

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ
НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

Сыровой Геннадий Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ПРОИЗВОДСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.02.08- Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Луганск-2017

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» Министерства образования и науки Луганской Народной Республики, г. Луганск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витренко Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "**Донбасский государственный технический университет**"

Защита состоится «__» _____ 2017 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» по адресу: ауд. 6.202 а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +380 62 3050104,

Е-mail: tm@fimm.donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001 <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.014.02
кандидат технических наук, доцент

Р.М. Грубка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в технологии изготовления армирующих полимерных волокон и дальнейшее улучшение их прочностных характеристик дают новые возможности для повышения качества производства изделий из композиционных материалов. Такими изделиями являются малогабаритные корпуса: металлопластиковые баллоны давления, для дыхательной аппаратуры и средств медицинской техники, маршевые двигатели летательных аппаратов, транспортно-пусковые контейнеры, порошковые ствольные огнетушители и др., работающие в сложных условиях эксплуатации, и к которым предъявляются высокие требования.

Несовершенство технологического оборудования, используемого для изготовления изделий из композиционного материала, низкий уровень автоматизации этого оборудования, разброс параметров технологического процесса формирования поверхностного слоя из композиционного материала, термообработка, механическая обработка, приводят к возникновению различного рода производственным дефектам, снижающих несущую способность и работоспособность изготавливаемых малогабаритных корпусов.

Многообразию полимерных волокон и матричных материалов, различных схем армирования, позволяют направленно регулировать прочностные, жесткостные, теплопроводные и другие свойства малогабаритных корпусов путем подбора структуры, соотношения компонентов и разработки технологической оснастки для намотки малогабаритных корпусов.

Дальнейшее развитие технологического процесса повышения качества производства малогабаритных корпусов невозможно без применения современных расчётных компьютерных систем, которые, на начальном этапе изготовления позволяют смоделировать и выбрать определенную технологическую схему структуры армирования при намотке.

На основании выше изложенного, можно утверждать, что разработка технологического обеспечения качества производства малогабаритных корпусов из композиционных материалов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Вопросам технологического обеспечения производства изделий из композиционных материалов посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов из которых, можно выделить публикации И.Ф. Образцова, В.В. Васильева, В.А. Бунакова, В.И. Бутенко, Г.А. Молодцова, И.М. Буланова, В.Д. Протасова, А.Б. Миткевича, Е.Ф. Харченко, В.И. Маринина, Ю.И. Битюкова, В.А. Калинина, Ю.И. Денискина, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпова, В.А. Рач, В.А. Цопы, И.В. Малкова, В.С. Ивановского и других известных учёных.

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, отсутствуют рекомендации и технические решения по повышению массового совершенства и

общего ресурса малогабаритных корпусов. Причина заключается в недостаточном исследовании технологических режимов, оборудования и оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке.

Выполненные в данной работе исследования направлены на разработку технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования.

Цель и задачи исследования. Целью данной диссертационной работы является разработка технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующего технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных композитных корпусов.

2. Разработать технологическое оборудование, способ и управляющую программу автоматизированной намотки, повышающих качество производства малогабаритных корпусов из полимерных композитных материалов с использованием расчетных компьютерных систем.

3. Экспериментально определить влияние основных структурно-технологических параметров процесса намотки малогабаритных композитных корпусов на массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

4. Разработать технологический процесс намотки на основе наномодификации полимерной матрицы для повышения качества производства малогабаритных корпусов.

5. Внедрить результаты работы: разработанный технологический процесс, технологическое оборудование и программное обеспечение для намотки малогабаритных корпусов из полимерного материала на производственных предприятиях и в учебном процессе.

Объект исследования. Технологический процесс намотки малогабаритных корпусов из композиционных материалов.

Предмет исследования. Технологические методы и модели повышения функциональных характеристик малогабаритных корпусов и эффективности композиционного материала.

Научная новизна исследования. В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных корпусов из композиционных материалов, повышающего их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс. Наиболее существенными элементами научной новизны являются следующие результаты:

1. Впервые установлено, что варьирование структурных схем и направления укладки армирующего материала на поверхность оправки малогабаритных корпусов уменьшают напряженное состояние, позволяют расширить диапазон изготавливаемых изделий и повысить производительность на 15-20 %.

2. Экспериментально определены рациональные структурно-технологические параметры намотки малогабаритных корпусов из полимерного композитного материала с различными физико-механическими свойствами, позволившими повысить их массовое совершенство.

3. Впервые установлено, что включение наномодификаторов в полимерную матрицу повышает конструкционную прочность на 10-15% и эксплуатационный ресурс намотанных малогабаритных корпусов в 1,5-1,8 раза.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработаны схемы укладки армирующего материала на поверхность малогабаритной оправки сложной формы, включающую в себя алгоритм движения рабочих органов намоточного станка при переходе от одного витка к другому, и общая методика расчета управляющей программы намотки, позволивших повысить производительность намотки.

2. Разработана модель композитного материала для расчета структуры намотки малогабаритных корпусов.

3. Определены рациональные структурно-технологические параметры намотки малогабаритных корпусов, обеспечивающие повышение долговечности, за счет увеличения прочности и жесткости конструкции.

4. Установлен общий подход взаимодействия модификаторов различной природы с полимерной матрицей и алгоритм намотки малогабаритных корпусов на основе наномодификации матрицы полимерного материала.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные технологические режимы и технологическое оборудование процесса намотки повышают ресурс эксплуатации малогабаритных корпусов в два раза и снижают массу конструкции на 11-15% в зависимости от предъявляемых условий эксплуатации.

2. Разработанный способ укладки армирующего материала на поверхность оправки позволяет повысить качество технологического процесса намотки малогабаритных корпусов повышающего их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

3. Предложенные рекомендации по выбору наномодификаторов эпоксидной матрицы позволяют увеличить показатели прочности на 15%, герметичности и теплопроводности на 30% для различных вариантов технологических процессов и определять их рациональные структурные параметры.

