

АЛЕКСАНДРОВ ИСЛАМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
ПРОИЗВОДСТВА РЕАКТОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗИ
СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Брянск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном учреждении науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКТИ РАН).

Научный руководитель: **Шептунов Сергей Александрович**,
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Вермель Владимир Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор МФТИ,
начальник Научно-технического центра научно-производственного комплекса федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Холопов Владимир Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий
Кафедры промышленной информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Защита состоится «01» декабря 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 999.112.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/aleksandrov-islam-aleksandrovich>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.112.02
кандидат технических наук, доцент

В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание новых материалов для задач машиностроения, на сегодняшний день, неразрывно связано с композиционными материалами, которые получили применение в широком спектре отраслей народного хозяйства. Это обусловлено сочетанием в них требуемого комплекса целевых свойств, умеренной стоимостью и технологичностью. Под целевыми свойствами, в данном случае, понимаются конструкционные требования, заложенные на этапе проектирования, определяемые условиями эксплуатации конечного изделия. К ним также можно отнести высокую удельную прочность, работоспособность в большом интервале температур, и т.д. Целевые свойства композитной конструкции в общем случае достигаются корректным выбором исходных компонентов и рациональной технологией ее производства при обеспечении необходимой экономической эффективности технологических процессов изготовления. Для реактопластичных полимерных композиционных материалов (РПКМ) традиционными являются задачи обеспечения прочности и устойчивости их к внешним воздействиям, в условиях переменных температур. В последнее время практика эксплуатации изделий из РПКМ выдвигает на первый план задачу обеспечения их размерной стабильности. Под размеростабильностью понимается способность материала сохранять свои размеры и форму при воздействии переменных силовых и тепловых нагрузок.

Анализ подходов и путей позволил выявить ряд проблем, связанных с неоднозначностью существующих методов автоматизации технологической подготовки и непосредственно производства изделий, изготавливаемых из модифицированных РПКМ с высокой размерной стабильностью. Неоднозначность методов обусловлена прежде всего со сложностью, а чаще и невозможностью, построения необходимых для автоматизации универсальных формализованных моделей определения (идентификации) взаимосвязи целевых свойств изделий из РПКМ и технологических параметров их обеспечивающих (режимов изготовления). Неопределенность этих режимов, вызванная отмеченными сложностями формализации, затрудняет процесс автоматизации подготовки производства, а поиск путей решения этой задачи на иных принципах формализации переводит ее в разряд актуальных.

Из всей предметной области автоматизации технологических процессов с использованием человеко-машинных систем выделим:

Объект исследования – автоматизированный процесс обеспечения требуемых характеристик изделий на этапе подготовки их производства;

Предмет исследования – взаимосвязь свойств изделия из РПКМ с технологическими параметрами его изготовления.

Цель работы – обеспечение требуемых целевых свойств изделий из РПКМ в условиях неопределенной взаимосвязи целевых свойств с технологическими параметрами изготовления изделий на основе интеллектуальных моделей.

Задачи исследования. Достижение поставленной цели связано с решением задач:

1) Анализ путей автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых характеристик изделий из РПКМ;

2) Обоснование основных целевых характеристик изделий из РПКМ и выявления сущности и характера взаимосвязи между свойствами этих материалов и технологическими режимами их изготовления;

3) Анализ моделей теплопереноса в связующем РПКМ с различным содержанием углеродных наноразмерных модификаторов для расчетного определения теплопроводности, как основной меры размерной стабильности изделий;

4) Разработка и обоснование модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;

5) Формирование базы данных результатов экспериментальных исследований теплофизических характеристик образцов РПКМ, модифицированных углеродными наноразмерными структурами при различных вариациях технологических режимов их изготовления;

6) Разработка архитектуры и принципов построения нейросетевых моделей идентификации теплофизических характеристик РПКМ и технологических параметров переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами;

7) Оценка адекватности решений, полученных на основе предложенных нейросетевых моделей, путем сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы включает:

1) Раскрытие и объяснение сущности проявления взаимосвязи между целевыми характеристиками изделий из РПКМ и режимами их изготовления, обеспечивающими эти характеристики;

2) Формирование структуры и описание модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;

3) Нейросетевые модели, раскрывающие взаимообусловленную связь целевых свойств изделий из РПКМ и технологических режимов их изготовления;

4) Метод автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ в условиях неопределенности режимов их изготовления на основе интеллектуальных моделей принятия технологических решений.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа и ее научная новизна соответствуют паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение), а именно: пункт 3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения АСУТП и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства

(АСТПП) и т. д.», пункт 6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления», пункт 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)».

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в расширении представлений о возможности применения нейросетевых моделей для автоматизации этапа технологической подготовки производства композитных конструкций в условиях неопределенности режимов их изготовления.

Практическая значимость. Полученные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли применение при решении задач автоматизации этапа технологической подготовки производства изделий из РПКМ и включают:

1) Методику перехода от целевых свойств изделий из РПКМ к технологическим режимам их изготовления на этапе подготовки производства;

2) Метод построения автоматизированной системы обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ, основанный на рациональном выборе технологических режимов их изготовления на этапе подготовки производства;

3) Формальное представление архитектуры и описание принципов построения нейросетевых моделей идентификации характеристик РПКМ и технологических режимов переработки реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными структурами;

Методы исследования. Диссертационное исследование выполнено с использованием основных положений и принципов системного анализа, современной теории управления и автоматизации технологических процессов, математического моделирования процессов и систем, планирования эксперимента, теории теплопереноса, математической логики, теории вероятностей и математической статистики, методов искусственного интеллекта (метод нейросетевого моделирования).

