

На правах рукописи

Ван Чжуан

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА
КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ (ДЛЯ УСЛОВИЙ КИТАЯ)**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)).

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник **Кондращенко Валерий Иванович**

Официальные оппоненты: **Ушков Валентин Анатольевич**,
доктор технических наук,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», научно-исследовательская лаборатория «Современные композиционные строительные материалы», заведующий лабораторией

Бондарев Александр Борисович,
кандидат технических наук,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра строительного материаловедения и дорожных технологий, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина»

Защита состоится «6» июня 2024 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, (ауд. 329, ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте www.miiit.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бадина Елена Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железобетонные и деревянные шпалы относятся к важнейшим элементам железнодорожного пути и имеют диаметрально противоположные эксплуатационные характеристики, что служит основанием для поиска подрельсовых оснований с компромиссными по отношению к ним свойствами. Такими свойствами обладают композиционные (пластиковые, полимерные, композитные) шпалы с полимерной матрицей и включениями (наполнитель, заполнитель, армирующие элементы) как органической, так и неорганической природы. При этом открывается возможность широкого использования отходов различного происхождения, что способствует смягчению экологических проблем, а в ряде регионов, и их частичному решению. В связи с этим в мире проводится широкий спектр исследований, направленный на разработку технологии получения и конструкций композиционной шпалы. В тоже время не установлены рациональные свойства материала таких конструкций, что является одной из причин, ограничивающей широкое применение композиционной шпалы в железнодорожном пути.

Другим, возможно, даже более важным препятствием, является большая величина коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) полимерной матрицы, приводящая при температурных перепадах окружающей среды к нестабильности ширины железнодорожной колеи. Отличие величины КЛТР полимерной матрицы композиционной шпалы по сравнению с традиционными материалами – древесиной и бетоном, составляет более чем на порядок и его снижение представляет серьезную научную и техническую проблему, решение которой предпринято в диссертации.

Для Китая с огромными запасами быстрорастущего бамбука и многомиллионными полимерными отходами подобная разработка является чрезвычайно актуальной.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ «Аспиранты» при реализации научного проекта №19-38-90179 "Рациональные свойства и состав материала композиционной шпалы" для молодых ученых, обучающихся в аспирантуре.

Степень разработанности. Композиционные подрельсовые основания изучали Б.А. Бондарев, В.А. Кондратюк, В.И. Кондращенко, Я.А. Кудрявцева, А.В. Савин, Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников, М.Ю. Хвостик, A. Manalo, W. Ferdous, S. Kaewungruen, G.Q. Jing, G. Van Egr, R.L. You, S.L. Xiao, A.A. Khalil, X. Yan, C. Pattamaprom, X.Q. Hu, K.A. Soehardjo, R. Lampo и другие ученые. В мире существует большое число компаний, разрабатывающие технологию их производства, в частности, Tвema, АпАТЭК, IntegriCo, Axion, TieTek, I-PLAS, MPW, Tufflex, Duratrack, SICUT, SEKISUI FFU, Greenrail, KLP и многие другие.

Применению бамбуковых материалов для их получения посвящены работы В. Sharma, Arjanvan der Vegteb, M. H. Ramage, R. Lorenzo, Z. Li, X.F. Sun, Y. H. Chui, H.T. Li, A. Kumar, K. Harries, M. Ashraf, A. Sinha, L. Laiblova, Y. Wei и др., показавших перспективность этого направления для стран Юго-Восточной Азии, богатых ресурсами быстрорастущего бамбука.

Теория и практика проектирования композиционных полимерных материалов с учетом специфики конкретного региона с уникальными местными ресурсами, условиями эксплуатации и климатическими особенностями нашла отражение в работах С.М. Барина, А.А. Берлина, Ю.А. Курганова, В.С. Лесовика, Н.П. Лукутцова, Ю.А. Михайлина, В.И. Павленко, E.J. Barbero, D. Gay, Y. Yan, D. Brigante, A.V. Dyskin, T.W. Clyne, G.L. Shen, S.Y. Du, Ю.А. Т.Х. Liu, J.B. Shen, S.M. Otajonov, M. Jones и др.

В работах А.А. Зайцева, С.Д. Стебловского, Н. Geng, Z.H. Zhao, W. Ferdous, P. Yu, T. Aravinthan, A van Belkom, М.М. Khotbehsara, Н. Krejčířiková, P. Jagadeesh и других отмечается, что с ростом грузонапряженности в железнодорожном пути при большом межсезонном перепаде температур серьезной проблемой успешной эксплуатации композитов является высокая (на порядок и более по сравнению с традиционными материалами подрельсовых оснований – древесиной и бетоном) величина КЛТР полимерной матрицы. Это является ключевым препятствием для разработки инновационных технологий и конструкций композиционной шпалы и их применению, в частности, в Китае, на преодоление которого и направлено диссертационное исследование.

Целью диссертационного исследования является разработка технологии изготовления и определение физико-технических свойств материала композиционных шпал, предназначенных для эксплуатации в условиях Китая.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- проведение анализа российских и зарубежных исследований, выполненных в данной предметной области;
- определение по данным вычислительных экспериментов требований к свойствам материала композиционной шпалы;
- установление оптимального состава материала композиционной шпалы с учетом их работы в железнодорожном пути;
- изучение влияния технологических факторов на свойства материала композиционной шпалы;
- определение основных физико-технических свойств материала композиционной шпалы;
- изучение методами лазерной интерферометрии особенностей поведения материала композиционной шпалы под нагрузкой;
- разработка инновационной конструкции и принципиальных схем изготовления композиционной шпалы, армированных бамбуком;
- выполнение оценки жизненного цикла применения композиционной шпалы.

Рабочая гипотеза исследований состоит в том, что приемлемый уровень КЛТР композиционной шпалы, обеспечивающий безопасную эксплуатацию железнодорожного транспорта, может быть достигнут посредством многоуровневой (от атомно-молекулярного уровня до макроуровня – конструкции шпалы) их модификацией структурными элементами с пониженной величиной КЛТР.

Объект исследования: физико-технические свойства материала композиционных шпал и технология их изготовления.

Предмет исследования: физико-технические свойства материала композиционных шпал, армированных бамбуком, на основе поливинилхлорида и их изготовление по экструзионной и инъекционной технологиям.

Научная новизна и наиболее существенные научные результаты проведенных исследований заключаются в установлении:

- оптимального содержания наночастиц ($\approx 1\%$ по массе) в поливинилхлориде, обусловленное протеканием двух конкурирующих процессов, связанных с упорядочиванием (за счет образования кристаллитов) и разрыхлением структуры полимера;

- влияния собственных напряжений в полимерном композите на характер разрушения и поведения его под нагрузкой с формированием блочных структур в процессе разрушения;

- свойств материала композиционной шпалы с учетом их работы в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”;

- многоуровневого подхода (от атомно-молекулярного до макроуровня – конструкции шпалы) к управлению важнейшими свойствами материала композиционной шпалы – модулем упругости и величиной КЛТР.

Научно-техническая новизна исследований подтверждается патентами на устройства для определения свойств строительных материалов (патенты РФ №2672192 и №2710953), конструкцию композиционной шпалы (патенты РФ №2707435 и Китая №20862218.6) и ее получение по экструзионной (патент РФ №2738498) и инъекционной (патент РФ №2737711) технологиям.