4. Разработана конструкция формирующего и ленточно-пропиточного тракта, а также испытательного оборудования, защищенных авторскими свидетельствами позволяющих повысить эксплуатационные характеристики малогабаритных корпусов.

5. Результаты работы внедрены на ПАО «Луганский завод горноспасательного оборудования «Горизонт», Луганском МЧП «Донбасс-сервис» и в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего

профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля", общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 455000,00 рублей РФ.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: основные положения, принципы, методы и правила технологии машиностроения, основные положения, принципы и методы механики твердого деформируемого тела при анализе напряжённо-деформируемого состояния и методы оптимального проектирования. При разработке метода численного моделирования малогабаритных композитных корпусов на основе полимерного композита в компьютерных расчетных системах использован метод конечных элементов (МКЭ).

Компьютерное моделирование выполнено с использованием пакета программ конечно-элементного анализа LS-DYNA 971 и ANSYS. Экспериментальное исследование образцов полимерного композитного материала (ПКМ) и натуральных малогабаритных корпусов проводилось на специально разработанных установках для пневматических, гидравлических и циклических испытаний. Изучение структурных параметров наномодифицированного полимерного композитного материала выполнено методом рентгеноструктурного анализа. При этом рентгенограммы получены на дифрактометре ДРОН-И. Исследования базировались на методах планирования эксперимента, обработка результатов эксперимента и проверка адекватности математических моделей выполнялась согласно ГОСТ 8.207-76 с помощью стандартных пакетов прикладных программ Mathcad 15.0 и STATISTICA 6.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные научные разработки и положения:

- научное положение о том, что при укладке армирующего материала на поверхность оправки малогабаритных корпусов позволяет уменьшить значения деформационных напряжений в зонах перехода при намотке;
- научное положение о том, что формирование рациональных структурно-технологических параметров намотки имеет закономерный характер и влияет на технологический процесс намотки;
- научное положение о том, что наномодификаторы влияют на структурные параметры технологического процесса и приводят к изменению эксплуатационных показателей малогабаритных корпусов;
- научное положение о влиянии структуры укладки армирующего материала на массовое совершенство малогабаритных корпусов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность диссертационной работы обеспечена:

- использованием современных физико-технических методов для решения инженерных задач по определению характеристик малогабаритных корпусов;

- получением и обоснованием данных по результатам испытаний малогабаритных корпусов на натурном стенде с сертифицированными средствами измерений;

- согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований с точностью, необходимой для определения характеристик малогабаритных корпусов конкретной конструкции.

Основные научные положения и результаты исследований были доложены и обсуждены на: I и II Международной научно-практической конференции «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития» (2010-2011 г. г., Ялта, Украина), 7-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» (2015 г., Москва, Россия), научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (2008-2014, г. Луганск, Украина), 3-ей Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» (Тамбов, Россия, 2016 г.), VIII Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, Россия, 2016 г.);

В полном объёме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 122 наименования и приложения с методиками и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 116 рисунков и 26 таблиц. Общий объём работы - 208 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и новизна выбранной темы диссертации, сформирована цель и задачи работы, определен объект и предмет исследований, отмечена научная и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения диссертационной работы, сведения об апробации результатов работы, публикации и описана структура диссертации.

В первом разделе «Анализ существующего технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных композитных корпусов» выполнен аналитический обзор по теме исследования, представлен анализ существующих технологических режимов и материалов для изготовления малогабаритных корпусов.

Анализ включает три части. В первой части проанализированы технологические способы и параметры намотки композитных корпусов, рассмотрены основополагающие работы технологии производства композитной оболочки по традиционным схемам. Выделены параметры исследования

малогабаритных композитных корпусов и рассмотрены два типа этих корпусов: композитные и металлокомпозитные.

Во второй части проведен анализ используемого оборудования и приспособлений для намотки изделий из композитного материала.

В третьей части проведен анализ волокнистых наполнителей и связующего, используемого в технологическом процессе намотки, выделены требования к полимерным матрицам и проведена классификация наполнителей.

На основе анализа сделан вывод об актуальности проблемы, выделена схема решаемых задач совершенствования технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов (рис.1).



Рисунок 1. Схема решаемых задач повышения качества производства малогабаритных корпусов

На основании анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе «Разработка технологического оборудования, способа и управляющей программы намотки, повышающих качество производства малогабаритных корпусов» разработаны устройства технологического

оборудования: ленто-формирующий тракт пропитки и натяжения армирующего материала, удлинитель хода нитераскладчика и разработана управляющая программа намотки.

Для изготовления малогабаритных корпусов модернизирован токарный станок 16К20 со стойкой НЦ-31, внешний вид намоточного станка показан на рисунке 2, шпулярник с 64 одновременно сходящими нитями (рис.3), узел предварительного натяжения нити и жгута (рис.4).



Рисунок 2. Намоточный станок с пультом и шкафом управления



Рисунок 3. Шпулярник с 64 одновременно сходящими нитями



Рисунок 4. Узел предварительного натяжения нити



Рисунок 5. Пропиточно-формирующий тракт для нитей

А также разработано оригинальное оборудование, такое как пропиточно-формирующий тракт (рис.5) и удлинитель хода нитераскладчика защищенные авторскими свидетельствами.

Разработан способ укладки армирующего материала на поверхность оправки корпуса сложной формы (рис.6) и технологическая управляющая программа намотки малогабаритных корпусов.

