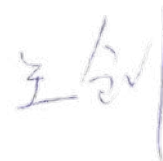


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

ВАН ЧЖУАН



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

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, с.н.с.
Кондращенко Валерий Иванович

Москва 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Перспективы развития подрельсовых оснований.....	12
1.2 Исходные материалы для изготовления композиционных шпал.....	15
1.3 Конструкции композиционных подрельсовых оснований.....	28
1.3.1 Гомогенные композиционные подрельсовые основания.....	29
1.3.2 Гибридные композиционные подрельсовые основания.....	33
1.4 Технологии изготовления композиционных шпал.....	39
1.5 Применение и вызовы развитию композиционных шпал.....	47
1.6 Выводы по главе 1, цель и задачи исследования.....	52
ГЛАВА 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ....	55
2.1 Свойства исходных материалов.....	55
2.2 Определение свойств материала стандартными методами.....	62
2.3 Определение свойств материала методами лазерной интерферометрии	68
2.3.1 Деформации образцов при статическом нагружении.....	68
2.3.2 Собственные напряжения в композите.....	71
2.3.3 Водопоглощение композита.....	73
2.4 Методы планирования активных экспериментов.....	76
2.5 Статистическая обработка результатов экспериментов.....	78
ГЛАВА 3 ТРЕБОВАНИЯ К СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛА КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ.....	80
3.1 Моделирование свойств материала композиционных шпал.....	80
3.2 Анализ варьируемых факторов при движении подвижного состава в кривой	83
3.3 Рациональные свойства материала композиционных шпал.....	99
3.4 Допустимая величина температурного расширения материала.....	104
3.5 Выводы по главе 3.....	107

ГЛАВА 4 СОСТАВ МАТЕРИАЛА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ШПАЛ.....	109
4.1 Модификация полимерной матрицы на атомно-молекулярном и наноуровне	110
4.1.1 Модификация полимерной матрицы на атомно-молекулярном уровне	110
4.1.2 Модификация полимерной матрицы на наноуровне.....	123
4.2 Оптимизация состава композита на микро- и мезоструктурных уровнях	132
4.2.1 Значения функций отклика в точках плана эксперимента.....	132
4.2.2 Решение задачи оптимизации системы.....	134
4.3 Оптимизация композиционных шпал на макроуровне.....	136
4.4 Влияние технологических факторов на изгибную жесткость композиционных шпал.....	139
4.5 Выводы по главе 4.....	144
ГЛАВА 5 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ.....	147
5.1 Физико-механические свойства материала.....	147
5.2 Трещиностойкость материала шпал.....	150
5.3 Физико-технические свойства материала.....	153
5.4 Лазерная интерферометрия материала композиционных шпал.....	159
5.4.1 Статическое нагружение образцов.....	159
5.4.2 Собственные напряжения в материале шпал.....	170
5.5 Выводы по главе 5.....	173
ГЛАВА 6 ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	176
6.1 Экструзионная технология изготовления композиционных шпал.....	176
6.2 Инжекционная технология изготовления композиционных шпал.....	181
6.3 Инновационная конструкция композиционной шпалы.....	186
6.4 Оценка жизненного цикла композиционных шпал.....	189
6.5 Выводы по главе 6.....	195
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	197
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	201

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	202
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Свойства образцов мао-бамбука.....	221
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Матрица плана эксперимента.....	226
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Влияние материала шпал на путь и подвижной состав....	231
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Погрешность расчетных моделей.....	233
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Расчет изгибной жесткости композиционных шпал.....	237
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Объединенный алгоритм.....	243
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Коэффициенты математических моделей.....	251
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 Анализ влияния технологических факторов на изгибную жесткость композиционных шпал.....	252
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 Воздействие на окружающую среду применения разных шпал на ж.д. пути в течение 50 лет.....	259
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 Акт опытно-промышленной апробации экструзионной технологии изготовления образцов материала композиционной шпалы.....	263

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Железобетонные (ж.б.) и деревянные шпалы относятся к важнейшим элементам железнодорожного (ж.д.) 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, 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 конструкции композиционных шпал. В тоже время не установлены рациональные свойства материала таких конструкций, что является одной из причин, ограничивающей широкое применение композиционных шпал в ж.д. 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 ж.д. колеи. Отличие величины КЛТР полимерной матрицы композиционных шпал 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, обучающимися 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 Erp, 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 технологии их производства: Твема, 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., показавшие 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. Баринова, А.А. Берлина, Ю.А. Курганова, В.С. Лесовика, Н.П. Луктцова, 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, H. Geng, Z.H. Zhao, W. Ferdous, P. Yu, T. Aravinthan, A van Belkom, M.M. Khotbehsara, H. Krejčířiková, P. Jagadeesh и других отмечается, что с ростом грузонапряженности ж.д. 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 композиционных шпал 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 вычислительного эксперимента (ВЭ) требований к свойствам материала композиционных шпал;
- установление оптимального состава материала композиционных шпал с учетом их работы в ж.д. пути;
- изучение влияния технологических факторов на свойства материала композиционных шпал;
- определение основных физико-технических свойств материала композиционных шпал;
- изучение методами лазерной интерферометрии (ЛИ) особенностей поведения материала композиционных шпал под нагрузкой;
- разработка инновационной конструкции и принципиальных схем изготовления композиционных шпал, армированных бамбуком;
- выполнение оценки жизненного цикла (ОЖЦ) применения композиционных шпал.

Рабочая гипотеза исследований состоит в том, что приемлемый уровень КЛТР композиционных шпал, обеспечивающий безопасную эксплуатацию ж.д. 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 (ПВХ) и их изготовление по экструзионной и инъекционной технологии.

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

- оптимального содержания наночастиц ($\approx 1\%$ по массе) на свойства ПВХ, 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;
- свойств материала композиционных шпал с учетом их работы в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”;
- многоуровневого подхода (от атомно-молекулярного до макроуровня – конструкции композиционной 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 ПВХ) для изготовления композиционных шпал; применении метода атомарных инкрементов для расчета свойств ПВХ, модифицированного различными полимерами; разработке математических моделей, адекватно описывающих физико-технические свойства полимерных композиционных материалов на основе ПВХ и наполнителей в виде мела, древесной муки и бамбуковой фибры; установлении рациональных физико-технических свойств материала композиционных шпал; разработке оптимальных составов и технологических параметров получения материала композиционных шпал в системах «ПВХ – тонкодисперсный мел – древесная мука» и «ПВХ – тонкодисперсный мел – бамбуковая фибра»; установлении влияния технологических факторов на их свойства; разработке рациональной конструкции и тех-

нологий – экструзионной и инжекционной, изготовления композиционных шпал, армированных 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 композиционных шпал, особенно в условиях Китая и Юго-Восточной Азии.

Теоретико-методологическая основа определила используемые в диссертации научные методы: анализ и синтез, обобщение и формализация, математическое моделирование (определение свойств материала композиционных шпал в зависимости от их работы в ж.д. системе), оптимизация (состава композита материала шпал), наблюдение и измерение (определение физико-технических свойств материала композиционных шпал). 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 композиционных шпал;
- рациональные свойства материала композиционных шпал, установленные проведением ВЭ в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”;
- данные по управлению физико-техническими свойствами полимерной матрицы шпал на основе ПВХ, модифицированной введением различных полимеров и углеродных нанотрубок;
- математические модели свойств полимерного композита в системах «ПВХ – тонкодисперсный мел – древесная мука» и «ПВХ – тонкодисперсный мел – бамбуковая фибра» и оптимизация состава материала композиционных шпал их основе;

- методика и результаты лазерно-интерференционных (ЛИ) исследований по определению собственных напряжений и структурных изменений в материале композиционных шпал 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 (ПЭ);

- данные экспериментальных исследований свойств материала композиционных шпал, в том числе установленные с применением методов ЛИ;

- технологические схемы изготовления композиционных шпал, армированных бамбуком, по экструзионной и инъекционной технологии;

- результаты оценки жизненного цикла применения композиционных шпал.

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; применением адекватных математических моделей, полученных методами ПЭ, к определению рациональных технологических параметров получения композиционных шпал; 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 «Безопас-

ность 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; Четвертом 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.

Автор приносит благодарность д.т.н., проф. А.А. Аскадскому за консультации при расчете свойств полимеров методом атомарных инкрементов, а также ведущему инженеру ООО «Лаборатория комплексных технологий» к.т.н. А.Г. Кесарийскому за помощь в исследовании композитов методом ЛИ.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Перспективы развития подрельсовых оснований

Железнодорожное (ж.д.) сообщение является важным и популярным средством передвижения людей и грузов в большинстве стран мира. Основными его видами являются грузовые и высокоскоростные пассажирские перевозки, а также пригородный транспорт с высокой плотностью движения в городе. Ж.д. транспорт более энергоэффективен, чем большинство других видов транспорта. В связи с этим развитие ж.д. транспорта и соответствующей инфраструктуры, особенно оптимизация и модернизация конструкций верхнего строения ж.д. пути, имеет существенное значение для устойчивого развития общества.

Конструкция балластного ж.д. пути включает верхнюю и нижнюю части: верхняя часть состоит из рельсов, узлов скрепления и шпал, а нижняя – из щебеночного балласта, песчаной подушки и земляного полотна (рисунок 1.1).

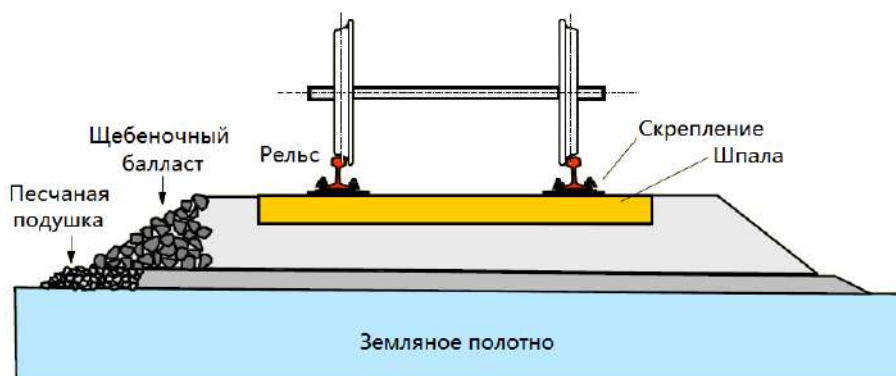


Рисунок 1.1 – Конструкция балластного ж.д. пути [1]

Шпала, как основной элемент верхней части конструкции балластного ж.д. пути, выполняет следующие функции [1]: а) фиксация рельсов при помощи скреплений; б) восприятие поездной нагрузки и равномерная передача усилий от рельсов основанию, в частности, балластной призме; в) обеспечение ширины колеи и уклона рельсов; г) электроизоляция между рельсами на электрофицирован-

ных участках железных дорог; д) обеспечение сопротивления поперечному и продольному уgonу рельсового пути.

Роль шпал подчеркивалась многими учеными не только с точки зрения их важнейших функций, связанных с безопасностью движения поездов [1, 2], но и с высокой стоимостью ремонта и другими эксплуатационными расходами [3-5]. Шпалы из дерева, стали и железобетона (ж.б.) являются традиционными конструкциями, которые имеют долгую и положительную историю применения на ж.д. транспорте.

Однако каждый вид имеет свои специфические преимущества и недостатки, которые не в полной мере соответствуют требованиям эффективной эксплуатации железной дороги. Деревянные шпалы имеют такие недостатки, как гниение, разрушение термитами (типично для Юго-Восточной Азии), образование и развитие трещин, ослабление костылей, смятие подрельсовых площадок, а также трудности с их повторным использованием при все возрастающей нехватке древесных ресурсов [6-9]. Стальная шпала обладает чрезвычайно высокой жесткостью, низкой коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, развитием усталостных трещин вокруг крепежных элементов, а также неудовлетворительный контакт с балластом [10-12]. Ж.б. шпалы имеют более высокую, чем деревянные и стальные, долговечность, но их отличает низкая ударная прочность, высокая жесткость, подверженность химической коррозии, трудности при монтаже из-за большой массы и некоторые другие недостатки [13-17].

Между тем, использование традиционных шпал оказывает большое влияние на глобальную экосистему, связанное с массовой вырубкой лесов, загрязнением окружающей среды консервантами, чрезмерной добычей песка в реках, массовым выбросом углекислого газа при производстве цемента и другими негативными явлениями [18, 19]. Кроме того, шпалы из традиционных материалов проявляют диаметрально противоположные достоинства и недостатки, что делает целесообразным поиск некоторого материала, обеспечивающего получение шпал с некоторыми компромиссными свойствами, которыми может обладать композиционная (синонимы – композитная, пластиковая, полимерная) шпала [20, 21]. Для их изго-

товления целесообразно использовать крупнотоннажные побочные продукты промышленности и отходы, в частности, полимерные, что будет способствовать решению экологических проблем.

Композиционная шпала является одной из перспективных типов шпал для строительства ж.д. путей. В отличие от подрельсовых оснований из традиционных материалов, конструкции из композиционных материалов имеют ряд преимуществ, к которым относятся высокая прочность, возможность регулирования свойств в широком диапазоне, стойкость к трещинообразованию, высокие электросопротивление и виброизоляционные свойства, стойкость ко многим агрессивным химическим средам, возможность их переработки и повторного использования и ряд других преимуществ, определяющих перспективность развития композиционных подрельсовых оснований в ж.д. отрасли. Сравнение основных свойств различных шпал приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение эксплуатационных свойств шпал из различных материалов

Материал	Сопротивление материала воздействию				Срок эксплуатации конструкции, лет
	гниения	нагрузки	выдергиванию крепежителей	врезанию подкладки	
Композит	очень хорошее	очень хорошее	очень хорошее	очень хорошее	до 50
Древесина	плохое	среднее	среднее	плохое	12-15
Бетон	очень хорошее	очень хорошее	очень хорошее	очень хорошее	12-15*

** указан фактический период эксплуатации до замены с рельсошпальной решеткой, расчетный срок службы бетона ж.б. шпал составляет 50 лет.*

Композиционные шпалы имеют хороший потенциал и перспективы для использования в различных типах ж.д. путей, используемых в городском ж.д. транспорте, в обычном, скоростном и высокоскоростном пути, на стандартной, узкой и ширококолейной железной дороге, на мостах с ездой без балласта и подъездных к ним участках, в стрелочных переводах, рудниках, портах, а также на безбалластном ж.д. пути.

Преимущества и недостатки, проявляющиеся при эксплуатации ж.д. пути, положительные и отрицательные стороны подрельсовых оснований из древесины и

бетона диаметрально противоположны и решение этой дилеммы лежит как раз в плоскости применения композиционных подрельсовых оснований, свойства которых являются своеобразным компромиссом свойствам материала оснований из бетона, стали и древесины (таблица 1.2) [22]. Отметим, что строгий подход к определению требуемых свойств композита (на примере композиционных шпал) впервые был реализован в работе [23].

Таблица 1.2 – Характеристики материала шпал [22]

Характеристики	Шпала		
	деревянная	композиционная	ж.б.
Масса шпалы, кг	65-75	85-190	215-320
Плотность материала, кг/м ³	0,44-0,64	0,89-1,60	2,40
Модуль упругости, ГПа	11,9-16,1	2,67-13,0	32,5

Композиционные шпалы, полученные по разным технологиям, существенно различаются по свойствам и массе. Однако, в разных странах (или областях) эксплуатационные условия ж. д. пути разные, соответственно, шпалы должны иметь подходящие свойства для определённой ж. д. линии. В связи с этим, весьма актуальной задачей перед производителями композиционных шпал является установление их рациональных свойств, определяемых условиями эксплуатации ж.д. пути.

1.2 Исходные материалы для изготовления композиционных шпал

Композиционные шпалы состоят из полимерной матрицы и, как правило, размещенных в ней армирующих элементов, имеющих различную форму и располагающихся вдоль шпалы. В свою очередь, матрица шпалы представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из полимера, являющегося непрерывной фазой композита – матрицей, и расположенных в нем дискретных армирующих элементов в виде фибры различной природы, микродисперсных наполнителей, а также модификаторов.

Благодаря проявлению синергетического эффекта в композите при рациональном сочетании вида и содержания входящих в него компонентов свойства

композиционного материала шпал могут изменяться в широком диапазоне с получением набора свойств, недоступных каждому из входящих в его состав составляющих в отдельности. При этом широкий спектр вида армирующих и матричных материалов дает возможность создавать композит с теми свойствами, которые соответствуют назначению изделия, в том числе создание композиционных шпал с требуемым комплексом свойств, рациональным для их применения на ж.д. пути.

На мировом рынке существуют разнообразные композиционные шпалы, отличающиеся исходными материалами, технологией изготовления и конструкцией. В этой связи классифицировать композиционные шпалы можно по разным признакам, в частности, по типу матрицы, по способу армирования композитов, по наличию, отсутствию и виду армирующих элементов и прочее. Ниже в таблицах 1.3-1.7 приводится классификация композиционных шпал по способу армирования и применяемым исходным материалам, выполненная на основе анализа литературных источников [24-77].

Из предложенной классификации следует, что для изготовления композиционных шпал применяют разнообразные материалы. В частности, в качестве составляющих (компонентов) матрицы композиционных шпал используют вторичные отходы из пластика (полиэтилен сшитый, низкого и высокого давления, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол и т.д.), твердую полиуретановую пену, натуральный каучук, эпоксидную и фенолоформальдегидную смолы и т.д, а также комбинации из них. Армирующими матрицу элементами при этом могут служить как искусственные (стекловолоконные, металлические, базальтовые, углеродные, полиэфирные волокна, стеклоткани, древесноволокнистые плиты, ламинаты и пр.), так и натуральные (древесные, бамбуковые, кокосовые, из багасса, из сизали и т.д.) волокна, а также щепа. Свойства матрицы модифицируют введением измельченных твердых промышленных отходов (шлак, измельченные изношенные шины и использованных стекловолоконных полимерных композитов и др.) и минеральных наполнителей (карбонат кальция, графит, зола-уноса, сера, слюда и др.).

Обращает внимание то обстоятельство, что в разных странах/областях отдается приоритет определенным материалам, для которых имеется соответствующая

сырьевая база или развиты базовые технологии. Например, в Америке и Европейских странах отходы пластмассы, резины и стекловолокна являются основным исходным сырьем для изготовления композиционных шпал [24, 25, 27, 28, 30-34, 44]. В России основное внимание уделяется использованию отходов деревопереработки и бытового пластика, а также улучшению свойств деревянных шпал комбинацией других материалов или элементов [26, 29, 38-42]. Япония специализируется на синтетических шпалах из полиуретановой пены и стекловолокна [52]. Развитие производства композиционных шпал из пенополиуретана и из стеклопластика являются основными направлениями в Китае [53, 54, 57, 58]. В Австралии в основном разработки связаны с производством композиционных шпал из склеенных ламинатов или из геополимерных материалов [66-70]. Кроме того, в Индии, Таиланде, Индонезии, Китае и ряде стран Юго-Восточной Азии, где имеются богатые натуральные возобновляемые ресурсы бамбука, сизали и др., интерес проявляется к использованию вместо искусственных элементов натуральных волокон (щепы) из быстрорастущих кустарников [37, 43, 55, 56, 71].

Анализ используемых сырьевых материалов позволяет сделать выбор на перспективных для Китая таких материалах, как вторичный поливинилхлорид (ПВХ), применяемых в качестве матрицы, и бамбук, используемый в качестве фибры и армирующих конструкцию шпалы брусков.

Обоснованием для применения вторичного ПВХ в качестве связующего матрицы композиционных шпал является:

а) в течение последних 65 лет годовой объем производства пластмасс увеличился почти в 200 раз – с 1,5 млн. т в 1950-х до 381 млн. т в 2015 году [78]. Из всего когда-либо произведенного в мире пластика переработано лишь 9%. Около 12% было сожжено, а остальные 79% накопились либо на свалках, либо в окружающей среде [79]. Огромное количество пластиковых отходов загрязняет окружающую среду и угрожает, тем самым, здоровью человека. Поэтому отходы пластмасс

Таблица 1.3 – Сырьевые материалы, применяемые для изготовления композиционных шпал без или только с короткими волокнами в полимерной матрице

Название продукции	Страна	Исходные материалы	Область применения	Ссылка
1	2	3	4	5
USPL Duratie композитная шпала	США	Отходы ПНД*, рубленые осколки стекловолокнистых полимерных композитов	Для магистральных и других транзитных путей, в том числе мостов	[24]
Polywood Переработанная пластиковая шпала	США	Отходы ПНД*, отходы полистирола	Для магистральных и других транзитных путей, в том числе мостов	[24]
AXION ECOTRAX(R) композитная ж.д. шпала	США	100 % переработанный пластик (пластиковые пакеты, бутылки, и т. д.)	Стандартная шпала, переводной и мостовой брусья	[25]
АКСИОН РУС композитная шпала	Россия	Отходы разных видов переработанного пластика	Для замены деревянных и железобетонных шпал	[26]
TieTek композитная шпала	США	Изношенные пластики, шины и стекловолокна, минеральные наполнители	Стандартная шпала, переводной и мостовой брусья	[27-28]
АпАТэК безбалластное мостовое полотно и брус	Россия	Полимерные композитные материалы	Для замены безбалластных мостовых полотен и брусьев	[29]
IntegriCo ж.д. композитная шпала	США	100 % вторичные отходы из пластика, в матрице содержит сшитый полиэтилен, имеющий сверхвысокую прочность	Для первоклассных, пригородных, промышленных и рудничных ж.д. путей	[30]
I-PLAS пластиковая шпала	Англия	100 % бытовой и промышленный переработанные пластики	Для замены деревянных шпал	[31-32]
SICUT пластиковая композитная шпала для ж.д. магистралей	Англия	Вторичные полиэтилен высокой плотности и полипропилен	Для замены деревянных шпал	[33]

1	2	3	4	5
Fraunhofer ICT шпала из смешанных пластиковых отходов	Германия	Смешанные пластиковые отходы и изношенные стекловолокна, вспомогательные компоненты	Для замены деревянных шпал	[34]
SUNRUI пластиковая композиционная шпала	Китай	Пластиковые композиты	Для стальных ж. д. мостов	[35]
Tianjin Yanwen Weiye пластиковая ж.д. шпала	Китай	Отходы ПВХ* 46-60%, порошок отходов резины 18-25%, отходы ПТФЭ* 1-5%, отходы ФЭП* 1-5%, отходы ПП* 1-15% и т. д.	Для замены деревянных шпал	[36]
Композиционная шпала на основе лесных и промышленных отходов	Китай	Древесные отходы, стекловолокно, фенольная смола, промышленная зола	Для замены традиционных шпал	[37]
Древесностекловолокнистые композиционные шпалы	Россия	Фурановые смолы, минеральные наполнители и заполнители, древесная щепа, стекловолокно и т. д.	Для замены традиционных шпал	[38]
Композиционная шпала на основе отходов лесного комплекса	Россия	Смола ФАМ*, бензолсульфокислота, песок речной, графитовая электродная мука, мука из пиритовых огарков, щепа, стеклосетка и т. д.	Для лесовозных ж.д. путей и дорог общего назначения, а также подъездных и трамвайных путей	[39]
Литая шпала для ж.д. путей широкой колеи	Россия	Древесные волокна 50-70%, металлическая проволока 30-10%, каучук 5-10%, вискоза 5-10%	Для ж.д. путей широкой колеи	[40]
Древесно-композиционная шпала	Россия	Древесные волокна 80%, связующее 10%, порошок металла 10%	Для ж.д. путей широкой колеи	[41]

1	2	3	4	5
Составная композиционная шпала	Россия	Мелкая резиновая крошка старых автомобильных шин 50%, древесное волокно 30%, полипропилен 10%, антисептик ЖТК 10%	Для ж.д. путей широкой колеи	[42]
Композиционная шпала на основе натурального каучука	Таиланд	Натуральный каучук, сажа, стеариновая кислота, антиоксидант 6PPD, ускоритель CBS, сера, оксид цинка, рисовая шелуха, багасса и т. д.	Для ж.д. пути узкой колеи	[43]
GreenRail композиционная шпала	Италия	Железобетонный брус и полимерная оболочка (переработанный пластик и изношенные шины)	Для замены традиционных шпал	[44]
Tufflex пластиковая шпала	Южная Африка	Смешение переработанного полипропилена и полиэтилена (в том числе ПНД* и ПВД*)	Для метрополитена, шахтных дорог, и ж.д. путей узкой колеи	[45]
Композиционная ж.д. шпала	Индия	Отходы ПНД* 55%, резиновая крошка 12,5%, стекловолокна 12,5%, наполнители (CaCO ₃ , слюда и т. д.) 20%	Для замены традиционных шпал	[46]
Композиционная шпала на основе отходов пластика и железного шлака	Египет	Полиэтилен высокой плотности, шлак, карбонат кальция, полиэфирная смола, стекловолокно	Для замены деревянных шпал	[47, 48]
Permal Wallace ж.д. шпала из стеклопластика	Индия	Армирующие волокна и матрица из смолы	Для замены деревянных шпал	[49]
Резиновая бетонная шпала	Индия	Портландцемент, речной песок, измельченный заполнитель, резиновая крошка, порошок кремния, суперпластификатор и т. д.	Для замены ж.б. шпал	[50]
Duratrack ж.д. шпала	Австралия	переработанные пластики и полистирен 85%, добавки 15%	Для замены традиционных шпал	[51]

* ПНД и ПВД – соответственно полиэтилен низкого и высокого давления; ПВХ – поливинилхлорид, ПТФЭ – политетрафторэтилен, ФЭП – фторированный этилен-пропилен, ПП - полипропилен; ФАМ – фурфуролацетоновая смола.

Таблица 1.4 – Сырьевые материалы, применяемые для изготовления композиционных шпал с длинными волокнами, сетками или тканями в полимерной матрице

Название продукции	Страна	Исходные материалы	Область применения	Ссылка
SEKISUI FFU синтетическая шпала	Япония (Sekisui)	Твердая полиуретановая пена и стекловолокно	Для магистральных путей, ВСМ*, стрелок, и мостов без балласта.	[52]
SUNRUI синтетическая шпала	Китай	Твердая полиуретановая пена и стекловолокно	Для метро, легкорельсового транспорта, магистральных и тяжелогрузных линий	[53]
KEBOS армированная волокном шпала из вспененного уретана	Китай	Сплошная пенополиуретан, армированный стекловолокном	Для магистральных путей, ВСМ, стрелок, и мостов	[54]
Консолидированная бамбуковая шпала	Китай	Лучины бамбука, смола и т. д.	Для замены традиционных шпал, для рудничных путей	[55-56]
Стеклопластиковая синтетическая шпала	Китай	Термопластичная смола, сетка из стекловолокна и т. д.	Для замены традиционных шпал	[57]
Шпала из армированного волокнами пластика особой формы	Китай	Е-стеклоткань, кварцевый песок, смола	Для магистральных участков, применяющих системы контроля подвижного состава	[58]
Композитная ж.д. шпала	Австралия	Полимербетон и волокнистые композиты	Для замены деревянных, стальных и ж.б. шпал	[59]

* *ВСМ – высокоскоростная магистраль.*

Таблица 1.5 – Сырьевые материалы, применяемые для изготовления композиционных шпал с армирующими брусками или профилями в полимерной матрице

Название продукции	Страна	Исходные материалы	Область применения	Ссылка
KLP гибридная полимерная шпала	Нидерланды	100% переработанные пластмассовые материалы и арматура	Для магистральных путей, стрелочных переводов, мостов	[60, 61]
Пластиковая композитная шпала с деревянным сердечником	США	Пластмассовая матрица из различных пластмасс без разделения или специальной очистки, которая содержит сшитый полиэтилен; прямоугольные дубовые бруски	Для замены деревянных шпал	[62]
Композиционная шпала, армированная брусками древесины	Россия	Деревянные бруски, древесные щепы, феноло-формальдегидная смола и т. д.	Для замены традиционных шпал	[23]
Деревянная шпала, плакированная в стеклокомпозите	США	Стекловолокно, эпоксидная смола, резорцинформальдегидная грунтовка, древесная сердцевина	Для повышения свойств и срока службы деревянных шпал	[63]
Пултрузионная композитная шпала с геополимерным бетоном	Австралия	Пултрузионные полые профили (изофталевая смола и вытянутое вдоль шпалы стекловолокно в объеме 60%), заполненные полимербетоном на основе золы-уноса	Для легкорельсового транспорта	[64, 65]

Таблица 1.6 – Сырьевые материалы, применяемые для изготовления композиционных шпал из склеенных ламинатов

Название продукции	Страна	Исходные материалы	Область применения	Ссылка
Композитная шпала рациональной конструкции	Австралия	Сэндвич-панели, склеенные и покрытые эпоксидной полимерной матрицей	Для замены деревянных шпал на путях узкой колеи	[66]
Волоконные композитные подрельсовые бруски	Австралия	ЛВЛ-брус*, ламинаты из углеродного волокна сверху и снизу, защищенные с поверхности шпалы стеклянными волокнами	Для стрелочных переводов	[67]
Клеевая ламинированная шпала	Австралия	Армированные стекловолокном полимерные наружные пластины с сердцевиной из модифицированной фенолформальдегидной смолы	Для стрелочных переводов	[68]
Carbonloc армированная полимерная шпала	Австралия	Сэндвич-панели из волокнистого композита и полимерной смолы, четыре арматурных стержня (для мостовых брусьев), заполнители и т. д.	Для замены деревянных шпал	[69, 70]
Железнодорожная шпала из композитных материалов сэндвич	Индонезия	Стеклоткани, древесно-волокнисты пластик из багассы и кокосовых волокон, эпоксидная смола	Для мостовых брусьев	[71]

* ЛВЛ-брус – брус LVL, брус из клеёного шпона.

Таблица 1.7 – Сырьевые материалы, применяемые для изготовления композиционных шпал модификацией традиционных шпал

Название продукции	Страна	Исходные материалы	Область применения	Ссылка
Бетоны, армированные базальтовыми волокнами	Китай	Базальтовые волокна 6-30 мм, цемент, заполнитель, вода, химические и минеральные добавки	Для безбалластных бетонных плит и традиционных бетонных подрельсовых оснований	[72]
Железобетонная шпала, армированная полипропиленовыми волокнами	Китай	Полипропиленовые волокна (0,02-1,0 кг/м ³), цемент, вода, арматура, мелкий и крупный заполнители	Для повышения физико-механических свойств ж.б. шпал	[73]
Усиленная деревянная шпала	Россия	Деревянная шпала, металлические опилки 50%, древесные волокна 30%, полистирол 20%	Для сохранения торца деревянных шпалы от растрескивания	[74]
Шпала из полимербетона сложной конструкции	Корея	Полимербетонная конструкция волнового типа, бетон	Для снижения шума качения колёс ВСМ	[75]
Экологичная шпала из предварительно напряженного бетона	Корея	Частичная замена цемента и песка доменным гранулированным шлаком и шлаком электродуговой печи	Вместо ж.б. шпал и подрельсовых оснований	[76]
Ж.б. шпала, армированная композитными материалами	Иран	Стекловолокна или углеродные волокна с эпоксидной смолой для армирования ж.б. шпал	Для усиления ж.б. шпал	[77]

должны подвергаться более полной переработке и утилизации при производстве крупнотоннажной продукции, к которой относятся и композиционные шпалы;

б) по сравнению с другими термопластичными полимерами ПВХ, полимеризуемый из мономерного винилхлорида под действием инициатора, обладает повышенными показателями термостойкости, водо-, износо-, коррозио- и огнестойкостью, высоким электросопротивлением, легкой доступностью сырья при низкой цене и другими важными свойствами [80], в частности, при прочих равных условиях основные механические свойства и атмосферостойкость композитов на основе ПВХ значительно выше, чем у композитов на основе полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП) и пр. [81]. Сравнение физико-механических свойств наиболее распространенных полимеров приведены в таблице 1.8, из которой видны преимущества ПВХ;

в) имеется обширная сырьевая база использования вторичного ПВХ, объём производства которого занимает первое место в Китае. Китай занимает более 40% мировых мощностей по производству ПВХ, намного опережая Северную Америку и Западную Европу. При этом ПВХ отличается высоким соотношением цены и качества, цена его вторичных гранул на рынке ниже, чем вторичных гранул ПЭ и пр.

Таблица 1.8 – Основные свойства полимеров, перспективных для изготовления композиционных шпал [82-86]

Полимер Свойства	ПВД	ПНД	ПП	ПВХ	ПС	АБС- пластик
Плотность, г/см ³	0,92	0,95	0,91	1,61	1,05	1,05
Прочность при растяжении, МПа	7-16	18-32	26-41	34-62	30-60	35-50
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0,2	0,7	0,9-1,8	1,1-3,7	2,5-3,5	1,7-2,9
КЛТР* 10 ⁶ , °С ⁻¹	300	110-300	110-180	50-80	70	74
Температура плавления, °С	112	135	170	212	240	170
Прочность при изгибе, МПа	12-20	20-40	44	70-120	35	50-87
Относительное удлинение, %	150-1000	300-800	200-700	40	30	3
Ударная вязкость, кДж/м ²	–	2	6,5	30	6,5	12

Обоснованием применения бамбука для производства композиционных шпал для условий Китая служит следующее:

а) коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) пластмасс до 25 раз превышает этот показатель для стали и бетона, они склонны к ползучести и накоплению остаточных деформаций под действием циклических нагрузок от подвижного состава, что делает использование шпал из чистых пластиков неприемлемым и требует снижения этих важных для обеспечения требуемой ширины ж.д. колеи показателей, для чего и предполагается использование в диссертации бамбука в качестве бамбуковой щепы, дисперсно-армирующей полимерную матрицу, и стержней бамбука в роли упругих и армирующих шпалу элементов;

б) бамбук широко распространен в Азии, Латинской Америке и Африке (рисунок 1.2) [87], многие азиатские страны, такие как Китай, Индия, Мьянма, Индонезия, Таиланд и Вьетнам, очень богаты бамбуковыми ресурсами, но применение которых ещё ограничено и нуждается в расширении при помощи новой технологии. Например, в Китае (в основном в южном Китае – см. рисунок 1.3 [88]) годовой объем производства бамбука достигает 18 млн. т, из которых до 50% составляет мао-бамбук, объемы применения которого явно недостаточны [89, 90];

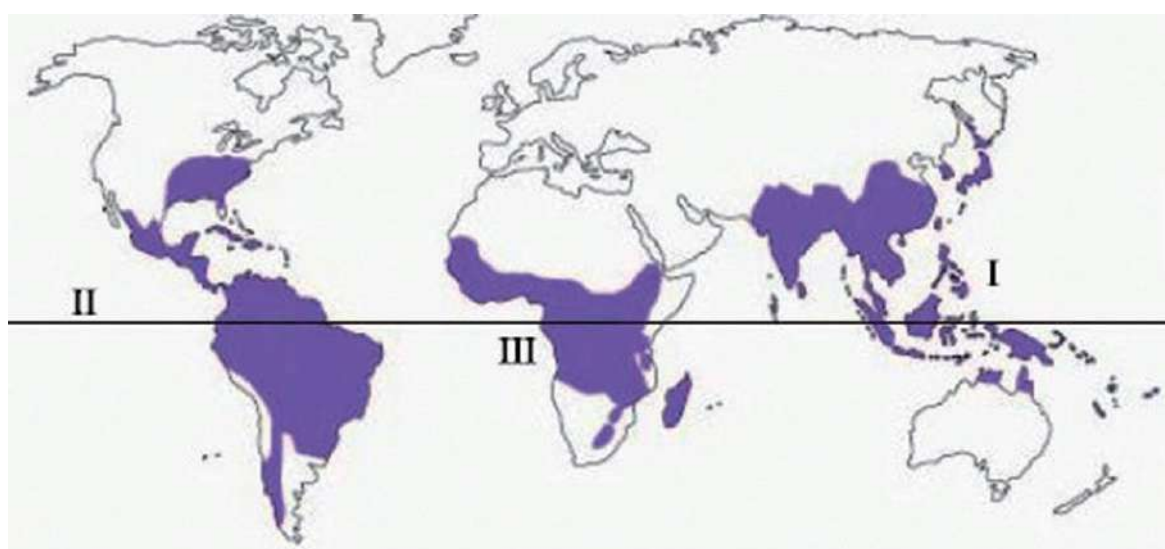


Рисунок 1.2 – Области произростания бамбука: Азиатско-Тихоокеанский (I), Американский (II) и Африканский (III) регионы [87]

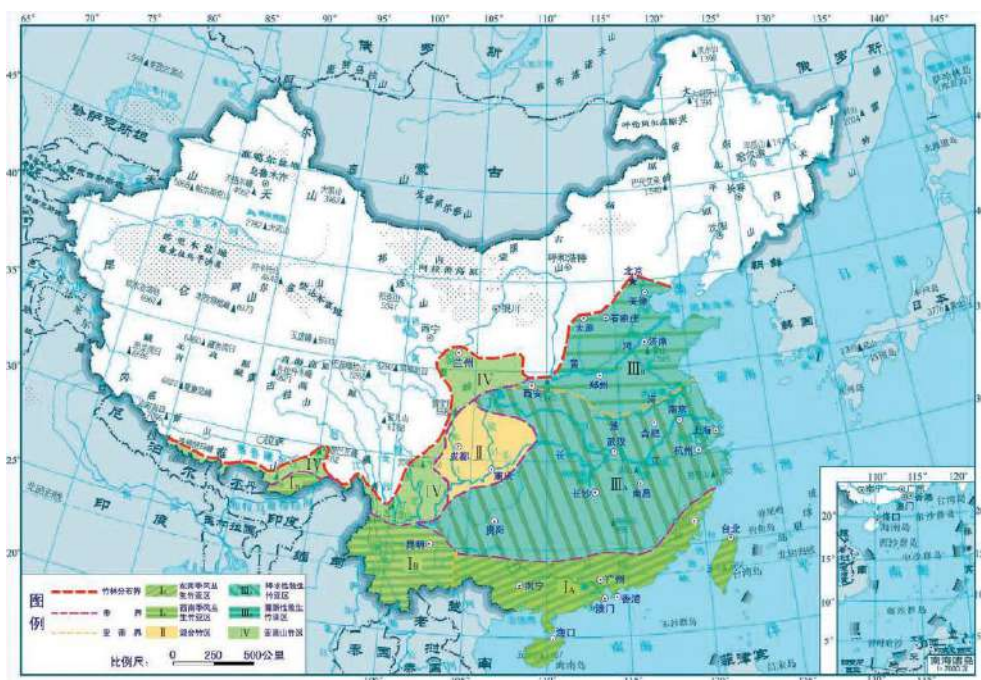


Рисунок 1.3 – Распространение бамбука в Китае [88, 91]

Примечание: мао-бамбук в основном встречается в провинциях Чжэцзян, Фуцзянь, Цзянси, Хунань, Хубэй, Сычуань, Аньхой, Цзянсу, Гуйчжоу, Гуандун, Гуанси, Юньнань и Шаньси. Центральный лесной массив расположен между 25-30° с.ш. и 110-122° в.д.

в) благодаря особому анатомическому строению, многослойной волокнистой структуре, отличной от клеточных стенок волокон древесины, и механизму разрыва, бамбук и его волокна могут служить превосходными натуральными материалами как для армирования конструкции композиционной шпалы, так и регулирования свойств ее полимерной матрицы;

г) бамбук, являясь биологически разлагаемым и экологически безопасным материалом (например, углеродные или асбестовые волокна небезопасны для человека и животных), растет очень быстро и при рациональной рубке после разовой посадки эти участки могут длительно использоваться, что не только позволяет получать большую массу бамбука, но и способствует сохранению почвы, улучшает экологию среды;

д) естественные полости и структура перегородок жердей бамбука обеспечивают высокую сопротивляемость сжатию и изгибу, которые могут быть введены в композиционную шпалу в качестве упругих и усиливающих конструкцию

элементов, способствующие улучшению ее механических свойств при одновременном снижении расхода исходных материалов.

Кроме того, композиционные шпалы с использованием бамбука и ПВХ могут быть подвергнуты последующей (вторичной) переработке и использоваться для получения новых композиционных шпал, реализуя тем самым на практике принцип устойчивого развития человечества. Процессы их получения, применения и утилизации потребляют мало энергии, не сопровождаются выделением газообразных, жидких и твердых отходов, что позволяет отнести композиционные шпалы к экологически безопасной продукции. В этом отношении переработка деревянных и ж.б. шпал с получением продукции того же типа более затруднительна.

1.3 Конструкции композиционных подрельсовых оснований

По сравнению с традиционными конструкциями верхнего строения ж.д. пути, композиционные подрельсовые основания имеют ряд преимуществ, связанных с возможностью достижения компромиссных (по сравнению с мягкой но малой массы конструкции из древесины и тяжелой, но жесткой – из бетона) физико-механических характеристик, обеспечения экологической безопасности применения, высокой долговечности, их переработки и повторного использования полученного при этом сырья для изготовления конструкций-аналогов, согласуясь тем самым с реализацией принципа-парадигмы устойчивого развития, в частности, ж.д. отрасли, с возможностью в значительной степени противостоять вызову современного техногенного общества за счет утилизации производимых им промышленных отходов при изготовлении композиционных шпал и брусьев и других видов подрельсовых оснований, что делают их все более и более конкурентоспособными и перспективными конструкциями.

Композиционные подрельсовые основания состоят из различных материалов, поэтому имеют хорошую конструктивность – возможность их создания с желаемыми внутренней структурой и внешней конфигурацией, что можно наблюдать на таком его самом распространенном представителе, как композиционные

шпалы, которые по аналогии со всеми композиционными подрельсовыми основаниями будем подразделять на гомогенные и гибридные.

1.3.1 Гомогенные композиционные подрельсовые основания

Такие композиционные подрельсовые основания представляют собой композит, состоящий из полимерной матрицы с равномерно распределенными в ней армирующими элементами в виде дисперсных минеральных частиц, древесной щепы или волокон, которые бывают короткими или длинными.

Гомогенные композиционные подрельсовые основания, армированные короткими волокнами и/или щепой. Данный тип композиционных подрельсовых оснований получают из первичных или переработанных вторичных полимеров (сшитый полиэтилен, полиэтилен низкого и высокого давления, полипропилен, поливинилхлорид, изношенные шины, натуральный каучук и т.д.) в смеси с различными наполнителями (песок, гравий, бой стекла, короткие стеклянные волокна длиной до 20 мм и т.д.). При этом свойства композиционного материала в таких подрельсовых основаниях в основном определяются свойствами полимера.

К этому виду композиционных подрельсовых оснований относятся такие их марки, как Axion- [25], TieTek- [27], IntegriCo- [30], I-PLAS- [31], SICUT-пластиковая шпала [33], MPW- [34], а также шпалы из натурального каучука [43], Tufflex-композитная шпала [45], Duratrack-полимерная шпала [51], и др., конструкции которых показаны на рисунке 1.4.

Подрельсовые основания данного типа изготавливаются преимущественно по экструзионной или литьевой технологии с получением непрерывного бруса, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда. Благодаря высокой производительности, простоте конструкции и низкой цене сырьевых материалов, гомогенные подрельсовые основания имеют пониженную себестоимость, что предопределяет их высокую рыночную привлекательность.

а)



б)



в)



г)



д)



е)



ё)



ж)



з)



и)



й)



к)



Рисунок 1.4 – Конструкции гомогенных композиционных подрельсовых оснований
 а – Axion-композитная шпала [25]; б – то же, ТВЕМА [26]; в – то же, TieTek [27];
 г – то же, IntegriCo [30]; д – то же, I-PLAS [31]; е – SICUT-пластиковая шпала [33];
 ё – то же, MPW [34]; ж – мостовой пластиковый брус компании Tianjin Yanwen
 Weiye [36]; з – то же, из натурального каучука [43]; и – то же, Tufflex [45];
 й – Duratrack-полимерная шпала [51]; к – пластиковая трамвайная шпала [92]

Кроме того, они обладают такими преимуществами, как хорошая упругость конструкции, низкое влияние на истираемость балластного щебня при наличии хорошего контакта с ним, определяющим высокую сдвигоустойчивость ж.д. пути, удовлетворительную коррозионную стойкость, простоту перевозки и укладки и пр., что предопределяет перспективу их широкого применения на большинстве участков балластных ж.д. путей.

Однако из-за большого содержания полимерного связующего при низком количестве армирующих матрицу включений недостатком таких конструкций является относительно большой КЛТР, что ограничивает их применение в регионах с большим перепадом межсезонных температур.

Гомогенные композиционные подрельсовые основания, армированные длинными волокнами. К данному типу относятся композиционные шпалы/бруссы, состоящие из полимерной матрицы (твердая полиуретановая пена, эпоксидная смола, фенолоформальдегидная смола или другие термореактивные смолы) и включений в виде волокон длиной более 20 мм (стекловолокно, бамбуковые, древесные волокна и др.).

Расположение длинных волокон в полимерной матрице может совпадать [52, 56] или отличаться [68] от направления продольной оси конструкции, формируя тем самым зависимость физико-технических свойств композита вдоль конструкции от свойств волокон, а в перпендикулярном к продольной оси направлении – преимущественно от свойств полимера. К данному виду подрельсовых оснований относятся консолидированные бамбуковые и SEKISUI FFU-синтетические основания (рисунок 1.5).

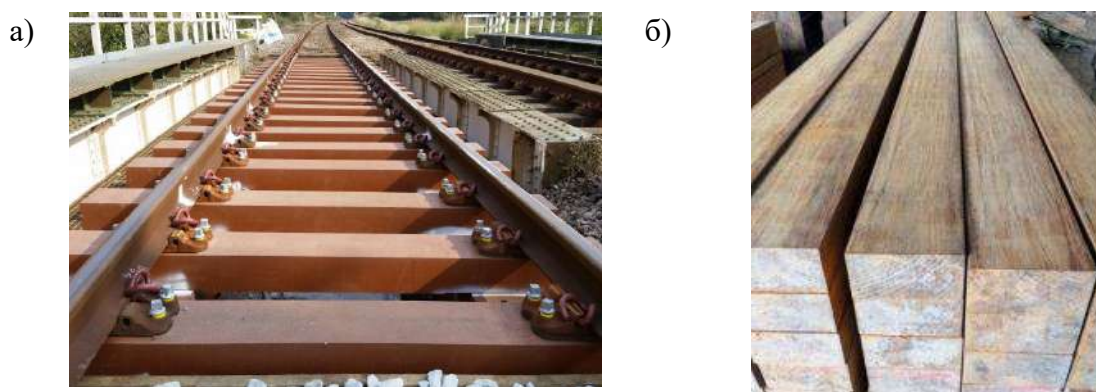


Рисунок 1.5 – Конструкции гомогенных композиционных подрельсовых оснований с длинными волокнами
 а – SEKISUI FFU-синтетические основания [52];
 б – консолидированные бамбуковые основания [56, 93]

Подрельсовые основания данного типа изготавливают по пултрузионной (рисунок 1.5а) и прессовой (рисунок 1.5б) технологии, чем обеспечивается ее прямоугольное сечение и расположение длинных волокон параллельно продольной оси конструкции [52, 56]. Подрельсовые основания данного типа имеют более высокие прочность и модуль упругости при изгибе, более низкий КЛТР, чем у изделий первого типа. В связи с этим, хотя у них при этом и выше цена, что обусловлено применяемыми материалами и технологией, такие конструкции могут применяться в районах с большими перепадами температуры и на ж.д. высококлассных линиях, где требования к геометрическим параметрам ж.д. колеи более высокие, а также на стальных ж.д. мостах с ездой без балласта, где требуются высокие сопротивление сдвигающей силе и изгибающему моменту.

1.3.2 Гибридные композиционные подрельсовые основания

Хотя некоторые типы гомогенных композиционных подрельсовых оснований (особенно армированные короткими волокнами или без них) находят применение в ж.д. пути, у них по-прежнему существуют такие проблемы, как плохое обеспечение стабильности ширины ж.д. колеи в условиях большого температурного перепада, недостаточные физико-механические показатели для их повсеместного применения, например, в качестве, мостовых брусьев, высокая стоимость и некоторые другие причины, ограничивающие сферу их эффективного применения.

Гибридные композиционные подрельсовые основания – это конструкции верхнего ж.д. пути из композитных материалов, в которых один или несколько видов дискретных армирующих элементов (ж.б. балки [44], арматура [60, 61, 94], деревянные бруски [62], полые профили [64], панели [70, 95], стальной жёлоб [96] и т.д.) комбинируются с гомогенными полимерными композитами (рисунок 1.6). Иногда также используются различные сенсоры для создания «умных» шпал [97].

а)



б)



в)

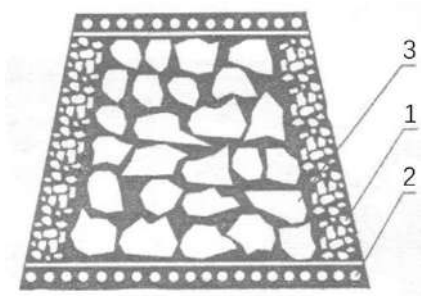
I



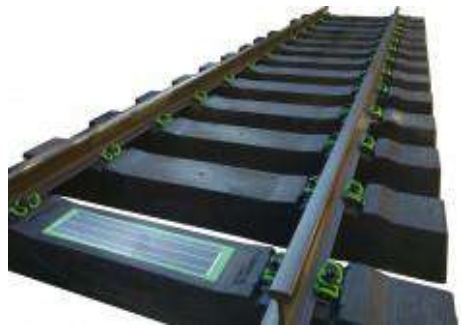
II



г)



д)



е)



ё)



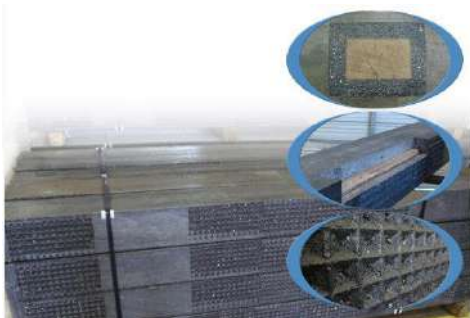
ж)



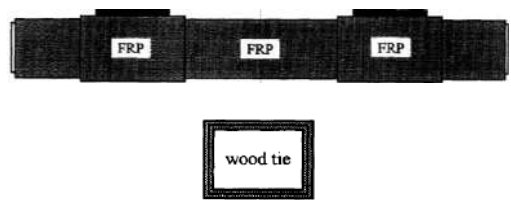
з)



и)



й)



к)



л)



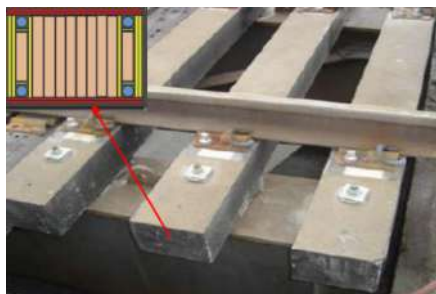
м)



н)



о)



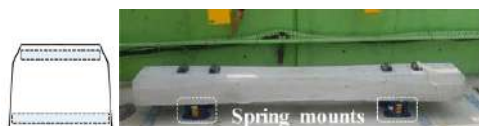
п)



р)



с)



т)



у)



Рисунок 1.6 – Конструкции гибридных композиционных подрельсовых оснований
 а – пластиковая шпала, армированная полым металлическим брусом [23]; б – композиционная шпала, армированная двумя деревянными брусками [23]; в – безбалластное мостовое полотно (I) и мостовой брус (II) из композитных материалов [29]; г – сечение композиционной шпалы, состоящей из полимербетонной матрицы (1), армирующей стеклосетки (2) и древесного заполнителя (3) [38]; д – Greenrail-шпалы из ж.б. сердцевин с полимерной оболочкой [44]; е – Permal Wallace-пластиковый мостовой брус, армированный волокнами [49]; ё – композиционная шпала из полимербетона и стекловолокон [59]; ж – то же, KLP-мостовой брус [60]; з – KLP-композиционная шпала, армированная двумя стержнями [61]; и – композитная шпала с деревянными брусками [62]; й – шпала из деревянной серд-

цевины и стеклокомпозита [63]; к – полые полимерные профили, заполненные геополимерным бетоном [64]; л – шпала из клееных деревянных досок и полимербетона [66]; м – шпала из композитных сэндвич-панелей, стекловолокон и смолы [66]; н – композиционный ламинированный мостовой брус из древесины [68]; о – мостовые брусья из клееных деревянных досок, усиленных четырьмя арматурными стержнями [70]; п – ламинированный композитный мостовой брус из полимера, стеклосетки, багасы и шелухи какао [71]; р – шпала из ж.б. и полимербетона в форме волны [75]; с – консолидированный бамбуковый брус, армированный четырьмя стержнями [94]; т – стальной желоб, заполненный бетоном [95]; у – деревянная шпала, покрытая полиуретановым эластомером [98]

Сочетание гомогенных полимерных композитов с армирующими элементами приводит к улучшению эксплуатационных свойств подрельсовых оснований. Благодаря их наличию такие изделия имеют более высокое сопротивление изгибу и сдвигу, чем гомогенные композиционные подрельсовые основания и больше подходят для применения на ж.д. мостах с ездой без балласта, где требуется обеспечение их вязкого разрушения с точки зрения безопасности ж.д. сообщения.

Однако такие конструкции подрельсовых оснований трудоемки в изготовлении по экструзионной технологии, определяя тем самым более низкую производительность их производства. Тем не менее, современный уровень развития технологий позволяет изготавливать такие подрельсовые основания оптимизированной конструкции с учетом их напряженно-деформированного состояния в ж.д. пути от действия поездных нагрузок и получать изделия с рациональным сечением по их длине, обеспечивая экономию материала, а, следовательно, и снижение их себестоимости, и, что важно для безопасности железных дорог, их более высокую устойчивость при значительных перепадах температуры, в отличие от большинства гомогенных конструкций.

Армированием гомогенного полимерного композита в гибридных композиционных подрельсовых основаниях на макроуровне обеспечивается их важное преимущество, достигаемое за счет сочетания высокопрочных и упругих армирующих элементов с высокоэластичной гомогенной полимерной матрицей, свойствами которых (упругостью, прочностью, величиной КЛТР и др.) можно управ-

лять в широком диапазоне. Это позволяет более полно реализовать идею достижения «композиционного эффекта» и получить конструкции пониженной стоимости при высоких показателях прочности на изгиб, сопротивляемости сдвигу и циклическим воздействиям нагрузки, управляемой величиной ползучести, приемлемой величиной КЛТР и др., обеспечивая конструкции ж.д. подрельсового основания вязкий тип разрушения при их высокой эксплуатационной способности.

С другой стороны, в данном типе конструкций реализуется комбинация разнородных материалов в виде композита и на микроуровне, как и в гомогенных композиционных подрельсовых основаниях, тем самым реализуя «композиционный эффект» на двух уровнях – макро- и микроуровне, давая тем самым более универсальный инструмент для улучшения их физико-технических и технико-экономических характеристик.

Благодаря улучшенным технико-экономическим показателям при хорошей их экологичности данный тип композиционных изделий может применяться при более сложных эксплуатационных условиях, в том числе в регионах с резкими изменениями температуры, на мостах с ездой без балласта и прочее. Однако, для некоторых типов изделий такого типа существует проблема их низкой атмосферостойкости из-за выхода растительных волокон на поверхность конструкций, что требует использования дополнительных технологических операций по предварительной гидрофобной обработке таких волокон, нанесения специальных защитных покрытий на поверхность конструкции и др.

Несмотря на более сложную технологию изготовления гибридных композиционных подрельсовых оснований, они привлекают все большее внимание ученых и путейцев-практиков всего мира, которые рассматривают данный тип конструкций оснований как один из наиболее перспективных направлений их применения в ж.д. отрасли, особенно на ж.д. мостах с ездой без балласта.

Гомогенные композиционные основания без волокон или с короткими волокнами имеют высокий потенциал применения на всех участках ж.д. путей, за исключением мостов с ездой без балласта и регионов с большим перепадом температур. В этом отношении гомогенные композитные основания с длинными во-

локнами и гибридные композиционные конструкции имеют более широкий спектр применения, включая и участки ж.д. пути, где гомогенные композиты, армированные короткими волокнами или без них, менее эффективны.

Следует отметить, что величины изгибающего момента и поперечной силы сильно изменяются по длине шпал и зависят как от нагрузки от подвижного состава, так и от типа опирания [99-102]. Из рисунка 1.7. видно, что схема опирания мостовых брусьев непосредственно на мостовые балки приводит к более высоким усилиям в сечениях конструкции основания (рисунок 1.7. бI, вI), чем при опирании на балласт (рисунок 1.7. бII, вII). В связи с этим для экономии материала оптимальная конструкция должна иметь переменные механические свойства по ее длине. Но с точки зрения повышения производительности и упрощения процесса изготовления, приоритетной технологией является экструзионная, по которой получают изделия постоянного сечения.

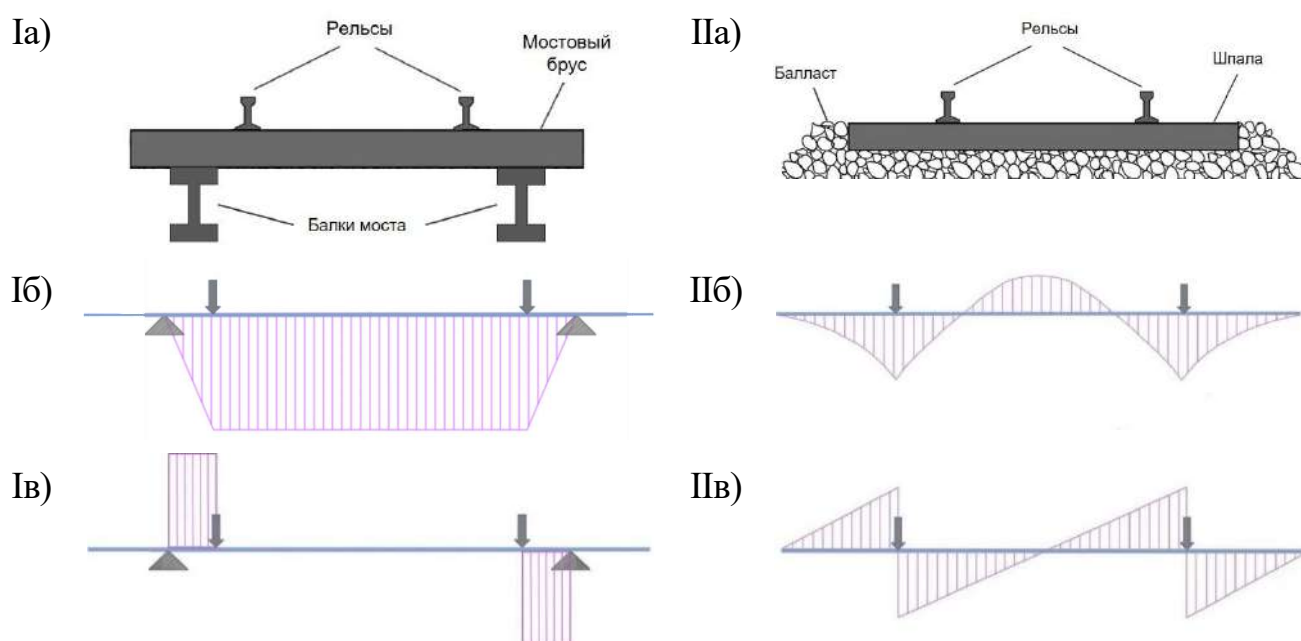


Рисунок 1.7 – Различия работы мостового бруса (I) и шпал (II) [103]

а – схема опирания; б – эпюра изгибающих моментов; в – то же, поперечной силы

Следовательно, целесообразна разработка новой конструкции композиционной шпалы, имеющей постоянный поперечный профиль, но с изменяющимися свойствами в соответствии с действующими по сечению шпалы изгибающими моментами и поперечными силами.

1.4 Технологии изготовления композиционных шпал

К существующим технологиям изготовления композиционных подрельсовых оснований, применяемых на практике или находящихся в стадии разработки и исследований, относятся: пултрузия, литье (без и под давлением), прессование, экструзия и прокат.

Прессовая технология используется для термопластичных и термоактивных полимерных материалов. Процесс прессования состоит в непосредственном придании нужной формы изделию под воздействием прилагаемого давления с одновременным нагревом материала и последующим его охлаждением.

После того, как материал перейдет в вязкопластичное состояние, он под действием давления заполняет пресс-форму, образуя целостную и уплотненную структуру. Процесс затвердевания основан на протекании реакции сшивки макромолекул благодаря процессу поликонденсации между свободными группами связующего вещества. Для протекания реакции необходимо тепло, в процессе которого возможно выделение низкомолекулярных, летучих веществ таких как, метанол, вода, формальдегид, аммиак и др.

К технологическим параметрам прессования относятся: температура подогрева; давление прессования; температура прессования; выдержка под давлением; параметры подпрессовок.

В зависимости от типоразмеров изделия цикл прессования может варьировать от 4 до 7 мин. Непосредственное прессование армированных пластиков имеет две разновидности, которые зависят от того, как пропитывается волокнистый наполнитель: а) прессуются предварительно пропитанные холсты и ткани; б) прессование выполняется с пропиткой непосредственно в форме.

Большой популярностью пользуется первый способ. Для изготовления изделий относительно простой формы применяется прямое прессование. Благодаря высоким требованиям, предъявляемых к качеству наружной поверхности изделий, были созданы автоматические установки для дозировки компонентов при приготовлении заготовок из препрегов. Спроектированы специальные автоматические

манипуляторы, которые загружают пакеты заготовок в многогнездные формы пресса. Поколение новых прессов высокой точности оснащены современными системами контроля, благодаря которым можно получить детали с высококачественной поверхностью [104, 105]. Примеры получения композиционных шпал по прессовой технологией показаны на рисунках 1.8 и 1.9 [23, 29].



Рисунок 1.8 – Пластиковая шпала, армированная полым металлическим вкладышем [23]



Рисунок 1.9 – АПАТЭК, Мостовой брус из композитных материалов [29]

Производство композиционных шпал прокатом. Изготовление композиционной шпалы (рисунок 1.10) начинают с подачи исходного сырья. При этом через отверстие 1 в трубу 2 загружается древесное сырье, а через отверстие 3 во вспомогательную трубу 4 загружается металлический порошок, а через отверстие 5 во вспомогательную трубу 6 загружаются связующее. В основную трубу 2, соединенную с вентилятором 7, приводимым во вращение двигателем 8, вдувается воздух, а со вспомогательной трубы 4 с помощью шнека 9, соединенного с двигателем 10, в основную трубу 2 подается металлический порошок, а со вспомогательной трубы 6 с помощью шнека 11, соединенного с двигателем 12, в основную трубу подается синтетическое связующее. Воздушная струя от вентилятора 7 перемешивает и перемещает всю массу до шнека 13, в смесительную камеру 30, а она передает смешанную массу под вращающиеся металлические колеса 14, а они в свою очередь предварительно сжимают массу композиционной шпалы и направляют ее в камеру 15 предварительного сжатия, имеющую подвижную крышку 16, на которой установлены две пары подающих роликов 17, соединенных с электродвигателями 18, корпуса которых через рычаги 19 соединены с си-

ловыми гидроцилиндрами 20, позволяющими создавать необходимое усилие прессования композиционной массы в прессе 25. Предварительно спрессованная масса через калибровочную рамку 21 подается в узел 22 чистовой обработки и окончательного сжатия массы композиционной шпалы, состоящий из фрез 23, прокатных роликов 24, геометрического калибра 26 и отрезной круглой пилы 27, которая окончательно от массы, движущейся через прокатные ролики, отрезает длину композиционной шпалы 28 и передает ее на ленточный конвейер 29, и далее шпала поступает на отгрузку потребителю [41, 42, 106].

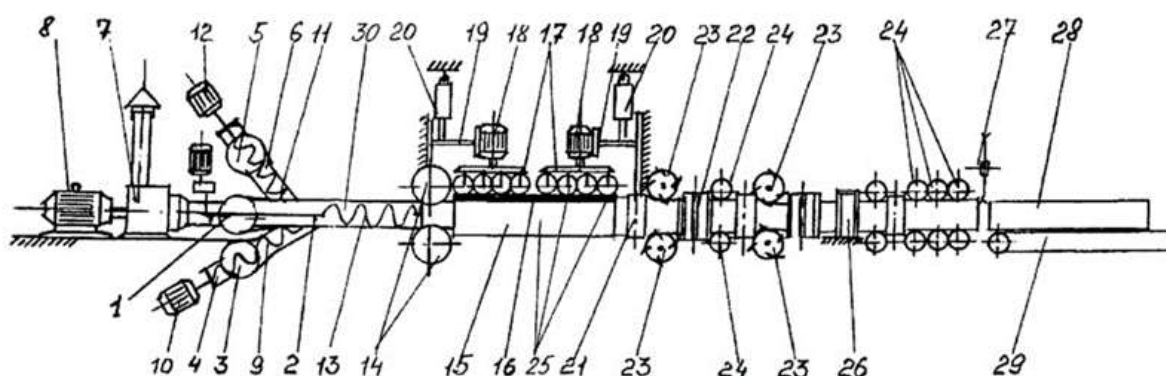


Рисунок 1.10 – Изготовление композиционной шпалы прокатом

Экструзионная технология изготовления композиционной шпалы. Экструзия – непрерывный технологический процесс получения изделий определенной формы путем продавливания расплава полимерного материала через формующее отверстие. Поскольку процесс экструзии осуществляется непрерывно, он является наиболее прогрессивным, так как позволяет производить изделия с небольшими трудовыми и энергетическими затратами при незначительных потерях материалов.

При изготовлении изделий методом экструзии в полимерах протекают в основном физические процессы, например, переход полимера из одного физического или фазового состояния в другое. К химическим процессам, протекающим при экструзии, можно отнести термическую и механическую деструкцию полимеров, обусловленную соответственно высокими температурами и большими сдвиговыми напряжениями, возникающими при течении расплава полимера в рабочих узлах экструдера и формующей головки. При обеспечении определенных техноло-

гических параметров эти химические процессы могут быть сведены к минимуму или полностью исключены.