Теоретическая и практическая значимость проведенных исследований состоит в: разработке технологии утилизации крупнотоннажных полимерных отходов (на примере поливинилхлорида) для изготовления композиционной шпалы; применении метода атомарных инкрементов для расчета свойств поливинилхлорида, модифицированного различными полимерами; разработке математических моделей, адекватно описывающих физико-технические свойства полимерных композиционных материалов на основе поливинилхлорида и наполнителей в виде мела, древесной муки и бамбуковой фибры; установлении рациональных физико-технических свойств материала композиционной шпалы; разработке оптимальных составов и технологических параметров получения материала композиционной шпалы в системах «поливинилхлорид – тонкодисперсный мел – древесная мука» и «поливинилхлорид – тонкодисперсный мел – бамбуковая фибра»; установлении влияния технологических факторов на свойства материала шпал; разработке рациональной конструкции и технологий – экструзионной и инъекционной, изготовления композиционной шпалы, армированной бамбуковыми стержнями.

Методология и методы исследования. Теоретико-методологической основой диссертационного исследования являются результаты научных исследований зарубежных и отечественных ученых, регламентирующие документы по методам испытаний и исследований в данной предметной области, а также опыт внедрения технологий и конструкций композиционной шпалы, особенно в условиях Китая и стран Юго-Восточной Азии.

Теоретико-методологическая основа определила используемые в диссертации научные методы: анализ и синтез, обобщение и формализация, математическое моделирование (определение свойств материала композиционной шпалы в зависимости от их работы в железнодорожной системе), оптимизация (состава композита материала шпал), наблюдение и измерение (определение физико-технических свойств материала композиционной шпалы). Автором применен методологический аппарат производства композитных материалов, стандартных и нестандартных экспериментальных исследований, математического (имитационного) моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- системный подход к управлению свойствами материала шпалы на пяти структурных уровнях: атомно-молекулярном, нано-, мезо-, микро- и макроуровнях;
- свойства мао-бамбука, применяемого в качестве наполнителя и для армирования композиционной шпалы;
- рациональные свойства материала композиционной шпалы, установленные проведением вычислительных экспериментов в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”;
- данные по управлению физико-техническими свойствами полимерной матрицы шпал на основе поливинилхлорида, модифицированной введением различных полимеров и углеродных нанотрубок;
- математические модели свойств полимерного композита в системах «поливинилхлорид – тонкодисперсный мел – древесная мука» и «поливинилхлорид – тонкодисперсный мел – бамбуковая фибра» и оптимизация состава материала композиционной шпалы на их основе;
- методика и результаты лазерно-интерференционных исследований по определению собственных напряжений и структурных изменений в материале композиционной шпалы под нагрузкой;
- данные по влиянию типа древесных наполнителей (древесная мука или бамбуковая фибра) на свойства композита, включая технологические параметры, установленные с применением методов планирования экспериментов;
- данные экспериментальных исследований свойств материала композиционной шпалы, в том числе установленные с применением методов лазерной интерферометрии;
- технологические схемы изготовления композиционных шпал, армированных бамбуком, по экструзионной и инъекционной технологиям;
- результаты оценки жизненного цикла применения композиционной шпалы.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается логически правильно выверенной методологией, включающей: этапы формулировки цели и задач исследования на основе критического анализа достижений отечественных и зарубежных ученых в выбранной отрасли знаний; использование фундаментальных законов физико-химического материаловедения; проведение испытаний на современном оборудовании; взаимодополнение стандартизированных методов испытаний оригинальными методами; обработку результатов измерений статистическими методами; применение адекватных математических моделей, полученных методами планирования экспериментов, к определению рациональных

технологических параметров получения композиционной шпалы; получение данных, не противоречащих фундаментальным законам и основополагающим представлениям в области строительного материаловедения.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследований докладывались на научно-технических конференциях различного уровня: «Неделя науки» (2017-2021), М., РУТ (МИИТ); Всероссийское совещание заведующих кафедрами материаловедения и технологий конструкционных материалов, Саранск, 2016; Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. Программа международной научной конференции, МГСУ, 16-17.11.2016; 3-й научный форум «Новые материалы», М.: 21-24.11.2017; Всероссийский НПК «Безопасность движения поездов» (2016-2019), М.; Proceedings of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials on Advanced Materials and Technologies (Sanya, Hainan Island, China, 28.11-01.12.2017); XV и XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Г.М. Шахунянца, 4-5.04.2018 и 3-4.04.2019; XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 16-19.10.2018; Четвергом междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», 27-29.11.2018; VII Международном симпозиуме Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018), 1-8.07.2018, Новосибирск; II Международной научной конференции «BuildInTech ВIT 2021. Инновации и технологии в строительстве». 9-10.03.2021, Белгород; XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "CONSTRUCTION - THE FORMATION OF LIVING ENVIRONMENT" (FORM-2020) 23-26.09.2020, Hanoi, Vietnam; XVII international scientific and practical conference "New polymer composite materials. Mikitaevskie readings", s. Elbrus, Russia, July 5-10, 2021; VIII International Conference – ACTUAL PROBLEMS OF ENGINEERING MECHANICS. Odessa, May 11-14, 2021.

Объем и структура работы. Диссертация включает 263 страницы общего текста и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 180 наименований и 10 приложений. Основной текст диссертации изложен на 220 страницах, содержит 94 рисунка и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследований, показана степень его разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, рабочая гипотеза, определены объект и предмет исследований, их научная и научно-техническая новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и достоверность исследований, приведены положения, выносимые на защиту, сведения по апробации результатов на научных конференциях и в открытой печати.

В первой главе выполнен литературный обзор отечественного и мирового опыта изготовления и конструкций композиционных шпал (проанализировано более 250

источников, из которых свыше 90% зарубежные), на основании которого установлено большое разнообразие применяемых в качестве связующего полимерных материалов, наполнителей и армирующих элементов в том числе разнообразных отходов, позволяющих получать композиционные шпалы с большим диапазоном физико-технических свойств, для которых необходимо установить рациональные их значения, являющиеся компромиссом между имеющими диаметрально противоположные характеристики железобетонными и деревянными шпалами. Это раскрывает большие перспективы их применения на железнодорожном пути в качестве альтернативы шпалам из традиционных материалов при повышенных осевых нагрузках, в труднодоступных и малонаселенных районах, где их применение приведет к значительному технико-экономическому эффекту и защите окружающей среды.

Другой проблемой для широкого применения композиционной шпалы является высокое значение КЛТР полимерной матрицы на порядок и более превышающего КЛТР древесины и железобетона. На основании анализа известных технических решений была сформулирована научная гипотеза, заключающаяся в том, что достижение приемлемого уровня КЛТР для композиционной шпалы, обеспечивающего безопасную работу железнодорожного пути, может быть достигнуто посредством многоуровневой – от атомно-молекулярного уровня до конструкции шпалы, модификацией материала структурными элементами с пониженной величиной КЛТР. С другой стороны, использование при их производстве вторичных пластиков и возобновляемых природных материалов (в частности, бамбука) способствует повышению технико-экономической эффективности, снижению загрязнения окружающей среды и устойчивому развитию железнодорожной отрасли.

Во второй главе приведены сведения о свойствах применяемых материалах и методах исследований. В качестве полимерной матрицы композиционной шпалы использовали поливинилхлорид, многослойные углеродные нанотрубки производства НПП «Центр нанотехнологий» для армирования матрицы на наноуровне, дисперсный мел, древесную муку для армирования материала на микроуровне, фибру из бамбука (мао-бамбук) для армирования материала на мезоуровне и стержни бамбука для армирования конструкции шпалы на макроуровне.

