonapravlennoogo voloknistogo kompozita s viazkoupругimi komponentami [Numerical prediction of effective thermoviscoelastic characteristics of unidirectional fiber composite with viscoelastic components]. Vestnik of Samara University. Natural Science Series, 2009, no. 4(70), pp. 129–148.
5. Smetannikov O.Iu., Il'inykh G.V. Model' viazkoupругogo termomekhanicheskogo povedeniia voloknistogo kompozita i ee eksperimental'naia identifikatsiia [Model of viscoelastic thermomechanical behavior of fiber composite and its experimental identification]. Applied Mathematics and Control Sciences, 2017, no. 4, pp. 51–72.
6. Iankovskii A.P. Opredelenie verkhnei i nizhnei granits effektivnykh zhestkosti perekrestno-armirovannykh kompozitnykh sred [Determination of the upper and lower boundaries of effective stiffnesses of cross-reinforced composite media]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktсии, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 582–602.
7. Iankovskii A.P. Modelirovanie lineino-termoviazkoupругogo povedeniia kompozitov s prostranstvennoi strukturoi armirovaniia [Modeling of linear-thermoviscoelastic behavior of composites with a spatial reinforcement structure]. Konstruktсии iz kompozitsionnykh materialov, 2016, no. 2, pp. 3–14.
8. Anoshkin A.N. Teoriia i tehnologija namotki konstrukcij iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Theory and technology of winding structures made of polymer composite materials]. – Perm National Research Polytechnic University, 2003. 118 p.
9. Pestrenin V.M., Pestrenina I. V., Landik L. V. Predstavitel'nyi ob'em i effektivnye material'nye kharakteristiki periodicheskikh i statisticheskii odnorodno armirovannykh volokonnykh kompozitov [Representative volume and effective material characteristics of periodic and statistically uniformly reinforced fiber composites]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2023, no. 1, pp. 103–110. DOI 10.15593/perm.mech/2023.1.10.
10. Arutiunian N.Kh., Manzhurov A.V. Kontaknye zadachi teorii polzuchesti [Contact problems of creep theory]. Erevan, Institut mekhaniki NAN Armenii, 1999, 320 p.
11. Manzhurov A.V. Matematicheskaiia teoriia rastushchikh tel: uravneniia, zadachi, prilozheniia [Mathematical Theory of Growing Bodies: Equations, Problems, Applications]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2011, no. 4-4, pp. 1603–1605.
12. Kuznetsov S.I., Manzhurov A.V., Fedotov I. Zadacha teploprovodnosti dlia rastushchego shara [Heat Conduction Problem for a Growing Sphere]. Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela, 2011, no. 6, pp. 139–148.
13. Manzhurov A.V., Parshin D.A. Modelirovanie protsessov narashchivaniia tsilindricheskikh tel na vrashchaiushcheisia opravke s uchetom deistviia tsentrobezhnykh sil [Modeling the Processes of Growing Cylindrical Bodies on a Rotating Mandrel Taking into Account the Action of Centrifugal Forces]. Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela, 2006, no. 6, pp. 149–166.

14. Manzhirov A.V., Parshin D.A. Modelirovanie protsessa deformirovaniia narashchivaemykh konicheskikh tel [Modeling the deformation process of built-up conical bodies]. Vestnik of Samara University. Natural Science Series, 2007, no. 4(54), pp. 290–303.
15. Kordkheili S.H., Khorasani R. On the geometrically nonlinear analysis of sandwich shells with viscoelastic core: A layerwise dynamic finite element formulation. Compos. Struct, 2019, vol. 230, art. 111388.
16. Bai Y., Liu J., Cui Y., Shi X., Song Z., Qi C. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures. Construction and Building Materials, 2021, vol. 290, art.123237.
17. Rusakov I.Iu., Sofronov V.L. Osnovy konstruirovaniia i rascheta elementov oborudovaniia otrasli: uchebnoe posobie [Fundamentals of designing and calculating equipment elements for the industry: a tutorial]. Seversk, STI NIaU MIFI, 2018, 271 p.
18. Dats E.P., Murashkin E.V., Tkacheva A.V., Shcherbatiuk G.A. Temperaturnye napriazheniia v uprugoplasticheskoi trube v zavisimosti ot vybora usloviia plastichnosti [Temperature stresses in an elastic-plastic pipe depending on the choice of plasticity conditions]. Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela, 2018, no. 1, pp. 32–43.