Основным элементом шнекового экструдера является шнек (червяк). В экструзионных машинах обычно выделяют три рабочие зоны: загрузки, плавления и дозирования (рисунок 1.11). Такое разделение носит несколько условный характер, поскольку отсутствуют четкие границы раздела; например, плавление полимера начинается в зоне загрузки, а заканчивается в зоне дозирования. Тем не менее в существующих конструкциях машин имеется геометрическое разделение на зоны, обусловленное размерами шнека и его геометрией. Истинную границу зон в зависимости от состояния полимера можно установить экспериментально или математическими расчетами с учетом конкретных условий работы агрегата. За зону загрузки обычно принимают длину шнека от загрузочного отверстия до места появления слоя расплава на поверхности цилиндра или шнека. Зона плавления – это участок шнека от начала появления расплава до полного плавления слоя гранул или неполного плавления, но разрушения оставшегося твердого слоя гранул на части, распределения его в расплаве и перехода на движение расплава за счет вязкого течения. В зоне дозирования происходит окончательное плавление оставшихся частиц, выравнивание температуры расплава полимера по сечению и его гомогенизация, т.е. тщательное перемешивание расплава и придание ему однородных свойств за счет сдвиговых деформаций вязкого течения в каналах шнека. Кроме трех основных зон по длине шнека могут присутствовать дополнительные зоны, назначение которых определяется конкретным технологическим процессом. Наиболее часто встречается зона дегазации, в которой на расстоянии 1-3 витков происходит резкое увеличение объема винтовых каналов, что способствует удалению из расплава газообразных включений [104, 107].

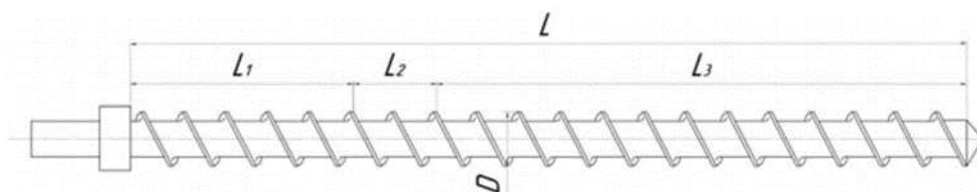


Рисунок 1.11 – Схема общего вида шнека с зонами загрузки (L_1),

плавления (L2) и дозирования (L3)

Преимущества экструзионной технологии: экологичность, непрерывная работа в формате 24/7, скорость, автоматизация процессов. Не стоит исключать из поля зрения и некоторые недостатки экструзионной технологии: сложность управления процессом, высокая стоимость оборудования [108-110]. Примеры композиционных шпал, полученных по экструзионной технологией, показаны на рисунках 1.12 и 1.13.



Рисунок 1.12 – Германия, МРВ композиционная шпала, Смешанные пластиковые отходы и изношенные стекловолокна, вспомогательные компоненты [34]



Рисунок 1.13 – Китай, композиционный мостовой брус; отходы ПВХ, порошок отходов резины, отходы ПТФЭ, отходы ФЭП, отходы ПП и т. д. [36]

Пултрузионная технология изготовления композиционных шпал заключается в непрерывном процессе изготовления длинномерных профильных изделий (с постоянным поперечным сечением) путем протягивания композиции матричного полимера с непрерывными волокнами через формообразующее и консолидирующее устройство. В отличие от экструзии, где основным рабочим воздействием служит давление, при пултрузии таковым является тянущее усилие.

Изготовление профилей технологией пултрузии осуществляется с помощью специальной пултрузионной машины (рисунок 1.14), которая включает в себя: систему подачи волокна (бобину); ванну с полимером; преформовочное устройство; нагретую фильеру (прессформу); синхронизированную тянущую машину; блок управления нагревательными элементами тянущего агрегата; отрезную машину.

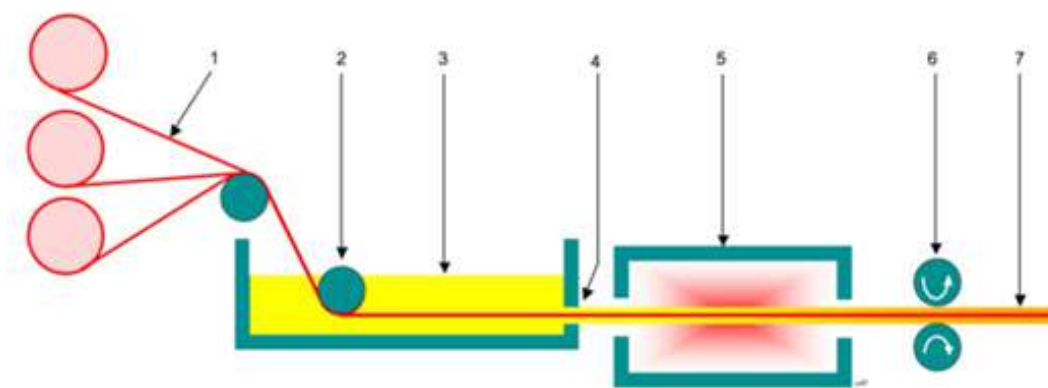


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема машины пултрुзии

1 – непрерывный рулон армирующих нитей; 2 – натяжной ролик; 3 – полимер для пропитки; 4 – волокна, пропитанные смолой; 5 – фильера; 6 – протяжное устройство; 7 – нарезка готовых профилей (секция пилы)

Волокна материала 1 в сухом состоянии сматывается с бобин и собирается в пучок, который затем протягивается через ванну с полимером (устройство с жидкой полимерной смолой, пропитывающей волокна 3). В качестве полимерных смол обычно используют эпоксидные, полиэфирные или винилэфирные смолы.

Далее пропитанные смолой волокна 4 пропускаются через преформовочное устройство, которое придает волоконно-полимерному составу желаемую форму и выравнивает волокна. На следующем этапе незатвердевший композит продавливается через нагретую прессформу (фильеру 5), при этом смола подвергается полимеризации, а после охлаждения профиль затвердевает и приобретает окончательную форму, соответствующую конфигурации фильеры.

Наконец отвержденный продукт вытягивается из фильеры вытяжной машиной 6 и далее распиливается отрезной машиной (7) на готовые к использованию изделия [104, 111-113].

К преимуществам пултрузии относится высокая скорость производства, возможность автоматизации процесса, низкая себестоимость исходного сырья, соблюдение всех допусков по размерам, высокие физико-химические, тепловые и электрические свойства изделий. Недостатки технологии: существенное влияние на скорость производства температуры и времени отверждения, сложности в

обеспечении строго постоянного сечения изделий по всей длине, кроме изделий с простой формой сечения, использование узкого спектра стекловолоконных материалов (жгуты и нити) [112].

Технология производства обладает высокой степенью гибкости, наукоёмкости и относится к категории инновационных. Технология пултрузии весьма успешно используется для производства ответственных изделий авиационной и ракетно-космической техники, строительных материалов и изделий для нужд автомобильной индустрии и машиностроения. В частности, японская композиционная шпала FFU изготавливается по данной технологии (см. рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Sekisui FFU; Япония; полиуретановая пена и стекловолокно [52]

Технология изготовления композиционных шпал литьем под давлением. В последнее время динамично развивающимся способом переработки композиционных полимерных материалов является литье под давлением. Метод литья под давлением наиболее часто используется при производстве различных изделий из термопластичных полимеров (термопластов). Из-за этого литьевые машины преимущественно называются термопластавтоматами. Термопластавтоматы позволяют изготавливать большое количество разнообразных изделий из пластика автоматическим и полуавтоматическим способом. Термопластавтоматы бывают различных типов и конструкций, наиболее распространенными из которых являются шнековые (рисунок 1.16) и плунжерные литьевые машины.

Литьё под давлением – технологический процесс переработки пластмасс, цветных металлов и других материалов путём впрыска их расплава под давлением в пресс-форму с последующим охлаждением. Подача гранулированного или порошкообразного полимера осуществляется через приемный бункер (7) в цилиндр термопластавтомата. На инжекционном пластикационном цилиндре (6) размеща-

ются нагревательные элементы – кольцевые электронагреватели (11), которые подогревают подаваемый материал до нужной температуры, соответствующей переходу полимера в вязкотекучее состояние. Продвижение полимерного термопластичного материала по цилиндру обеспечивается вращением шнека (5). В отличие от шнекового экструдера, шнек в термопластавтомате двигается не только вращением, но и производит движение вперед-назад из-за формирования разницы давления в гидравлическом цилиндре (10). Совокупные вращательные и возвратно-поступательные движения шнека (интрузионный режим) позволяют увеличить объем впрыска и готового изделия. При возвратно-поступательных движениях расплавленная термопластичная масса заполняет литьевую форму (1), которая может дополнительно нагреваться трубчатыми, спиральными или плоскими нагревателями. Форма раскрывается только после остывания и затвердения термопласта. Извлечение готового изделия (2) при открытии формы также производится автоматическим способом.

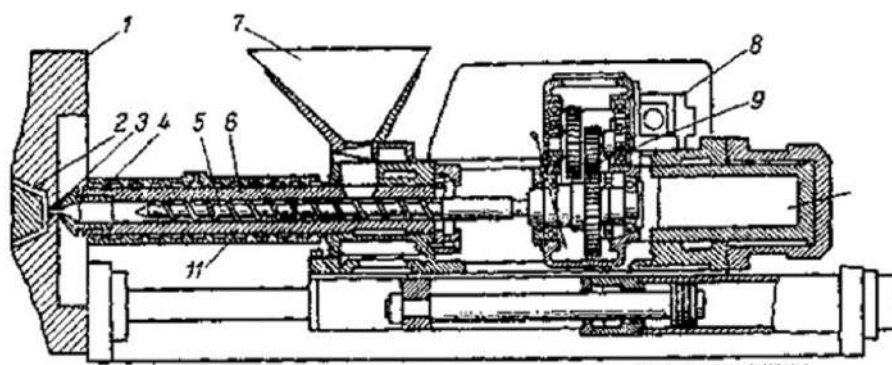


Рисунок 1.16 – Шнековый термопластавтомат [114]

- 1 – форма; 2 – изделие; 3 – литниковый канал; 4 – литниковая втулка;
5 – шнек; 6 – пластикационный цилиндр; 7 – бункер; 8 – привод; 9 – редуктор;
10 – гидроцилиндр; 11 – нагреватель

К преимуществам данной технологии можно отнести: высокую точность готового изделия, возможность получения детали любой сложности, минимальная потребность в механической обработке изделия, невысокая стоимость при условии изготовления крупной партии. Вместе с тем, технология литья под давлением имеет свои недостатки: высокая стоимость подготовительных работ и,

соответственно, нерентабельность изготовления изделия в одном экземпляре или мелкой партии [40, 114-116]. Композиционная шпала IntegriTies, полученная по литьевой технологии под давлением, показана на рисунке 1.17.

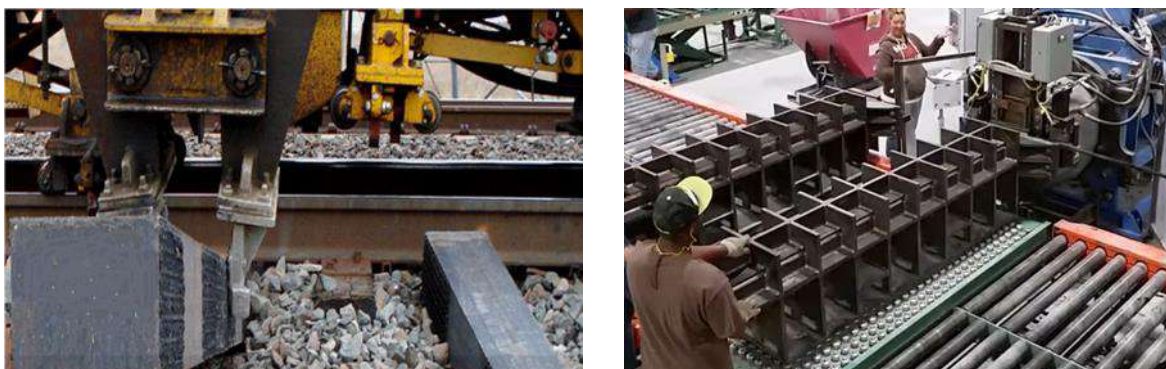


Рисунок 1.17 – Шпала IntegriTies, США, состоящая из 100% вторичных отходов пластика, содержащего сшитый полиэтилен сверхвысокой плотности [30]

1.5 Применение и вызовы развитию композиционных шпал

Современные тенденции развития ж.д. транспорта связаны с увеличением нагрузки на ось, повышением скорости движения поездов, их протяженности и интенсивности движения, следовательно, при эксплуатации ж.д. инфраструктуры с использованием стандартных подрельсовых оснований неизбежно проявятся такие проблемы, как ускоренный выход из строя конструкций подрельсовых оснований, рост расходов на их обслуживание, сокращение срока службы оснований и увеличение межремонтных периодов [117-119].

При этом ухудшающиеся климатические условия эксплуатации подрельсовых оснований, связанные с ростом загрязнения атмосферы, воздействием кислотных дождей и другими негативными факторами, которые усложняют вышеизложенные факторы, а обостряющаяся проблема охраны окружающей среды как от непосредственного воздействия на нее ж.д. пути, так и опосредованного через разработку карьеров для добычи щебня, вырубки лесов, плохо организованной утилизации старогодных подрельсовых оснований и т.д., все это в совокупности представляет для ж.д. индустрии острый вызов для ее устойчивого развития [120, 121].

Композиционные подрельсовые основания, в частности, шпалы, с одной стороны, могут быть сконструированы рационально подобно ж.б. конструкциям с учетом действующих от подвижной нагрузки в их сечениях сил, и, с другой, за счет использования разнородных материалов им может быть придан более широкий диапазон свойств композита, в отличие металла, бетона и древесины, что предполагает более широкий спектр климатических и других эксплуатационных условий, где их применение будет экономически более выгодным по сравнению с подрельсовыми основаниями стандартных конструкций и из традиционных материалов.

Композиционные шпалы имеют разнообразную базу исходного сырья, определяемую как собственными сырьевыми ресурсами страны (вид сырья, количество, цена и т.д.), так и различием в условиях эксплуатации железных дорог (климат, ширина колеи, нагрузка на ось, скорость и интенсивность движения поездов, назначение ж.д. путей и т. д.), определяющими для каждой страны и, возможно, отдельного региона необходимость рационального выбора технологии, исходных материалов и, возможно, конструкции подрельсового основания. В частности, для Южно-Азиатского региона перспективным для их изготовления являются натуральные ресурсы (бамбук, сизаль и т. д.) с широким источником, большой скоростью роста и возобновляемостью ресурсов. Для производства композиционных подрельсовых оснований перспективным направлением является использование при их производстве бытовых (особенно пластиковых), строительных, промышленных, лесопромышленных и сельскохозяйственных отходов, что способствует снижению загрязнения водной среды и почвы, освобождению занимаемых ими земельных ресурсов, расширению возобновляемой сырьевой базы, что, в целом, способствует устойчивому развитию железнодорожной отрасли.

За последние годы были предложены различные продукты и технологии изготовления композитных шпал, в том числе Axion EcoTrax-шпала [25], TieTek-композитная шпала [27], IntegriCo-композиционная шпала [30], шпала из смешанных пластиковых отходов (MPW) [34], Wood-Plastic-композиционная шпала [37], композитная шпала из натурального каучука [43], Tufflex-шпала [45], композитная шпала из пластиковых отходов и шлаков [47], шпала из армированного волокном

полимера (FRP) [49], FFU-синтетическая шпала [52], KLP-композитная шпала [60], композитная шпала с деревянным сердечником [62], композитная шпала из ламинированного клееного сэндвича [66] и т.д. Эти шпалы изготавливаются из различных материалов, таких как пенополиуретан, переработанный пластик, армированный волокном, отходы деревопереработки, натуральный каучук, твердые промышленные отходы, сэндвич-композиты и т.д. Хотя рынок композитных шпал достаточно разнообразен, внедрение и применение большинства из них все еще ограничены [122].

В отличие от традиционных подрельсовых оснований [123, 124], для композиционных не существует общепринятой классификации дефектов, но с учетом накопившегося опыта их мирового применения к таким дефектам можно отнести излом конструкции, растрескивание полимерной матрицы, трещинообразование в зоне крепежей, торцевые трещины, дефекты от термитной сварки рельсов, врезка в шпалу подкладки, крип (увеличение ширины колеи), повышенные продольные температурные деформации при больших перепадах температуры и некоторые другие [23, 125-127]. Наиболее типичные для композиционных подрельсовых оснований дефекты, наблюдающиеся на практике, приведены на рисунке 1.18.

Вышеупомянутые дефекты раскрывают основные проблемы при внедрении композиционных шпал, решения которых сможет существенно повышать работоспособность и долговечность композиционных изделий, следовательно, и увеличить конкурентоспособность данного типа шпал.

a)



б)



в)



г)



д)



е)



ё)



ж)



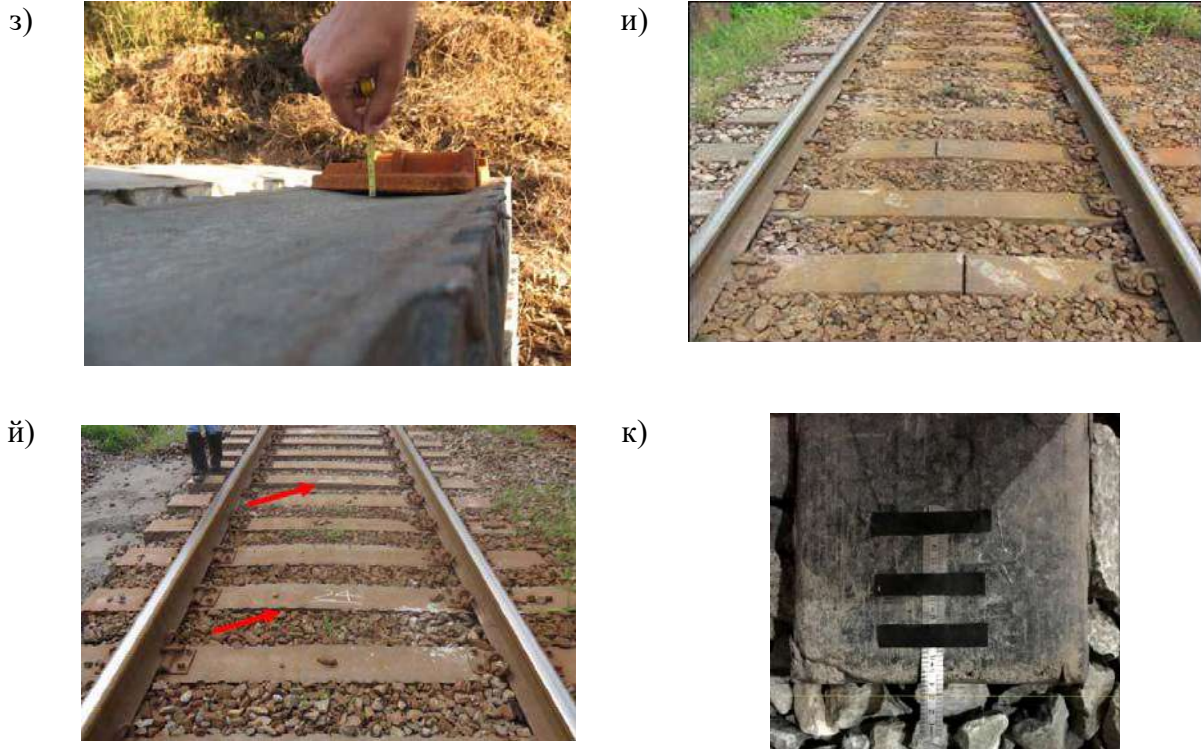


Рисунок 1.18 – Типичные дефекты композиционных подрельсовых оснований

а – развитие сетки трещин на поверхности шпалы, вызванное нарушениями технологии их изготовления [23]; б – излом шпалы под рельсом вследствие дефекта в виде сучка в нижнем армирующем деревянном бруске [23]; в – трещинообразование в верхней части шпалы вследствие дефекта в виде сучка в верхнем армирующем деревянном бруске [23]; г – трещины в зоне прикрепителя [125]; д – опасность деструкции конструкции при термитной сварке рельса [125]; е – низкая стойкость к воздействию окружающей среды при технологических нарушениях производства [125]; ё – развитая трещина в зоне системы крепления [126]; ж – технологические пустоты в области скреплений [126]; з – неплоскостность поверхности вследствие технологических нарушений при производстве [126]; и – излом в центральной части шпалы вследствие эксплуатационных нарушений [126]; й – выгиб центральной части шпалы в области загрязненного балласта [126]; к – повышенное продольное температурное расширение (изменение ширины колеи) при большом перепаде температуры [127]

Одной из самых острых проблем, имеющей важное практическое значение, является разрешение противоречия между требованиями к их эксплуатационным

свойствам, например, по снижению критически высокого значения КЛТР полимерной матрицы (в 15-20 раз превышающем этот показатель для древесины и железобетона), и эколого-экономической эффективности их жизненного цикла, являющейся препятствием для обеспечения их конкурентоспособности традиционным шпалам. При этом, как отмечалось в параграфе 1.1, диапазон свойств применяемых материалов чрезвычайно широк и остается нерешенной задачей определения рациональных свойств материала подрельсовых оснований и, в частности, наиболее широко применяемого их представителя – композиционных шпал. Это позволит корректно сформулировать задачу оптимизации рецептуры материала композиционных шпал и изучить его физико-технические свойства, важные для обеспечения эксплуатационной надежности таких конструкций.

1.6 Выводы по главе 1, цель и задачи исследования

Из анализа отечественных и зарубежных источников по проблеме исследований установлен большой интерес в мире к созданию технологий и конструкций композиционных (композитных, полимерных, пластиковых) подрельсовых оснований – шпал, мостовых брусев и брусев стрелочных переводов. Это объясняется возможностью использования для их получения крупнотоннажных бытовых отходов, побочных продуктов промышленности и сельского хозяйства, а в ряде стран, в частности, в Китае, и наличием местной сырьевой базы в виде, например, быстрорастущего бамбука. Такой интерес обусловлен также и тем, что расширение области применения композиционных подрельсовых оснований способствует развитию их производства и решению при этом ряда экологических проблем.

Установлено, что материал композиционных шпал обладает широким диапазоном физико-технических свойств; при этом свойства, определяющие высокую эффективность эксплуатации железных дорог, являются компромиссом по отношению к свойствам традиционного для подрельсовых оснований материала – дерева, стали и бетона. При этом композиционные конструкции, основой которых служит полимерная матрица, обладают повышенными значениями КЛТР, что суще-

ственно ограничивает области их применения на ж.д. транспорте, особенно на высокоскоростных магистралях и в областях с большим перепадом температур.

На основании анализа известных технических решений сформировалась идея снижения величины КЛТР и регулирования величин модуля упругости и массы шпалы посредством многоуровневой модификации материала композиционных шпал на пяти структурных уровнях – атомно-молекулярном, нано-, микро-, мезо- и макроуровне; при этом рациональные значения КЛТР, массы и модуля упругости композиционной шпалы устанавливаются решением оптимизационной задачи при рассмотрении работы шпалы в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав” (*ЗБШПТ*). Решение задачи в такой постановке обеспечивает безопасную эксплуатацию подвижного состава на композиционных подрельсовых основаниях и, с другой стороны, способствует повышению технико-экономической эффективности, снижению загрязнения окружающей среды и устойчивому развитию ж.д. отрасли за счет использования при их производстве вторичных пластиков и возобновляемых природных материалов, в частности, бамбука.

На основании вышеизложенного сформулируем цель и задачи диссертационного исследования.

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 необходимо решить следующие **задачи**:

- проведение анализа российских и зарубежных исследований, выполненных в данной предметной области;
- определение по данным *ВЭ* требований к свойствам материала композиционных шпал;
- установление оптимального состава материала композиционных шпал с учетом их работы в ж.д. пути;
- изучение влияния технологических факторов на свойства материала композиционных шпал;

- определение основных физико-технических свойств материала композиционных шпал;
- изучение методами ЛИ особенностей поведения материала композиционных шпал под нагрузкой;
- разработка инновационной конструкции и принципиальных технологических схем изготовления композиционных шпал, армированных бамбуком;
- выполнение ОЖЦ применения композиционных шпал.

ГЛАВА 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки композиционных шпал, предназначенных для стран Азиатско-Тихоокеанского региона, в частности, Китая, в качестве матрицы используется поливинилхлорид (ПВХ), модифицируемый другими полимерами, углеродными нанотрубками (УНТ), наполнителями в виде дисперсного мела, древесной муки и бамбуковой фибры, а на уровне конструкции армируемой стержнями из мао-бамбука.

2.1 Свойства исходных материалов

Поливинилхлорид. Согласно статистическим данным, с 1950 г до настоящего времени только 9% из всех произведенных пластиков было переработано, но бóльшая часть из них захоронена на многочисленных свалках и нанесла непоправимый вред природе [128]. При этом около 8 млн. т пластиковых отходов ежегодно поступает в океан [129]. В настоящее время мировой уровень переработки пластиковых отходов не достигает и одной пятой части: в 2014 году самый высокий уровень переработки пластика отмечался в Европе и достигал 30%, в Китае он составил 25%, в США с 2012 года перерабатывают только 9% пластикового мусора [128]. В России в настоящее время действует около 500 предприятий, на которых по разным оценкам перерабатывается от 350 до 450 тыс. т пластиковых отходов в год, что составляет лишь 7-12,5% от ежегодного их образования [130]. Огромное количество пластиковых отходов загрязняет окружающую среду и угрожает, тем самым, здоровью человека. Поэтому отходы пластмасс должны подвергаться более полной переработке и утилизации при производстве крупнотоннажной продукции, к которой относятся и композиционные шпалы.

Выбор ПВХ обусловлен его повышенными показателями термо-, водо-, износо- и коррозиостойкости, высоким электросопротивлением, пониженной величиной КЛТР [131], которые превышают аналогичные показатели таких распространенных полимеров, как полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП) [81]. Кроме того, имеется обширная сырьевая база вторичного ПВХ, уступающая только ПЭ и

составляющая около 30% мирового потребления полимеров [132] при существенно более низкой стоимости вторичных гранул по сравнению с ПЭ. В связи с этим, вторичный ПВХ имеет превосходный потенциал в производстве композиционного материала для шпал. Основные физико-технические свойства используемого ПВХ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные физико-технические свойства ПВХ

Температура воспламенения, С ⁰	500
Температура разложения, С ⁰	140
Температура стеклования, С ⁰	75
КЛТР·10 ⁶ , К ⁻¹	94
Плотность, кг/м ³	1350
Модуль упругости, МПа	3400

Углеродные нанотрубки. Параметры многослойных УНТ, представляющих собой порошкообразный материал двух основных размеров D_{out} – $49,3\pm 0,45$ нм и $72,0\pm 0,45$ нм, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры УНТ производства НПП «Центр нанотехнологий»

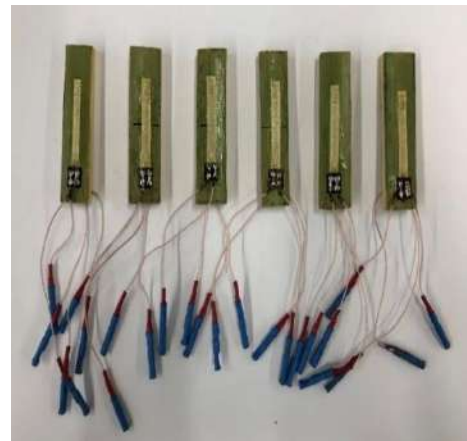
Наименование параметра	Значение параметра
Полуширина функции распределения по внешнему диаметру (в процентах от D_{out}) нанотрубок W_{out} , %	27
Положение максимума функции распределения по внутреннему диаметру нанотрубок D_{in} , нм	$13,3\pm 0,45$
Полуширина функции распределения по внутреннему диаметру нанотрубок W_{in} , %	74
Верхняя граница длины нанотрубок L , мкм	5
Содержание несгораемого до 1000 ⁰ С остатка (зольность) C_{ash} , масс. %	$3,52\pm 0,2$
Содержание неструктурированных форм углерода, сгорающих до начала сгорания УНТ C_{non} , масс.%	$0,65\pm 0,08$
Удельная поверхность S , м ² /г	$97,55\pm 0,02$

Мао-бамбук. Подготовка и испытания образцов из бамбука осуществлялись по китайскому стандарту «Методы испытания физико-механических свойств бамбука, применяемого в строительстве» (JG/T 199-2007). Деформации образцов под нагрузкой определяли с использованием 8-ми канального усилителя Spider8 и тензодатчиков с базой 20 и 50 мм [133, 134].

Свойства образцов бамбука определяли на шести образцах-близнецах. Первичные данные испытанных образцов приведены в Приложении 1. Средние арифметические значения свойств мао-бамбука составили значения (коэффициент вариации и доверительный интервал с вероятностью 0,95 приведены в Приложении 1): влажность – $\bar{\omega} = 13,9\%$ (см. таблицу П1.1); плотность при влажности 13,9% – $\bar{\rho}_{\omega} = 887,83 \text{ кг/м}^3$ (см. таблицу П1.2); прочность вдоль волокон при сжатии (при скорости нагружения 1,333 МПа/с) при влажности 13,9% – $\bar{f}_{c,\omega} = 92,65 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.3) и при стандартной влажности 12% – $\bar{f}_{c,12} = 97,28 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.3); то же, при растяжении – соответственно $\bar{f}_{t,\omega} = 213,13 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.4) и $\bar{f}_{t,12} = 207,15 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.4); то же, при статическом изгибе – соответственно $\bar{f}_{m,\omega} = 223,65 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.5) и $\bar{f}_{m,12} = 225,67 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.5); модуль упругости при статическом изгибе – соответственно $\bar{E}_{m,\omega} = 16,30 \times 10^3 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.6) и $\bar{E}_{m,12} = 16,56 \times 10^3 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.6); то же, вдоль волокон на сжатие и растяжение (при влажности 13,9%) – соответственно $\bar{E}_{c,\omega} = 38,23 \times 10^3 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.7) и $\bar{E}_{t,\omega} = 26,97 \times 10^3 \text{ МПа}$ (см. таблицу П1.8 и П1.9). Образцы мао-бамбука показаны на рисунках 2.1-2.3.

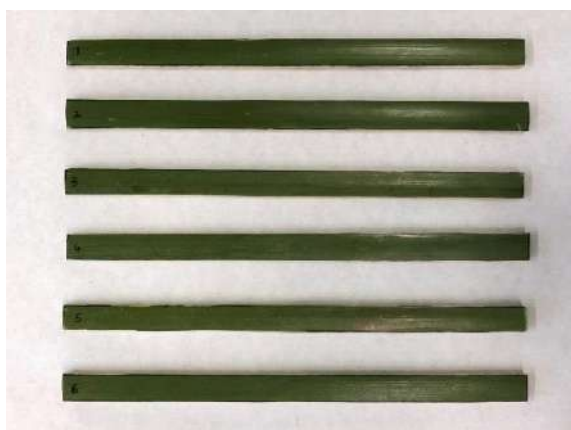


а)



б)

Рисунок 2.1 – Образцы мао-бамбука после определения прочности на сжатие (а) и для определения модуля упругости на сжатие (б) вдоль волокон



а)



б)

Рисунок 2.2 – Образцы (а) и устройство (б) для определения модуля упругости мао-бамбука при изгибе



а)



б)

Рисунок 2.3 – Образцы мао-бамбука после испытаний на осевое растяжение (а) и растяжение при изгибе (б)

Дисперсные мел и древесная мука, основные свойства которых приведены в таблице 2.3, применялись в качестве наполнителей ПВХ.

Таблица 2.3 – Основные свойства дисперсного мела и муки

Наименование свойств	Вид наполнителя	
	дисперсный мел	древесная мука
КЛТР·10 ⁶ , К ⁻¹	2,2	5,0
Модуль упругости, Н/мм ²	70000	14000
Плотность, кг/м ³	2700	650
Средний размер частиц, мкм	2	115
Удельная поверхность, см ² /см ³	23192	2423

Гранулометрический состав дисперсного мела (рисунок 2.4) изучали с использованием лазерного анализатора размеров частиц FRITTSCH Analysette 22 NanoTec plus по ISO 13320:2009 «Particle size analysis – Laser diffraction methods». Согласно полученным результатам, анализируемый дисперсный мел имеет диапазон распределение частиц от 10 нм до 21,86 мкм. Наибольшее количество частиц (модальный диаметр распределения) имеет размер 1,97 мкм (рисунок 2.5). Содержание частиц размером < 500 нм составляет 6,77%, средний размер частиц дисперсного мела (персентиль 50%) – 2,1 мкм.

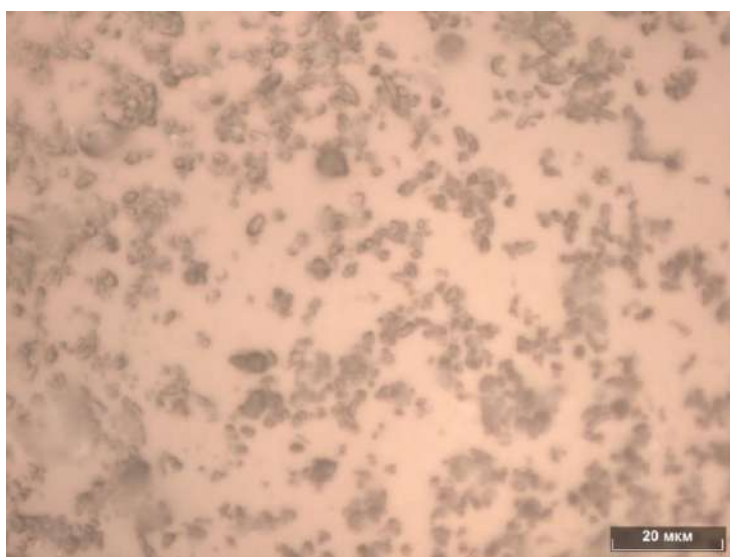


Рисунок 2.4 – Фото дисперсного мела под микроскопом

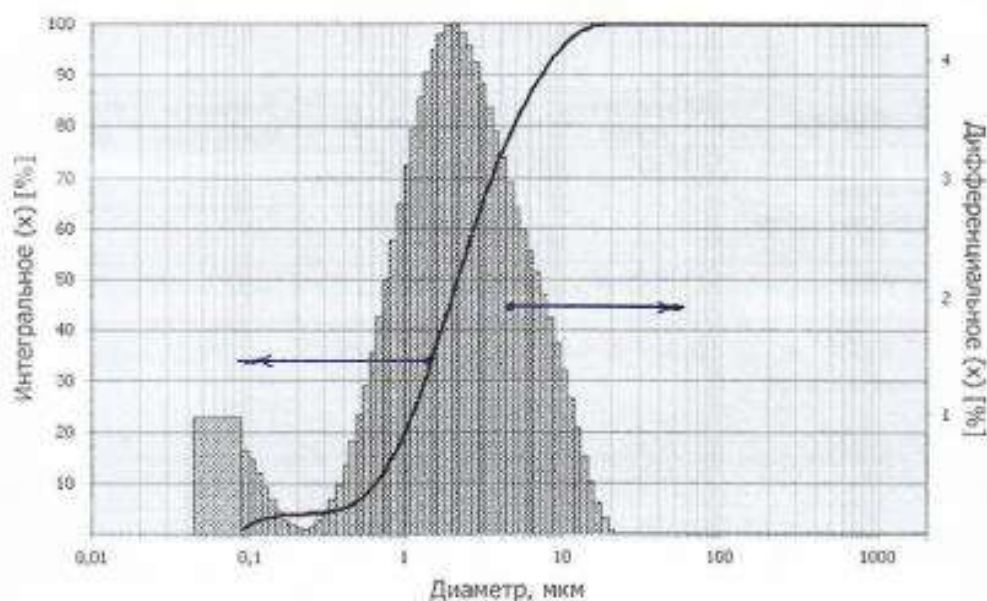


Рисунок 2.5 – Интегральное и дифференциальное распределение размеров частиц дисперсного мела

Исследование гранулометрического состава древесной муки (рисунок 2.6) проводилось также с использованием лазерного анализатора размеров частиц FRITSCH Analysette 22 NanoTec plus по ISO 13320:2009 «Particle size analysis – Laser diffraction methods». Установлено, что древесная мука имеет распределение частиц в диапазоне от 10 нм до 2000 мкм. Наибольшее количество частиц (модальный диаметр распределения) имеет размер 106,85 мкм. Содержание частиц размером < 500 нм – 0,31%, средний размер частиц гидрофобного мела (перцентиль 50%) – 114,94 мкм (рисунок 2.7).

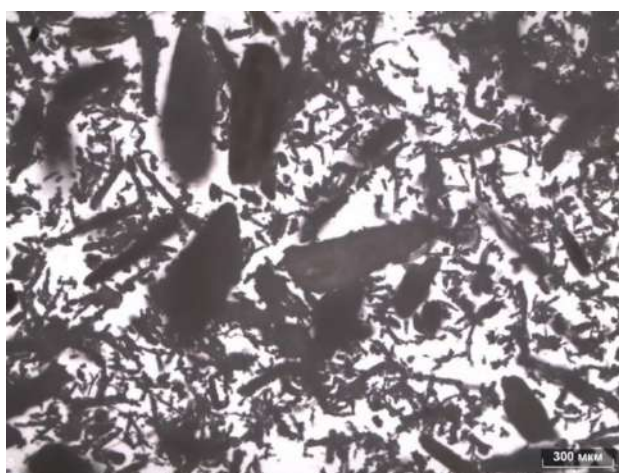


Рисунок 2.6 – Фото древесной муки под микроскопом

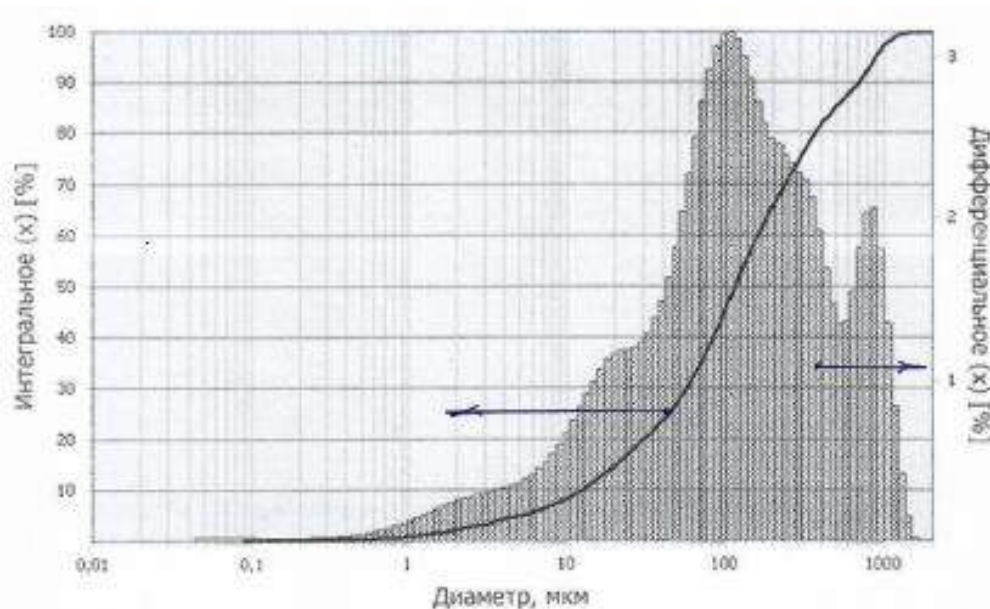


Рисунок 2.7 – Интегральное и дифференциальное распределение размеров частиц древесной муки

Фибра мао-бамбука была получена рассевом щепы, полученной измельчением образцов (рисунок 2.8), свойства которой приведены в таблице 2.4. С учетом большого разброса данных в расчетах, свойства фибры принимались по результатам выполненных физико-механических испытаний образцов мао-бамбука с учетом данных [135, 136].



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 – Измельчитель (а), конвейер (б) и щепа (в) Мао-бамбука, полученная дроблением образцов Мао-бамбука

Таблица 2.4 – Физико-механические свойства фибры Мао бамбука

КЛТР·10 ⁶ , К ⁻¹	Плотность в сухом состо- янии, кг/м ³	Модуль упру- гости при ра- стяжении, МПа	Предел проч- ности при растяжении, МПа	Удлинение при разрыве, %
5,0	650	17000	500-575	1,9-3,2

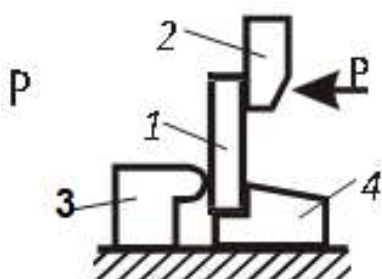
2.2 Определение свойств материала стандартными методами

Образцы материала композиционной шпалы изготавливали на технологической линии компании ООО Savewood по производству изделий из древесно-полимерного композита (ДПК) с использованием промышленных экструдеров. Температура в различных зонах экструдера варьируется от 145 до 200°C и составляла стандартное значение для производства изделий из ДПК на основе ПВХ [137, 138]. Скорость экструзии в зонах экструдера варьировали от 0,25 до 2,00 м/мин.

Такие параметры обеспечивали «мягкий» режим пластификации расплава и минимизировали впитывание влаги гигроскопичным древесным наполнителем из окружающего воздуха, чем исключалось образование вздутий и пузырей на поверхности готового профиля.

Удельная ударная вязкость характеризует способность полимерных материалов сопротивляться динамическим нагрузкам, приложенным со скоростью более 1 м/с, оценивает их ударную прочность и определяется отношением энергии разрушения образца к площади его поперечного сечения. Она определялась по ГОСТ 4647-2015 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи» с использованием маятникового копра на образцах размерами $L \times b \times h = (15,0 \pm 1,0) \times (10,0 \pm 0,5) \times (4,5 \pm 0,5)$ мм, испытываемых при консольном изгибе (рисунок 2.9а) на приборе «Динстат» (рисунок 2.9б).

а)



б)



Рисунок 2.9 – Схема (а) и прибор «Динстат» (б) для определения удельной ударной вязкости материала

1 – образец; 2 – боек маятника; 3 – нижняя зажимная опора; 4 – передвигная опора

Удельную ударную вязкость a , кДж/м², определяли по формуле:

$$a = \frac{A}{b \cdot h}, \quad (2.1)$$

где A – работа по разрушению образца, кгс·см; b и h – соответственно ширина и толщина образца, см.

Прочность при изгибе $\sigma_{из}$, МПа, определяли по ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010) «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб» при трехточечном нагружении.

Среднюю плотность образцов ρ_t , г/см³, определяли по ГОСТ 15139-69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)».

Прочность при растяжении σ_p , МПа, определяли на стандартных образцах (рисунок 2.10) по ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» с использованием испытательной машины LLOYD Instruments LR5K Plus.

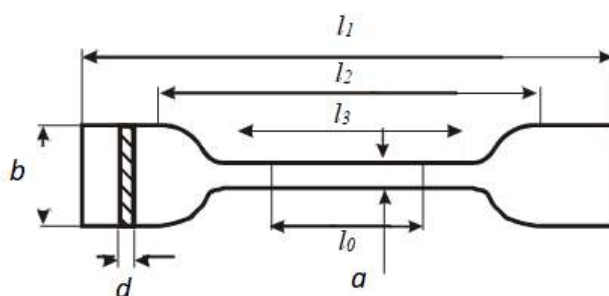


Рисунок 2.10 – Образец для определения прочности при растяжении

$l_1 = 115$ мм – общая длина; $l_2 = 80 \pm 5$ мм – расстояние между положением кромок зажимов; $l_3 = 33 \pm 1$ мм – длина рабочей части; $l_0 = 25 \pm 1$ мм – расчетная длина; $b = 25 \pm 1$ мм – ширина головки; $a = 6 \pm 0,4$ мм – ширина рабочей части; $a = 6 \pm 0,4$ мм – толщина, $d = 2 \pm 0,2$ мм

Определение модуля упругости при изгибе $\sigma_{из}$, МПа, выполняли на образцах-балочках размерами $L \times b \times h = \geq 80 \times (10,00 \pm 0,50) \times (4 \pm 0,20)$ мм с использованием испытательной машины LLOYD Instruments LR5K Plus по схеме трехточечного нагружения (рисунок 2.11).

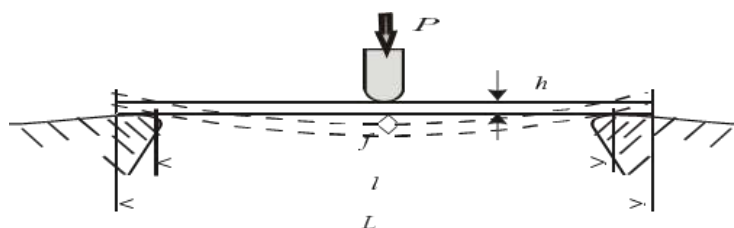


Рисунок 2.11 – Схема испытаний по определению модуля упругости при изгибе (см. пояснения в тексте)

Предел прочности при статическом изгибе σ_u , МПа, с учетом стрелы прогиба образца в момент разрушения равен

$$\sigma_u = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \cdot \left[1 + 4 \left(\frac{f}{l} \right)^2 \right], \quad (2.2)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н; l – длина пролета, мм; b – ширина образца, мм; h – то же, высота, мм; f – прогиб образца под нагрузкой P в момент разрушения образца, мм.

Модуль упругости при статическом изгибе определялся по формуле:

$$E_{из} = \frac{1920000 \Delta P}{8 \delta_{пр} b h^2}, \quad (2.3)$$

где ΔP – приращение нагрузки, Н; $\delta_{пр}$ – прогиб образца, см; b и h – ширина и толщина образца, см.

Определение КЛТР и температуры стеклования выполняли в соответствии с ГОСТ 32618.2-2014 (ISO 11359-2:1999) «Пластмассы. Термомеханический анализ (ТМА). Часть 2. Определение коэффициента линейного теплового расширения и температуры стеклования» с использованием термомеханического анализатора Q400 (рисунок 2.12).

Трещиностойкость образцов определяли по ГОСТ 29167-91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», в соответствии с которым характеристики трещиностойкости материала при нормальном отрыве определяли проведением механических испытаний образцов-балочек с записью полностью равновесной диаграммы деформирования «нагрузка –

перемещение» ($F - V$) образца. Использование равновесной диаграммы позволяет определять энергетические и силовые характеристики испытуемого материала.



Рисунок 2.12 – Термомеханический анализатор Q400

Характеристики трещиностойкости определяли на образцах-балочках размерами $0,04 \times 0,04 \times 0,16$ м³ с предварительно наведенной – пропилом на глубину 4 мм алмазным диском толщиной 1 мм, начальной трещиной. (рисунок 2.13).

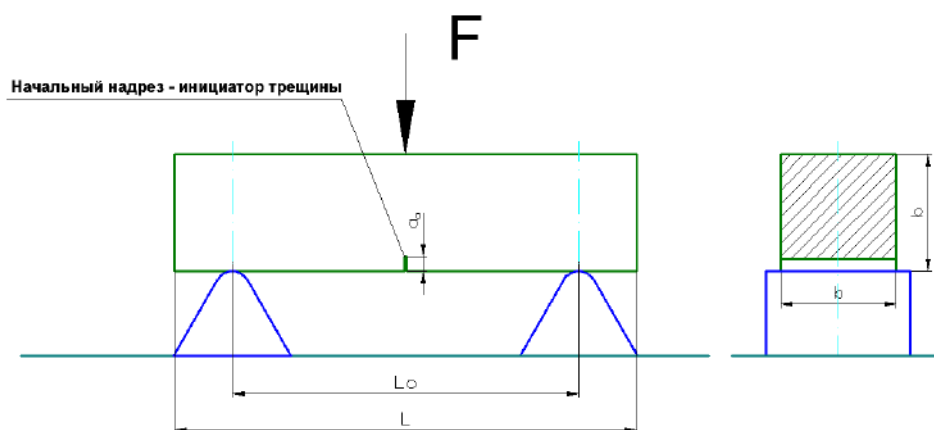


Рисунок 2.13 – Схема образца для определения характеристик трещиностойкости

a_0 – длина начальной трещины; b , L – размеры образца;

L_0 – расстояние между зонами опирания; F – нагрузка на образец

Для получения равновесной диаграммы «усилие – перемещение» («F – V») при испытаниях образцов была изготовлена установка повышенной жесткости (рисунок 2.14). Ее особенность состоит в том, что создание усилия обеспечивается клиновым механизмом с углом подъема клина 4 градуса. Площадь клиновой поверхности составляет более 200 см², что позволяет при крайне малых напряжениях в испытательной системе развивать усилия, достаточные для разрушения образца, обеспечивая при этом требуемую жесткость разгрузочного устройства.

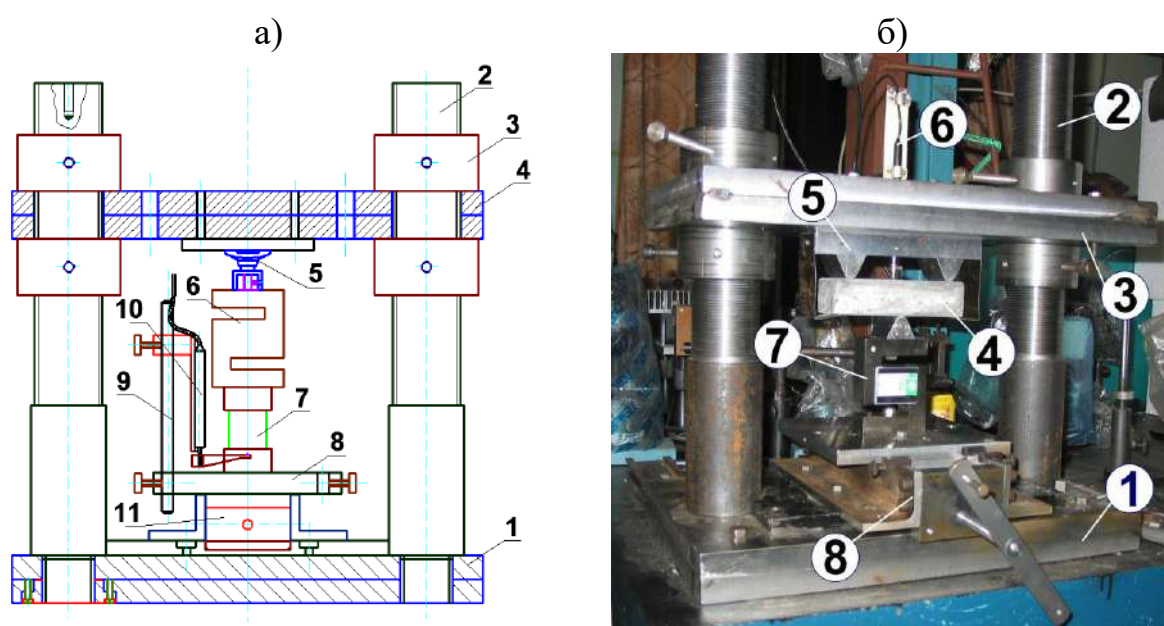


Рисунок 2.14 – Схема (а) и общий вид (б) установки для проведения испытаний образцов-балочек на трещиностойкость

- а): 1 – базовая плита; 2 – стойка резьбовая; 3 – ходовые гайки; 4 – верхняя плита;
 5 – сферический шарнир; 6 – датчик усилия; 7 – балочка-образец;
 8 – подъемная платформа; 9 – стойка датчика перемещения; 10 – датчик перемещения; 11 – клиновой механизм; б): 1 – базовая плита; 2 – стойка резьбовая;
 3 – верхняя плита; 4 – балочка-образец; 5 – опорные призмы;
 6 – датчик перемещения; 7 – датчик усилия; 8 – клиновой механизм

Усилие на образец F и перемещение V центральной части образца регистрировались при помощи датчиков, преобразующих измеряемые физические величины в электрические сигналы. Для регистрации перемещений использовался датчик Honeywell-MLT0R5, чувствительностью к перемещениям 59,055 Ом/мм, а для ре-

гистрации усилия применялись датчики S-типа модели STC фирмы Vishay Precision Group, Inc. С целью обеспечения высокой чувствительности в широком диапазоне измерений, использовались датчики с пределами измерения 500, 2500, 10000 и 50000 Н. Схема электроизмерительной части установки показана на рисунке 2.15.

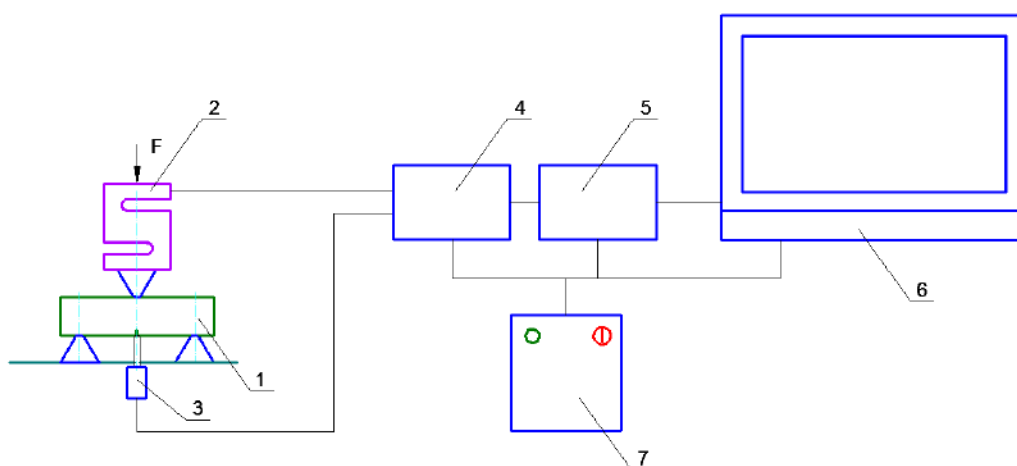


Рисунок 2.15 – Схема электроизмерительной части установки

- 1 – балочка-образец; 2 – датчик усилия; 3 – датчик перемещения;
 4 – нормализатор сигналов; 5 – аналогово-цифровой преобразователь;
 6 – компьютер; 7 – источник бесперебойного электропитания

Сигналы от датчиков усилия 2 и перемещения 3 поступают на блок 4, где приводятся к стандартному предельному уровню напряжений 10 В. Далее сигналы передаются на АЦП 5, в качестве которого используется цифровой многоканальный самописец «S-Recorder-L». Через USB соединение данные от АЦП 5 поступают на компьютер 6, где происходит их визуализация с последующей записью в файл. Управление работой АЦП и визуализацией данных осуществляется программой «S-Recorder».

Частота опроса датчиков составляет 100 Гц, но может быть как увеличена, так и снижена на два порядка. Уровень квантования сигналов датчиков 12 бит. Число дифференциальных каналов 16.

Результаты измерений обрабатывались в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 29167-91. На основании данных, полученных от датчиков усилия F и перемещения V , строилась равновесная диаграмма « $F - V$ », показанная на рисунке 2.16.

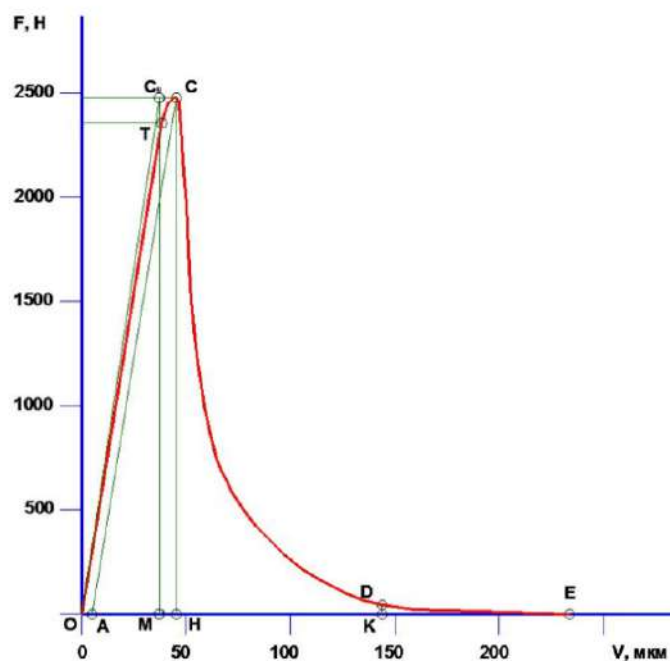


Рисунок 2.16 – Равновесная диаграмма деформирования образца

2.3 Определение свойств материала методами лазерной интерферометрии

2.3.1 Деформации образцов при статическом нагружении

Метод лазерной интерферометрии позволяет изучать процессы разрушения материала путем фиксации полей перемещений/деформаций синхронно с приложением сжимающей нагрузки. Он основан на взаимодействии световых волн, сформированных голографическими изображениями объекта исследования в исходном и нагруженном состоянии [139].

Чувствительность метода при регистрации полей перемещений составляет доли световой волны (0,1-0,3 мкм), что требует применения специальных средств виброзащиты. На рисунке 2.17 показана схема установки для проведения лазерно-интерференционных измерений, а на рисунке 2.18 – общий вид измерительной установки для регистрации голографических интерферограмм.

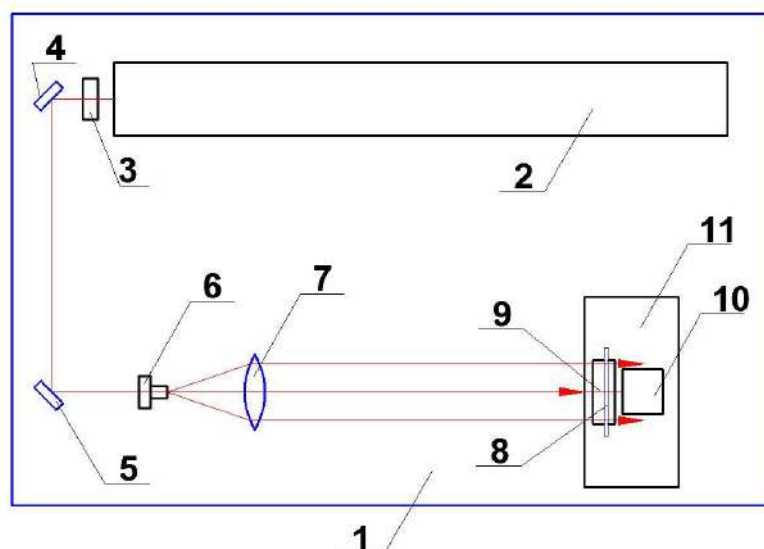


Рисунок 2.17 – Схема регистрации голографических интерферограмм двойной экспозиции с использованием метода Денисюка для записи голограмм

1 – виброзущищенная платформа; 2 – лазер; 3 – оптический затвор;
4, 5 – зеркала; 6 – микрообъектив; 7 – коллимирующая линза; 8 – фотопластинка;
9 – держатель; 10 – образец; 11 – нагружающее устройство

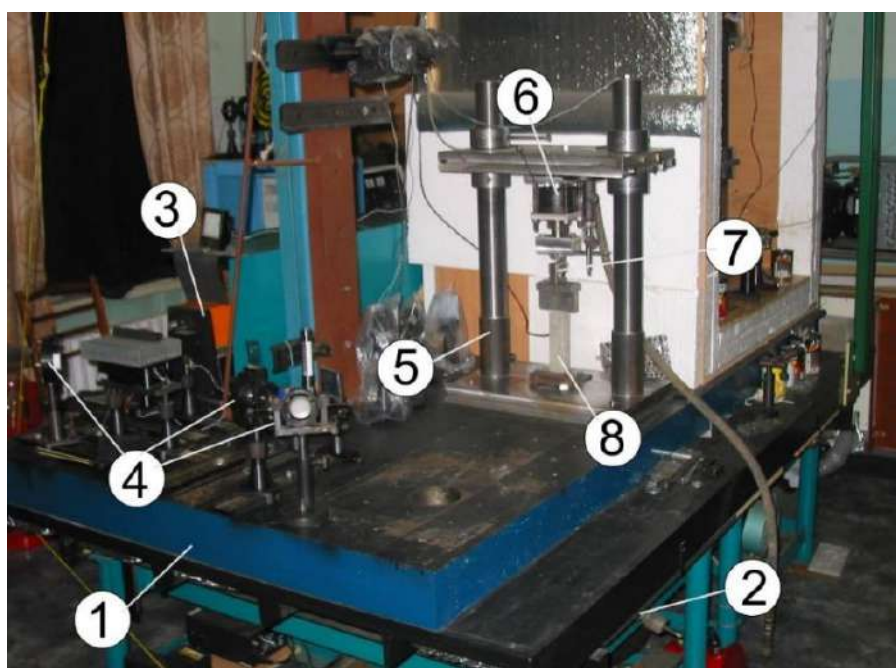


Рисунок 2.18 – Установка для регистрации голографических интерферограмм

1 – массивная платформа (2500 кг); 2 – пневматические подушки виброзащиты;
3 – лазер; 4 – оптические элементы; 5 – нагружающее устройство;
6 – гидроцилиндр; 7 – датчик усилия; 8 – образец

Анализ интерферограмм выполняли по методике [140], в которой перемещение в точке на поверхности образца определяется по формуле:

$$d = \frac{n\lambda}{2}, \quad (2.4)$$

где d – перемещение в точке исследуемой поверхности; λ – длина волны лазерного излучения; n – порядок интерференционной полосы.

Такой подход обеспечивает регистрацию только нормальной компоненты вектора перемещений w , но при этом упрощает определение вектора перемещений в виде поля.

Обработку данных эксперимента проводили с применением графического комплекса AutoCAD. В соответствии с работой [141], на интерферограмме выделяли цветными полилиниями интерференционные полосы и присваивали каждой из полос номер n , соответствующий ее порядку. Нулевая полоса определялась из особенностей формирования оптической схемы и условий закрепления образца, а также контролировалась при помощи датчика перемещения.

Поскольку в работе использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм, то перемещения в зоне пролегания, например, 7-й полосы, составили $d = n \cdot \lambda / 2 = 7 \cdot 0,633 / 2 = 2,21$ мкм. Аналогично определяли значения перемещений для других полос, после чего строили графики по характерным сечениям, как это показано на рисунке 2.19.

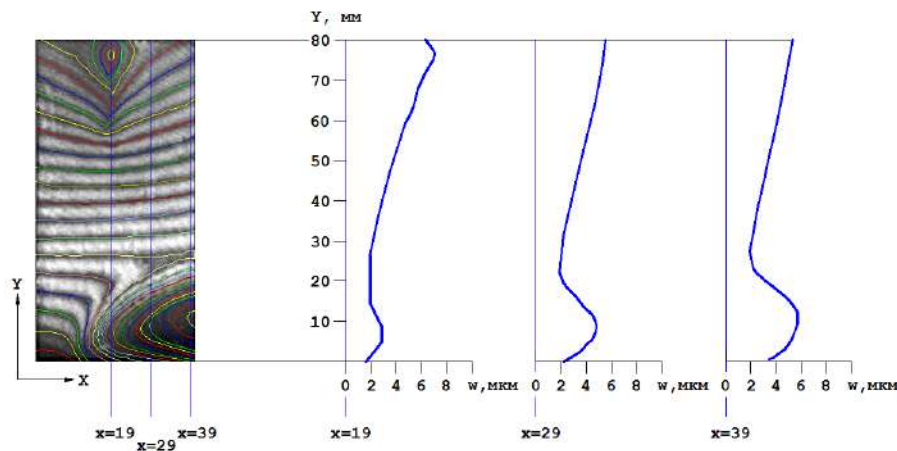


Рисунок 2.19 – Расшифровка интерферограммы с построением графиков поля перемещений по отдельным сечениям

Для более наглядного представления о деформировании образца применяли 3D-визуализацию поля перемещений, показанную на рисунке 2.20, что существенно сокращает также время анализа интерферограмм.

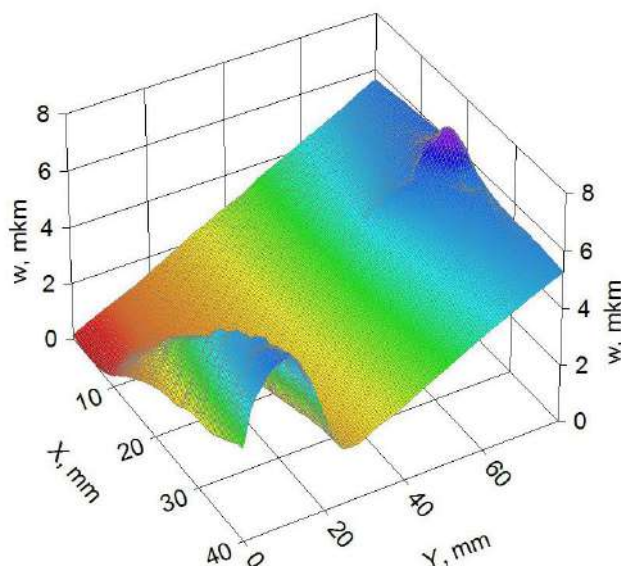


Рисунок 2.20 – Представление данных о поле перемещений образца в виде 3D-графика

2.3.2 Собственные напряжения в композите

Регистрация собственных напряжений в материале основана на переводе исследуемого образца из одного стабильного состояния уравновешенности внутренних сил в другое уравновешенное состояние, сопровождающегося формоизменением объекта исследования. Для формирования деформационного отклика исследуемого образца использовали удаление части материала методом высверливания. При этом величина собственных напряжений в образце прямопропорциональна ПОЛЮ перемещений в зоне удаления материала, которое регистрировалось методом лазерной-интерферометрии.

Проблема обеспечения возможности высверливания части образца между экспозициями решалась выбором схемы регистрации голограмм по методу Лейта-Упатниекса (рисунок 2.21).