Наряду со стандартными методами определения основных физико-технических свойств материала шпал, включая определение параметров трещиностойкости композита, методы планирования экспериментов, формулировку задачи оптимизации состава материала шпал и статистическую обработку результатов экспериментов, также разработана оригинальная методика оценки собственных напряжений в материале шпал и изучения процесса разрушения композита с использованием лазерной интерферометрии.

В третьей главе приведены результаты исследований по определению требований к свойствам материала композиционной шпалы, обеспечивающих компромисс между жестким (на железобетонных шпалах) и мягким (на деревянных шпалах) режимами эксплуатации подвижного состава. Оптимальные свойства материала композиционной шпалы были установлены решением оптимизационной

задачи при рассмотрении работы шпалы в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”.

При решении такой задачи использовали план эксперимента Бокса-Уилсона (для получения математических моделей свойств Y , характеризующих рассматриваемую систему) с варьируемыми факторами X : X_1 – коэффициент изгиба шпалы, отн. ед.; X_2 – ее масса, кг; X_3 – модуль упругости шпалы в горизонтальной плоскости, МН/см²; X_4 – то же, в вертикальной, МН/см²; X_5 – то же, в отношении кручения рельса, МН/рад; X_6 – жесткость узла скрепления шпалы, МН/см. Уровни варьирования факторов X приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения варьируемых факторов X в точках плана эксперимента

Варьируемый фактор	Значение X на уровнях варьирования x			Интервал варьирования h
	Нижний $x = -1$	Основной $x = 0$	Верхний $x = +1$	
X_1 , отн. ед.	0,700	0,775	0,850	0,075
X_2 , кг	71	168	265	97
X_3 , МН/см ²	2,2	3,9	5,6	1,7
X_4 , МН/см ²	3,4	5,7	8,0	2,3
X_5 , МН/рад	340	435	530	95
X_6 , МН/см	1500	1200	900	300

В качестве Y использовали параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”: Y_1 – осевые напряжения в подошве рельса, МПа; Y_2 – вертикальный прогиб рельса, см; Y_3 – вертикальный прогиб шпалы, см; Y_4 – вертикальное ускорение шпалы в долях g , отн. ед.; Y_5 – напряжения в балласте, МПа, и др., значения которых в точках плана эксперимента получены по результатам вычислительных экспериментов для прохождения локомотива ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч в кривой радиуса 350 м. Расчеты выполнены по программе “Взаимодействие экипажа и пути при пространственных колебаниях подвижного состава” ВНИИЖТ. По результатам вычислительных экспериментов получены математические модели, адекватно (погрешность < 1,26%) описывают функции отклика Y .

По полученным математическим моделям:

а) установлено влияние варьируемых факторов X на функции отклика Y анализом графических зависимостей в виде изолиний на квадрате, пример которых приведен на рис. 1. Обобщением влияние варьируемых факторов x_1 и x_2 на функции отклика Y (табл. 2), характеризующих состояние системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”, установлено, что на состояние железнодорожного пути свойства материала композиционной шпалы в равной степени влияют на напряжения в подошве рельса Y_1 , вертикальной силы, действующей на рельс Y_6 , практически не влияя на вертикальные прогибы рельса Y_2 ; при этом изгибная жесткость шпалы (фактор x_1) оказывает большее влияние по сравнению с массой шпалы (фактор x_2) на

вертикальные прогибы шпалы Y_3 , напряжения в балласте Y_5 и основной площадке земляного полотна Y_6 , и особенно на напряжения во внутренней выкружке головки рельса Y_{10} , в то время как на вертикальное ускорение шпалы Y_4 преимущественно влияет масса шпалы.

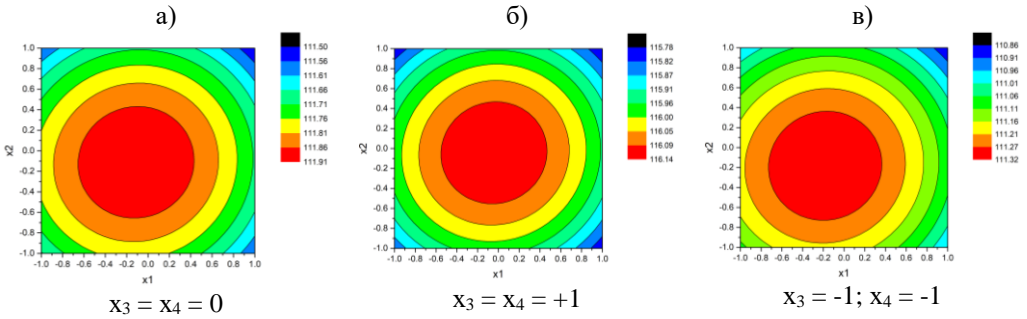


Рисунок 1 – Изолинии изменения напряжений в подошве рельса Y_1 , МПа, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов

Таблица 2 – Обобщение влияния x_1 и x_2 на функции отклика Y

Значение функции отклика	Вклад, %, варьируемых факторов	
	x_1	x_2
Напряжение в подошве рельса Y_1 , МПа	9,3	9,3
Вертикальные прогибы рельса Y_2 , см	≈ 0	≈ 0
Вертикальные прогибы шпалы Y_3 , см	0,6	2,2
Вертикальное ускорение шпалы Y_4 , отн. ед.	0	47,6
Напряжения в балласте Y_5 , МПа	12,8	2,6
Напряжения в основной площадке земляного полотна Y_6 , МПа	14,7	4,4
Величины вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , кН	4	4
Напряжения во внутренней выкружке головки рельса Y_{10} , МПа,	320	≈ 0

б) определены оптимальные свойства материала композиционной шпалы, установленные решением многокритериальной задачи по достижению минимума целевой функции, являющейся комплексным показателем, характеризующим напряженно-деформированное состояние элементов системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”. В результате ее решения были определены рациональные свойства композиционной шпалы: модуль упругости материала шпалы – 6200-7450 МПа, ее масса – 151-153 кг. Также установлено, что

для обширных областей Китая значение КЛТР для композиционной шпалы (помимо высокоскоростных железнодорожных магистралей) не должен превышать $25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Четвертая глава диссертации посвящена технологическим исследованиям. Впервые в мировой практике выполнено управление свойствами композиционного материала на пяти структурных уровнях – от атомно-молекулярного до макроуровня (рис. 2), направленное в первую очередь на снижение величины КЛТР, а также регулирование величины модуля упругости материала композиционной шпалы. На разных структурных уровнях использовались модифицирующие поливинилхлорид полимеры – на атомно-молекулярном уровне, углеродные нанотрубки – на наноуровне, тонкодисперсный мел/древесная мука – на микроуровне, бамбуковая фибра – на мезоуровне, и стержни бамбука – на макроуровне, т.е. на уровне конструкции – шпалы. При этом решение оптимизационной задачи на атомно-молекулярном и наноуровнях выполнялось на основе метода атомарных инкрементов, а на остальных трех уровнях – методами механики сплошных сред и планирования активных экспериментов.

