

**Д. А. Еловенко***Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация**Дата поступления: 15 апреля 2019 г.***ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Аннотация. В статье кратко описываются основные современные исследования, направленные на моделирование, анализ и оптимизацию технологического процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкций с целью снижения результирующих остаточных напряжений. Изученные работы направлены на исследование многослойных рулонированных конструкций, образованных по спирали Архимеда, витых спирально-рулонных конструкций, а также конструкций, полученных способом намотки заготовки из гибкой проволоки прямоугольного поперечного сечения. Одними из основных параметров оптимизации процесса формообразования являются величина натяжения навиваемой заготовки и скорость вращения центрального цилиндрического элемента. В работе приводятся ссылки на исследования, в которых решаются проблемы появления различных дефектов (телескопичность, морщинистость и т. д.) в формообразованных конструкциях. Рассмотренные методы и модели могут иметь прямое практическое приложение к созданию корпусов сосудов высокого давления и реакторов, несущая часть которых собирается из нескольких многослойных цилиндрических узлов (царг). Многие из них могут быть развиты и адаптированы с целью дальнейшего применения на этапе анализа результирующих остаточных напряжений и деформаций, возникающих при формообразовании многослойных цилиндрических конструкций. Представленный аналитический обзор позволяет понять способы решения различных проблем, связанных с технологическим процессом формообразования рулонированных многослойных цилиндрических конструкций, навитых по спирали Архимеда и спирально-рулонных витых конструкций, а также дает возможность проследить главные тренды их развития.

Ключевые слова: многослойная цилиндрическая конструкция, сосуд высокого давления, царга, результирующие остаточные технологические напряжения, спиральная навивка, давление, трение.

D. A. Elovenko*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation**Received: April 15, 2019***TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF FORMATION TECHNOLOGY OF MULTILAYER CYLINDRICAL STRUCTURES AND RESIDUAL TECHNOLOGICAL STRESS EVALUATION METHODS**

Abstract. The paper provides a brief description of the main modern studies intended to model, analyze and optimize the process flow of forming multilayer cylindrical structures in order to reduce the resulting residual stresses. The mentioned works are focused on the study of multilayer rolled structures formed in a spiral of Archimedes, twisted spiral-rolled structures, as well as structures obtained by winding the workpiece in the form of a flexible wire of rectangular cross-section. One of the main parameters of optimizing the formation process is the amount of tension of the wound-up workpiece and the rotational speed of the central cylindrical element. The review also contains references to studies solving the problems of the emergence of various defects (telescopicity, wrinkling, etc.) in formed structures. The considered methods and models can be directly applied in practice when creating pressure vessels and reactors, whose bearing part is assembled from several multi-layered cylindrical units (shells). Many of them can be developed and adapted to be further applied at the stage of analysis of the resulting residual stresses and strains emerging due to the shaping of multilayer cylindrical structures. The analytical review presented in this paper provides an insight into solutions of various problems associated with the process flow of forming rolled multilayer cylindrical structures wound in a spiral of Archimedes and spiral-wound twisted structures, and also allows one to trace the main trends of their development.

Keywords: multi-layered cylindrical structure, pressure vessel, shell, resulting residual process-related stresses, spiral winding, pressure, friction.

Введение

Технологический процесс формообразования многослойных цилиндрических конструкции (МЦК) является одним из основных этапов произ-

водства и изготовления сосудов высокого давления (СВД) и реакторов. Основные способы изготовления корпусов такого оборудования уже были описаны [1–5]. Как правило, корпуса имеют несущую



щую часть, образованную из стального тонколистового материала по схеме спиральной намотки (навивки) на центральный элемент с определенным натягом. Расчет его оптимальной величины подробно описан [6].

В России на изготовление, испытание и приемку многослойных СВД разработан соответствующий отраслевой стандарт [7]. В результате процесса формообразования многослойная цилиндрическая конструкция имеет результирующие (остаточные) напряжения и деформации весьма существенной величины. Напряженно-деформированное состояние (НДС) таких конструкций прямо влияет на прочность и работоспособность цилиндрического корпуса аппарата. Царги – заготовки относительно коротких фрагментов цилиндрического сосуда, образованные навивкой стальной ленты, используются далее для изготовления достаточно длинного цилиндрического корпуса. Царги могут иметь различные геометрические дефекты, такие как телескопичность, появление волнистости и «морщинистости» накладываемых слоев, а также их локальные утонения. Между слоями царги могут возникать воздушные зазоры, искажающие ее общую геометрическую форму, существенно изменяющие ее термомеханические и жесткостные свойства.

В данной работе дается краткое описание основных современных исследований, направленных на моделирование, анализ и оптимизацию технологического процесса формообразования различных многослойных цилиндрических конструкций. Они имеют прямое практическое приложение к созданию корпусов СВД и реакторов, и могут быть полезны для развития и адаптации приведенных результатов исследований.

Аналитическая методика оптимизации процесса навивки композиционных (многослойных) цилиндрических и сферических сосудов давления представлена в работе А. Д. Дроздова и А. Л. Каламкарлова [8]. Оптимизация реализуется с точки зрения анализа изменения силы натяжения в процессе навивки. Рассматриваются процессы со стареющими (релаксирующими) материалами, а также с нестареющими (не подверженными релаксации). Авторами предложена функция $\varphi(r)$, характеризующая приложенную силу к навиваемым слоям или ленте (полотну), используемой для изготовления царги. Ее величина не фиксирована и может изменяться для получения оптимального состояния (свойства) структуры навитого многослойного цилиндра. В работе предложен метод поиска этой функции в таком виде, в котором она гарантировала бы однородную интенсивность напряжений во всех слоях многослойной кон-

струкции после приложения силы натяжения (главной нагрузки).

Основные практические результаты этого исследования изложены в виде следующих рекомендаций:

1. Оптимальная интенсивность предварительного натяжения ленты для толстостенного сосуда давления практически зависит от полярного радиуса и внутреннего давления.

2. для тонкостенного сосуда давления с достаточно малым внутренним давлением оптимальная интенсивность предварительного натяжения ленты монотонно уменьшается с ростом радиуса и стремится к постоянному значению в области, достаточно далекой от внутреннего (центрального) цилиндрического элемента.

3. в течение фиксированного времени для процесса формообразования увеличение степени релаксации означает рост оптимальной интенсивности предварительного натяжения в любой точке формообразуемой цилиндрической конструкции.

4. Для тонкостенного сосуда давления с достаточно большим внутренним давлением оптимальная интенсивность предварительного натяжения ленты монотонно возрастает с ростом радиуса.