Особенность формирования текстурного слоя с различным порядком симметрии, выражается в своеобразии получаемой слоистой структуры спирального слоя. При $K=1$ лента, завершив полный цикл обмотки оправки, возвращается в

точку своего первоначального схода. Для полной обмотки поверхности модели число циклов повторяется. При $K=2$ лента, завершив полный цикл, не вернется в исходную точку, и будет сдвинута по отношению к ней на 180° . В исходную точку она вернется, совершив два цикла обмотки, при этом порядок симметрии текстурного слоя показывает, сколько одновременно формируется винтовых текстурных поверхностей.

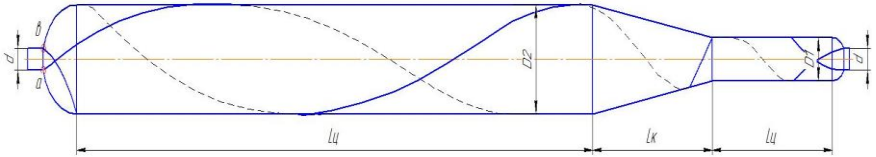


Рисунок 6. Траектория укладки ленты армирующего материала

Полный геометрический угол поворота объёмной модели (Φ_r) состоит из угла поворота при укладке по двум днищам (Φ_1 и Φ_2), и угла поворота при укладке по конической (Φ_k) и по цилиндрическим поверхностям ($\Phi_{ц1}$, $\Phi_{ц2}$).

$$\Phi_r = 2(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_k + \Phi_{ц1} + \Phi_{ц2}), \quad (1)$$

где 2-коэффициент, учитывающий угол поворота объёмной модели в обратном направлении.

Намоточный угол поворота объёмной модели (Φ_n) из условия равномерной укладки лент по всей поверхности будет:

$$\Phi_n = 360n \pm \frac{360^\circ}{k} \quad (2)$$

Погрешность угла поворота, определяемая как $\Delta\Phi = |\Phi_r - \Phi_n|$ распределяется равномерно по участкам объёмной модели. При этом выполняем условие

$$\Phi_n = \Phi_r \pm |\Delta\Phi| \quad (3)$$

Если погрешность $|\Delta\Phi|$ представляет величину, измеряемую десятками градусов, то необходимо изменить геометрические размеры объёмной модели и снова просчитать Φ_r , последовательно приближаясь к значению Φ_n .

При укладке нити по цилиндрической части объёмная модель повернется на угол, определяемый по формуле:

$$\Phi_{ц} = \frac{360^\circ l_{ц} t g \varphi}{\pi D}, \quad (4)$$

где $l_{ц}$ -длина цилиндрической части; D -диаметр цилиндра.

Угол обхвата конусной части объёмной модели определяется по формуле:

$$\psi_k = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{\text{sinarctg}\left(\frac{d_{i+1} - d_i}{2h_i}\right)} \quad (5)$$

где φ_1, φ_2 -входной угол армирования, выходной угол армирования; d, D - диаметры оснований усеченного конуса; h - высота усеченного конуса.

Рассчитанные величины по формулам, приведенным выше, служат для разработки алгоритма движения нитераскладчика намоточного станка (НС) при переходе от одного витка к другому и реализованы в виде управляющей программы перехода, которая состоит из двух программ: управляющей программы входа в виток и управляющей программы выхода из витка.

Для расчета однослойного элемента из однонаправленного КМ необходимо знать физико-механические свойства матрицы и волокна и их объемное содержание в КМ. Если анизотропное тело обладает симметрией упругих свойств, то уравнения обобщенного закона Гука для него упрощаются, так как некоторые из коэффициентов оказываются равными нулю, а между другими коэффициентами появляются линейные зависимости.

Для однонаправленного композита, в зависимости от направления волокон, упругие константы рассчитываются по определенному закону. Условно принимаем направление вдоль волокон за 1, а поперек – 2.

Для расчета элементов с прямолинейной структурой волокна (пластины, продольный слой трубчатого элемента), возможно использование декартовой системы координат (СК). В свою очередь при расчете элементов, имеющих вдоль волокон цилиндрическую или дугообразную форму (кольцевой слой трубчатого элемента), необходимо использование цилиндрической СК. Для расчета сферы либо сферической части элемента (дно малогабаритного корпуса) используется сферическая СК (рис. 7).

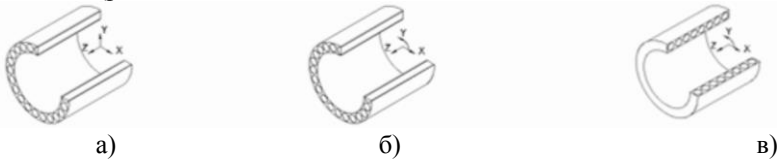


Рисунок 7. Система координат и направление укладки материала в слоях: продольный слой в декартовой СК (а), продольный (б) и кольцевой (в) слои в цилиндрической СК.

Модуль сдвига во всех плоскостях, кроме плоскости со свойствами изотропной модели материала, берется как среднее значение между модулем сдвига рассчитанным исходя из равенства сдвиговых деформаций и модулем сдвига, рассчитанным исходя из равенства касательных напряжений по формуле:

$$G_{12} = \frac{G_{12}^D + G_{12}^H}{2}, \quad (6)$$

где G_{12}^D – модуль сдвига равенства сдвиговых деформаций;
 G_{12}^H – модуль сдвига равенства касательных напряжений;

$$G_{12}^D = G_B \cdot \Theta + G_M \cdot (1 - \Theta), \quad (7)$$

$$G_{12}^H = \frac{G_B \cdot G_M}{G_M \cdot \Theta + G_B \cdot (1 - \Theta)}, \quad (8)$$

где G_B – модуль сдвига волокна; G_M – модуль сдвига матрицы

Модули сдвига волокна и матрицы в свою очередь рассчитываются по формулам:

$$G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}, \quad (9)$$

$$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}. \quad (10)$$

Таким образом, зная модули упругости и коэффициенты Пуассона волокна и матрицы, а также объемное содержание волокна в КМ, можно рассчитать упругие константы слоёв малогабаритного корпуса.