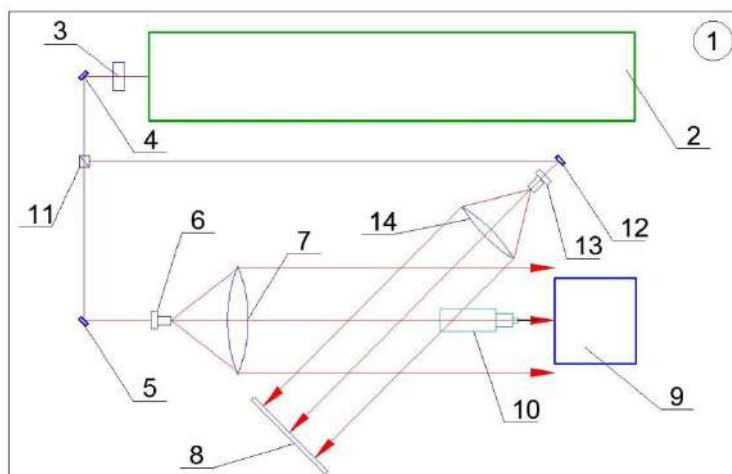


Рисунок 2.21 – Схема регистрации интерферограммы двойной экспозиции с применением метода Лейта-Упатниекса

1 – виброзащищенная платформа; 2 – лазер; 3 – оптический затвор; 4, 5, 12 – зеркала; 6, 13 – микрообъективы; 7, 14 – коллимирующие линзы; 8 – фотопластинка; 9 – объект исследования; 10 – дрель; 11 – светоделитель

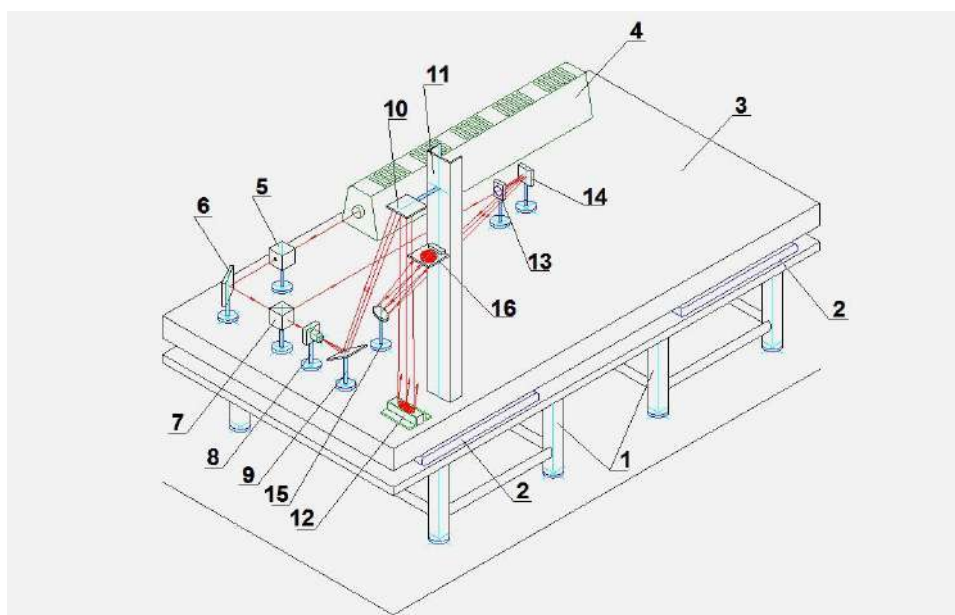


Рисунок 2.22 – Пространственная схема регистрации голографических интерферограмм по методу Лейта-Упатниекса

1 – опоры голографической установки; 2 – подушки-пневмоамортизаторы; 3 – виброзащищенная платформа; 4 – лазер; 5 – оптический затвор; 6, 9, 10, 14, 15 – зеркала; 7 – светоделитель; 8 – микрообъектив; 11 – вертикальный рейтер; 12 – объект исследования в устройстве фиксации; 13 – линза опорного пучка; 16 – фотопластинка

Для успешного выполнения исследований необходимо обеспечить стабильного положения образца. С этой целью традиционная схема регистрации голографических интерферограмм была модернизирована и трансформирована в вертикальной плоскости, как показано на рисунке 2.22.

Предложенная схема обеспечивает свободный доступ для засверливания объекта исследования.

Процесс исследования собственных напряжений включает операции: установку и фиксацию оснастки для крепления образца на рабочую поверхность голографической установки; фиксацию образца в оснастке с последующей выдержкой не менее 20 мин, что позволяет устранить влияние на результат измерения даже незначительных усилий крепления; юстировку оптической схемы так, чтобы исследуемая поверхность по нормали равномерно освещалась лазерным излучением, при этом обеспечивается максимальная чувствительность измерительной системы к перемещениям в направлении нормали к исследуемой поверхности; перевод освещения лаборатории в режим неактивного освещения; перекрытие лазерного луча оптическим затвором; помещение фотопластинки в устройство для крепления; выполнение 1-го экспонирования фотопластинки; высверливание образца на глубину 3-4 мм с минимальной осевой подачей инструмента для уменьшения тепловыделения и минимизации наведенных механических напряжений; удаление пыли и других фрагментов, образовавшихся при сверлении; выдержка 2 мин. для термостабилизации зоны сверления; повторное экспонирование фотопластинки; химическая обработка фотопластинки и ее безусадочная сушка; фотографирование полученной интерферограммы; качественный и количественный анализ интерферограммы.

2.3.3 Водопоглощение композита

Водопоглощение по массе W_m , %, определяется по формуле

$$W_m = [(m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}] \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

где: $m_{\text{нас}}$ – масса водонасыщенного образца, г; $m_{\text{сух}}$ – масса сухого образца, г.

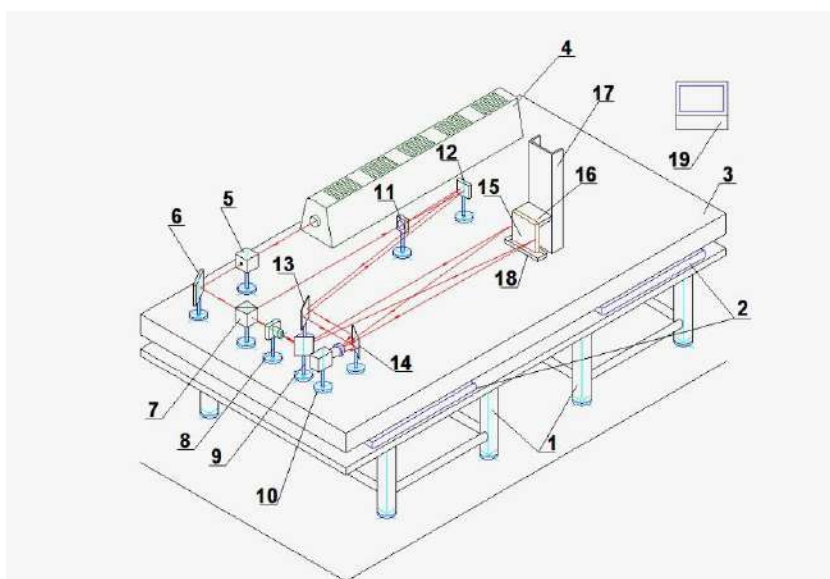
Однако для сверхплотных полимерных материалов такой стандартный подход не оправдан, так как дает большую погрешность при малой величине водопоглощения на больших образцах. Необходимая точность измерений величины W_m может быть достигнута за счет регистрации поля деформаций исследуемого образца в процессе поглощения влаги и вычисления изменения его объема, вызванного впитываемой влагой.

Предложенный метод позволяет оценить динамику процесса поглощения влаги, обнаружить наличие локальных дефектов в образце, влияющих на водопоглощение и, тем самым, повысить достоверность оценки свойств исследуемых образцов.

Для предложенного способа была реализована измерительная система регистрации полей перемещений, основанная на использовании методов электронной корреляционной спекл-интерферометрии [141]. В этом методе интерференционные спекл-структуры регистрируются при помощи оптико-электронных средств, что позволяет получить поток изображений с заданными интервалами по времени, составляющим от единиц до сотен секунд. Сравнивая спекл-структуры, зарегистрированные через различные интервалы времени, можно определить формоизменение образца за период времени между моментами регистрации спекл-структур.

Для проведения исследований на лазерно-голографической установке была реализована оптическая схема (рисунок 2.23а) и установка (рисунок 2.23б).

а)



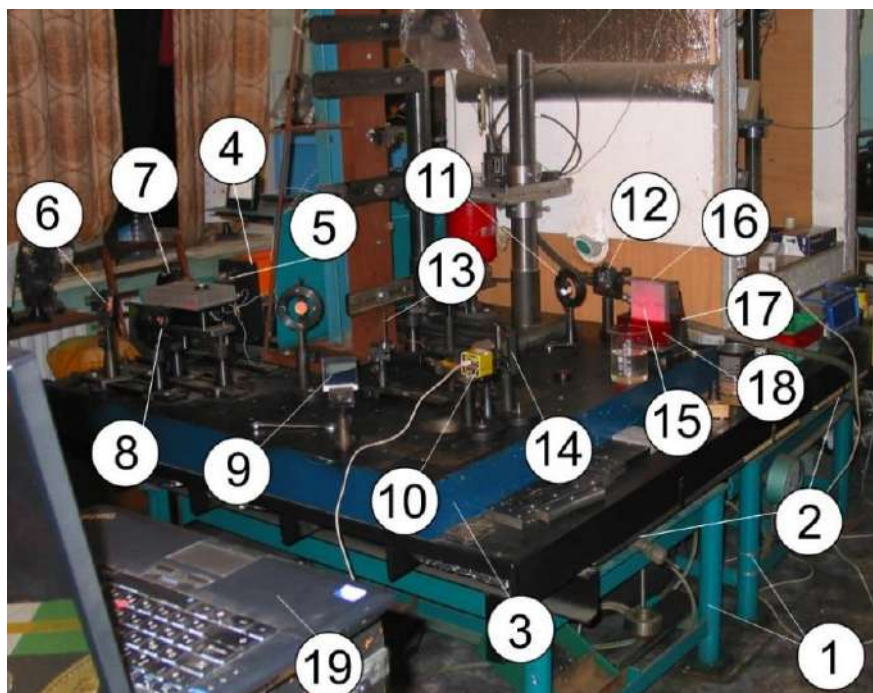


Рисунок 2.23 – Схема (а) и общий вид (б) установки для деформационных изменений образца под воздействием влаги с применением метода электронной-корреляционной спекл-интерферометрии (см. описание в тексте)

Пневматические подушки 2, размещенные на опорных столах 1, обеспечивают виброзащиту платформы 3 от влияния случайных вибраций и возмущений, которые могут повлиять на выполнение прецизионного эксперимента. Излучение лазера 4 проходит через оптико-механический затвор 5, зеркало 6 и разделяется светоделителем 7 на опорный и предметный лучи. Предметный луч после зеркала 6 расширяется микрообъективом 8 и направляется зеркалом 9 на исследуемую поверхность образца 15. Опорный луч, выходящий из светоделителя 7, расширяется линзой 11 и посредством зеркал 12 и 13 направляется на полупрозрачное зеркало 14, после которого отражается в направлении объектива цифровой камеры 10 и освещает ее светочувствительную матрицу.

На эту же матрицу поступает изображение исследуемой поверхности образца 15, сфокусированное объективом камеры 10. Длины опорного и предметного световых потоков сбалансированы так, что разность их оптического пути не превышает 2000 мм - длины когерентности лазера ЛГН-215, применявшегося в экс-

перименте. Взаимодействие опорного и предметного световых потоков в плоскости светочувствительной матрицы цифровой камеры 10 формирует интерференционную спекл-структуру.

2.4 Методы планирования активных экспериментов

Обобщение влияния структурных и технологических факторов на получение материала композиционной шпалы изучали с привлечением планирования экспериментов (ПЭ) с получением полиномиальных моделей свойств материала композиционных шпал.

Материал композиционных шпал должен обеспечивать компромисс между жестким (ж.б. шпалы) и мягким (деревянные шпалы) режимами движения подвижного состава. Оптимальные свойства такого материала устанавливали решением оптимизационной задачи при рассмотрении системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав” (ЗБШРП) с использованием программы, разработанной во ВНИИЖТ.

Коэффициенты полиномиальных моделей свойств материала композиционных шпал определяли с использованием трехуровневого ПЭ (см. таблицу П2.1) [142]. Уровни варьируемых факторов X в ПЭ приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Значения варьируемых факторов X в точках ПЭ

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

Примечание: X_1 – коэффициент изгиба, отн. ед.; X_2 – масса, кг; X_3 – модуль упругости 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, МН/см.

ММ свойств материала композиционных шпал получали в виде *полных кубических моделей* в псевдокомпонентах z [143]:

$$\hat{y} = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_{12} z_1 z_2 + \beta_{13} z_1 z_3 + \beta_{23} z_2 z_3 + \gamma_{12} z_1 z_2 (z_1 - z_2) + \gamma_{13} z_1 z_3 (z_1 - z_3) + \gamma_{23} z_2 z_3 (z_2 - z_3) + \beta_{123} z_1 z_2 z_3 \quad (2.6)$$

в которых коэффициенты определяются по формулам:

$$\beta_1 = y_1; \beta_2 = y_2; \beta_3 = y_3;$$

$$\beta_{12} = \frac{9}{4}(y_{112} + y_{122} - y_1 - y_2); \beta_{13} = \frac{9}{4}(y_{113} + y_{133} - y_1 - y_3);$$

$$\beta_{23} = \frac{9}{4}(y_{223} + y_{233} - y_2 - y_3); \gamma_{12} = \frac{9}{4}(3y_{112} - 3y_{122} - y_1 + y_2);$$

$$\gamma_{13} = \frac{9}{4}(3y_{113} - 3y_{133} - y_1 + y_3); \gamma_{23} = \frac{9}{4}(3y_{223} - 3y_{233} - y_2 + y_3);$$

$$\beta_{123} = 27y_{123} - \frac{27}{4}(y_{112} + y_{122} + y_{133} + y_{223} + y_{233}) + \frac{9}{2}(y_1 + y_2 + y_3).$$

ПЭ для построения полных кубической модели свойств материала композиционных шпал и соотношения компонентов материала шпалы в точках ПЭ приведены в таблице П2.2 Приложения 2. ПЭ для построения математических моделей для анализа изгибной жесткости композиционной шпалы в кодированном масштабе x и в натуральном масштабе X приведены в таблицах П2.3 и П2.4 Приложения 2.

При решении *задачи оптимизации* состава материала композиционных шпал в качестве функции цели 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 некоторых рациональных значений Y_E^r, Y_α^r, Y_m^r , полученных при решении задачи по взаимодействию подвижного состава с земляным полотном, балластной призмой и рельсами:

$$C_{E,\alpha,m} = \lambda_E \frac{|Y_E^r - Y_E|}{Y_E^r} + \lambda_\alpha \frac{|Y_\alpha^r - Y_\alpha|}{Y_\alpha^r} + \lambda_m \frac{|Y_m^r - Y_m|}{Y_m^r} \rightarrow \min, \quad (2.7)$$

при выполнении ограничений на свойства материала композиционных шпал

$$A_{min}^E \leq Y_E \leq A_{max}^E; \quad (2.8)$$

$$A_{min}^\alpha \leq Y_\alpha \leq A_{max}^\alpha; \quad (2.9)$$

$$A_{min}^m \leq Y_m \leq A_{max}^m; \quad (2.10)$$

и на значения варьируемых переменных в псевдокомпонентах z_i ($i = 1, 2, 3$).

$$0 \leq z_i \leq 1, \quad (2.11)$$

для которых выполняется условие

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1, \quad (2.12)$$

где $\lambda_E, \lambda_\alpha, \lambda_{mt}$ – весовые коэффициенты соответственно для функций отклика Y_E, Y_α, Y_{mt} ($0 \leq \lambda_i \leq 1$ и $\lambda_E + \lambda_\alpha + \lambda_{mt} = 1$).

2.5 Статистическая обработка результатов экспериментов

Выделяют три типа ошибок – промахи, систематические и случайные [144].

Среди результатов выборки (y_1, \dots, y_n) объема n может присутствовать резко выделяющаяся величина показателя качества испытуемого материала. Значение этого показателя, обозначаемое y_k , является промахом (грубой ошибкой измерений) при условии, что применение соответствующей критериальной оценки приводит к отклонению гипотезы о принадлежности y_k данной выборке.

Проверку гипотезы, является ли данное измерение промахом, проводили с использованием статистики [145]

$$\theta = |(\hat{y} - y_k)/S|, \quad (2.13)$$

где \hat{y} – среднее арифметическое значение измеряемого свойства материала, вычисляемое по формуле $\hat{y} = \sum y_i/n$ (здесь y_i – единичное значение свойства, полученное при испытаниях i -го образца материала, $i = 1, \dots, n$); S – среднеквадратическое отклонение, вычисляемое по формуле

$$S = \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)}. \quad (2.14)$$

При выполнении неравенства:

$$\theta < \theta_{n;\alpha}, \quad (2.15)$$

(здесь $\theta_{n,\alpha}$ – критическое значение θ при объеме выборки n и уровне значимости $\alpha = 0,05$), гипотеза о принадлежности y_k данной выборке отвергается, значение y_k считается промахом и исключается из выборки.

Систематические ошибки обусловлены неточностью проводимых измерений и классом точности используемых приборов. Если измеряемый показатель качества испытуемого материала y является функцией нескольких некоррелированных параметров P , т.е. $y = y(P_1, \dots, P_j, \dots, P_l)$, то абсолютная систематическая ошибка при определении y составит значение:

$$\Delta y^c = \sqrt{\sum_j \left(\frac{\partial y}{\partial P_j} \Delta P_j^c \right)^2}, \quad (2.16)$$

где ΔP_j^c – абсолютная систематическая ошибка в определении P_j параметра.

Случайная ошибка измеряемого показателя определяется преимущественно особенностями испытуемого материала и влиянием в процессе испытаний неконтролируемых факторов. Она характеризуется величиной абсолютной случайной ошибки измерения некоторого показателя качества материала y [145]

$$\Delta y^{cl} = S \cdot t_{\alpha;n} / \sqrt{n}, \quad (2.17)$$

где $t_{\alpha;n}$ – табличное значение критерия Стьюдента.

Для практических расчетов величину случайной ошибки целесообразно ограничить условием не превышения ею величины систематической ошибки:

$$\Delta y^{cl} \leq \Delta y^c, \quad (2.18)$$

а величину уровня значимости α , как уже отмечалось выше – значением 0,05 (при этом доверительная вероятность $\beta = 1 - \alpha$ составит 0,95).

Из (2.16)-(2.18) устанавливаем необходимое число однотипных измерений n данного показателя качества испытуемого материала

$$n \geq S^2 \cdot t_{\alpha;n}^2 / \sum_j \frac{\partial y}{\partial P_j} \Delta P_j^c, \quad (2.19)$$

обеспечивающее его определение с доверительной вероятностью 0,95, что является приемлемым для проведения прикладных исследований.

ГЛАВА 3 ТРЕБОВАНИЯ К СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛА КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ

3.1 Моделирование свойств материала композиционных шпал

Требуемые свойства материала композиционных шпал могут быть установлены решением оптимизационной задачи при рассмотрении работы шпалы в системе “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав” (*ЗБШРП*) из условия обеспечения компромисса между жестким (на железобетонных шпалах) и мягким (на деревянных шпалах) режимами движения подвижного состава. Схематически система *ЗБШРП* показана на рисунке 3.1.

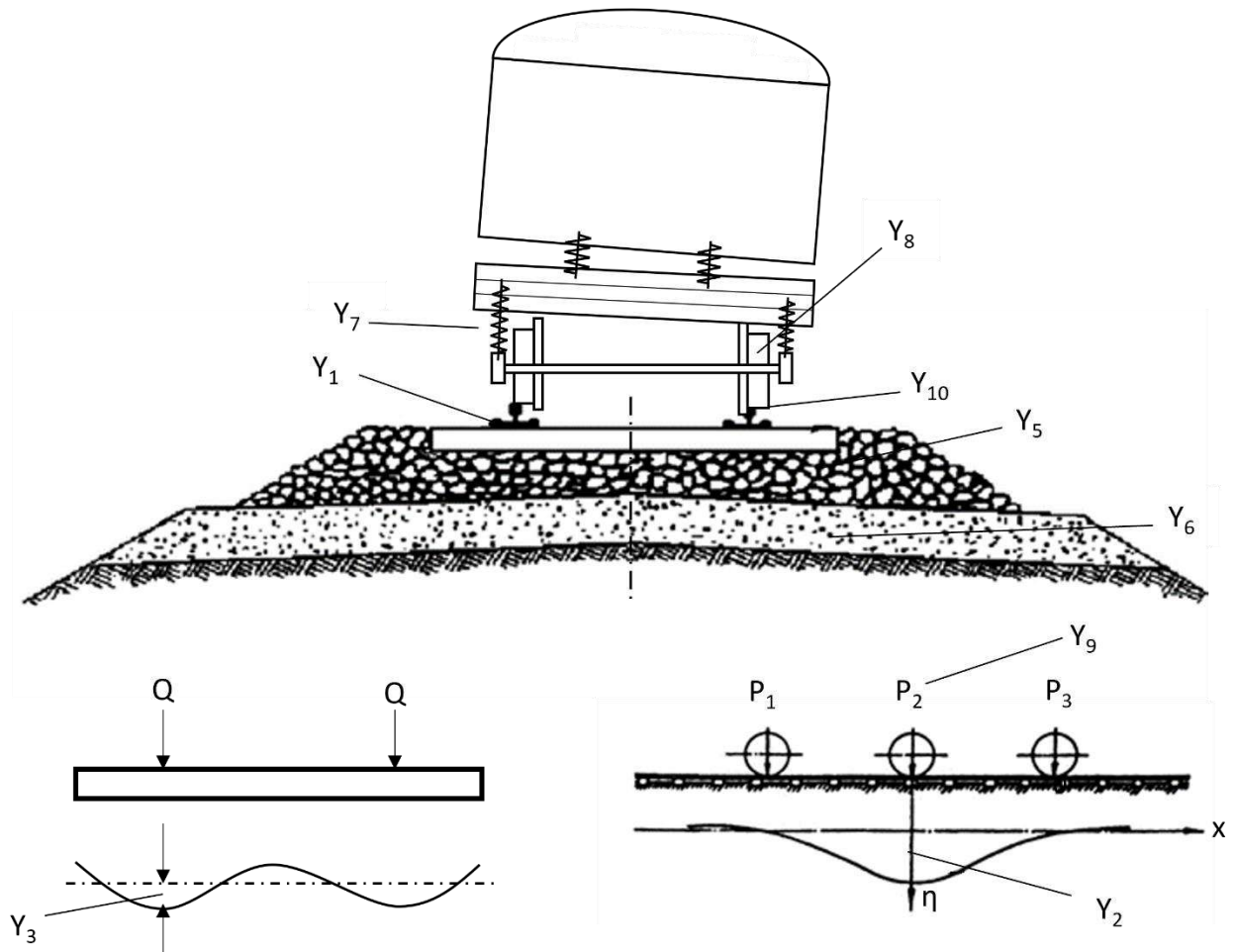


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение системы *ЗБШРП* и ее элементов в виде функций отклика Y (обозначения приведены в тексте) [23]

Для этого в системе *ЗБШРП* варьируют свойства шпалы и определяют параметры, характеризующие ее отклик на привнесенные изменения в виде напряжений в земляном полотне, балластной призме, рельсе и др. Оптимальные свойства материала композиционной шпалы устанавливаются из условия снижения до некоторого приемлемого (компромиссного) уровня показателей, характеризующих напряженно-деформированное состояние элементов системы *ЗБШРП*.

Задачу по поиску оптимальных свойств материала композиционной шпалы решали методом экспериментально-статистического моделирования (*ЭСМ-методом*) проведением вычислительного эксперимента (*ВЭ*) на математических моделях (*ММ*) исследуемых свойств (функций отклика) Y в системе *ЗБШРП* от варьируемых факторов X .

В качестве варьируемых факторов X были приняты следующие показатели, характеризующие работу шпалы в ж.д. пути: 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.

Выбор вида варьируемых факторов определялся учетом работы композиционной шпалы в ж.д. пути. В частности, коэффициент изгиба X_1 является важнейшим показателем, так как в комплексе учитывает геометрические параметры шпалы, характер ее армирования брусками и модуль упругости составляющих ее шпалу. Масса шпалы X_2 определяет устойчивость ж.д. пути к выбросам, вызываемых температурными напряжениями в рельсах при изменении температуры окружающей среды, и, тем самым, безопасность движения поездов. Модули упругости шпалы X_3 и X_4 также являются комплексными показателями, характеризующими модули упругости как самой шпалы, так и подстилающего ее основания – балластной призмы и земляного полотна. Их величины определяют режим работы ж.д. пути, в частности, в зависимости от времени года – зимой при промерзании основания, в весенне-осенний период при его оттаивании и в летний период. Фактором X_5 может быть учтен тип применяемого рельса, а фактором X_6 – вид применяемого скрепления. При рассмотрении системы *ЗБШРП* с использованием кон-

кретного типа рельса и вида скрепления этими факторам целесообразно задавать фиксированные значения.

В качестве функций отклика Y служат свойства элементов системы *ЗБШРП*, определяющих ее эксплуатационную способность: Y_1 – напряжения в подошве рельса, МПа; Y_2, Y_3 – вертикальные прогибы соответственно рельса и шпалы, см; Y_4 – вертикальное ускорение шпалы в долях g , отн. ед.; Y_5, Y_6 – напряжения соответственно в балласте и основной площадке земляного полотна, МПа; Y_7 – сжатие рессорного комплекта 1-й ступени подвешивания, м; Y_8 – вертикальное ускорение центров масс колесных дисков в долях от g , отн. ед.; Y_9 – вертикальная сила на рельс, кН; Y_{10} – напряжения во внутренней выкружке головки рельса, МПа.

Зависимости функций отклика Y от варьируемых факторов X представляются в виде полиномиальных моделей второго порядка, коэффициенты которых определяли методами *ПЭ*. При шести варьируемых факторах и трех уровнях варьирования их значениями использовался *ПЭ* Бокса-Уилсона, включающий 56 опытов (см. таблицу П2.1 Приложения 2). Уровни варьирования факторов X приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения варьируемых факторов X в точках *ПЭ*

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

Значения функций отклика Y в *ПЭ* (см. Приложение 3) получены по результатам вычислительного эксперимента (*ВЭ*), выполненного в опытах точек *ПЭ* при постоянных параметрах, характеризующих тип подвижного состава (локомотив ВЛ-80), движущегося со скоростью 80 км/ч в кривой радиуса 350 м (см. таблицу П3.1), постоянных характеристиках балластной призмы и земляного полотна.

Расчеты выполнены по программе “Взаимодействие экипажа и пути при пространственных колебаниях подвижного состава” (ВЭИП), разработанной во ВНИИЖТ [146].

По результатам ВЭ получены ММ, адекватно (ошибка не превышает 1,26%, что характеризует высокую предсказательную способность полученных ММ) исследуемых функций отклика Y (см. Приложение 4).

Полученные ММ были использованы для построения графических зависимостей в виде изолиний на квадрате, по которым был выполнен анализ влияния варьируемых факторов X на исследуемые функции отклика Y .

3.2 Анализ варьируемых факторов при движении подвижного состава в кривой

С использованием полученных ММ $Y = Y(x_1, \dots, x_6)$ свойств элементов системы ЗБШРП (см. Приложение 4) проанализируем влияние установленных в пар. 3.1 варьируемых факторов X_1 – коэффициента изгиба шпалы, отн. ед., и X_2 – ее массы, кг, при дискретных значениях таких комплексных факторов (они зависят как от свойств шпалы, так и балластной призмы с земляным полотном), как X_3 – модуля упругости подрельсового основания в горизонтальной плоскости, МН/см², и X_4 – то же, в вертикальной, МН/см² (при этом остальные два варьируемых фактора X_5 – жесткость в отношении кручения рельса, МН/рад, и X_6 – жесткость узла крепления шпалы, МН/см, принимают фиксированные значения на том основании, что на рассматриваемом участке ж.д. пути используются конкретные тип рельсов и вид крепления) на такие функции отклика, как Y_1 – напряжения в подошве рельса, МПа; Y_2 – вертикальные прогибы рельса, см; Y_3 – вертикальные прогибы шпалы, см; Y_4 – вертикальное ускорение шпалы в долях g , отн. ед.; Y_5 – напряжения в балласте, МПа; Y_6 – напряжения в основной площадке земляного полотна, МПа; Y_9 – вертикальная сила на рельс, кН; Y_{10} – напряжения во внутренней выкружке головки рельса, МПа.

Дискретными варьируемые факторы X_3 и X_4 принимаются из тех соображений, чтобы можно было установить влияние сезонных факторов на ж.д. путь. При

этом зимним условиям эксплуатации будут соответствовать значения переменных X_3 и X_4 на верхнем уровне (в кодированном масштабе $x_3 = 1$ и $x_4 = 1$) – они принимают наибольшие значения при отрицательных температурах из-за промерзания балластной призмы и земляного полотна; в летний период – на нижнем уровне (в кодированном масштабе $x_3 = -1$ и $x_4 = -1$) – они принимают самые низкие значения при положительных температурах; а в периоды осень-весна – на среднем уровне (в кодированном масштабе $x_3 = 0$ и $x_4 = 0$).

При этом из рассмотрения попарного изменения одного из дискретных факторов X_3 и X_4 при фиксированном значении второго можно выполнить сравнительную оценку степени их влияния на функции отклика Y .

Таким образом, анализ будем выполнять в кодированном масштабе x варьируемых факторов x_1 – коэффициента изгиба шпалы, и x_2 – массы шпалы, на плоскости (квадрате) при варьировании этих переменных от -1 до $+1$, дискретных значениях двух переменных (x_3, x_4) в вершинах квадрата с координатами $(-1, -1)$, $(-1, 1)$, $(1, -1)$ и $(1, 1)$ при фиксированных значениях остальных двух факторов на основном уровне, т.е. при $x_5 = x_6 = 0$.

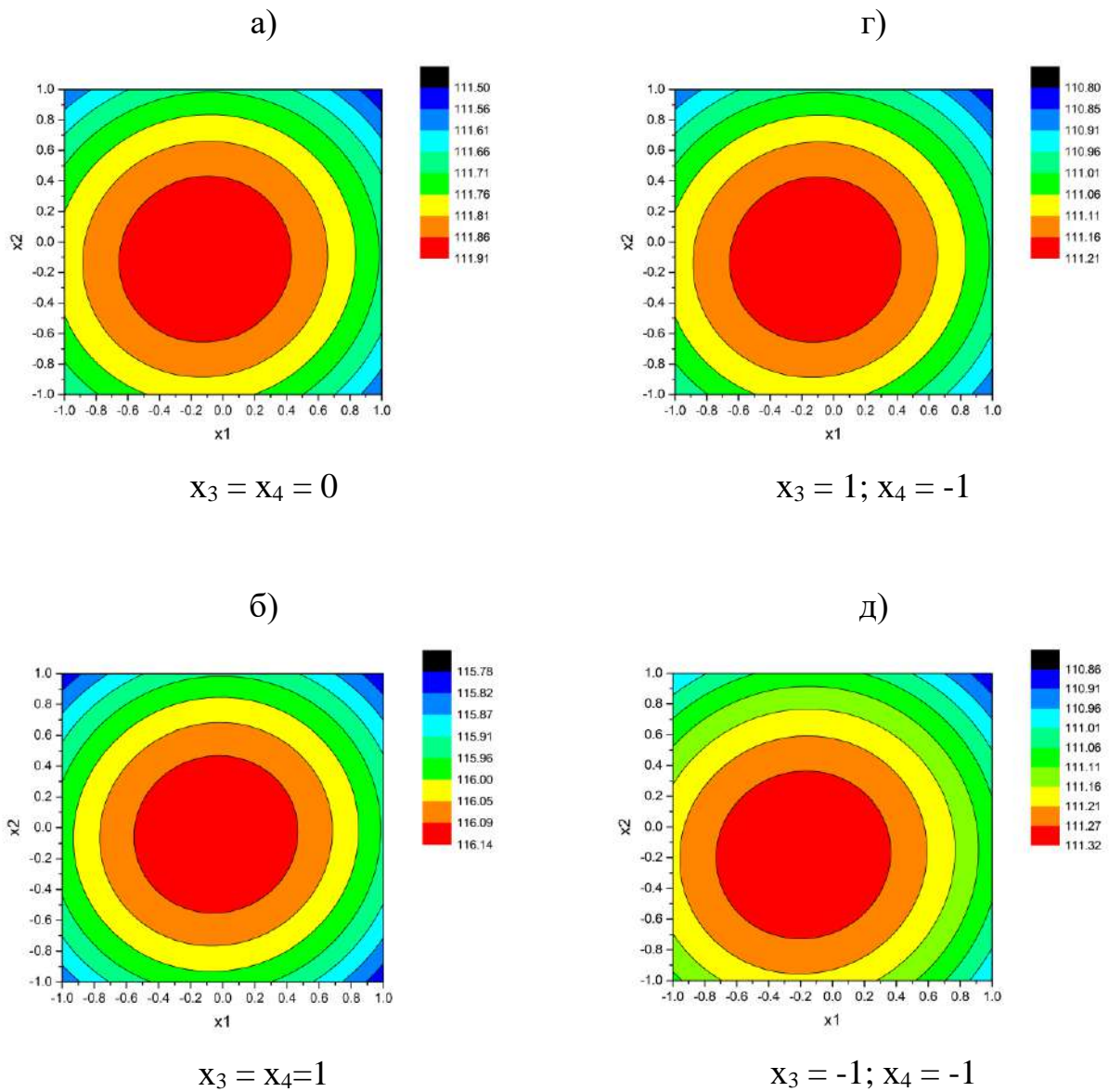
Переход от кодированных x , изменяющихся в диапазоне от -1 до $+1$, к натуральным значениям X варьируемых факторов выполняется с учетом данных таблицы 3.1.

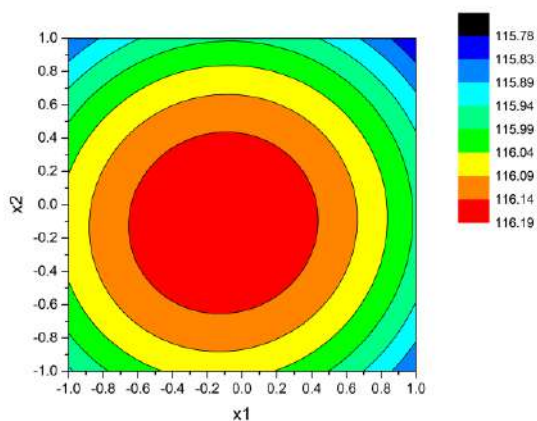
Изолинии – уровни равных значений функций отклика Y_j ($j = 1, \dots, 6, 9, 10$), строятся на квадрате с вершинами $(-1, -1)$, $(-1, 1)$, $(1, -1)$, $(1, 1)$ с центром в точке $(0, 0)$ на плоскости (x_1, x_2) . Для построения изолиний значений анализируемой функции отклика Y на квадрате значений варьируемых факторов x использовался пакет программ фирмы OriginLab Corporation для численного анализа данных и научной графики «Origin 9.2».

Влияние варьируемых факторов на напряжения в подошве рельса

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на напряжения в подошве рельса Y_1 , МПа, важна с точки зрения снижения риска его хрупкого разрушения при движении подвижного состава.

Влияние изменений свойств материала композиционной шпалы, выраженных через x_1 – коэффициент ее изгиба, и x_2 – массы шпалы, при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов на величину функции отклика Y_1 показано на рисунке 3.2.





$$x_3 = -1; x_4 = 1$$

Рисунок 3.2 – 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 (см. пояснения в тексте)

Из приведенных на рисунке 3.2 зависимостей следует, что изменение коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы оказывают практически одинаковое влияние на напряжения в подошве шпалы Y_1 , максимальное значение которого достигается при средних значениях x_1 и x_2 в интервалах их варьирования, т.е. при $x_1 \approx 0$ и $x_2 \approx 0$. При этом более сильное влияние на величину Y_1 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы (изменение при этом Y_1 составило всего 0,36-0,46 МПа), а сезонные факторы – модуль упругости подрельсового основания в горизонтальной x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_1 достигает 4,92 МПа (см. рисунки 3.2б и 3.2д).

Вместе с тем имеется возможность управления величиной Y_1 , минимальное значение которой достигается за счет комбинации минимального коэффициента изгиба $x_1 \rightarrow -1$ и массы $x_2 \rightarrow -1$ шпалы, или их максимальных значений ($x_1 \rightarrow 1; x_2 \rightarrow 1$), или сочетаний ($x_1 \rightarrow -1; x_2 \rightarrow 1$) и ($x_1 \rightarrow 1; x_2 \rightarrow -1$), выбор которых определяется возможностью принятой технологии изготовления композиционных шпал и их составом.

Влияние варьируемых факторов на вертикальные прогибы рельса

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на вертикальные прогибы рельса Y_2 , см, важна с точки зрения снижения риска его разрушения при циклическом нагружении при движении подвижного состава.

Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_2 показано на рисунке 3.3.

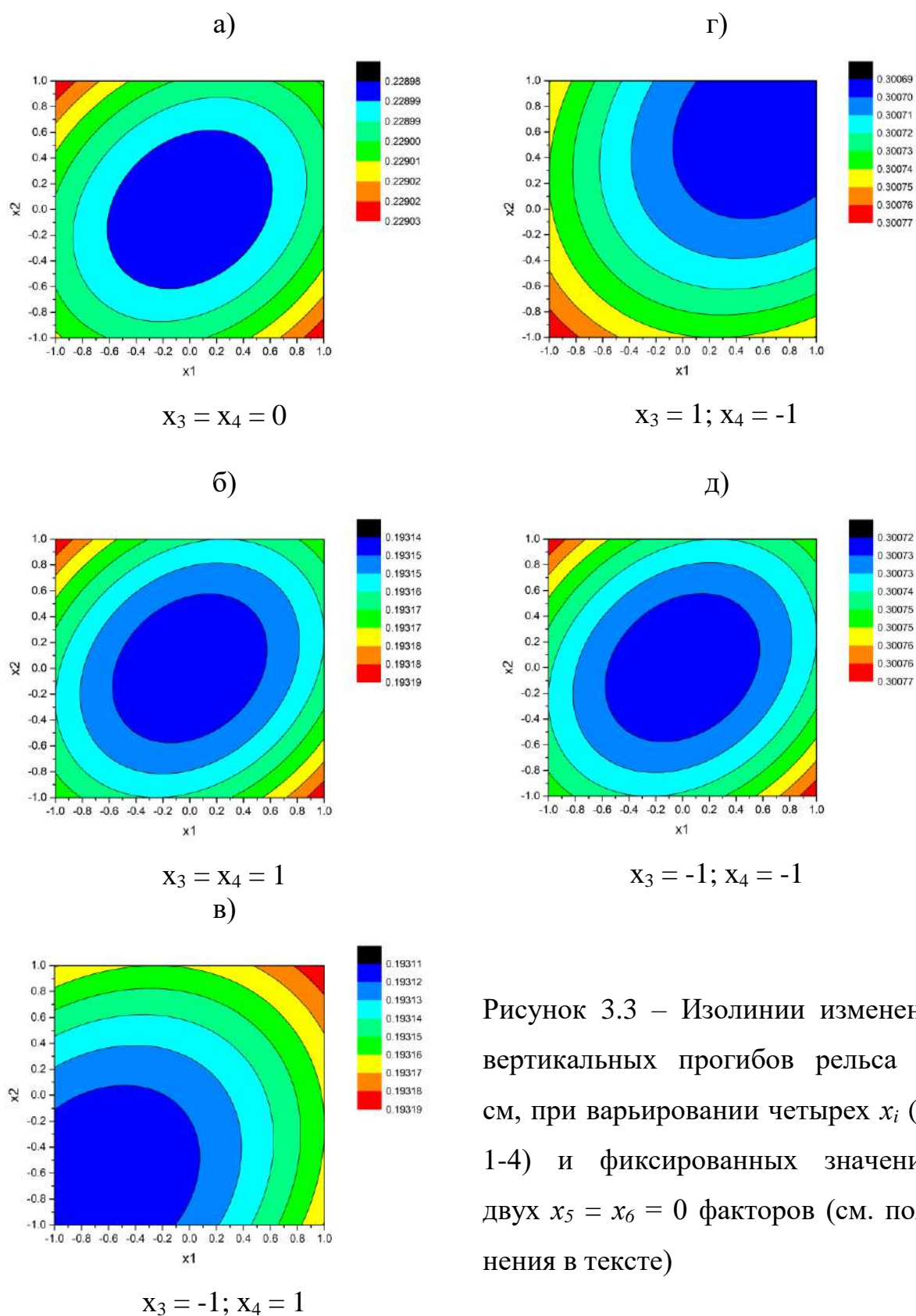


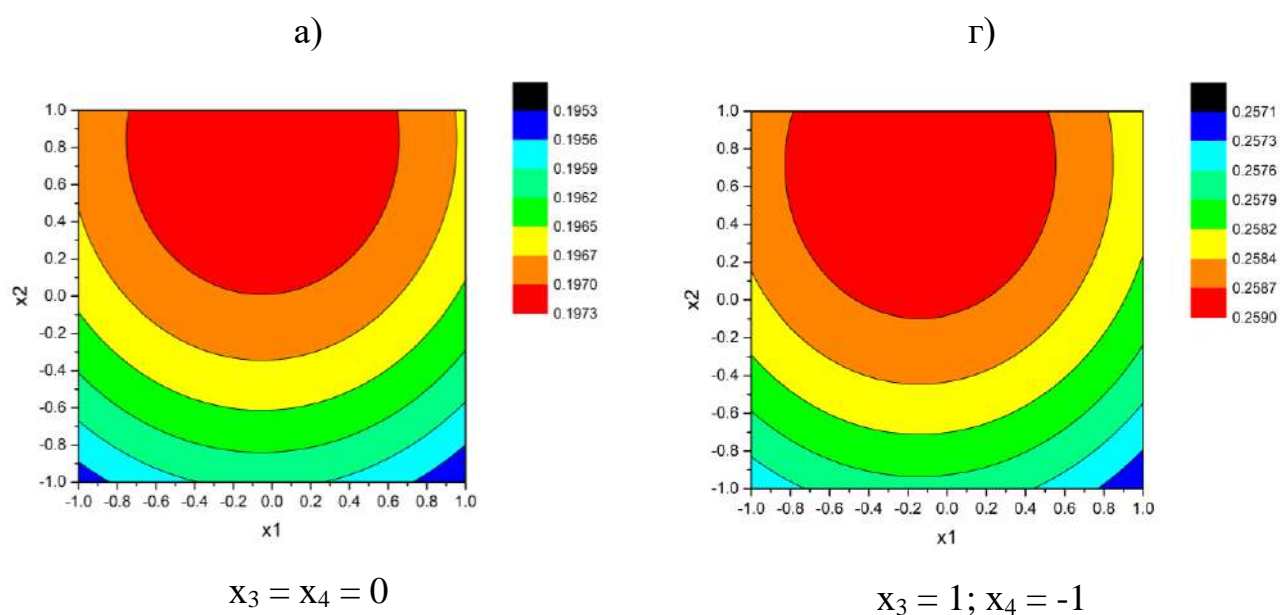
Рисунок 3.3 – Изолинии изменения вертикальных прогибов рельса Y_2 , см, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

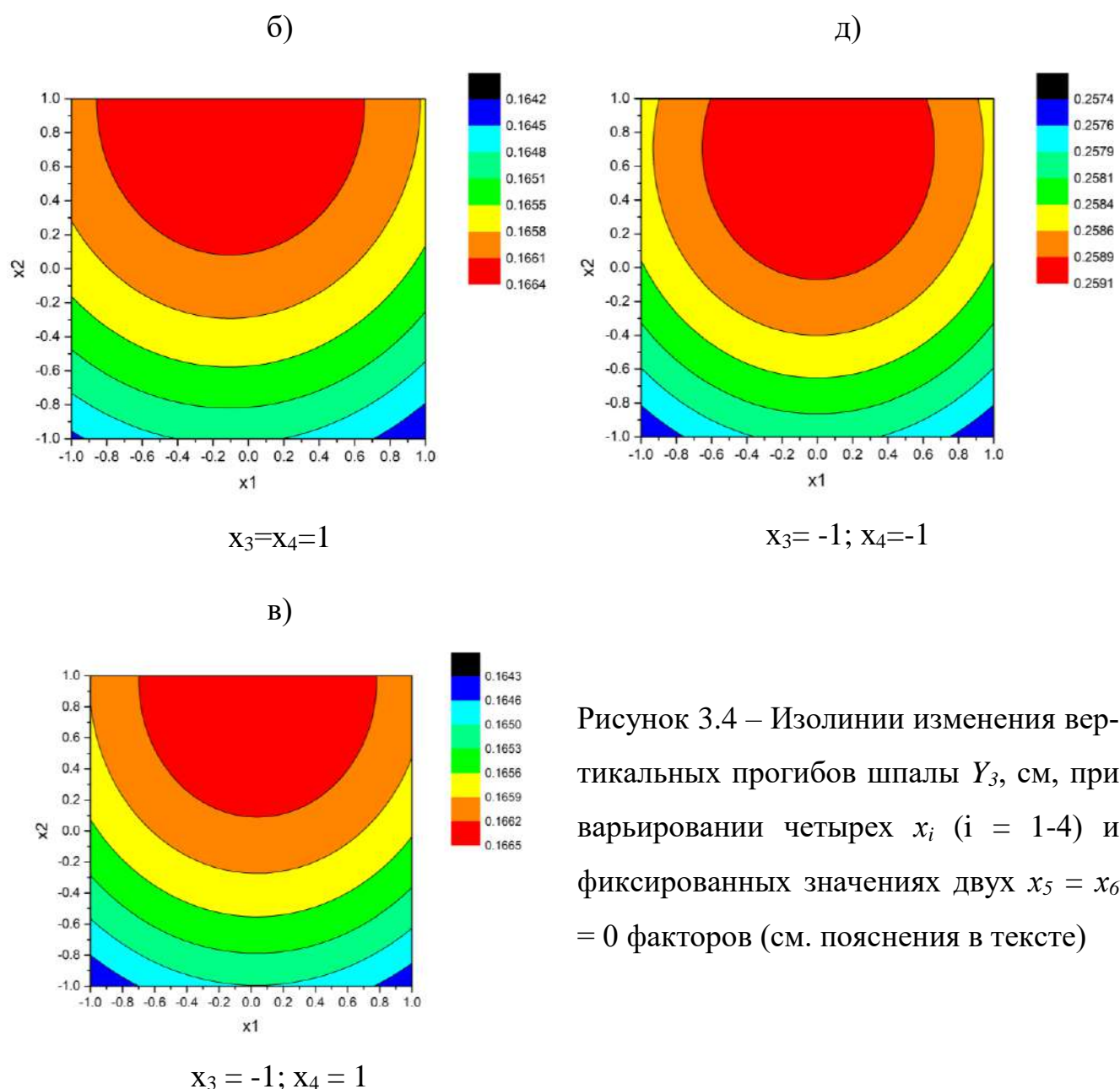
Из приведенных на рисунке 3.3 зависимостей следует, что, изменение коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы оказывают ничтожное влияние на величину вертикального прогиба рельса Y_2 (максимальное изменение Y_2 составило только $0,00008 \text{ см} \approx 0 \text{ см}$). При этом более сильное влияние на величину Y_2 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы, а сезонные факторы – модуль упругости подрельсового основания в горизонтальной x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_2 достигает $0,11 \text{ см}$ (см. рисунки 3.3б и 3.3д). Возможность управления величиной Y_2 посредством регулирования x_1 и x_2 ограничена.

Влияние варьируемых факторов на вертикальные прогибы шпалы

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на вертикальные прогибы шпалы Y_3 , см, важна с точки зрения снижения риска ее разрушения при циклическом нагружении при движении подвижного состава.

Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_3 показано на рисунке 3.4.





Из приведенных на рисунке 3.4 зависимостей следует, что в диапазоне изменения x_2 от -1 до 0 на величину вертикального прогиба шпалы Y_3 оказывает влияние в основном масса шпалы, а при изменении значений x_2 от 0 до 1 начинает оказывать влияние на величину Y_3 и коэффициент изгиба шпалы x_1 . Максимум прогиба шпалы достигается при ($x_1 \rightarrow 0; x_2 \rightarrow 1$).

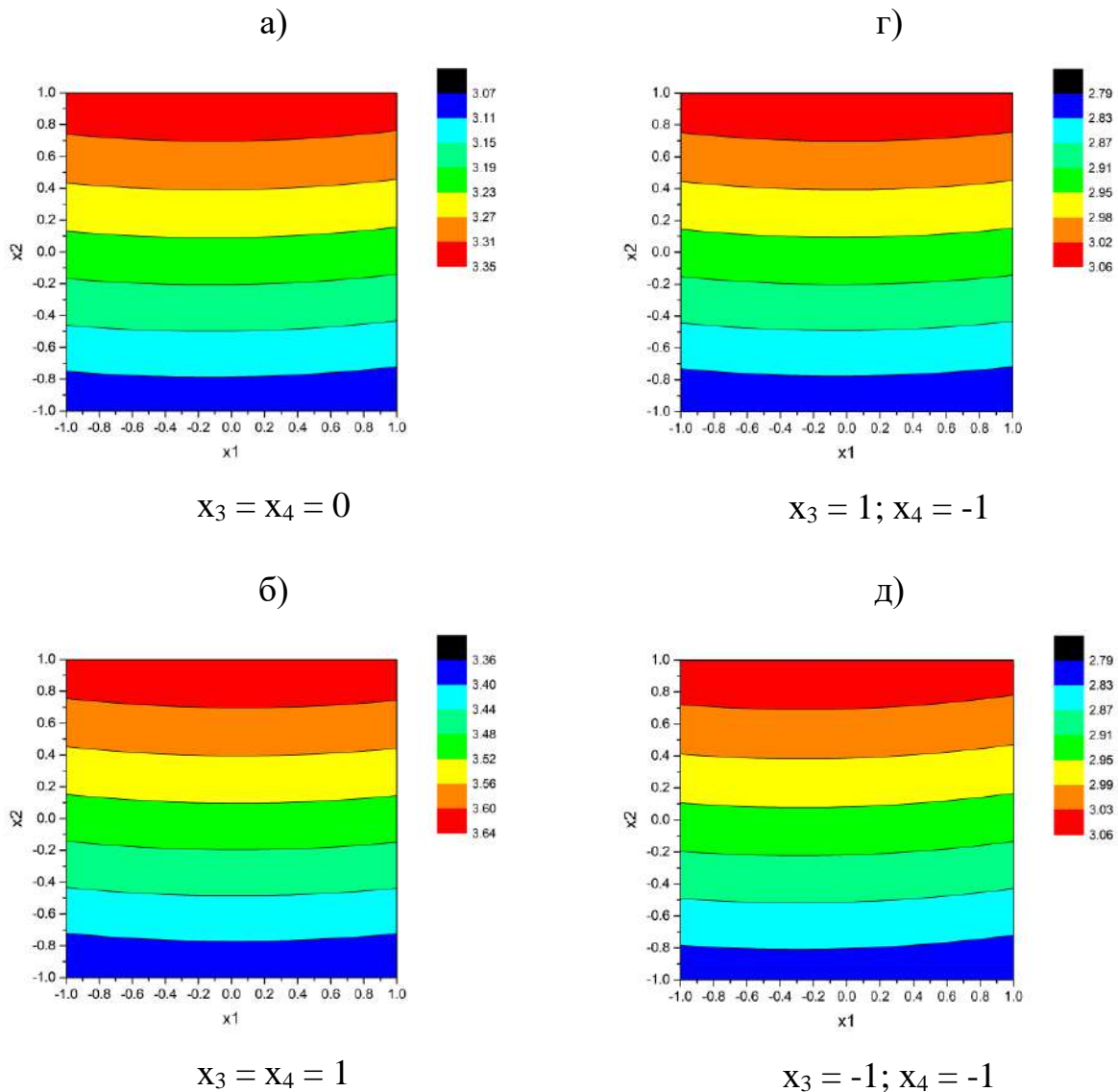
При этом более сильное влияние на величину Y_3 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы (изменение при этом Y_3 составляет 0,002 см ≈ 0 см), а сезонные факторы – модуль упругости подрельсового основания в

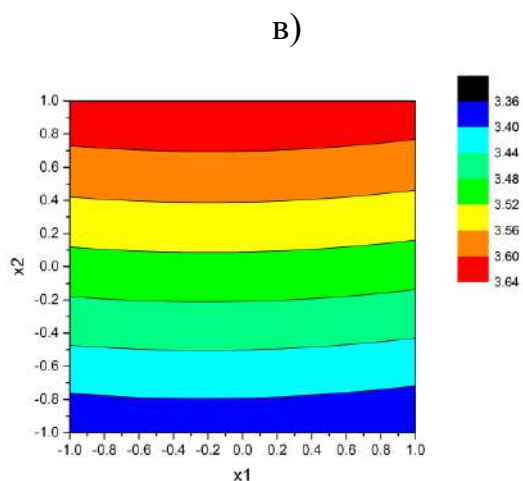
горизонтальной x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_3 достигает 0,093 см (см. рисунки 3.4б и 3.4д). Возможность управления величиной Y_3 посредством регулирования x_1 и x_2 ограничена.

Влияние варьируемых факторов на вертикальное ускорение шпалы

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на вертикальное ускорение шпалы Y_4 (в долях g , отн. ед.) важна с точки зрения снижения риска ее разрушения при динамическом воздействии подвижного состава.

Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_4 показано на рисунке 3.5.





$$x_3 = -1; x_4 = 1$$

Рисунок 3.5 – Изолинии изменения вертикального ускорения шпалы Y_4 (в долях g , отн. ед.) при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

Из приведенных на рисунке 3.5 зависимостей следует, что при прочих равных условиях в диапазоне варьирования коэффициента изгиба шпалы x_1 на величину вертикального ускорения шпалы Y_4 преимущественное влияние оказывает масса шпалы x_2 – с ее ростом наблюдается увеличение величины вертикального ускорения шпалы.

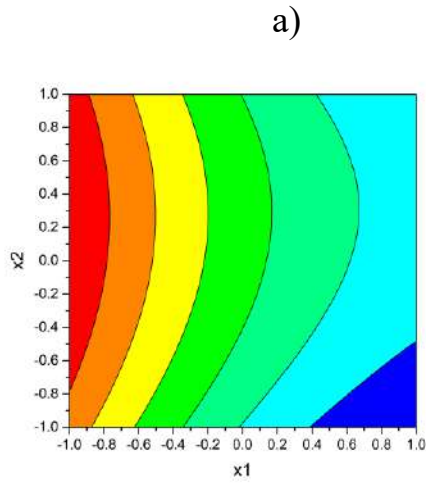
При этом более сильное влияние на величину Y_4 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы шпалы x_2 (изменение при этом Y_4 составляет 0,28 в долях g , отн. ед.), а сезонные факторы – модуля упругости подрельсового основания в горизонтальной плоскости x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_4 достигает 0,58 (см. рисунки 3.5б и 3.5д).

Вместе с тем имеется возможность управления величиной Y_4 , минимальное значение которой достигается при минимуме значения массы шпалы, т.е. при $x_2 \rightarrow -1$; коэффициент изгиба шпалы при этом не оказывает существенного влияния.

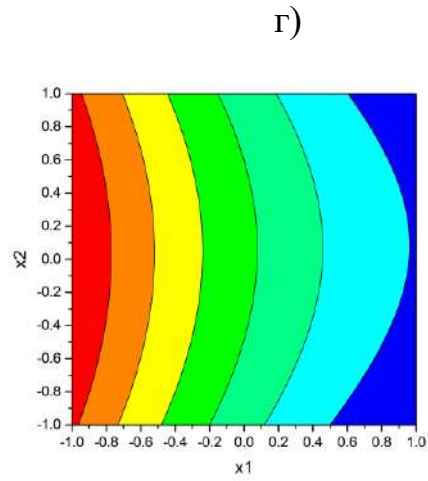
Влияние варьируемых факторов на напряжения в балласте

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на напряжения в балласте Y_5 , МПа, важна с точки зрения снижения воздействия подвижного состава на балластную призму и обеспечение стабильности ж.д. пути.

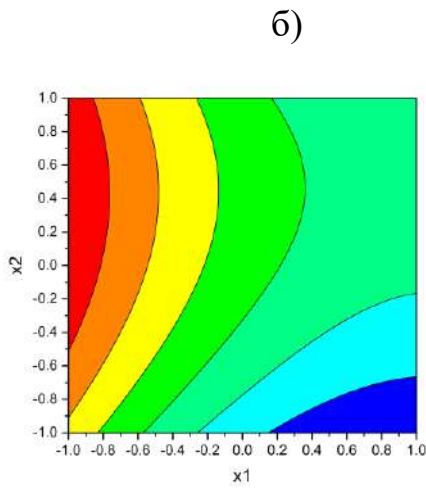
Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_5 показано на рисунке 3.6.



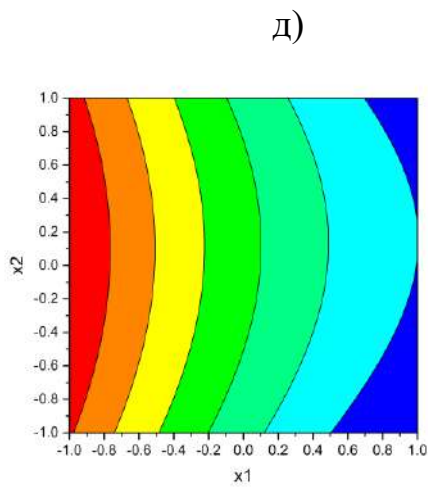
$$x_3 = x_4 = 0$$



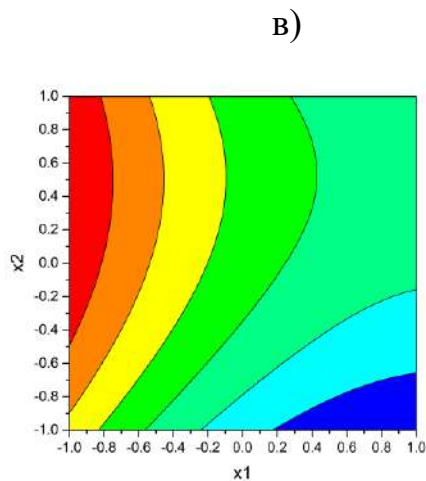
$$x_3 = 1; x_4 = -1$$



$$x_3 = x_4 = 1$$



$$x_3 = -1; x_4 = -1$$



$$x_3 = -1; x_4 = 1$$

Рисунок 3.6 – Изолинии изменения напряжений в балласте γ_5 , МПа, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

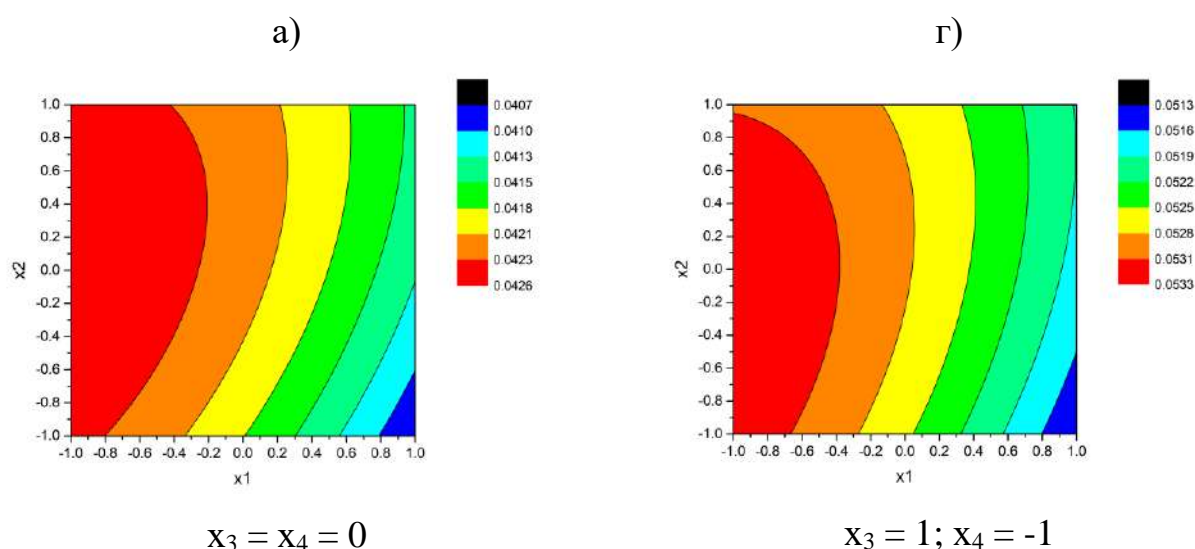
Из приведенных на рисунке 3.6 зависимостей следует, что при прочих равных условиях на изменение напряжений в балластной призме Y_5 изменение коэффициента изгиба шпалы x_1 оказывает более существенное влияние, чем ее масса x_2 .

При этом, как и ранее для функций отклика Y , более сильное влияние на величину Y_5 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы (изменение при этом Y_5 достигает 0,006 МПа), а сезонные факторы – модуля упругости подрельсового основания в горизонтальной x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_5 достигает 0,047 МПа, т.е. на порядок выше (см. рисунки 3.6б и 3.6д).

*Влияние варьируемых факторов на
напряжения в основной площадке земляного полотна*

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на напряжения в основной площадке земляного полотна Y_6 , МПа, важна с точки зрения снижения воздействия подвижного состава на земляное полотно и обеспечения стабильности ж.д. пути.

Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_6 показано на рисунке 3.7.



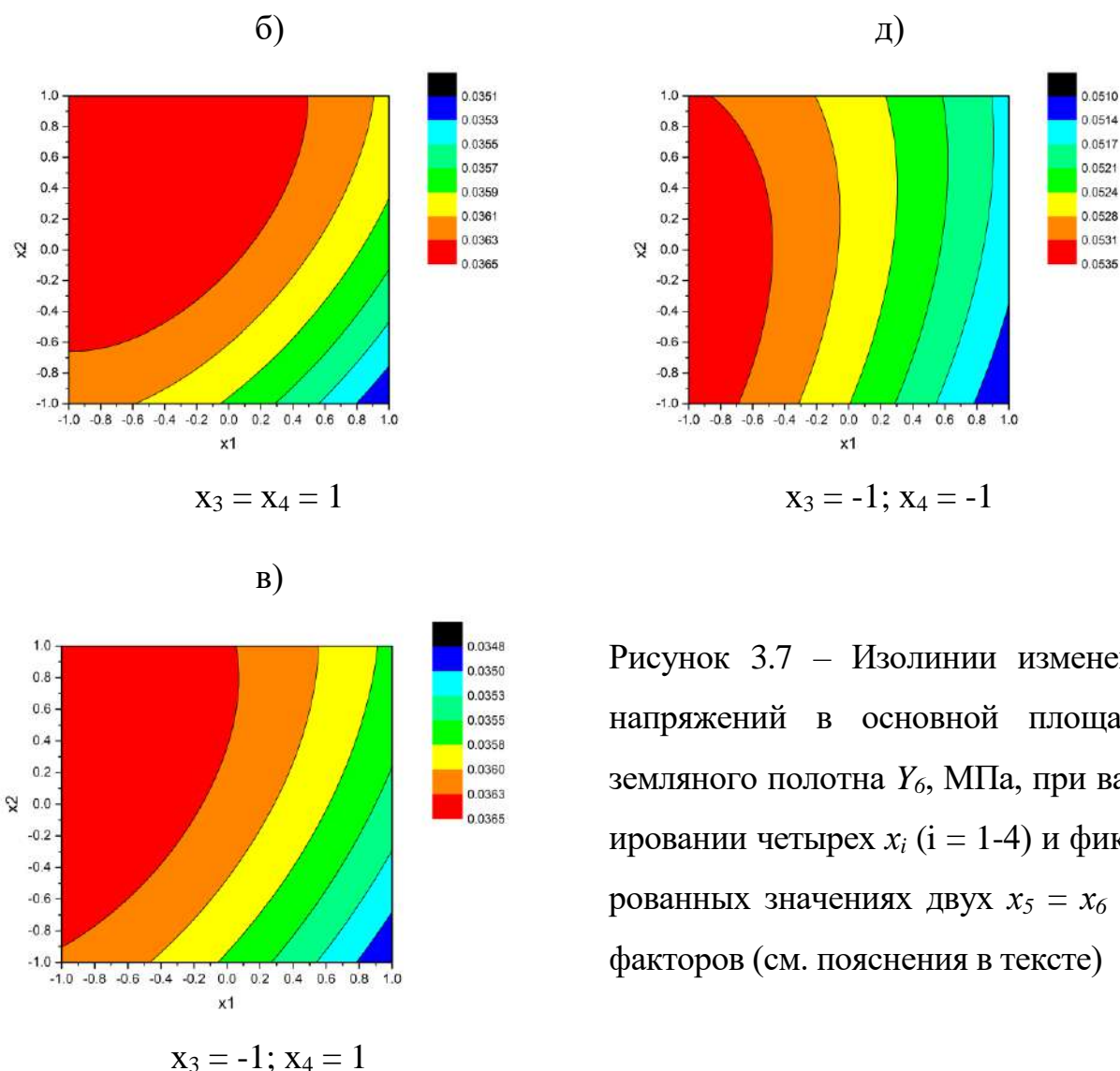


Рисунок 3.7 – Изолинии изменения напряжений в основной площадке земляного полотна Y_6 , МПа, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

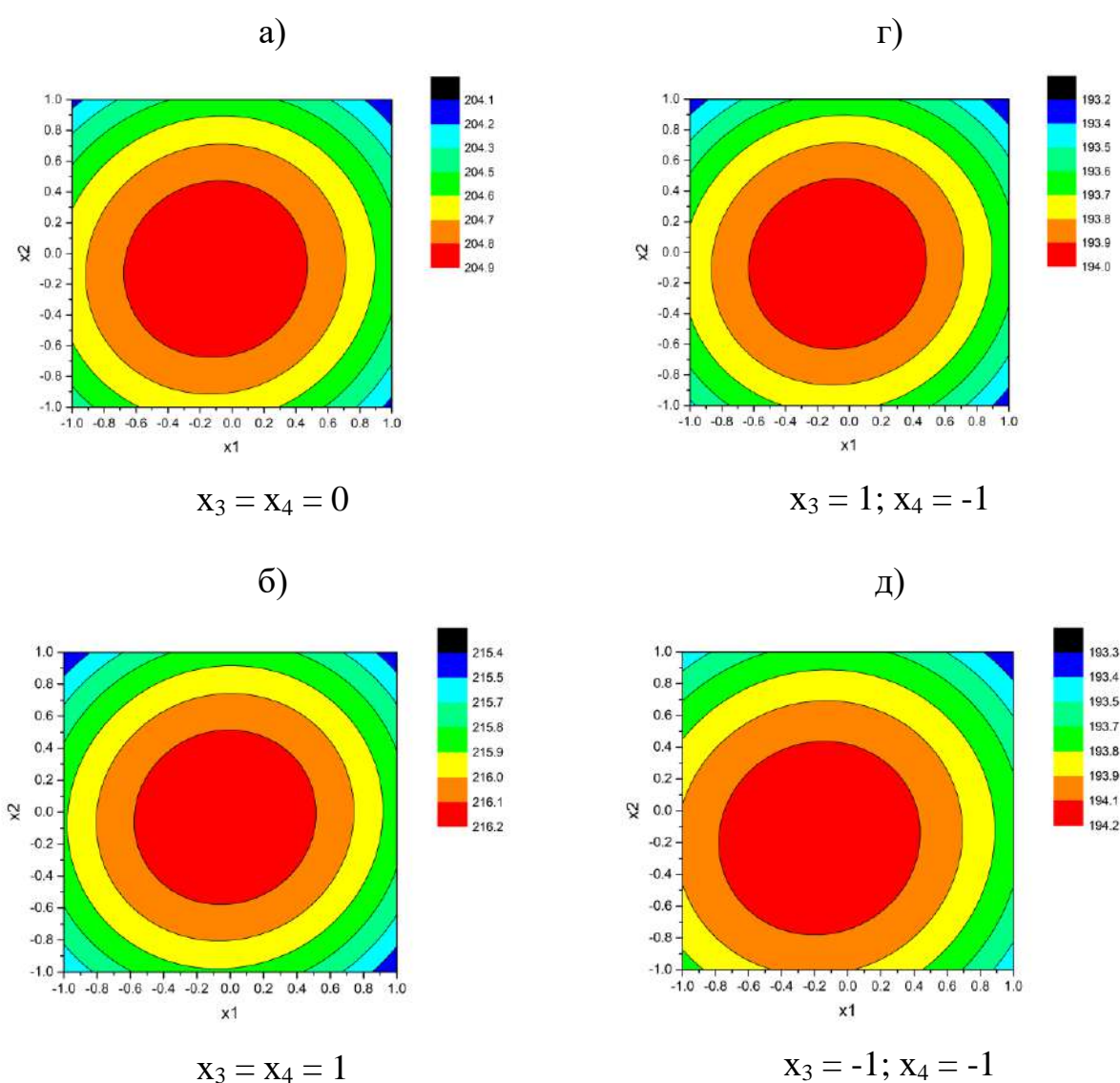
Из приведенных на рисунке 3.7 данных следует, что при прочих равных условиях на изменение напряжений в основной площадке земляного полотна Y_6 изменение коэффициент изгиба шпалы x_1 оказывает более существенное влияние, чем ее масса x_2 .