Математическая модель окружного разрывного давления для многослойных корпусов сосудов, формообразованных из спирально намотанной стальной ленты, представлена отдельно [9]. На ее основе сделан анализ осевых и кольцевых деформаций. Показано, что осевые деформации немного выше кольцевых и найдены оптимальные условия их баланса. Даны рекомендации границ оптимальных значений угла навивки ленты α , определяемые значениями $\alpha = 20^\circ$ и $\alpha = 25^\circ$ (рис. 1).

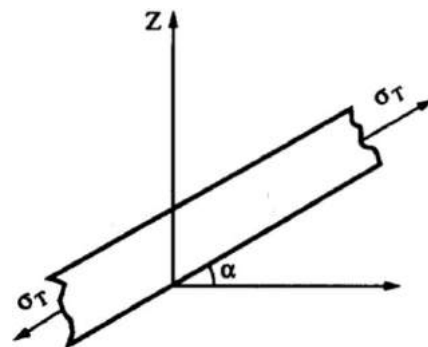


Рис. 1. Фрагмент навиваемой ленты с углом навивки α и напряжением от ее натяжения σ_t

В исследуемых источниках описывается применение метода конечных элементов для описания решения проблемы упругой и упругопластической работы формообразованной (намотанной) многослойной толстостенной оболочки (рис. 2) [10].

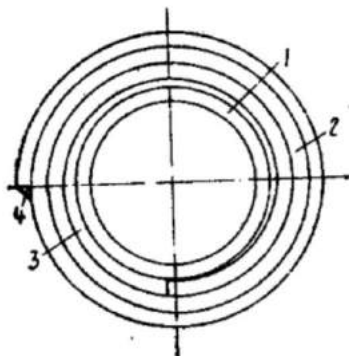


Рис. 2. Поперечное сечение навитого многослойного цилиндрического корпуса сосуда:

1 – центральный цилиндрический элемент;
2 – основная многослойная часть; 3 – вставка клиновидной формы; 4 – замыкающий сварочный шов, расположенный вдоль образующей царги

Рассматривается зона сосуда высокого давления, в которой краевым эффектом торцевых поверхностей, примыкающих к днищам сосуда, можно пренебречь, при этом давление, передаваемое на эти поверхности днищами, учитывается. Описанная методика расчета позволяет исследовать напряженное состояние и деформации на упругих и упругопластических стадиях работы многослойных сосудов спирального типа, нагруженных внутренним давлением, и проследить поведение таких конструкций в случае циклического нагружения внутренним давлением.

Этими же авторами описаны перспективы развития сосудов давления с многослойными цилиндрическими корпусами. Показано, что особая форма плоской стальной ленты спирально-крестообразного типа является оптимальной по критериям безопасности и экономичности [11].

Исследуется напряженно-деформированное состояние многослойной цилиндрической стенки формообразованной прокатанной стальной лентой [12]. Поставленная авторами задача без учета контактного сближения слоев решается с помощью линейных уравнений, а характер распределения периферических (краевых) напряжений по толщине стенки цилиндра не зависит от величины внутреннего давления.

Здесь же показано, что напряжения во внешних слоях и оболочке (наружном кожухе навитой многослойной царги) (рис. 3) значительно возрастают только при значении коэффициента трения менее 0,04. При этом уравнения, используемые авторами для расчета контактного сближения (контактной податливости) являются нелинейными, а характер распределения периферических (краевых) напряжений уже будет зависеть от величины внутреннего давления.

Главный результат этого исследования говорит о том, что идеальный контакт слоев царги (контакт без учета контактного сближения) и наличие их проскальзывания действует состояние деформации многослойной царги только при малых значениях коэффициента трения. Наличие эффекта контактной податливости оказывает существенное влияние на периферийные (краевые) напряжения на внутренних поверхностях многослойной царги, увеличивая их до 75 %.

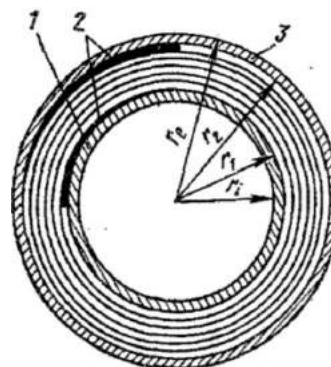


Рис. 3. Конструктивная и расчетная схема:

1 – центральный цилиндрический элемент;
2 – формообразованная многослойная часть;
3 – наружный кожух

Также отметим, что физически корректная аппроксимация функции контактной податливости (сближения шероховатых контактирующих поверхностей в многослойных конструкциях) дается трехпараметрическим дробнонелинейным соотношением [13].

Метод расчета оптимальных параметров многослойной цилиндрической стенки с постоянным натяжением полосы во время намотки (рис. 4) в зависимости от внутреннего радиуса многослойной цилиндрической стенки, внутреннего рабочего давления и прочностных характеристик материала изложен в работе А.Ф. Безвербного [14].

Описанный метод предполагает, что смещение слоев относительно друг друга отсутствует при формообразовании многослойной цилиндрической стенки, а также не имеет места в процессе эксплуатации. При этом любое частичное проскальзывание может значительно ухудшить благоприятный эффект, достигаемый при натяжении полосы во время наматывания (формообразовании многослойной цилиндрической стенки).

Другая работа этого автора отражала исследование эквивалентных деформаций и прочности многослойного цилиндра, формообразованного плоской металлической лентой [15]. По мнению А.Ф. Безвербного, следует избегать уменьшения натяжения навиваемой ленты в отдельных витках

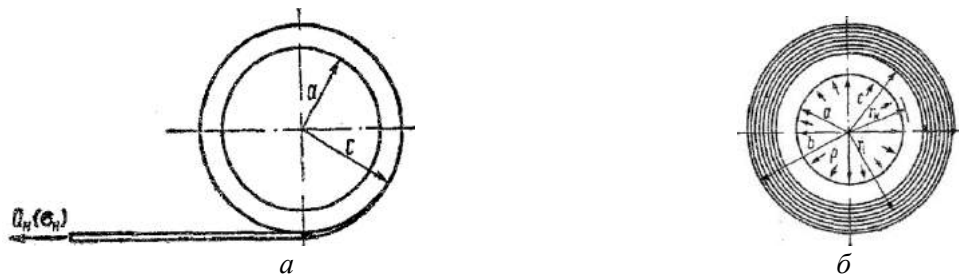


Рис. 4. Исходная позиция начала процесса намотки (формообразования, навивки) плоской стальной ленты заготовки:

a – центральный цилиндрический элемент; b – конструктивная схема многослойного формообразованного цилиндра

во время формообразования многослойного цилиндра, а в качестве профилактической меры для предотвращения проскальзывания слоев предлагается использование точечной сварки для крепления ленты навиваемой заготовки к центральному цилиндрическому элементу.