При нагружении трансверсально изотропного тела, в зависимости от направления нагружения по отношению к оси симметрии, коэффициент Пуассона может принимать три различных значения. Осью симметрии в данном случае является ось Z , а плоскостью со свойствами изотропной модели материала - плоскость XY . На рисунках 8 и 9 изображены деформации при нагружении.

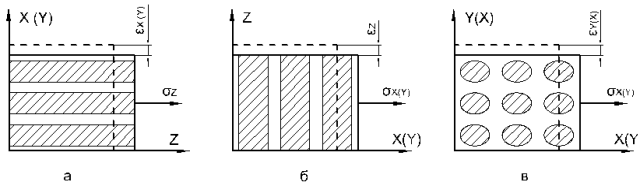


Рисунок 8. Деформации слоя при нормальных напряжениях:
а - поперечная деформация при продольном нагружении; б - продольная деформация при поперечном нагружении; в - поперечная деформация при поперечном нагружении.

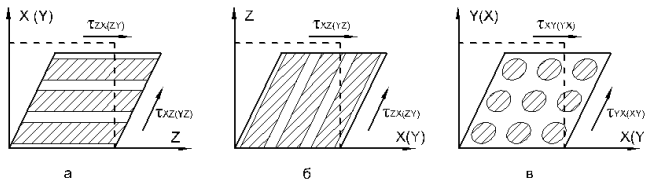


Рисунок 9. Деформации слоя при касательных напряжениях:
а, б - сдвиговая деформация в плоскости параллельной оси симметрии;
в - сдвиговая деформация в плоскости со свойствами изотропной модели материала.

В ранее приведенных расчётных формулах для определения коэффициента Пуассона и соответственно модуля сдвига в поперечном направлении при поперечном нагружении (в плоскости XY) не используют. В связи с этим условно принимаем коэффициент Пуассона в плоскости XY равным "0". Модуль сдвига G_{xy} в данном случае находится по формуле (6).

Для проверки правильности подхода при выборе методики расчета был рассчитан корпус, условно армированный слоем $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ относительно оси Z и

проведен теоретически расчет деформации корпуса, нагруженного внутренним давлением.

После проектировочных расчётов выполнялся поверочный расчёт напряжений для выбранных фактических толщин намотанного слоя КМ. При изготовлении изделий из КМ, изначально известны упругие константы матрицы и волокна, а также их объемное содержание в КМ. Для расчета КМ в расчетных системах, необходимо перейти от упругих констант элементов композита к константам композита.

Проведя вычисления, были получены данные и составлена таблица 1 упругих констант, задаваемых в расчетных системах, для продольного и кольцевого слоя. Тестовый расчёт проведен на малогабаритном корпусе типа «баллон». После нагружения корпуса внутренним давлением $P = 10$ МПа наглядно видна работа слоев и лайнера. Максимальные напряжения возникают в лайнере в районе перехода его цилиндрической части в сферическую и составляют 270 МПа. Напряжения в слоях $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ составляют 23 МПа и 57 МПа соответственно.

Таблица 1. Упругие константы продольного и кольцевого слоя

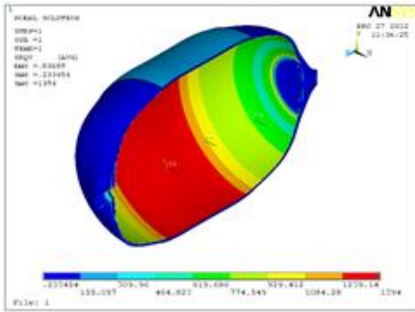
Физическая величина	Обозначение	Продольный слой		Кольцевой слой	
		Расчетная величина	Значение	Расчетная величина	Значение
Модуль упругости, МПа	E_x	E_2	9375	E_2	9375
	E_y		9375	E_1	55600
	E_z	E_1	55600	E_2	9375
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	–	0	μ_{21}	0,049
	μ_{yz}	μ_{21}	0,049	μ_{12}	0,288
	μ_{xz}		0,049	–	0
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	–	4688	G_{12}	3609
	G_{yz}	G_{12}	3609		3609
	G_{xz}			3609	–

Проведенный расчет допускаемых напряжений слоев КМ и лайнера методом конечных элементов (МКЭ) и полученные при расчете константы были использованы для разработки управляющей программы намотки.

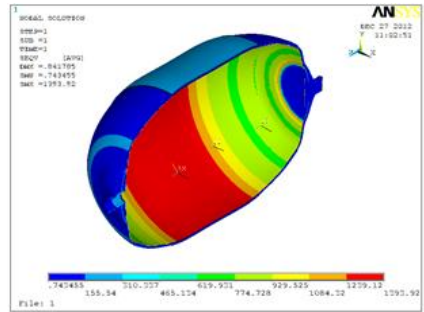
Для уменьшения максимальных напряжений, возникающих в лайнере в районе перехода цилиндрической части в сферическую предложено моделирование двузонной намотки. При этом получено распределение эквивалентных напряжений для однозонной и двузонной намотки корпуса в переходной части днища и цилиндра (рис. 10). При намотке днища двумя зонами напряжения уменьшаются, что связано с равномерной намоткой днища.

По полученным углам поворота Фдн, Фк, Фц наносим геодезическую кривую на поверхность объёмной модели малогабаритного корпуса и рассчитываем управляющую программу.

Проектирование управляющей программы заключается в определении параметров намотки: числа лент спирального слоя, количества слоев спирального слоя, шага намотки кольцевого слоя, количества слоёв кольцевого слоя.



а)



б)

Рисунок 10. Характер распределения эквивалентных напряжений для корпуса с однозонной (а) и двухзонной (б) намоткой днаща.