При этом, как и ранее для функций отклика Y , более сильное влияние на величину Y_6 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы шпалы x_2 (изменение при этом Y_6 достигает 0,0025 МПа), а сезонные факторы – модуля упругости подрельсового основания в горизонтальной плоскости x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_6 достигает 0,017 МПа, т.е. более чем в пять раз выше (см. рисунки 3.7б и 3.7д).

*Влияние варьируемых факторов на величину
вертикальной силы, действующей на рельс*

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на величину вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , кН, важна с точки зрения снижения риска его хрупкого разрушения при движении подвижного состава.

Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_9 показано на рисунке 3.8.



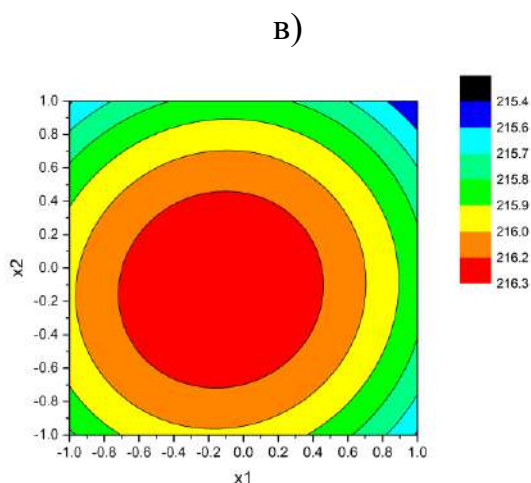


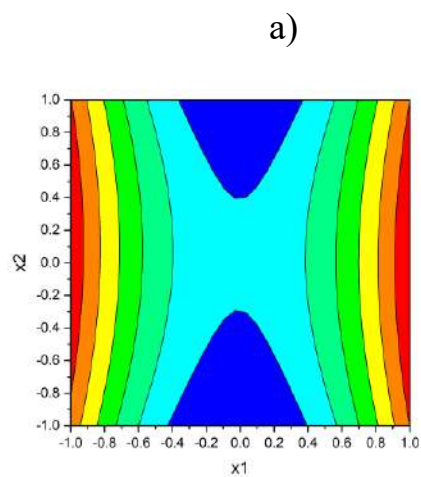
Рисунок 3.8 – Изолинии изменения величины вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , кН, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

Из приведенных на рисунке 3.8 зависимостей следует, что изменение коэффициента изгиба x_1 и массы x_2 шпалы оказывают практически одинаковое влияние на величину вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , максимальное значение которой достигается при средних значениях x_1 и x_2 в интервалах их варьирования, т.е. при $x_1 \approx 0$ и $x_2 \approx 0$. При этом более сильное влияние на величину Y_9 оказывает изменение не коэффициента изгиба x_1 и массы шпалы x_2 (изменение при этом Y_9 составило всего 0,9 кН), а сезонные факторы – модуля упругости подрельсового основания в горизонтальной плоскости x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_9 достигает 22,1 кН (см. рисунки 3.8б и 3.8д). Возможность управления величиной Y_9 посредством регулирования x_1 и x_2 ограничена.

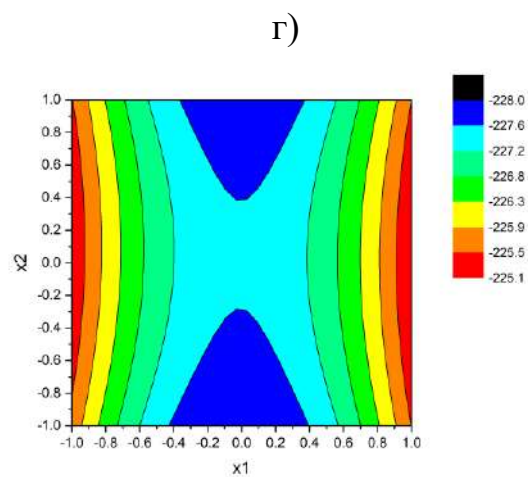
*Влияние варьируемых факторов на величину напряжений
во внутренней выкружке головки рельса*

Оценка влияния параметров композиционной шпалы на величину напряжений во внутренней выкружке головки рельса Y_{10} , МПа, важна с точки зрения уменьшения износа как рельса, так и колесной пары, обеспечивая при этом безопасность движения подвижного состава.

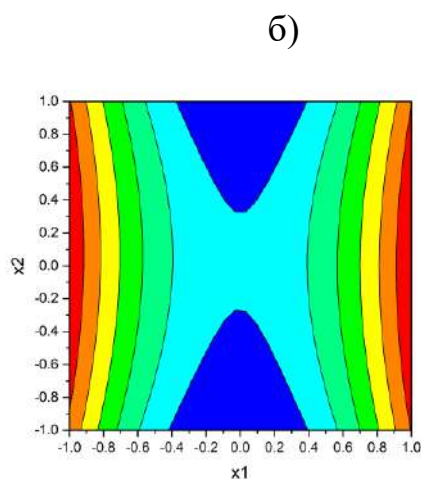
Влияние изменений свойств композиционной шпалы ($x_1; x_2$) при дискретных значениях остальных четырех варьируемых факторов (x_3, \dots, x_6) на величину функции отклика Y_{10} показано на рисунке 3.9.



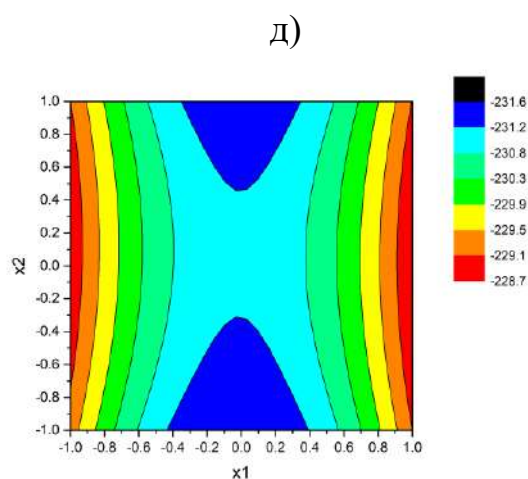
$$x_3 = x_4 = 0$$



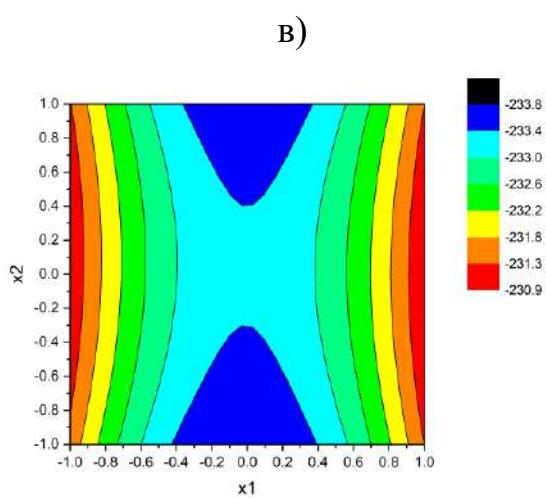
$$x_3 = 1; x_4 = -1$$



$$x_3 = x_4 = 1$$



$$x_3 = -1; x_4 = -1$$



$$x_3 = -1; x_4 = 1$$

Рисунок 3.9 – Изолинии изменения величины напряжений во внутренней выкружке головки рельса Y_{10} , МПа, при варьировании четырех x_i ($i = 1-4$) и фиксированных значениях двух $x_5 = x_6 = 0$ факторов (см. пояснения в тексте)

Из приведенных на рисунке 3.9 данных следует, что при прочих равных условиях на величину напряжений во внутренней выкружке головки рельса Y_{10} (они принимаются по приведенным на рисунке 3.9 значениям со знаком «минус») изменение коэффициент изгиба шпалы x_1 оказывает основное влияние, а x_2 не оказывает существенного влияния. Максимальное значение Y_{10} достигается при $x_1 \approx -1$ или 1 .

При этом по сравнению с влиянием x_1 и x_2 (изменение Y_{10} составило всего 2,9 МПа), сезонные факторы – модуль упругости подрельсового основания в горизонтальной x_3 и в вертикальной x_4 плоскости – оказывают относительно малое влияние, с лета до зимы (x_3, x_4 варьируются от -1 до 1) изменение величины Y_{10} достигает 0,9 МПа (см. рисунки 3.9б и 3.9д). Вместе с тем имеется возможность управления величиной Y_{10} , минимальное значение которой может быть достигнуто при $x_1 \rightarrow 0$, вне зависимости от значения x_2 .

В таблице 3.2 обобщено влияние варьируемых факторов x_1 и x_2 (при суммарном влиянии x_3 и x_4 , принятом за 100%) на функции отклика Y , характеризующих состояние системы ЗБШРП.

Таблица 3.2 – 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

Как следует из данных таблицы 3.2, показал, что на состояние ж.д. пути свойства материала композиционных шпал в равной степени влияют на напряжения в подошве рельса Y_1 , вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , 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 площадки 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 влияет ее масса.

3.3 Рациональные свойства материала композиционных шпал

Полученные на предыдущем этапе *ММ* свойств Y системы *ЗБШРП* в зависимости от варьируемых факторов X использовали для решения оптимизационной задачи по поиску свойств композиционных шпал.

Многокритериальную целевую функцию C для оптимизации свойств материала композиционной шпалы устанавливали из условия достижения функциями отклика Y минимальных значений $Y^{min}_{1,2,4-6,9,10}$, в то время как для обеспечения “мягкого” режима движения подвижного состава ее вертикальный прогиб Y_3 при этом должен стремиться к максимальному значению Y^{max}_3 .

В качестве целевой функции C принята свертка вида

$$C = \sum \alpha_i / (Y_i - Y^{min}_i) / Y^{min}_i + \alpha_3 / (Y_3 - Y^{max}_3) / Y^{max}_3, \quad (3.1)$$

где α_i – весовой множитель, отн. ед. ($\sum \alpha_i = 1; i = 1, \dots, 10$).

При минимизации целевой функции (3.1) весовые множители α_i варьировали в пределах 0,05-0,20. Кроме того, так как материал шпал оказывает слабое влияние на жесткость узла крепления X_6 , модуль упругости подрельсового основания X_3 и на кручение рельса X_5 , а вклад модуля упругости материала шпалы в комплексный показатель упругости подрельсового основания X_4 трудно корректно оценить из-за более значимого влияния, как это было установлено в предыдущем параграфе, сезонной изменчивости свойств земляного полотна и балласта, то

эти переменные в расчетах принимали фиксированными и равными значениям основных уровней: $X_3 = 3,9$ МН/см², $X_4 = 5,7$ МН/см², $X_5 = 435$ МН/рад и $X_6 = 1200$ МН/см (см. таблицу 3.1).

Задача оптимизации свойств материала композиционной шпалы формулировалась следующим образом: определить значения коэффициента изгиба X_1 и массы шпалы X_2 , при которых достигается компромиссное напряженно-деформированное состояние системы *ЗБШРП*, или в математической постановке:

найти X_1 и X_2 , при которых достигается минимум целевой функции (3.1)

$$\Sigma \alpha_i / (Y_i - Y_i^{min}) / Y_i^{min} + \alpha_3 / (Y_3 - Y_3^{max}) / Y_3^{max} \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

и выполняются ограничения на функции отклика Y :

а) из условий обеспечения прочности пути (по напряжениям):

$$\text{— в подошве рельса} \quad Y_1 \leq [Y_1]; \quad (3.3)$$

$$\text{— в балласте, МПа} \quad Y_5 \leq [Y_5]; \quad (3.4)$$

$$\text{— в земляном полотне, МПа} \quad Y_6 \leq [Y_6]; \quad (3.5)$$

$$\text{— во внутренней выкружке головки рельса, МПа} \quad Y_{10} \leq [Y_{10}]; \quad (3.6)$$

$$\text{б) устойчивости пути, кН} \quad P_y \leq [P_y], \quad (3.7)$$

где: $[Y]$ – допустимые значения функций отклика [147], равные $[Y_1] = 190$ МПа, $[Y_5] = 0,4$ МПа, $[Y_6] = 0,1$ МПа и $[Y_{10}] = 201$ МПа; $[P_\kappa] = 1,75$ МН – усилие в рельсах, вызывающее потерю устойчивости пути [148].

При прохождении локомотива ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч в кривой радиусом 350 м в результате решения задачи (3.2)-(3.7) методом многокритериальной оптимизации определены оптимальные значения коэффициента изгиба и массы шпалы, соответственно в кодированном $x_1^{onm} = + (0,92-0,97)$ и $x_2^{onm} = - (0,16-0,24)$ и натуральном $X_1^{onm} = 0,82-0,84$, отн. ед., и $X_2^{onm} = 151-162$, кг, масштабах.

Полученное значение коэффициента изгиба X_1^{onm} используется далее для определения модуля упругости композиционной шпалы $E_{ш}$ по следующей схеме.

1. Задаваясь коэффициентом постели подшпального основания c , модулем упругости $E_{ш}$ и высотой $h_{ш}$ шпалы, определяется коэффициент жесткости подшпального основания

$$k = [3c/(E_{ш}h^3)]^{0,25}. \quad (3.8)$$

2. Устанавливаются коэффициенты эпюры прогибов шпалы

$$\eta_1 = e^{-kx_1}(\text{Cos}kx_1 + \text{Sink}x_1); \quad \eta_2 = e^{-kx_2}(\text{Cos}kx_2 + \text{Sink}x_2), \quad (3.9)$$

где: x_1 и x_2 – координаты точки шпалы относительно соответственно вертикальных нагрузок P_1 и P_2 , действующих на шпалу в подрельсовых сечениях, м.

3. Вычисляются прогибы в i -ом сечении шпалы

$$y_i = [k(P_1\eta_1 + P_2\eta_2)]/(2b_{ш}c). \quad (3.10)$$

4. По средней величине прогиба шпалы $y_{cp} = \sum y_i/n$ и его максимальному значению y_{max} определяется значение коэффициента изгиба X_1

$$X_1^{opt} = y_{cp}/y_{max}. \quad (3.11)$$

При прохождении локомотива ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч в кривой: для определения величины $E_{ш}^{min}$, варьируя значениями коэффициента постели c , высотой шпалы h и ее модулем упругости $E_{ш}$ при постоянной величине нагрузки на шпалу (при прохождении локомотива ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч в кривой радиусом 350 м $P_1 = 52$ кН и $P_2 = 58$ кН), расчетом по вышеприведенной методике устанавливается значение модуля упругости шпалы $E_{ш}^{min}$, при котором обеспечивается коэффициент изгиба X_1^{opt} .

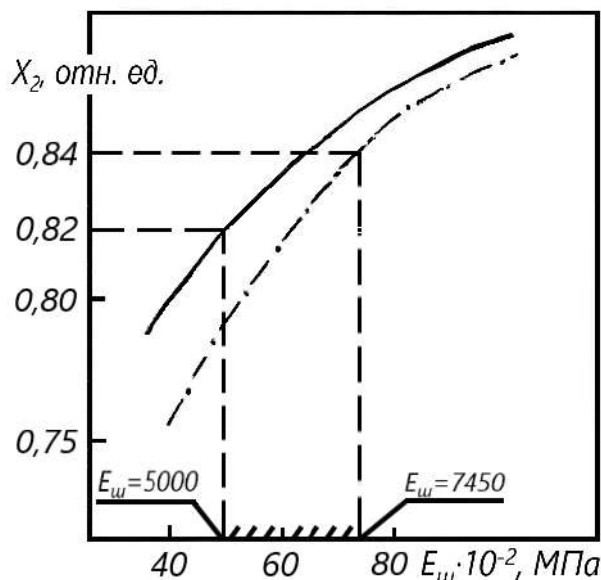


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента изгиба шпалы X_2 от модуля упругости $E_{ш}$ и коэффициента постели шпалы c в кривой
 — при $c = 6 \cdot 10^7$ Н/м³; - - - - - при $c = 8 \cdot 10^7$ Н/м³
 Примечание: заштрихована область рациональных значений $E_{ш}$.

Процедуру поиска модуля упругости шпалы поясняет рисунок 3.10, из которого находим область рациональных значений $E_{ш}^{min} = 5000-7450$ МПа.

Поэтому при прохождении локомотива ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч в кривой оптимальные значения модуля упругости композиционной шпалы находится в диапазоне 5000-7450 МПа, а ее масса – 151-162 кг. Отметим, что в работе [23] проанализирован случай прохождения локомотивом ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч прямого участка, для которого оптимальное значение модуля упругости композиционной шпалы составило 6200-7600 МПа, а ее масса – 146-153 кг. В связи с этим рациональные свойства материала шпалы, отвечающие обоим случаям (в кривой и по прямым со скоростью 80 км/ч), составят: модуль упругости композиционной шпалы – 6200-7450 МПа, ее масса – 151-153 кг.

Верхнюю оценку модуля упругости композиционной шпалы $E_{ш}^{max}$ устанавливаем из условия обеспечения ее изгибной жесткости $G_{ш}$, равной произведению модуля упругости $E_{ш}$ на момент инерции ее поперечного сечения I , которая должна быть не ниже предельного значения

$$G_{ш} \geq [G_{ш}], \quad (3.12)$$

где: для сосновой обрезной деревянной шпалы (I-го типа по ГОСТ 78) $[G_{ш}^d] = 1,45$ МПа·м⁴, а для среднего сечения ж.б. шпалы – $[G_{ш}^{жб}] = 1,82$ МПа·м⁴.

Изгибная жесткость определяется для конструкции композиционной шпалы прямоугольного сечения, состоящей из древесно-волокнутого пластика (матрицы) и армирующих шпалу двух или четырех бамбуковых стержней (см. Приложение 5).

Дальнейший анализ будем выполнять на основании формулы (П2.16) для шпалы с двумя армирующими бамбуковыми стержнями:

$$G_{ш2} = E_m \frac{ab^3}{12} + (E_{\sigma} - E_m) \cdot S_{\sigma} \left[\frac{R^2 + r^2}{2} + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right] + (E_y - E_m) \cdot S_y \left[r^2 + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right],$$

здесь $S_{\sigma} = \pi(R^2 - r^2)$, $S_y = \pi r^2$,

и формулы (П.2.20) для шпалы с четырьмя бамбуковыми стержнями:

$$G_{ш2} = E_m \frac{ab^3}{12} + (E_{\sigma} - E_m) \cdot S_{\sigma} \left[\frac{R^2 + r^2}{2} + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right] + (E_y - E_m) \cdot S_y \left[r^2 + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right],$$

здесь $S_{\sigma} = 2\pi(R^2 - r^2)$, $S_y = 2\pi r^2$.

Задаваясь размерами $b_{ш} = 25$ см, $r = 1,4$ см, $R = 2,0$ см, расстоянием 2 см от нижней или верхней грани соответственно верхнего или нижнего бруска до постели шпалы и модулем упругости брусков мао-бамбука при изгибе $E_{\delta} = 16560$ МПа (см. параграф 2.1), модулем упругости цементного камня $E_{ц} = 20000$ МПа, из формул (П2.16) и (П.2.20) определяем значения $E_{ш}^{max}$. При вычислении массы шпалы принимается плотность брусков бамбука $\rho_{б} = 0,860 \times 10^3$ кг/м³, плотность безусадочного цемента $\rho_{ц} = 2,210 \times 10^3$ кг/м³, длина шпала $L = 2,75$ м, длины ствола бамбука и заполняющего его цементного камня $l = 2,65$ м, т.е. без учета колец бамбука. Результаты расчетов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения $E_{ш}^{max}$ матрицы и массы $m_{ш}$ композиционной шпалы

Высота шпалы $h_{ш}$, м	Величина $E_{ш}^{max}$, МПа, для стержней из мао-бамбука		$m_{ш}$, кг, при $\rho_{ш}$, кг/м ³ , при количестве стержней бамбука $t = 2$ и 4 шт., кг/м ³		
	2 бруска	4 бруска	900	1000	1100
0,18	11708/14841	11468/14694	115,5/119,7	127,2/130,7	138,9/141,7
0,20	8133/10485	7494/9995	127,9/132,0	141,0/144,4	154,1/156,9
0,22	5830/7599	5033/6915	140,3/144,4	154,7/158,2	169,2/172,0

Примечания. 1. Перед чертой приведены значения $E_{ш}^{max}$ деревянной шпалы для обеспечения $[G_{ш}^{\delta}] = 1,45$ МПа·м⁴, а после черты – для ж.б. шпалы при $[G_{ш}^{\delta}] = 1,82$ МПа·м⁴. 2. Величина $m_{ш}$ рассчитана при длине шпалы 2,75 м в зависимости от плотности материала $\rho_{ш}$.

Как следует из таблицы 3.3, по величине модуля упругости $E_{ш}$ ($E_{ш}^{min} = 6200$ -7450 МПа), обеспечивающего оптимальные величины X_1^{onm} и X_2^{onm} ($m_{ш} = 151$ -153 кг), наилучшие показатели имеет композиционная шпала высотой $h_{ш} = 0,22$ м при количестве стержней $t = 2$ или 4 и средней плотности материала $\rho_{ш} = 900$ -1000 кг/м³; при $h_{ш} = 0,20$ м величина $E_{ш}$ будет на 0,6-40,9% превосходить $E_{ш}^{min}$, а при $h_{ш} = 0,18$ м – уже в 1,95-2,28 раза, что является неприемлемым, да и трудно реализуемым при древесном/бамбуковом наполнителе как по величине модуля упругости, так и по средней плотности материала композиционной шпалы.

Модуль упругости композиционной шпалы в вертикальном направлении $E_{ш}^{\delta}$, с учетом сделанных выше относительно X_4 замечаний, целесообразно принимать не ниже, чем у древесины твердых пород при сжатии поперек волокон, т. е. $E_{ш}^{\delta} \geq 1000$ МПа [149]. Тем самым материал композиционной шпалы будет являться ортотропным с соотношением модулей упругости в продольном и поперечном к оси шпалы направлениях как $E_{ш}/E_{ш}^{\delta} \leq 7,45$.

3.4 Допустимая величина температурного расширения материала

Для применяемых в ж.д. пути шпал из ж.б. и древесины (вдоль волокон) величина α (КЛТР) составляет в среднем соответственно $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в то время как для ненаполненных пластмасс он на порядок и более выше [150].

Отсюда возникает задача определения максимально допустимой величины КЛТР для наполненных пластмасс, обеспечивающей требуемые допуски на ширину колеи ж.д. пути при температурных перепадах в эксплуатационных условиях. Исходя из свойств традиционных материалов можно принять требуемое значение КЛТР для наполненных полимеров, не превышающее (для ж.б. шпал) $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что, по-видимому, является достаточно жестким требованием для полимерного композита так как потребовало бы снижения величины КЛТР более чем на порядок.

Рассмотрим температурный режим эксплуатации железных дорог Китая. При перепаде температуры Δt изменение ширины колеи составит:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t, \quad (3.13)$$

где: α – КЛТР композиционной шпалы, $^\circ\text{C}^{-1}$; l – ширина колеи ж.д. пути Китая, равная 1435 мм; Δt – перепад температуры в регионе укладки шпалы, $^\circ\text{C}^{-1}$.

По ТВ 10082-2017 (Нормы для проектирования железнодорожной пути / Code for design of railway track) Китая при высокоскоростном движении поездов (наиболее перспективное направление для применения композиционных шпал, но для которого накладываются самые жесткие требования к свойствам подрельсовых оснований) допустимая погрешность ширины ж.д. колеи составляет ± 2 мм.

Ж.д. путь укладывают в верхней половине температурного интервала. При этом рельс и шпалы нагреваются выше температуры окружающей среды за счет солнечной радиации и это превышение может быть оценено как 10°C [1]. Из таблицы 3.4 следует, что наибольший из температурных интервалов составляет $91,6^\circ\text{C}$. Поэтому за расчетный интервал принимается 100°C , при котором максимально допустимая величина КЛТР составит значение:

$$\alpha \leq \frac{2}{1435 \cdot \frac{100}{2}} = 27,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (3.14)$$

Таблица 3.4 – Температура окружающей среды в городах (округах) Китая

Города (округа)	Температура, $^{\circ}\text{C}$		
	максимальная t^{\max}	минимальная t^{\min}	$\Delta t = t^{\max} - t^{\min}$
1	2	3	4
Корла	40,0	-28,1	68,1
Кашгар	40,1	-24,4	64,5
Чэнду	37,3	-5,9	43,2
Мяньян	38,8	-7,3	46,1
Чунцин	43,0	-1,8	44,8
Сичан	36,6	-3,8	40,4
Гуанчжоу	39,1	0,0	39,1
Лхаса	30,4	-16,5	46,9
Шигацзе	29	-25,1	54,1
Гуйян	37,5	-7,8	45,3
Цзинань	42,5	-19,7	62,2
Дэчжоу	43,4	-27,0	70,4
Циндао	38,9	-14,3	53,2
Нанкин	40,7	-14,0	54,7
Сюйчжоу	40,6	-22,6	63,2
Шанхай	39,6	-10,1	49,7
Ханчжоу	40,3	-9,6	49,9
Хэфэй	41,0	-20,6	61,6
Фучжоу	41,7	-1,7	43,4
Сямэнь	39,2	-1,5	40,7
Наньчан	40,6	-9,7	50,3
Шэньчжэнь	38,7	0,2	38,5
Наньнин	40,4	-2,1	42,5
Гуйлинь	39,5	-4,9	44,4
Чанша	40,6	-10,3	50,9
Чжэнчжоу	43,0	-17,9	60,9
Лоян	44,2	-18,2	62,4
Наньян	41,4	-21,2	62,6
Ичан	41,4	-9,8	51,2
Ухань	39,6	-18,1	57,7
Пекин	41,9	-27,4	69,3
Тяньцзинь	40,5	-22,9	63,4
Шицзячжуан	42,9	-19,8	62,7
Чжанцзякоу	41,1	-25,7	66,8
Таншань	40,1	-25,2	65,3

1	2	3	4
Баодин	43,3	-22	65,3
Тайюань	39,4	-25,5	64,9
Датун	39,2	-29,1	68,3
Юньчэн	42,7	-18,9	61,6
Хух-Хото	38,9	-32,8	71,7
Маньчжурия	40,5	-43,8	84,3
Баотоу	40,4	-31,4	71,8
Шэньян	38,3	-32,9	71,2
Далянь	35,6	-21,1	56,7
Чанчунь	38	-36,5	74,5
Харбин	39,2	-38,1	77,3
Цицикар	40,8	-39,5	80,3
Ибинь	40,7	-3,0	43,7
Куньмин	30,5	-7,8	38,3
Муданьцзян	38,4	-38,3	76,7
Мохэ	39,3	-52,3	91,6
Нэньцзян	40,0	-47,3	87,3
Сиань	41,8	-20,6	62,4
Ханьчжун	38,4	-10,1	48,5
Баоцзи	41,6	-16,7	58,3
Ланьчжоу	39,8	-21,7	61,5
Синин	36,5	-26,6	63,1
Голмо	35,5	-33,6	69,1
Иньчуань	39,3	-30,6	69,9
Урумчи	42,1	-41,5	83,6

Примечание: данные получены из документов, опубликованных информационным центром китайского метеорологического управления [https://weather.cma.cn/web/weather/map.html]

Однако трудно обеспечить укладку пути точно в середине перепада температуры шпалы. Обычно укладывают путь в определенном температурном диапазоне, и поэтому значение КЛТР $27,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ является верхней оценкой величины КЛТР. Поэтому для шпалы допустимая величина КЛТР должна быть меньше и она зависит от диапазона температуры для укладки шпалы.

Согласно таблицы 3.4 температурный интервал для большинства китайских провинций составляет (-40°C , $+60^{\circ}\text{C}$) и при допустимом отклонении температуры при обустройстве ж.д. пути в 10°C вокруг средней температуры этого интервала,

то допустимый диапазон температуры при укладке шпал составит (+5⁰С, +15⁰С) и тогда требуемая величина КЛТР не должна превышать значение

$$\alpha \leq \frac{\Delta l'}{l \cdot \Delta t'} = \frac{2}{1435 \cdot (15 - (-40))} = \frac{2}{1435 \cdot (60 - 5)} = 25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (3.15)$$

В связи с этим, композиционные шпалы со значением КЛТР не выше $25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ будут соответствовать требованиям к ширине колеи 1435 ± 2 мм в большинстве обширных регионов Китая.

3.5 Выводы по главе 3

1. Показано, что оптимальные (получены решением конкретной оптимизационной задачи) и рациональные (получены обобщением решений оптимизационных задач) свойства материала композиционных шпал могут быть корректно установлены при рассмотрении их работы как элемента системы “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав” (*ЗБШРП*).

2. Методами планирования эксперимента с использованием плана Бокса-Уилсона получены полиномиальные модели второго порядка, адекватно (ошибка не превышает 1,26%) описывающие зависимость свойств ж.д. пути (функций отклика) Y от параметров (варьируемых факторов) X , характеризующих работу композиционной шпалы в ж.д. пути.

3. Выполненный анализ влияния варьируемых факторов X на функции отклика Y , характеризующих состояние системы *ЗБШРП*, показал, что на фоне преимущественного влияния сезонного изменения жесткости подрельсового основания в горизонтальной и вертикальной плоскости (факторы x_3 и x_4), включающего шпалу, балластную призму и земляное полотно, на состояние ж.д. пути, свойства материала композиционных шпал (факторы x_3 и x_4) в равной степени влияют на напряжения в подошве рельса Y_1 , вертикальной силы, действующей на рельс Y_9 , 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 площадки земляного полотна Y_6 и особенно на напряжения во внут-

ренной выкружке головки рельса Y_{10} , в то время как на вертикальное ускорение шпалы Y_4 влияет ее масса.

4. Сформулирована многокритериальная оптимизационная задача по определению свойств материала композиционных шпал из условия обеспечения компромисса между жестким (на ж.б. шпалах) и мягким (на деревянных шпалах) режимами эксплуатации ж.д. пути. Ее решением методом экспериментально-статистического моделирования проведением вычислительного эксперимента на математических моделях, описывающих состояние ж.д. пути и подвижного состава, определены оптимальные свойства композиционных шпал, характеризующихся величиной изгибной жесткости 0,82-0,84 отн. ед., при которой модуль упругости материала шпалы составляет 5000-7450 МПа, и массой шпалы 151-162 кг.

5. Обобщением значений оптимальных свойств материала композиционной шпалы для случаев прохождения локомотивом ВЛ-80 со скоростью 80 км/ч по прямой и в кривой радиусом 350 м установлены рациональные свойства композиционной шпалы, составившие значение модуля упругости в продольном направлении $E_{uu} = 6200-7450$ МПа, в вертикальном E_{uu}^g – не ниже 1000 МПа при плотности материала шпалы 900-1000 кг/м³.

6. С учетом климатических условий Китая и допустимой погрешности ширины ж.д. колеи для высокоскоростного движения поездов, являющегося наиболее перспективным направлением использования композиционных шпал, коэффициент линейного температурного расширения материала таких шпал не должен превышать $25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что обеспечит применение таких подрельсовых оснований в большинстве провинций Китая.

ГЛАВА 4 СОСТАВ МАТЕРИАЛА И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ШПАЛ

Как показал анализ зарубежного и отечественного опыта применяемых материалов и конструкций композиционных (композитных, пластиковых) подрельсовых оснований (шпал, мостовых и переводных брусьев), основной проблемой для их применения на ж.д. транспорте является высокое значение КЛТР полимерной матрицы, на порядок и более превышающего аналогичный показатель для подрельсовых оснований из традиционных материалов – бетона и древесины [150]. Другими определяющими работу подрельсовых оснований в ж.д. пути и, в частности, наиболее распространенной их конструкции – шпал, являются модуль упругости материала и масса шпалы, которые также необходимо учитывать при определении рациональных свойств материала шпалы (см. главу 3).

Для решения такой сложной в научном отношении задачи по снижению на более чем порядок величины КЛТР материала композиционных шпал и самой их конструкции использовался многоуровневый подход, в котором на каждом структурном уровне достигалось поэтапное снижение КЛТР модификацией матричного полимера, в качестве которого использовался поливинилхлорид (ПВХ), другими полимерами, частицами с меньшей величиной КЛТР и бамбуковыми стержнями, используемыми для армирования шпал.

Многоуровневая оптимизация материала композиционной шпалы с целью снижения величины КЛТР и регулирования модуля упругости и массы композиционной шпалы проводилась на пяти структурных уровнях – атомно-молекулярном, нано-, микро-, мезо- и макроуровне, схематически показанных на рисунке 4.1 [151, 152]. На разных структурных уровнях использовались модифицирующий полимер – на атомно-молекулярном уровне, углеродные нанотрубки (УНТ) – на наноуровне, тонкодисперсный мел/древесная мука – на микроуровне, бамбуковая фибра – на мезоуровне, и стержни бамбука – на макроуровне. Свойства модифицирующих компонентов приведены в главе 2.

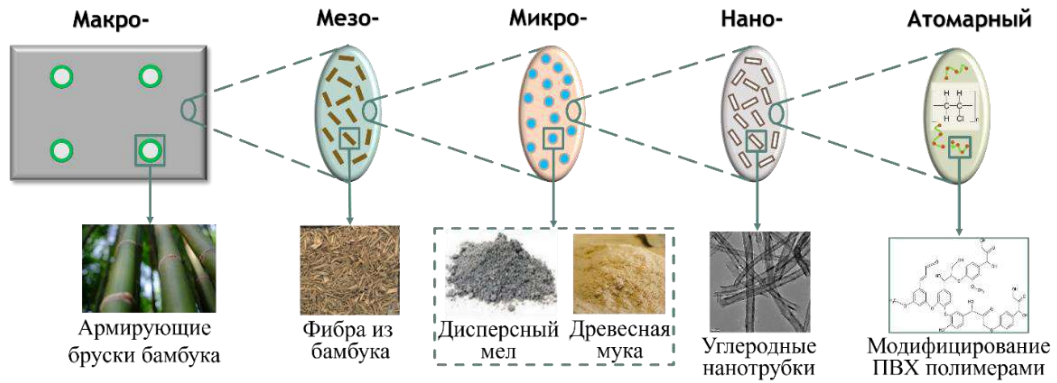


Рисунок 4.1 – Схематическое многоуровневой оптимизации материала композиционной шпалы

При этом решение оптимизационной задачи на атомно-молекулярном и наноуровнях выполнялось на основе метода атомарных инкрементов [153], а на остальных трех уровнях – методами механики сплошных сред и ПЭ.

4.1 Модификация полимерной матрицы на атомно-молекулярном и наноуровне

4.1.1 Модификация полимерной матрицы на атомно-молекулярном уровне

Модификация величины КЛТР ПВХ-матрицы полимерами

Теория. Теоретический анализ величины КЛТР применительно к материалам на основе смесей ПВХ с полимерами проведен на основе влияния на КЛТР температур размягчения T_r и начала интенсивного термического разложения T_d , энергий межмолекулярного взаимодействия D и когезии ΔE^* [153]. При этом энергия когезии ΔE^* используется для оценки совместимости полимеров, температура размягчения T_r аморфных полимеров определяется температурой их стеклования T_g , кристаллических – их температурой плавления T_m , а для аморфно-кристаллических полимеров важны оба показателя [154].

Согласно [153] приведем уравнения для расчета КЛТР полимера

$$\alpha_L = \frac{1}{3} \frac{\left(\sum_i \alpha_i \Delta V_i + \sum_j \beta_j \right)}{\sum_i \Delta V_i}, \quad (4.1)$$

сополимеров и совместимых смесей полимеров

$$\alpha_L = \frac{1}{3} \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \alpha_i \Delta V_i + \sum_j \beta_j \right)_k}{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}, \quad (4.2)$$

где α_i – парциальные коэффициенты объемного термического расширения, обусловленного слабым дисперсионным взаимодействием i -го атома с соседними атомами; β_j – параметры, характеризующие вклад каждого типа специфического межмолекулярного взаимодействия (диполь-дипольное, водородные связи) в коэффициент термического расширения; $\sum_i \Delta V_i$ – ван-дер-ваальсов объем повторяющегося звена полимера или повторяющегося фрагмента полимерной молекулярной сетки; α_k – мольная доля компонента k ; n – число компонентов.

Величина КЛТР сополимера, выраженная через термические коэффициенты для его компонентов, описывается соотношением [153]:

$$\alpha_L = \frac{1}{3} \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \alpha_{G,k} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)_k}, \quad (4.3)$$

где $\alpha_{G,k}$ – коэффициент объемного термического расширения для k -го компонента сополимера.

Прогнозирование совместимости полимеров. Для решения задачи снижения величины КЛТР применим способ получения смесей ПВХ с теплостойкими полимерами, обладающими высокой температурой стеклования. В связи с этим рассмотрим их совместимость для оценки возможности образовывать прозрачные монолитные материалы или так называемые «технологические смеси» [155]. С этой целью используем критерии совместимости полимеров [154]:

$$\mu_1 = \frac{\delta_{n,1}^2}{\delta_{n,2}^2} < 1.374\Phi \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - 1 + a_1} \right) = 2\rho\beta_1; \quad (4.4)$$

$$\mu_2 = \frac{\delta_{n,2}^2}{\delta_{n,1}^2} < 1.374\Phi \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - 1 + a_2} \right) = 2\rho\beta_2, \quad (4.5)$$

где $a_1 = \gamma_{п,1; п,2}/\gamma_{п,2}$; $a_2 = \gamma_{п,1; п,2}/\gamma_{п,1}$; $\gamma_{п,1}$ и $\gamma_{п,2}$ – поверхностные энергии соответственно полимеров 1 и 2; $\gamma_{п,1; п,2}$ – межфазное натяжение между полимерами 1 и 2.

Величина Φ определяется по формуле

$$\Phi = \frac{4(V_{n,1} \cdot V_{n,2})^{1/3}}{(V_{n,1}^{1/3} + V_{n,2}^{1/3})^2}, \quad (4.6)$$

где $V_{п,1}$ и $V_{п,2}$ – мольные объемы полимеров 1 и 2 соответственно.

Здесь возможны различные ситуации [153]:

1) Если при использовании критерия совместимости оказывается, что во всех случаях левая часть критерия больше правой части, то имеет место абсолютная несовместимость. Тогда критерий совместимости принимает вид:

– при введении первого полимера во второй:

$$\mu_1 = \frac{\delta_{n,1}^2}{\delta_{n,2}^2} > 1,37 \rho \beta_1; \quad (4.7)$$

– при введении второго полимера в первый:

$$\mu_2 = \frac{\delta_{n,2}^2}{\delta_{n,1}^2} > 1,37 \rho \beta_2 \quad (4.8)$$

(здесь $\delta_{п,1}$ и $\delta_{п,2}$ – параметры растворимости полимеров 1 и 2 соответственно).

Поскольку левая часть критериев (4.7) и (4.8) больше правой части, то это означает, что полимеры являются несовместимыми.

2) При введении небольших количеств первого полимера во второй критерий показывает, что совместимость наблюдается, т.е.

$$\mu_1 = \frac{\delta_{n,1}^2}{\delta_{n,2}^2} < 1,37 \rho \beta_1. \quad (4.9)$$

Однако при введении второго полимера в первый может оказаться, что совместимость не наблюдается, т.е.

$$\mu_2 = \frac{\delta_{n,2}^2}{\delta_{n,1}^2} > 1,37 \rho \beta_2. \quad (4.10)$$

3) При абсолютной совместимости полимеров, т.е. когда первый полимер «растворяется» во втором, а второй «растворяется» в первом критерий совместимости приобретает вид:

– при введении первого полимера во второй

$$\mu_1 = \frac{\delta_{n,1}^2}{\delta_{n,2}^2} < 1,37 \rho \beta_1; \quad (4.11)$$

– при введении второго полимера в первый

$$\mu_2 = \frac{\delta_{n,2}^2}{\delta_{n,1}^2} < 1,37 \rho \beta_2. \quad (4.12)$$

Расчет. При использовании критериев (4.7)-(4.12), если различие в параметрах растворимости $\delta_{п,1}$ и $\delta_{п,2}$ больше 2, то такие полимеры считаются несовместимыми. Поэтому в таблице 4.1 нет значений μ_1 , μ_2 , $1,374\beta_1$ и $1,374\beta_2$ для полимеров № 1-5, хотя все они входят в состав древесины. Знаки “- -“ означают, что данные полимеры не совместимы с ПВХ, знаки “- +” – частично совместимы с ПВХ, а знаки “+ +” – полностью совместимы с ПВХ. Расчетные свойства анализируемых полимеров приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Совместимость ПВХ с рядом полимеров

№	“Структура”	“Структура” вводится в ПВХ	ПВХ вводится в “структуру”	Межфазное натяжение, мН/м	μ_1	$1,374\beta_1$	μ_2	$1,374\beta_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Целлюлоза	-	-					
2	Лигнин ели 1	-	-					
3	Лигнин ели 2	-	-					
4	Лигнин бука 1	-	-					
5	Лигнин бука 2	-	-					
6	Поли-4-хлорстирол	+	+	1,52	1,02	1,28	0,98	1,29
7	Поли-2,6-дихлорстирол	+	+	2,12	1,11	1,18	0,90	1,26
8	Полиэфир эфиркетон	+	+	0,60	1,05	1,32	0,95	1,34

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Полиэфиркетон	+	+	0,69	1,09	1,28	0,91	1,31
10	Полифенилен-сульфид	-	+	7,12	1,16	0,76	0,86	0,96
11	Ultem	+	+	1,12	1,013	1,025	0,89	1,29
12	2,6-диметилфениленоксид	+	+	2,94	0,89	1,03	1,12	1,12
13	Поликарбонат	+	+	0,40	1,00	1,34	1,00	1,32
14	Полисульфон	+	+	1,15	1,17	1,23	0,85	1,27

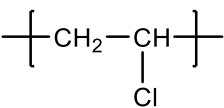
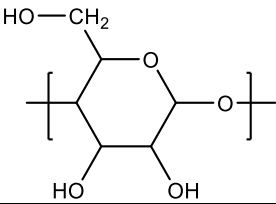
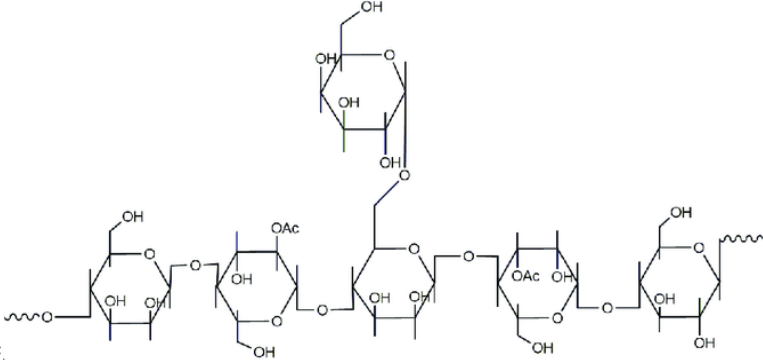
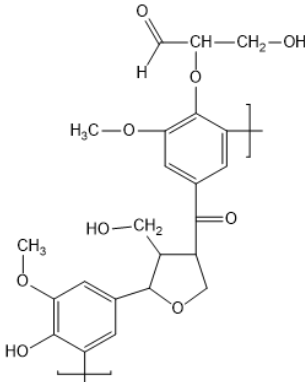
Таблица 4.2 – Расчетные свойства полимеров

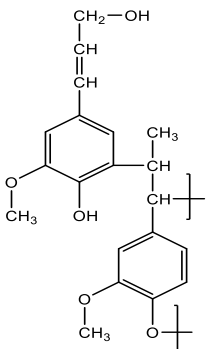
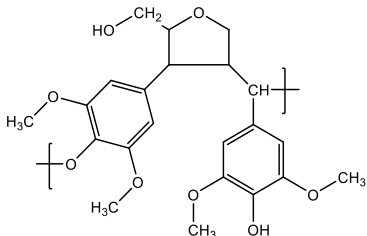
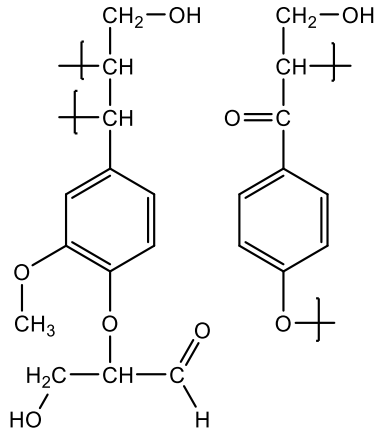
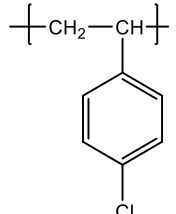
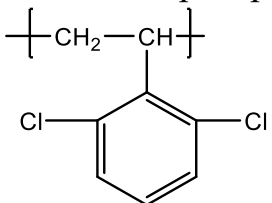
Структура	V_m , см ³ /моль	δ , (Дж/см ³) ^{0.5}	γ , мН/м	T_g , К	T_d , К	α_G , К ⁻¹ ·10 ⁴	α_L , К ⁻¹ ·10 ⁴
ПВХ	43,3	19,4	34,2	340	530	2,81	0,94
Целлюлоза	116	31,4	52,2	540	550	1,78	0,59
Гемицеллюлоза ²	230	27,7	48,3	474	540	1,94	0,65
Лигнин ели 1	342	25,3	45,2	480	610	2,00	0,67
Лигнин ели 2	342	21,6	25,4	440	580	2,16	0,72
Лигнин бука 1	334	23,0	36,8	460	590	2,10	0,70
Лигнин бука 2	331	23,7	39,6	520	529	1,85	0,62
Поли-4-хлорстирол	109	19,6	34,4	410	550	2,34	0,78
Поли-2,6-дихлорстирол	121	20,4	38,4	405	515	2,37	0,79
Поликарбонат	211	19,4	33,0	431	717	2,23	0,74
Полиимид ULTEM	460	20,6	37,4	500	730	1,91	0,64
Полиэфирэфиркетон	232	19,9	35,3	420	780	2,31	0,77
Полиэфиркетон	157	20,3	36,9	430	760	2,23	0,74
Полисульфон	353	21,0	38,8	467	679	2,05	0,68
Полифениленсульфид	83,5	20,9	69,0	363	726	2,64	0,88
Поли-2,6-диметилфениленоксид	104	18,3	48,9	442	703	2,17	0,72
Полиарилат Ф-2	345	21,0	39,6	578	683	1,67	0,56

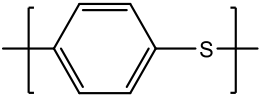
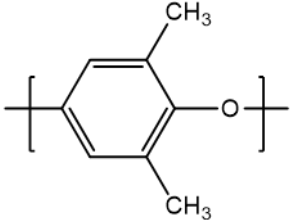
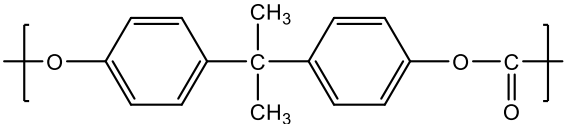
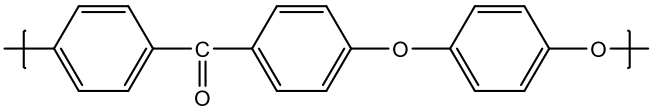
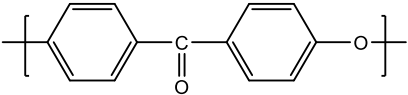
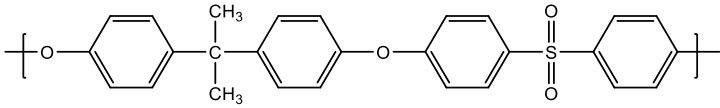
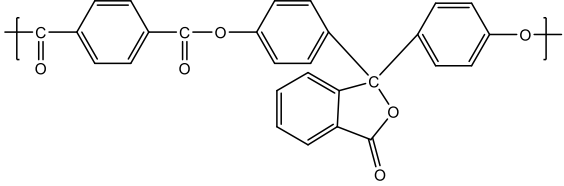
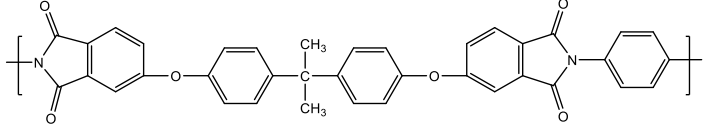
Примечания. 1. V_m – мольный объем, δ – параметр растворимости, γ – поверхностная энергия, T_g – температура стеклования, T_d – температура начала интенсивной термической деструкции, α_G – коэффициент объемного термического расширения, α_L – коэффициент линейного термического расширения. 2. В третьей строчке приведены усредненные значения для 16-и гемицеллюлоз

При расчете коэффициента линейного температурного расширения по (4.2) используются сведения по химическому строению полимера и ван-дер-ваальсовому объему его повторяющегося звена, приведенным в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Ван-дер-ваальсовы объемы повторяющихся звеньев $\sum_i \Delta V_i$ и КЛТР α_L

Структура	$\sum_i \Delta V_i$, Å^3	α_L , $\text{К}^{-1} \cdot 10^4$
1	2	3
<p>ПВХ</p> 	48,9	0,94
<p>Целлюлоза</p> 	102,6	0,59
<p>Гемицеллюлоза*</p> 	203	0,65
<p>Лигнин ели 1</p> 	302	0,67

1	2	3
<p style="text-align: center;">Лигнин ели 2</p> 	302	0,72
<p style="text-align: center;">Лигнин бука 1</p> 	295	0,70
<p style="text-align: center;">Лигнин бука 2</p> 	293	0,62
<p style="text-align: center;">Поли-4-хлорстирол</p> 	96,4	0,78
<p style="text-align: center;">Поли-2.6-хлорстирол</p> 	107	0,79

1	2	3
<p>Полифениленсульфид</p> 	73,8	0,88
<p>Поли-2,6-диметилфениленоксид</p> 	92	0,72
<p>Поликарбонат</p> 	187	0,74
<p>Полиэфирэфиркетон</p> 	205	0,77
<p>Полиэфиркетон</p> 	139	0,74
<p>Полисульфон</p> 	312	0,68
<p>Полиарилат Ф-2</p> 	390	0,56
<p>Полиимид Ultem</p> 	407	0,64

* усредненные значения для 16-и гемицеллюлоз.

Из данных таблицы 4.3 следует, что изготовление смеси ПВХ с рядом промышленных полимеров приводит к существенному снижению КЛТР [156, 157], прогнозируемые значения которого от весовой доли второго полимера α_w показаны на рисунке 4.2.

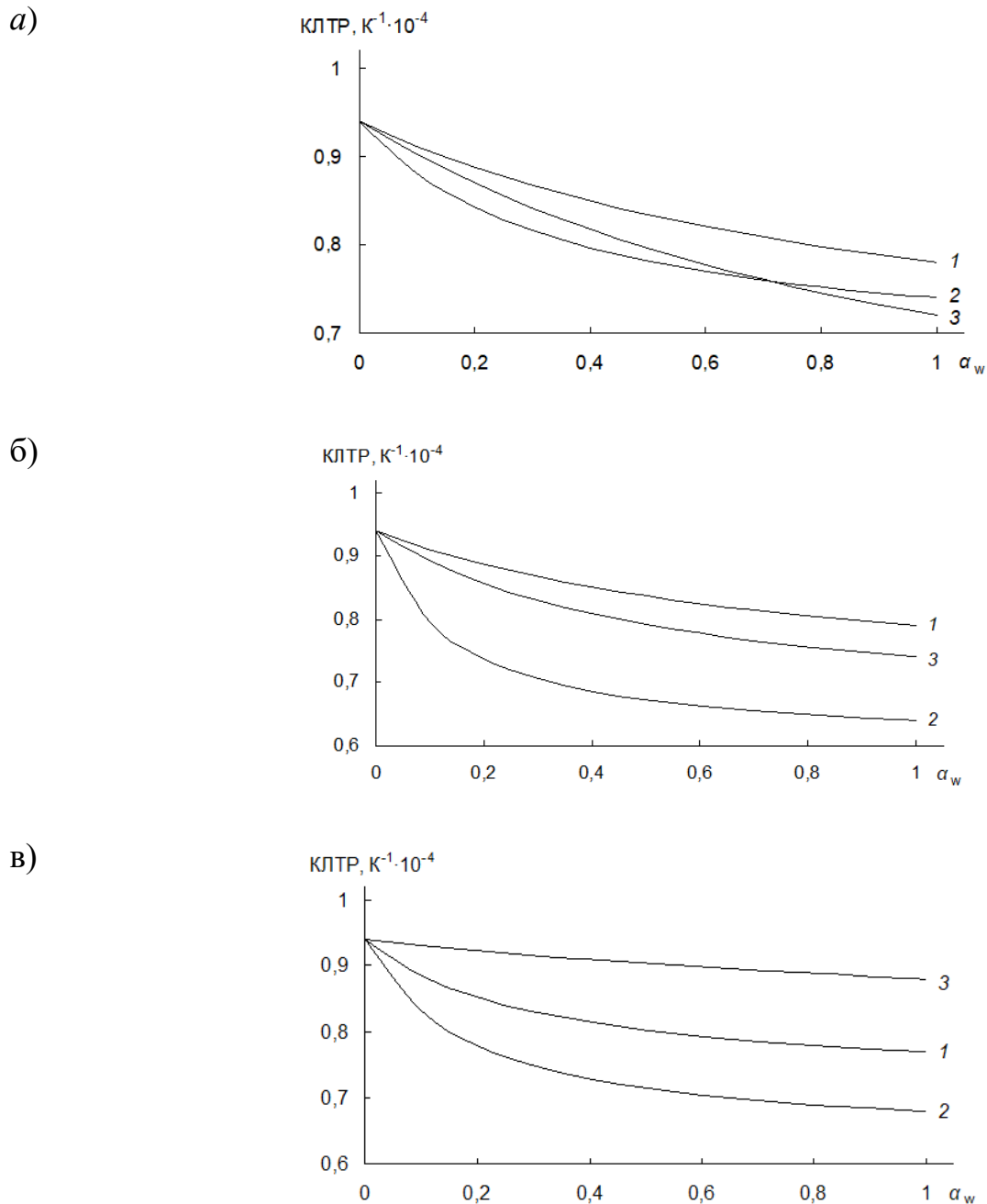


Рисунок 4.2 – Зависимости КЛТР от весовой доли второго полимера в смеси с ПВХ

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

Из рисунка 4.2 и таблицы 4.2 следует, что чем выше температура стеклования полимера T_g , вводимого в смесь с ПВХ, тем ниже величина КЛТР. Из вводимых полимеров наибольший эффект достигается при добавлении Ultem (поз. 2 на рисунке 4.2, б): при его введении в ПВХ 10% снижение КЛТР для чистого ПВХ составляет 15%, а при введении 20% – 21%.

Модификация модуля упругости ПВХ-матрицы полимерами

Теория. Рассмотрим численную оценку модуля упругости полимера E_T по его химическому строению. Модуль упругости E_T стеклообразного полимера при температуре T рассчитывается на основании метода Бицерано [158] по формуле

$$E_T = 2(1 + \nu_T)G_T = 3(1 - 2\nu_T)B_T, \quad (4.13)$$

где G_T – модуль сдвига стеклообразного полимера при температуре T ;

$$G_T = \frac{3(1 - 2\nu_T)}{2(1 + \nu_T)} B_T, \quad (4.14)$$

где B_T – объемный модуль, зависящий от температуры T

$$B_T = 8.23333E_{coh} \left[\frac{5(V_{M,0K})^4}{(V_{M,T})^5} - \frac{3(V_{M,0K})^2}{(V_{M,T})^3} \right], \quad (4.15)$$

где $V_{M,0K}$ – мольный объем при 0 по К; $V_{M,T}$ – мольный объем при температуре T ; E_{coh} – мольная энергия когезии, рассчитываемая с помощью компьютерной программы «Каскад» (ИНЭОС РАН); ν_T – коэффициент Пуассона в стеклообразном состоянии, зависящий от T :

$$\nu_T = \nu_0 + \frac{50T}{T_g} \{0.00163 + \exp[0.459(T - T_g - 13)]\}; \quad (4.16)$$

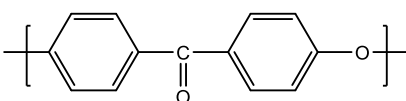
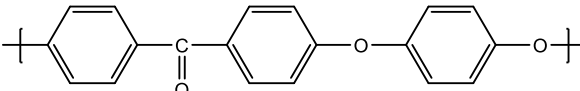
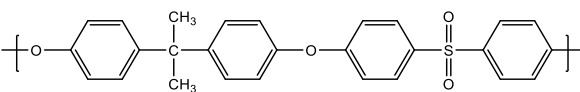
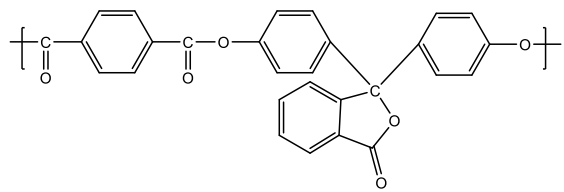
$$\nu_0 = \nu_{298K} - \frac{14900}{T_g} \{0.00163 + \exp[0.459(285 - T_g)]\}; \quad (4.17)$$

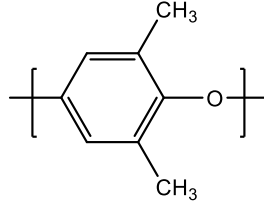
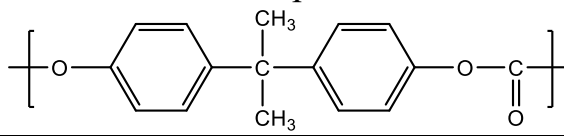
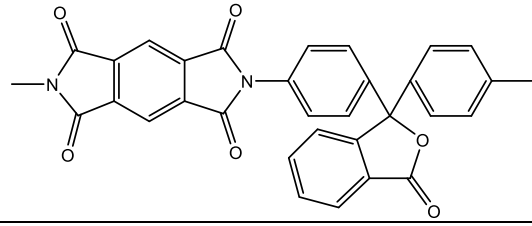
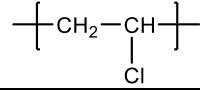
$$\nu_{298K} = 0.513 - 3.054 \cdot 10^{-6} \frac{V_w}{I_m}, \quad (4.18)$$

где V_w – ван-дер-ваальсов объем; I_m – длина повторяющегося звена полимера в полностью вытянутой конформации.

Расчет. Проведем оценку зависимостей модуля упругости от мольной доли второго полимера, вводимого в смесь с ПВХ. Оценки сделаны по уравнению (4.13), в которое входит ряд физических параметров, приведенных в таблице 4.4 для полимеров разных классов, совместимых с ПВХ [137, 138] Модуль упругости при растяжении рассчитывается методом Дж. Бицерано [158] с помощью компьютерной программы DTW PDtools, а ван-дер-ваальсов объем $\left(\sum_i \Delta V_i\right)$ и плотность ρ полимеров – с помощью компьютерной программы «Каскад» (ИНЭОС РАН).

Таблица 4.4 – Модули упругости ряда полимеров

№	Полимер	Модуль упругости E , МПа	Ван-дер-ваальсов объем, $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2$, Å^3	$\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1}$	$\frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}}$
1	2	3	4	5	6
1	Полиэфиркетон 	2350	178	3,574	3,613
2	Полиэфирэфиркетон 	2110	205	4,192	5,351
3	Полисульфон 	2280	312	6,380	8,165
4	Полиарилат Ф-2 	2790	390	7,975	7,940

1	2	3	4	5	6
5	Поли-2,6-диметилфениленоксид 	1890	92	1,881	2,383
6	Поликарбонат 	1780	187	3,824	4,877
7	Полипиромеллитимид анилинфталена 	3980	409	8,364	8,314
	Поливинилхлорид 	2400	48,9	1,000	-

Полученные зависимости модуля упругости от мольной доли второго полимера показаны на рисунке 4.3.

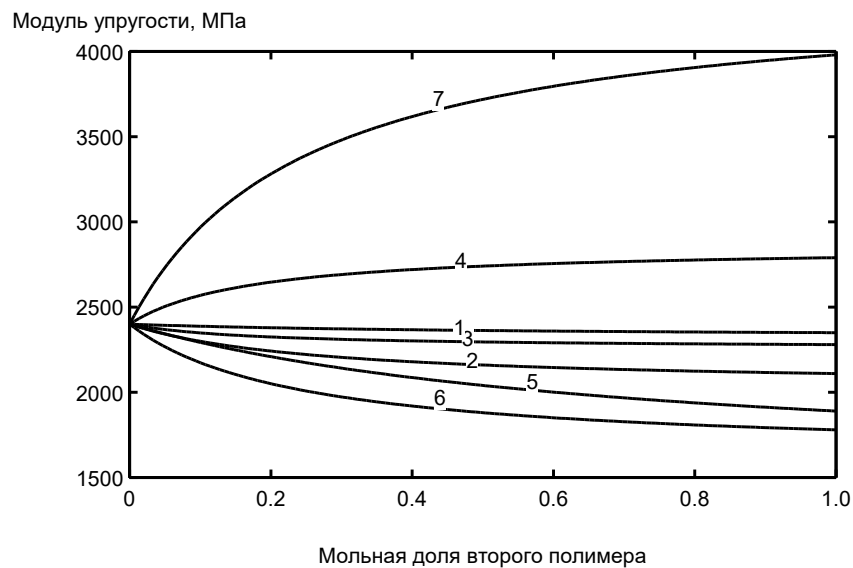


Рисунок 4.3 – Зависимости модуля упругости от мольной доли второго полимера (номера кривых соответствуют номерам полимеров в таблице 4.4)

Из рисунка 4.3 видно, что ряд полимеров (№№ 1, 2, 3, 5, 6) несколько снижает модуль упругости поливинилхлорида при введении его в состав смеси. Другие полимеры (№№ 4, 7) повышают модуль упругости, причем при сравнительно небольших концентрациях модуль упругости растет быстро с увеличением концентрации добавляемого полимера, а затем возрастание замедляется.

Теперь проанализируем зависимости E от объемной доли полимера 2. Мольная доля связана с объемной долей соотношением [159,160]:

$$\alpha_{m,2} = \frac{1}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}, \quad (4.19)$$

где M_{p1} и M_{p2} – молекулярные массы повторяющихся звеньев полимеров 1 и 2 соответственно; ρ_{p1} и ρ_{p2} – их плотности; β_2 – объемная доля полимера 2.

Подстановка (4.19) в (4.13) позволяет провести описание зависимости модуля упругости от объемной доли полимера 2:

$$E = \frac{1 + \frac{\left[\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1 \right]}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}{\frac{1}{E_1} + \frac{\left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right]}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}}. \quad (4.20)$$

Рисунок 4.4 демонстрирует зависимости E от β_2 , которые качественно такие же, как и зависимости модуля упругости от мольной доли второго полимера. Из них следует, что модуль упругости может регулироваться в широком диапазоне как в сторону снижения модифицируемого полимера – до 1,36 раз, так и его повышения – до 1,63 раза, что открывает широкие возможности для управления его значениями на атомно-молекулярном уровне.

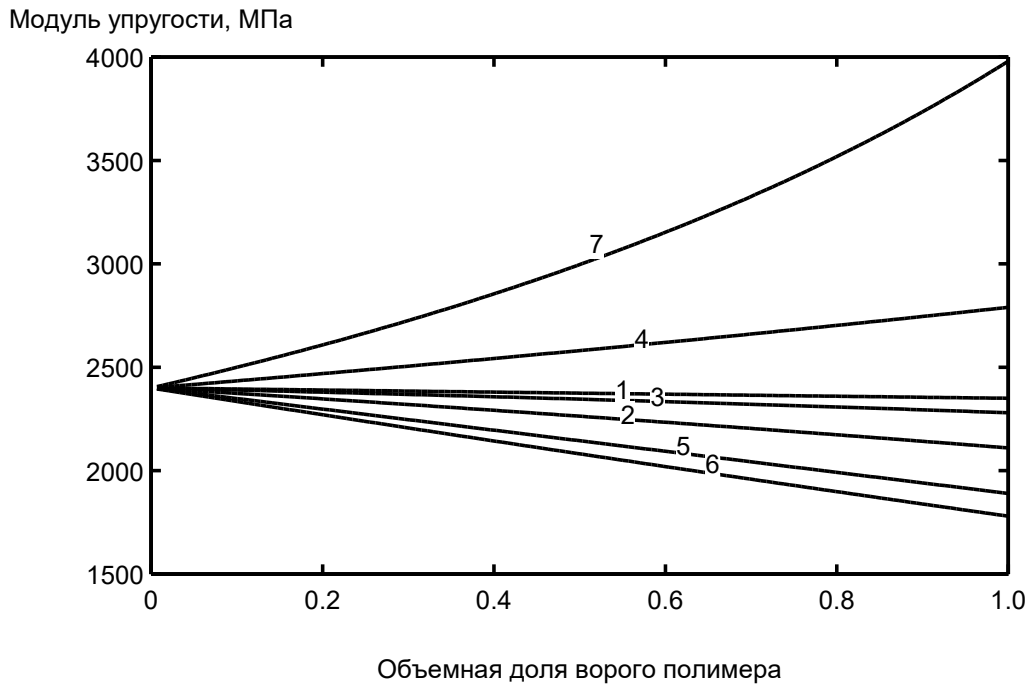


Рисунок 4.4 – Зависимости модуля упругости от объемной доли второго полимера (номера кривых соответствуют номерам полимеров в таблице 4.4)

4.1.2 Модификация полимерной матрицы на наноуровне

Наномодификация величины КЛТР ПВХ-матрицы

Теория. Температура размягчения непосредственно связана с коэффициентом термического расширения полимера [155]. Исследование аморфно-кристаллических полимеров показывает, что степень кристалличности α_{cr} влияет на температуру стеклования (температуру размягчения) аморфных доменов в полимерах и в целом на температуру размягчения всего полимера. Механизм такого влияния был рассмотрен Манделькерном [161]. Кристаллизация полимеров сопровождается увеличением плотности кристалличности фазы, вызывающей деформацию аморфных доменов. Эта деформация связана с уменьшением возможных конформаций макромолекул из-за увеличения времени релаксации «не замороженной» сегментальной подвижности.