Было также проанализировано влияние предварительного натяжения заготовки (прокатанной ленты) на результирующее остаточное напряженное состояние в многослойном цилиндре, формообразованном на стальной оправке [16].

Авторы определяют элементы, влияющие на результирующее остаточное напряженное состояние, и получают соответствующие функции, связывающие напряжения слоев с натяжением ленты (заготовки). Остаточные напряжения слоя оцениваются для постоянного распределения напряжений во всех слоях. Процедура оптимизации реализована для установления распределений преднатягов, которые создают минимальные остаточные напряжения в слоях. Роль жесткости оправки в результирующем остаточном напряженном состоянии также изучается путем выбора различных толщин оправки. Г. Дворак ссылается на свою предыдущую работу [17], в которой он с соавтором рассмотрел многослойный цилиндр из ортотропных слоев, нагруженный равномерными осесимметричными поверхностными растяжениями и кусочно-однородными собственными напряжениями в слоях (рис. 5).

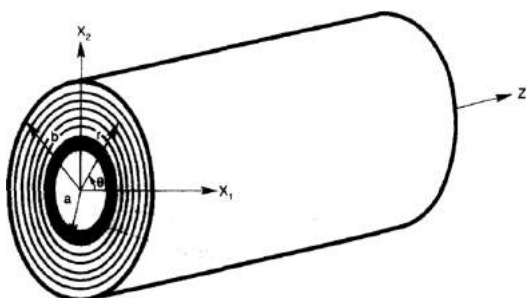


Рис. 5. Конструктивная схема формообразованного многослойного цилиндра

Процедура их оптимизации реализована для поиска распределений собственных напряжений, которые корректируют напряжения в слоях до определенного уровня, позволяя применять установленные диапазоны величины предварительного напряжения формообразуемой (навиваемой) ленты для уменьшения волнистости слоев. В частности, анализируется конкретный процесс формообразования, в котором используется предварительное напряжение формообразуемой (навиваемой) ленты в качестве источника собственных напряжений слоев и распределяются силы для ее предварительного натяжения, создающие желаемое распределение кольцевых и осевых напряжений в многослойной цилиндрической стенке.

Представлена методика моделирования процесса намотки узкой заготовки прямоугольного поперечного сечения (рис. 6) из высокопрочной стали для анализа цилиндрических корпусов сосудов высокого давления [18]. Процесс формообразования заключается в последовательной укладке каждого слоя заготовки по ширине «стык в стык» с постепенным формированием сжимающих напряжений во внутреннем цилиндрическом элементе.

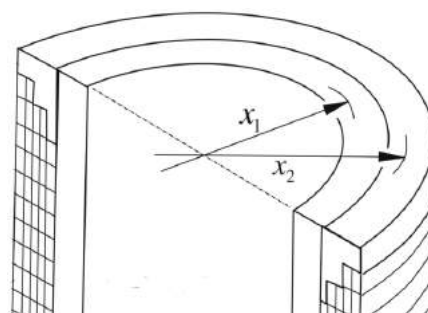


Рис. 6. Царга, образованная из узкой заготовки прямоугольного поперечного сечения

Результаты моделирования были подтверждены аналитическими решениями для линейных упругих случаев с хорошей сходимостью результатов. Предложенная методика моделирования дает возможность оценить вариации непродолжитель-



ных напряжений навивки для различных слоев, а также позволяет учитывать существующую разницу между модулями упругости материала центрального цилиндрического элемента и материала навиваемой заготовки. Также с ее помощью можно определить внутреннее сжимающее давление.

Предложены также методики определения деформации и напряжения толстостенного цилиндра с различными углами намоточной ленты под равномерным внутренним давлением (рис. 7).

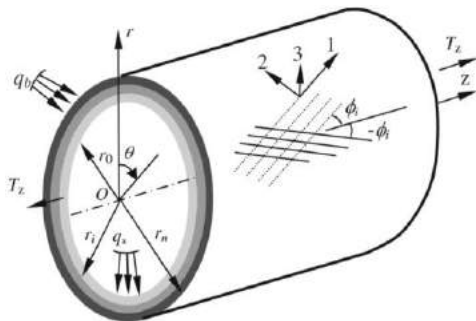


Рис. 7. Цилиндр, формообразованный намотанной лентой

Проведен аналитический расчет напряжений каждого ортотропного слоя, продольных напряжений вдоль направления ленты, также рассчитаны поперечные напряжения, перпендикулярные направлению навитой ленты и напряжения сдвига в слое ленты. Построена оптимизационная модель сосуда с концевыми элементами под равномерным внутренним давлением, подвергнутым критерию отказа Цай-Ву, для максимизации самой низкой степени прочности по толщине с оптимальным изменением угла намотки [19].

Приняты два метода оптимизации для поиска наилучшей последовательности угла намотки (навивки) с целью получения более эффективного алгоритма расчета. Таким образом, исследование показывает, что конструктивные и эксплуатационные параметры могут быть улучшены за счет правильного изменения угла намотки. Предложено несколько схем оптимальной последовательности намотки для различных соотношений толщины цилиндрических корпусов сосудов.

В конце 1990-х гг. ученые Чжэцзянского университета в Ханчжоу (КНР) начали работу по исследованию результирующего НДС конструкций витых многослойных корпусов сосудов внутреннего давления [20, 21] с внутренним диаметром 350–1 000 мм, вызванного различными эффектами в процессе их формообразования под различными углами намотки стальной рулонной ленты (15–30°).

Ученые из этого же университета продолжили свои исследования [22], в которых изучались

вопросы оптимизации углов навивки плоской ленты витых цилиндрических корпусов СВД (рис. 8), что является весьма полезным в процессе их проектирования.

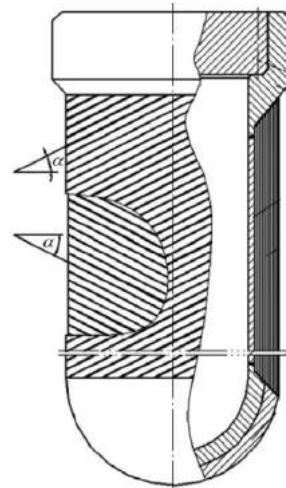


Рис. 8. Конструкция витого спирально-рулонного сосуда высокого давления

Теоретический и экспериментальный анализ показали, что при угле намотки α менее 15° существует опасность осевых разрушений (разрывов), а когда угол намотки α более 30° снижается общая возможная предельная величина эксплуатационного внутреннего давления. Таким образом, для обеспечения приемлемых осевых и кольцевых деформаций с учетом слияния сил трения, угол намотки стальной ленты должен быть в диапазоне 15–30°. Авторы также отмечают, что важным параметром в таких цилиндрических корпусах сосудов давления является коэффициент отношения толстостенностей центрального цилиндрического элемента и формообразованной многослойной части из стальных лент. Когда это значение около 1/4, следует уменьшить угол намотки, а когда в пределах 1/6 – увеличить.