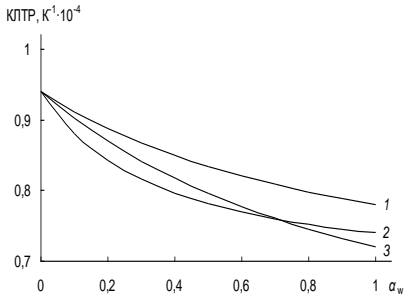


Рисунок 2 – Схема многоуровневой оптимизации материала композиционной шпалы

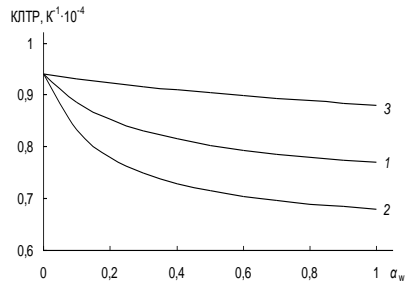
Методом атомарных инкрементов на атомно-молекулярном уровне по химическим формулам полимеров, перспективных для модификации поливинилхлорида – связующего, принятого в работе для получения композиционной шпалы, выполнена оценка совместимости сополимеров, определены их важнейшие свойства (ван-дер-ваальсов объем, поверхностная энергия, температура стеклования, КЛТР и др.).

полимеров приводит к существенному снижению КЛТР, прогнозируемые значения которого от весовой доли второго полимера α_w показаны на рис. 3. Из рисунка следует, что чем выше температура стеклования полимера T_g , вводимого в смесь с поливинилхлорида, тем ниже величина КЛТР. Из вводимых полимеров один из наибольших эффектов достигается для Ultem (поз. 2 на рис. 3, б): при его введении в поливинилхлорид в количестве 10% (по массе) снижение КЛТР для поливинилхлорида составляет 15%, а при введении 20% – 21%.

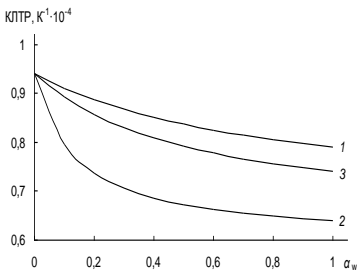
Установлено (рис. 4), что введением сополимера модуль упругости E может регулироваться в широком диапазоне как в сторону снижения E модифицируемого полимера (до 1,36 раз), так и его повышения (до 1,63 раз), что открывает широкие возможности для управления его значениями на атомно-молекулярном уровне.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Зависимости КТТР от весовой доли второго полимера в смеси с поливинилхлоридом

а) 1 – поли-4-хлорстирол, 2 – поликарбонат, 3 – поли-2,6-диметилфениленоксид; б) 1 – поли-2,6-дихлорстирол, 2 – Ultem, 3 – полиэфиркетон; в) 1 – полиэфирэфиркетон, 2 – полисульфон, 3 – полифениленсульфид

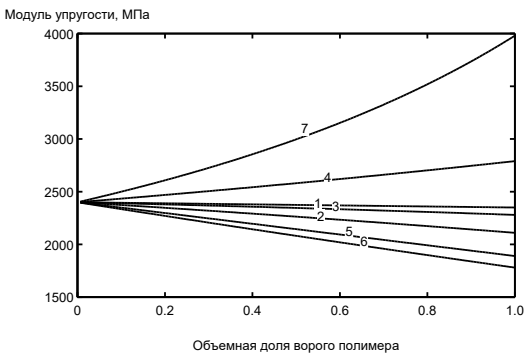


Рисунок 4 – Зависимости модуля упругости от объемной доли второго полимера (1 – полиэфиркетон; 2 – полиэфирэфиркетон; 3 – полисульфон; 4 – полиарилат Ф-2; 5 – поли-2,6-диметилфениленоксид; 6 – поликарбонат; 7 – полипиромеллитимид анилинфталейна)

На наноуровне проведен теоретический анализ снижения величины КТТР и регулирования модуля упругости материала композиционной шпалы введением в матрицу наночастиц – многослойных углеродных нанотрубок. Зависимость степени

кристалличности от концентрации нанотрубок показана на рис. 5, а зависимость для КЛТР (α_L) – на рис. 6, из которых следует, что, в зависимости от содержания наночастиц, степень кристалличности проходит через максимум, а величина α_L – через минимум.



Рисунок 5 – Зависимость степени кристалличности от концентрации нанотрубок

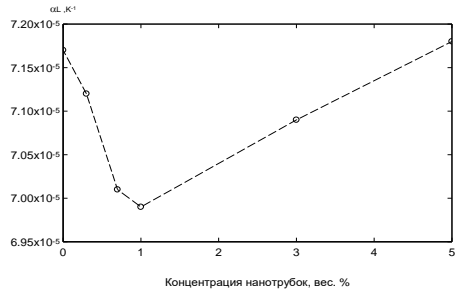


Рисунок 6 – Зависимость КЛТР (α_L) от концентрации нанотрубок

Введение нанотрубок до 1% снижает на 2,5% величину КЛТР, а большего количества – повышает, что объясняется соответствующим упорядочиванием и разрыхлением структуры полимера. Показано, что увеличение степени кристалличности поливинилхлорида вызывает снижение величины его КЛТР, максимум которого достигается при концентрации нанотрубок 1% по массе. При этом введением наночастиц модуль упругости может быть увеличен значительно существеннее – до 40%.

На микро- и мезоуровне посредством теоретического анализа свойств композита и симплекс-решетчатого планирования экспериментов получены полные кубические математические модели свойств полимерного композита, с использованием которых сформулирована задача оптимизации состава материала композиционной шпалы на основе поливинилхлорида, мела и древесной муки (микроуровень) или бамбуковой фибры (мезоуровень). В качестве целевой функции в задаче оптимизации использовали многокритериальную целевую функцию $C_{E,\alpha,m}$, представляющую собой минимум отклонения получаемых в задаче оптимизации расчетных значений свойств материала композиционной шпалы (модуля упругости матрицы Y_E , величины КЛТР Y_α и массы шпалы Y_m) от их рациональных значений Y_E^r , Y_α^r , Y_m^r , полученных при решении задачи по взаимодействию подвижного состава с подрельсовым основанием в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”:

$$C_{E,\alpha,m} = \lambda_E \frac{|Y_E^r - Y_E|}{Y_E^r} + \lambda_\alpha \frac{|Y_\alpha^r - Y_\alpha|}{Y_\alpha^r} + \lambda_m \frac{|Y_m^r - Y_m|}{Y_m^r} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при выполнении ограничений на свойства материала композиционной шпалы $A_{min}^E \leq Y_E \leq A_{max}^E$; $A_{min}^a \leq Y_a \leq A_{max}^a$; $A_{min}^m \leq Y_m \leq A_{max}^m$, где λ_E , λ_a , λ_m – весовые коэффициенты функций отклика Y_E , Y_a , Y_m ($0 \leq \lambda_i \leq 1$ и $\lambda_E + \lambda_a + \lambda_m = 1$).

Для композита «поливинилхлорид – мел – древесная мука» в результате решения задачи (1) был определен оптимальный состав для расхода соответственно поливинилхлорида, мела и древесной муки – $X_1 = 601,9$ кг; $X_2 = 134,5$ кг; $X_3 = 315,0$ кг, который обеспечивает получение композита с модулем упругости $E_m = 1,45 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью $\rho = 1051$ кг/м³, КЛТР $\alpha_m = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и шпалы массой $m_s = 124,5$ кг. Аналогично для композита «поливинилхлорид – мел – бамбуковая фибра» был определен оптимальный состав $X_1 = 641,7$ кг; $X_2 = 72,1$ кг; $X_3 = 305,9$ кг, который обеспечивает получение композита с модулем упругости $E_m = 1,38 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью $\rho = 1019,7$ кг/м³, КЛТР $\alpha_m = 19,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и шпалы массой $m_s = 114,1$ кг.