Число лент спирального слоя определяется по соотношению:

$$k_{л} = \frac{h_c \pi \gamma D \cos \varphi \cdot 10^5}{\gamma \cdot k_{нс}}, \quad (11)$$

где h_c -толщина АМ в спиральном слое, найденная из условия прочности и долговечности конструкции, см; φ -угол армирования спирального слоя, град; T -линейная плотность одной нити (жгута), текс; γ -массовая плотность АМ, г/см³; $k_{нс}$ -количество нитей (жгутов) в ленте спирального слоя; D -максимальный диаметр изделия, см.

Шаг укладки АМ в кольцевом слое определяем по соотношению:

$$C = \frac{T \cdot k_{нк} \cdot 10^{-5}}{h_k \cdot \gamma}, \quad (12)$$

где $k_{нк}$ -количество нитей (жгутов) в ленте кольцевого слоя; h_k -толщина АМ кольцевого слоя, полученная из условия прочности и долговечности конструкции, см.

Разработанная управляющая программа для намотки малогабаритных корпусов, учитывает основные структурно-технологические параметры: ширину ленты, угол укладки, толщину слоя, шаг укладки армирующего материала.

В третьем разделе «Влияние основных структурно-технологических параметров на массовое совершенство малогабаритных корпусов» проведены исследования и экспериментально подтверждены выбранные структурно-технологические параметры намотки на массовое совершенствование и деформационные свойства малогабаритных корпусов.

Окружная деформативность проверялась на конструкции малогабаритного корпуса и экспериментально была подтверждена его работоспособность при импульсном нагружении.

Моделирование проведено методом конечных элементов. Начальными данными для моделирования являются: геометрия конструкции металлокомпозитной цилиндрической оболочки, представленной в виде совокупности конечно-элементных сеток; модели материалов; условия нагружения конструкции и критерии разрушения для применяемых материалов.

Для лейнера металлокомпозитного корпуса принята упругопластическая билинейная модель деформирования, модуль упругости материала лейнера $E=2.1 \cdot 10^6$ МПа, напряжение текучести $\sigma_T=860 \cdot 10^6$ Па, тангенциальный модуль $E_T=100 \cdot 10^6$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$, плотность $\rho=7.85 \cdot 10^3$ кг/м³, минимальная толщина обечайки $h=0,003$ м.

Для подтверждения расчетной модели были проведены тестовые расчеты в линейной постановке на основании формул и расчетов с применением конечно-элементной модели для упругого материала.

На рис.11 показаны осевые напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) для стали, нити и связующего в направлении оси X. При импульсном внутреннем давлении 70 МПа напряжения в лейнере и композите уменьшаются на 35-30 МПа.

На рис.12 показана эффективная деформация в центральном сечении (в выбранных элементах) для стали (1), нити (2) и связующего (3). Напряжение в лейнере составляет порядка 1100 МПа, а в композите 600 МПа при внутреннем давлении 70 МПа.

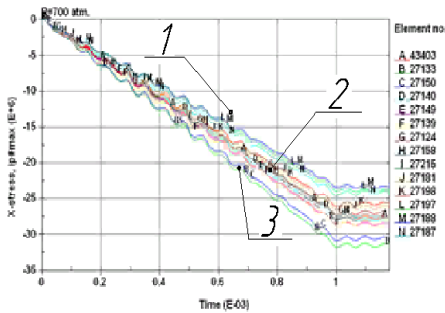


Рисунок 11. Осевые напряжения в центральном сечении для стали (1), нити (2) и связующего (3)

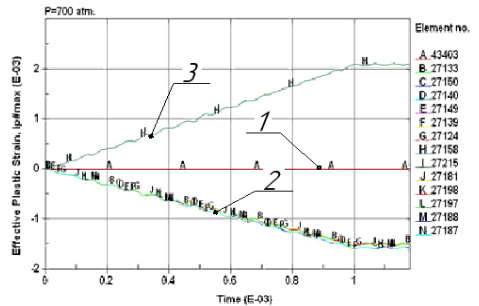


Рисунок 12. Эффективная деформация в центральном сечении для стали (1), нити (2) и связующего (3)

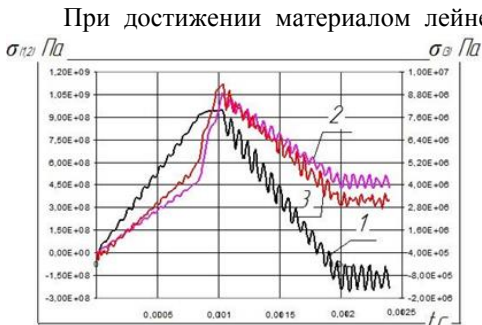


Рисунок 13. Радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении лейнера металлокомпозитного корпуса

При достижении материалом лейнера предела текучести отмечается резкое увеличение прогибов оболочки, а после снятия нагрузки появляются остаточные деформации, максимальные величины которых лежат в пределах 0,22 мм для внешней поверхности (кривая 1) и 0,25 мм для внутренней (кривая 2). На рис. 13 приведены радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении лейнера металлокомпозитного корпуса (кривая 1), волокна (кривая 2) и связующего (кривая 3).

В результате расчета такой трехслойной оболочки получены результаты, аналогичные результатам для однослойной анизотропной оболочки эквивалентной толщины.

Проведены экспериментальные исследования малогабаритных корпусов для оценки влияния многозонности намотки, текстурности АМ и гибридизации на их массовое совершенство и деформационные свойства в окружном направлении.

При изменении намотки с одной зоны по традиционной схеме на три зоны намотки для диаметра корпуса 101 мм масса уменьшилась на 6%, а для диаметра корпуса 135 мм масса уменьшилась на 11%.