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения работы, определяющие решение поставленных задач:

1) Результаты анализа возможностей автоматизации процесса обеспечения требуемых целевых свойств изделий из РПКМ, в том числе оценка взаимосвязи этих свойств с технологическими режимами переработки указанных материалов;

2) Принцип построения автоматизированной системы обеспечения целевых свойств изделий из РПКМ, на основе которого осуществляется выбор режимов переработки;

3) Метод и модель оценки ключевых характеристик РПКМ, которые существенно влияют на целевые свойства изготавливаемых изделий;

4) Метод идентификации взаимозависимости целевых свойств изделий из РПКМ и режимов их изготовления, основанный на нейросетевом моделировании, неформализованных процессов.

Степень достоверности. Достоверность полученных в работе результатов обусловлена: корректной постановкой решаемой задачи, принятием обоснованных допущений и ограничений, логикой выбора и использования необходимых математических моделей, соответствием теоретических и экспериментальных результатов.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы нашли практическое применение при выполнении государственных научно-технических целевых программ, прикладных научных исследований и контрактов. Предложенные методы послужили основой и прошли апробацию при разработке нового инструментального средства производства модифицированных композитных конструкций на предприятиях, специализирующихся на производстве изделий для нужд судостроительной (ЗАО «Псковская лодочная верфь»), станкостроительной (ООО «ПОТОК-М») и нефтедобывающей (ООО НПП «ЗСТ») отрасли.

Отдельные результаты получены в рамках работ по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидии от 13 декабря 2019 г. № 075-15-2019-1941 (Внутренний номер 05.607.21.0321) по теме: «Разработка конструкторско-технологических решений модульных быстровозводимых опор линий электропередач с интегрированными системами непрерывного цифрового мониторинга состояния и термостабилизации грунта для обеспечения нужд регионов Арктики и Крайнего Севера» с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0321).

Основные положения диссертации докладывались на 6 международных и всероссийских конференциях, выставках и семинарах: 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications, 11-13 июня 2012 г., Wrexham, UK; Международной научно-технической конференции молодых ученых, 22-23 октября 2015 г., г. Могилев, Республика Беларусь; Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», 15-17 декабря 2014 г., Москва, Россия; Всероссийской конференции «Информационные технологии, менеджмент качества, информационная безопасность» (IT&MQ&IS – 2015), 20-25 мая 2015 г., Учебно-научная база КБГУ в п. Эльбрус; 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", (IT&QM&IS – 2018), 24-28 сентября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия; 2019 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS–2019), 23-27 сентября 2019 г., Санкт-Петербург, Россия.

Состав публикаций. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для кандидатских

диссертаций. Количество публикаций, проиндексированных в библиографической и реферативной базе данных Scopus равно 3.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 157 страницах, состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 97 наименований и 2 приложений. Содержит 76 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении показана актуальность задачи автоматизации процесса подготовки производства при изготовлении изделий из РПКМ. Дается аннотация работы, сформулирована цель работы, задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, представляемые к защите.

Глава 1. В данной главе представлено обоснование необходимости использования в современном машиностроении РПКМ. Проанализированы пути обеспечения целевых характеристик изделий из РПКМ. Показано, что для обеспечения этих характеристик эффективным является использование углеродных нанотрубок как наполнителя. Изложены основные подходы, применяемые для решения задачи технологической подготовки производства (ТПП) композитных конструкций и сформулированы основные методы моделирования целевых свойств и идентификации технологических параметров производства композиционных материалов, модифицированных наноразмерными структурами.

Показано, что теоретические и экспериментальные исследования вопроса разработки научных основ, моделей и методов идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления, направленных на обеспечение автоматизации технологических процессов производства, детально разработаны в трудах ученых Ю.М. Соломенцева, С.А. Шептунова, Л.М. Червякова, А.В. Олейника, В.Г. Митрофанова, В.Л. Сосонкина, Г.М. Мартинова, А.В. Васильева, Д.В. Гусарова, Т. Zaborovsky, M. Jenek и др. В обозначенных трудах рассмотрены вопросы повышения качества технологических процессов и, в частности, вопросы, связанные с формированием требуемых показателей качества этих процессов средствами автоматизации.

Основные положения, определяющие теоретическую основу проектирования композитных конструкций и технологических процессов их производства, сформулированы учеными В.В. Васильевым, Е.Н. Кабловым, Ю.М. Тарнопольским, В.Д. Протасовым, И.М. Булановым и др., в работах которых было показано, что одним из возможных методов достижения высокой размерной стабильности является обеспечение минимизации коэффициента линейного термического расширения (КЛТР).

Появление наноразмерных дисперсных наполнителей позволило обеспечить повышение механических и теплофизических свойств полимеров, используемых в качестве связующего до значений, сопоставимых со

свойствами армирующего наполнителя. На сегодняшний день, развитие получили работы В.Д. Вермеля, С.А. Титова, Ю. В. Корнева, В.А. Тарасова, Г.В. Малышевой и др., посвященные созданию композиций на основе наполнителей из углеродных наноматериалов, к которым относятся углеродные нанотрубки и углеродные нановолокна.

Определение параметров технологического процесса введения наноразмерных частиц в реактопластичную среду – многопараметрическая задача, содержащая большое количество нелинейных зависимостей, аналитическое описание которых представляет собой сложный наукоемкий процесс, требующий индивидуального подхода к каждой конкретной совокупности технологических итераций, зависящих от свойств композитной конструкции. Экономическая эффективность такого подхода является неоправданной, что делает актуальной задачу поиска методов автоматизации ТПП при модификации реактопластичных полимеров углеродными наноразмерными структурами. В трудах ученых F. Rosenblatt, А.И. Галушкина, А.Н. Горбань и др., сформулированы теоретические основы и решены задачи практического применения нейросетевого моделирования в прикладных задачах, связанных с вопросами автоматизации машиностроительных производств.