Для снижения КЛТР на макроуровне разработана конструкция композиционной шпалы, армированная бамбуковыми стержнями в количестве двух или четырех штук (рис. 7).

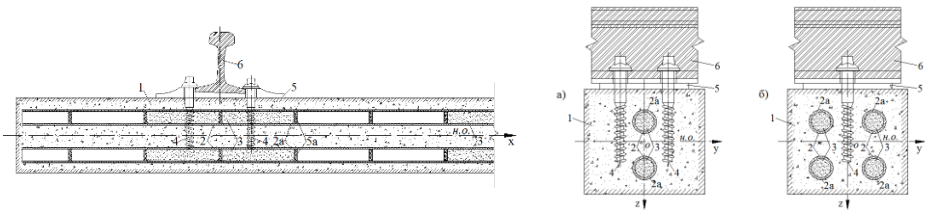


Рисунок 7 – композиционная шпала, армированная бамбуковыми стержнями (1 – полимерная матрица; 2 – бамбуковые элементы; 2а – их стенки; 3 – затвердевший цементный раствор; 4 – шурупы или костыли; 5 – рельсовая подкладка; 5а – междуозлия бамбуковых элементов; 6 – рельсы)

С использованием методов механики сплошной среды, при $L = 2,50$ м, $B = 0,22$ м, $H = 0,16$ м, $E_b = E_f = 170 \times 10^8$ Па; $\alpha_b = \alpha_f = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; внутренний $R_1 = 0,01$ м и внешний $R_2 = 0,02$ м радиусы бамбука, было установлено, что на макроуровне за счет использования армирующих стержней из бамбука снижение КЛТР достигает 10,2% (при 4-х стержнях).

Результат многоуровневого снижения КЛТР композиционной шпалы показал, что при КЛТР поливинилхлорида $94,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ его модификация полимерами снижает КЛТР до $73,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на наноуровне введение наночастиц снижает КЛТР на 2,5%, т.е. до $70,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на микро- и мезоструктурных уровнях введение мела и древесной муки/бамбуковой фибры снижает КЛТР до $15,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с бамбуковой фиброй)/ $19,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с древесной мукой), на макроуровне введение бамбуковых стержней способствует снижению КЛТР шпалы на основе композита «поливинилхлорид – мел – древесная мука» до $18,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 2 брусками)/ $17,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 4 брусками), а для шпалы на основе композита «поливинилхлорид – мел – бамбуковая фибра» до $15,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 2 брусками)/ $14,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 4 брусками). Таким образом, при пятиуровневой модификации окончательный КЛТР

композиционной шпалы достигает ниже допускаемого предела КЛТР шпалы – $25,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (рис. 8).

Методами планирования экспериментов «на квадрате» с использованием в виде целевой функции изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$, являющейся комплексным показателем работы подрельсового основания в железнодорожном пути (рис. 9), установлено, что среди таких технологических факторов, как модули упругости бамбуковых стержней (x_1) и матрицы шпалы из пластика (x_2), наружный радиус бамбукового стержня (x_3) и расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до центра сечения верхнего бамбукового стержня (x_4) наибольшее влияние на величину $G_{из}$ в области допустимых значений варьируемых факторов оказывает модуль упругости матрицы композиционной шпалы. Показано, что по степени влияния на $G_{из}$ варьируемые факторы x располагаются в следующей последовательности: $x_2 > x_3 > x_1 > x_4$.

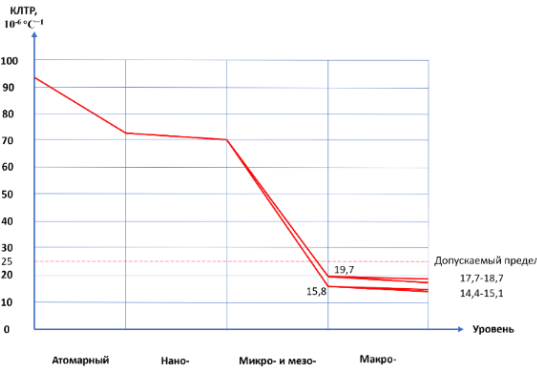


Рисунок 8 – Результат многоуровневого снижения КЛТР композиционной шпалы ($\alpha_{\text{дет.}} = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{\text{ПВХ}} = 94,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_f = 6,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_q = 45,0 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_p = 70,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

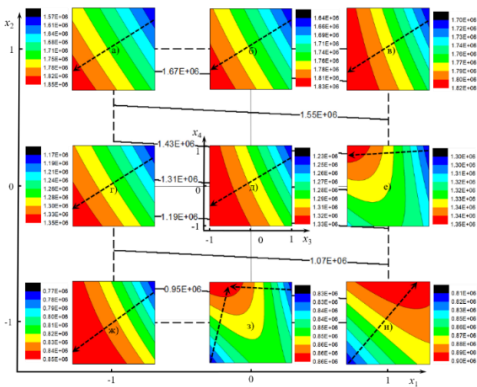


Рисунок 9 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , $\text{Па} \cdot \text{м}^4$, в области варьируемых факторов x , отн. ед. (--- базовое поле F_1 при изменениях x_1 , x_2 и фиксированных $x_3 = x_4 = 0$; — локальные поля F_2 при изменениях x_3 , x_4 в точках базового поля F_1 с координатами; ← направление наибольшего градиента ΔG_{max})

В пятой главе представлены результаты исследований основных свойств материала композиционной шпалы стандартными и нестандартными (с применением лазерной интерферометрии) методами. Исследованы основные свойства материала

композиционной шпалы оптимального и производственного (компания Savewood) составов, состоящих из древесной муки, карбоната кальция и поливинилхлорида. Образцы изготавливали на промышленных экструдерах компании Savewood. Температура экструзии в различных зонах экструдера варьировалась от 145 до 200^oC, а скорость экструзии – от 0,25 до 2,00 м/мин.

Установлено, что материал оптимального состава обладает более высокими физико-техническими свойствами по сравнению с производственным составом – прочности при изгибе $\sigma_{из}$ и на растяжение при раскалывании R_{pp} для образцов оптимального состава выше соответственно на 20,3% и 17,6% и это различие является статистически значимым. Для оптимального состава показатели энергетических затрат на процессы трещинообразования и развития магистральной трещины существенно выше аналогичных параметров образцов производственного состава: на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины W_e выше на 33%, на процессы развития и слияния микротрещин W_m выше на 26% и на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины W_i выше в 2,2 раза.

Для образцов оптимального состава величина КЛТР в 1,6 раз ниже величины для образцов производственного состава, а величина водопоглощения, установленная методом лазерной интерферометрии для сверхмалого водопоглощения, в 7,8 раз ниже, чем обеспечивается высокая стойкость такого композиционного материала к воздействию агрессивных сред при эксплуатации в железнодорожном пути.

Изучение процесса разрушения материала композиционной шпалы при сжатии методом лазерной интерферометрии (по патентам РФ №2672192 и №2710953) позволил бесконтактно фиксировать поле деформаций во всех точках поверхности образца в процессе его нагружения (рис. 10). С использованием разработанных устройств установлено, что образцы обоих составов характеризуются высоким уровнем деформационной однородности, но первые признаки деструкции в образцах оптимального состава проявляются при более низком уровне напряжений (45-50%), чем у образцов производственного состава (60-65%). При этом характер разрушения образцов оптимального состава соответствует разрушению пластического материала с проявлением больших пластических деформаций, сопровождаемых ростом трещин и формированием блоков, а разрушение образца производственного состава характерно хрупкому материалу с его дефрагментацией на отдельные части при взрывном разрушении. Последнее объясняется более высоким уровнем собственных напряжений в образцах производственного состава.