Эффект предварительного натяжения слоев многослойной формообразованной части и центрального цилиндрического элемента также исследуются этими авторами [23]. Разработана математическая модель для исследования этой проблемы и предложен оптимальный метод проектирования конструкции (см. рис. 7) с целью обеспечения благоприятного распределения уровня напряжений по толщине стенки корпуса сосуда в процессе его эксплуатации.

В процессе дальнейшего исследования конструкции цилиндрического корпуса разработаны аналитические формулы для расчета кольцевых и осевых напряжений в тонкостенных сосудах давления с многослойными стенками, формообразо-



ванными намоткой плоской металлической ленты под влиянием изменения угла ее спиральной намотки (навивки) [24]. Анализ модели выполнен с использованием программной системы «ANSYS», конструкция которой состоит из внутренней оболочки толщиной 40 % от общей расчетной толщины и шести слоев, образованных плоской металлической лентой (2 мм). Намотка ленты на внутренний (центральный) цилиндрический элемент реализована с предварительным натягом. Сравнивались результаты аналитического и конечно-элементного методов с точки зрения кольцевых и осевых напряжений, сделаны предложения по компенсации различий между ними. Основные результаты этого исследования заключаются в следующих положениях:

1. Намотка ленты на внутренний (центральный) цилиндрический элемент под силой натяжения ленты создает остаточные технологические напряжения сжимающего характера во внутреннем цилиндрическом элементе, которые действуют против эксплуатационного давления в сосуде. Слои будут находиться под натяжением из-за предварительного натяжения ленты заготовки во время намотки, которое компенсируется растягивающими напряжениями от внутреннего (эксплуатационного) давления.

2. Для сосудов давления, корпус которых образован плоской металлической лентой, необходимо применять контактные пары между последовательно сопряженными (смежными) слоями для корректной передачи усилий с внутреннего (центрального) цилиндрического элемента на слои, образованные лентой. Несмотря на то, что аналитическое решение было предложено с учетом линейного поведения материала внутреннего (центрального) цилиндрического элемента и слоев, образованных лентой, оно не учитывает концентраторов напряжений, сформированных сварочными стыковыми швами, которые соединяют внутренний цилиндрический элемент и ленту.

Говоря о процессе формообразования основных конструктивных элементов (царг) многослойных цилиндрических корпусов сосудов и реакторов, нельзя обойти стороной и исследование модуля радиального сжатия [25], в котором была предпринята попытка моделирования нелинейного поведения этого процесса. Авторы ссылаются на известные работы Пфайфера, где намотанные слои рассматриваются как «многослойный пакет под давлением». Соотношение деформации и давления, основанного на экспериментальном исследовании представляется как

$$P = -K_1 + K_1 e^{K_2 \varepsilon}, \quad (1)$$

где P – приложенное к формообразованной (намотанной) конструкции давление; ε – результирующая деформация; K_1 и K_2 – параметры, определяемые экспериментально.

Для лучшего соответствия экспериментальным данным был добавлен третий член

$$P = -K_1 + K_1 e^{K_2 \varepsilon} + K_3 \varepsilon. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования, проведенные авторами, показывают, что для учета влияния возрастания количества слоев и их свойств (поверхности контакта, воздушных зазоров и т. д.) модель Пфайфера должна зависеть от количества слоев конструкции и радиуса. Ими также предложена модель для расчета профиля давления в слоях многослойной конструкции:

$$P(i-1) = \frac{2\Delta r}{r(i)} (T(i) - P(i)) + P(i+1). \quad (3)$$

Представлена линейная и нелинейная модели для оценки напряжений и деформаций в процессе формообразования многослойных цилиндров [26]. Автор также дает уточнение граничных условий и других особенностей процесса формообразования относительно своей предыдущей работы и предлагает решение для анизотропной конструкции. Говоря о нелинейном характере заготовки формобразуемого ортотропного цилиндра, автор ссылается на модель Пфайфера. Ценность полученных результатов и предложенных методов заключается в возможности оценки НДС формобразуемой конструкции и навиваемого следующим слоем участка заготовки (ленты) до момента наложения следующего слоя и после (рис. 9).

Наиболее интересной в этом исследовании является модель, представленная с учетом того, что все коэффициенты Пуассона приняты равными нулю, а нелинейность конструкции учитывается только в радиальном направлении, т. е. модуль упругости в радиальном направлении E_r зависит от давления.

Нашло практическое приложение в качестве инструмента исследования процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкций и развитие методов конечно-элементного анализа [27].

Авторы статьи утверждают, что ключевой характеристикой конечных элементов в модели формообразования должно быть правильное распределение натяжения полотна формобразуемой ленты по ширине на текущем слое с изменением радиуса в зависимости от ее длины и толщины. Ими вводится концепция предварительных напряжений на основе утверждения, что напряжение от натяжения навиваемой ленты является источником силового воздействия уже на формобразованную перед этим конструкцию в целом.

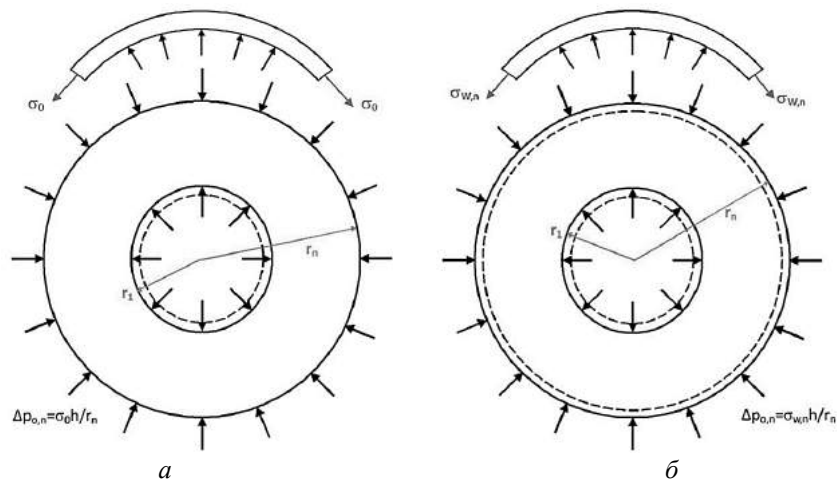


Рис. 9. Момент процесса формообразования с новым навиваемым слоем (сплошные линии показывают исходное положение контура цилиндра перед намоткой нового слоя; пунктирные линии – положение контура цилиндра после намотки соответствующего слоя):

a – исходные граничные условия (текущий навиваемый слой имеет напряжение σ_0 , наружный радиус формообразованного к этому моменту цилиндра еще не деформирован); *б* – результирующие граничные условия (текущий навиваемый слой уже навит $\sigma_{w,n} \neq \sigma_0$, наружный радиус цилиндра деформирован)