Тем не менее, формирование методологического аппарата, направленного на разработку средств автоматизации ТПП модифицированных РПКМ путем интеллектуализации средств решения задачи идентификации взаимосвязи целевых свойств изделия и технологических режимов их изготовления, изучены в недостаточной степени и представляют интерес для исследования.

Основываясь на анализе выполненных исследований по автоматизации ТПП при изготовлении изделий из РПКМ можно отметить следующее.

1. Экономическая эффективность производства изделий из РПКМ напрямую зависит от производительности технологических операций. Технологические режимы изготовления изделий из РПКМ являются одним из ключевых факторов, который определяет их эксплуатационные характеристики. При этом, специфика производственных процессов РПКМ заключается в том, что вариация характеристик исходных компонентов, находясь в допустимых пределах, оказывает существенное влияние на достижение оптимальных значений технологических режимов изготовления. Это приводит к несоответствию изделия заявленным целевым свойствам, что в итоге приводит к браку. Обеспечение рациональных значений технологических режимов изготовления, в данном случае, может быть достигнуто путем применения средств автоматизации ТПП. Следовательно, экономическая эффективность производства РПКМ в значительной степени будет зависеть от уровня автоматизации и, в частности, от этапа ТПП.

2. При производстве РПКМ, проектирование технологических процессов занимает основное место на стадии ТПП. Трудоемкость выполнения этой задачи может составлять до 60-65% всех трудовых затрат различных специалистов.

3. Отечественные производственные предприятия различных отраслей народного хозяйства, связанные с производством изделий и конструкций из РПКМ, существенно уступают зарубежным производителям в плане использования современных информационных технологий и средств автоматизации производственных процессов. Основной причиной тому является отсутствие соответствующего информационного и программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс управления производством изделий из РПКМ на этапе его технологической подготовки.

4. Анализ методологических подходов к обеспечению автоматизации ТПП позволяет говорить о том, что автоматизация подготовки технологических операции по модификации связующего РПКМ затруднена из-за сложной формализации процесса. Очевидно, что закономерным следствием этого является отсутствие достоверных моделей, характеризующих процессы диспергации наноразмерных структур в средах с нелинейной вязкостью, а также отсутствием баз данных, позволяющих назначать рациональные режимы технологических операций.

5. Несмотря на имеющуюся фундаментальную научную базу, задача совершенствования существующих и разработки новых методов технологического обеспечения производственных процессов, опирающихся на использование современных средств автоматизации ТПП, продолжает оставаться актуальной. При этом одним из важнейших шагов ее решения при изготовлении изделий из РПКМ является поиск моделей, описывающих взаимосвязь между целевыми характеристиками этих изделий и технологическими параметрами операций их обеспечивающих, с последующим построением на этой основе соответствующих алгоритмов автоматизации. Как показал анализ выполненных работ, в полной мере эта задача не решена.

Глава 2. В главе предложена концепция и сформулированы принципы, основанные на применении методов нейросетевого моделирования для реализации метода автоматизации производства изделий из РПКМ. Сформированы и обоснованы основные задачи, решение которых необходимо для реализации предлагаемой концепции автоматизации этапа подготовки производства.

Установлено, что первостепенной задачей идентификации технологических режимов изготовления изделий является исследование возможности обеспечения управляемого перемещения в поле допуска требуемого значения целевой характеристики из выявленных первоначальных положений.

Сформулирован принцип реализации метода обеспечения автоматизации процесса подготовки производства изделий из РПКМ, который заключается в идентификации технологических режимов, обеспечивающих формирование целевых свойств изделий в пределах установленных полей допусков.

Реализация метода опирается на систему идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры изготовления (Рисунок 1). Ключевыми элементами системы являются технологические параметры

изготовления, как объект поиска, а также целевые свойства изделия и свойства исходных компонентов как вводные данные.

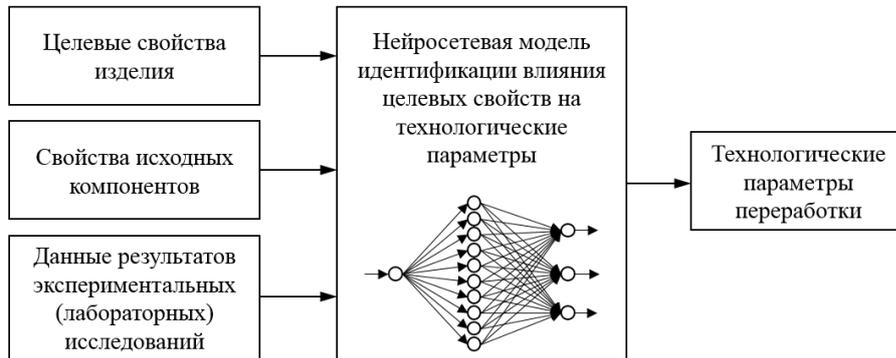


Рисунок 1 – Структура взаимосвязи ключевых элементов системы идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры изготовления

Предлагаемые подходы могут быть реализованы в структуре автоматизированной системы управления технологической подготовкой производства (АСТПП), представленной на рисунке (Рисунок 2).