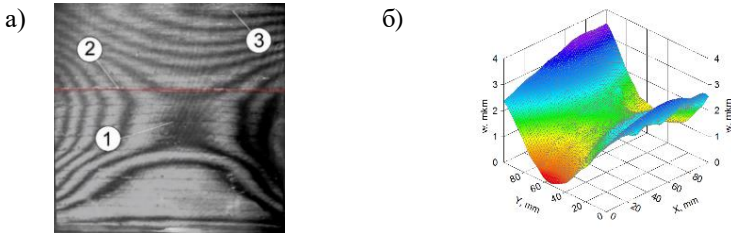


Рисунок 10 – Интерферограмма (а) и 3D-график (б) поля перемещений поверхности образца оптимального состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 24,8$ МПа

По разработанной методике оценки методом лазерной интерферометрии собственных напряжений было установлено, что в образцах оптимального состава (рис. 11) их максимальные значения сосредоточены ближе к поверхности, а в образцах производственного состава – в более глубоких слоях. При этом собственные напряжения с глубиной в образце быстро релаксируют и снижаются по сравнению с поверхностным слоем в 2,7 раза, а в образце производственного состава они остаются выше, чем в поверхностных слоях образца и в 3,7 раза превышают значения собственных напряжений внутри образца оптимального состава.

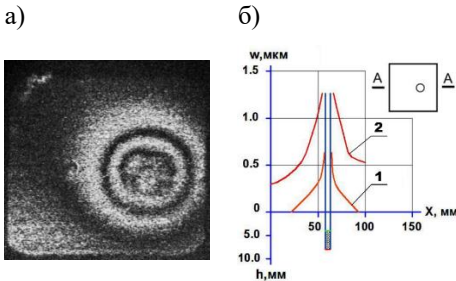


Рисунок 11 – Интерферограмма (а) и график перемещений по сечению А-А (б) на кромке отверстия в образце оптимального состава под действием собственных напряжений при засверливании на глубину $h = 4$ мм (1) и с глубины $h = 4$ мм до глубины $h = 8$ мм (2)

Особенности распределения собственных напряжений в образцах обеих серий по сечению образцов и более высокий их уровень в образце производственного состава объясняет различный характер предельного состояния образцов при действии сжимающих напряжений – образец оптимального состава проявляет пластический характер разрушения, а производственного состава – хрупкое взрывное разрушение с фрагментацией на отдельные части, что является неприемлемым для применения производственного состава при изготовлении композиционных шпал.

В шестой главе по результатам исследований разработана экструзионная (рис. 12) (патент РФ №2738498) и инжекционная (патент РФ №2737711) (рис. 13) технологии изготовления композиционных шпал.

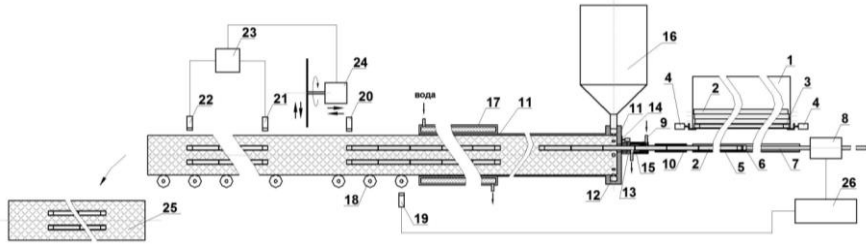


Рисунок 12 – Общий вид устройства для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований (магазин-накопитель 1; армирующие стержни 2; магнитные втулки-маркеры 3; электромагнитные замки 4; ложемент 5; коническая позиционирующая головка 6; шток-толкатель 7; привод 8; конический канал 9; втулка-кондуктор 10; формирующая оснастка 11; подающий расплав полимера коллектор 12; термоизолирующая проставка 13; заслонка-обтюратор 14; охлаждаемый запирающий блок 15; экструдер 16; рубашка охлаждения 17; ролики рольганга 18; датчик скорости 19; датчики 20, 21 и 22; блок управления 23; привод дисковой маятниковой пилы 24; готовое армированное основание 25; управляемый микроконтроллер 26)

Разработанные устройства могут быть эффективно применены как на рельсовом транспорте для изготовления переводных и мостовых брусьев, так и в строительной индустрии для изготовления бруса и балок с заданными характеристиками.

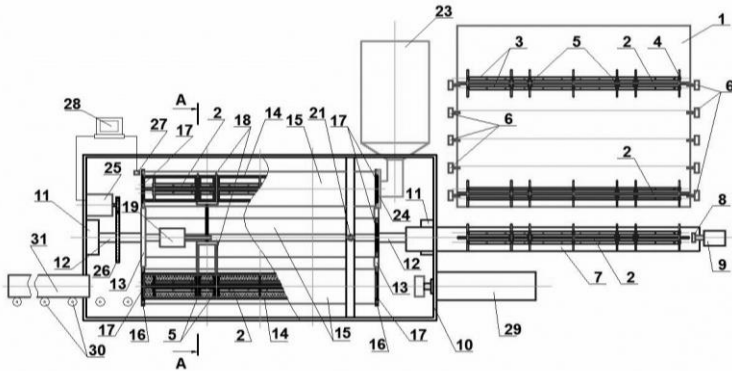


Рисунок 13 – Общая схема устройства для изготовления композиционной шпалы (накопитель 1; армирующая сборка 2; магнитный втулка-маркер 3; позиционирующие эле менты 4; закладный элемент 5; электромагнитная замка 6; желоб-кондуктор 7; толкатель 8; привод 9; жесткая рамная конструкция 10; подшипниковый узел 11; полуось 12; термоизолирующая проставка 13; пресс-формы 14; рубашка теплообменника 15; силовой фланец 16; шиберная заслонка 17; стержни-фиксаторы 18; привод 19; гидроразъемы 20 и 21; трубопровод 22; экструдер 23; разъем 24; привод вращения 25; механическая передача 26; датчик положения 27; ЭВМ 28; толкатель 29; рольганг 30; готовая шпала 31)

Разработанная инновационная конструкция композиционной шпалы (патенты РФ №2707435 и Китая №20862218.6) (см. рис. 7) имеет такие преимущества, как повышенные физико-механические свойства шпалы как в целом, так и в зонах наибольших изгибающих моментов, обеспечивающие преимущества при механических повреждениях, возможность переработки старогодных шпал для получения новых шпал, пониженная стоимость, экологическая безопасность, и пр.