Рассмотрим один моль сегментов в аморфной фазе, которые занимают объем V . Деформация возникает как однородное расширение или сжатие и ведет к началу негативного отрицательного давления p , которое ответственно за расширение:

$$p = -(\partial F / \partial V)_T, \quad (4.21)$$

где $F = U - TS$ (свободная энергия); U – внутренняя энергия; S – энтропия системы; T – абсолютная температура.

Если деформация появляется при небольших изменениях внутренней энергии, будучи в тоже время сильно зависящей от конформационной энтропии, можно записать:

$$p = T(\partial S / \partial V)_T, \quad (4.22)$$

где S – конформационная энтропия.

Так как давление p зависит от коэффициента изотермического расширения β_i , получаем:

$$-\frac{1}{\beta_i} \ln \frac{V}{V_0} = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T. \quad (4.23)$$

Теперь определим изменение конформационной энтропии, которое связано с изменением времени релаксации термического движения полимерных сегментов. Это изменение дается формулой:

$$\tau = \tau_0 \exp[F/(RT)] - \tau_{U,T} \exp(-S/R), \quad (4.24)$$

где $\tau_{U,T}$ – параметр, зависящий от температуры и энергии активации.

Введем обозначение $x = V/V_0$, где V_0 – объем полимера, соответствующий $\alpha_{cr} = 0$, и V – объем полимера при конечной степени кристалличности. Тогда из выражений (4.23) и (4.24) получаем:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \frac{\tau}{\tau_0} \right) \right]_T = \frac{V_0}{RT\beta_i} \ln x. \quad (4.25)$$

Заметим, что $\tau = \tau_0$ при $V = V_0$. Из выражения (4.25) следует, что:

$$\ln \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{V_0}{RT\beta_i} (x \ln x - x + 1). \quad (4.26)$$

Свяжем степень кристалличности α_{cr} полимера с параметром x :

$$x = \frac{(1 - \alpha_{cr})\rho_a}{\rho_a - \alpha_{cr}\rho_{кр}}, \quad (4.27)$$

где ρ_a – плотность аморфного полимера ($\alpha_{cr} = 0$); $\rho_{кр}$ – то же, кристаллического ($\alpha_{cr} = 1$).

Разлагая (4.27) в ряд и ограничиваясь вторым членом ряда, получаем:

$$\ln \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{V_0}{RT\beta_i} \frac{(\rho_a - \rho_{kp})^2}{\rho_a^2} \alpha_{cr}^2. \quad (4.28)$$

При определенной степени кристалличности температурная зависимость времени релаксации подчиняется уравнению Аррениуса:

$$\left[\frac{\partial \ln(\tau/\tau_0)}{\partial T^{-1}} \right]_{\alpha_{cr}} = \frac{U}{R}. \quad (4.29)$$

При этом температура перехода определяется с помощью хорошо известного соотношения $\omega\tau = 1$, где ω – частота воздействия.

Комбинация уравнений (4.28) и (4.29) дает:

$$\ln \frac{T_{\alpha_{cr}}}{T_0} = \frac{1}{2} \frac{V_0}{\beta_i U} \frac{(\rho_a - \rho_{kp})^2}{\rho_a^2} \alpha_{cr}^2. \quad (4.30)$$

Для определения $\beta_i U$, будем использовать тот факт, что температура равна температуре плавления при $\alpha_{cr} = 1$. Тогда для $\beta_i U$ получаем:

$$\beta_i U = \frac{1}{2} V_0 \frac{(\rho_a - \rho_{kp})^2}{\rho_a^2 (\ln T_m - \ln T_0)}, \quad (4.31)$$

где T_m – точка плавления кристаллического полимера.

Зная $\beta_i U$, можно рассчитать зависимость температуры размягчения $T_{\alpha_{cr}}$ из соотношения (4.30). Физические величины, показанные выше и появляющиеся в этом соотношении, рассчитываются из выражения:

$$V_0 = \frac{N_A \left(\sum_i \Delta V_i \right)_p}{k}, \quad (4.32)$$

где k – коэффициент молекулярной упаковки полимера, принимаемый из условий: если температура стеклования полимера T_0 лежит выше комнатной температуры, его средняя величина $k_{cp} = 0,681$, а если ниже, то его значение принимается при температуре стеклования равным $k_g = 0,667$ [155].

Если известны экспериментальные значения плотности для идеальных кристаллов, расчет проводится с использованием этих данных. В противном случае

параметр $\rho_{кр}$ рассчитывается из соотношения [156]

$$\rho_{кр} = \frac{k_{кр} M}{N_A \left(\sum_i \Delta V_i \right)_n}, \quad (4.33)$$

где $k_{кр} = 0,74$; M – молекулярная масса повторяющегося звена полимера.

Уравнение (4.30) описывает зависимость температуры размягчения от степени кристалличности только для аморфной части полимера. Если необходимо рассчитать температуру размягчения для реального образца, состоящего из аморфных и кристаллических частей, используется уравнение [156]:

$$\frac{T_{\alpha_{cr}}}{T_0} = (1 - \alpha_{cr}) \exp \left[\frac{1}{2} \frac{V_0}{\beta_i U} \frac{(\rho_a - \rho_{кр})^2}{\rho_a^2} \alpha_{cr}^2 \right] + \alpha_{cr} \frac{T_m}{T_0}. \quad (4.34)$$

Расчет. При введении небольшого количества наночастиц в полимер меняется степень кристалличности в сторону ее увеличения. С этим связано снижение КЛТР. В [154] получено соотношение, связывающее величину КЛТР со степенью кристалличности α_{cr} . Для полимера, состоящего из аморфных и кристаллических областей величина α_L равна:

$$\alpha_L = \frac{k_0 / k_g - 1}{3(1 - \alpha_{cr}) T_0 \exp(0.583 \alpha_{cr}^2) + 3 \alpha_{cr} T_m} = \frac{0.0906}{3(1 - \alpha_{cr}) T_0 \exp(0.583 \alpha_{cr}^2) + 3 \alpha_{cr} T_m}, \quad (4.35)$$

где T_0 – температура размягчения аморфной части полимера (температура стеклования); T_m – температура плавления кристаллитов.

Степень кристалличности α_{cr} определяется из соотношения

$$\alpha_{cr} = \frac{\rho_k (\rho - \rho_a)}{\rho (\rho_k - \rho_a)}, \quad (4.36)$$

где ρ – плотность исследуемого образца; ρ_a и ρ_k – плотности полностью аморфного и кристаллического образца соответственно.

Параметры ПВХ следующие: $\rho_k = 1,57$ г/см³, $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_n = 48,9$ Å³, $T_0 = 341$ К (расчетная величина), $\rho_a = 1,222$ г/см³, $T_m = 479$ К, $V_0 = 43,3$ см³/моль. Известно, что при нагревании из ПВХ выделяется HCl и при этом плотность меняется в сторону

уменьшения. Приведенные данные получены экспериментально путем прессования образцов при температуре 170°C. Проведем расчет на основе этих данных и экспериментально измеренных плотностей.

При содержании нанотрубок 0%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.3486-1.222)/1.3486(1.57-1.222) = 0.1988/0.4693 = 42,4\%.$$

При содержании нанотрубок 0,3%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.3531-1.222)/1.3531(1.57-1.222) = 0.2058/0.4709 = 43,7\%.$$

При содержании нанотрубок 0,7%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.3644-1.222)/1.3644(1.57-1.222) = 0.2236/0.4748 = 47,1\%.$$

При содержании нанотрубок 1%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.368-1.222)/1.368(1.57-1.222) = 0.2292/0.4728 = 47,6\%.$$

При содержании нанотрубок 3%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.3560-1.222)/1.3560(1.57-1.222) = 0.2104/0.4719 = 44,6\%.$$

При содержании нанотрубок 5%:

$$\alpha_{cr} = 1.57(1.3476-1.222)/1.3476(1.57-1.222) = 0.1972/0.4690 = 42,0\%.$$

Таблица 4.5 – Весовая доля нанотрубок и степень кристалличности ПВХ

Весовая доля нанотрубок, %	Плотность, г/см ³	Степень кристалличности, %	КЛТР
0	1,3486	42,4	$7,17 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
0,3	1,3531	43,7	$7,12 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
0,7	1,3644	47,1	$7,01 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
1,0	1,3680	45,3	$6,99 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
3,0	1,3560	44,6	$7,09 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
5,0	1,3476	42,0	$7,18 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Зависимость степени кристалличности от концентрации нанотрубок показана на рисунке 4.5, а зависимость КЛТР (α_L) от концентрации нанотрубок – на рисунке 4.6. Из рисунков следует, что, в зависимости от содержания наночастиц, степень кристалличности проходит через максимум, а величина α_L – через минимум.

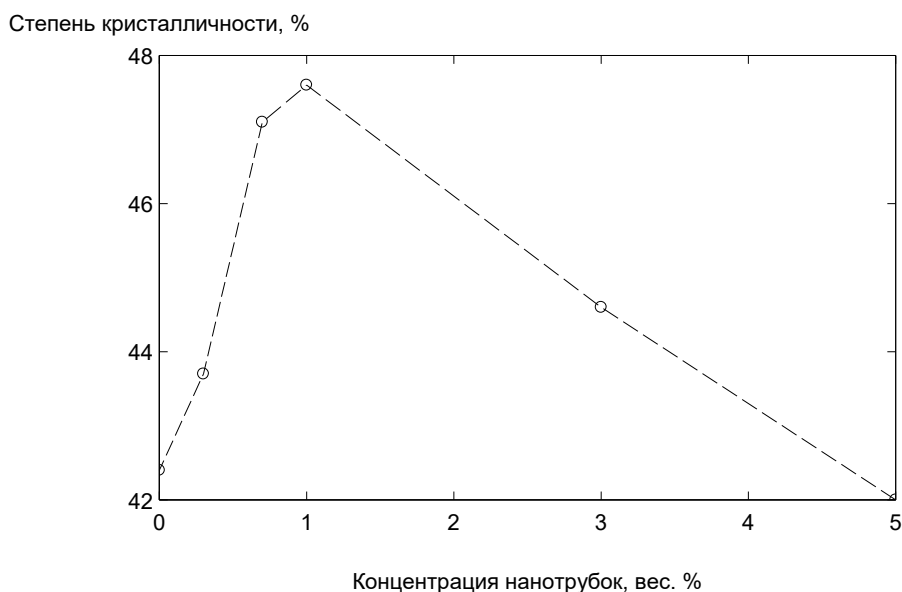


Рисунок 4.5 – Зависимость степени кристалличности от концентрации нанотрубок

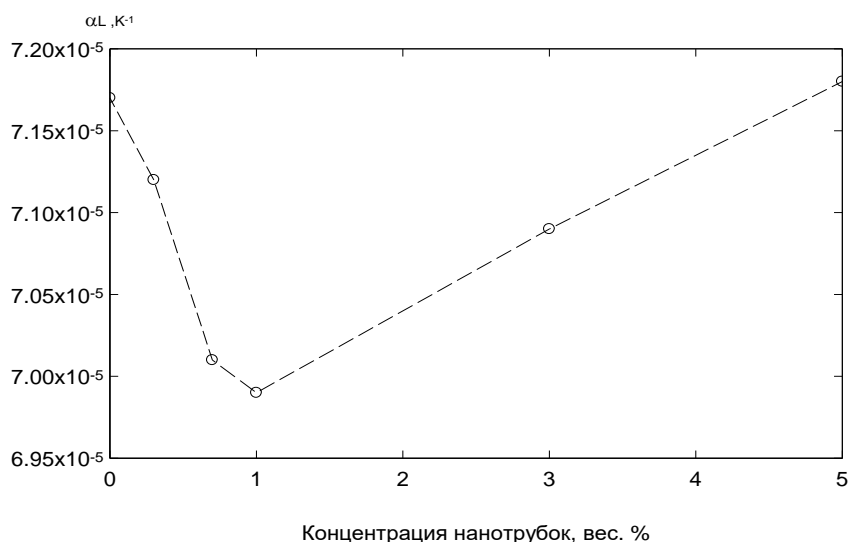


Рисунок 4.6 – Зависимость КЛТР (α_L) от концентрации нанотрубок

Следовательно, введение небольшого количества нанотрубок (до 1%) снижает (на 2,5%) величину КЛТР, а большего (до 5%) – повышает, что объясняется соответствующим упорядочиванием и разрыхлением структуры полимера. Это объясняется протеканием двух конкурирующих процессов – конструктивным, связанным с упорядочиванием структуры полимера у нанотрубок при повышении степени его кристалличности (см. рисунок 4.5), и деструктивным, вызванным интенсификацией выделения НС1 из ПВХ при повышенных температурах прессования, что требует дополнительного экспериментального подтверждения, на фоне снижения степени кристалличности полимера.

Влияние наночастиц на модуль упругости ПВХ-матрицы

Теория. Влияние наночастиц на свойства полимера обусловлено двумя факторами – во-первых, вкладом свойств самих наночастиц как компонента системы, и, во-вторых, тем, что наночастицы, выполняя роль зародышей кристаллитов приводят к изменению степени кристалличности полимера (см. рисунок 4.5).

Последнее приводит к эффекту формирования в полимере двухфазной системы: одна фаза представляет собой аморфный полимер, а вторая – кристаллиты, образовавшиеся из исходного (матричного) полимера. Уравнение, описывающее зависимость модуля упругости двухкомпонентной системы имеет вид [153]:

$$E = \frac{\alpha_{m,p1} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} + \alpha_{m,p2} \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2}}{\alpha_{m,p1} \frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1}}{E_{p1}} + \alpha_{m,p2} \frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2}}{E_{p2}}}, \quad (4.37)$$

где $\alpha_{m,p1}$ и $\alpha_{m,p2}$ – молярные доли фаз 1 и 2 соответственно; E_1 и E_2 – модули упругости фаз 1 и 2 соответственно; $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1$ и $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_2$ – ван-дер-ваальсовы объемы фаз 1 и 2 соответственно.

Принимая во внимание, что $\alpha_{m,p1} + \alpha_{m,p2} = 1$, а также то, что $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1 = \left(\sum_i \Delta V_i \right)_2$, запишем

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \alpha_{m,2} \left[\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right]}, \quad (4.38)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости аморфной и кристаллической фаз полимера соответственно; $\alpha_{m,2}$ – мольная доля кристаллитов.

Проанализируем зависимость E от объемной доли кристаллитов. Мольная доля связана с объемной долей соотношением:

$$\alpha_{m,p2} = \frac{1}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}, \quad (4.39)$$

где M_{p1} и M_{p2} – молекулярные массы повторяющихся звеньев полимеров 1 и 2 соответственно; ρ_1 и ρ_2 – их плотности; β_2 – объемная доля полимера 2.

Подстановкой (4.39) в (4.38) находим зависимость модуля упругости от объемной доли полимера 2:

$$E = \frac{1 + \frac{\left[\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1 \right]}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}{\frac{1}{E_1} + \frac{\left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p2} / \left(\sum_i \Delta V_i \right)_{p1} - 1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right]}{1 + \frac{M_{p2} \rho_{p1}}{M_{p1} \rho_{p2}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}}. \quad (4.40)$$

Принимая во внимание, что $\left(\sum_i \Delta V_i \right)_1 = \left(\sum_i \Delta V_i \right)_2$, и $M_1 = M_2$, запишем

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{\left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right)}{1 + \frac{\rho_a}{\rho_{cr}} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)}}}. \quad (4.41)$$

Расчет. Выполним оценки модуля упругости для ПВХ. Модуль упругости ПВХ при растяжении оценивается величиной от 2600 до 4000 МПа. Примем для аморфной части $E_1 = 2600$ МПа и для кристаллической $E_2 = 4000$ МПа. Зависимость модуля упругости от мольной доли $\alpha_{m,2}$ кристаллической части показана на рисунке 4.7.

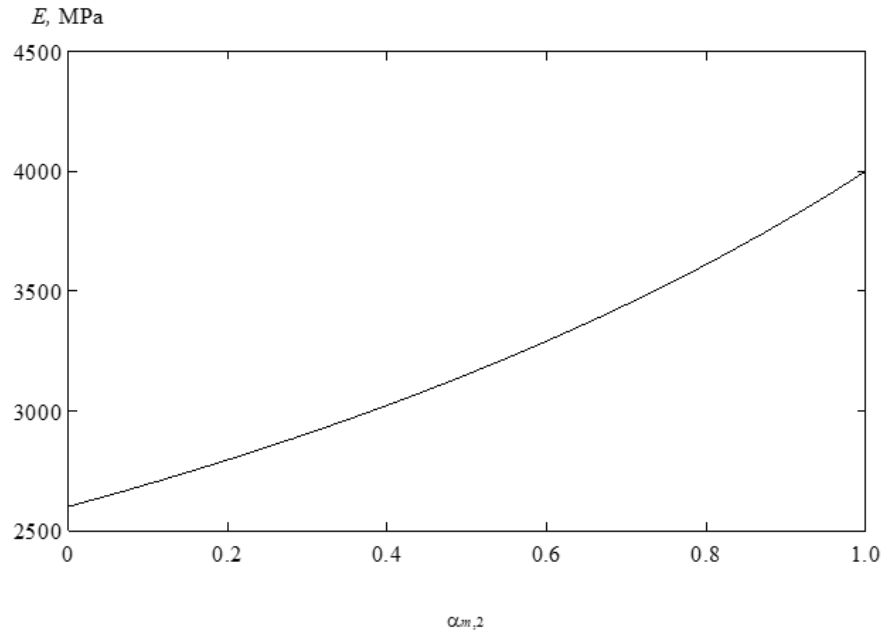


Рисунок 4.7 – Зависимость модуля упругости E от мольной доли $\alpha_{m,2}$ кристаллической части

Формулы (4.40) и (4.41) позволяют установить зависимость модуля упругости E от объемной доли кристаллической фазы β_2 , приведенную на рисунке 4.8 при следующих параметрах для ПВХ: $\rho_a = 1,44 \text{ г/см}^3$, $\rho_{cr} = 1,57 \text{ г/см}^3$, $E_1 = 2600 \text{ МПа}$ для аморфной и $E_2 = 4000 \text{ МПа}$ для кристаллической фазы.

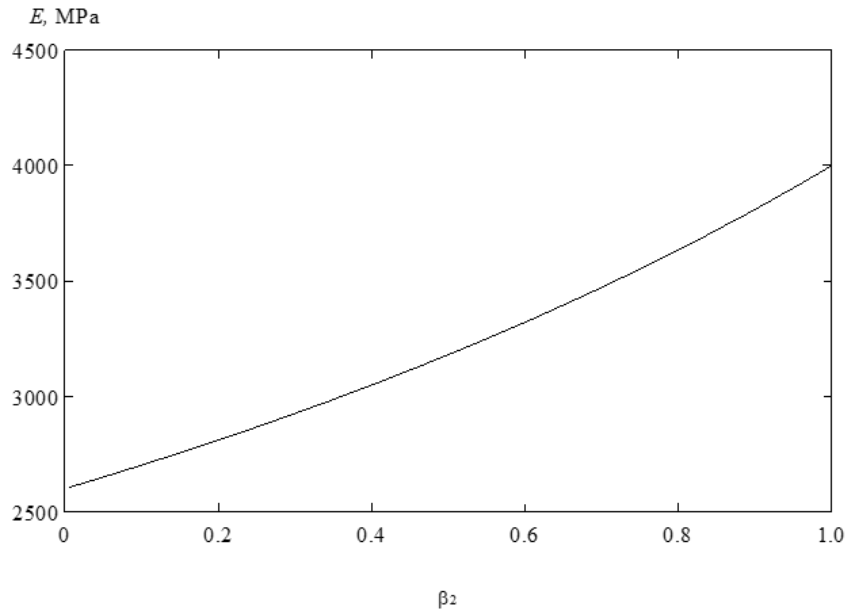


Рисунок 4.8 – Зависимость модуля упругости E от содержания весовой части кристаллической фазы β_2

4.2 Оптимизация состава композита на микро- и мезоструктурных уровнях

На микро- и мезоструктурных уровнях посредством теоретического анализа свойств композита от свойств структурных составляющих и симплекс-решетчатого *ПЭ* получены *ММ* третьего порядка свойств полимерного композита, с использованием которых выполнена оптимизация состава материала композиционных шпал на основе *ПВХ*, дисперсного мела и древесной муки (микроуровень), а также бамбуковой фибры (мезоуровень).

4.2.1 Значения функций отклика в точках плана эксперимента

Для получения материала композиционных шпал в качестве основных компонентов использовали дисперсные наполнители в виде древесной муки/бамбуковой фибры и тонкодисперсного мела в полимерной матрице *ПВХ*, модуль упругости (E), КЛТР (α) и средняя плотность (ρ) которых приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Свойства исходных компонентов материала композиционной шпалы

Компонент	E , ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	ρ , кг/м ³	Длина/диаметр, 10 ⁻³ м
Бамбуковая фибра	17	5,0	650	60
Древесная мука	14	5,0	650	3
Мел	70	2,2	2700	-
ПВХ	3,4	70,0	1350	-

Компонентами композиции I материала композиционной шпалы являлись расходы древесной муки (в кодированном масштабе x_1), порошок карбоната кальция (то же, x_2) и полимерное связующее – *ПВХ* (то же, x_3), а в композиции II вместо древесной муки использовалась фибра мао-бамбука. Для компонентов x_i ($i = 1, 2, 3$) во всех точках *ПЭ* выполняется условие

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, x_i \leq 1, \quad (4.42)$$

и переход от кодированных значений компонентов x_i , отн. ед., к их натуральным значениям X_i , кг в 1 м³, осуществляется по уравнению:

$$X_i = x_i \cdot \rho_{см}, \quad (4.43)$$

где $\rho_{см}$ – плотность материала композиционной шпалы, кг/м³.

Для реализации эксперимента принимались ограничения по расходу древесной муки/фибры бамбука $a = 0$, измельченного карбоната кальция (мел) $b = 0$ и ПВХ $c = 0,3$, см. рисунок 4.9. Расходы компонентов материала композиционной шпалы в точках ПЭ в кодированном масштабе \mathbf{x} и в псевдокомпонентах \mathbf{z} приведены в таблице П2.2 Приложения 2, в которой содержание древесной муки/бамбуковой фибры (в x_1 или в z_1), мела (в x_2 или в z_2) и ПВХ (в x_3 или в z_3) относится к единице объема материала шпалы.

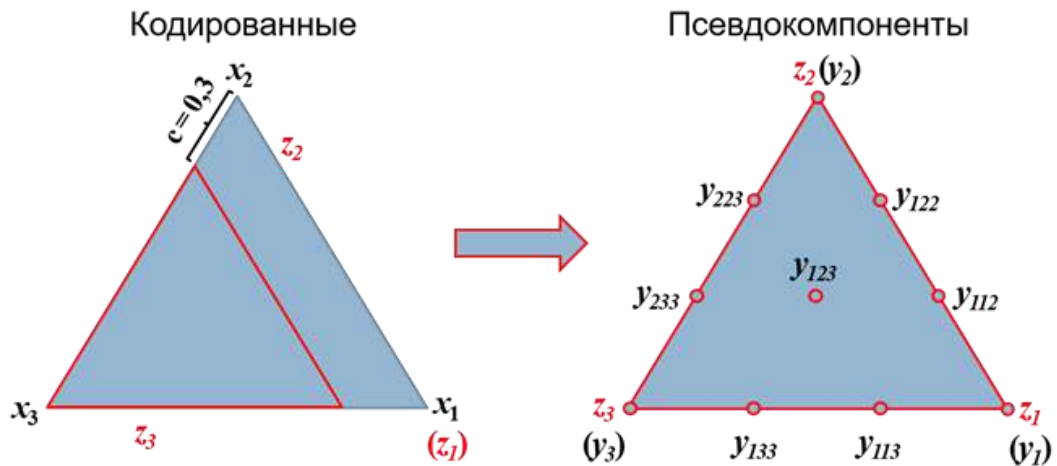


Рисунок 4.9 – Переход от кодированного масштаба \mathbf{x} к псевдокомпонентам \mathbf{z}

(z_1 - расход древесной муки/бамбуковой фибры псевдокомпонентах;

z_2 – то же, мела; z_3 – то же, ПВХ)

В таблице 4.7, представляющей симплекс-решетчатый ПЭ для получения моделей третьего порядка [143], приведены значения свойств материала композиционной шпалы в точках ПЭ, являющихся функциями отклика оптимизационной задачи – модуля упругости (E_m), КЛТР (α_m) и массы шпалы (m). Значения функций отклика Y_E , Y_α , Y_m в точках ПЭ получали по алгоритму, приведенному в Приложении 7, используемых для построения моделей третьего порядка вида (2.6).

Сравнение значений функций отклика для двух систем показывает, что при одинаковом составе и параметров исходного сырья с повышением отношения длины к диаметру повышается модуль упругости композита и снижается КЛТР композита.

Таблица 4.7 – Значения функций отклика Y в точках ПЭ

Система «ПВХ – мел – древесная мука»				Система «ПВХ – мел – бамбуковая фибра»			
Номер опыта	$E_m \cdot 10^{-10}$, Па	$\alpha_m \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	m , кг	Номер опыта	$E_m \cdot 10^{-10}$, Па	$\alpha_m \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	m , кг
1	0,900	18,14	73,7	1	1,257	15,84	73,7
2	3,172	28,89	191,4	2	3,172	28,89	191,4
3	0,340	70,00	127,0	3	0,340	70,00	127,0
4	1,894	22,90	123,7	4	2,158	21,95	123,7
5	0,499	47,93	101,5	5	0,662	44,02	101,5
6	1,037	58,97	142,1	6	1,037	58,97	142,1
7	1,354	20,07	92,2	7	1,722	18,34	92,2
8	0,691	31,37	85,4	8	0,959	27,57	85,4
9	1,938	45,64	162,9	9	1,938	45,64	162,9
10	1,212	36,33	111,6	10	1,441	34,21	111,6
K ₁	1,585	21,29	105,6	K ₁	1,908	19,94	105,6
K ₂	0,592	39,14	92,7	K ₂	0,812	35,02	92,7
K ₃	1,456	52,65	151,7	K ₃	1,456	52,65	151,7

Примечание: K₁-K₃ – контрольные опыты.

Значения коэффициентов β и γ в полиномиальных моделях (2.6) для композита системы «поливинилхлорид – мел – древесная мука» и «поливинилхлорид – мел – бамбуковая фибра» приведены в Приложении 7.

4.2.2 Решение задачи оптимизации системы

Система «ПВХ – мел – древесная мука»

Оптимизационную задачу (2.7)-(2.12) для материала композиционных шпал на основе полимерной матрицы из ПВХ, наполненной мелом и древесной мукой, решали при значениях весовых коэффициентов $\lambda_E = 0,7$, $\lambda_\alpha = 0,2$, $\lambda_m = 0,1$.

На основании результатов решения задачи по определению рациональных свойств материала композиционных шпал в системе ЗБШРП на первом этапе, как и в предыдущем случае, примем значение модуля упругости $Y^r_E = 1,25 \cdot 10^{10}$ Па и массу композиционной шпалы $Y^r_m = 130$ кг, а величину КЛТР равную ее значению для ж.б. шпал $Y^r_\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ [162, 163].

Решением оптимизационной задачи на микроуровне по алгоритму, приведенному в Приложении 6, был определен оптимальный состав материала композиционной шпалы в кодированных переменных x – $x_1 = 0,573$; $x_2 = 0,127$; $x_3 = 0,300$, в псевдокомпонентах z – $z_1 = 0,819$; $z_2 = 0,181$; $z_3 = 0,0$ и в натуральных единицах соответственно для ПВХ, мела и древесной муки – $X_1 = 601,9$ кг; $X_2 = 134,5$ кг; $X_3 = 315,0$ кг. Полученный оптимальный состав при значении целевой функции (2.7), равном $C_{E,\alpha,m} = 0,251$ отн. ед., обеспечивает получение композита с модулем упругости $E_m = 1,45 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью композита $\rho = 1051$ кг/м³, КЛТР $\alpha_m = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и шпалы массой $m_s = 124,5$ кг.

Система «ПВХ – мел – бамбуковая фибра»

Оптимизационную задачу (2.7)-(2.12) для материала композиционных шпал на основе полимерной матрицы из ПВХ, наполненной мелом и бамбуковой фиброй, решали при значениях весовых коэффициентов $\lambda_E = 0,7$, $\lambda_\alpha = 0,2$, $\lambda_m = 0,1$.

На основании результатов решения задачи по определению рациональных свойств материала композиционных шпал в системе ЗБШРП на первом этапе, как и в предыдущем случае, примем значение модуля упругости $Y^r_E = 1,25 \cdot 10^{10}$ Па и массу композиционной шпалы $Y^r_m = 130$ кг, а величину КЛТР равную ее значению для ж.б. шпал $Y^r_\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Решением оптимизационной задачи на мезоуровне по алгоритму, приведенному в Приложении 6, был определен оптимальный состав материала композиционной шпалы в кодированных переменных x – $x_1 = 0,629$; $x_2 = 0,071$; $x_3 = 0,300$, в псевдокомпонентах z – $z_1 = 0,899$; $z_2 = 0,101$; $z_3 = 0,000$ и в натуральных единицах соответственно для ПВХ, мела и бамбуковой фибры $X_1 = 641,7$ кг; $X_2 = 72,1$ кг; $X_3 = 305,9$ кг. Полученный оптимальный состав при значении целевой функции (2.7), равном $C_{E,\alpha,m} = 0,224$ отн. ед., обеспечивает получение композита с модулем упругости $E_m = 1,38 \cdot 10^{10}$ Па, плотность композита $\rho = 1019,7$ кг/м³, КЛТР $\alpha_m = 19,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и шпалы массой $m_s = 114,1$ кг.

4.3 Оптимизация композиционных шпал на макроуровне

В конструкции композиционной шпалы по патентам РФ №2707435 [174] и Китая №20862218.6 [175] армирующими элементами служат два/четыре бамбуковых стержня, расположенных симметрично относительно продольной оси шпалы. Они предназначены для повышения несущей способности шпалы и обеспечения стабильности ее формы, нарушаемой вследствие накопления остаточных деформаций от подвижного состава. При этом для повышения несущей способности шпал полости в бамбуковых стержнях в местах максимальных изгибающих моментов, возникающих в подрельсовых сечениях и в среднем сечении шпалы, заполнены цементным раствором.

На рисунках 4.10 и 4.11 обозначены: 1 – матрица в виде композиционного материала на основе полимерного связующего, армированная группой бамбуковых элементов 2; 2а – стенка бамбуковых элементов; 3 – затвердевший цементный раствор; 4 – шурупы, или костыли, или болты; 5 – рельсовая подкладка; 5а – междоузлия бамбуковых элементов; 6 – рельсы.

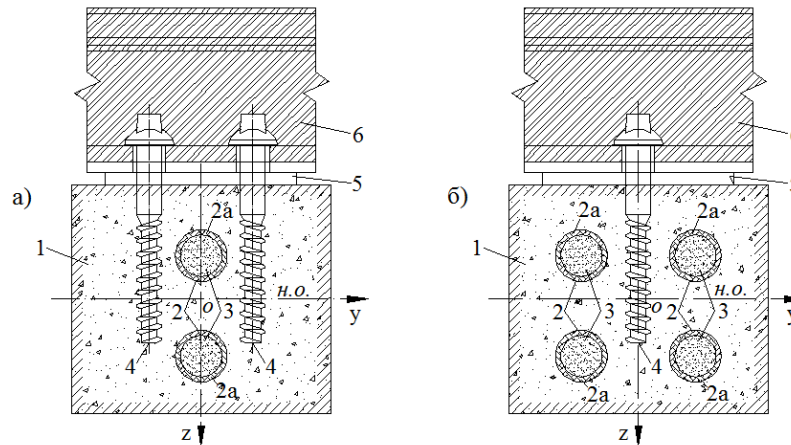


Рисунок 4.10 – Поперечное сечение композиционной шпалы, армированной двумя/четырьмя бамбуковыми брусками

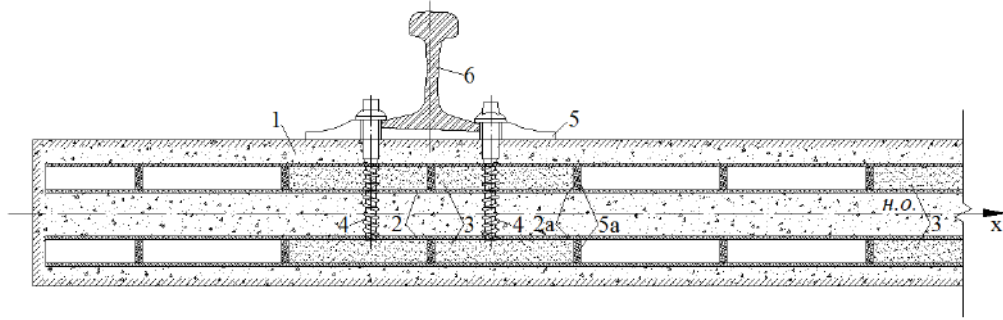


Рисунок 4.11 – Продольное сечение композиционной шпалы, армированной бамбуком (половина, симметрично)

Величину КЛТР композиционной шпалы на макроуровне, армированной 2 или 4 стержнями бамбука, определяли по формуле (см. Приложение 6):

$$\alpha_s = \frac{c_b \alpha_b E_b + c_m \alpha_m E_m}{c_b E_b + c_m E_m}, \quad (4.44)$$

где: c_b – относительное содержание армирующих стержней бамбука в композиционной шпале по объему, отн. ед.; c_m – относительное содержание матрицы в композиционной шпале, отн. ед.; α_b – КЛТР бамбукового стержня в продольном направлении, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; α_m – КЛТР матрицы композиционной шпалы, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; E_b – модуль упругости бамбукового стержня в продольном направлении, 10^8 Па ; E_m – модуль упругости матрицы композиционной шпалы, 10^8 Па .

При условии, что $L = 2,50 \text{ м}$, $B = 0,22 \text{ м}$, $H = 0,16 \text{ м}$, $E_b = E_f = 170 \times 10^8 \text{ Па}$; $\alpha_b = \alpha_f = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; внутренний $R_1 = 0,01 \text{ м}$ и внешний $R_2 = 0,02 \text{ м}$ радиусы ствола бамбука, находим:

а) для композита системы «ПВХ – мел – древесная мука» $\alpha_{\text{ком.}} = 19,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при количестве стержней бамбука $t = 2$: $\alpha_s = 18,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (снижение КЛТР на 5,1%), то же, $t = 4$: $\alpha_s = 17,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (снижение КЛТР на 10,2%);

б) для композита системы «ПВХ – мел – бамбуковая фибра» $\alpha_{\text{ком.}} = 15,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при количестве ствола бамбука $t = 2$: $\alpha_s = 15,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (снижение КЛТР на 4,4%), то же, $t = 4$: $\alpha_s = 14,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (снижение КЛТР на 8,9%).

Следовательно, на макроуровне за счет использования армирующих стержней из бамбука можно снизить КЛТР от 4,4% до 10,2%. Результат многоуровневого снижения КЛТР композиционных шпал обобщен на рисунке 4.12.

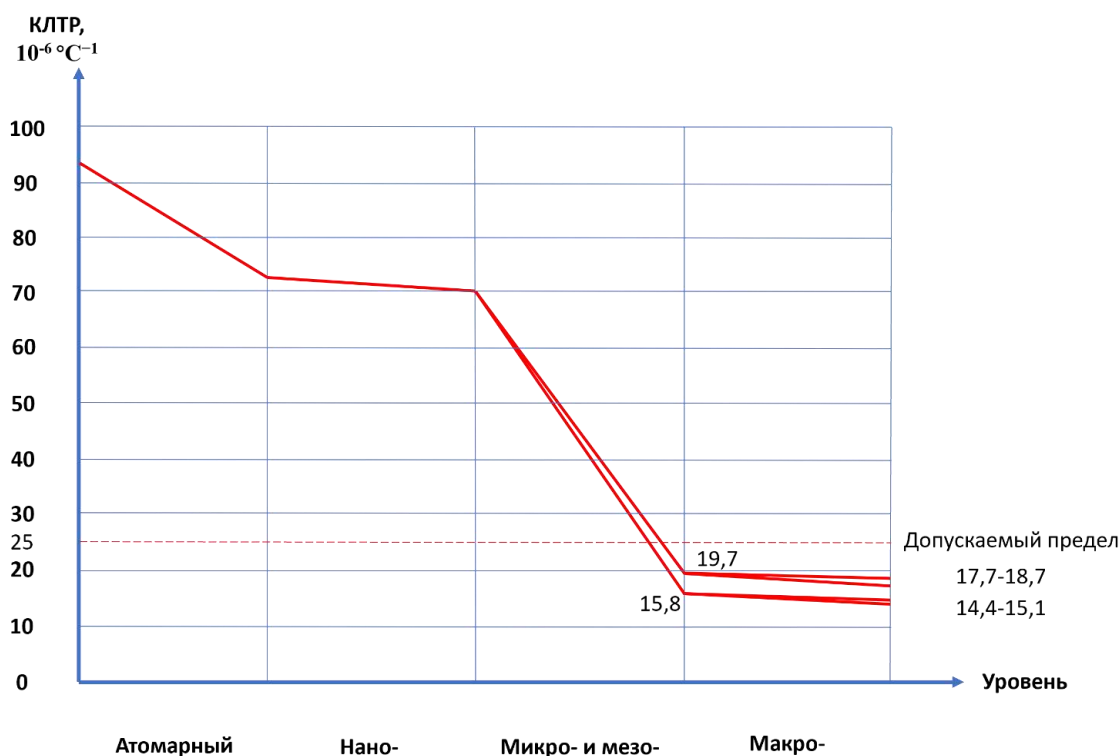


Рисунок 4.12 – Результат многоуровневого снижения КЛТР

КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ

Примечание: $\alpha_{\text{бетона}} = 10,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{\text{ПВХ}} = 94,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_f = 6,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
 $\alpha_q = 45,0 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_p = 70,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Из рисунка 4.12 следует, что КЛТР чистого ПВХ составляет $94,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, введение других полимеров в нем поможет снизить КЛТР до $73,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на наноуровне введение наночастиц снижает КЛТР на 2,5%, т.е. до $70,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, на микро- и мезоструктурных уровнях введение мела и древесной муки/бамбуковой фибры еще снижает КЛТР до $15,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с бамбуковой фиброй) / $19,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с древесной мукой), далее на макроуровне введение бамбуковых брусков способствует снижению КЛТР шпалы на основе композита системы «ПВХ – мел – древесная мука» до $18,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 2 брусками) / $17,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 4 брусками), а для шпалы на основе композита системы «ПВХ – мел – бамбуковая фибра» до $15,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 2 брусками) / $14,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (с 4 брусками). Посредством 4-х кратной модификации ПВХ плюс за счет армирования окончательная величина КЛТР композиционной шпалы уже ниже допустимого предела КЛТР шпалы в $25,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что доказывает практическую значимость предлагаемого подхода по снижению КЛТР композиционной шпалы инновационной конструкции.

4.4 Влияние технологических факторов на изгибную жесткость композиционных шпал

Оценка степени влияния технологических факторов чрезвычайно важна для выбора рациональной технологии изготовления композиционных шпал и установления рациональной их конструкции.

В качестве критерия такой оценки принят такой показатель, как изгибная жесткость композиционной шпалы $G_{из}$, формула для расчета которой была получена в Приложении 5. Это объясняется тем, что, с одной стороны, изгибная жесткость является комплексным показателем подрельсового основания, определяющего во многом работу верхнего строения ж.д. пути, а, с другой стороны, как это следует из полученной формулы расчета $G_{из}$, появляется возможность технологическими приемами управлять свойствами такой шпалы и ее геометрическими параметрами.

Для решения поставленной задачи использовали MM изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$ (см. Приложение 5), по которой были построены геометрические зависимости и выполнен анализ степени влияния технологических факторов на величину $G_{из}$. На рисунке П5.1 бамбуковые стержни имеют разные размеры: верхний стержень имеет наружный радиус R_1 и внутренний радиус r_1 , а нижний стержень – соответственно R_2 и r_2 .

Допустим, что $R_1 = R_2 = R$ и $r_1 = r_2 = r$, $r = 0,7R$ [164]. При фиксированных ширине $a = 250$ мм и высоте $b = 180$ мм (как у деревянной шпалы I типа) композиционной шпалы принимаем следующие пять технологических факторов для определения влияния отклонений диаметра, расположения стержней бамбука и свойств материала композиционной шпалы на изменчивость её изгибной жесткости:

- модули упругости бамбуковых стержней E_b и полимерной матрицы E_m ;
- наружный радиус бруска бамбука R ;
- расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до центров сечения соответственно верхнего e_1 и нижнего e_2 стержней бамбука.

Из условий универсальности применения композиционных шпал при их укладке в ж.д. путь принимаем симметричное (относительно центра шпалы) расположение бамбуковых брусков в ее поперечном сечении, при котором выполняется

условие $e_2 = 0,18 - e_1$ и, следовательно, переменным фактором остается только один геометрический параметр, в качестве которого принимается величина e_1 .

Таким образом, переменными X_i полиномиальной MM изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из} = G_{из}(X_i)$, предназначенной для оценки влияния технологических факторов на $G_{из}$, будут являться следующие варьируемые факторы: E_{σ} (обозначается в MM X_1) – модуль упругости бамбуковых стержней, ГПа; E_m (X_2) – модуль упругости матрицы шпалы из пластика, ГПа; R (X_3) – наружный радиус бруска бамбука, мм; e_1 (X_4) – расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до центра сечения верхнего стержня бамбука, мм.

Анализ будем выполнять в кодированном масштабе варьируемых переменных x . Переход к кодированным значениям x от их натуральных значений X выполняется по уравнению:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X}, \quad (4.45)$$

где X_i – текущее значение варьируемого фактора в натуральных единицах, изменяющегося от его наибольшего (верхнего уровня) X_{max} до наименьшего (нижнего уровня) X_{min} значения; X_0 – основной уровень варьируемого фактора, равный $X_0 = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}$; ΔX – интервал варьирования, равный $\Delta X = X_{max} - X_0 = X_0 - X_{min}$.

Из формулы (4.45) следует, что варьируемые переменные x изменяются в диапазоне от -1 до +1. Уровни варьирования факторов X в ПЭ приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Натуральные X и кодированные x значения варьируемых факторов

Варьируемый фактор	Значение X на уровнях			Интервал варьирования ΔX
	нижнем ($x = -1$)	основном ($x = 0$)	верхнем ($x = +1$)	
X_1 10^{-9} Па	8	15	22	7
X_2 10^{-9} Па	7	11	15	4
X_3 , м	0,01	0,02	0,03	0,01
X_4 , м	0,13	0,14	0,15	0,01

Значения X приняты в таблице 4.8 для X_1 по публикации [165], для X_2 по данным [166, 167], для X_3 из условия обеспечения расстояния между гранями

нижнего и верхнего стержня не менее 20 мм и так как $X_4 = 180 - 20 - R$, то $130 \leq X_4 \leq 150$ мм.

Функцией отклика $Y = Y(X_i)$ служила изгибная жесткость композиционной шпалы $G_{из}$, Н • мм². ПЭ, по которому выполняли вычисления коэффициентов полиномиальной модели $Y = Y(X_i)$ приведен в таблицах П2.3 (в кодированном масштабе x) и П2.4 (в натуральном масштабе X) Приложения 2. В результате была получена ММ с достаточной точностью – не превышает 1% (процедура ее получения приведена в Приложении 7) описывающая значения функции отклика – изгибную жесткость композиционной шпалы $G_{из}$:

$$G_{из} = 1305983 + 23683x_1 + 452713x_2 - 33820x_3 - 14723x_4 + 21462x_1x_3 + 18996x_1x_4 - 29520x_2x_3 - 19719x_2x_4 - 12248x_3x_4 - 9678x_3^2 - 1371x_4^2. \quad (4.46)$$

С использованием уравнения (4.46) выполним оценку степени влияния варьируемых факторов x на изгибную жесткость композиционной шпалы $G_{из}$. С этой целью все варьируемые факторы принимаются на основном уровне, т.е. приравниваются нулю, а каждый фактор варьируют в пределах его изменения от нижнего (-1), до верхнего 9 (+1) уровня и далее оценивают их вклад (в % или относительных единицах к значению жесткости шпалы $G_{из} = 1305000$ Па•м⁴, рассчитанной при основном уровне, т.е. $x = 0$) в изменение $G_{из}$. Результаты расчетов приведены на рисунке 4.13 и сведены в таблице 4.9.

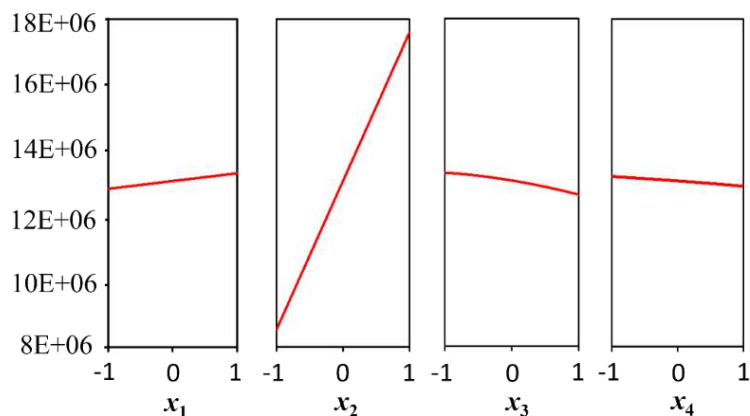


Рисунок 4.13 – Влияние варьируемых факторов x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) на величину изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$, Па•м⁴, при $x_j = 0$ ($i \neq j$)

Таблица 4.9 – Данные по чувствительности изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$ к изменению x_i ($i = 1, 2, 3, 4$)

$\Delta G_{из}, \text{Па} \cdot \text{м}^4$	x_1	x_2	x_3	x_4
		48000	900000	68000
$\Delta G_{из}/G_{из}, \%$	3,7	69,0	5,2	2,3

Из данных, приведенных на рисунке 4.13 и в таблице 4.9 устанавливаем, что по степени влияния на изгибную жесткость композиционной шпалы варьируемые факторы располагаются в следующей последовательности: $x_2 > x_3 > x_1 > x_4$ или в принятых обозначениях их натуральных значений $E_m > R > E_6 > e$.

Уравнение (4.46) будем также использовать для анализа влияния технологических факторов на изгибную жесткость композиционной шпалы $G_{из}$. Для такого анализа удобно использовать графики двух варьируемых переменных в кодированном масштабе x_i и x_j на плоскости (x_i, x_j) . Так как такие переменные изменяются в диапазоне от -1 до $+1$, то такой график будет строиться на квадрате с вершинами, координаты которых представляют собой сочетание переменных в виде -1 и $+1$. На этом же рисунке показаны изолинии значений некоторой функции отклика, отличающиеся ее значениями с шагом, равным пяти.

При числе варьируемых переменных больше двух, как в нашем случае, такое построение выполняется при двух изменяющихся переменных и фиксированных значениях остальных переменных.

Для полноты анализа влияния технологических факторов на $G_{из}$ целесообразно построение изолиний на графиках типа «квадрат на квадрате», когда из четырех переменных на двух, например, x_1 и x_3 (переменные x_2 и x_4 принимают фиксированные значения) строится большой квадрат с изолиниями $G_{из} = G_{из}(x_1; x_3) = const$, в вершинах которого, т.е. при фиксированных значениях x_1 и x_3 , строятся малые квадраты, в которых варьируемыми переменными являются уже переменные x_2 и x_4 и уравнение изолиний имеет вид $G_{из} = G_{из}(x_2; x_4) = const$.

Построение изолиний функции отклика $G_{из}$ на квадрате проводилось по разработанной программе «Origin 9.2».

Изолинии – уровни равных значений функций отклика $G_{из}$, строятся на базовом поле F_1 и в его точках на локальных полях F_2 :

а) в локальных полях $F_2(x_1, x_2)$, построенных в точках $(-1, -1)$, $(-1, 1)$, $(1, -1)$, $(1, 1)$ и $(0, 0)$ базового поля $F_1(x_3, x_4)$;

б) в локальных полях $F_2(x_2, x_3)$ в тех же точках базового поля $F_1(x_2, x_4)$;

в) в локальных полях $F_2(x_1, x_4)$ в тех же точках базового поля $F_1(x_2, x_3)$;

г) в локальных полях $F_2(x_2, x_3)$ в тех же точках базового поля $F_1(x_1, x_4)$;

д) в локальных полях $F_2(x_2, x_4)$ в тех же точках базового поля $F_1(x_1, x_3)$;

е) в локальных полях $F_2(x_3, x_4)$ в тех же точках базового поля $F_1(x_1, x_2)$.

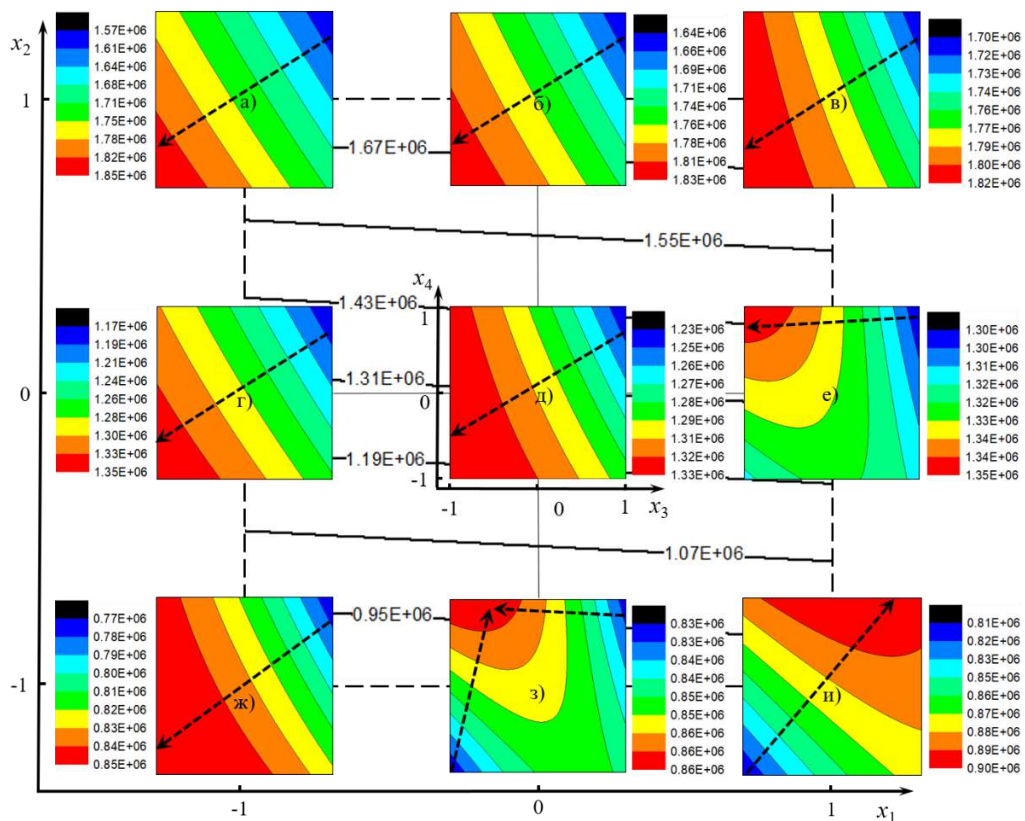


Рисунок 4.14 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$, Па·м⁴, в области варьируемых факторов x , отн. ед. — — — — — базовое поле F_1 при изменениях x_1, x_2 и фиксированных $x_3 = x_4 = 0$; ————— — локальные поля F_2 при изменениях x_3, x_4 в точках базового поля F_1 с координатами: а – $x_1 = -1$ и $x_2 = 1$; б – $x_1 = 0$ и $x_2 = 1$; в – $x_1 = 1$ и $x_2 = 1$; г – $x_1 = -1$ и $x_2 = 0$; д – $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$; е – $x_1 = 1$ и $x_2 = 0$; ж – $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$; з – $x_1 = 0$ и $x_2 = -1$; и – $x_1 = 1$ и $x_2 = -1$; ← — — — — — направление наибольшего градиента $\Delta G_{из max}$.

В качестве примера, из рисунка 4.14 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях геометрических параметров – радиуса бамбуковых брусков R (x_3) и расстояния их верхнего ряда от растянутой пласти шпалы e (x_4), равных их основным уровням ($R = 0,02$ м и $e = 0,14$ м, см. таблицу 4.6) наибольшее влияние на величину $G_{из}$ оказывает изменение модуля упругости матрицы шпалы E_m (x_2), во всем диапазоне изменения которой влияние модуля упругости бамбуковых брусков E_b (x_1) на $G_{из}$ незначительно и изменяется по линейному закону.

В точках базового поля F_1 при фиксированных значениях E_b (x_1) и E_m (x_2) влияние геометрических параметров R (x_3) и e (x_4) (локальные поля F_2) на величину $G_{из}$ неоднозначно: если в базовом поле F_1 (локальные поля F_2 а, б, в, г, д и ж) наибольший градиент изменения изгибной жесткости $\Delta G_{из max}$ для достижения ею максимального значения $G_{из max}$ (на рисунке 4.16 направление наибольшего градиента $\Delta G_{из max}$ показано пунктирной стрелкой $G_{из max} \leftarrow \text{-----} G_{из min}$) соответствует одновременному уменьшению геометрических параметров R и e , то в локальном поле F_2 а направление градиента $\Delta G_{из max}$ зависит от радиуса бамбуковых стержней R (x_3), в локальном поле F_2 и – от повышения роста радиуса стержней R (x_3) и расстояния между ними e (x_4), в локальном поле F_2 з – одно направление градиента $\Delta G_{из max}$ зависит в основном от радиуса стержней R (x_3) (при наибольших значениях R и e), а другое направление градиента $\Delta G_{из max}$ зависит в основном от расстояния между ними e (x_4) (при наименьших значениях R и e). Анализы других случаев приведены в Приложении 8.

4.5 Выводы по главе 4

1. Одним из основных препятствий, сдерживающим применение композиционных шпал на ж.д. транспорте, является высокое, на порядок и выше по сравнению с традиционными материалами, применяемыми для изготовления шпал – древесины и бетона, значение коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР). Ввиду такой большой разницы, неприемлемой для безопасной эксплуатации подвижного состава, его снижение и управление величиной модуля упругости матери-

ала шпал впервые в мировой практике выполнено на пяти структурных уровнях – атомно-молекулярном, нано-, микро-, мезо- и макроуровне.

2. Методом атомарных инкрементов на атомно-молекулярном уровне по химическим формулам полимеров, перспективных для модификации *ПВХ* – связующего, принятого в работе для получения композиционных шпал, выполнена оценка их совместимости, определены их важнейшие свойства (ван-дер-ваальсовый объем, поверхностная энергия, температура стеклования, коэффициенты термического расширения и др.) и показана возможность снижения модификацией поливинилхлорида величины КЛТР до 30%.

3. Введение углеродных нанотрубок в состав *ПВХ* приводит к перестройке его аморфной структуры в упорядоченную в приграничной области наночастиц и, тем самым, изменению степени кристалличности *ПВХ*. Показано, что увеличение степени кристалличности *ПВХ* вызывает снижение величины его КЛТР, максимум которого достигается при концентрации нанотрубок 1% по массе.

4. На мезо- и микроструктурных уровнях разработан алгоритм расчета значений КЛТР и модуля упругости E трехкомпонентного композита «поливинилхлорид – тонкодисперсный мел – бамбуковая фибра», с использованием которого методами симплекс-решетчатого *ПЭ* получены полиномиальные математические модели, адекватно описывающие важнейшие для оценки работы композиционных шпал в пути свойства материала шпал – коэффициента линейного температурного расширения, модуля упругости и средней плотности.

5. Показано, что использование в качестве армирующих композиционную шпалу бамбуковых стержней (макроуровень) позволяет не только регулировать несущую способность шпал путем введения в их полости на участках наибольших изгибающих моментов цементного раствора (на конструкцию композиционной шпалы получены патенты РФ №2707435 [174] и Китая №20862218.6 [175]), но и обеспечить стабильность ширины рельсовой колеи путем снижения величины КЛТР с $15,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (для модифицированного на четырех структурных уровнях *ПВХ*) до $14,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (для двух стержней бамбука) и $13,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (для четырех стержней бамбука).

6. Методами ПЭ «на квадрате» с использованием в виде целевой функции изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$, являющейся комплексным показателем работы подрельсового основания в ж.д. пути, установлено, что среди таких технологических факторов, как модули упругости бамбуковых стержней и матрицы шпалы из пластика, наружный радиус бамбукового стержня и расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до центра сечения верхнего бамбукового стержня наибольшее влияние на величину $G_{из}$ в области допустимых значений варьируемых факторов оказывает модуль упругости матрицы композиционной шпалы.

7. С использованием полученных полиномиальных моделей свойств материала композиционной шпалы решением многокритериальной оптимизационной задачи по минимизации целевой функции, представляющей собой минимум отклонения значений свойств материала композиционной шпалы (модуля упругости матрицы Y_E , величины коэффициента линейного температурного расширения Y_α и массы шпалы Y_{mt}) от их некоторых рациональных значений Y_E^r , Y_α^r , Y_{mt}^r , полученных при решении задачи по взаимодействию подвижного состава с земляным полотном, балластной призмой и рельсами, определены оптимальные расходы составляющих материала шпал – для системы «ПВХ – мел – древесная мука» соответственно – $X_1 = 601,9$ кг; $X_2 = 134,5$ кг; $X_3 = 315,0$ кг, а для системы «ПВХ – мел – бамбуковая фибра» соответственно – $X_1 = 641,7$ кг; $X_2 = 72,1$ кг; $X_3 = 305,9$ кг, обеспечивающие получение композита с модулем упругости $E_m = 1,38 \cdot 10^{10}$ Па, плотностью композита $\rho = 1019,7$ 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.

ГЛАВА 5 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ

В главе 5 представлены результаты исследований основных свойств материала композиционных шпал стандартными и нестандартными (с применением лазерной интерферометрии (ЛИИ)) методами.

Материал композиционных шпал в ж.д. пути испытывает:

- ударные нагрузки в уравнильных местах, на стыке рельсов, на путевых стрелках и др. местах;
- квазистатические нагрузки на бóльшей протяженности ж.д. пути при постоянной скорости движения подвижного состава в местах прикрепления ж.д. рельсов, в зонах сжимающих и растягивающих напряжений, возникающих при изгибе шпалы;
- нагрузки в местах фиксации креплений в шпале, вызывающие ее растрескивание;
- агрессивные воздействия, к которым относятся низкие температуры, влага, химические агенты и другие факторы.

Ввиду многочисленности воздействующих на шпалу факторов не существует единого комплексного показателя, характеризующего все аспекты эксплуатационной способности материала шпал, и, в связи с этим, задача находит решение определением ряда его наиболее важных физико-технических свойств. Кроме того, материал композиционных шпал должен удовлетворять установленным в главе 3 рациональным показателям по массе, модулю упругости и коэффициенту линейного температурного расширения (КЛТР). Эти соображения и были положены в основу выбора в данной главе физико-технических характеристик материала композиционных шпал.

5.1 Физико-механические свойства материала

Исследовались образцы материала композиционных шпал оптимального состава, полученного решением оптимизационной задачи в пар. 4.3.2, изготовленных

на промышленных экструдерах компании Savewood, состоящих из древесной муки, карбоната кальция и *ПВХ*. Температура экструзии в различных зонах экструдера варьировалась от 145 до 200⁰С, а скорость экструзии – от 0,25 до 2,00 м/мин [168].

Для испытаний по определению свойств материала композиционных шпал использовали образцы-пластины размерами 100×100×25 мм и балочки 150×40×25 мм, выпиленные из непрерывной пластины, получаемой на выходе из экструдера. Общий вид испытываемых образцов приведен на рисунках 5.1 и 5.2.

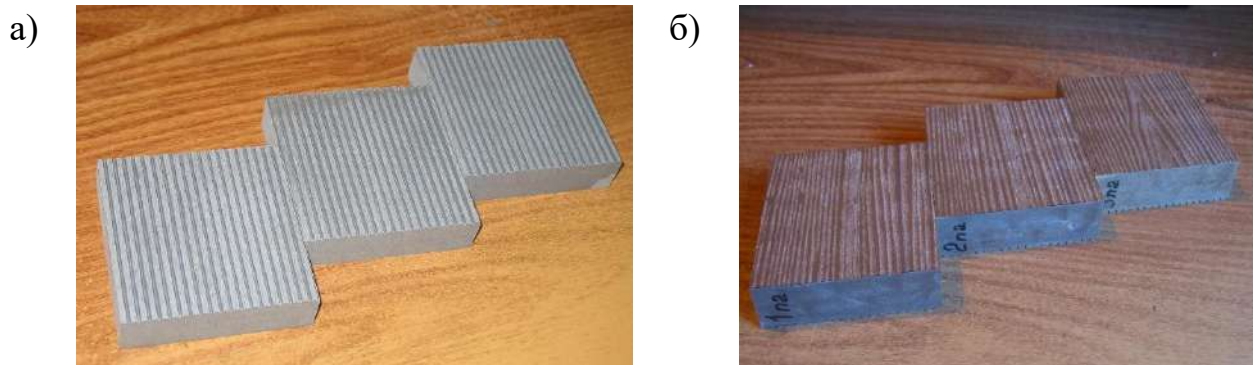


Рисунок 5.1 – Общий вид пластин оптимального (а) и производственного (б) составов

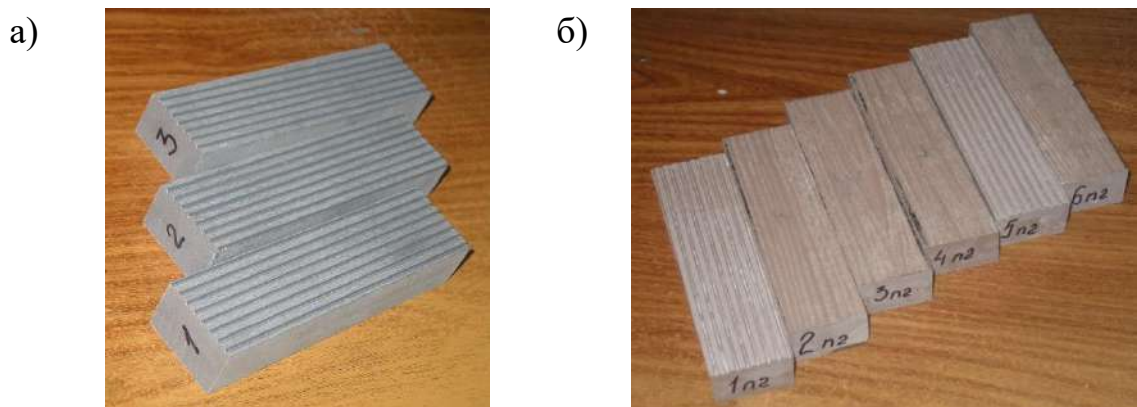


Рисунок 5.2 – Общий вид балочек оптимального (а) и производственного (б) составов

Результаты определения физико-механических свойств материала композиционных шпал приведены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Физико-механические свойства материала композиционных шпал оптимального состава

Свойства материала образцов	Среднее арифметическое значение \bar{a}	Коэффициент вариации V, %	Доверительный интервал Δ
Удельная ударная вязкость $Y_{ув}$, кДж/м ²	3,33	11,3	2,90-3,75
Прочность при растяжении σ_p , МПа	14,7	9,6	13,1-16,3
Прочность при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	43,3	10,2	38,3-48,3
Модуль упругости E , МПа	5573,3	12,7	4484,9-6661,7
Прочность на растяжение при раскалывании R_{pp} , МПа	20,82	5,1	19,97-21,66

Примечание: единица измерения доверительного интервала Δ соответствует единице измерения свойства материала.

Таблица 5.2 – Физико-механические свойства материала композиционных шпал производственного состава

Свойства материала образцов	Среднее арифметическое значение \bar{a}	Коэффициент вариации V, %	Доверительный интервал Δ
Удельная ударная вязкость $Y_{ув}$, кДж/м ²	3,07	12,8	2,62-3,51
Прочность на растяжение σ_p , МПа	13,7	7,4	12,5-14,8
Прочность при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	36,0	8,3	33,6-37,4
Модуль упругости E , МПа	5823	14,1	5780-6366
Прочность на растяжение при раскалывании R_{pp} , МПа	17,71	1,6	17,49-17,93

Примечание: единицы измерения доверительного интервала Δ соответствуют единицам измерения свойств материала.

Из приведенных в таблицах 5.1 и 5.2 данных следует, что показатели удельной ударной вязкости $Y_{ув}$, модуля упругости E и прочности при растяжении σ_p образцов оптимального состава несколько выше (на 8,5%, 4,5% и 6,8% соответственно) образцов производственного состава, однако их средние арифметические значения статистически неразличимы в отличие от прочности при изгибе $\sigma_{из}$ и на растяжение при раскалывании R_{pp} (выше на 20,3% и 17,6% соответственно).

Полученные данные по физико-механическим свойствам материала композиционных шпал показывают, что материал оптимального состава обладает более высокими показателями по сравнению с материалом производственного состава и по ряду важнейших показателей это различие является статистически значимым.

5.2 Трещиностойкость материала шпал

На рисунке 5.3 приведены характерные для испытанных образцов кривые их равновесного деформирования в координатах «нагрузка – перемещение» («F – v») при статических испытаниях по определению параметров трещиностойкости материала, а в таблицах 5.3 и 5.4 – ее основные показатели.