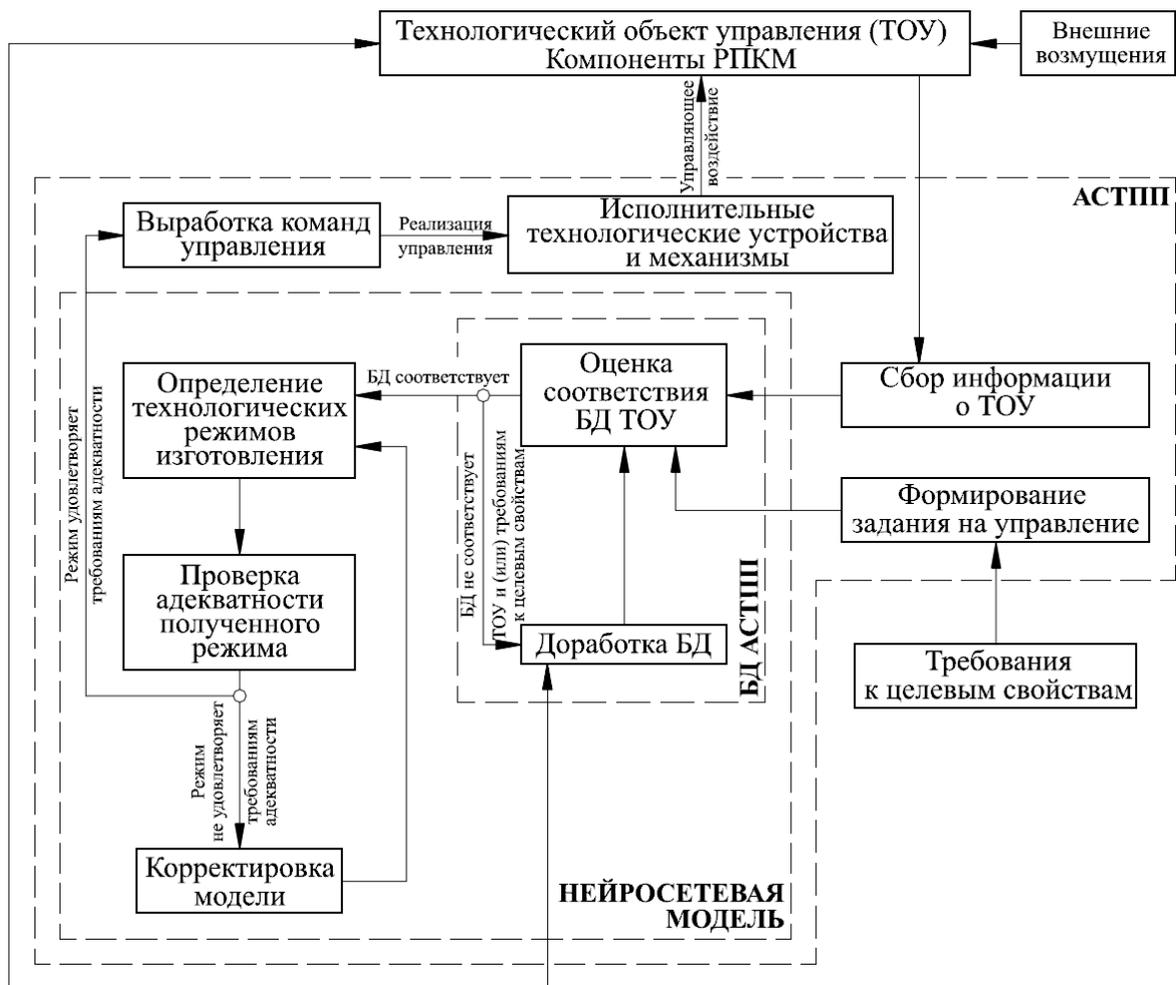


Рисунок 2 – Структура АСТПП изделий из РПКМ

Определяющим фактором повышения эффективности функционирования технологического процесса является наличие оптимальной по структуре системы управления, адекватно отображающей протекающие в системе процессы. Использование методов нейросетевого моделирования для построения системы идентификации влияния целевых свойств на технологические параметры, требует формирования базы данных результатов экспериментальных исследований. Наличие базы данных является обязательным условием обеспечения адекватного отображения процессов формирования свойств изделия.

При разработке современных автоматизированных систем возникают проблемы, меньше связанные с рассмотрением свойств и законов функционирования элементов, а больше – с выбором наилучшей структуры, оптимальной организации взаимодействия элементов системы, определения оптимальных режимов функционирования, учетом влияния внешней среды и т.д. Дальнейшая апробация и оценка адекватности предлагаемого метода требует решения прикладной задачи обеспечения взаимосвязи целевых свойств РПКМ и технологических режимов их изготовления. По сути эта задача сводится к идентификации теплопроводности анизотропных материалов, из которого изготавливается изделие. По природе технологических параметров изготовления она является характерной и показательной для большинства целевых свойств изделий. В свою очередь это связано с тем, что теплопроводность зависит от совокупности технологических параметров производства, но в тоже время эта связь не может быть описана универсальными аналитическими методами с приемлемой степенью точности.

Глава 3. В данной главе сформулирована задача идентификации теплофизических характеристик модифицированного композиционного материала. Определено, что задача идентификации теплофизических характеристик, а именно, теплопроводности элементарной ячейки, с размерами, определенными на этапе ее формирования, сводится к определению величины теплового потока при заданном градиенте температур. В вопросе моделирования теплопроводности РПКМ как гетерофазных материалов, величина теплопроводности определяется по принципу суперпозиции компонентов. Зная их структуру и пространственную ориентацию, становится возможным установить теплопроводность композиции в целом.