Сила натяжения навиваемой ленты, свойства ее материала, жесткость центрального цилиндрического элемента, а также конечный диаметр формообразуемой конструкции в итоге оказывают влияние на изменение напряженного состояния, которое может вызвать дефекты по длине и толщине. Предложенная авторами модель может анализировать любые дефекты по всей длине полотна формообразуемой ленты и учитывать осевую симметрию.

Развитие моделей численного анализа радиальных напряжений в формообразуемых по спирали конструкциях с учетом эффектов гравитации, технологических (растягивающих ленту) и изгибающих напряжений представлено в другой работе [28]. Полученная авторами модель применима для различных материалов, в том числе и не металлического происхождения, она показывает, как радиальные напряжения зависят от характеристик материала формообразуемой заготовки и от силы ее натяжения. Эффект влияния гравитации и изгибающих напряжений на увеличение радиального напряжения был проанализирован с помощью компьютерного моделирования. Его результаты показали, что радиальные напряжения возрастают с увлечением плотности материала формообразуемой заготовки, а изгибные снижаются. Также в работе отмечено, что сокращение радиальных напряжений способствует возрастанию модуля упругости материала и этот эффект гораздо сильнее, чем с изгибными напряжениями в виду того, что модуль упругости определяется результирующими радиальными напряжениями, вызванными напряжениями изгиба и навивки (формообразова-

ния). Максимум радиальных напряжений достигается при наибольшем натяжении ленты формообразуемой заготовки, но эта тенденция меняется с возрастанием разницы в величинах компонент результирующих напряжений.

Известны и другие исследования процесса формообразования путем навивки (намотки) по спирали заготовок различной толщины и материалов. Так, например, описан процесс одновременного формообразования многослойного цилиндра из двух заготовок (рулонов) с применением адгезионного слоя между ними [29]. Нанесение адгезионного слоя проводилось с использованием высоковязкого клеевого материала на различных режимах скорости покрытия и регулировкой зазоров между соединяемыми слоями. Одновременно опубликованным продолжением этого исследования стала работа, в которой механика данного технологического процесса была исследована методом конечных элементов, основанным на теоретической модели [30]. Оценка влияния механических факторов на адгезионную прочность была сделана с применением полного факторного экспериментального плана. В результате авторы доказали, что адгезионная прочность слоев в формообразованной конструкции снижается с увеличением натяжения и степени деформации заготовки в процессе формообразования, а изменение радиуса конструкции имеет противоположную тенденцию, т. е. к рабочему натяжению заготовок.

Представлена численная модель для оценки напряжений навивки формообразуемой по спирали конструкции с учетом влияния нелинейности сжатия, а также воздушного захвата и проницаемости



[31]. Напряжение навивки рассчитывается как суперпозиция приращений напряжений, вызванных каждой обмоткой (каждым навитым слоем). С этой целью в работе вводится теория упруго-гидродинамической смазки со сжатием воздуха для оценки эффекта его захвата на входе в рулон (рис. 10).

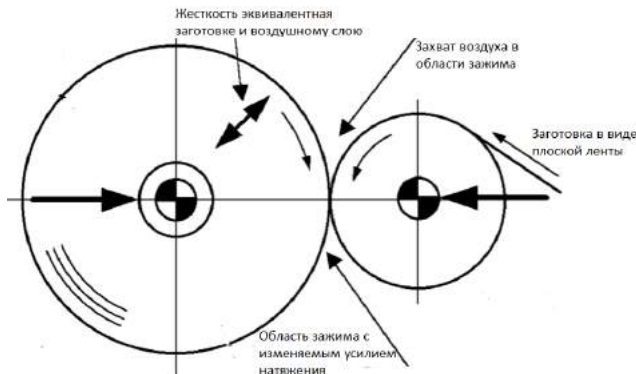


Рис. 10. Технологическая схема навивки

Проницаемость воздуха, включенная в формообразующую модель, выражается из предположения о том, что проницаемость пропорциональна разности давлений с обеих сторон слоя.

Многие многослойные цилиндрические конструкции, имеющие сравнительно малую толщину слоев и их большое количество, могут иметь различные дефекты формообразования в виде складчатости во внутренней центральной области и волнистости (рис. 11).

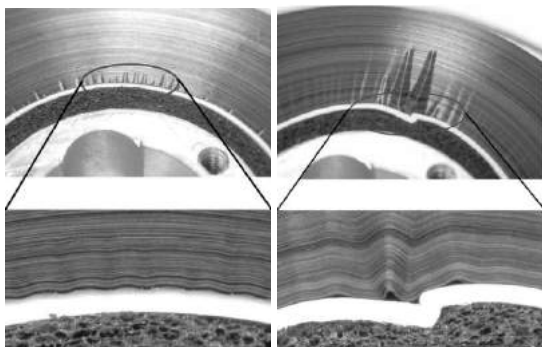


Рис. 11. Виды дефектов формообразования (складчатость и волнистость)

Как правило, это рулоны листового металла, бумаги или различные полимерные полотна. Появление таких дефектов обусловлено напряжениями внутри рулона, которые могут быть достаточно высокими, и зависят от упругих свойств формообразуемого материала, размеров рулона, типа центрального цилиндрического элемента (сердечника) и степени натяжения обмотки [32].

Описана математическая модель прогнозирования минимального коэффициента трения

между слоями формообразуемой конструкции с целью предотвращения дефектов в виде морщин и складок с точки зрения условий формообразования и свойств материала [33].

Автором показано, что минимальный коэффициент трения между слоями увеличивается с увеличением плотности и радиуса рулона, а уменьшается с увеличением напряжения намотки между слоями. Также в работе установлено, что увеличение диаметра формообразуемой конструкции снижает критическое значение коэффициента трения.