19. Golub V.P., Pavljuk Ja.V., Fernati P.V. Nestacionarnaja polzuchest' linejnykh vjzskouprugih materialov pri odnoosnom rastjazhenii i szhatii [Unsteady creep of linear viscoelastic materials under uniaxial tension and compression]. Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika, 2007, vol.43, pp.40-49.
20. Zinov'ev R.S., Merezko Iu.A., Sapozhnikov S.B., Khishchenko Iu.M. Eksperimental'nye issledovaniia kompensatsionnogo sposoba snizheniia napriazhenii v namotochnykh konstruktiiakh iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Experimental Studies of the Compensation Method for Reducing Stresses in Winding Structures Made of Polymer Composite Materials]. Kompozitnyi mir, 2020, no. 4(91), pp. 54–57.
21. Zinov'ev R.S. Ispol'zovanie temperaturnogo polia v kachestve upravliaiushchego faktora dlia snizheniia ostatochnykh napriazhenii v namotochnoi konstruktii iz armirovannogo reaktoplasta [Using the Temperature Field as a Control Factor to Reduce Residual Stresses in a Winding Structure Made of Reinforced Thermosetting Plastic]. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki, 2012, no. 4 (24), pp. 127–134.
22. Kharinova Iu.Iu. Metodika prognozirovaniia kachestva izgotovleniia stekloplastikovykh obolochek metodom namotki [Methodology for Predicting the Quality of Manufacturing Fiberglass Shells by Winding]. Ph.D. thesis, Izhevsk, 2017, 195p.
23. Yang H., Luo X., Shen K., Yuan Y., Fu Q., Gao X., Jiang L. The role of mandrel rotation speed on morphology and mechanical properties of polyethylene pipes produced by rotational shear. Polymer, 2019, vol. 184, art.121915.
24. Sukhodoeva A.A. Sovmestnoe deformirovanie opravki i kompozitsionnoi obolochki pri silovoi namotke [Joint deformation of the mandrel and composite shell during power winding]. Vestnik PGU. Vychislitel'naia matematika i mekhanika, 2000, pp. 52–55.
25. Sukhodoeva A.A. Chislennyi analiz napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia i otsenka prochnosti opravok dlia namotki kompozitsionnykh obolochek [Numerical analysis of the stress-strain state and strength assessment of mandrels for winding composite shells]. Ph.D. thesis, Perm', 2000, 116 p.
26. Kugler D., Moon T.J. The effects of Mandrel material and tow tension on defects and compressive strength of hoop-wound, on-line consolidated, composite rings. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf, 2002, vol. 33, pp. 861–876.

27. Li S., Zhan L., Chang T. Numerical simulation and experimental studies of mandrel effect on flow-compaction behavior of CFRP hat-shaped structure during curing process. *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 2018, vol. 18, pp. 1386–1400.
28. Sletova A.A., Safronov S.A., Lobanov D.S., Smetannikov O.Iu. Povedenie obraztsov peschano-polimernoi kompozitsii v usloviakh normal'noi i povyshennykh temperatur pri relaksatsii v oblasti szhatiia [Behavior of sand-polymer composite samples under normal and elevated temperatures during relaxation in the compression region]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2018, vol. 1, pp. 273–277.
29. Lekhnitskii S.G. *Teoriia uprugosti anizotropnogo tela* [Theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow, Nauka, 1977, 416 p.
30. Endo V., Pereira J. Linear orthotropic viscoelasticity model for fiber reinforced thermoplastic material based on Prony series. *Mech. Time-Dependent Mater.*, 2017, vol. 21, pp. 199–221.
31. Otero J.A., Rodríguez-Ramos R., Guinovart-Díaz R., Cruz-González O.L., Sabina F.J., Berger H., Böhlke T. Asymptotic and numerical homogenization methods applied to fibrous viscoelastic composites using Prony's series. *Acta Mech.*, 2020, vol. 231, pp. 2761–2771.
32. Mauro J.C., Mauro Y.Z. On the Prony series representation of stretched exponential relaxation. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.*, 2018, vol. 506, pp. 75–87.
33. Luo R., Lv H., Liu H. Development of Prony series models based on continuous relaxation spectrums for relaxation moduli determined using creep tests. *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 168, pp. 758–770.