Для исследования влияния зависимости целевых свойств РПКМ от количественных характеристик и пространственной ориентации модификатора, был использован структурный алгоритм процесса моделирования, состоящий из следующих основных шагов:

- 1) Подготовка входных данных и условий нагружения, необходимых для процесса моделирования;
- 2) Построение твердотельной модели элементарной ячейки модифицируемого РПКМ, причем для этой модели были использованы

сведения как о геометрических характеристиках, так и пространственной ориентации модификатора;

3) Конечно-элементное моделирование, при котором осуществлялась идентификация физических свойств геометрических элементов и формировались условия нагружения;

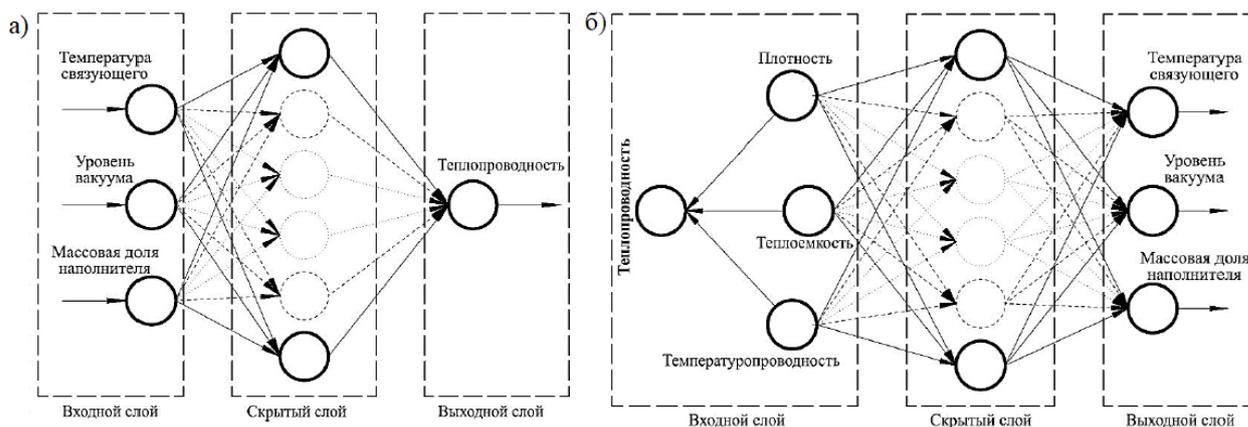
4) Обработка и анализ результатов моделирования.

Результатом работ стала математическая модель теплофизических характеристик РПКМ, позволяющая определить и обосновать геометрические параметры элементарной ячейки как объекта моделирования. Проведен анализ влияния геометрических параметров включений их ориентации и концентрации на теплопроводность элементарных ячеек.

Задача идентификации теплопроводности модифицируемого РПКМ, в рамках проводимого исследования, заключается в установлении зависимости технологических режимов изготовления изделия от значения его целевого свойства либо определяющих это свойство характеристик. В соответствии с условиями проведения экспериментальных исследований и математического моделирования, для формирования архитектуры нейросетевой модели, в качестве нейронов входного слоя были выбраны значения массовой доли наполнителя, уровень вакуума и температура связующего. Выходной слой модели, в свою очередь, содержит один нейрон, определяющий значение теплопроводности. Структура указанной сети представлена на рисунке (Рисунок 3а).

Для решения задачи автоматизации технологического процесса модификации наноразмерными углеродными структурами РПКМ, как реактопластичных полимеров, была сформулирована задача определения технологических параметров модификации реактопластичного связующего исходя из требуемых теплофизических характеристик. Данные для обучения нейросети были разделены в следующем соответствии. В качестве входных нейронов были использованы значения теплопроводности модифицированных реактопластичных полимеров, в качестве выходных – значения уровня вакуума, температуры связующего и массовой доли наполнителя. Конфигурация сети, содержащая единичный нейрон во входном слое при большем количестве нейронов выходного слоя, приводит к неудовлетворительной сходимости и плохой достоверности результатов. Решением является представление свойства теплопроводности в виде произведения таких характеристик как температуропроводность, плотность и теплоемкость связующего (Рисунок 3б).

Установлено, что достижение адекватности работы нейросетевых моделей идентификации целевых свойств изделий из РПКМ и технологических режимов их изготовления возможно только в случае наличия достаточного количества результатов экспериментальных исследований целевых свойств образцов, полученных с вариацией технологических режимов их изготовления.



а) целевые свойства; б) технологические режимы изготовления

Рисунок 3 – Структура нейронной сети

В результате проведенных работ определен инструментарий и сформирован метод экспериментальных исследований теплофизических характеристик экспериментальных образцов, разработаны технологические средства и методики изготовления экспериментальных образцов из РПКМ.

Глава 4. Здесь по результатам предложенных методик изготовления и исследования экспериментальных образцов из РПКМ, модифицированных углеродными наноразмерными структурами, были сформированы базы экспериментальных данных об изменении целевых свойств этих образцов при вариации технологических режимов их изготовления.

Обеспечивая одновременную вариацию массовой доли наполнителя, в диапазоне от 0 до 0,8 %, температуры связующего в процессе модификации в диапазоне от 23 °С (нормальные условия) до 70 °С, а также уровня вакуума в процессе диспергации, в диапазоне от 0 (нормальные условия) до 80·(-1) кПа, были получены экспериментальные значения теплопроводности в зависимости от совокупной вариации трех технологических параметров (температуропроводность, плотность и теплоемкость связующего). Графическое изображение полученных результатов представлено на рисунке (Рисунок 4).