Исследования процессов намотки (формообразования) различных рулонов из неметаллических материалов также имели свое развитие. Предприняты попытки оптимизации этих параметров относительно силы натяжения рулонной ленты с использованием специальной структуры, основанной на теории упругости [34]. Анализируются корреляции между натяжением рулонной ленты и распределением кольцевых напряжений через центральный формообразующий элемент. Похожее исследование было реализовано немного раньше, которое также было направлено на исследование дефектов телескопического и складчатого типа [35]. В этой работе предложены математические модели и алгоритмы оптимизации процесса формообразования и поиска его наиболее благоприятных параметров (режимов).

Наконец, известны работы, в которых исследуются различные эффекты, влияющие на возникновение дефектов в виде телескопирования в процессе высокоскоростного формообразования рулонированных неметаллических конструкций [36, 37]. В них решаются вопросы развития и оптимизации методов натяжения формообразуемых лент заготовок различной ширины с применением разных вспомогательных и поддерживающих приспособлений роликового типа. Также еще в одном исследовании предпринята попытка установить контроль над силами натяжения с двумя степенями свободы на основе многопараметрического контроля [38].

В заключение отметим, что результирующее напряженно-деформированное состояние и качество формообразованной многослойной конструкции можно существенно повысить путем применения предварительного процесса прокатки заготовки. В известных работах описаны технология и основные средства прокатных комплексов, а также опыт их применения на листовых заготовках [39, 40].

Заключение

Представленный в данной работе аналитический обзор коротко описывает основные результаты исследований процесса формообразования многослойных цилиндрических конструкций и



дает возможность понять методы моделирования и анализа таких процессов, а также позволяет проследить тренды их развития.

Многие из приведенных работ могут иметь развитие и практическое приложение для анализа и оценки результирующих остаточных технологических напряжений, возникающих в многослойных царгах по завершении процесса формообразо-

вания, и позволят осуществлять его оптимизацию. Эти и другие, связанные с ними задачи, будут предметом для дальнейших исследований авторов.

Автор выражает глубокую благодарность профессору кафедры вагонов и вагонного хозяйства Л. Б. Цвику за внимание к работе и полезные замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 71464 СССР, МПК⁶ В 21 С 47/04. Способ изготовления многослойных корпусов толстостенных сосудов высокого давления / М.Н. Бейлин. № 45059 ; заявл. 24.02.41 ; опубл. 01.01.48.
2. А.с. 331614 СССР, МКИ³ В 21 Д 51/24. Способ изготовления многослойных обечаек для сосудов высокого давления / Е.Р. Хисматулин и др. № 1610342/25-27 ; заявл.22.01.71 ; опубл. 30.04.78, Бюл. № 16.
3. А.с. 659828 СССР, МКИ³ Г 17 С 1/06. Способ изготовления многослойных корпусов сосудов / П.Г. Пимштейн и др. № 2046816/23-26 ; заявл.15.07.74 ; опубл.30.04.79, Бюл. № 16.
4. А.с. 986024 СССР, МКИ³ В 21 Д 51/24. Способ изготовления многослойных сосудов высокого давления / В.М. Макаров и др. № 3276675/25-27 ; заявл.20.04.81 ; опубл. 1.09.82, Бюл. № 32.
5. А.с. 341284 СССР, МКИ³ В 21 Д 51/24. Способ изготовления корпусов / П.Г. Пимштейн. № 1369848 ; заявл.09.10.69 ; опубл.12.11.82, Бюл. № 35.
6. Пимштейн П.Г. Расчет оптимальной величины натяга в многослойном цилиндре // Химическое и нефтяное машиностроение. 1974. № 5. Р. 4–6.
7. ОСТ 26-01-221-86. Сосуды многослойные рулонированные стальные высокого давления. Изготовление, испытание, приемка и поставка. М. : Минхимнефтемаш, 155 с.
8. Drozdov A.D., Kalamkarov A.L. Optimization of winding process for composite pressure vessels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1995. Vol. 62, № 1. P. 69–81.
9. Zhu R., Zhu G. Strength and safety analysis of flat steel ribbon helically wound pressure vessel // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1996. Vol. 65, № 1. P. 7–11.
10. Gordeev V.N., Mikitarenko M.A., Perel'muter A.V. Stress analysis of coiled multilayer high-pressure vessels in the elastoplastic stage // Strength of Materials. 1979. Vol. 11, № 7. P. 778–783.
11. Zhu R., Zhu G. Potential developments of pressure vessel technology by using thin inner core and flat steel ribbon winding techniques // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1996. Vol. 65, № 1. P. 1–5.
12. Investigation of the stress-strain condition of a multilayer rolled wall // In L.A. et al. // Chemical and Petroleum Engineering. 1979. Vol. 15, № 9. P. 668–671.
13. Об аппроксимирующей функции сближения шероховатых контактирующих поверхностей в многослойных конструкциях / П.Г. Пимштейн и др. // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1983. № 12. Р. 3–9.
14. Bezverbnyi A.F. Method of calculating the optimum parameters of a multilayered coiled cylinder with constant tension of the strip during coiling // Strength Mater. 1982. Vol. 14, № 3. P. 368–374.
15. Bezverbnyi A.F. Strength equalization in a multilayer band-reinforced cylinder // Strength of Materials. 1982. Vol. 14, № 6. P. 787–792.
16. Srinivasl M.V., Dvorak G.J. Design of Composite Cylinder Fabrication Process // IUTAM Symposium on Transformation Problems in Composite and Active Materials / ed. Bahei-El-Din Y.A., Dvorak G.J. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. Vol. 60. P. 209–219.
17. Dvorak G.J., Prochazka P. Thick-walled composite cylinders with optimal fiber prestress // Composites Part B: Engineering. 1996. Vol. 27, № 6. P. 643–649.
18. Alegre J.M. et al. Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique // Engineering Failure Analysis. 2010. Vol. 17, № 1. P. 61–69.
19. Geng P., Xing J.Z., Chen X.X. Winding angle optimization of filament-wound cylindrical vessel under internal pressure // Arch Appl Mech. 2017. Vol. 87, № 3. P. 365–384.
20. Zheng J., Xu P, Wang L.Q, Zhu G.H. A more accurate method for predicting the stresses in a flat steel ribbon wound pressure vessel // Internal report of Zhejiang University. 1997. P. 787–793.
21. Zheng J. Design philosophy of flat ribbon wound layered pressure vessel // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1998. Vol. 75, № 1. P. 57–61.
22. Zheng C. Research on reasonable winding angle of ribbons of Flat Steel Ribbon Wound Pressure Vessel // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7, № 3. P. 445–449.
23. Zheng C., Lei S. Optimal Winding Conditions of Flat Steel Ribbon Wound Pressure Vessels With Controllable Stresses // Journal of Applied Mechanics. 2008. Vol. 75, № 4. P. 041009.
24. Amin M., Ahmed S. Finite element analysis of pressure vessel with flat metal ribbon wound construction under the effect of changing helical winding angle // Journal of Space Technology. 2011. Vol. 1, № 1. P. 34–39.
25. Kaboré P. et al. Modelling Radial Compressive Modulus in Wound Rolls // Measurement and Control. 2007. Vol. 40, № 7. P. 207–210.
26. Liu M.L. A nonlinear model of center-wound rolls incorporating refined boundary conditions // Computers & Structures. 2009. Vol. 87, № 9–10. P. 552–563.
27. Mollamahmutoglu C., Good J.K. Modeling the influence of web thickness and length imperfections resulting from manufacturing processes on wound roll stresses // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2015. Vol. 8. P. 22–33.
28. Lee J., Lee C. An advanced model for the numerical analysis of the radial stress in center-wound rolls // International Journal of Mechanical Sciences. 2016. Vol. 105. P. 360–368.