В зависимости от текстурной формы АМ и температурно-силового режима обработки параметры качества изменялись в пределах: совершенство по массе увеличилось от 4 до 12%, окружные относительные деформации уменьшились от 3 до 14%, а осевые деформации – от 7 до 17%.

Анализ зависимостей по структуре намотки (рис.14) показал, что конструкционная прочность АМ в кольцевом слое зависит от соотношения толщин угле- и стеклонитей. Минимального значения прочность достигает при содержании стеклонитей равном 40%.

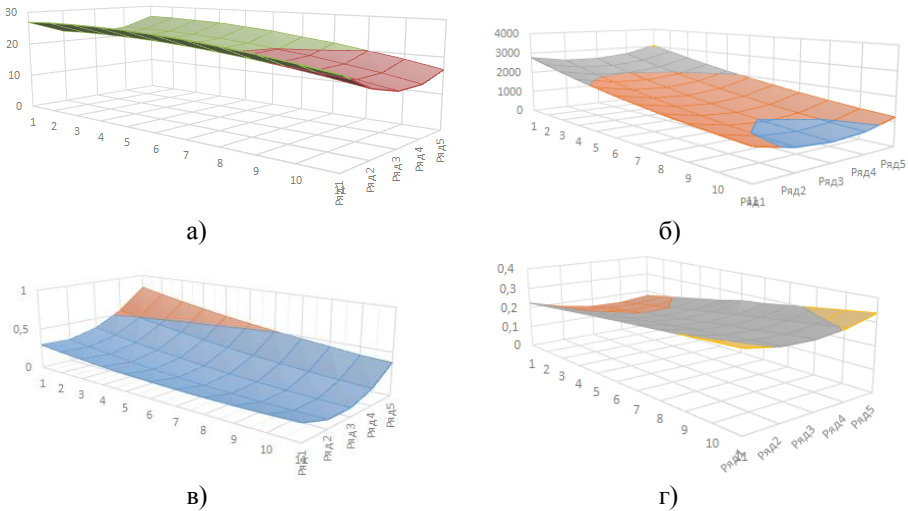


Рисунок 14. Зависимости совершенства по массе цилиндрической части корпусов $W_{\text{бал}}$ (а), средних напряжений в армирующем материале кольцевого слоя в момент разрушения корпусов σ_k (б), окружной относительной деформации $\varepsilon_{\text{ок}}^{\text{раб}}$ (в) и осевой относительной деформации $\varepsilon_{\text{ос}}^{\text{раб}}$ (г) при рабочем давлении в корпусе от структурных параметров намотки.

Конструкционная прочность АМ в спиральном слое (при коэффициенте технологического отклонения $K > 0,8$ - разрушаются спиральные слои) остается практически одинаковой при фиксированных значениях коэффициента гибридизации m , но зависит от этого параметра.

Массовое совершенство малогабаритных корпусов максимально при 100% содержании угленитей в кольцевом слое ($m=0$).

Увеличение толщины АМ кольцевого слоя (стеклонитей) приводит к увеличению осевой деформации. Окружная деформация с увеличением АМ в кольцевом слое соответственно уменьшается. Минимального значения окружная деформация достигает при $m=0,25$ (когда стеклянный слой составляет 25% от толщины пакета).

Эквивалентная относительная деформация, влияющая на усталостную долговечность баллона (из-за усталости металла лейнера), зависит от параметров K и m . Параметр $\epsilon_{\text{эkv}}$ достигает минимального значения при $K=1,1$ и $m=0,25$.

Полученные экспериментальные результаты позволили определить влияние структурно-технологических параметров на массовое совершенство малогабаритных корпусов из ПКМ.

В четвертом разделе «Разработка технологического процесса намотки малогабаритных корпусов на основе наномодификации матрицы» проведены экспериментальные исследования физико-механических и эксплуатационных свойств наномодифицированного полимерного композита и разработан технологический процесс намотки конструктивных элементов на его основе.

Проведено исследование наномодификаторов эпоксидной матрицы, идентифицирована их структура и дисперсность и составлен классификатор. Изучение дифрактограмм серии образцов модифицированных шунгитом, ультрадисперсным алмазографитом (УДАГ), терморасширенным графитом и аэросилом показало интенсивные изменения в структуре полимерного композитного материала.

Установлено, что изменение интенсивности максимумов структурируемых блоков и расстояния между ними в композите зависит от количества вводимого модификатора.

Разработан механизм взаимодействия углеродного наномодификатора с эпоксидной полимерной матрицей на молекулярном уровне. Показано, что в процессе полимеризации берут участие π -электроны как компоненты матрицы, так и модификатора.

На основе механизма взаимодействия наномодификатора с эпоксидной полимерной матрицей на молекулярном уровне разработан технологический процесс намотки малогабаритных корпусов с использованием наномодифицированной матрицы (рис. 15).

Полученные образцы из полимерных композиционных материалов с измененной структурой армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке были исследованы на адгезионную, конструкционную прочность и герметичность.