Оценка адекватности результатов математического моделирования, путем сопоставления с результатами экспериментальных исследований, установила необходимость внесения поправочных допущений (коэффициентов), обусловленных технологическими особенностями производства изделий из РПКМ. Необходимость проведения корректировки математической модели путем проведения экспериментальных исследований образцов позволяет говорить о несостоятельности утверждения об экономическом преимуществе методов математического моделирования перед методами нейросетевого моделирования, основанных на обучении модели выборками экспериментальных данных, в вопросах прогнозирования целевых свойств изделий из РПКМ.

Результаты апробации и анализа нейросетевой модели позволили сделать заключение о работоспособности предложенной архитектуры этой модели идентификации теплофизических характеристик реактопластичного связующего, модифицированного углеродными наноразмерными

структурами, а практическое применение разработанных принципов ее построения целесообразным в вопросах решения задачи идентификации целевых свойств изделий из РПКМ.

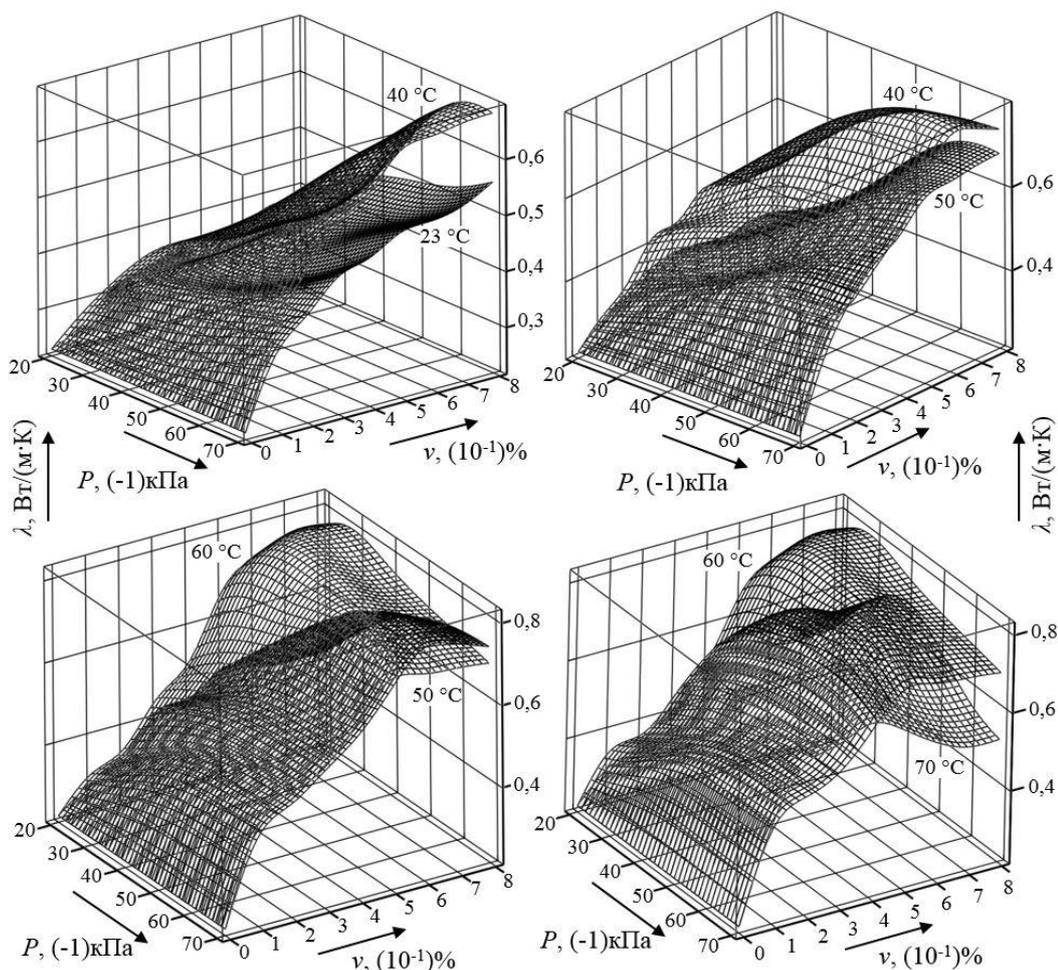


Рисунок 4 – Зависимость теплопроводности образцов наномодифицированного связующего от массовой доли модификатора

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рисунке (Рисунок 5). Для визуального сопоставления с результатами экспериментальных исследований на этом рисунке отображены контрольные значения (КЗ) и результаты, полученные с использованием нейросетевой модели (ПЗ). Суммарная сходимость полученных значений по выборкам обучения при валидации и тестировании составила - 98,77%.

Анализ выборки данных методами параметрической статистики установил, что относительная погрешность результатов нейросетевого моделирования составляет 6,83 %. Это позволяет считать предложенную архитектуру нейросетевой модели работоспособной, а результаты моделирования адекватно соответствующими результатам экспериментальных исследований. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности практического применения разработанных принципов построения нейросетевых моделей идентификации целевых свойств изделий из РПКМ.