29. Park J., Shin K., Lee C. Improvement of cross-machine directional thickness deviation for uniform pressure-sensitive adhesive layer in roll-to-roll slot-die coating process // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015. Vol. 16, № 5. P. 937–943.
30. Lee J. et al. Analysis of adhesion strength of laminated copper layers in roll-to-roll lamination process // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015. Vol. 16, № 9. P. 2013–2020.
31. Tanimoto K. et al. Wound stress of permeable papers with air-entrainment // *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*. 2003. Vol. 73, № 3–4. P. 160–170.
32. Lin P.M., Wickert J.A. Corrugation and Buckling Defects in Wound Rolls // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2006. Vol. 128, № 1. P. 56.
33. McDonald D. Crepe wrinkle formation during reeling and winding // *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*. 2014. Vol. 4, № 1. P. 10–16.
34. Optimization of taper winding tension in roll-to-roll web systems / W. Dehui et al. // *Textile Research Journal*. 2014. Vol. 84, № 20. P. 2175–2183.
35. Hashimoto H., Jeenkour P., Mongkolowongrojn M. Optimum Winding Tension and Nip-load into Wound Webs for Protecting Wrinkles and Slippage // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2010. Vol. 4, № 1. P. 214–225.
36. Lee C. et al. Effect of taper tension profile on the telescoping in a winding process of high speed roll to roll printing systems // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. Vol. 23, № 11. P. 3036–3048.
37. Lee C., Kang H., Shin K. Advanced taper tension method for the performance improvement of a roll-to-roll printing production line with a winding process // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. Vol. 59, № 1. P. 61–72.
38. Knittel D. et al. Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H_∞ controllers // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003. Vol. 39, № 1. P. 113–120.
39. Ou Y. et al. An incipient on-line anomaly detection approach for the dynamic rolling process // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2014. Vol. 15, № 9. P. 1855–1864.
40. Pham M., Lee C. Novel approach to predict the varying thicknesses of a PVA film during a roll-to-roll process // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. Vol. 92. P. 52–69.

REFERENCES

1. Beilin M.N. *Sposob izgotovleniya mnogosloynnykh korpusov tolstostennykh sudov vysokogo davleniya* [A method of manufacturing a multilayer shells of thick walled high-pressure vessels]. Inventor's certificate 71464 USSR, MPK⁶ V 21 S 47/04. / No. 45059; Applied 24.02.41; Published 01.01.48.
2. Khismatulin E.R., Shel M.M., Korolev E.M., Pimshteyn P.G., Novikov A.N., Redkin B.V., Cheremnykh V.M. *Sposob izgotovleniya mnogosloynnykh obechayek dlya sudov vysokogo davleniya* [A method of manufacturing multilayer shells for pressure vessels]. Inventor's certificate 331614 USSR, MKI³ B 21 D 51/24. No. 1610342/25-27; Applied 22.01.71; Published 30.04.78. Bulletin No. 16.
3. Pimshteyn P.G., Borsuk E.G., Shel M.M., Ivantsov V.V., Makarov V.M., Ziselman B.G. *Sposob izgotovleniya mnogosloynnykh korpusov sudov* [A method of manufacturing a multilayer vessel shells]. Inventor's certificate 659828 USSR, MKI³ Г 17 S 1/06. No. 2046816/23-26; Applied 15.07.74; Published 30.04.79, Bulletin No. 16.
4. Makarov V.M., Khismatulin E.R., Livshits V.I., Shel M.M., Serov P.G., Pimshtein P.G., Tupitsyn A.A., Borsuk E.G., Murashev B.G., Solodov G.S., Tsvik L.B. *Sposob izgotovleniya mnogosloynnykh sudov vysokogo davleniya* [A method of manufacturing a multilayer pressure vessels]. Inventor's certificate 986024 USSR, MKI³ V 21 D 51/24. Applied 20.04.81; Published 1.09.82, Bulletin No. 32.
5. Pimshtein P.G. *Sposob izgotovleniya korpusov* [A method of manufacturing housing]. Inventor's certificate 341284 USSR, MKI³ V 21 D 51/24. No. 1369848; Applied 09.10.69; Published 12.11.82, Bulletin No. 35.
6. Pimshtein P.G. Raschet optimal'noy velichiny natyaga v mnogosloynnom tsilindre [Calculation of the optimal value of tension in a multilayer cylinder]. *Khimicheskoye i neftyanoye mashinostroyeniye* [Chemical and petroleum engineering], 1974. No. 5. Pp. 4–6.
7. Industry standard 26-01-221-86. *Sosudy mnogosloynnyye rulonirovannyye stal'nyye vysokogo davleniya. Izgotovleniye, ispytaniye, priyemka i postavka* [Multilayer steel rolled high pressure vessels. Manufacturing, testing, acceptance and delivery]. Moscow. Ministry of Chemical and Petroleum Engineering Publ., 155 p.
8. Drozdov A.D., Kalamkarov A.L. Optimization of winding process for composite pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1995. Vol. 62, No. 1. Pp. 69–81.
9. Zhu R., Zhu G. Strength and safety analysis of flat steel ribbon helically wound pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1996. Vol. 65, No. 1. Pp. 7–11.
10. Gordeev V.N., Mikitarenko M.A., Perel'muter A.V. Stress analysis of coiled multilayer high-pressure vessels in the elastoplastic stage. *Strength of Materials*, 1979. Vol. 11, No. 7. Pp. 778–783.
11. Zhu R., Zhu G. Potential developments of pressure vessel technology by using thin inner core and flat steel ribbon winding techniques. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1996. Vol. 65, No. 1. Pp. 1–5.
12. Il'in L.A. et al. Investigation of the stress-strain condition of a multilayer rolled wall. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1979. Vol. 15, No. 9. Pp. 668–671.
13. Pimshtein P.G., Tupitsyn A.A., Borsuk E.G., Tsvik L.B. Ob approksimiruyushchey funktsii sblizheniya sherokhovatykh kontaktiruyushchikh poverkhnostey v mnogosloynnykh konstruktivnykh [On the approximating function of the convergence of roughness contacting surfaces in multilayer structures]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye* [University proceedings. Engineering], 1983. No. 12. Pp. 3–9.
14. Bezverbnyi A.F. Method of calculating the optimum parameters of a multilayered coiled cylinder with constant tension of the strip during coiling. *Strength Mater*, 1982. Vol. 14, No. 3. Pp. 368–374.
15. Bezverbnyi A.F. Strength equalization in a multilayer band-reinforced cylinder. *Strength of Materials*, 1982. Vol. 14, No. 6. Pp. 787–792.
16. Srinivas M.V., Dvorak G.J. Design of Composite Cylinder Fabrication Process. *IUTAM Symposium on Transformation Problems in Composite and Active Materials*. In Bahei-El-Din Y.A., Dvorak G.J. (ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. Vol. 60. Pp. 209–219.
17. Dvorak G.J., Prochazka P. Thick-walled composite cylinders with optimal fiber prestress. *Composites Part B: Engineering*, 1996. Vol. 27, No. 6. Pp. 643–649.