Из приведенных в таблицах 5.3 и 5.4 данных следует, что различие практически всех средних арифметических значений показателей материала оптимального и производственного составов, за исключением статического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном разрыве K_I , оказалось статистически значимо.

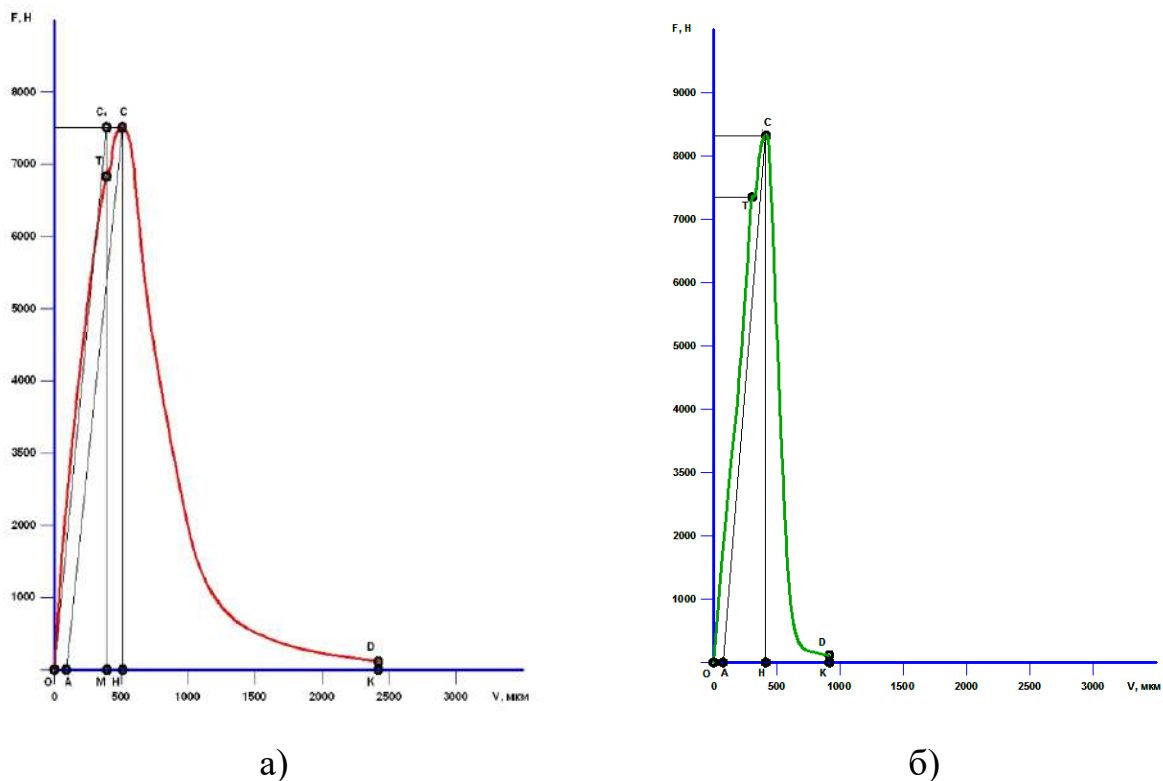


Рисунок 5.3 – Деформирование образцов оптимального (а) и производственного (б) составов при равновесных испытаниях на трещиностойкость

Таблица 5.3 – Показатели трещиностойкости материала оптимального состава

Показатель	Среднее арифметическое значение \bar{a}	Коэффициент вариации V, %	Доверительный интервал Δ
Энергозатраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины W_e , МДж	1,98	1,1%	1,96-2,00
Энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин W_m , МДж	0,76	8,7%	0,71-0,82
Энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины W_i , МДж	2,13	5,7%	1,99-2,27
Статический джей-интеграл J_i , МДж/м ²	935	12,3%	843-1027
Статический коэффициент интенсивности напряжений K_i , МПа·м ^{1/2}	2887	2,0%	2840-2934
Критерий хрупкости материала χ^c_F , м	0,043	3,6%	0,042-0,044

Таблица 5.4 – Показатели трещиностойкости материала производственного состава

Показатель	Среднее арифметическое значение \bar{a}	Коэффициент вариации V, %	Доверительный интервал Δ
1	2	3	4
Энергозатраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины W_e , МДж	1,49	3,6%	1,44-1,53
Энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин W_m , МДж	0,61	4,1%	0,59-0,63
Энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины W_i , МДж	0,98	11,4%	0,89-1,07

1	2	3	4
Статический джей-интеграл J_i , МДж/м ²	771	6,6%	730-811
Статический коэффициент интенсивности напряжений K_i , МПа·м ^{1/2}	3017	4,7%	2903-3131
Критерий хрупкости материала χ^c_F , м	0,028	14,8%	0,025-0,031

Для оптимального состава показатели энергетических затрат на процессы трещинообразования и развития магистральной трещины оказались существенно выше аналогичных параметров образцов производственного состава: энергозатраты на упругое деформирование образца до начала движения магистральной трещины W_e выше на 33%, энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин W_m выше на 26% и энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины W_i уже выше в 2,2 раза.

Столь высокое различие затрат энергии на деформирование материала перед магистральной трещиной объясняется высокими энергозатратами на микротрещинообразование и слияние трещин в более пластичном материале оптимального состава, что подтверждается величиной статического джей-интеграл J_i , являющегося критерием сопротивления развитию трещин при пластическом деформировании материала, который оказался на 20% выше для оптимального состава, что говорит о его преимуществе для получения композиционных шпал. В данном случае при наличии полимерной матрицы показатель статического коэффициента интенсивности напряжений K_i , который характеризует сопротивление материала развитию трещин при его упругом состоянии, оказался менее чувствителен к составу материала, и это предопределило отсутствие статистически значимого их различия для оптимального и производственного составов.

При этом материал производственного состава имеет более высокую хрупкость, характеризуемую критерием хрупкости материала χ^c_F , отличающегося для оптимального и производственного состава в 1,5 раза, что и предопределило

«взрывной» характер разрушения образцов при их испытаниях на сжатие с регистрацией процесса разрушения методами лазерной интерферометрии (см. ниже).

5.3 Физико-технические свойства материала

В параграфе 5.3 приведены результаты определения КЛТР и водопоглощения образцов.

Значение КЛТР, полученные с использованием лазерного интерферометра Майкельсона, приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Статистические показатели КЛТР образцов

Состав серии	Среднее арифметическое значение $\bar{\alpha} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	Коэффициент вариации $V_{\alpha}, \%$	Доверительный интервал, K^{-1}
Оптимальный	24	8,1	21,5-27,3
Производственный	38	11,6	33,4-41,8

Из приведенных в таблице 5.5 результатов испытаний следует, что величина КЛТР образцов оптимального состава в 1,6 раз ниже аналогичной величины для образцов производственного состава и это различие статистически значимо.

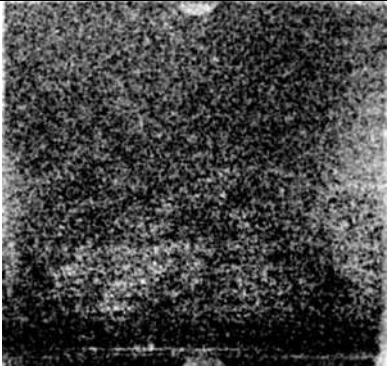
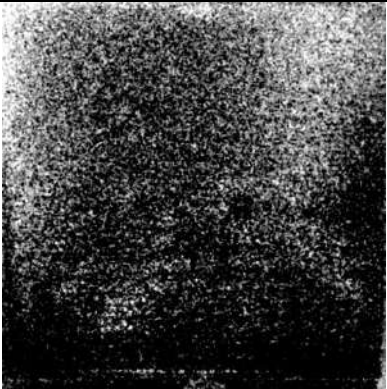
Для определения водопоглощения образцов использовался метод электронной-корреляционной спекл-интерферометрии (см. пар. 2.3.3). Применительно к длительным по времени процессам, методы электронной-корреляционной спекл-интерферометрии обеспечивают хорошую дискретность измерений по времени и не требуют использования дорогостоящих голографических фотоматериалов. При этом для получения наиболее полной количественной и качественной информации о процессе влагопереноса в образце необходимо вести эксперимент до наступления момента достижения динамического равновесия поглощаемой и испаряющейся воды, что проявляется в отсутствии изменений деформационного поля влажностных деформаций во времени.

В таблицах 5.6 и 5.7 приведены результаты спекл-интерферометрических измерений процесса водонасыщения образцов оптимального и производственного составов.

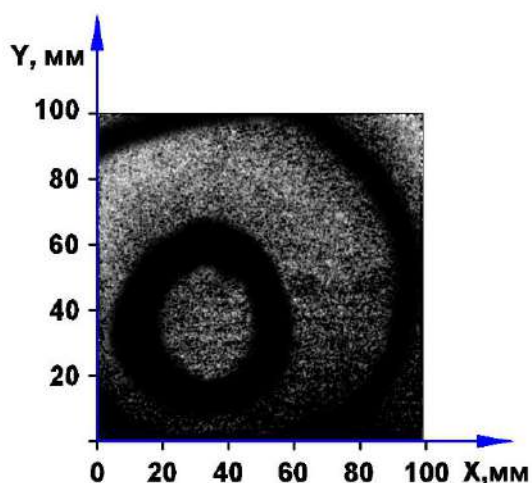
Для анализа процесса водопоглощения и влагопереноса было построено поле перемещений исследуемой поверхности, возникшее за все время водопоглощения образцом воды, показанное на рисунке 5.4.

Анализ последовательности картин полос корреляции, зарегистрированных в привязке ко времени протекания процесса водопоглощения, и 3D-график поля перемещений показывает, что образец имеет крайне низкий уровень водопроницаемости, близкий к нулевому. Основное водопоглощение происходило не за счет капиллярного подсоса через грань, погруженную в воду, а за счет адсорбции влаги воздуха сверхтонкими капиллярами через открытую контролируемую поверхность размерами 100×100 мм², о чем свидетельствует как холмообразное поле перемещений поверхности исследуемого объекта (с максимумом вблизи геометрического центра), так и низкий контраст полос корреляции, вызванный влиянием водопоглощения через микроструктуру образца.

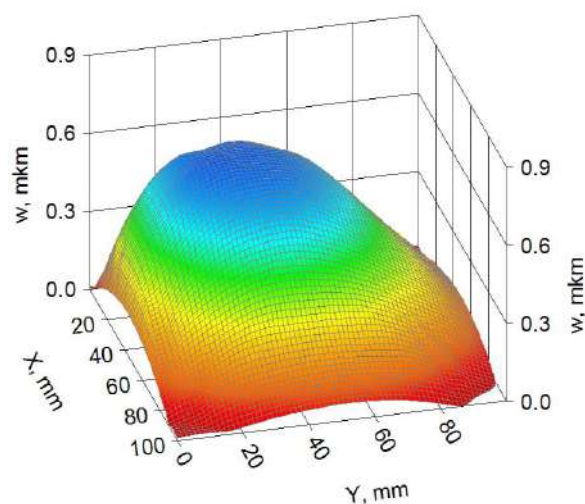
Таблица 5.6 – Результаты спекл-интерферометрических измерений водонасыщения образцов оптимального состава

№№ п.п.	Корреляционные полосы	Описание процесса через интервал времени τ , с
1	2	3
1		$\tau = 1000$ с Отсутствие явно выраженных полос свидетельствует о том, что воздействие влаги за указанное время не вызывает существенного формоизменения образца.
2		$\tau = 2000$ с В нижней части образца, контактирующей с водой, формируется поле перемещений с максимальной величиной нормальных перемещений 0,1-0,2 мкм.

1	2	3
3		<p style="text-align: center;">$\tau = 3000 \text{ с}$</p> <p>Через 50 мин после начала водопоглощения начинает формироваться общее поле формоизменения по всей поверхности образца. Максимальное перемещение составляет не более 0,3 мкм.</p>
4		<p style="text-align: center;">$\tau = 5000 \text{ с}$</p> <p>Через 1 ч 20 мин после начала водопоглощения формируется максимум поля перемещений в центре исследуемой поверхности. Это позволяет предположить, что основное поглощение влаги идет за счет адсорбции открытой поверхностью образца влаги воздуха.</p>
5		<p style="text-align: center;">$\tau = 9000 \text{ с}$</p> <p>2,5 ч после начала пропитки. Максимум поля перемещений незначительно смещается в сторону нижней грани, погруженной в воду.</p>
6		<p style="text-align: center;">$\tau = 10000 \text{ с}$</p> <p>Поле перемещений стабилизируется. Наступает баланс между поглощением и испарением влаги. Максимальные перемещения не превышают 0,6 мкм, что можно объяснить воздействием влаги воздуха на поверхностный слой образца.</p>



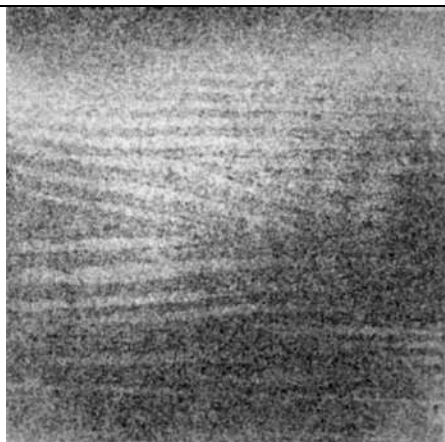
а)

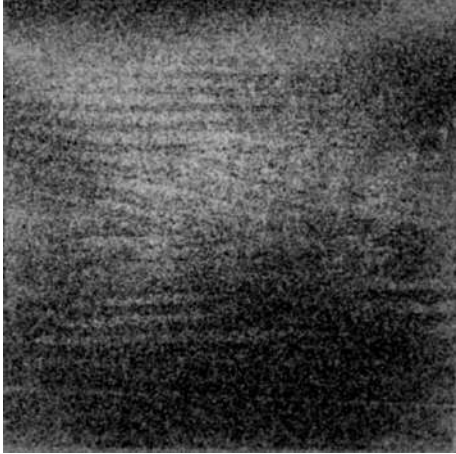
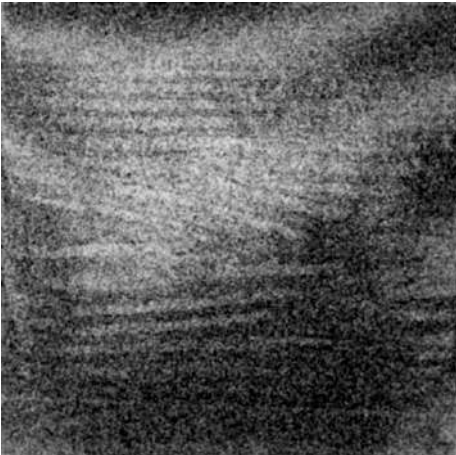
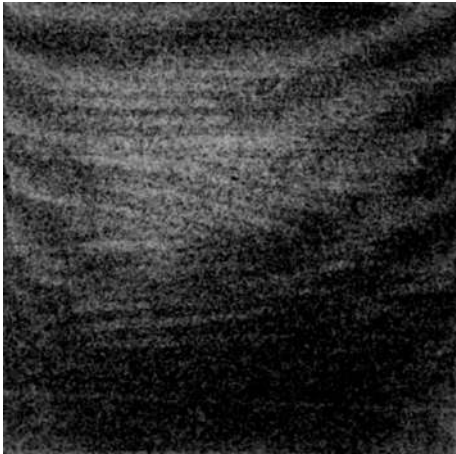


б)

Рисунок 5.4 – Адаптированная для анализа картина полос корреляции, полученная при исследовании влагопоглощения образца оптимального состава после 2 ч 46 мин водопоглощения (а), и 3D-график поля перемещений поверхности образца, построенный по этой картине полос корреляции (б)

Таблица 5.7 – Результаты спекл-интерферометрических измерений водонасыщения образцов производственного состава

№№ п.п.	Корреляционные полосы	Описание процесса через интервал времени τ , с
1	2	3
1		$\tau = 1000$ с Анализ изображения позволяет обнаружить смещение нижнего ребра образца на 0,6 мкм. При этом фронт влагопереноса в основном соответствует уровню $Y = 20$ мм, однако по боковым граням деформационное поле поднимается до уровня $Y = 50-60$ мм.

1	2	3
2		<p style="text-align: center;">$\tau = 2000 \text{ с}$</p> <p>Фронт влаги перемещается снизу вверх, при этом наблюдается почти линейная закономерность увеличения перемещений.</p>
3		<p style="text-align: center;">$\tau = 4000 \text{ с}$</p> <p>Деформирование образца не изменяет свой характер. Сохраняется приоритет по перемещению влаги по боковым граням, о чем свидетельствует дугообразный характер полос корреляции. В нижней части проявляется влияние паров воды, вызывающее декорреляцию спекл-структур.</p>
4		<p style="text-align: center;">$\tau = 8900 \text{ с}$</p> <p>Характер деформирования очень похож на ожидаемое поле перемещений для гидрофильного образца. Влияние паров воды возле открытой поверхности по-прежнему существенное, что проявляется в сильном снижении контраста полос у нижней грани.</p>

Влагоперенос через нижнюю грань образца, погруженную в воду, вносит крайне малый вклад в его водопоглощение, что проявляется лишь в смещении максимума поля перемещений на 15 мм в сторону смачиваемой грани.

Расчет поглощенного объема воды, основанный на вычислении формоизменения образца по полученному пространственному полю перемещений посредством численного интегрирования, показывает, что увеличение объема из-за поглощенной влаги составляет $\approx 4 \text{ мм}^3$, приводящее к увеличению массы образца на 0,004 г. При этом водопоглощение образца оптимального состава по массе, имеющего в сухом состоянии массу 430 г, составит:

$$W_m = (0,004/430,3) \cdot 100 = 0,0009 (\%).$$

Проведенный эксперимент показывает, что образец производственного состава имеет существенные отличия по уровню поглощенной влаги, скорости и характеру протекания процесса водопоглощения:

- основная часть поглощенной влаги поступает через нижнюю грань, контактирующую с водой;
- величина деформации образца постоянно увеличивается по мере увеличения продолжительности эксперимента;
- поступление влаги по боковым граням заметно интенсифицирует характер деформирования исследуемой поверхности, что, по-видимому, сопряжено с наличием капиллярной пористости в образце.

Для оценки количества влаги, поглощенной за время эксперимента, построен 3-D график, представленный на рисунке 5.5.

Изменение объема, вызванное влагопоглощением определить достаточно легко, поскольку формоизменение образца соответствует форме клина с пренебрежимо малым желоблением по осевой линии.

Используя данные 3D-графика можно определить, что добавочный объем (с учетом двух граней $100 \times 100 \text{ мм}^2$) составил около 28 мм^3 . Водопоглощение образца производственного состава по массе при массе в сухом состоянии 397 г, составит:

$$W_m = (0,028/397) \cdot 100 = 0,007 (\%).$$

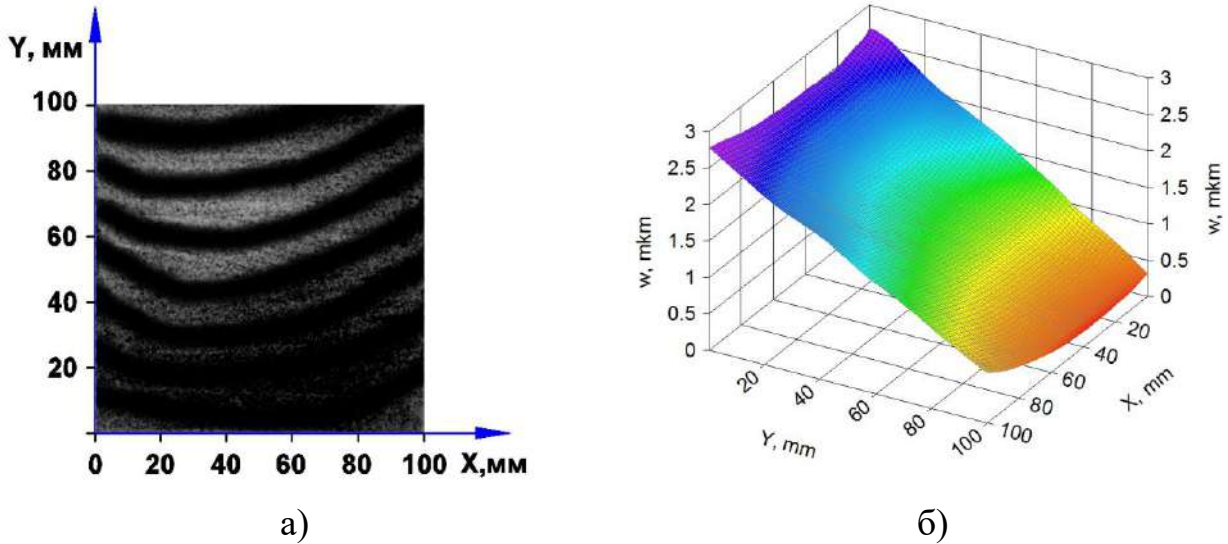


Рисунок 5.5 – Адаптированная для анализа картина полос корреляции, полученная при исследовании влагопоглощения образца производственного состава после 2 ч 28 мин водопоглощения (а), и 3D-график поля перемещений поверхности образца, построенный по этой картине полос корреляции (б)

При небольшой величине водопоглощения она, тем не менее, почти на порядок, точнее в 7,8 раз, превышает значение, полученное для образца оптимального состава. По-видимому, это связано с наличием капиллярной пористости, обеспечивающей, в отличие от образца оптимального состава, впитывание влаги контактирующей с водой поверхностью образца. Отметим также, что применение электронной-корреляционной спекл-интерферометрии является основой новой методики определения чрезвычайно низкого водопоглощения образцов по изменению их объема при контакте с водой, что недостижимо при применении стандартных методов.

5.4 Лазерная интерферометрия материала композиционных шпал

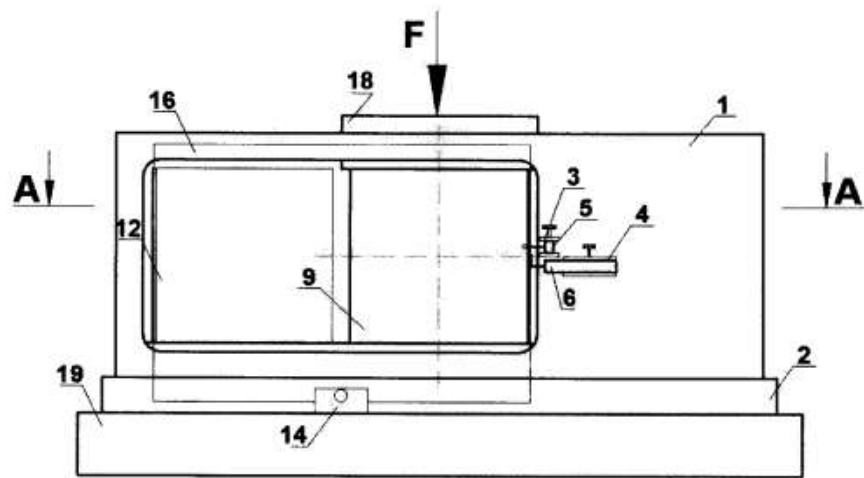
5.4.1 Статическое нагружение образцов

Цель работы – изучение процесса разрушения образцов при осевом нагружении с фиксацией полей перемещений/деформаций синхронно с приложенной нагрузкой с применением лазерной интерферометрии (ЛИ). Измерительная схема настраивалась таким образом, чтобы ее максимальная чувствительность соответствовала вектору перемещений, нормальному к исследуемой поверхности. В ис-

следованиях применялся He-Ne лазер с длиной волны лазерного излучения $\lambda = 0,633$ мкм. При указанной настройке измерительной системы ширина интерференционной полосы на интерферограммах соответствует 0,315 мкм [169].

Для проведения исследований на основе технологии ЛИ разработано устройство (патент №2672192 РФ от 12.11.2018) [170], позволяющее анализировать влияние химического и вещественного составов строительных материалов на структурные изменения в испытуемом образце в процесс его нагружения, схема и механизм патента приведены на рисунке 5.6.

а)



б)

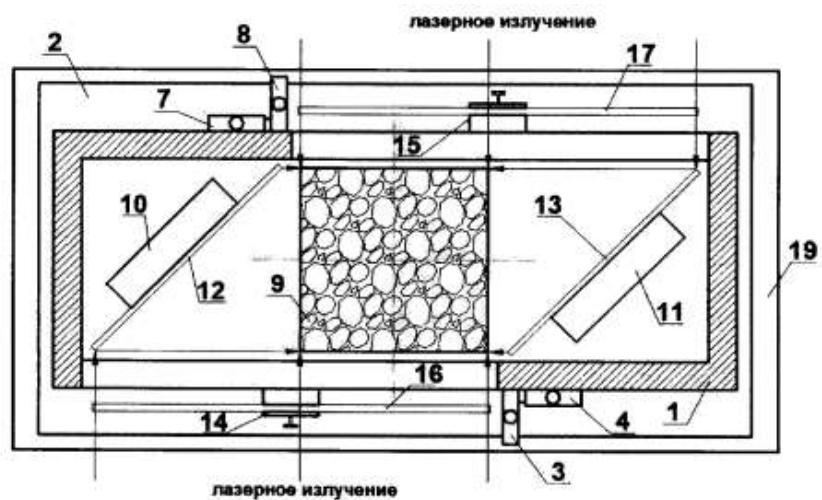
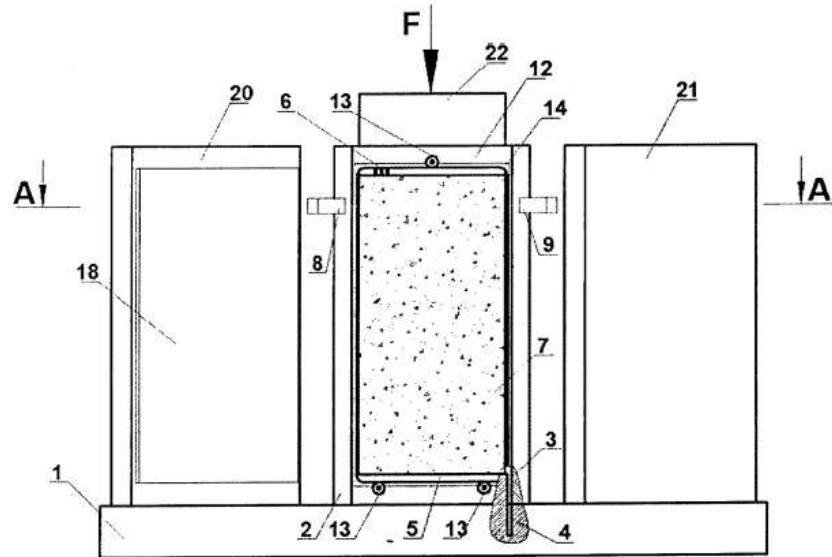


Рисунок 5.6 – Устройство по патенту [170] для определения физико-механических характеристик строительных материалов а) схема; б) вид с разрезом по сечению А-А
 1 – рамка; 2 – днище; 3, 4 – трубины; 5, 6 – датчики линейных перемещений; 7, 8 – датчики для контроля поперечного перемещения двух других граней; 9 – образец; 10,11 – кронштейн; 12, 13 – зеркала; 14, 15 – трубины; 16, 17 – фотопластины; 18 – нагружающая плита; 19 – испытательный пресс

Также получен патент (патент №2710953 РФ от 14.01.20) [171] на устройство, позволяющее одновременно регистрировать поля пространственных векторов перемещений всех четырех боковых граней образца, позволяющее снизить влияние паразитных деформаций на регистрируемые перемещения (рисунок 5.7).

а)



б)

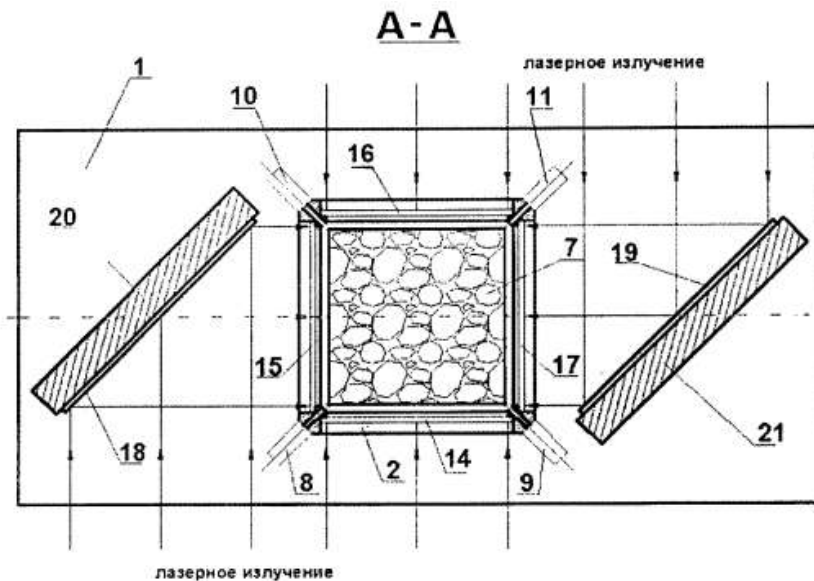


Рисунок 5.7 – Устройство по патенту [171] для определения физико-механических характеристик строительных материалов: а) схема; б) вид с разрезом по сечению А-А
 1 – базовое основание; 2 – рамка; 3 – опорная площадка; 4 – канавка-компенсатор; 5 – окно оптического доступ; 6 – маркер; 7 – образец; 8, 9, 10, 11 – датчики линейного перемещения; 12 – ложемент; 13 – фиксатор; 14, 15, 16, 17 – фотопластины; 18, 19 – зеркало; 20, 21 – кронштейн; 22 – плита

Интерферограмму регистрировали путем наложения двух экспозиций светочувствительной пластины – первой \mathcal{E}_1 при сжимающей нагрузке σ и второй \mathcal{E}_2 при добавлении к ней тестирующего перепада напряжений $\Delta\sigma$, реализуемого в эксперименте, т.е. при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = \sigma + \Delta\sigma$.

Лазерная интерферометрия образца оптимального состава. На первом этапе нагружения сжимающие напряжения составляли $\sigma_{\max} = 10,1$ МПа (здесь и далее тестирующий перепад напряжений равен $\Delta\sigma = 0,5$ МПа). Поскольку характер деформации материала был ранее неизвестен, то на начальных стадиях исследования приращение тестирующей нагрузки проводилось малыми приращениями. Было установлено, что характер деформирования образца является равномерным и не имеет аномальных зон (рисунок 5.8). Равномерное деформирование отражает этап упругопластической деформации, который сопряжен как с адаптацией контактирующих поверхностей, так и общим наклоном исследуемой поверхности, что хорошо проявляется на 3D-графике поля перемещений (рисунок 5.8б). Подобный характер деформирования сохраняется до уровня напряжений $\approx 40\%$ от разрушающих.

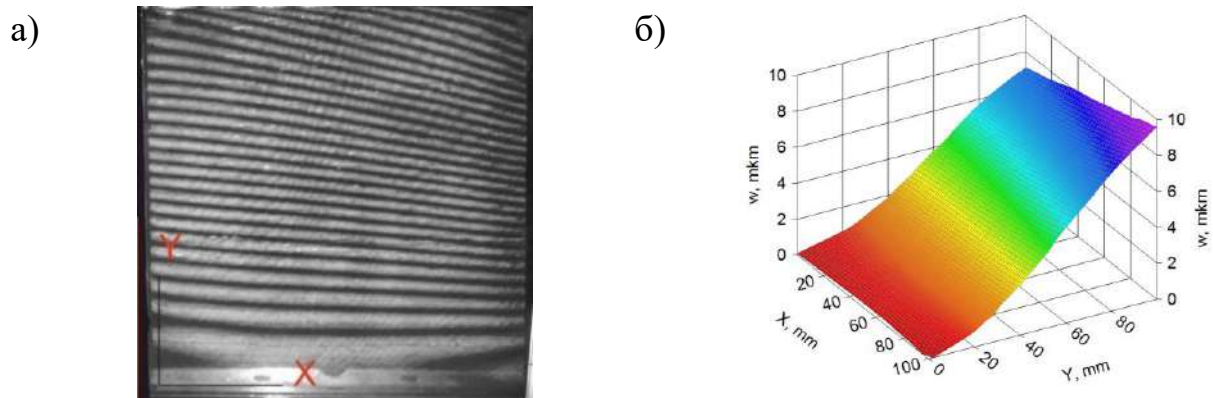


Рисунок 5.8 – Интерферограмма (а) и 3D-график поля перемещений (б) поверхности образца оптимального состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 10,1$ МПа

По мере увеличения уровня напряжений до $\sigma_{\max} = 24,8$ МПа характер деформирования претерпевает плавные изменения. На интерферограмме отчетливо наблюдается формирование поля перемещений, характерного для потери устойчивости (рисунок 5.9). Центральный прогиб поз. 1 формируется под воздействием ло-

кального поля деформирования с максимумом поз. 3. При этом на интерферограмме отчетливо просматривается полоса локальных микродеформационных всплесков поз. 2, свидетельствующих о развитии линии изгиба. На 3D-графике поля перемещений можно наблюдать аномальное деформирование верхней части образца.

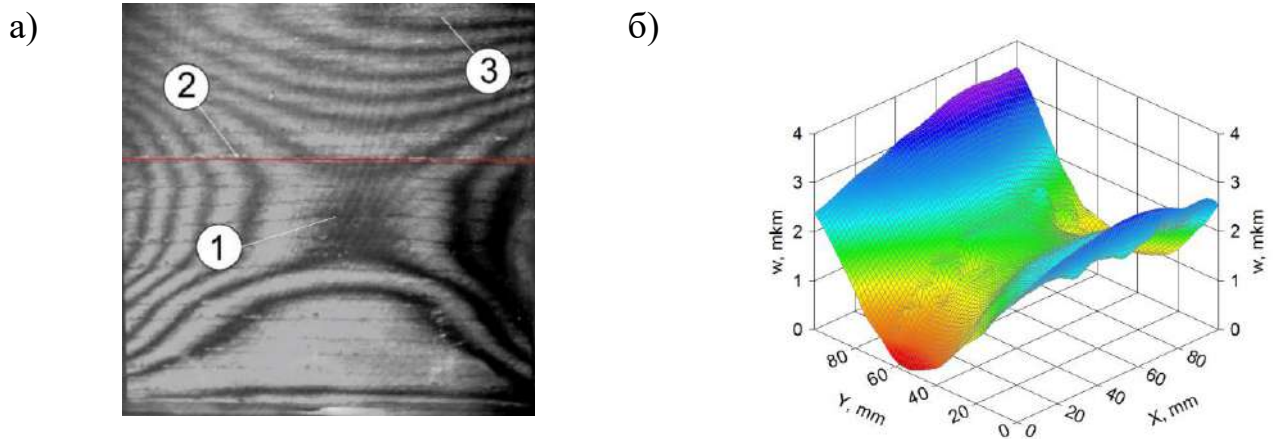


Рисунок 5.9 – Интерферограмма (а) и 3D-график поля перемещений (б) поверхности образца оптимального состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 24,8$ МПа

Увеличение напряжений в образце до 60% от разрушающих ($\sigma_{\max} = 29,7$ МПа, рисунок 5.10а) существенно не изменяет общее поле перемещений, однако в локальной зоне, расположенной в нижней части интерферограммы, наблюдается формирование устойчивой высокостабильной зоны поз. 1, характерной для бездефектных участков твердого тела с низкими пластическими деформациями. Верхняя часть образца интенсивно деформируется и проявляет склонность к интенсификации пластических деформаций. Об этом свидетельствует снижение контраста в верхней части интерферограммы.

При напряжениях $\sigma_{\max} = 38,7$ МПа, составляющих 77% от разрушающих, верхняя часть образца претерпевает столь интенсивную деформацию, что интерференционные полосы теряют контраст и не различимы на фоне структуры исследуемой поверхности (рисунок 5.10б). Образец сохраняет целостность формы, но пластические деформации развиваются с возрастанием скорости. Такое состояние образца свидетельствует о достижении напряжений, близких к предельным.

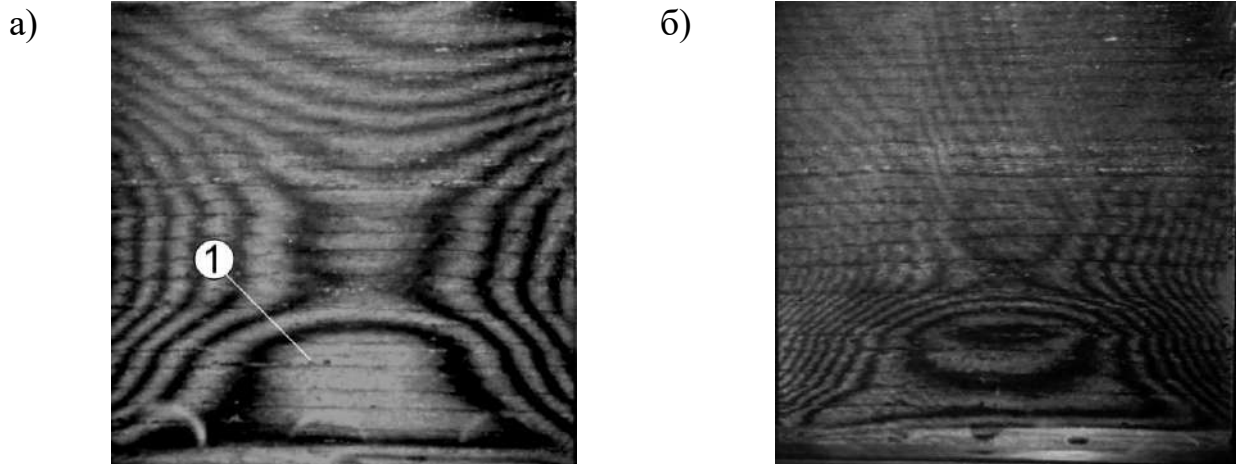


Рисунок 5.10 – Интерферограммы деформации поверхности образца оптимального состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 29,7$ МПа (а) и $\sigma_{\max} = 38,7$ МПа (б)

На ниспадающей ветви при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 48,7$ МПа падение несущей способности происходит плавно, без резких изгибов на кривой деформирования. Характер общего формоизменения не изменяется, как это видно на интерферограмме, представленной на рисунке 5.10б. Качественные изменения проявляются только в том, что в верхней части образца образуется зона непрерывной интенсивной деформации текучести (поз. 1) с полной потерей контраста интерференционных полос (рисунок 5.11а).

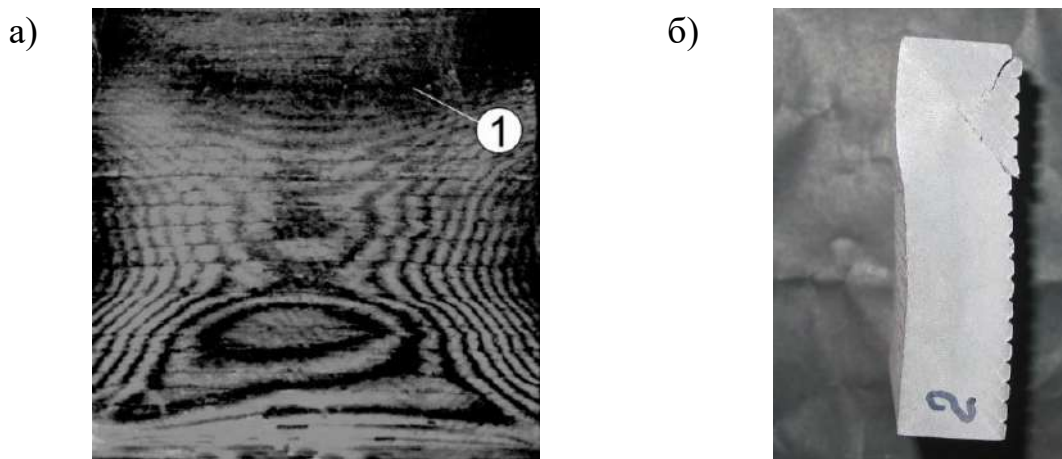


Рисунок 5.11 – Интерферограмма деформации поверхности образца оптимального состава на ниспадающей ветви при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 48,7$ МПа (а) и его физическое разрушение (б)

Темные зоны на интерферограмме соответствуют участкам, на которых перемещение поверхности идет со скоростью более 0,03 мкм/с. В относительной стабильности находится только нижняя часть образца и связанные с ней боковые лепестки. Деформация образца растет, а уровень напряжений быстро падает. Интенсивный рост деформаций образца проявляется в выклинивании фрагмента в верхней части, приводящему к его физическому разрушению (рисунок 5.11б).

Таким образом, до уровня напряжений 40-45% от разрушающих напряжений формоизменение образца не имеет признаков существенной деструкции и соответствует участку упругих и частично пластических деформаций. Начиная с уровня напряжений 45-50% от разрушающих напряжений, начинают появляться признаки деструкции с образованием протяженных зон пластических деформаций. При уровне нагружения 80-90% интенсивно развиваются процессы пластического деформирования, сопровождаемых ростом трещин и формированием блоков, приводящих к падению несущей способности образца.

На рисунке 5.12 приведена кривая деформирования образца « $\sigma - \epsilon$ » с указанием этапов съемки интерферограмм, приведенных на рисунках 5.8-5.11.

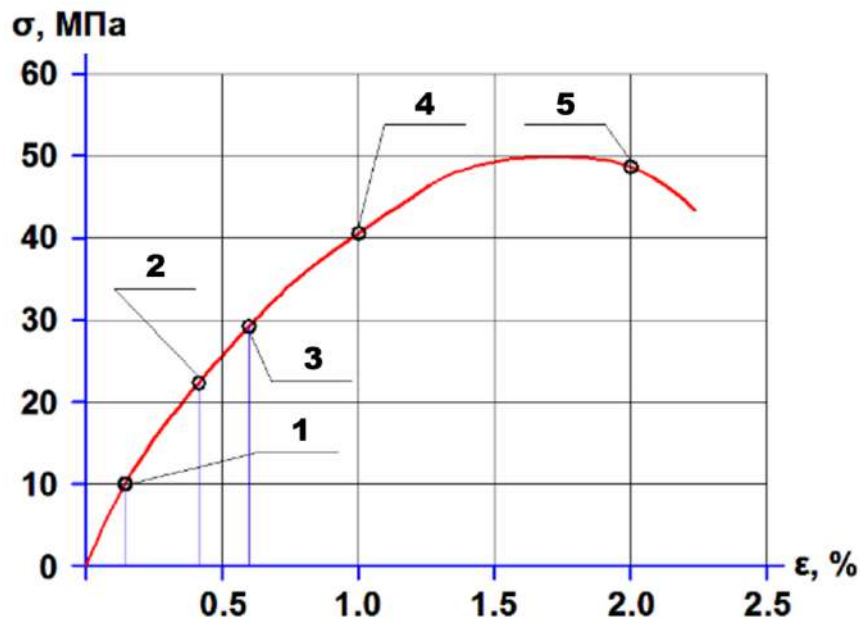


Рисунок 5.12 – Диаграмма « $\sigma - \epsilon$ » деформирования образца оптимального состава

1 – сжимающие напряжения $\sigma = 10,1$ МПа; 2 – то же, $\sigma = 24,8$ МПа; 3 – то же, $\sigma = 29,7$ МПа; 4 – то же, $\sigma = 38,7$ МПа; 5 – то же, $\sigma = 48,7$ МПа

Лазерная интерферометрия образца производственного состава. При сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 10,2$ МПа (19% от разрушающих) характер деформирования образца производственного состава существенно отличается от начального характера деформирования образца оптимального состава. Уже при первом нагружении видно, что образец практически не претерпевает перемещений как целого, а на деформационном поле проявляются локальные особенности формоизменения исследуемой поверхности (рисунок 5.13). В зоне поз. 1 формируется локальный холмообразный максимум. В зоне поз. 2 искажение интерференционных полос визуализирует неявную аномальную зону, возможно, являющуюся предвестником формирования будущей трещины. Зона поз. 3 представляет собой наиболее стабильный деформационный участок с минимальным градиентом поля перемещений. В этой части исследуемого образца реализован надежный контакт с опорной поверхностью, не имеющий существенных локальных аномальных зон силопередачи.

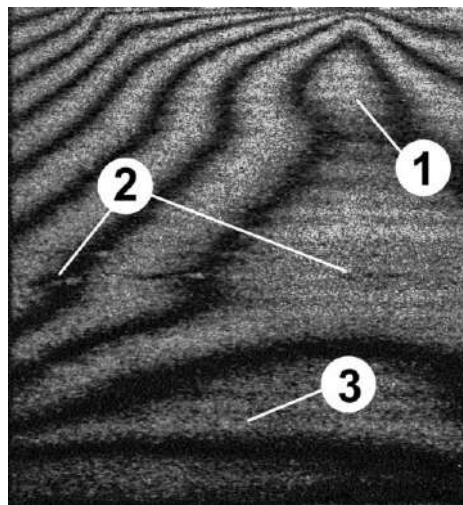


Рисунок 5.13 – Интерферограмма поверхности образца производственного состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 10,2$ МПа

При уровне напряжений $\approx 35\%$ от разрушающих (напряжения сжатия $\sigma_{\max} = 18,6$ МПа) формируется стабильное деформационное поле, имеющее два явно выраженных максимума в верхней правой части исследуемой поверхности и в нижней правой ее части (рисунок 5.14). Граница перегиба проявляется очень отчетливо и имеет желобообразную форму. В целом образец сохраняет единую монолит-

ную структуру и не имеет ярко выраженных деформационных аномалий, указывающих на наличие трещин, дефектов несплошности или разноплотности.

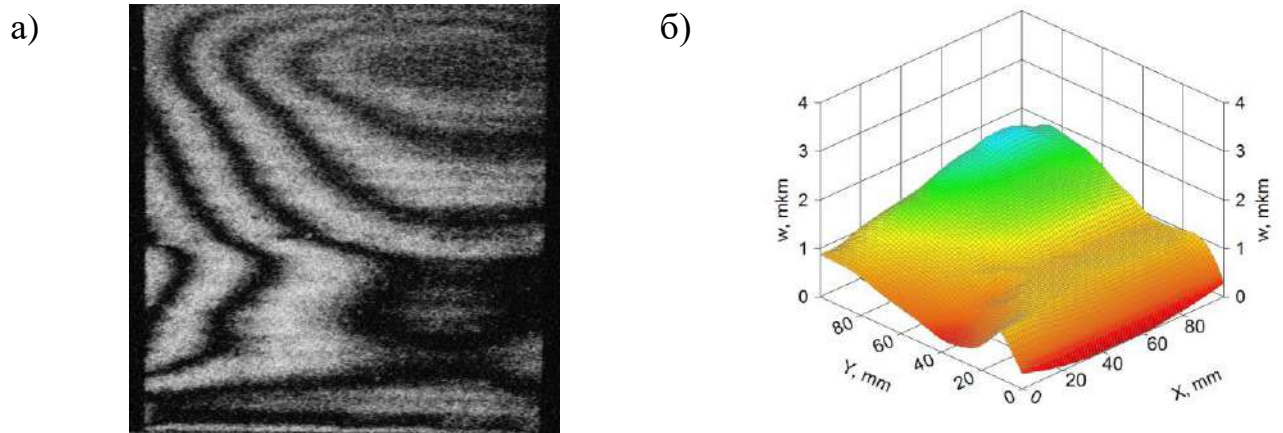


Рисунок 5.14 – Интерферограмма (а) и 3D-график поля перемещений (б) поверхности образца производственного состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 18,6$ МПа

При напряжениях сжатия $\sigma_{\max} = 28,6$ МПа (53% от разрушающих) на исследуемой поверхности сохраняется ранее сформировавшийся характер формоизменения (рисунок 5.15). На поле перемещений присутствуют ранее обнаруженные максимумы поз. 1 и поз. 2. При этом характер деформирования практически сохраняет линейную зависимость.

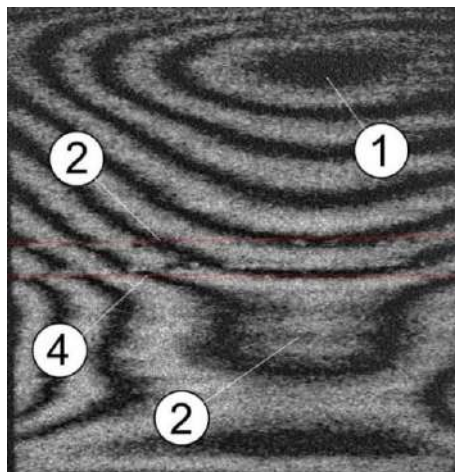


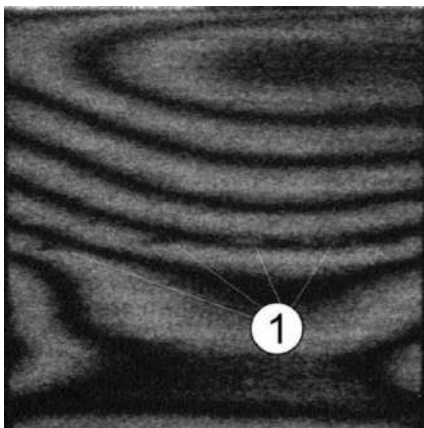
Рисунок 5.15 – Интерферограмма деформации поверхности образца производственного состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 28,6$ МПа

Следует отметить, что обнаруживается весьма интересная особенность деформирования в зоне перегиба между максимумами. Незначительные зубчатые искажения интерференционных полос, указывающие на наличие чрезвычайно малой деформационной аномалии, обнаруженные ранее, отчетливо дублируются еще одной линией. Анализ геометрических характеристик образца показывает, что направление линий в точности совпадает с направлением пазов глубиной 1 мм на обратной стороне образца, а измерение расстояния между полосами позволяет установить, что оно кратно шагу этих пазов.

Столь высокая чувствительность применяемого метода подтверждает эффективность анализа с применением деформационных полей и гарантирует возможность обнаружения даже малых дефектов, влияющих на напряженно-деформированное состояние образца.

При сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 45,5$ МПа, составляющих 85% от разрушающих, нижний деформационный максимум существенно уменьшается, а максимум поля деформирования в верхней части начинает расти (рисунок 5.16). При этом, перераспределение интенсивности деформаций по полю не вызывает существенных изменений на характере осевого сжатия и процесс деформирования развивается по линейной зависимости.

а)



б)

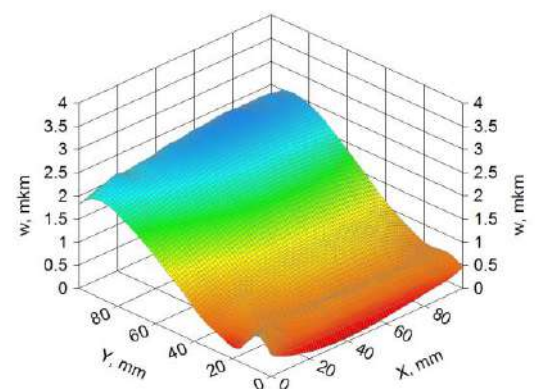


Рисунок 5.16 – Интерферограмма (а) и 3D-график поля перемещений (б) поверхности образца производственного состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 45,5$ МПа

В целом деформационный отклик хорошо коррелирует с приращением нагрузки и позволяет получать достаточно контрастные интерферограммы при ступенчатом ее приложении. Из этого следует, что доля пластических деформаций на этом этапе нагружения невелика. Важно отметить, что даже при столь существенном качественном перераспределении перемещений по полю, линия аномальных микродеформаций хорошо просматривается на интерферограмме 4-го этапа нагружения (см. поз. 1).

При сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 47,6$ МПа (на уровне 89% от разрушающих напряжений) характер деформирования полностью соответствует предыдущему этапу регистрации интерферограмм (рисунок 5.17а). Как видим, с ростом сжимающей нагрузки характер деформирования образца начинает быстро меняться. Вместо локального максимума в верхней части образца и холмообразного поля нормальные перемещения формируют равномерное поле, характерное для продольного расклинивания образца. При этом нижняя часть исследуемого образца сохраняет относительную стабильность, а верхняя часть интенсивно перемещается даже без приращения нагрузки.

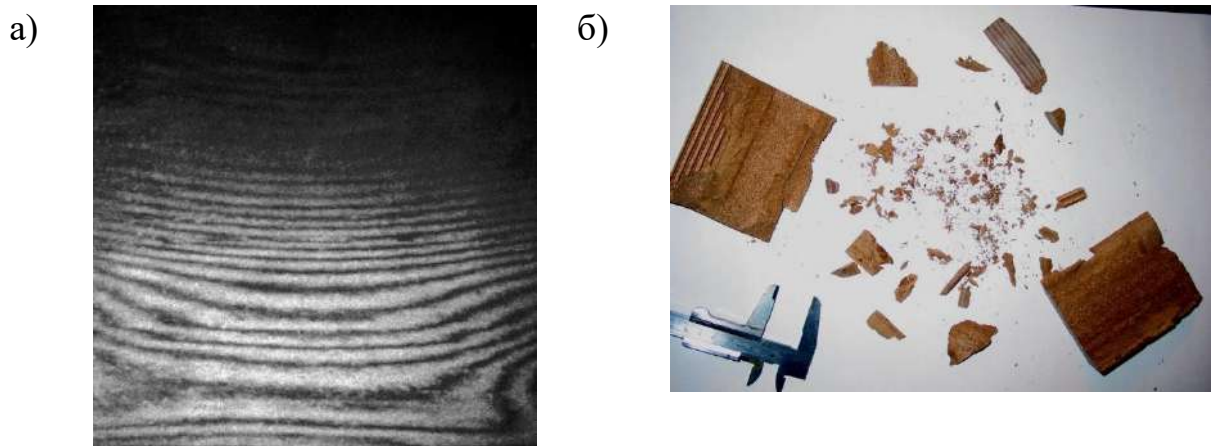


Рисунок 5.17 – Интерферограмма деформаций поверхности образца производственного состава при сжимающих напряжениях $\sigma_{\max} = 47,6$ МПа (а) и его разрушение при $\sigma_{\max} = 53,6$ МПа (б)

Падение контраста полос и образование темного пятна в верхней части исследуемой поверхности свидетельствует об интенсивном развитии локальных пластических деформаций образца. Дальнейшая регистрация интерферограмм не представ-

ляется возможной, поскольку скорость перемещения точек исследуемой поверхности в процессе развития пластических деформаций не позволяет зарегистрировать интерферограмму с экспозицией 4-5 с. При уровне напряжений 80,1 МПа образец разрушается с его фрагментацией на отдельные части (рисунок 5.17б).

Таким образом, до уровня напряжений 60-65% от разрушающих напряжений формоизменение образца производственного состава не имеет признаков существенной деструкции и соответствует участку упругих и частично пластических деформаций. При уровне 70-80% от разрушающих напряжений уровень пластических деформаций столь высок, что затруднено получение интерферограмм традиционными методами.

Сравнительный анализ интерферограмм образцов оптимального и производственного составов показывает, что они характеризуются высоким уровнем деформационной однородности, что свидетельствует о достаточно высоком уровне гомогенизации материала, применяемого для их изготовления. При этом характер разрушения образца оптимального состава больше соответствует разрушению пластического материала, а характер разрушения образца производственного состава имеет признаки, свойственные хрупкому материалу, использование которого нежелательно для изготовления композиционных шпал.

5.4.2 Собственные напряжения в материале шпал

Экспериментальные исследования по определению собственных напряжений в материале шпал проводили путем высверливания двух отверстий – на глубину от 0 до h и от h до $2h$ (рисунок 5.18).

Исследования показали, что при засверливании в зоне устья отверстия происходит заметная деструкция материала, нарушающая корреляцию изображений, как это видно на рисунке 5.18а, что связано с проявлением им пластичности в процессе сверления инструментом. Кроме того, высокая пластичность материала приводит к тому, что величины разгрузочных деформаций, вызванных действием внутренних напряжений, чрезвычайно малы.

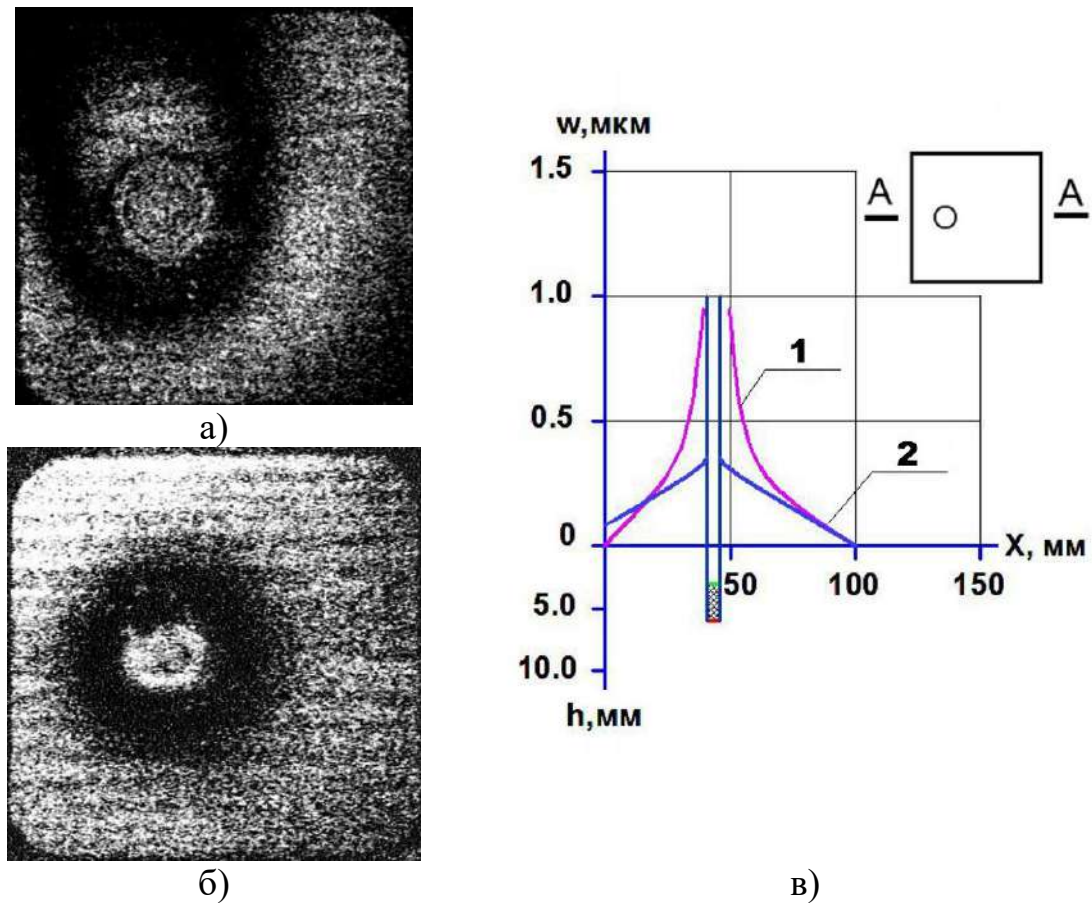


Рисунок 5.18 – Интерферограммы деформирования кромки отверстий в образце оптимального состава под действием собственных напряжений
 а – интерферограмма, полученная при высверливании отверстия диаметром $D = 5$ мм с поверхности образца на глубину $h = 3$ мм; б – то же, с глубины $h = 3$ мм до глубины $h = 6$ мм; в) комплексный график перемещений исследуемой поверхности у кромки засверленного отверстия по сечению А-А на глубину $h = 3$ мм (поз. 1) и $h = 6$ мм (поз. 2)

Исследование образца производственного состава проводилось аналогично, полученные результаты представлены на рисунке 5.19.

Сравнительный анализ интерферограмм на рисунках 5.18а и 5.19а показывает, что деструкция материала при начальном засверливании присутствует как при исследовании образца оптимального, так и производственного составов. Эта особенность объясняется тем, что основу исследуемых образцов составляет полимерная матрица из поливинилхлорида. Даже при незначительном усилии подачи сверла, материал образцов вокруг зоны высверливания пластично деформируется.

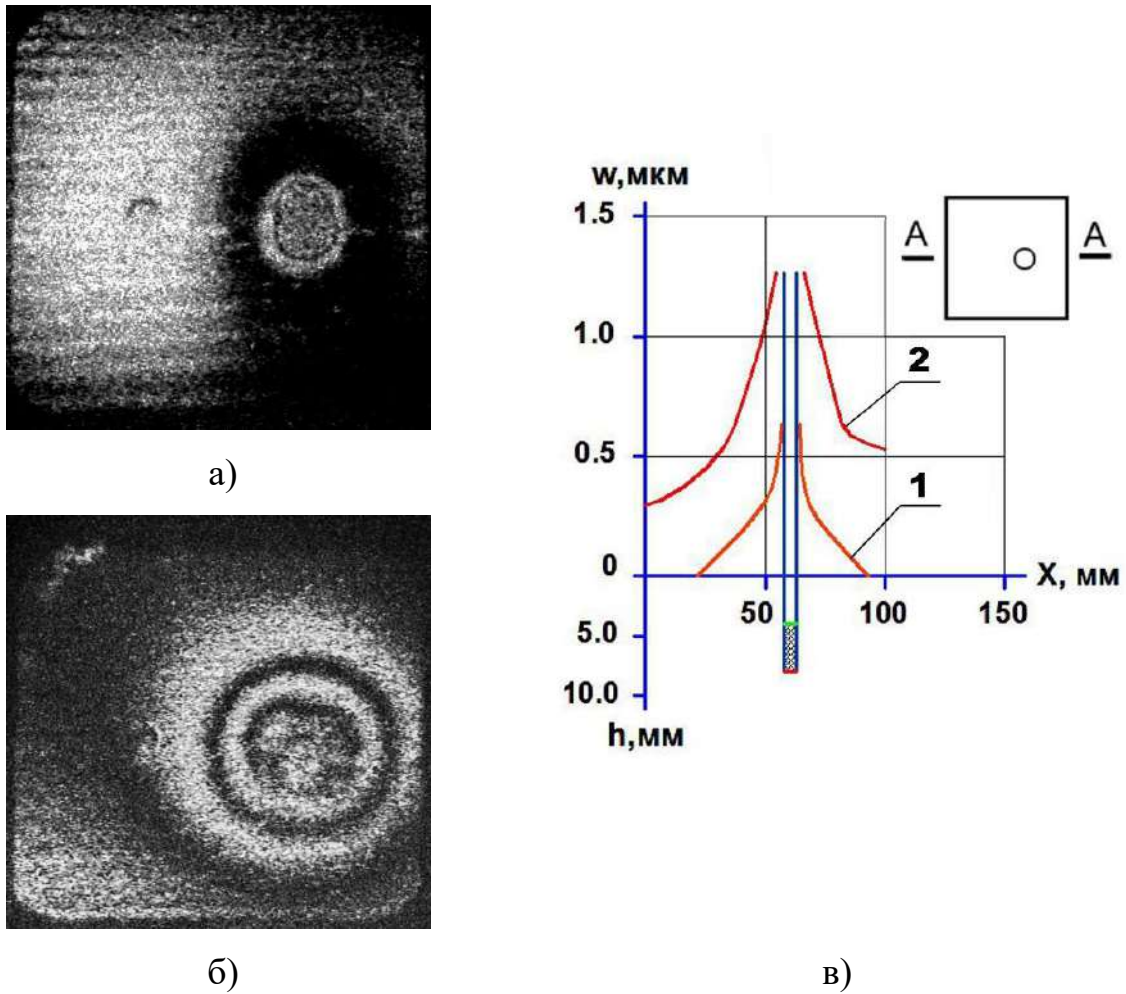


Рисунок 5.19 – Интерферограммы деформирования кромки отверстий в образце оптимального состава под действием собственных напряжений

а – интерферограмма, полученная при высверливании отверстия диаметром $D = 5$ мм с поверхности образца на глубину $h = 4$ мм; б – то же, с глубины $h = 4$ мм до глубины $h = 8$ мм; в) комплексный график перемещений исследуемой поверхности у кромки засверленного отверстия по сечению А-А на глубину $h = 4$ мм (поз. 1) и $h = 8$ мм (поз. 2)

Существенное отличие собственных напряжений в образцах обеих серий состоит в разном характере их распределения по сечению образца: в образце оптимального состава их максимальные значения сосредоточены ближе к поверхности, а в образце производственного состава – в более глубоких слоях, как следует из сравнения интерферограмм на рисунках 5.18а и 5.19а. При этом собственные напряжения с глубиной в образце быстро релаксируют и снижаются по сравнению с поверхност-

ным 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. Такое различие в характере распределения собственных напряжений объясняется влиянием состава композиции, влияющим на разный характер термоупругого состояния образцов при их охлаждении и последующем отверждении в процессе экструзионного изготовления.

Выявленные 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 (см. рисунок 5.11б), а производственного состава – хрупкое взрывное разрушение с фрагментацией на отдельные части (см. рисунок 5.17б).

5.5 Выводы по главе 5

1. Изучение основных физико-механических свойства материала композиционных шпал показало, что материал оптимального состава обладает более высокими показателями по сравнению с материалом производственного состава и ряд важнейших параметров, таких как прочность при изгибе $\sigma_{из}$ и прочность на растяжение при раскалывании R_{pp} для образцов оптимального состава оказался выше соответственно на 20,3% и 17,6% и это различие является статистически значимым.

2. Для оптимального состава показатели энергетических затрат на процессы трещинообразования и развития магистральной трещины оказались 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 уже выше в 2,2 раза. Столь высокое различие затрат энергии на деформирование материала перед магистральной трещиной объясняется высокими энергозатратами на

микротрещинообразование и слияние трещин в более пластичном материале, что подтверждается величиной статического джей-интеграл J_i , являющегося критерием сопротивления развитию трещин при пластическом деформировании материала, который оказался на 20% выше для оптимального состава, что говорит о его преимуществе для получения композиционных шпал.

3. Из физико-технических свойств для образцов оптимального состава величина КЛТР оказалась в 1,6 раз ниже аналогичной величины для образцов производственного состава, что явилось одной из целей выполненной оптимизации состава материала композиционных шпал, и коррелирует с ее расчетной величиной, определенной при решении оптимизационной задачи. Показано, что величина водопоглощения образцов производственного состава в 7,8 раз превышает этот показатель для образцов оптимального состава, что объясняется пониженной в них величиной капиллярной пористости.