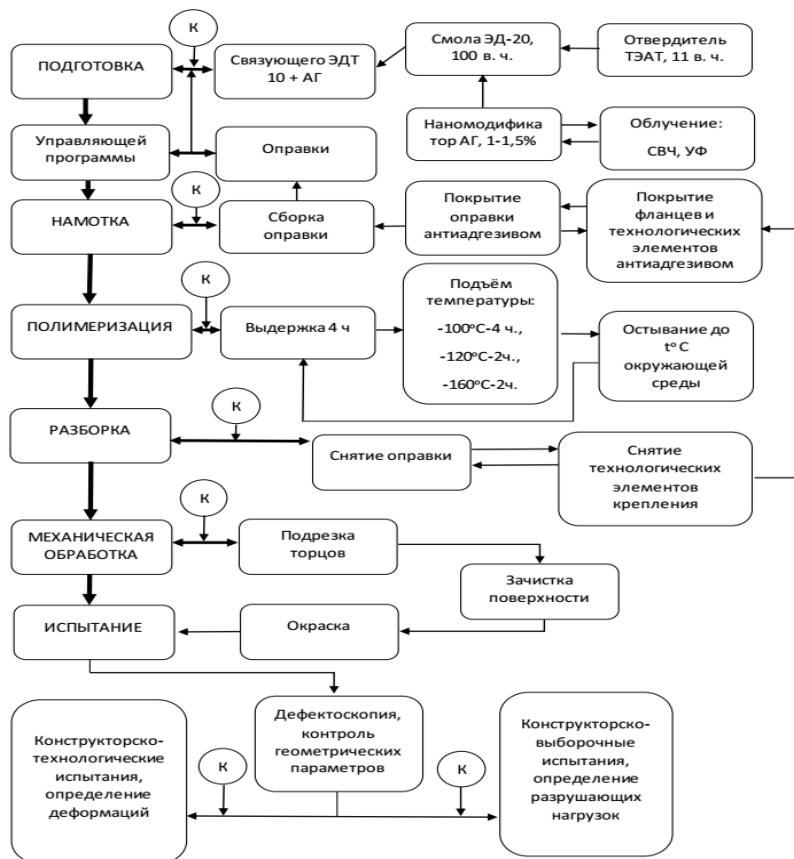


Рисунок 15. Схема технологического процесса намотки малогабаритного корпуса на основе наномодификатора

Экспериментально исследовано влияние наномодификации полимерного композита на прочностные свойства конструктивных элементов на их основе. Прочность на растяжение однониточного микропластика (МП) на основе стеклонити при 1-2% наномодифицировании аэросилом увеличилась на 15%

Введение наномодификатора любого типа до 2% приводит к понижению водопоглощения на 30 % и повышению герметичности.

Экспериментальные исследования позволили разработать технологический процесс намотки конструктивных элементов на основе наномодифицированного полимерного композита.

В пятом разделе «Внедрение результатов исследования. Технологический процесс намотки реальных малогабаритных корпусов» приведены результаты внедрения технологического процесса, разработанной оснастки, оборудования,

управляющих программ намотки и приведены примеры технологии изготовления намоткой малогабаритных композитных корпусов.

Примеры реализации разработанной технологии намотки металлокомпозитного корпуса двигателя РДТТ на основе органопластика (рис. 16а), транспортно-пускового контейнера из стеклопластика на основе наномодифицированной полимерной матрицы (рис. 16б), корпуса двигателя РДТТ из органопластика с металлическим фланцем (рис. 16в), корпуса головного обтекателя из стеклопластика (рис. 16г), баллонов давления (рис. 16д).



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 16. Внешний вид металлокомпозитного корпуса (а), корпуса ТПК из стеклопластика (б), корпуса двигателя РДТТ (в), корпуса головного обтекателя (г) и баллон давления (д).

Разработанные в диссертации технологический процесс повышения качества производства малогабаритных корпусов, оснастка, оборудование и управляющие программы намотки композитных корпусов внедрены на производственных предприятиях Луганской Народной Республике: заводе ОАО «Горизонт» и МЧП «Донбасс-сервис», а также в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки технологического обеспечения повышения качества намотки малогабаритных композитных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и

наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

1. Анализ существующего уровня технологий и материалов процесса намотки малогабаритных корпусов из полимерных композитов позволил сформулировать требования к технологическому режиму, оборудованию и оснастке, а также полимерным композитным материалам и наметить пути повышения массового совершенства, деформационных свойств и общего ресурса.

2. Разработанное технологическое оснащение и технология формообразования намоткой малогабаритных корпусов сложной формы из полимерных композитов с использованием расчетных компьютерных систем, позволило: повысить их прочностные и жесткостные свойства, расширить номенклатуру изготавливаемых изделий и повысить производительность на 15-20 %.

3. Экспериментально определенные рациональные структурно-технологические параметры процесса намотки малогабаритных композитных корпусов позволили разработать управляющую программу автоматизированной намотки малогабаритных корпусов и повысить их массовое совершенство на 25%.

4. Разработанный технологический процесс намотки малогабаритных корпусов на основе наномодифицированной полимерной матрицы, позволил увеличить ресурс эксплуатации в два раза, а экспериментальные исследования подтвердили, что:

- адгезионная прочность полимерного композита при введении в него 1-2% наномодифицированного материала возросла в 1,5 раза;

- введение наномодификатора любого типа до 2% приводит к повышению показателя герметичности на 30%;

- прочность на растяжение однострунчатого микропластика на основе стекловолкна при 1-2% наномодификации аэросилом увеличилась на 15%, причем структурный параметр оказывает более существенное влияние (прочность МП снижается в 2 раза с увеличением числа нитей);

- прочность на сжатие трубчатого элемента увеличилась на 41% при введении 1% наномодификатора аэросил.

5. Анализ технико-экономической эффективности результатов внедрения технологического процесса повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе наномодифицированного композитного материала, показал перспективность развития, возможность получения, ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов работы на 455 000 рублей РФ.

6. Разработанные в диссертации технологический процесс, методы проектирования, оснастка, оборудование и управляющие программы намотки малогабаритных композитных корпусов внедрены на производственных предприятиях ЛНР: заводе ОАО «Горизонт» и МЧП «Донбасс-сервис», а также в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Дала".

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***Научные работы, опубликованные в рецензируемых журналах и изданиях***

1. Малков, И.В. Физико-химические основы наномодификации полимеров /И.В. Малков, Л.П. Бондарь, **Г.В. Сыровой** //Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КДПУ, 2008. - Вип. 5/ 2008 (52) частини 1. – С. 70-71. (*Постановка цели и задач исследования, обоснование общей методики теоретических исследований*).