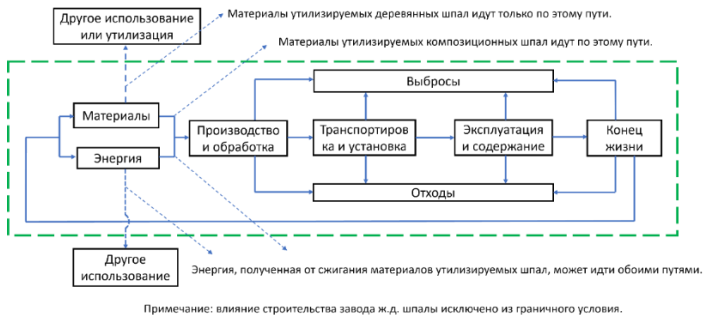


Рисунок 14 – Жизненный цикл железнодорожной шпалы и сфера действия оценки жизненного цикла

Согласно результатам оценки жизненного цикла (рис. 14), углеродный след применения композиционных шпал стремится к значению от применения деревянных шпал – около 631796 кг экв. CO_2 на 1 км железнодорожного пути в течение 50 лет. Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе при чтении лекций аспирантам по дисциплине «Техника и технологии строительства» и прошли апробацию в условиях действующего производства компании Savewood.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал перспективность внедрения композиционных (композитных, полимерных, пластиковых) шпал на железнодорожном транспорте вследствие использования для их получения разнообразных крупнотоннажных бытовых отходов, побочных продуктов промышленности и сельского хозяйства, а в ряде стран, в частности, в Китае, и наличия местной сырьевой базы в виде быстрорастущего бамбука; при этом применение композиционных подрельсовых оснований способствует решению и ряда экологических проблем.

2. Установлено, что одним из основных препятствий широкому применению на железнодорожном транспорте композиционных шпал является высокий коэффициент линейного температурного расширения полимерной матрицы.

3. Выполнена многоуровневая модификация поливинилхлорида – матричного полимера композиционной шпалы, на пяти структурных уровнях – атомно-

молекулярном (полимерами), нано- (углеродными нанотрубками), микро- (тонкодисперсным мелом и древесной мукой), мезо- (бамбуковой фиброй) и макроуровне (стержнями из бамбука), в следствие чего достигнута величина коэффициент линейного температурного расширения $\alpha_m \leq 25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, чем обеспечивается возможность их применения в большинстве провинций Китая.

4. Путём решения в вычислительном эксперименте многокритериальной оптимизационной задачи по поиску свойств материала композиционных шпал как элемента системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав” определен: а) оптимальный состав материала шпал композиции из поливинилхлорида, мела и древесной муки соответственно – $X_1 = 601,9 \approx 602$ кг; $X_2 = 134,5 \approx 134$ кг; $X_3 = 315,0 \approx 315$ кг, обеспечивающие получение композита с модулем упругости $E_m^e = 1,45 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью композита $\rho = 1051$ кг/м³, коэффициентом линейного температурного расширения $\alpha_m = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и массой шпалы $m_s = 124,5$ кг; б) оптимальный состав материала шпал композиции из поливинилхлорида, мела и бамбуковой фибры соответственно – $X_1 = 641,7 \approx 642$ кг; $X_2 = 72,1 \approx 72$ кг; $X_3 = 305,9 \approx 306$ кг, обеспечивающие получение композита с модулем упругости $E_m^e = 1,38 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью композита $\rho = 1020$ кг/м³, коэффициентом линейного температурного расширения $\alpha_m = 19,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и массой шпалы $m_s = 114,1$ кг.

5. На атомно-молекулярном и наноуровнях проведением вычислительного и натурального экспериментов показано, что за счет модификации матричного полимера – поливинилхлорида, совместимыми с ним полимерами и введением углеродных нанотрубок снижение величины коэффициента линейного температурного расширения модифицированного поливинилхлорида достигает 30%, при этом оптимальная концентрация нанотрубок составляет 1% по массе; методом атомарных инкрементов определены важнейшие свойства модифицированного поливинилхлорида (ван-дер-ваальсовый объем, поверхностная энергия, температура стеклования, коэффициент линейного температурного расширения и др.), важные для прогнозирования свойств полимерного композита на более высоких структурных уровнях.

6. Физико-механические свойства разработанного материала композиционных шпал оптимального состава выше соответствующих показателей материала производственного состава: прочности при изгибе $\sigma_{из}$ и на растяжение при раскалывании R_{pp} соответственно на 20,3% и 17,6%, энергетические затраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины W_e на 33%, на процессы развития и слияния микротрещин W_m на 26%, на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины W_i в 2,2 раза, величина статического джей-интеграла J_i , являющегося критерием сопротивления развитию трещин при пластическом деформировании материала, на 20%, что определяет более благоприятное поведения композиционных шпал при эксплуатации в железнодорожном пути.

7. Важнейшие физико-технические свойства разработанного материала композиционных шпал оптимального состава, определяющих их долговременную эксплуатацию в железнодорожном пути, обладают лучшими показателями, чем

материал производственного состава: величина коэффициента линейного температурного расширения в 1,6 раз ниже, а водопоглощение в 7,8 раз меньше; при этом для установления последней зависимости применена новая методика определения сверхмалого водопоглощения для материалов высокой плотности, основанная на установлении изменения объема образца при его контакте с водой с применением электронной-корреляционной спекл-интерферометрии.

8. Бесконтактное измерение поля деформаций методом лазерной интерферометрии позволило установить блочный характер разрушения образцов материала композиционных шпал под нагрузкой, а с применением лазерной интерферометрии по разработанной методике оценки собственных напряжений показать, что пластичный характер разрушения образцов оптимального состава обусловлено снижением в нем уровня собственных напряжений; на устройства по определению бесконтактным методом лазерной интерферометрии деформаций образцов в процесс их нагружения получены патенты РФ №2672192 и №2710953.

9. Разработаны технологические схемы экструзионного (патент РФ №2738498) и инъекционного (патент РФ №2737711) изготовления не только композиционных шпал для железнодорожного пути различного назначения, но также мостового, переводного бруса и разработанной (патенты РФ №2707435 и Китая №20862218.6) инновационной конструкции композиционной шпалы, армированной бамбуковыми стержнями с регулируемой несущей способностью и пониженной (до 11% от предельно допустимой) величиной коэффициента линейного температурного расширения. Проведенная оценка жизненного цикла композиционной шпалы подтверждает конкурентоспособность предлагаемой конструкции композиционной шпалы относительно деревянных шпал в отношении экологической устойчивости.

Рекомендации. Для практического применения могут быть рекомендованы: многоуровневый – от атомно-молекулярного до макроуровня – подход к регулированию свойств композиционных материалов с учетом их работы в конструкции; оптимальный состав и физико-технические свойства такого материала композиционных шпал; методика бесконтактного измерения деформаций, в том числе собственных напряжений в материалах, с применением лазерной интерферометрии; технологические схемы экструзионного и инъекционного способов изготовления композиционных подрельсовых оснований, а также на бесконтактные испытания строительных материалов методом лазерной интерферометрии (патенты РФ №2672192 и №2710953), технологии изготовления (патенты РФ №2738498 и №2737711) и конструкцию (патенты РФ №2707435 и Китая №20862218.6) композиционных шпал.

Перспективы дальнейшей разработки. Дальнейшие исследования по рассмотренной в диссертации проблеме рекомендуется направить на: изучение свойств материала и конструкции композиционных шпал при длительном и циклическом воздействии нагрузок в сочетании со знакопеременными температурами; разработку требований к материалу и его составу для их применения на высокоскоростных китайских железнодорожных магистралях; производственной реализации полученных в диссертации результатов.

Перспективность дальнейшей разработки темы исследований обусловлена все нарастающей проблемой загрязнения суши и морской среды бытовыми и промышленными отходами, требующими их многотоннажной утилизации, чему и отвечает производство композиционных подрельсовых оснований.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Аскадский, А.А. Возможности предсказания коэффициента термического расширения материалов на основе поливинилхлорида / А.А. Аскадский, **Ч. Ван**, Е.А. Курская, В.И. Кондращенко, Т.В. Жданова, Т.А. Мацевич // *Строительные материалы*. – 2019. – № 11. – С. 57-65.