4. Разработана новая методика определения сверхмалого водопоглощения, измеряемого в тысячных долях процентов, для материалов высокой плотности, основанной на определении изменения объема образца при его контакте с водой с применением электронной-корреляционной спекл-интерферометрии. С ее использованием установлены показатели водопоглощения по массе W_m образцов оптимального и производственного составов, составивших соответственно 0,0009% и 0,0070%. Такие низкие показатели W_m обеспечивают за счет низкой проницаемости высокие показатели стойкости материалов к воздействию агрессивных сред.

5. Изучение процесса разрушения материала композиционных шпал при сжатии методом лазерной интерферометрии (ЛИ) позволил бесконтактно фиксировать поле деформаций во всех точках поверхности образца в процессе его нагружения. На устройства по изучению развития деформаций образца в процессе его нагружения получены два патента РФ №2672192 РФ от 12.11.2018 и №2710953 РФ от 14.01.20.

6. С использованием разработанных устройств методами ЛИ 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 и более высоким уровне собственных напряжений в образце производственного состава.

7. Разработана оригинальная методика оценки собственных напряжений в материалах, основанная на сопоставлении полей нормальных к поверхности образца перемещений вокруг засверливаемых в них отверстий. При этом методами ЛИ производится измерение поля таких перемещений, что обеспечивает высокую точность, наглядность и достоверность их измерений.

8. С использованием разработанной методики было установлено отличие не только в величине собственных напряжений в образцах обеих серий, но и в разном характере их распределения по сечению образца: в образце оптимального состава их максимальные значения сосредоточены ближе к поверхности, а в образце 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.

9. 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 его применения при изготовлении композиционных шпал.

ГЛАВА 6 ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе 6 представлены результаты исследований, определяющие их инновационную направленность, подтвержденную патентами на технологию изготовления композиционных шпал и их конструкцию, и эффект применения на ж.д. транспорте.

6.1 Экструзионная технология изготовления композиционных шпал

Разработано устройство для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований, представленное на рисунках 6.1-6.3, на которое получен патент патенту РФ №2738498 [172].

Устройство содержит магазин-накопитель 1 армирующих стержней 2 (предпочтительно – бамбуковых), оснащенных на стадии подготовки и калибровки, магнитными втулками-маркерами 3. Электромагнитные замки 4 обеспечивают поступление армирующих (бамбуковых) стержней 2 на ложемент 5 в заданное время при подаче электрического сигнала.

Для упрощения понимания конструкции устройства на рисунке 6.1 показан только один модуль подачи армирующего (бамбукового) стержня в формирующую оснастку (для формирования подрельсового основания).

Перемещение бамбукового стержня 2, установленного на ложементе 5, в зону формирования подрельсового основания, осуществляется штоком-толкателем 7, оснащенный конической позиционирующей головкой 6. Шток-толкатель 7 приводится в движение приводом 8, управляемым микроконтроллером 26 по заданной программе и сигналам датчиков. Для позиционирования армирующего (бамбукового стержня) 2 и предотвращения возможной потери его устойчивости при осевом нагружении штоком-толкателем 7 используется втулка-кондуктор 10. Для ввода армирующего стержня 2 в полость формирующей оснастки 11 со стороны подающего расплав полимера коллектора 12, используется конический канал 9, образованный внутренними поверхностями заслонки-обтюратора 14, термоизолирующей проставки 13 и охлаждаемого-запирающего блока 15.

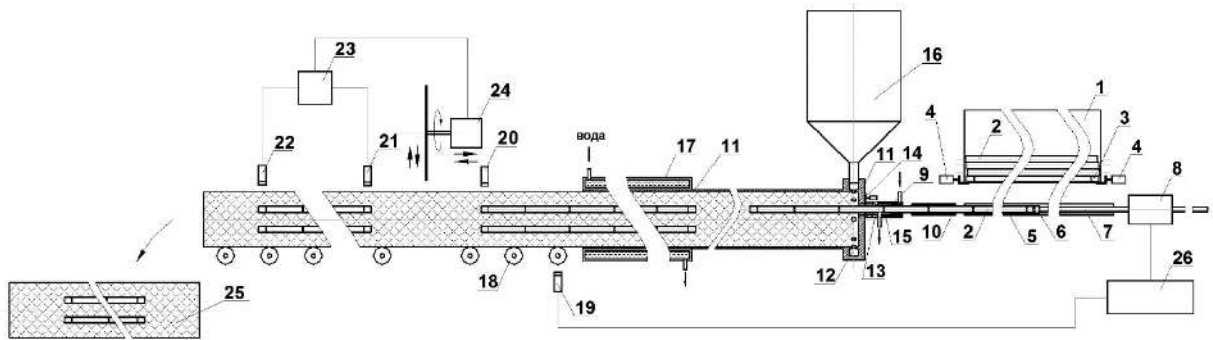


Рисунок 6.1 – Эскиз общего вида устройства для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований

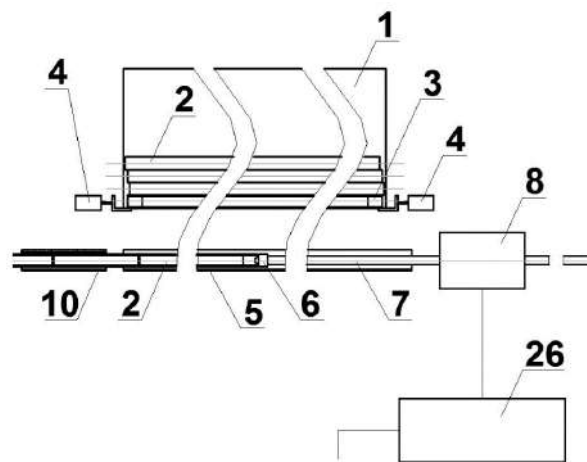


Рисунок 6.2 – Укрупненная схема части входного блока устройства для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований

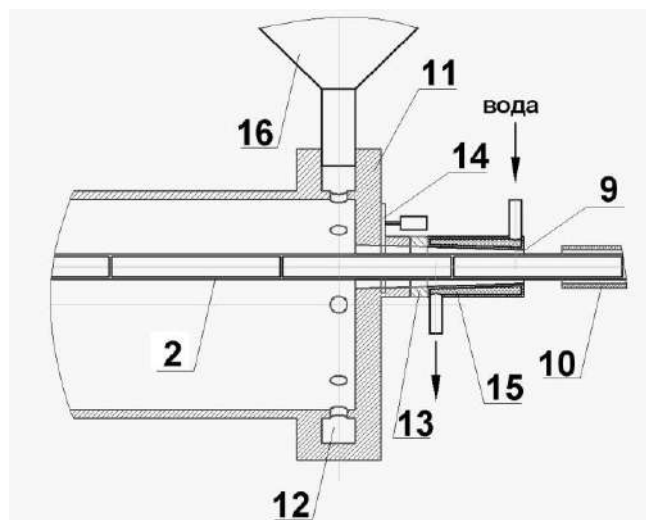


Рисунок 6.3 – Укрупненная схема части входного блока устройства для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований

Заслонка-обтюратор 14 имеет электромеханический привод для запира-ния/отпира-ния отверстия конического канала 9, ведущего в полость формирующей оснастки 11. Заслонка расположена в зоне разогретой части формирующей оснастки, температура которой заведомо выше температуры расплавленной пластической массы, поступающей из экструдера 16 (конструкция экструдера на фигурах не показана) в полость формования через подающий расплав полимера коллектор 12. Термоизолирующая проставка 13 препятствует перетеканию теплового потока от нагретой части формирующей оснастки 11 к охлаждаемому запирающему блоку 15, предназначенному для предотвращения вытекания расплавленной пластической массы в отверстие для подачи армирующего (бамбукового) стержня 2. Запирающий блок 15 выполнен из материала с высокой теплопроводностью, например, из меди, и имеет рубашку охлаждения для непрерывной циркуляции в ней теплоносителя, например, воды. Входное отверстие конического канала 9 формирующей оснастки 11, отверстие обтюратора 14, отверстие теплоизолирующей проставки 13 и внутренняя полость рубашки охлаждения запирающего блока 15 формируют единую коническую поверхность, расширяющуюся в направлении движения армирующего (бамбукового) стержня 2. Внутренние поверхности всех деталей имеют антиадгезионное покрытие, например, из тефлона.

Рубашка охлаждения 17 с проточным теплоносителем, имеющим температуру намного ниже температуры расплавленного пластика, охватывающая часть формирующей оснастки 11, предназначена для охлаждения расплавленного пластика и его постепенной полимеризации при движении от подающего расплав полимера коллектора 12 до выхода из формирующей оснастки 11. В качестве теплоносителя может использоваться, например, вода. Внутренняя поверхность формирующей оснастки имеет антиадгезионное покрытие, а ее поперечное сечение соответствует профилю поперечного сечения изготавливаемого композиционного подрельсового основания (далее по тексту – основания).

На выходе формирующей оснастки 11, сформированный твердотельный пластиковый брус, повторяющий профиль внутреннего поперечного сечения формирующей оснастки 11, поступает на ролики рольганга 18. Датчик скорости

19, установленный, например, на пассивном ролике рольганга, формирует сигнал, поступающий в микроконтроллер 26 для вычисления контроля скорости движения бруса. Датчики положения 20, 21 и 22 реагируют на магнитные втулки-маркеры 3 и предназначены для управления операциями подачи армирующих (бамбуковых) стержней и резки готового бруса на отрезки, соответствующие длине шпалы. Совпадение, например, сигналов датчиков 21 и 22, поступающих в блок управления 23, запускает привод дисковой маятниковой пилы 24, обеспечивающей в процессе движения бруса по рольгангу разделение пластикового бруса на мерные отрезки заданной длины, соответствующей длине основания. Сигнал датчика 20, поступающий на микроконтроллер 26, запускает, например, механизм подачи очередного (бамбукового) армирующего стержня из магазина-накопителя 1. На выходе из рольганга готовое армированное основание 25 поступает на складирование (не показано на фигурах).

В зависимости от типа формируемого основания, в установке выполняется один или несколько конических каналов 9 для подачи армирующих бамбуковых стержней в формирующую оснастку 11 с целью получения основания, имеющего необходимое количество и расположение армирующих элементов.

Устройство работает следующим образом.

При запуске устройства (установки), на выходном сечении формирующей оснастки 11 устанавливается простейшую технологическую поршневую заглушку (на фигурах не показана), обеспечивающую возможность первоначального заполнения внутренней полости формирующей оснастки 11 расплавленной пластиковой массой, поступающей из экструдера 16. Одновременно временная поршневая заглушка обеспечивает дренаж вытесняемого воздуха и иных возможных газообразных продуктов. На этой стадии obtюратор-заслонка 14 перекрывает выход пластиковой массы в отверстие для подачи армирующих стержней. После полного заполнения внутренней полости формирующей оснастки 11 включают подачу теплоносителя через рубашку охлаждения 17. По мере поступления новой пластиковой массы на вход в формирующую оснастку 11 и полимеризации пластиковой массы на выходе, поршневая заглушка вытесняется из внутренней полости

формирующей оснастки 11 сформированным пластиковым брусом. После этого посредством микроконтроллера 26 подают последовательность команд на сброс армирующих (бамбуковых) стержней из магазинов-накопителей 1, перемещение армирующих стержней толкателями 7 посредством приводов 8 до контакта с заслонками-обтюраторами 14. Далее принудительно открывают заслонки-обтюраторы 14 и продолжают перемещение армирующих стержней внутрь формирующей оснастки 11 со скоростью, соответствующей скорости движения пластикового бруса на выходе, определяемой микроконтроллером 26 по сигналам датчика 19. При поступлении армирующего (бамбукового) стержня во входной блок, состоящий из электромеханической заслонки-обтюратора 14, термоизолирующей проставки 13 и запирающего блока 15, расплавленная пластическая масса окружает (бамбуковый) стержень, входит в полость теплоизолирующей проставки 13 и поступает в запирающий блок 15, где, интенсивно охлаждаясь, резко увеличивает свою вязкость. Входное отверстие запирающего блока 15 имеет диаметр, соответствующий верхнему полю допуска на диаметр армирующего (бамбукового) стержня. В малом зазоре пластик с высокой вязкостью (вплоть до уровня полимеризации) препятствует вытеканию расплавленной пластической массы, нагнетаемой экструдером 16.

В то же время, даже затвердевший пластик легко отделяется от стенок входного блока из-за конической геометрии канала 9, имеющего уширение в направлении подачи армирующего элемента, и антиадгезионного покрытия на его поверхности.

По мере движения формируемого бруса, микроконтроллер управляет скоростью подачи армирующих (бамбуковых) стержней 2, закрытием обтюраторов-заслонок 14 и возвратом шток-толкателей 7 в исходное положение. По достижению, например, датчика 20, микроконтроллер 26 подает команду на загрузку очередной партии армирующих (бамбуковых) стержней из магазина-накопителя 1 на ложемент 5 и их перемещение по нему во внутреннюю полость формирующей оснастки 11 со скоростью перемещения в ней пластикового бруса.

При достижении армированного пластикового бруса положения, в котором срабатывают датчики 21 и 22, блок управления 23 запускает привод дисковой маятниковой пилы 24, обеспечивающей разделение пластикового бруса на мерные отрезки, соответствующие длине основания. При этом пила движется как по радиусу реза, так и в горизонтальной плоскости, синхронно с движением армированного бруса.

Готовое основание 25 перемещается рольгангом к месту упаковки и транспортировки (на фигурах не показаны). В дальнейшем цикл экструзии происходит непрерывно с циклической подачей армирующих стержней в заданные временные и пространственные интервалы.

Устройство позволяет изготавливать не только композиционные армированные шпалы, мостовые и переводные брусья, но и строительный брус большой протяженности. Кроме того, в качестве армирующих стержней могут использоваться не только стержни бамбука, но и элементы иной конфигурации из иного материала, например, трубы из кевлара или графена, брус из дерева, профильные трубы из металла или пруты из синтетических материалов.

6.2 Инжекционная технология изготовления композиционных шпал

Разработано устройство для инъекционного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований, представленное на рисунках 6.4-6.6, и на который получен патент патенту РФ №2737711 [173].

Предлагаемое устройство обеспечивает поточное, качественное, безопасное, экологичное и энергоэффективное изготовление композиционных шпал, содержащих закладные крепежные элементы и армированных элементами, строго позиционированными по объему шпалы.

Устройство для изготовления композиционных армированных шпал, например, методом экструзионного литья под давлением, выполнено в виде установки револьверного типа, содержащей горизонтальный барабан с вращающимися пресс-формами. На рисунке 6.4 показан общий вид устройства с частичным разрезом по

вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения. Для уточнения конструкции устройства дан вид с разрезом по поперечному сечению А-А, представленный на рисунке 6.5. Отдельные части устройства показаны укрупнено, как, например, узел подачи армирующих элементов, представленный на рисунке 6.6.

Устройство содержит накопитель армирующих сборок 1. Армирующая сборка 2 изготавливается на подготовительном участке и включает в себя армирующие стержни 3, например, из бамбука или углепластика, позиционирующие элементы 4, обеспечивающие заданное расположение армирующих стержней в процессе литья под давлением и закладные элементы 5, предназначенные, например, для резьбового соединения шпалы и рельса. Армирующая сборка 2 фиксируется в накопителе 1 при помощи электромагнитных замков 6. Для позиционирования армирующей сборки 2 перед подачей в зону прессования используется желоб-кондуктор 7. Перемещение армирующей сборки 2 в зону прессования осуществляется толкателем 8 с приводом 9.

Для крепления элементов устройства используется жесткая рамная конструкция 10 с подшипниковыми узлами 11 и полуосями 12, на которых вращается барабанный узел, образованный силовыми дисками 13 и пресс-формами 14 для литья под давлением. Пресс-формы 14 снабжены рубашками-теплообменниками 15 для охлаждения или прогрева пресс-форм 14. Торцы пресс-форм 14 закрыты силовыми фланцами 16, оснащенными шиберными заслонками 17.

Стержни-фиксаторы 18 предназначены для точного позиционирования закладных элементов 5 армирующей сборки 2 при ее установке в пресс-форму 14. Для перемещения по стержней-фиксаторов 18 используется привод 19.

Рубашки теплообменников 15 оснащены гидроразъемами 20 предназначенными для подачи/слива теплоносителя при стыковке с базовыми гидроразъемами 21, установленными на базовой раме устройства. Для попарного соединения рубашек теплообменника охлаждаемых/нагреваемых пресс-форм 14 используются трубопроводы 22.

Экструдер 23 используется для подачи пластической массы в пресс-форму 14, посредством разъема 24.

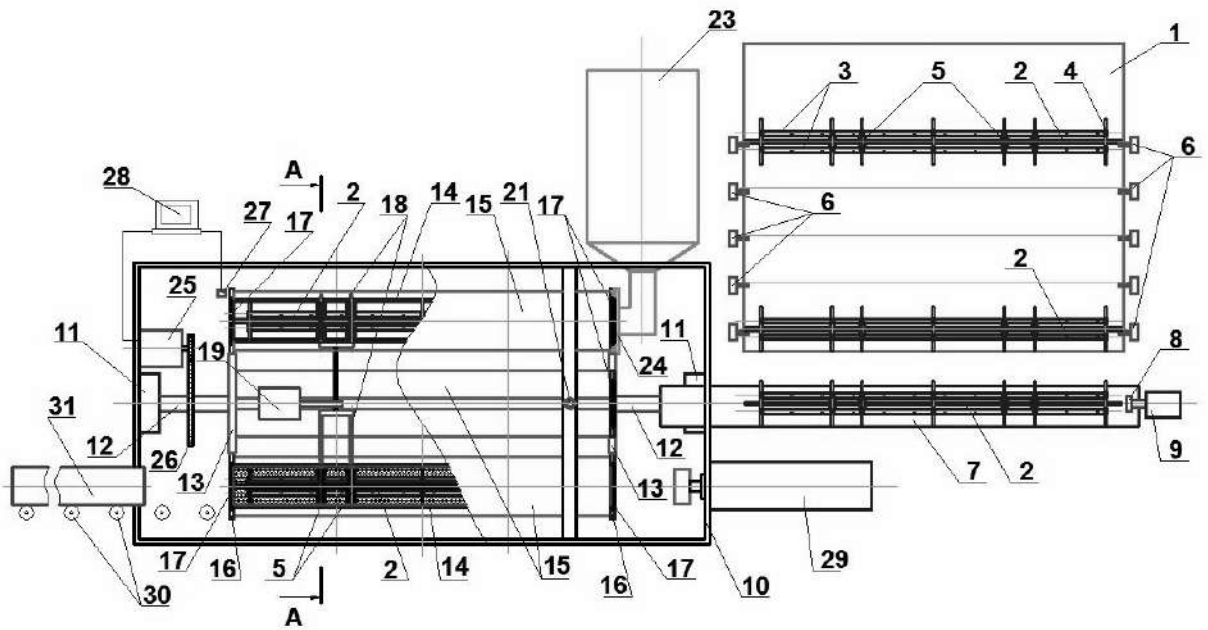


Рисунок 6.4 – Общая схема устройства для изготовления композиционных армированных шпал

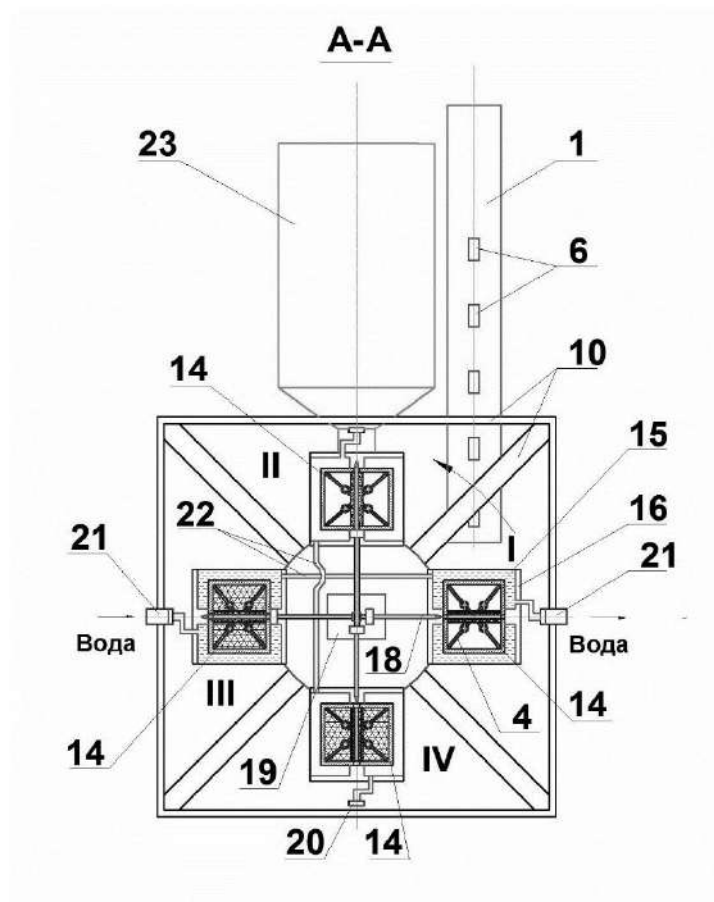


Рисунок 6.5 – Вид с разрезом по сечению А-А со схемы на рисунке 6.4

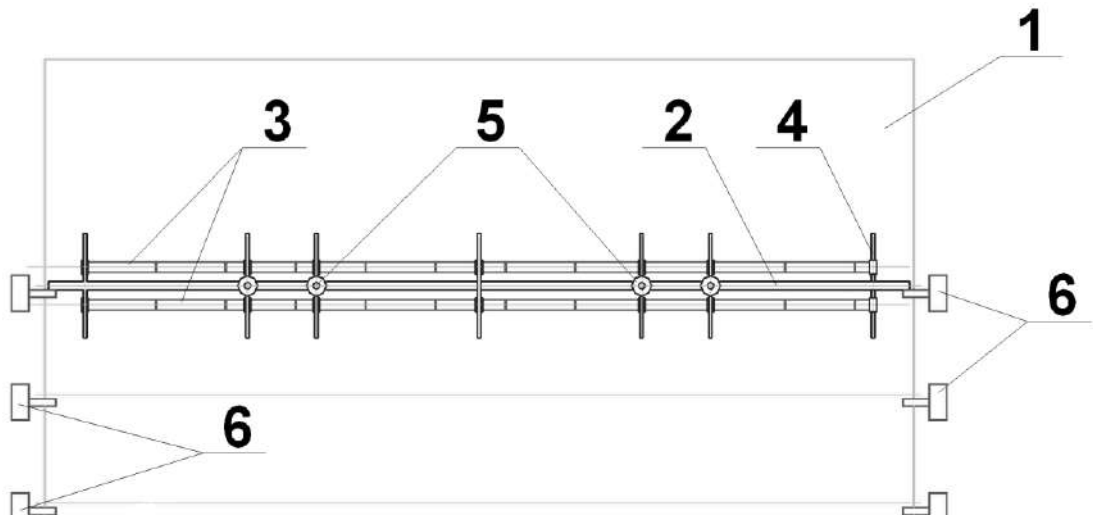


Рисунок 6.6 – Укрупненный фрагмент со схемы на рисунке 6.4

Привод 25, например, шаговый двигатель и механическая передача 26 предназначены для поворота на заданный угол барабанного узла с пресс-формами 14. Позиционирование барабанного узла с пресс-формами 14 осуществляется по сигналам датчика положения 27, сигналы которого передаются на управляющую ЭВМ 28.

Толкатель с приводом 29 служит для извлечения из пресс-формы 14 на рольганг 30 готового изделия 31.

Устройство работает следующим образом. По команде управляющей ЭВМ 28 срабатывают электромагнитные замки 6 удерживающие ближайшую к желоб-кондуктору 7 армирующую сборку 2, расположенную в накопителе 1. Происходит перегрузка армирующей сборки 2 в желоб-кондуктор 7, а в накопителе 1 выполняется последовательное перемещениеборок 2 в позицию, обеспечивающую последующую загрузку в желоб-кондуктор 7. По следующей команде ЭВМ 28, со стороны желоба-кондуктора 7 открывается шиберная заслонка 17 пресс-формы 14 расположенной в позиции I, как показано на рисунке 6.5. После подтверждения открытия шиберной заслонки, например, сигналом концевого датчика, ЭВМ 28 подает команду на привод 9 толкателя 8, осуществляющего перемещение армирующей сборки 2, находящейся в желобе-кондукторе 7, во внутреннюю полость пресс-формы 14. После завершения перемещения сборки 2, толкатель 8 возвращается в исходное состояние, закрывается шиберная заслонка 17 пресс-формы 14

расположенной в позиции I. По команде ЭВМ 28 включается привод вращения 25, который посредством механической передачи 26 проворачивает полуось 12 так, чтобы пресс-форма 14 с установленной армирующей сборкой 2 переместилась в позицию II (см. рисунок 6.5). При этом высокоточное позиционирование обеспечивается сигналом датчика положения 27. Затем ЭВМ 28 выдает команду на привод 19 для перемещения стержней-фиксаторов 18 в положение, обеспечивающее строгое позиционирование закладных элементов 5 сборки 2, находящейся в пресс-форме 14, размещенной в позиции II (см. рисунок 6.5). Разъем 24 фильеры экструдера 23 герметично соединяется с силовым фланцем 16 указанной пресс-формы 14, после чего подается команда на открытие шиберной заслонки 17 и нагнетание пластической массы из экструдера 23 во внутреннюю полость пресс-формы 14. После заполнения внутреннего объема пресс-формы, программа ЭВМ 28 выдает команду на закрытие шиберной заслонки 17 и на привод 25 для поворота полуоси 12 так, чтобы заполненная пресс-форма 14 переместилась в позицию III (см. рисунок 6.5). При этом гидроразъемы 20 рубашки охлаждения соединяются с базовыми гидроразъемами 21 для подачи/отвода теплоносителя, например, воды. При этом поступающий теплоноситель, проходит по рубашке теплообменника 15 пресс-формы 14, установленной в позиции III (см. рисунок 6.5) охлаждает пластическую массу и в нагретом состоянии через трубопровод 22 поступает в рубашку теплообменника 15 пресс-формы 14, установленной в позиции I. Прогрев пресс-формы перед заливкой позволяет улучшить процесс последующего формообразования шпалы.

После перехода пластической массы в твердое состояние, по команде управляющей ЭВМ 28 выполняется поворота полуоси 12 так, что пресс-форма 14 из позиции III переместилась в позицию IV (см. рисунок 6.5). Разъемы 20 и 21 расстыковываются. Привод 19 по команде ЭВМ 28 извлекает стержни-фиксаторы 18 из пресс-формы 14, находящейся в позиции IV, одновременно с этим перемещаются механически связанные стержни-фиксаторы 18 в положение, обеспечивающее строгое позиционирование закладных элементов 5 сборки 2, находящейся в противоположной пресс-форме 14, размещенной в позиции II. После этого от-

крываются обе шибберные заслонки 17 пресс-формы находящейся в позиции IV и толкатель 29 перемещает на рольганг 30 готовое изделие (шпалу) 31.

Использование устройства позволяет изготавливать композиционные армированные шпалы с различными типами армирующих элементов, как на макро, так и на микроуровне. Например, на микроуровне в состав полимерной смеси может быть введена микрофибра, в качестве макроармирующих элементов могут быть использованы стержни из дерева, бамбука, углепластика. Кроме того, устройство позволяет быстро изменять характеристики выпускаемых шпал путем применения элементов армирующих сборок с различными механическими свойствами. Устройство позволяет существенно упростить монтаж и эксплуатацию шпал за счет точного позиционирования закладных элементов крепления в готовом изделии.

6.3 Инновационная конструкция композиционной шпалы

Разработана конструкция композиционных, армированных бамбуковыми стержнями шпал, на которую получены российский РФ №2707435 [174] и китайский №20862218.6 [175] патенты.

Техническим результатом изобретения является регулирование прочности, физико-механических свойств шпалы и повышение ее экологичности, а также в возможности ее простой и дешевой утилизации путем многократной переработки и повторного применения шпалы.

Для достижения вышеуказанного технического результата предложена композиционная шпала, состоящая из матрицы в виде композиционного материала на основе органического связующего, армированной группой бамбуковых элементов, полости которых заполнены цементным раствором.

Органическим связующим матрицы может являться продукт переработки пластиковых бытовых отходов, в частности, поливинилхлорид, дисперсно-армированной органическим, например, бамбуковой щепой и/или волокнами и/или минеральным, например, кварцевым песком, и/или органическим, например, древесной мукой, наполнителем.

Обобщение технических характеристик предлагаемой шпалы:

- в шпалах пластиковые бытовые отходы служат для создания матрицы, дисперсно-армированной, например, бамбуковой щепой/волокном, служащими наполнителем матрицы, стержни бамбука служат в качестве армирующих элементов (арматуры), цементный раствор на безусадочном цементе частично заполняет полости бамбуковых стержней, что усиливает прочность шпалы на изгиб и сопротивление на сжатие стержней бамбука в высоконапряженных зонах шпалы, вследствие чего улучшаются физико-механические свойства композиционной шпалы;

- волокна бамбука имеют многослойную конструкцию, отличную от клеточных стенок волокон древесины и благодаря особой анатомической конструкции и волокнистой структуре, физико-механические свойства бамбука и их волокон выше (по таким показателям, например, как базисная плотность, пористость, коэффициент усушки, предел прочности, модуль упругости, твердость, ударная вязкость, сцепляемость щепы/волокна с матрицей) обычной древесины;

- прочность и вязкость бамбука высокие, обеспечивая его хорошую сочетаемость с полимерной матрицей и высокую трещиностойкость, что обеспечивает запас прочности при механических повреждениях, предотвращая внезапное разрушение несущих элементов в виде бамбука [176];

- предлагаемая композиционная шпала может быть подвергнута переработке и использоваться для получения новой шпалы, при этом процессы её получения, применения и утилизации потребляют мало энергии, не сопровождаются образованием газообразных, жидких и твердых отходов, что позволяет отнести шпалы к экологически безопасной продукции и реализовать на практике принцип устойчивого развития.

Шпала имеет следующие экономические и экологические преимущества:

- в мире потребность в древесине постоянно увеличивается, а запасы лесных ресурсов уменьшаются, что все больше и больше заставляет обратить внимание на бамбук в качестве заменителя традиционно применяемым породам древесины. Развитие предлагаемой шпалы имеет существенный смысл для обширных

стран юго-восточной Азии, которые испытывают острый дефицит в древесине, но имеют богатые недоиспользуемые бамбуковые материалы;

- по сравнению с древесиной бамбук растет быстрее и при рациональной рубке после разовой посадки эти участки могут длительно использоваться, что не только позволяет получать большую массу бамбука с низкой стоимостью, но и способствует сохранению почвы, улучшая экологическую среду;

- искусственные волокна, например, углеродные или асбестовые, небезопасны для человека и животных, а бамбук является экологически безопасным, разлагаемым и возобновляемым материалом, применение которого не окажет на окружающую среду отрицательное воздействие;

- по мере возрастающей добычи нефти пластиковые отходы постоянно и быстро накапливаются, что наносит серьёзный экологический ущерб природе и способствует всеобъемлющему экологическому кризису. Ввиду этого переработка и утилизация этих отходов являются весьма актуальными. В предложенной шпале пластиковые отходы применяются как сырьё, что превращает бытовой мусор в ценное сырьё, предотвращая при этом загрязнение окружающей среды.

На рисунках 4.12 и 4.13 обозначены: 1 – матрица в виде композиционного материала на основе полимерного связующего, армированная группой бамбуковых элементов 2; 2 – бамбуковые элементы; 2а – стенка бамбуковых элементов; 3 – затвердевший цементный раствор; 4 – шурупы, или костыли, или болты; 5 – рельсовая подкладка; 5а – междуузлия бамбуковых элементов; 6 – рельсы.

В предлагаемой конструкции композиционной шпалы в качестве армирующих элементов используются бамбуковые стержни в количестве двух или четырех штук, расположенные симметрично относительно продольной оси шпалы и предназначенные как для повышения несущей способности шпалы, так и обеспечения стабильности ее формы в продольном направлении, нарушаемой поперечной нагрузкой, приводящей к накоплению остаточных деформаций полимерной матрицы, полости в которых для повышения несущей способности шпалы заполнены цементным раствором, например, в местах максимальных изгибающих моментов, возникающих в подрельсовых сечениях и в среднем сечении шпалы при ее

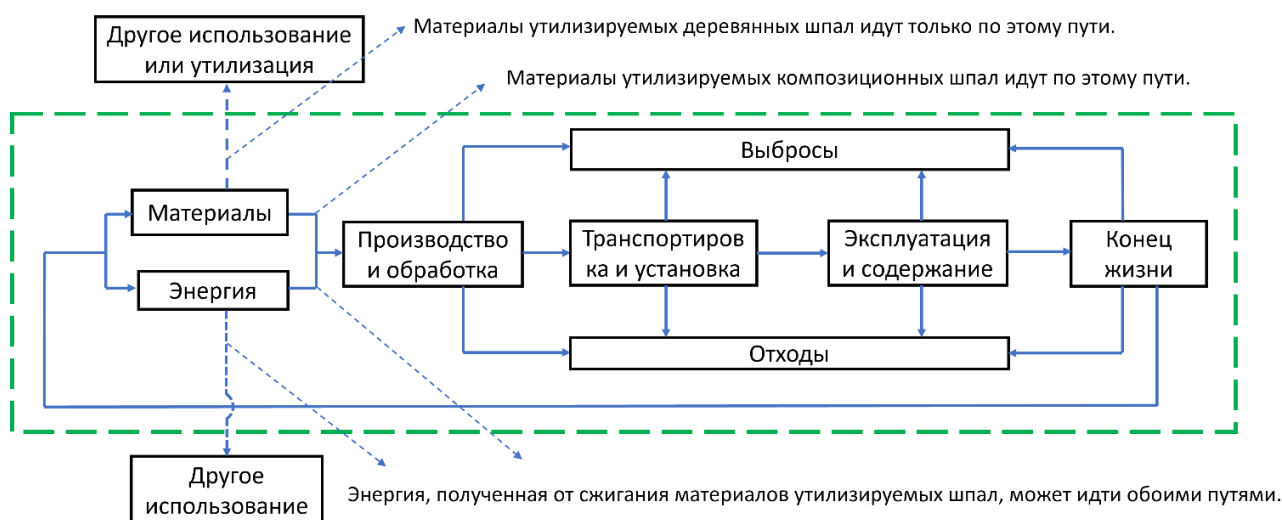
эксплуатации в железнодорожном пути, а в качестве матрицы (полимерной) используется композиционный материал на основе органического связующего (пластика), например, в виде продукта переработки пластиковых бытовых отходов, в частности, поливинилхлорид, дисперсно-армированной органическим, например, бамбуковой щепой и/или волокнами и/или минеральным, например, кварцевым песком, и/или органическим, например, древесной мукой, наполнителем.

6.4 Оценка жизненного цикла композиционных шпал

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) композиционных шпал выполнена по сравнению с деревянной шпалой. Целью исследования является проведение сравнительного анализа воздействия на окружающую среду применения деревянных и предлагаемых композиционных шпал.

Сфера действия ОЖЦ

В первую очередь определена сфера действия ОЖЦ согласно стандартов ISO 14040 (Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework / Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура) и ISO 14044 (Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines / Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации), см. рисунок 6.7 [177, 178].



Примечание: влияние строительства завода ж.д. шпалы исключено из граничного условия.

Рисунок 6.7 – Жизненный цикл ж.д. шпалы и сфера действия ОЖЦ

Функциональные единицы

На втором этапе определены функциональные единицы для ОЖЦ. В данной диссертации выбраны два показателя:

- а) углеродный след (кг CO₂);
- б) общий спрос на энергию (МДж).

Функциональными единицами являются значения двух вышеуказанных показателей, рассчитанных для шпал на 1 км однопутного пути в течение срока службы 50 лет.

Исходные данные

На третьем этапе определены исходные данные для ОЖЦ. В оценке рассматривается конструкция композиционной шпалы, армированной двумя бамбуковыми стержнями с полостями, заполненными цементным камнем (рисунок 6.8).

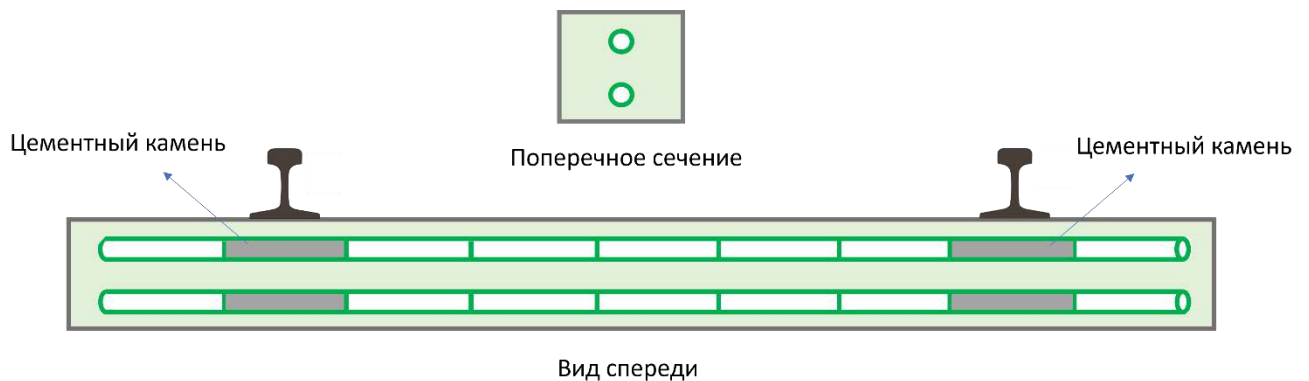


Рисунок 6.8 – Конструкция композиционной шпалы для ОЖЦ

Данные исходного сырья деревянной и композиционной шпал приведены в таблице 6.1 [179]. Поскольку данные общего спроса на энергию креозота отсутствуют, он исключен из расчета. Различные добавки в композитном материале также исключены из расчета из-за недостатка данных, низкого содержания и большой неопределенности концентрации. Предполагается, что отходы бамбуковой стружки имеет те же параметры, что у отходов древесной стружки, отходы затвердевшего цементного камня имеет те же параметры, что у щебня, полученного после дробления бетона (вторичный бетонный заполнитель).

Таблица 6.1 – Материалы деревянных и композиционных шпал [179]

Тип материала	Углеродный след / кг экв. CO ₂	Общий спрос на энергию / МДж	Источник
Сосна, кг	0,24	21,39	Idemat 2022
Креозот, кг	1,93	-	Ecoinvent_EI_V3-7
Вторичный ПВХ, кг	2,44	70,92	Idemat 2022
Бамбук, кг	0,14	19,82	Idemat 2022
Отходы древесной стружки, кг	0,07	11,98	Ecoinvent_EI_V3-7; ICE 2011
Щебень, кг	0,01	0,12	Idemat 2022

Композиционная шпала изготавливается по экструзионной технологии (таблица 6.2 [179]). Для сравнения использованная деревянная шпала получена из сосны (см. таблицу 6.2) и имеет конструкцию прямоугольного параллелепипеда.

Таблица 6.2 – Исходные данные экструзионной технологии [179]

Тип производства	Углеродный след / кг экв. CO ₂	Общий спрос на энергию / МДж	Источник
Экструзия, производственная площадка, кг	0,35	5,42	Idemat 2022

Информация ж.д. пути, уложенного на деревянных и композиционных шпалах, приведена в таблице 6.3. При анализе приняты ежегодные нормы замены 1% композиционных шпал / 5% деревянных шпал при эксплуатации ж.д. пути.

Таблица 6.3 – Информация ж.д. пути с применением деревянных и композиционных шпал [179]

Тип шпалы	Количество (шт/км)	Расчетный срок службы (лет)	Материалы	Масса, кг
Деревянная	1680	15	Древесина	72,3
			Креозот	17,7
Композиционная	1680	50	ПВХ	62,0
			Стержни бамбука	4,2
			Частицы бамбука	26,6
			Цементный камень	0,5

Предполагается, что оба типа шпал транспортируются одинаковым способом и на равное расстояние – 50 км автомобильный транспорт + 150 км ж.д. транспорт. Данные двух способов транспортировки приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Информация двух способов транспорта для перевозки шпал [179]

Тип транспорта	Углеродный след / кг экв. CO ₂	Общий спрос на энергию / МДж	Источник
Грузовик+прицеп 24 тн нетто, ткм	0,0905	1,42	Idemat 2022
Поезд, грузовой, электрический, ткм	0,0102	0,16	Idemat 2022

Композитные шпалы полностью перерабатываются. Композитные материалы и бамбуковые стержни измельчаются и используются в качестве сырья для производства нового композита, цементный камень измельчается и перерабатывается для производства новых аналогичных материалов. Утилизируемые деревянные шпалы служат топливом на теплоэлектростанции, оборудованной средствами улавливания выделяющихся при этом вредных веществ. Данные утилизируемых деревянных и композиционных шпал приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Данные по обработке утилизируемых шпал [179]

Тип обработки отходов	Углеродный след / кг экв. CO ₂	Общий спрос на энергию / МДж	Источник
Переработка ПВХ, кг	0,97	-31,99	Idemat 2022
Древесина твердых пород, бамбук, совместное обжигание на электростанции, кг	0*	-29,98	Idemat 2022
Стружка твердых пород древесины на кг удаляемой сухой массы, кг	0,1659	2,92	Idemat 2022

**Примечание: здесь значение в Idemat 2022 было -1,70, но с учетом того, что это не учитывается факт, что углекислый газ, поглощаемый естественным ростом деревьев, равен углекислому газу, выделяемому при сжигании, поэтому это значение скорректировано до 0.*

Результаты расчета

Воздействие на окружающую среду шпал в ж.д. пути приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Воздействие на окружающую среду
1680 шт. шпал (на 1 км ж.д. пути) на разных этапах ОЖЦ

Этап	Тип шпалы	Углеродный след / кг экв. CO ₂	Общий спрос на энергию / МДж
Производство	Деревянная	87137	2597780
	Композиционная	309921	8876288
Перевозка	Деревянная	915	14354
	Композиционная	950	14898
Эксплуатация	Деревянная	0,0	0,0
	Композиционная	0,0	0,0
Утилизация	Деревянная	0,0	-3638798
	Композиционная	110327	-3180364

По вышеприведенным данным выполнены расчеты воздействия на окружающую среду применения двух типов шпал на 1 км однопутного ж.д. пути в течение 50 лет (конкретные данные см. в таблицах П.9.1 и П 9.2 Приложения 9), обобщенных на рисунках 6.9 и 6.10.

Воздействие на окружающую среду

В соответствии с заданным расчётным сроком эксплуатации композиционных шпал в 50 лет в течение расчетного периода при типовой конструкции деревянной шпалы необходимо выполнить 4 замены шпал (через 15, 30, 45 и 50 лет эксплуатации), а при предлагаемой конструкции композиционной шпалы только одну. Из рисунка 6.9 видно, что, хотя в самом начале углеродный след деревянных шпал (87137 кг экв. CO₂) в 3 раза меньше, чем у композиционных шпал (309921 кг экв. CO₂), но благодаря их высокой долговечности до конца службы ж.д. пути эти показатели почти сравниваются (около 631796 кг экв. CO₂).

Однако рост деревьев требует определенного времени и если в рассматриваемый период новые деревья не успеют вырасти, но концентрация углекислого газа в атмосфере воздуха только повышается, а более высокая его концентрация еще больше усугубляет парниковый эффект [180]. Кроме того, воздействие креозота

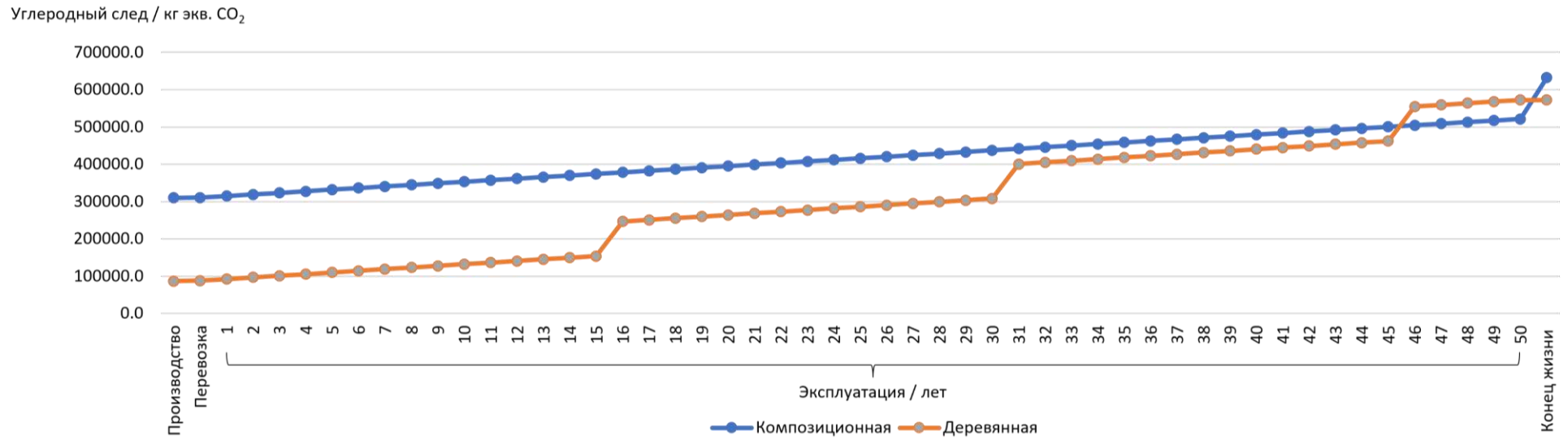


Рисунок 6.9 – Углеродный след применения деревянных и композиционных шпал в течение 50 лет для 1 км ж.д. пути

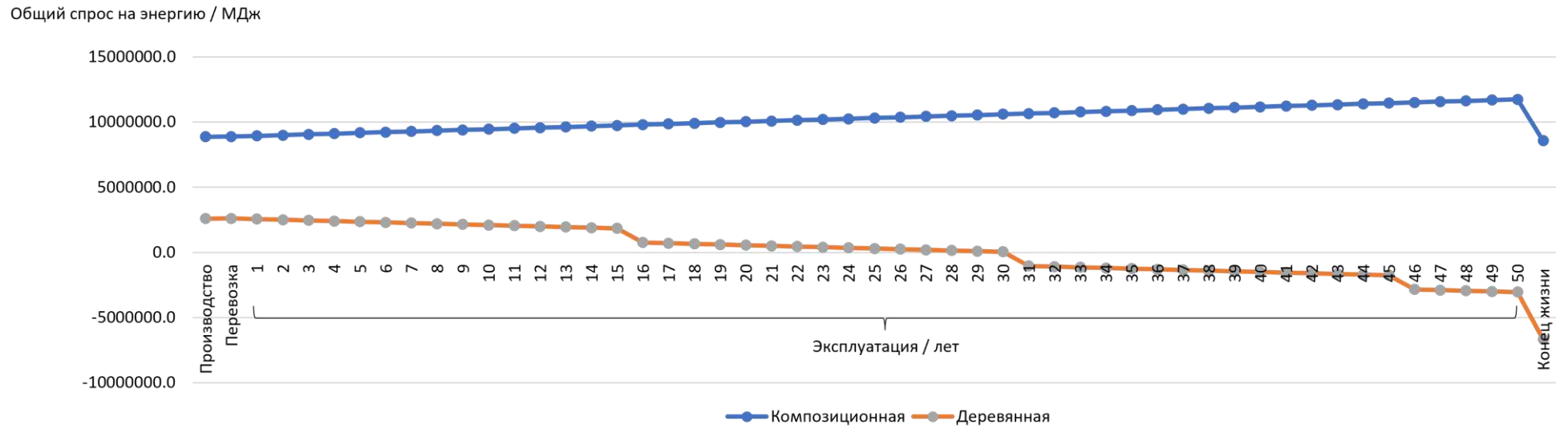


Рисунок 6.10 – Общий спрос на энергию применения деревянных и композиционных шпал в течение 50 лет для 1 км ж.д. пути

в качестве необходимого антисептика для производства деревянных шпал не учитывается из-за нехватки данных. Креозот не только приводит к дополнительным углеродному следу, но и вреду экосистеме, а применение отходов пластмассы сокращает загрязнение окружающей среды. Следовательно, композиционные шпалы имеют достоинства не только в отношении снижения углеродного следа от эксплуатации ж.д. системы, но и снижают загрязнение окружающей среды.

В отношении общего затрата на энергию из рисунка 6.10 видно, что на применение деревянных шпал требуется меньшая энергия, чем композиционных, при этом со временем, их применение не расходует энергию, а предоставляет энергию (до -6673321 МДж), потому что в конце службы жизни деревянные шпалы служат топливом на электростанции. Общий спрос на энергию применения композиционных шпал в течение их службы постепенно повышается, но в конце значение возвращается к начальному значению (8876288 МДж) в связи с повторным их использованием в качестве сырья для производства новых композиционных шпал.

В итоге, применение композиционных шпал является более природосберегающим решением для строительства и эксплуатации ж.д. системы.

6.5 Выводы по главе 6

1. Разработана технологическая схема экструзионного изготовления композиционных шпал, на которую получен патент РФ №2738498 «Устройство для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований». Устройство может быть эффективно применено как на рельсовом транспорте, в том числе для изготовления переводных брусьев различной длины, так и в строительной индустрии, например, для изготовления бруса и балок с заданными характеристиками.

2. Разработана технологическая схема инъекционного изготовления композиционных шпал, на которую получен патент (РФ №2737711 «Устройство для изготовления композиционных армированных шпал»). Устройство может быть эф-

фективно применено для изготовления композиционных шпал для ж.д. пути различного назначения, а также мостового бруса.

3. Разработана инновационная конструкция композиционной шпалы и на неё получен патент (РФ №2707435 «Композиционная шпала» и Китая №20862218.6 «Композиционная шпала, армированная бамбуком»). Предложенная конструкция композиционной шпалы имеет такие преимущества, как повышенные физико-механические свойства шпалы как в целом, так и в зонах наибольших изгибающих моментов, в частности, хороший запас прочности при механических повреждениях, возможность переработки старогодних шпал для получения новых шпал, пониженная стоимость, экологическая безопасность, и пр.

4. Проведенная ОЖЦ композиционных шпал подтверждает конкурентоспособность предлагаемой инновационной конструкции композиционной шпалы относительно деревянных шпал традиционных конструкций в отношении экологичности. Для строительства ж.д. пути и обеспечения его эксплуатации в течение 50 лет на 1 км однопутной линии, углеродный след композиционных шпал составит 631796 кг экв. CO₂, общий спрос на энергию – 8566232 МДж. Результаты исследований прошли успешную апробацию в условиях действующего производства (см. Приложение 10. «Акт опытно-промышленной апробации экструзионной технологии изготовления образцов материала композиционной шпалы»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал перспективность внедрения композиционных (композитных, полимерных, пластиковых) шпал на ж.д. 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 ж.д. транспорте композиционных шпал является высокий коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) 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 КЛТР $\alpha_m \leq 25,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 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 I – 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, КЛТР $\alpha_m = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и массой шпалы $m_s = 124,5$ кг; б) оптимальный состав материала шпал композиции II – 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, КЛТР $\alpha_m = 19,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 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 нанотрубок снижение величины КЛТР модифицированного ПВХ достигает 30%, при этом оптимальная концентрация нанотрубок составляет 1% по массе; методом атомарных инкрементов определены важнейшие свойства модифицированного ПВХ (ван-дер-ваальсовый объем, поверхностная энергия, температура стеклования, КЛТР 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 ж.д. пути.

7. Важнейшие физико-технические свойства разработанного материала композиционных шпал оптимального состава, определяющих их долговременную эксплуатационную способность в ж.д. пути, обладают лучшими показателями, чем материал производственного состава: величина КЛТР 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, основанной на установлении изменения объема образца при его контакте с водой с применением электронной-корреляционной спекл-интерферометрии.

8. Бесконтактное измерение поля деформаций методом лазерной интерферометрии (ЛИ) позволило установить блочный характер разрушения образцов ма-

териала композиционных шпал под нагрузкой, а с применением ЛИ 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 ЛИ 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 ж.д. 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%) величиной КЛТР. Проведенная ОЖЦ 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 ЛИ (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 в высокоскоростных китайских ж.д. 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБС-пластик – акрилонитрилбутадиенстирол-пластик

ВСМ – высокоскоростная магистраль

ВЭ – вычислительный эксперимент

ВЭИП – “Взаимодействие экипажа и пути при пространственных колебаниях подвижного состава”

Ж.д. – железнодорожное

Ж.б. – железобетон

ДПК – древесно-полимерный композит

ЗБШРП – “земляное полотно – балластная призма – шпала – рельс – подвижной состав”

КЛТР – коэффициент линейного температурного расширения

ЛИ – лазерная интерферометрия

ЛВЛ-брус – брус LVL, брус из клеёного шпона

ММ – математическая модель

НПП – научно-производственное предприятие

ОЖЦ – оценка жизненного цикла

ПВД – полиэтилен высокого давления

ПВХ – поливинилхлорид

ПНД – полиэтилен низкого давления

ПП – полипропилен

ПТФЭ –политетрафторэтилен

ПЭ – планирование экспериментов/полиэтилен

ТМА – термомеханический анализ

ТНК – технолого-нормировочные карты

УНТ – углеродная нанотрубка

ФЭП – фторированный этилен-пропилен

ФАМ –фурфууролацетоновая смола

ЭСМ-метод – метод экспериментально-статистического моделирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esveld, C. Modern Railway Track (2nd Edition): monograph. – Delft: MRT productions, 2001. – 740 p.
2. Koike, Y. Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks / Y. Koike, T. Nakamura, K. Hayano, et al. // Soils and Foundations. – 2014. – Vol. 54. – Iss. 3. – Pp. 502-514. ISSN: 0038-0806.
3. International Union of Railways (UIC). SUWOS—Sustainable Wooden Railway Sleepers: report. – Paris: UIC, 2013. - 44 p.
4. Total length of the railway lines in use in the European Union (EU-28) from 1990 to 2017 (in kilometers). - URL: <https://www.statista.com/statistics/451812/length-of-railway-lines-in-use-in-europe-eu-28/> (дата обращения 17.06.2021). - Текст: электронный.
5. Historical Tie Trends. Wood Crosstie Insertions in the US. - URL: <https://www.rta.org/assets/docs/Surveys/class%20insertions%201921%20to%202016.pdf> (дата обращения 02.12.2019). - Текст: электронный.
6. Ets Rothlisberger SA. History and development of the wooden sleeper. - URL: https://www.traverses-chemin-de-fer-bois.ch/files/4/Timber_sleeper_history_and_development.pdf (дата обращения 08.08.2021). - Текст: электронный.
7. Terziev, N. Plant oils as “green” substances for wood protection / N Terziev, D Panov // 4th International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products. Porto. – 2011. – Vol. 1. – Pp. 139-146.
8. Silva, A. Feasibility of creosote treatment for glued-laminated pine-timber railway sleepers / A. Silva, A.C. Martins, A.O. Feio, et al // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2014. – Vol. 27. – Iss. 3. – Pp. 04014134.
9. Manalo, A. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers / A Manalo, T Aravinthan, W Karunasena, et al. // Composite Structures. – 2010. – Vol. 92. – Iss. 3. – Pp. 603-611.
10. Steel Channel Sleeper. - URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/steel-channel-sleeper-10632529062.html> (дата обращения 22.05.2020). - Текст: электронный.

11. History of Steel Sleepers and the Latest Developments. – URL: <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nssmc/pdf/115-11.pdf> (дата обращения 22.05.2020). – Текст: электронный.
12. Hernandez, F. C. R. Rail base corrosion detection and prevention / F. C. R. Hernandez, K. Koch, G. P. Barrera // No. Contractor Final Report. – 2007.
13. Kaewunruen, S. Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact / S. Kaewunruen, A.M. Remennikov // Engineering failure analysis. – 2009. – Vol. 16. – Iss. 3. – Pp. 705–712.
14. Concrete sleepers. - URL: <http://www.railroadpart.com/rail-sleepers/concrete-sleeper.html> (дата обращения 22.05.2021). - Текст: электронный.
15. Oostermeijer, K. H. Review on short pitch rail corrugation studies / K. H. Oostermeijer // Wear. – 2008. – Vol. 265. – Iss. 9. – Pp. 1231-1237.
16. Sahu, S. / Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties / S. Sahu, N. Thaulow // Cement and concrete research. – 2004. – Vol. 34. – Iss. 9. – Pp. 1675-1681.
17. Fournier, B. Evaluation and management of concrete structures affected by alkali-silica reaction – a review / B. Fournier, M. A. Bérubé, M. D. A. Thomas, N. Smaoui, K. J. Folliard // Seventh canmet/acsi international conference on recent advances in concrete technology. Farmington Hills, Michigan. – 2004.
18. Ferdous, W. Review of failures of railway sleepers and its consequences / W. Ferdous, A. Manalo, T. Aravinthan, et al. // Proceedings of the 1st International Conference on Infrastructure Failures and Consequences (ICFC 2014). RMIT University. – 2014. – Vol. 1. – Pp. 398-407.
19. Silva, É.A. Comparison of structural design methods for railway composites and plastic sleepers and bearers / É.A. Silva, D. Pokropski, R. You, et al. // Australian journal of structural engineering. – 2017. – Vol. 18. – Iss. 3. – Pp. 160-177.
20. Кондращенко, В. И. Композиционные подрельсовые основания. Конструкции / В.И. Кондращенко, А.В. Савин, Чж. Ван // Строительные материалы. – 2020. – №10. – С. 52-76.

21. Kondrashchenko, V.I. Model of Concrete Macrostructure. / V.I. Kondrashchenko, G. Jing, E.V. Kondrashchenko, Ch. Wang // Proceedings of the 14th Sino-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies. Beijing: Metallurgical Industry Press. – 2017. – P. 347-354.
22. Кондращенко, В.И. Материалы и конструкции композиционных шпал / В.И. Кондращенко, Чж. 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.
23. Кондращенко, В.И. Оптимизация составов и технологических параметров получения изделий брускового типа методами компьютерного материаловедения: Дис...д-р тех. наук: 05.23.05 / В.И. Кондращенко. – М. МИИТ, 2005. – 551 с.
24. Lampo, R. Recycled Plastic Composite Railroad Crossties / R. Lampo // Construction Innovation Forum US Army ERDC-CERL. – Champaign, IL, USA. – 2002.
25. AXION ECOTRAX(R), Composite Railroad Ties. – URL: <https://axionsi.com/products/ecotrax-railroad/> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
26. АКЦИОН РУС. Композитные шпалы. – URL: <https://axionrus.ru/kompozitnayashpala/> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
27. TieTek composite ties. – URL: <http://www.tietek.net/product.asp> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
28. Railroad tie and method for making same. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20020123553/de> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
29. АпАТЭК – Прикладные перспективные технологии. – URL: <http://www.apatech.ru/beam.html> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
30. IntegriCo. IntegriTies. – URL: <https://www.integrigo.com/integrities> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
31. Clifton, P. Plastic surgery // P. Clifton Rail Professional. – 2009. – P. 26.

32. Network Rail to recycle rubbish into sleepers. – URL: <https://www.theguardian.com/environment/2009/feb/16/rail-recycling-plastic> (дата обращения 08.12.2020). – Текст: электронный.
33. SICUT. Plastic Composite Railway Mainline Sleepers. – URL: <http://www.sicut.co.uk/standard-sleeper-tie/> (дата обращения 12.08.2021). – Текст: электронный.
34. Fraunhofer ICT. Mixed Plastic Waste (MPW) Sleeper. - URL: <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/fdz/projects/susprise/railwaste-production-of-railway-sleepers-by-mixed-plastic-waste.php> (дата обращения 12.08.2021). - Текст: электронный.
35. SUNRUI Plastic composite sleeper. – URL: <http://www.xssunrui.com/kjcp/gdjtfhclcp/09c5362a90d84f98bc97dffdb879f6f3.htm> (дата обращения 09.08.2021). – Текст: электронный.
36. Сунь, Цз. Процесс изготовления пластиковых железнодорожных шпал: пат. 201310396860.7 Китайской Народной Республика / Цз. Сунь, В. Сунь, Я. Сунь; заявитель и патентообладатель Tianjin Yanwen Weiye Plastic Products Co., Ltd. CN103524923A; заявл. 04.09.2013; опубл. 22.01.2014 (на китайском).
37. Xiao, Sh. Analysis of component characteristics of railway sleeper composite materials and its influence on overall performance / Sh. Xiao, Yu. Chen // *Forest Engineering*. – 2007, – Vol. 23. – Iss. 1. – Pp. 85-87.
38. Кондращенко, В.И. Древесностекловолокнистые композиционные шпалы: монография / В.И. Кондращенко, В.И. Харчевников, Т.Н. Стородубцева – М.: Издательство "Спутник+", 2009. – 311 с.
39. Стородубцева, Т.Н. Композиционный материал на основе отходов лесного комплекса для железнодорожных шпал / Т.Н. Стородубцева, Н.В. Федянина // *Современные наукоемкие технологии*. – 2011. – № 5. – С. 49-52.
40. Занегин, Л.А. Способ изготовления литой шпалы для железных дорог широкой колеи [Текст]: патент РФ 2179923: МПК В27М 3/14 / Л.А. Занегин, Н.Ф. Селиванов, Ю.Л. Петров; заявитель и патентообладатель Занегин Л.А. N 2000107941/13; опубл. 30.03.2000.

41. Занегин, Л.А. Способ производства композиционных шпал прокатом [Текст]: патент РФ 2354548: МПК В27М 3/14 / Л.А. Занегин, В.А. Кондратюк, И.В. Воскобойников, Ю.Л. Петров, В.М. Щелоков; заявитель и патентообладатель Занегин Л.А. N 2007139852/12; заявл. 30.10.2007; опубл. 10.05.2009, бюл. № 13.
42. Занегин, Л.А. Составная композиционная шпала [Текст]: патент РФ 2389841: МПК E01B 3/10 / Л.А. Занегин, В.А. Кондратюк, И.В. Воскобойников, Ю.Л. Петров; заявитель и патентообладатель Занегин Л.А. N 2008115478/11; заявл. 27.10.2009; опубл. 23.04.2008, бюл. № 14.
43. Pattamaprom, C. Natural rubber composites for railway sleepers: a feasibility study: master of engineering dissertation / C. Pattamaprom. Bangkok, Thammasat University, 2005. – 350 p.
44. Greenrail. Composite sleeper product. - URL: <http://www.greenrailgroup.com/en/the-product/> (дата обращения 20.08.2021). - Текст: электронный.
45. Tufflex Plastic products (Pty) Ltd. Product Range. - URL: <http://www.tufflex.co.za/Pages/ProductCatalogue2/SubCategoryPage/SubCategoryPage.asp?SubCategoryID=4391> (дата обращения 13.08.2021). – Текст: электронный.
46. Rahul, S. Composite Railway Sleeper / S. Rahul, P. Garish, K. Gaurav, et al. // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2018. – Vol. 5, – Iss. 9. – Pp. 1416-1419. ISSN: 2395-0056.
47. Khalil, A.A. Mechanical Testing of Innovated Composite Polymer Material for using in Manufacture of Railway Sleepers / A.A. Khalil // Journal of Polymers and the Environment. – 2018. – №. 26. – Iss. 1. – Pp. 263-274.
48. Khalil, A.A. Analysis on railway sleepers manufactured from polymers and iron slag / A.A. Khalil, H.M. Bakry, H.S. Riad, et al. // J. of Engineering Sector of Engineering Colleges - Al-Azhar University. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 43. – Pp. 620-639.
49. FRP Composite Sleepers for Application on Rail Tracks and Support Spans. - URL: <http://www.presentica.com/ppt-presentation/frp-composite-sleepers-for-application-on-rail-tracks-and-support-spans> (дата обращения 19.05.2020). - Текст: электронный.

50. Hameed, A.S. Suitability of rubber concrete for railway sleepers / A.S. Hameed, A.P. Shashikala // *Perspectives in Science*. – 2016. – №. 8. – Pp. 32-35.
51. Duratrack® Composite Recycled Plastic Railway Sleepers. – URL: <http://www.integratedrecycling.com.au/railway-sleepers/> (дата обращения 08.08.2021). – Текст: электронный.
52. SEKISUI. FFU® synthetic wood railway sleepers. – URL: https://www.sekisui-rail.com/en/ffu_en.html (дата обращения 08.08.2021). – Текст: электронный.
53. SUNRUI. Synthetic sleeper. – URL: <http://www.xssunrui.com/kjcp/gdjtfhclcp/3a220ba380a146d389f6d531f41932fc.htm> (Date of access 08.08.2021). – Текст: электронный.
54. KEBOS. Fiber Reinforced Foamed Urethane Sleeper. - URL: <http://www.kebos.cn/item/5.html> (дата обращения 08.08.2021). - Текст: электронный.
55. Yu, X. Discussion of reconsolidated bamboo (wood) replacing traditional railway sleeper material/ X. Yu, L. Liu, W.Yu // *Forestry and grassland machinery*. – 2011. – Vol. 22. – Iss. 6. – Pp. 40-43.
56. Ван, Ш. Рекомбинированный бамбуковый шпал для шахтных железных дорог: патент 201220554856.X Китайской Народной Республики / Ш. Ван; заявитель и патентообладатель Zhangping Wanshan Bamboo Industry and Trade Co., Ltd. CN202954271; заявил. 27.10.2012; опубл. 29.05.2013.
57. Лу, Я. Композитная шпала из стекловолокна и способ ее изготовления: пат. 201010017210.3 Китайской Народной Республики / Я. Лу, Г. У, Цз. Цзи, Цз. Чен; заявитель и патентообладатель Jiangsu Jiajing Composite Materials Co., Ltd. CN 101759898 B; заявил. 04.01.2010; опубл. 21.03.2012 (на китайском).
58. Ling, L. Design and application of special-shaped fiberglass track sleeper / L. Ling, Y. Feng, J. Li // *Railway engineering*. – 2012. – №7. – Pp. 112-114.
59. Hoger, D.I. Fibre composite railway sleepers: Phd Dissertation. – University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia, 2000.
60. Lankhorst. Engineered products. Composite sleepers for turnouts & cross-

ings. - URL: <https://www.lankhorstrail.com/en/composite-sleepers> (дата обращения: 12.08.2021). – Текст: электронный.

61. Lankhorst. Engineered products. Recycled plastic sleepers for main track. - URL: <https://www.lankhorstrail.com/en/recycled-plastic-sleepers> (дата обращения: 12.08.2021). – Текст: электронный.