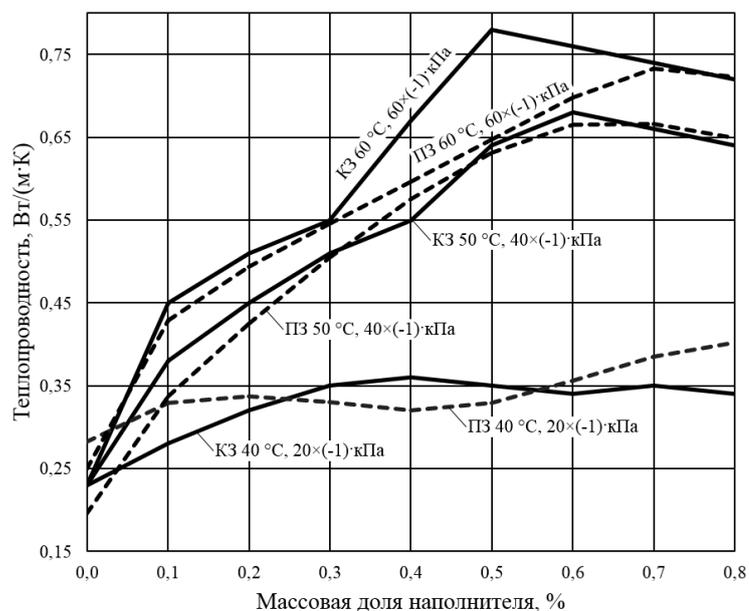


Рисунок 5 – Контрольные значения теплопроводности (КЗ) и значения, полученные с использованием нейросетевой модели (ПЗ)

Постановка задачи идентификации технологических режимов изготовления изделий из РПКМ, по сравнению с задачей определения их целевых свойств является более нетривиальной. Отсутствие методов поверочного контроля, за исключением результатов экспериментальных исследований, в совокупности с процессом изготовления объектов исследований, реализованного с обеспечением возможности контроля и вариации технологических режимов изготовления, обуславливает необходимость апробации разработанной нейросетевой модели в соответствии с методологией, сформулированной ранее.

Оценка предлагаемого метода идентификации технологических режимов изготовления заключается в анализе адекватности разработанной нейросетевой модели по результатам ее апробации по аналогии с прямой задачей идентификации целевых свойств изделий и характеристик модифицируемого материала в зависимости от технологических режимов изготовления.

Соответственно, обучение, валидация и тестирование разработанной модели осуществлялось на экспериментально установленных значениях теплопроводности, полученных для модифицированных образцов из реактопластичного связующего, при вариации технологических режимов и сохранением контрольных значений теплопроводности для температуры связующего и уровня вакуума в пределах {40°C, 20·(-1) кПа}, {50°C, 40·(-1) кПа}, {60°C, 60·(-1) кПа}. Суммарная сходимость полученных значений по выборкам обучения при валидации и тестировании составила 84,83%

Оценка адекватности результатов нейросетевой идентификации технологических режимов также была проведена при помощи методов параметрической статистики. Для этого был выполнен расчет невязок между значениями контрольных технологических режимов и режимов, идентифицированных с использованием нейросетевой модели.

В результате статистического анализа было установлено, что в изученном диапазоне параметров относительная погрешность результатов нейросетевого моделирования температуры составляет 9,74 %, уровня вакуума в процессе модификации 28,47%, и массовой доли наполнителя 3,61 % соответственно.

Приемлемые значения относительной погрешности полученных значений температуры и массовой доли наполнителя не могут быть рассмотрены отдельно, от значения уровня вакуума, так как представляют собой набор связанных технологических параметров. Из сопоставления и анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что в процессе модификации полученные значения массовой доли наполнителя, уровня вакуума, температуры связующего не сопоставима с контрольными значениями этих величин.

Существенная разница между контрольными и полученными значениями технологических режимов позволяет рассматривать полученное с использованием нейросетевого моделирование решение как самостоятельное. Для проверки достоверности полученных решений была изготовлена серия экспериментальных образцов из реактопластичного модифицированного связующего на режимах, установленных по результатам нейросетевого моделирования. Анализ результатов показал, что разность полученных и контрольных значений теплопроводности варьируется в диапазоне от -0,09 до 0,07 Вт/(м·К). В изученном диапазоне параметров относительная погрешность результатов нейросетевого моделирования составляет 6,83 %, что позволяет считать предложенную архитектуру нейросетевой модели идентификации технологических режимов изготовления изделий из РПКМ работоспособной, а результаты моделирования адекватно соответствующими результатам экспериментальных исследований. Кроме того, на основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности практического применения разработанных принципов построения нейросетевых моделей идентификации технологических режимов.

Таким образом, анализ результатов нейросетевого моделирования в задаче идентификации технологических режимов изготовления изделий из РПКМ и последующая их экспериментальная верификация позволили говорить о состоятельности самостоятельного решения, которое может быть использовано в качестве инструмента автоматизации ТПП изделий из РПКМ.

На основании сказанного можно сделать вывод о работоспособности предложенной архитектуры нейросетевой модели идентификации технологических режимов изготовления изделий из РПКМ и состоятельности принципов построения нейросетевых моделей идентификации этих режимов.

Приложения. В приложениях приведены результаты математического моделирования теплофизических характеристик модифицированных РПКМ, акты и заключения о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе доказано, что автоматизация этапа подготовки производства изделий из РПКМ в условиях неопределенности режимов их изготовления должна осуществляться системно на основе разработанного метода идентификации взаимозависимости целевых свойств этих изделий и режимов их изготовления, основанном на нейросетевом моделировании плохо формализуемых процессов.

1. Теоретическими исследованиями установлено, что взаимосвязь между целевыми свойствами изделий из РПКМ и режимами их изготовления является нетривиальной. Для автоматизации процесса подготовки производства эта взаимосвязь должна быть выявлена и формализована. Решение указанной задачи заключается:

- в раскрытии и объяснении сущности взаимосвязи между целевыми характеристиками изделий из РПКМ и режимами их изготовления;
- в формировании структуры и описании модели автоматизированной системы обеспечения требуемых свойств РПКМ с позиции достижения целевых свойств изготавливаемого изделия;
- в разработке нейросетевой модели, позволяющей, с достаточной для практического применения достоверностью, определить целевые свойства изделий из РПКМ, исходя из технологических режимов их изготовления;
- в аналитическом описании поправочных коэффициентов, позволяющих проводить математическое моделирование теплофизических характеристик РПКМ;
- в разработке метода интеллектуализации процесса идентификации взаимосвязи целевых свойств изделий из РПКМ и технологических режимов их изготовления, который позволяет получить оригинальные (не входящие в обучающие выборки) значения этих режимов.