2. Аскадский, А.А. Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров / А.А. Аскадский, **Ч. Ван**, В.И. Кондращенко, Т.В. Жданова, Т.А. Мацевич // *Строительные материалы*. – 2020. – № 7. – С. 60-66.

3. Кондращенко, В.И. Композиционные подрельсовые основания. *Материалы* / В.И. Кондращенко, **Ч. Ван** // *Строительные материалы*. – 2020. – № 1-2. – С. 95-111.

4. Кондращенко, В.И. Композиционные подрельсовые основания. *Конструкции* / В.И. Кондращенко, А.В. Савин, **Ч. Ван** // *Строительные материалы*. – 2020. – № 10. – С. 52-76.

б) в изданиях, входящих в международную систему Scopus:

5. JING, Guoqing. Ballast Bed Structure and Cross Section Dimension Determination of Malaysia East Coast Rail Line / G.Q. Jing, **C. Wang**, W.F. Wu // *Journal of Railway Engineering Society*. – 2018. – Vol. 7. – pp. 7-10.

6. Kondrashchenko, V.I. Wood-Polymer Composite for the Manufacture of Sleepers / V.I. Kondrashchenko, Guoqing Jing, **C. Wang** // *Materials Science Forum. Trans Tech Publications*. – 2019. – Vol. 945. – pp. 509-514.

7. Sokolova, Yu.A. Optimization of the structures material based on the integrated approach / Yu.A. Sokolova, V.I. Kondrashchenko, **C. Wang**, S.P. Titov // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 456. – p. 012127.

8. Wang, C. Prediction of the coefficient of thermal expansion of building materials based on polyvinyl chloride / **C. Wang**, V.I. Kondrashchenko, A.V. Matseevich // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1425. – p. 012094.

9. Matseevich, T.A. Prediction of the modulus of elasticity of building materials based on wood-polymer composites / T.A. Matseevich, T.V. Zhdanova, **C. Wang**, V.I. Kondrashchenko and A.A. Askadskii // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 869, – p. 032009.

в) патенты на изобретение:

10. Кесарийский, А.Г. Устройство для определения физико-механических характеристик строительных материалов: пат. 2672192 Рос. Федерация: МПК G01B 11/16, G01N 3/02, G01B 21/02 / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, А.В. Кендюк, А.А. Казаков, Е.В. Тарарушкин, **Ч. Ван**, С.П. Титов. N 2017146259; заявл. 27.12.2017; опублик. 12.11.2018, бюл. №32.

11. Кесарийский, А.Г. Устройство для определения физико-механических характеристик строительных материалов: пат. 2710953 Рос. Федерация: МПК G 01 В 11/16, G 01 N 3/08, G 01 N 21/88 / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, Ихэ Чжан, **Ч. Ван**, Сяофэн Ли, К.О. Мурадян, С.П. Титов, М.Д. Шутин, N 2019121002; заявл. 05.07.2019; опубл. 14.01.2020, бюл. №2.

12. Кондращенко, В.И. Композиционная шпала [Текст]: пат. 2707435 Рос. Федерация: МПК E 01 В 3/46, E 01 В 3/44 / В.И. Кондращенко, А.А. Аскадский, А.А. Аскадский, П.А. Мороз, **Ч. Ван**, Г.Ц. Цзин, N 2019105718; заявл. 28.02.2019; опубл. 26.11.2019, бюл. № 33.

13. ВАН, Чжуан. Композиционная шпала, армированная бамбуком: пат. 20862218.6 Китайской Народной Республика. / **Ч. Ван**, Гоцин Цзин, В.И. Кондращенко, Лу Цзун, Цян Чжоу, Вэй Лу, CN210315076U; заявл. 10.06.2019; опубл. 14.04.2020. (на китайском)

14. Кондращенко, В.И. Устройство для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований: пат. 2738498 РФ: МПК E 01 В 3/46, В 29 С 48/025, В 29 С 48/16 / В.И. Кондращенко, А.Г. Кесарийский, **Ч. Ван**, Хуань Ван, Гоцин Цзин, N 2020116831; заявл. 22.05.2020; опубл. 14.12.2020, бюл. № 35.

15. Кондращенко, В. И. Устройство для изготовления композиционных армированных шпал: патент РФ №2737711: МПК В29С 43/02, В29С 43/06, В29С 43/18/ В.И. Кондращенко, А.Г. Кесарийский, **Ч. Ван**, Гоцин Цзин, Алеа Пейман. N 2020117213; заявл. 26.05.2020; опубл. 02.12.2020 Бюл. № 34.

г) в других изданиях и материалах конференций:

16. WANG, Chuang. Comparative Study on Technical Standards for Processing Indexes of Crushed Stone Ballasts on Chinese and Russian Railways / **C. Wang**, G.Q. Jing, L.C. Qie, L. Yao // Railway Quality Control. – 2017. – Vol. 45. – pp 5-8. (In Chinese)

17. WANG, Chuang. Comparative Study on the Physical Performance and Technical Indexes of Crushed Stone Ballasts on Chinese and Russian Railways / **C. Wang**, G.Q. Jing, L.C. Qie, L. Yao // Railway Quality Control. – 2017. – Vol. 45. – pp 9-13. (In Chinese)

18. WANG, Chuang. Technical Analysis of Chinese and Russian High-speed Ballast Bed-references for 350 km/h HSR Design / **C. Wang**, G.Q. Jing, L. Pang, L. Yao // Railway Standard Design. – 2017. – Vol. 61. – 61. – pp. 20-23. (In Chinese)

19. Кондращенко, В.И. Оптимизация составов материала строительных конструкций / В.И. Кондращенко, А.Ю. Гусева, В.Д. Кудрявцева, **Ч. Ван**, Е.В. Кондращенко, А.В. Ерохина // Сборник конференции инновационной технологии в архитектурном дизайне. – 2017. – С. 305-313.

20. Kondrashchenko, V.I. Model of Concrete Macrostructure. / V.I. Kondrashchenko, G.Q. Jing, E.V. Kondrashchenko, **C. Wang** // Proceedings of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies. Beijing: Metallurgical Industry Press. – 2017. – P. 347-354.

21. Кондращенко, В.И. Оптимизация свойств материала композиционной шпалы / В.И. Кондращенко, **Ч. Ван** // Сборник статей XV международной научно-

технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – 2018. – С. 222-224.

22. ВАН, Чжуан. Полимерный композит для изготовления шпал. / **Ч. Ван** // Сборник XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов". – 2018 – С. 86-92.

23. Кесарийский, А.Г. Исследование разрушения древесно-полимерного композита методами голографической интерферометрии. / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, Г.Ц. Цзин, **Ч. Ван** // Сборник четвертой междисциплинарной научной форумы с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». – 2018. – С. 678-681.

24. Кондращенко, В.И. Материалы и конструкции композиционных шпал / В.И. Кондращенко, **Ч. Ван** // Сборник статей XVI международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца. – 2019. – С. 238-242.

25. JING, Guoqing. Development and Application of Smart Railway Sleepers / G.Q. Jing, W.B. Du, **C. Wang**, X.Q. Huang // Journal of Railway Science and Engineering. – 2020. – Vol. 48. – Pp. 56-59. (In Chinese)

Ван Чжуан

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ (ДЛЯ УСЛОВИЙ КИТАЯ)

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	1 марта 2024	Формат 60×90/16
Объем 1,5 усл. п.л.	Заказ № 457	Тираж 80 экз.