2. Малков И.В. Влияние контактного давления на прочность клевого соединения полимерных композитных материалов /И.В. Малков, **Г.В. Сыровой** //Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - Луганськ: СНУ, 2011. - Вип. 14/2011 (168) частини 1. – С.115-118. (*Разработка методики испытаний клевого соединения композитных материалов с добавлением в матрицу наномодификаторов*).

3. **Сыровой, Г.В.** Моделирование намотки сложнопрофильных малогабаритных корпусов летательных аппаратов из полимерных композитных материалов //Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (73). – Х., 2013. – С. 33 – 39.

4. **Сыровой, Г.В.** Разработка и внедрение баллонов высокого давления из композитных материалов для различных отраслей промышленности /Г.В. Сыровой, Е.И. Гончарова //Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля - Луганськ: СНУ, 2014. - Вип. 4/ 2014 (211) частини 2. – С.73-77. (*Анализ технологического процесса намотки малогабаритных корпусов и внедрение разработанной технологии в производство*).

5. Малков, И.В. Модификация полимерных композиционных материалов наночастицами / И.В. Малков, **Г.В. Сыровой**, Е.И. Гончарова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля - Луганськ: СНУ, 2014 - №4 (211) - Ч.1-2014, с.216-222. (*Получение оптимальных режимов модификации полимерных композитов*).

6. **Сыровой, Г.В.** Определение несущей способности металлического лейнера композитного баллона /Г.В. Сыровой, Н.В. Ивин, Е.П. Синдеева //Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр.- Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016, с.80-87. (*Разработана методика испытаний на усталость металлического лейнера композитного баллона*).

7. Витренко, В.А. Повышение ресурса малогабаритных корпусов на основе оптимизации структурных параметров намотки /В.А. Витренко, **Г.В. Сыровой** //Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. - Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. №2(17) - С. 82-90. (*Разработка технологических параметров оптимизации малогабаритных корпусов по структуре намотки*).

Научные работы с иностранными индексами цитирования

8. The calculation method of small-sized composite enclosures in CAD/CAE systems (Методика расчета малогабаритных корпусов из композиционных

материалов в CAD/CAE системах /Igor Malkov, **Gennadiy Sirovoy**, Sergey Kashkarov, Igor Nepran //TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2012. Vol. 12 N. 3. -P. 100-104. (*Возможность расчета элементов конструкции из композитных материалов в CAD/CAE системах на основе упругих констант волокна и матрицы*).

9. The analysis of adhesion effect on properties of the modified polymeric nano composites (Анализ влияния адгезии на свойства полимерных наномодифицированных композитов) /Igor Malkov, **Gennadiy Sirovoy**, Sergii Kashkarov, Igor Nepran //TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2012. Vol. 12 N. 4. -P. 131-134. (*Анализ влияния адгезии на структуру и свойства полимерных наномодифицированных композитов*).

10. CAD/CAE simulation of mechanical properties of tubular elements made from composite structures (Моделирование механических свойств трубчатых элементов конструкций из композиционных материалов в CAD/CAE системах) /Igor Malkov, **Gennadiy Sirovoy**, Sergey Kashkarov, Igor Nepran //TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2013. Vol. 13 N. 3. -P. 133-138. (*Сравнительный анализ результатов моделирования с натурными испытаниями*).

11. Stress-strain analysis of metal butt connection with composite propeller blade (Анализ характеристик локального напряженно-деформированного состояния соединения металлического комля с композитной лопастью воздушного винта) /Igor Malkov, **Gennadiy Sirovoy**, Igor Nepran //TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2013. Vol. 13 N. 4. -P. 143-148. (Моделирование напряженно деформированного состояния соединения металлического комля с композитной цилиндрической частью в модуле Composite PrepPost приложения ANSYS).

Научные работы в материалах конференций

12. Малков, И.В. Сравнительный анализ моделирования и расчета механических свойств изделий из композиционных материалов в среде SOLIDWORKS /И.В. Малков, **Г.В. Сыровой**, С.А. Кашкаров, И.Л. Непран //Труды VI Международной науково-практичної конференції «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД», Краснодар. 2013. с. 245-248 (*Разработка модели расчета механических свойств в расчетных системах*).

13. Малков, И.В. Технология формообразования элементов конструкции ветровых преобразователей энергии на основе наномодифицированных полимерных композиционных материалов /И.В. Малков, А.Г. Макухин, В.Д. Перевознюк, **Г.В. Сыровой** //Тезисы докладов 3-ей Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» Тамбов, 25-27 апреля 2016 года, с.247. (*Разработка технологического процесса изготовления элементов конструкции ветровых преобразователей энергии*).

14. Малков, И.В. Исследование влияния технологических схем термообработки трубчатых элементов из углепластика на их геометрические и механические характеристики /И.В. Малков, О.С. Дмитриев, **Г.В. Сыровой** //VIII Международная

научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», Тамбов, ТГТУ, 2016 с.285-288. *(Разработка влияния технологических схем термообработки трубчатых элементов из углепластика на их геометрические и механические характеристики).*

Другие научные работы

15. А.с. №1756255, 1992, В 65 Н54/28 Устройство для раскладки нитей /В.С. Ивановский, И.И. Яблонский, **Г.В. Сыровой** // *(Предложено использовать в технологическом процессе намотки для крупногабаритных изделий удлинитель хода на цепной передаче).*

16. Патент на корисну модель №66106 (Патент на полезную модель) В29В 15/00. Пристрій для просочення довгомірного волоконного матеріалу (Приспособление для пропитки длинномерного волокнистого материала)/ І.В. Малков, **Г.В. Сировой**, В.І. Малков, Д.Г. Сировой // Дата подання заявки 23.05.2011.БИ №24 від 26.12.2011. – 4 с. *(Предложено использовать для пропитки нитей ролики с проточкой для отжима излишков связующего).*