2. Для автоматизации процесса подготовки производства изделий из РПКМ, прежде всего, должны быть установлены ключевые целевые свойства этих изделий и основные параметры технологических режимов их изготовления с последующим выявлением взаимосвязи между этими параметрами.

3. Одним из ключевых свойств оценки эксплуатационной способности изделий из РПКМ является их размерная стабильность. Доминирующим фактором, влияющим на размерную стабильность, является теплопроводность. Использование конечно-элементного моделирования позволило установить параметры свойств материала, непосредственно влияющие на теплопроводность и, в конечном итоге, на размерную стабильность, а именно геометрические характеристики включений, их ориентация включений и концентрация.

4. Обеспечение требуемой теплопроводности РПКМ может быть достигнуто путем его модификации наноразмерными углеродными структурами (нанотрубками). Установлено, что основными параметрами режимов изготовления должны быть значения массовой доли наполнителя,

уровня вакуума и температуры связующего. В тоже время контролируемым целевым свойством должна быть теплопроводность, включающая в себя такие контролируемые параметры, как температуропроводность, плотность связующего и его теплоемкость. Эти параметры являются общими для всех изделий из РПКМ.

5. Для автоматизации процесса подготовки производства, задача выявления и поиска формального представления взаимосвязи целевых свойств изделий из РПКМ и режимов их изготовления должна быть определена как идентификация этой взаимозависимости. В работе показано, что в условиях неопределенности режимов изготовления, вызванных нетривиальностью указанной взаимосвязи, эффективным инструментом решения этой задачи является нейросетевое моделирование.

6. Нейросетевая модель, построенная на обучающей выборке, способна генерировать рациональные, с позиций целевых свойств изделий, технологические режимы их изготовления. Это позволяет исключить влияние субъективного фактора и, тем самым, автоматизировать процесс принятия решений на этапе ТПП. В работе представлен принцип построения и метод выбора состава и архитектуры нейронной сети, а также результаты экспериментальных исследований, необходимые для формирования обучающей выборки.

7. Экспериментальная проверка разработанного метода с использованием нейросетевых моделей показала:

- идентификация целевых свойств изделий в изученном диапазоне параметров выполняется с относительной погрешностью, не превышающей 6,83 %;

- идентификации технологических режимов изготовления в изученном диапазоне параметров выполняется с относительной погрешностью, не превышающей 7,58 %.

8. Практическая реализация и целесообразность предложенных в работе решений, способствующих повышению уровня автоматизации процесса изготовления изделий из РПКМ на этапе технологической подготовки их производства, подтверждена актами о внедрении результатов диссертационной работы на ЗАО «Псковская лодочная верфь», ООО НПП «ЗСТ», заключением ООО «ПОТОК-М»

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Александров, И.А., Шептунов, С.А. Нейросетевое моделирование влияния технологических параметров производства на теплофизические характеристики модифицированных композиционных материалов / И.А. Александров, С.А. Шептунов // Вестник МГТУ Станкин. – 2019. – № 3(50). – С. 72-76. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.).

2. Александров, И.А. Особенности автоматизации систем технологической подготовки производства композитных конструкций / И.А. Александров // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №. 6(57). – С. 25. (0,75 п.л. / 0,75 п.л.).

3. Муранов, А.Н., Александров, И.А. Чувствительность коэффициента линейного теплового расширения терморазмеростабильных композитных ламинатов к отклонениям угла армирования / А.Н. Муранов, И.А. Александров // Вестник МГТУ Станкин. – 2019. – № 4(51). – С. 56-59. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

4. Александров, И.А. Принципы автоматизация технологической подготовки производства путем нейросетевого моделирования / И.А. Александров // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 5 (56). – С. 22. (0,75 п.л. / 0,75 п.л.).

5. Александров, И.А. Взаимосвязь ключевых элементов автоматизированной системы с позиции концепции достижения изделием целевых свойств путём идентификации оптимальных технологических режимов изготовления / И.А. Александров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – № 3 (39). – С. 19-26. (0,5 п.л. / 0,5 п.л.).

В изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science

1. Aleksandrov I.A., Prosuntsov P.V. Determination of the effect of carbon nanosized particles on thermophysical characteristics of polymer composite materials // Polymer Science Series D. – 2016. – Vol. 9. – No. 4. – pp. 377-381. DOI: 10.1134/S199542121604002X

2. Sheptunov S.A., Alexandrov I.A., Golovатов D.A., Glashev R.M. Simulation of thermoset heat conductivity by means of artificial neural networks //2018 IEEE International Conference" Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies"(IT&QM&IS). – IEEE, 2018. – pp. 482-486. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524984

3. Alexandrov I.A., Sheptunov S.A., Sannikov A.S. Some Approaches to the Formalization Principles of Achieving the Target Properties of Products in the Automation of Technological Processes in Mechanical Engineering // 2019 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" IT and QM and IS 2019. – 2019. – pp. 395-398. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928338

Подписано в печать 29.09.2020. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100.

Федеральное государственное автономное учреждение науки
Институт конструкторско-технологической информатики
Российской академии наук
(ИКТИ РАН)
127055, г. Москва, Вадковский пер., д.18, стр. 1А
<http://www.ikti.ru>