18. Alegre J.M. et al. Simulation procedure of high pressure vessels using the wire winding technique. *Engineering Failure Analysis*, 2010. Vol. 17, No. 1. Pp. 61–69.
19. Geng P., Xing J.Z., Chen X.X. Winding angle optimization of filament-wound cylindrical vessel under internal pressure. *Arch Appl Mech*, 2017. Vol. 87, No. 3. Pp. 365–384.
20. Zheng J., Xu P., Wang L.Q., Zhu G.H. A more accurate method for predicting the stresses in a flat steel ribbon wound pressure vessel. *Internal report of Zhejiang University*, 1997. Pp. 787–793.
21. Zheng J. Design philosophy of flat ribbon wound layered pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998. Vol. 75, No. 1. Pp. 57–61.
22. Zheng C. Research on reasonable winding angle of ribbons of Flat Steel Ribbon Wound Pressure Vessel. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2006. Vol. 7, No. 3. Pp. 445–449.
23. Zheng C., Lei S. Optimal Winding Conditions of Flat Steel Ribbon Wound Pressure Vessels With Controllable Stresses. *Journal of Applied Mechanics*, 2008. Vol. 75, No. 4. Pp. 041009.
24. Amin M., Ahmed S. Finite element analysis of pressure vessel with flat metal ribbon wound construction under the effect of changing helical winding angle. *Journal of Space Technology*, 2011. Vol. 1, No. 1. Pp. 34–39.
25. Kaboré P. et al. Modelling Radial Compressive Modulus in Wound Rolls. *Measurement and Control*, 2007. Vol. 40, No. 7. Pp. 207–210.
26. Liu M.L. A nonlinear model of center-wound rolls incorporating refined boundary conditions. *Computers & Structures*, 2009. Vol. 87, No. 9–10. Pp. 552–563.
27. Mollamahmutoglu C., Good J.K. Modeling the influence of web thickness and length imperfections resulting from manufacturing processes on wound roll stresses. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015. Vol. 8. Pp. 22–33.
28. Lee J., Lee C. An advanced model for the numerical analysis of the radial stress in center-wound rolls. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016. Vol. 105. Pp. 360–368.
29. Park J., Shin K., Lee C. Improvement of cross-machine directional thickness deviation for uniform pressure-sensitive adhesive layer in roll-to-roll slot-die coating process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015. Vol. 16, No. 5. Pp. 937–943.
30. Lee J. et al. Analysis of adhesion strength of laminated copper layers in roll-to-roll lamination process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015. Vol. 16, No. 9. Pp. 2013–2020.
31. Tanimoto K. et al. Wound stress of permeable papers with air-entrainment. *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*, 2003. Vol. 73, No. 3–4. Pp. 160–170.
32. Lin P.M., Wickert J.A. Corrugation and Buckling Defects in Wound Rolls. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006. Vol. 128, No. 1. Pp. 56.
33. McDonald D. Crepe wrinkle formation during reeling and winding. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 2014. Vol. 4, No. 1. Pp. 10–16.
34. Dehui W. et al. Optimization of taper winding tension in roll-to-roll web systems. *Textile Research Journal*, 2014. Vol. 84, No. 20. Pp. 2175–2183.
35. Hashimoto H., Jeenkour P., Mongkolwongrojn M. Optimum Winding Tension and Nip-load into Wound Webs for Protecting Wrinkles and Slippage. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2010. Vol. 4, No. 1. Pp. 214–225.
36. Lee C. et al. Effect of taper tension profile on the telescoping in a winding process of high speed roll to roll printing systems. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009. Vol. 23, No. 11. Pp. 3036–3048.
37. Lee C., Kang H., Shin K. Advanced taper tension method for the performance improvement of a roll-to-roll printing production line with a winding process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012. Vol. 59, No. 1. Pp. 61–72.
38. Knittel D. et al. Tension control for winding systems with two-degrees-of-freedom H_{∞} controllers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003. Vol. 39, No. 1. Pp. 113–120.
39. Ou Y. et al. An incipient on-line anomaly detection approach for the dynamic rolling process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014. Vol. 15, No. 9. Pp. 1855–1864.
40. Pham M., Lee C. Novel approach to predict the varying thicknesses of a PVA film during a roll-to-roll process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015. Vol. 92. Pp. 52–69.

Информация об авторах

Еловенко Денис Александрович – к. т. н., доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск e-mail: elovenko03@gmail.com

Authors

Denis Aleksandrovich Elovenko – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Design and Standardization in Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: elovenko03@gmail.com

Для цитирования

Еловенко Д.А. Тенденции развития технологии формообразования многослойных цилиндрических конструкций и методы оценки остаточных технологических напряжений / Д. А. Еловенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 48–58. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).48–58

For citation

Elovenko D.A. Tendentsii razvitiya tekhnologii formoobrazovaniya mnogoslnoinykh tsilindricheskikh konstruktssii i metody otsenki ostatochnykh tekhnologicheskikh napryazhenii [Tendencies of development of formation technology of multilayer cylindrical structures and residual technological stress evaluation methods]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 48–58. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).48–58