62. Plastic Composite Wood Core Ties. - URL: <http://www.swrvandmarine.com/viewitem.php?id=13&basename=equipment> (дата обращения 08.08.2021). – Текст: электронный.

63. Qiao, P. Modeling and optimal design of composite-reinforced wood rail-road crosstie / P. Qiao, J.F. Davalos, M.G. Zipfel // *Composite Structures*. –1998. –Vol. 41. –Iss. 1. – Pp. 87-96.

64. Ferdous, W. Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams–concrete mix design and application / W. Ferdous, A. Manalo, A. Khennane, et al. // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – №58. – Pp. 1-13.

65. Van Erp, G. A highly sustainable fibre composite building panel. / G. Van Erp, D. Rogers // *Proceedings of the international workshop on fibre composites in civil infrastructure–past, present and future*. Brisbane. – 2008. – Vol. 1. – Pp. 1-2.

66. Ferdous, W. Evaluation of an innovative composite railway sleeper for a narrow-gauge track under static load / W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, et al. // *Journal of Composites for Construction*. – 2017. – Vol. 22. – Iss. 2. – P. 04017050. ISSN: 1090-0268.

67. Ticoalu, A. N. E. Investigation on fibre composite turnout sleepers: master of engineering dissertation / A. N. E. Ticoalu. – Toowoomba, Australia, University of Southern Queensland, 2008.

68. Manalo, A. Behavior of full-scale railway turnout sleepers from glue-laminated fiber composite sandwich structures / A. Manalo, T. Aravinthan // *Journal of composites for construction*. – 2012. – Vol. 16. – Iss. 6. – Pp. 724-736.

69. Van Erp, G. M. A railway sleeper: U.S. Patent Application 14/652,806 / Erp G. M. Van; applicant and patentee Univ Southern Queensland, 2015-11-19. – Текст: электронный.

70. Van Erp, G. Recent Australian developments in fibre composite railway

sleepers / G. Van Erp, M McKay // *Electronic Journal of Structural Engineering*. – 2013. – Vol. 13. – Iss. 1. – Pp. 62-66.

71. Soehardjo, K.A. Utilization of bagasse and coconut fibers waste as fillers of sandwich composite for bridge railway sleepers / K.A. Soehardjo, A. Basuki // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 223. – Pp. 012036.

72. Hu, X. Research on Application of Basalt Fiber in Railway Sleeper / X. Hu, Yu. Xu // *The 12th National Fiber Concrete Academic Conference*. China Civil Engineering Society. – 2009. – Pp. 48-53.

73. Фан, Л. Шпала из полипропиленового фибробетона: патент КНР 1743551 А. / Л. Фан, Ю. Чжоу, И. Чжао, и пр.; заявитель и патентообладатель Пятый железнодорожный изыскательский и проектный институт. N 200510105979.X; заявл. 08.10.2005; опубл. 08.03.2006 (на китайском).

74. Занегин, Л.А. Способ сохранения торца шпалы от растрескивания [Текст]: патент РФ 2328373: МПК В27М 3/14 / Л.А. Занегин; заявитель и патентообладатель Занегин Л.А. N 2006133082/12; заявл. 14.09.2006; опубл. 10.07.2008, бюл. № 19.

75. Ahn, S. Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system / S. Ahn, S. Kwon, Y.T. Hwang, et al. // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 223. – P. 110944.

76. Koh, T. Field evaluation and durability analysis of an eco-friendly prestressed concrete sleeper / T. Koh, S Hwang // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 27. – Iss. 7. – P. B4014009.

77. Shokrieh, M.M. On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials / M.M. Shokrieh, M Rahmat // *Composite structures*. – 2006. – Vol. 76. – Iss. 4. – Pp. 326-337.

78. Ritchie, H. Plastic Pollution / H. Ritchie, M. Roser - 2019– URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>' (дата обращения 19.08.2021). – Текст: электронный.

79. Our planet is drowning in plastic pollution—it's time for change! - URL:

<https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/ru/> (дата обращения 19.08.2021). – Текст: электронный.

80. Shuang, Zh. Optimization of Clean Production Process for Polyethylene Glycol Synthesis: Master Dissertation. – University of Heilongjiang, Harbin, China, 2016, – 87 с. (на китайском)

81. Мороз, П.А. Применение вторичных полимеров для производства древесно-полимерных композитов / П.А. Мороз, А.А. Аскадский, Т.А. Мацеевич, Е.В. Соловьева, А.А. Аскадский // Пластические массы. – 2017. – №9-10. – С. 56-62.

82. Описание и марки полимеров — АБС-пластик. - URL: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/8.html&viewinfo=2> (дата обращения 11.08.2021). - Текст: электронный.

83. Maya, M.G. Mechanical properties of short sisal fibre reinforced phenol formaldehyde eco-friendly composites / M.G. Maya, S.C. George, T. Jose, et al. // Polymers from Renewable Resources. – 2017. – Vol. 8. – Iss. 1. – Pp. 27-42.

84. Tuner, P.S. Thermal Expansion Stresses in Reinforced Plastic / P.S. Tuner // NBS. – 1946. – № 37. – P. 239.

85. James, E.M. Physical properties of polymers handbook (2nd Edition): monograph / E.M. James. – New York: Springer, 2007. – 1038 p.

86. Крыжановский, В.К. Технические свойства полимерных материалов: справочник (2-е изд.) / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, и т.д. – СПб.: Профессия, 2011. – 240 с.

87. Mera, F. A. T. Plantation management and bamboo resource economics in China / F. A. T. Mera, C. Xu // Ciencia y Tecnología. – 2014. – №1. – Pp. 1-12.

88. Xiao, Y. Modern Engineered Bamboo Structures: Proceedings of the Third International Conference on Modern Bamboo Structures (ICBS 2018) / Y. Xiao, Z. Li, & K. W. Liu: Beijing, China, CRC Press, 2019. – 246 с.

89. Li, Q. Experimental Research on Recombination Bamboo Timber Made from Small-sized Sundry Bamboo Timber / Q. Li, K. Wang, etc.// Journal of Bamboo Research. – 2002. – №3. – Pp. 33-35.

90. Yu. W. Development of bamboo-fiber based composites / W. Yu // China

Wood Industry. – 2011. – Vol. 25. – Iss. 1. – Pp. 6-8.

91. Fu, J. Chinese moso bamboo: its importance / J. Fu // Bamboo. – 2001. – №5. – С. 5-7.

92. В Москве начали использовать шпалы из одноразовой посуды и бутылок. - URL: <http://naydem-vam.ru/viewtopic.php?id=25361> (дата обращения 22.05.2021). – Текст: электронный.

93. Hunan Taohuajiang Bamboo Technology Co.,Ltd. - URL: <http://www.chinathj.com/> (дата обращения 21.05.2021). - Текст: электронный.

94. Zhong, Y. Bending properties evaluation of newly designed reinforced bamboo scrimber composite beams / Y Zhong, G Wu, H Ren, et al. // Construction and Building Materials. – 2017. – №143. – Pp. 61-70.

95. Kaewunruen, S. Composites for timber-replacement bearers in railway switches and crossings / S Kaewunruen, R You, M Ishida // Infrastructures. – 2017. – №4. – P. 13.

96. 光 亜 式 鉄 枕 木 (Koa Iron Crosstie). - URL: <http://www.koakensetsu.com/makuragi.htm> (дата обращения 22.05.2021). - Текст: электронный.

97. Jing, G. Development and Application of Smart Railway Sleepers / G. Jing, W. Du, Ch. Wang, X. Huang // Journal of Railway Science and Engineering. – 2020. – Vol. 48. – Pp. 56-59. (In Chinese).

98. Zhao, J. Development and Application of Composite Wooden Pillow and Gauge Adjustable Fastener / J. Zhao // Railway Investigation and Surveying. – 2016. – №4. – Pp. 95-97. (In Chinese).

99. Jing, G. Ballast Bed Structure and Cross Section Dimension Determination of Malaysia East Coast Rail Line / G. Jing, Ch. Wang, Weifan WU // Journal of Railway Engineering Society. – 2018. – Vol. 7. – pp. 7-10. (In Chinese).

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

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

102. Wang, Ch. Technical Analysis of Chinese and Russian High-speed Ballast Bed-references for 350 km/h HSR Design / Ch. Wang, G. Jing, L. Qie, L. Yao // Railway Standard Design. – 2017. – Vol. 61. – 61. – pp. 20-23 (In Chinese).

103. Bian, X. Cyclic and postcyclic triaxial testing of ballast and subballast / X. Bian, J. Jiang, W. Jin, et al // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2016. – №7. – P. 04016032.

104. Экспериментальный завод композитных материалов. Технологии производства композитных материалов. - URL: <http://ezkm.ru/tehnologii-proizvodstva-kompozitnyix-materialov> (дата обращения 13.08.2021). – Текст: электронный.

105. Кондратюк, В.А. Исследование и разработка технологии получения композиционных железнодорожных шпал / В.А. Кондратюк, В.Н. Петров, И.В. Воскобойников // Лесной вестник. – 2012. – № 8. – С. 141-145.

106. Занегин, Л.А. Способ формирования композиционной шпалы [Текст]: патент РФ 2384399: МПК В27М 3/14 / Л.А. Занегин, В.А. Кондратюк, И.В. Воскобойников, Ю.Л. Петров, В.В. Жгун; заявитель и патентообладатель Занегин Л.А. N 2008128495/12; заявил. 15.07.2008; опубл. 20.03.2010, бюл. № 8.

107. Панов, Ю.Т. Современные методы переработки полимерных материалов. Экструзия. Литье под давлением: учебное пособие / Ю.Т. Панов, Л.А. Чижова, Е.В. Ермолаева / – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – 144 с.

108. Extrusion of polymers. - URL: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=extrusion_of_polymers (дата обращения 20.08.2021). - Текст: электронный.

109. Чижова, Л. А. Экструзия полимеров и литье под давлением: учебное пособие / Л.А. Чижова, Е.В. Ермолаева, Ю.Т. Панов // – М.: Юрайт, 2020. – 131 с.

110. Раувендааль, К., Экструзия полимеров (перевод с англ.): монография / К. Раувенда-аль; под ред. А. Я. Малкина. // СПб.: Профессия, 2010. – 768 с.
111. Ferdous, W. Behaviour of polymer filled composites for novel polymer railway sleepers / W. Ferdous, A. Manalo, C. Salih, P. Yu, R. Abousnina, P. Schubel // *Polymers*. – 2021. – № 8. – Pp. 1-13.
112. Pultrusion Applications using composite materials. – URL: <https://pultrex.com/pultrusion-applications/> (дата обращения 20.08.2021). – Текст: электронный.
113. The pultrusion process: manufacturing fiber reinforced polymers. – URL: <https://www.craftechind.com/the-pultrusion-process-manufacturing-fiber-reinforced-polymers/> (дата обращения 20.08.2021). – Текст: электронный.
114. Способы переработки полимеров. Часть 2. Литье под давлением. – URL: <https://polymernagrev.ru/nagrev-v-proizvodstve/sposoby-pererabotki-polimerov-chast-2-lite-pod-davleniem/> (дата обращения 20.08.2021). – Текст: электронный.
115. Оствальд, Т.А. Литье пластмасс под давлением: монография / Т. А. Оствальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэман; под. ред. Э. Л. Калинчева. – СПб.: Профессия, 2005, 712 с.
116. Попов, Е.А. Железнодорожные шпалы из полимерных композиционных материалов, как один из способов утилизации пластиковых ТБО / Е.А. Попов, С.С. Вайсера // Сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 172-177.
117. Bian, X. Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities / X Bian, H Jiang, C Chang, et al. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – №76. – Pp. 29-43.
118. Wolf, H E. Flexural analysis of prestressed concrete monoblock sleepers for heavy-haul applications: methodologies and sensitivity to support conditions / H E Wolf, J R Edwards, M S Dersch, et al. // *Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference*. – 2015. – TRB 15-2924.

119. Ferdous, W. Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies—review of current practice / W Ferdous, A Manalo // *Engineering Failure Analysis*. – 2014. – №44. – Pp. 17-35.
120. Chen, M. C. Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack / M. C. Chen, K. Wang, L. Xie // *Engineering Failure Analysis*. –2013. –№27. –Pp. 272-285.
121. Lebreton, L. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal / L. Lebreton, A. Andrady // *Palgrave Communications*. – 2019. – №1. –P. 6.
122. Ferdous, W. Composite railway sleepers—Recent developments, challenges and future prospects / W Ferdous, A Manalo, G Van Erp, et al. // *Composite Structures*. – 2015. – №134. – Pp. 158-168.
123. Инструкция по содержанию деревянных шпал, переводных и мостовых брусьев железных дорог колеи 1520 мм ЦП-410 / Утверждена Заместителем Министра путей сообщения В. Т. Семеновым 11.12.96 г.
124. Инструкция по ведению шпального хозяйства с железобетонными шпалами / Утверждена распоряжением ОАО "РЖД" от 12.02.2014 г. N 380р.
125. Lampo, R. Summary of current state of practice for composite crossties / R. Lampo // *International crosstie and fastening system symposium*. Urbana, IL(USA): University of Illinois. – 2014.
126. Leonardo, S. S. The Plastic Composite Ties in Brazil. / S. S. Leonardo // *Challenges and Solutions in large scale installation*. – 2014.
127. Zhao, Zh. Experimental study on temperature adaptability of composite sleeper ballast track / Zh. Zhao, Z. Liu, W. Jiang, etc. // *Journal of Railway Science and Engineering*. – 2019. – №3. – С. 605-609. ISSN: 1672-7029. (на китайском)
128. Geyer, R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law // *Science advances*. – 2017. – Vol. 3. – Iss. 7. – P. e1700782.
129. Jambeck, J.R. Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, et al. // *Science*. – 2015. – №6223. – Pp. 768-771.
130. Вечная проблема: Россия тонет в пластике. Об этом сообщили «Газете.Ру» в Минпромторге. - URL:

https://finance.rambler.ru/economics/42436515/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink (дата обращения 19.08.2021). – Текст: электронный.

131. Combrinck, R. Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading / R. Combrinck, W. P. Boshoff // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – №97. – С. 300-311.

132. Li, X. Research progress in polyvinyl chloride production process and related composite materials / X. Li, X. Hui, H. Liu, et al. // *Petrochemical Industry Application*. – 2018. – №4. – С. 1-5.

133. Забродин, В.П. Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций: учебное пособие / В.П. Забродин, А.А. Серегин, М.В. Суханова, А.Б. Портакоев. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. – 107 с.

134. Усилители мобильные измерительные Spider 8, Spider 8-30. - URL: <http://td-str.ru/file.aspx?id=2969> (дата обращения: 03.06.2020). – Текст: электронный.

135. Ansell, M. P. High integrity joints for sisal-epoxy composites / M.P. Ansell, C. Gonzalez Murillo, M. Fagan, M. Thomson // *Conference proceedings of natural fibre*. London. – 14-16 December 2009.

136. Yao, W. Flexural behavior of bamboo–fiber-reinforced mortar laminates / W. Yao, Z. Li // *Cement and concrete research*. – 2003. – №1. – С. 15-19.

137. Поливинилхлорид (ПВХ): основные свойства, область применения. – URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/38/> (дата обращения: 11.08.2021). – Текст: электронный.

138. ПВХ композиции: составы и приготовление. – URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/152> (дата обращения: 05.10.2020).

139. Островский, Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций: монография / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев. – Москва: Наука, 1988. – 248с.

140. Александров, Е.Б. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники / Е.Б. Александров, А.М. Бонч-Бруевич // Журнал технической физики. – 1967. – №2. – С. 360-369.
141. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия (пер. с англ.): монография / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
142. Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справ. изд. / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др.; под. ред. В.В. Налимова. – М.: Металлургия, 1982. – 751 с.
143. Зедгенидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем: монография / И.Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
144. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений (изд. 3-е, испр. и доп.): монография / А.Н. Зайдель. – М.: Наука, 1968. – 99 с.
145. Мюллер, П. Таблицы математической статистики: справочное издание / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Штурм. – Москва: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
146. Коган, А.Я., Левинзон М.П., Войтов И.О. и др. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава. Описание программы // Инф. бюллетень ВНИЦентр ГОСФАП, 1985, № 4/67.
147. Желнин, Г.Г., Каменский В.Б., Лысюк В.С. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. № ЦПТ-52/14. – М.: МПС РФ, 2000. – 38 с.
148. Лященко, В.Н. Длинные рельсы и бесстыковой путь: учеб. пособие / В. Н. Лященко, канд. техн. наук доц.; МПС - СССР. – Харьков: Харьк. ин-т инженеров ж.-д. транспорта им. С. М. Кирова., 1961. – 111 с.
149. Боровиков, А.М. Справочник по древесине: справочное издание / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев.; под ред. Б.Н. Уголева. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
150. Кондращенко, В. И. Композиционные подрельсовые основания. Материалы / В.И. Кондращенко, Чжуан Ван. // Строительные материалы. – 2020. – № 1-2. – С. 95-111.

151. Sokolova, Yu.A. Optimization of the structures material based on the integrated approach / Yu.A. Sokolova, V.I. Kondrashchenko, Chuang WANG, S.P. Titov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 456. – p. 012127.
152. Кондращенко, В.И. Оптимизация составов материала строительных конструкций / В.И. Кондращенко, А.Ю. Гусева, В.Д. Кудрявцева, Чжуан ВАН, Е.В. Кондращенко, А.В. Ерохина // Сборник конференции инновационной технологии в архитектурном дизайне. – 2017. – С. 305-313.
153. Аскадский, А.А. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень: монография / А.А. Аскадский, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
154. Аскадский, А.А. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования: учебное издание / А.А. Аскадский, М.Н. Попова, В.И. Кондращенко. – М.: Издательство АСВ, 2015. – 408 с.
155. Askadskii, A.A. Computational Materials Science of Polymers: monograph / A.A. Askadskii. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2003. – 695 p.
156. Аскадский, А.А. Возможности предсказания коэффициента термического расширения материалов на основе поливинилхлорида / А.А. Аскадский, Чжуан ВАН, Е.А. Курская, В.И. Кондращенко, Т.В. Жданова, Т.А. Мацевич // Строительные материалы. – 2019. – № 11. – С. 57-65.
157. Wang, Ch. Prediction of the coefficient of thermal expansion of building materials based on polyvinyl chloride / Ch. Wang, V.I. Kondrashchenko, A.V. Matseevich // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1425. – p. 012094.
158. Bicerano, J. Prediction of polymer properties (3rd Edition): monograph / J. Bicerano. – Boca Raton, CRC Press, 2002. – 784 p.
159. Аскадский, А.А. Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров / А.А. Аскадский, Чжуан ВАН, В.И. Кондращенко, Т.В. Жданова, Т.А. Мацевич // Строительные материалы. – 2020. – №7. – С. 60-66.
160. Matseevich, T.A. Prediction of the modulus of elasticity of building materials based on wood-polymer composites / T.A. Matseevich, T.V. Zhdanova, Chuang

WANG, V.I. Kondrashchenko, A.A. Askadskii // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869. – p. 032009.

161. Mandelkern, L. Crystallization of Polymers: Volume 1, Equilibrium Concepts / L. Mandelkern. – Cambridge, Cambridge University Press, 2002. – 591 p.

162. Кондращенко, В.И. Оптимизация свойств материала композиционной шпалы / В.И. Кондращенко, Чжуан Ван // Сборник статей XV международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – 2018. – С. 222-224.

163. Ван, Чж. Полимерный композит для изготовления шпал. / Чж Ван // Сборник XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов". – 2018 – Pp. 86-92.

164. Wei, W. The effect of shaping on the radial compressive load of small diameter bamboo / W. Wei, Y. Yang // Forestry and Grassland Machinery. – 2010. – №6. – С. 15-18. (на китайском).

165. Zhang, D. Study on Mechanical Properties of Moso Bamboo Round Bamboo / D. Zhang, G. Wang, W. Zhang, etc. // Journal of Central South University of Forestry & Technology. – 2012. – №7. – С. 119-123. (на китайском).

166. Полиэтилен: свойства, области применения и структура потребления. – URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/42> (дата обращения: 12052021). – Текст: электронный.

167. Расчетные сопротивления и модули упругости для различных строительных материалов. – URL: <http://doctorlom.com/item171.html>. (дата обращения: 18072021). – Текст: электронный.

168. Kondrashchenko, V.I. Wood-Polymer Composite for the Manufacture of Sleepers / V.I. Kondrashchenko, Guoqing JING, Chuang WANG // Materials Science Forum. Trans Tech Publications. – 2019. – Vol. 945. – pp. 509-514.

169. Кесарийский, А.Г. Исследование разрушения древесно-полимерного композита методами голографической интерферометрии. / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, Г. Цзин, Чж. Ван // Сборник четвертой междисциплинарной

научной форумы с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». – 2018. – С. 678-681.

170. Кесарийский, А.Г. Устройство для определения физико-механических характеристик строительных материалов: пат. 2672192 Рос. Федерация: МПК G 01 В 11/16, G 01 N 3/02, G 01 В 21/02 / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, А.В. Кендюк, А.А Казаков, Е.В. Тарарушкин, Чжуан ВАН, С.П. Титов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)" РУТ (МИИТ). N 2017146259; заявл. 27.12.2017; опубл. 12.11.2018, бюл. № 32.

171. Кесарийский, А.Г. Устройство для определения физико-механических характеристик строительных материалов: патент РФ 2710953: МПК G 01 В 11/16, G 01 N 3/08, G 01 N 21/88 / А.Г. Кесарийский, В.И. Кондращенко, Ихэ ЧЖАН, Чжуан ВАН, Сяофэн ЛИ, К.О. Мурадян, С.П. Титов, М.Д. Шутин; заявитель и патентообладатель Кондращенко В.И. N 2019121002; заявл. 05.07.2019; опубл. 14.01.2020, бюл. №2.

172. Кондращенко, В. И. Устройство для экструзионного изготовления композиционных армированных подрельсовых оснований: патент РФ 2738498: МПК E 01 В 3/46, В 29 С 48/025, В 29 С 48/16 / В.И. Кондращенко, А.Г. А.Г. Кесарийский, Чжуан ВАН, Хуань ВАН, Гоцин ЦЗИН; заявитель и патентообладатель Кондращенко В.И. N 2020116831; заявл. 22.05.2020; опубл. 14.12.2020, бюл. № 35.

173. 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, Чжуан Ван, Гоцин Цзин, Пейман АЛЕА. N 2020117213; заявл. 26.05.2020; Опубликовано 02.12.2020 Бюл. № 34.

174. Кондращенко, В. И. Композиционная шпала: патент РФ 2707435: МПК E 01 В 3/46, E 01 В 3/44 / В.И. Кондращенко, А.А. Аскадский, Ал.А. Аскадский, П.А. Мороз, Чжуан ВАН, Гоцин ЦЗИН; заявитель и патентообладатель Кондращенко В.И. N 2019105718; заявл. 28.02.2019; опубл. 26.11.2019, бюл. № 33.

175. Ван, Чж. Композиционная шпала, армированная бамбуком: пат. 20862218.6 Китайской Народной Республика. / Чж. Ван, Г. Цзин, В.И. Кондра-

щенко, Л. Цзун, Ц. Чжоу, В. Лу; заявитель и патентообладатель Пекинский транспортный университет. CN210315076U; заявл. 10.06.2019; опубл. 14.04.2020 (на китайском).

176. Xian, X. Fracture behaviour of bamboo / X. Xian, D. Xian // Chinese Journal of Materials Research. – 1991. – №4. – С. 336-341 (на китайском).

177. ISO 14040: 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ИСО 14040: Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура). (на английском)

178. ISO 14044: 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ИСО 14044: 2006 Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации). (на английском)

179. Sustainability Impact Metrics. Download of databases for Simapro and OpenLCA / Показатели воздействия на устойчивость. Загрузка баз данных для Simapro и OpenLCA. <https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/download-of-databases/> (дата обращения 20.05.2022). – Текст: электронный.

180. Sizirici, B. A review of carbon footprint reduction in construction industry, from design to operation / B Sizirici, Y Fseha, C S Cho, et al. // Materials. – 2021. – № 14. – P. 6094.

СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ МАО-БАМБУКА

В таблицах П1.1-П1.9 даны первичные результаты измерений статистических показателей свойств образцов Мао-бамбука (см. Приложение 1), приведенные в примечаниях к таблицам в виде среднего арифметического значения, стандартного отклонения, коэффициента вариации и доверительного интервала с вероятностью 0,95.

Таблица П1.1 – Первичные данные для определения влажности образца

Показатели	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Масса образца исходной влажности m_1 , г	1,694	1,604	1,576	1,616	1,572	1,579
Масса образца в абсолютном сухом состоянии m_0 , г	1,489	1,412	1,387	1,406	1,379	1,391
Влажность образца ω , %	13,8	13,6	13,6	14,9	14,0	13,5

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_\omega = 0,522\%$, среднее арифметическое значение – $\bar{\omega} = 13,9\%$, коэффициент вариации – $V_\omega = 3,8\%$, доверительный интервал, в %, – (13,48, 14,32).

Таблица П1.2 – Первичные данные для определения плотности образца

Показатели	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Влажность образцов $\omega = 13,9\%$						
Длина образца a_ω , мм	19,71	20,64	19,49	19,95	21,08	20,86
Ширина образца b_ω , мм	16,73	16,81	15,47	15,39	17,71	16,14
Толщина образца c_ω , мм	6,35	6,34	5,67	5,89	6,42	5,64
Масса образца m_ω , г	1,793	1,905	1,585	1,602	2,064	1,727
Объем образца V_ω , мм ³	2094	2200	1710	1808	2397	1899
Плотность образца ρ_ω , кг/м ³	862	870	931	890	858	916
Влажность образцов $\omega = 0\%$						
Длина образца a_0 , мм	19,49	20,51	19,39	19,71	20,96	20,72
Ширина образца b_0 , мм	16,52	16,43	14,87	15,17	17,12	15,65
Толщина образца c_0 , мм	5,91	5,88	5,45	5,64	5,77	5,51
Масса образца m_0 , г	1,58	1,679	1,394	1,407	1,812	1,521
Объем образца V_0 , мм ³	1903	1981	1571	1686	2070	1787
Плотность образца ρ_0 , кг/м ³	830	847	887	834	875	851
Коэффициент объемной усушки образца K , отн. ед.	0,72	0,80	0,64	0,52	1,14	0,45

Примечание: а) при влажности образцов 13,9% стандартное отклонение составляет $S_{\rho_{\omega}} = 30,123 \text{ кг/м}^3$, среднее арифметическое значение $-\bar{\rho}_{\omega} = 887,83 \text{ кг/м}^3$, коэффициент вариации $-V_{\rho_{\omega}} = 3,4\%$, доверительный интервал, в кг/м^3 , – (863,73, 911,94); б) при влажности образцов 0% стандартное отклонение составляет $S_{\rho_{\omega}} = 22,645 \text{ кг/м}^3$, среднее арифметическое значение $-\bar{\rho}_{\omega} = 854,00 \text{ кг/м}^3$, коэффициент вариации $-V_{\rho_{\omega}} = 2,6\%$, доверительный интервал, в кг/м^3 , – (835,88, 872,12).

Таблица П1.3 – Первичные данные для определения прочности вдоль волокон на сжатие

Номер образца	Размеры образца, мм		Площадь сечения $b \times t$, мм ²	Нагрузка при разрушении P_{\max} , Н	Прочность вдоль волокон на сжатие, МПа,	
	ширина h	толщина t			при испытании	при 12 % влажности
1	2	3	4	5	6	7
1	14,58	6,36	92,73	8430	90,91	95,45
2	14,55	6,40	93,12	9730	104,49	109,71
3	15,22	6,39	97,26	9430	96,96	101,81
4	14,46	6,61	95,58	8530	89,24	93,70
5	14,75	6,51	96,02	9040	94,14	98,85
6	14,98	6,66	99,69	7990	80,15	84,16

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{f_{c,\omega}} = 8,147 \text{ МПа}$, среднее арифметическое значение $-\bar{f}_{c,\omega} = 92,65 \text{ МПа}$, коэффициент вариации $-V_{f_{c,\omega}} = 8,8\%$, доверительный интервал, в МПа, – (86,13, 99,17).

Таблица П1.4 – Первичные данные для определения прочности на растяжение

Номер образца	Размеры образца, мм		Нагрузка при растяжении, Н	Прочность на растяжение, МПа	
	толщина t	ширина b		при испытании	при 12% влажности
1	5,32	7,57	7989	198,4	192,8
2	5,09	8,85	9279	206,0	200,2
3	5,57	8,60	10268	214,4	208,4
4	5,22	8,85	9341	202,2	196,5
5	5,36	8,00	8487	197,9	192,4
6	5,61	8,76	12772	259,9	252,6

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{f_{t,\omega}} = 23,699 \text{ МПа}$, среднее арифметическое значение $-\bar{f}_{t,\omega} = 213,13 \text{ МПа}$, коэффициент вариации $-V_{f_{t,\omega}} = 11,1\%$, доверительный интервал, в МПа, – (194,17, 232,10).

Таблица П1.5 – Первичные данные для определения прочности на изгиб

Номер образца	Размер, мм				Нагрузка $R_{max}, Н$	Прочность на изгиб, МПа	
	толщина t	высота h				при испытании	при 12% влажности
		внешняя	внутренняя	средняя			
1	6,09	15,00	14,59	14,80	1942	218,4	220,4
2	5,02	15,64	15,65	15,65	1786	217,9	219,9
3	5,79	15,22	14,94	15,08	2061	234,8	236,9
4	5,68	15,55	15,08	15,32	2221	249,9	252,1
5	6,76	17,10	16,26	16,68	2505	199,8	201,6
6	5,75	15,43	14,84	15,14	1943	221,1	223,1

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{f_{m,\omega}} = 17,025$ МПа, среднее арифметическое значение $\bar{f}_{m,\omega} = 223,65$ МПа, коэффициент вариации $V_{f_{m,\omega}} = 7,6\%$, доверительный интервал, в МПа, – (210,03, 237,27).

Таблица П1.6 – Первичные данные для определения модуля упругости при изгибе

№ образца	Размеры образца, мм				Прогиб $\delta_m, мм$	Модуль упругости при изгибе $E \cdot 10^{-3}, МПа$	
	высота h			толщина t		при испытании	при 12% влажности
	внешн.	внутр.	средн.				
1	15,72	15,51	15,62	4,98	0,102	18,60	18,89
2	16,57	16,71	16,64	5,06	0,102	15,14	15,38
3	15,38	15,16	15,27	5,17	0,148	13,21	13,42
4	16,06	15,25	15,65	5,18	0,108	16,79	17,06
5	15,31	15,33	15,32	4,97	0,148	13,61	13,83
6	15,48	14,99	15,24	4,87	0,102	20,48	20,80

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{E_{m,\omega}} = 2,868 \cdot 10^3$ МПа, среднее арифметическое значение $\bar{E}_{m,\omega} = 16,305 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент вариации $V_{E_{m,\omega}} = 17,6\%$, доверительный интервал, в МПа, – ($14,01 \cdot 10^3$, $18,60 \cdot 10^3$).

Таблица П1.7 – Первичные данные для определения модуля упругости вдоль волокон при сжатии

№ образца	Размер образца, мм				Относительные деформации образца $\epsilon, мкм/м$	Модуль упругости на сжатие $E \cdot 10^{-3}, МПа$	
	ширина b	толщина t				при испытании	при 12% влажности
		внутр.	внеш.	сред.			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	14,43	5,76	5,63	5,70	43463	39,2	39,7
2	16,29	6,34	6,22	6,28	44361	30,8	31,2

Окончание таблицы П7.1

1	2	3	4	5	6	7	8
3	13,89	5,63	5,67	5,65	48133	37,1	37,5
4	15,48	6,42	5,98	6,20	28377	49,6	50,3
5	15,49	6,18	6,12	6,15	40051	36,7	37,2
6	15,34	6,29	6,43	6,36	39871	36,0	36,5

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{E_{c,\omega}} = 6,229 \cdot 10^3$ МПа, среднее арифметическое значение – $\overline{E_{c,\omega}} = 38,233 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент вариации – $V_{E_{c,\omega}} = 16,3\%$, доверительный интервал, в МПа, – $(33,25 \cdot 10^3; 43,22 \cdot 10^3)$.

Таблица П1.8 – Первичные данные для определения модуля упругости на растяжение

Номер образца	Число циклов	Относительные деформации, мкм/м			Средние значения относительных деформаций ε , мкм/м
		при нижнем уровне напряжений, 10 МПа	при верхнем уровне напряжений, 40 МПа	приращение относительных деформаций	
1	4	403,4	1475,7	1072,3	1074,1
	5	400,0	1474,0	1074,1	
	6	400,0	1475,7	1075,8	
2	4	239,6	1224,0	984,4	984,4
	5	244,8	1225,8	981,0	
	6	241,4	1227,5	986,1	
3	4	320,7	1380,9	1060,3	1058,5
	5	327,6	1379,2	1051,6	
	6	318,9	1380,9	1062,0	
4	4	431,0	1737,8	1306,8	1298,2
	5	441,3	1734,3	1293,0	
	6	441,3	1737,8	1296,4	
5	4	162,1	984,4	822,3	824,1
	5	174,1	999,9	825,8	
	6	162,1	984,4	822,3	
6	4	393,1	1008,5	615,5	631,0
	5	403,4	1060,3	656,8	
	6	450,0	1070,6	620,6	

Таблица П1.9 – Данные испытаний бамбука по определению модуля упругости при растяжении

№обр.	Размер образцов, мм				Отн. деформации образца, мкм/м	Модуль упругости при растяжении $E \cdot 10^{-3}$, МПа	
	Шир. b	Толщина t, мм				При испытании	При 12% влажности
		Внутр.	Внешн.	Средн.			
1	5,15	9,62	9,18	9,40	1074,1	23,1	23,4
2	5,23	8,84	8,82	8,83	984,4	26,4	26,7
3	4,98	9,25	9,23	9,24	1058,5	24,6	25,0
4	5,64	7,66	7,59	7,63	1298,2	21,5	21,8
5	5,45	9,23	9,30	9,26	824,1	28,9	29,2
6	5,70	9,02	8,87	8,94	631,0	37,3	37,8

Примечание: стандартное отклонение составляет $S_{E_{t,\omega}} = 5,679 \cdot 10^3$ МПа, средние арифметическое значение – $\overline{E_{t,\omega}} = 26,967 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент вариации – $V_{E_{t,\omega}} = 21,1\%$, доверительный интервал, в МПа, – $(22,42 \cdot 10^3; 31,51 \cdot 10^3)$.

МАТРИЦА ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА

Таблица П2.1 – Матрица ПЭ для построения математических моделей функций отклика Y в системе ЗБШРП [1]

Номер опыта	Значение варьируемых факторов в кодированном масштабе x_i					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	1
8	-1	1	1	1	1	1
9	1	-1	1	1	1	1
10	1	1	-1	1	1	1
11	1	1	1	-1	1	1
12	1	1	1	1	-1	1
13	1	1	1	1	1	-1
14	1	1	-1	-1	-1	-1
15	1	-1	1	-1	-1	-1
16	1	-1	-1	1	-1	-1
17	1	-1	-1	-1	1	-1
18	1	-1	-1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	-1	1
20	-1	-1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	-1	1	-1	1
22	-1	-1	-1	-1	1	1
23	-1	1	-1	-1	1	-1
24	-1	-1	1	-1	1	-1
25	-1	-1	-1	1	1	-1
26	-1	1	-1	1	-1	-1
27	-1	1	1	-1	-1	-1
28	-1	-1	1	1	-1	-1
29	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
30	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0

Окончание таблицы П2.1

1	2	3	4	5	6	7
32	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0
33	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
36	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
37	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
38	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5	0,5
39	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5	0,5
40	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5	0,5
41	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-0,5
42	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
43	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5
44	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5
45	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5
46	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5
47	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5
48	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5
49	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5
50	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5
51	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,5
52	-0,5	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5
53	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5
54	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-0,5	-0,5
55	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5	-0,5
56	-0,5	-0,5	0,5	0,5	-0,5	-0,5

Таблица П2.2 – Симплекс-решетчатый ПЭ для получения моделей третьего порядка для моделирования свойств материала композиционной шпалы [1]

Номер опыта	ПЭ в псевдокомпонентах z			ПЭ в кодированных переменных x		
	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3
1	1	0	0	0,7	0	0,3
2	0	1	0	0	0,7	0,3
3	0	0	1	0	0	1
4	0,334	0,666	0	0,234	0,466	0,3
5	0,334	0	0,666	0,234	0	0,766
6	0	0,334	0,666	0	0,234	0,766
7	0,666	0,334	0	0,466	0,234	0,3
8	0,666	0	0,334	0,466	0	0,534
9	0	0,666	0,334	0	0,466	0,534
10	0,333	0,333	0,334	0,233	0,233	0,534
K_1	0,5	0,5	0	0,35	0,35	0,3
K_2	0,5	0	0,5	0,35	0	0,65
K_3	0	0,5	0,5	0	0,35	0,65

Примечание: K_1 - K_3 – контрольные опыты.

Таблица П2.3 – Матрица ПЭ для построения математических моделей для анализа изгибной жесткости в кодированном масштабе x [1]

Номер опыта	Значение варьируемого фактора в кодированном масштабе x				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	1	1	1	1	1
2	-1	-1	1	1	1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	1	-1	1	1
6	1	-1	-1	1	1
7	1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	1	-1	-1
9	-1	1	1	1	-1
10	1	-1	1	1	-1
11	1	1	-1	-1	1
12	-1	-1	-1	-1	1
13	-1	1	1	-1	1
14	1	-1	1	-1	1
15	1	1	-1	1	-1
16	-1	-1	-1	1	-1
17	1	0	0	0	0
18	-1	0	0	0	0
19	0	1	0	0	0
20	0	-1	0	0	0
21	0	0	1	0	0
22	0	0	-1	0	0
23	0	0	0	1	0
24	0	0	0	-1	0
25	0	0	0	0	1
26	0	0	0	0	-1
27	0	0	0	0	0
K_1	0	0,5	0,75	-0,5	0,25
K_2	-0,75	0,25	-0,5	0,5	0
K_3	-0,25	0	0,5	1	0,75

Таблица П2.4 – Матрица ПЭ для построения математических моделей функций для анализа изгибной жесткости в натуральном масштабе X [1]

Номер опыта	Значение варьируемого фактора в натуральном масштабе X				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	14,1	36,0	30	150	50
2	8,4	0,4	30	150	50
3	8,4	36,0	10	130	30
4	14,1	0,4	10	130	30
5	8,4	36,0	10	150	50
6	14,1	0,4	10	150	50
7	14,1	36,0	30	130	30
8	8,4	0,4	30	130	30
9	8,4	36,0	30	150	30
10	14,1	0,4	30	150	30
11	14,1	36,0	10	130	50
12	8,4	0,4	10	130	50
13	8,4	36,0	30	130	50
14	14,1	0,4	30	130	50
15	14,1	36,0	10	150	30
16	8,4	0,4	10	150	30
17	14,1	18,2	20	140	40
18	8,4	18,2	20	140	40
19	11,25	36,0	20	140	40
20	11,25	0,4	20	140	40
21	11,25	18,2	30	140	40
22	11,25	18,2	10	140	40
23	11,25	18,2	20	150	40
24	11,25	18,2	20	130	40
25	11,25	18,2	20	140	50
26	11,25	18,2	20	140	30
27	11,25	18,2	20	140	40
K_1	11,25	44,9	27,5	135	42,5
K_2	9,11	42,5	135	44,9	11,25
K_3	10,54	11,25	44,9	50	27,5

Литература к приложению 2

1. Карамышева Ф.Н. Методические рекомендации по планированию эксперимента в технологии стройматериалов (Планы II порядка на "кубе" размерности 2 и 3). / Ф.Н. Карамышева, А.Н. Жучкова. – Челябинск: УралНИИСтромпроект, 1973. – 41 с. – Текст : непосредственный.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ШПАЛ НА ПУТЬ И ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

Таблица ПЗ.1 – Результаты вычислительного эксперимента по движению локомотива ВЛ 80 в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч

Номер опыта	Значение функции отклика									
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	$Y_7 \cdot 10^2$	Y_8	Y_9	Y_{10}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	110,5	0,301	0,268	2,84	0,163	0,055	1,15	2,27	192,30	-231,30
2	111,1	0,229	0,196	3,18	0,124	0,041	1,15	2,27	203,40	-226,40
3	111,1	0,229	0,197	3,32	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-226,40
4	111,1	0,229	0,196	3,18	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-225,10
5	115,5	0,193	0,166	3,47	0,111	0,036	1,15	2,27	215,20	-229,90
6	111,1	0,229	0,196	3,18	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-224,60
7	111,1	0,229	0,187	3,10	0,119	0,041	1,15	2,27	203,40	-226,40
8	115,5	0,193	0,159	3,56	0,109	0,035	1,15	2,27	215,20	-227,30
9	115,5	0,193	0,157	3,22	0,105	0,034	1,15	2,27	215,20	-227,30
10	115,5	0,193	0,159	3,56	0,107	0,035	1,15	2,27	215,20	-230,70
11	110,5	0,301	0,245	3,01	0,149	0,051	1,15	2,27	192,30	-224,50
12	115,5	0,193	0,159	3,56	0,107	0,035	1,15	2,27	215,20	-230,40
13	115,5	0,193	0,169	3,65	0,112	0,038	1,15	2,27	215,20	-227,30
14	110,5	0,301	0,269	3,04	0,159	0,053	1,15	2,27	192,30	-231,30
15	110,5	0,301	0,268	2,84	0,159	0,053	1,15	2,27	192,30	-227,80
16	115,5	0,193	0,168	3,43	0,111	0,036	1,15	2,27	215,20	-233,30
17	110,5	0,301	0,268	2,84	0,159	0,053	1,15	2,27	192,30	-228,00
18	110,5	0,301	0,244	2,67	0,148	0,050	1,15	2,27	192,30	-231,30
19	110,5	0,301	0,245	3,01	0,154	0,052	1,15	2,27	192,30	-231,30
20	110,5	0,301	0,244	2,67	0,154	0,052	1,15	2,27	192,30	-227,80
21	115,5	0,193	0,157	3,22	0,108	0,035	1,15	2,27	215,20	-233,30
22	110,5	0,301	0,244	2,67	0,154	0,052	1,15	2,27	192,30	-228,00
23	110,5	0,301	0,269	3,04	0,164	0,055	1,15	2,27	192,30	-228,00
24	110,5	0,301	0,268	2,84	0,163	0,055	1,15	2,27	192,30	-224,50
25	115,5	0,193	0,168	3,43	0,114	0,038	1,15	2,27	215,20	-230,70
26	115,5	0,193	0,169	3,65	0,115	0,038	1,15	2,27	215,20	-233,30
27	110,5	0,301	0,269	3,04	0,164	0,055	1,15	2,27	192,30	-227,80
28	115,5	0,193	0,168	3,43	0,114	0,038	1,15	2,27	215,20	-230,40
29	111,4	0,260	0,227	3,07	0,143	0,048	1,15	2,27	200,40	-229,00
30	111,1	0,229	0,196	3,18	0,124	0,041	1,15	2,27	203,40	-226,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
31	111,1	0,229	0,196	3,24	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-226,40
32	111,1	0,229	0,196	3,18	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-225,80
33	113,8	0,207	0,180	3,37	0,118	0,039	1,15	2,27	210,30	-228,40
34	111,1	0,229	0,196	3,18	0,125	0,042	1,15	2,27	203,40	-225,30
35	111,1	0,229	0,189	3,13	0,124	0,041	1,15	2,27	203,40	-226,40
36	113,8	0,207	0,179	3,41	0,117	0,038	1,15	2,27	210,30	-227,10
37	113,8	0,207	0,179	3,26	0,115	0,038	1,15	2,27	210,30	-227,10
38	113,8	0,207	0,179	3,41	0,116	0,038	1,15	2,27	210,30	-228,50
39	111,4	0,260	0,220	3,12	0,137	0,046	1,15	2,27	200,40	-225,60
40	113,8	0,207	0,179	3,41	0,116	0,038	1,15	2,27	210,30	-228,90
41	113,8	0,207	0,182	3,46	0,119	0,040	1,15	2,27	210,30	-227,10
42	111,4	0,260	0,228	3,18	0,141	0,047	1,15	2,27	200,40	-229,00
43	111,4	0,260	0,227	3,07	0,141	0,047	1,15	2,27	200,40	-227,50
44	113,8	0,207	0,181	3,35	0,119	0,040	1,15	2,27	210,30	-230,30
45	111,4	0,260	0,227	3,07	0,141	0,047	1,15	2,27	200,40	-227,10
46	111,4	0,260	0,219	2,99	0,137	0,045	1,15	2,27	200,40	-229,00
47	111,4	0,260	0,220	3,12	0,139	0,047	1,15	2,27	200,40	-229,00
48	111,4	0,260	0,219	2,99	0,139	0,047	1,15	2,27	200,40	-227,50
49	113,8	0,207	0,179	3,26	0,117	0,038	1,15	2,27	210,30	-230,30
50	111,4	0,260	0,219	2,99	0,139	0,047	1,15	2,27	200,40	-227,10
51	111,4	0,260	0,228	3,18	0,143	0,048	1,15	2,27	200,40	-227,10
52	111,4	0,260	0,227	3,07	0,143	0,048	1,15	2,27	200,40	-225,60
53	113,8	0,207	0,181	3,35	0,120	0,040	1,15	2,27	210,30	-228,50
54	113,8	0,207	0,182	3,46	0,121	0,040	1,15	2,27	210,30	-230,30
55	111,4	0,260	0,228	3,18	0,143	0,048	1,15	2,27	200,40	-227,50
56	113,8	0,207	0,181	3,35	0,120	0,040	1,15	2,27	210,30	-228,90

Примечания. 1. Приведены максимальные значения функций отклика Y с вероятностью 0,994. 2. Значения функций отклика Y даны в натуральных единицах, принятых в 1-й версии программного комплекса "ВЭИП" ВНИИЖТа. 3. Используются следующие обозначения функций отклика: Y_1 - осевые напряжения в подошве рельса, МПа; Y_2 - вертикальный погиб рельса, см; Y_3 - вертикальный прогиб шпалы, см; Y_4 - вертикальное ускорение шпалы в долях от g , отн. ед.; Y_5 - напряжение в балласте, МПа; Y_6 - напряжение в основной площадке земляного полотна, МПа; Y_7 - сжатие рессорного комплекта 1-й ступени подвешивания, м; Y_8 - вертикальное ускорение центров масс колесных дисков в долях от g , отн. ед.; Y_9 - вертикальная сила на рельс, кН; Y_{10} - напряжение во внутренней выкружке головки рельса, МПа. 4. Значения функций отклика даны для внешней (левой) рельсовой нитки.

ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Таблица П4.1 – Коэффициенты математических моделей функций отклика Y

Функ- ция	Прохождение локомотива в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч					
	b0	b1	b2	b3	b4	b5
Y_1	111,909	-0,037	-0,037	-0,037	2,452	-0,037
Y_2	0,22898	0	0	0	-0,05379	0
Y_3	0,197018	-0,000058	0,000677	-0,000058	-0,046377	-0,000058
Y_4	3,2198	-0,0017	0,1327	-0,0017	0,2842	-0,0017
Y_5	0,12649	-0,0019	0,00036	-0,00014	-0,02286	-0,00014
Y_6	0,042188	-0,000657	0,000185	0,00005	-0,008242	0,00005
Y_9	204,899	-0,067	-0,067	-0,067	11,07	-0,067
Y_{10}	-226,976	0,033	0,041	1,675	-1,242	1,664

Продолжение таблицы П4.1

Функ- ция	Прохождение локомотива в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч					
	b6	b11	b12	b13	b14	b15
Y_1	-0,037	-0,17	0,011	0,011	0,012	0,011
Y_2	0	0,00002	-0,00001	-0,00001	0,00001	-0,00001
Y_3	-0,008374	-0,000563	0,000005	-0,00008	0,00002	-0,00008
Y_4	-0,0664	-0,007	0,0004	0,0017	0,0005	0,0017
Y_5	-0,00388	0,00059	0,00004	0,00004	0,00057	0,00004
Y_6	-0,001426	-0,000236	0,000188	0,000111	0,000212	0,000111
Y_9	-0,067	-0,344	0,032	0,032	0,014	0,032
Y_{10}	0,041	2,417	-0,046	-0,01	-0,01	-0,002

Продолжение таблицы П4.1

Функ- ция	Прохождение локомотива в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч					
	b16	b22	b23	b24	b25	b26
Y_1	0,011	-0,17	0,011	0,012	0,011	0,011
Y_2	-0,00001	0,00002	-0,00001	0,00001	-0,00001	-0,00001
Y_3	0,000021	-0,000401	0,000005	0,000103	0,000005	0,000103
Y_4	0,0004	-0,0033	0,0004	0,0039	0,0004	0,0332
Y_5	-0,00011	-0,00063	-0,00004	0,00025	-0,00004	0,00005
Y_6	0,000092	-0,000187	-0,000005	0,000096	-0,000005	0,000035
Y_9	0,032	-0,344	0,032	0,014	0,032	0,032
Y_{10}	-0,046	-0,415	-0,009	-0,009	-0,001	-0,045

Продолжение таблицы П4.1

Функция	Прохождение локомотива в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч					
	b33	b34	b35	b36	b44	b45
Y_1	-0,17	0,012	0,011	0,011	1,97	0,012
Y_2	0,00002	0,00001	-0,00001	-0,00001	0,01792	0,00001
Y_3	-0,000563	0,00002	-0,000077	0,000021	0,016009	0,00002
Y_4	-0,007	0,0005	0,0017	0,0004	0,0081	0,0005
Y_5	-0,0001	-0,00004	-0,00027	0,00005	0,00914	-0,00004
Y_6	-0,000044	0,000019	-0,000082	-0,000042	0,002383	0,000019
Y_9	-0,344	0,014	0,032	0,032	0,593	0,014
Y_{10}	-0,78	-0,12	0,035	-0,009	-2,821	-0,136

Окончание таблицы П4.1

Функция	Прохождение локомотива в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч				
	b45	b46	b55	b56	b66
Y_1	0,012	0,012	-0,17	0,011	-0,17
Y_2	0,00001	0,00001	0,00002	-0,00001	0,00002
Y_3	0,00002	0,003236	-0,000563	0,000021	-0,000935
Y_4	0,0005	-0,0108	-0,007	0,0004	-0,0255
Y_5	-0,00004	0,00105	-0,0001	0,00005	-0,00202
Y_6	0,000019	0	-0,000044	-0,000042	0,000342
Y_9	0,014	0,014	-0,344	0,032	-0,344
Y_{10}	-0,136	-0,009	-0,18	-0,001	-0,415

Примечание: функции отклика Y имеют вид $Y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 6} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^6 x_i^2$.

Таблица П4.2 – Погрешность расчетных моделей функций отклика Y

Номер опыта	Относительная погрешность % расчета по модели для движения локомотивов ВЛ80 в кривой радиусом 350 м со скоростью 80 км/ч							
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_9	Y_{10}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,39	-0,09	-0,15	0,98	0,32	0,27	0,58	0,22
2	0,54	0	0,2	0,97	0,94	0,71	0,53	0,5
3	0,54	0	0,15	0,87	0,97	0,44	0,53	0,42
4	0,54	0	0,2	0,97	0,99	0,46	0,53	0,43
5	0,71	0,06	0,39	1,2	1,57	0,91	0,63	0,49
6	0,54	0	0,2	0,97	0,99	0,46	0,53	0,4
7	0,54	0	0,38	0,89	1,32	0,25	0,53	0,42
8	-0,06	0,11	0,27	-0,2	0,05	-0,13	-0,21	-0,04
9	-0,06	0,11	0,2	-0,1	0,16	0,24	-0,21	-0,03
10	-0,06	0,11	0,27	-0,2	0,2	-0,09	-0,21	-0,09

Продолжение таблицы П4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	-0,05	-0,12	0,02	-0,29	-0,3	-0,27	0,16	-0,08
12	-0,06	0,11	0,27	-0,2	0,2	-0,09	-0,21	0,04
13	-0,06	0,11	0,03	-0,15	-0,01	-0,44	-0,21	-0,03
14	0,09	-0,06	-0,14	0,18	-0,04	-0,17	0,22	0,04
15	0,09	-0,06	-0,19	0,32	-0,02	-0,1	0,22	0,07
16	0,07	0,08	0,13	0,19	0,49	0,22	-0,06	0,07
17	0,09	-0,06	-0,19	0,32	-0,02	-0,1	0,22	-0,01
18	0,09	-0,06	0,09	0,25	0,13	-0,33	0,22	0,04
19	0,09	-0,06	0,15	-0,01	-0,01	0,2	0,22	0,03
20	0,09	-0,06	0,09	0,25	0,02	0,27	0,22	0,07
21	0,07	0,08	0,28	0,12	0,45	0,1	-0,06	0,06
22	0,09	-0,06	0,09	0,25	0,02	0,27	0,22	-0,02
23	0,09	-0,06	-0,14	0,18	-0,12	-0,04	0,22	-0,02
24	0,09	-0,06	-0,19	0,32	-0,04	0,03	0,22	0,02
25	0,07	0,08	0,13	0,19	0,27	0,39	-0,06	0,01
26	0,07	0,08	0,22	0,04	0,37	0,29	-0,06	0,06
27	0,09	-0,06	-0,14	0,18	-0,12	-0,04	0,22	0,07
28	0,07	0,08	0,13	0,19	0,27	0,39	-0,06	0,1
29	-0,27	0,14	0,54	-0,8	-0,08	-0,13	-0,53	-0,12
30	0,67	-0,01	0,43	1,16	1,34	-0,48	0,67	-0,02
31	0,67	-0,01	0,64	1,38	1,2	0,55	0,67	0,29
32	0,67	-0,01	0,43	1,16	1,1	0,48	0,67	0,24
33	-0,15	-0,21	-0,09	-0,18	-0,56	-0,87	0,13	-0,04
34	0,67	-0,01	0,43	1,16	1,1	0,48	0,67	0,39
35	0,67	-0,01	-0,21	1,58	0,04	1,35	0,67	0,29
36	-0,38	-0,2	-0,52	-0,58	-0,91	0,52	-0,11	-0,27
37	-0,38	-0,2	-0,47	-0,65	-1,02	-1,17	-0,11	-0,26
38	-0,38	-0,2	-0,52	-0,58	-1,22	-0,4	-0,11	-0,16
39	-0,47	0,13	-0,62	-0,34	-0,52	-0,07	-0,72	-0,2
40	-0,38	-0,2	-0,52	-0,58	-1,22	-0,4	-0,11	-0,34
41	-0,38	-0,2	-0,75	-0,42	-1,13	0,77	-0,11	-0,26
42	-0,38	0,15	0,35	-0,78	-0,02	0,3	-0,65	-0,18
43	-0,38	0,15	0,5	-1,02	-0,19	0,18	-0,65	-0,25
44	-0,29	-0,2	-0,46	-0,64	-1,26	-0,72	-0,02	-0,24
45	-0,38	0,15	0,5	-1,02	-0,19	0,18	-0,65	-0,07
46	-0,38	0,15	-0,38	-0,89	-0,61	1,25	-0,65	-0,18
47	-0,38	0,15	-0,54	-0,19	-0,18	-0,95	-0,65	-0,18
48	-0,38	0,15	-0,38	-0,89	-0,36	-1,08	-0,65	-0,26
49	-0,29	-0,2	-0,4	-0,51	-1,07	0,2	-0,02	-0,24
50	-0,38	0,15	-0,38	-0,89	-0,36	-1,08	-0,65	-0,08

Окончание таблицы П4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
51	-0,38	0,15	0,35	-0,78	0,05	0,03	-0,65	-0,08
52	-0,38	0,15	0,5	-1,02	-0,28	-0,09	-0,65	-0,15
53	-0,29	-0,2	-0,46	-0,64	-0,77	-1,03	-0,02	-0,11
54	-0,29	-0,2	-0,65	-0,29	-1,16	-0,88	-0,02	-0,24
55	-0,38	0,15	0,35	-0,78	0,05	0,03	-0,65	-0,26
56	-0,29	-0,2	-0,46	-0,64	-0,77	-1,03	-0,02	-0,3

РАСЧЁТ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ

Изгибные жесткости конструкций композиционной шпалы вычисляются соответственно по рисункам П5.1 и П5.2.

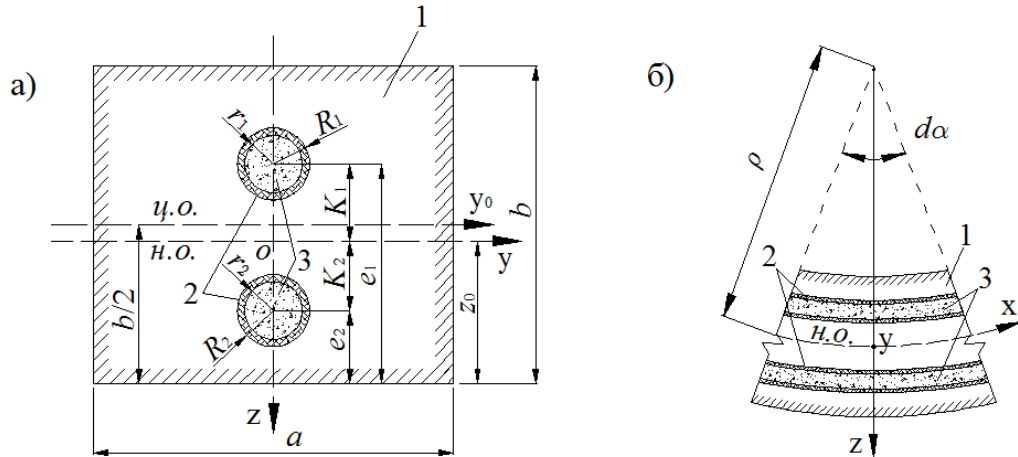


Рисунок П5.1 – Схема поперечного сечения (а) и изгиба (б) элемента композиционной шпалы 1 с двумя бамбуковыми брусками 2, заполненными безусадочным цементом 3

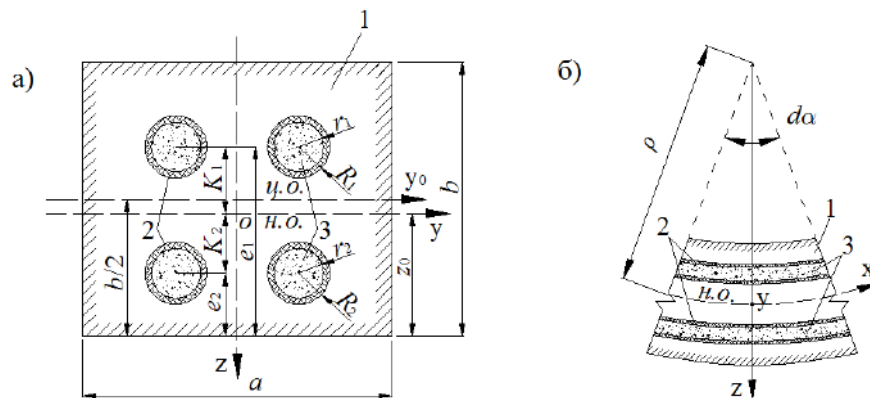


Рисунок П5.2 – Схема поперечного сечения (а) и изгиба (б) элемента композиционной шпалы 1 с четырьмя бамбуковыми брусками 2, заполненными безусадочным цементом 3

На рисунках П5.1 и П5.2, R_1 – верхний брусок-наружный радиус; r_1 – верхний брусок-внутренний радиус; R_2 – нижний брусок-наружный радиус; r_2 – нижний брусок-внутренний радиус; a, b – ширина, высота композиционной шпалы; z_0 – расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до нейтральной оси.

Выведем формулу для определения изгибной жесткости композиционной шпалы $G_{из}$, состоящей из бамбукового пластика (матрицы) и упругих элементов – двух бамбуковых брусков, предназначенных для восстановления формы шпалы в пути после прохождения подвижного состава (рисунок П5.1а). Величина $G_{из}$ входим в формулу для определения радиуса кривизны нейтральной оси шпалы ρ под действием изгибающего момента $M_{изг}$ (рисунок П5.1б)

$$\rho^{-1} = M_{изг} / G_{из}. \quad (\text{П5.1})$$

Вариант, когда полость бамбука заполняется цементным раствором, нужно для повышения несущей способности при сжатии и исключения сплющивания бамбука на подрельсовых участках. Цемент в полостях сдерживает овализацию брусков бамбука, которое важно не только ради повышения изгибной жесткости брусков бамбука, но и, как показано ниже, потому что препятствует двум или трем специфическим видам разрушения: а) первый механизм – это овализация, потеря устойчивости и образование локального кинка (полосы сдвига, смятия); б) второй механизм – это разрушение от критических растягивающих напряжений или схлопывание (коллапс) от критических сжимающих напряжений; в) третий механизм – это продольное расщепление.

Для большего манёвра при конструировании композиционной шпалы будем полагать, что бамбуковые бруски имеют разные размеры (рисунок П5.1а): верхний брусок – наружный радиус R_1 , внутренний радиус r_1 ; нижний брусок – наружный радиус R_2 , внутренний радиус r_2 .

Введем обозначения для площадей поперечного сечения:

$$S_0 = ab, \quad S_{\sigma_1} = \pi(R_1^2 - r_1^2), \quad S_{\sigma_2} = \pi(R_2^2 - r_2^2), \quad S_{\mu_1} = \pi r_1^2, \quad S_{\mu_2} = \pi r_2^2, \quad S_{\mu} = S_0 - S_{\sigma_1} - S_{\sigma_2} - S_{\mu_1} - S_{\mu_2}.$$

Нормальные напряжения в бамбуковом пластике обозначаем как σ_m , в брусках – как $\sigma_{\bar{o}}$, в безусадочном цементе – как σ_u .

Запишем условия равновесия элемента шпалы с центральным углом $d\alpha$ (рисунки П5.1б)

- сумма проекции сил на ось x

$$\sum F_{Kx} = 0 \quad \int_{(S_0)} \sigma_x dS = \int_{(S_m)} \sigma_m dS + \int_{(S_{\bar{o}1})} \sigma_{\bar{o}} dS + \int_{(S_{\bar{o}2})} \sigma_{\bar{o}} dS + \int_{(S_{u1})} \sigma_u dS + \int_{(S_{u2})} \sigma_u dS = 0, \quad (\text{П5.2})$$

- сумма моментов сил относительно оси y

$$\sum M_{Ky} = 0 \quad \int_{(S_m)} \sigma_m z dS + \int_{(S_{\bar{o}1})} \sigma_{\bar{o}} z dS + \int_{(S_{\bar{o}2})} \sigma_{\bar{o}} z dS + \int_{(S_{u1})} \sigma_u z dS + \int_{(S_{u2})} \sigma_u z dS = M_{изз}, \quad (\text{П5.3})$$

- сумма моментов сил относительно оси z

$$\sum M_{Kz} = 0 \quad \int_{(S_m)} \sigma_m y dS + \int_{(S_{\bar{o}1})} \sigma_{\bar{o}} y dS + \int_{(S_{\bar{o}2})} \sigma_{\bar{o}} y dS + \int_{(S_{u1})} \sigma_u y dS + \int_{(S_{u2})} \sigma_u y dS = 0. \quad (\text{П5.4})$$

Так как деформации слоя на расстоянии z от нейтральной оси при изгибе составляют $|\Delta l| = z d\alpha$ и относительные деформации $\varepsilon = z/\rho$, то напряжения в безусадочном цементе составит $\sigma_u = \varepsilon E_u = z E_u / \rho$, в брусках составит $\sigma_{\bar{o}} = \varepsilon E_{\bar{o}} = z E_{\bar{o}} / \rho$, а в матрице – $\sigma_m = z E_m / \rho$, где E_u , $E_{\bar{o}}$ и E_m – модули упругости соответственно безусадочного цемента, бамбуковых брусков и бамбукового пластика.

Уравнение (П5.2) позволяет найти положение нейтральной оси (т.е. z_0) относительно нижней поверхности шпалы.

Запишем уравнение (П5.2) в виде:

$$\int_{(S_0)} \sigma_m dS - \int_{(S_{\bar{o}1})} \sigma_m dS - \int_{(S_{\bar{o}2})} \sigma_m dS - \int_{(S_{u1})} \sigma_m dS - \int_{(S_{u2})} \sigma_m dS + \int_{(S_{\bar{o}1})} \sigma_{\bar{o}} dS + \int_{(S_{\bar{o}2})} \sigma_{\bar{o}} dS + \int_{(S_{u1})} \sigma_u dS + \int_{(S_{u2})} \sigma_u dS = 0 \quad (\text{П5.5})$$

Считая радиус кривизны ρ , модули упругости E_u , $E_{\bar{o}}$ и E_m постоянными на рассматриваемом элементе шпалы, уравнение (П5.5) можно записать в виде:

$$E_m \int_{(S_0)} z dS + (E_{\bar{o}} - E_m) \left(\int_{(S_{\bar{o}1})} z dS + \int_{(S_{\bar{o}2})} z dS \right) + (E_u - E_m) \left(\int_{(S_{u1})} z dS + \int_{(S_{u2})} z dS \right) = 0 \quad (\text{П5.6})$$

Записанные в уравнении (П5.6) интегралы представляют собой статические моменты фигур относительно нейтральной оси y .

Статический момент фигуры равен произведению её площади на координату центра тяжести. Поэтому:

$$\int_{(S_0)} z dS = ab(z_0 - 0,5b); \quad \int_{(S_{\sigma_1})} z dS = -\pi(R_1^2 - r_1^2) \cdot K_1; \quad \int_{(S_{\sigma_2})} z dS = \pi(R_2^2 - r_2^2) \cdot K_2;$$

$$\int_{(S_{y_1})} z dS = -\pi r_1^2 \cdot K_1; \quad \int_{(S_{y_2})} z dS = \pi r_2^2 \cdot K_2$$

Уравнение (П5.6) принимает вид:

$$E_M ab(z_0 - 0,5b) + (E_{\sigma} - E_M) [\pi(R_2^2 - r_2^2) \cdot K_2 - \pi(R_1^2 - r_1^2) \cdot K_1] + (E_y - E_M) (\pi r_2^2 \cdot K_2 - \pi r_1^2 \cdot K_1) = 0 \quad (\text{П5.7})$$

Введём обозначения для отношения модулей упругости и для площадей фигур:

$$\tilde{E}_1 = E_{\sigma} / E_M, \quad \tilde{E}_2 = E_y / E_M.$$

Поскольку $K_1 = (e_1 - z_0)$, $K_2 = (z_0 - e_2)$ (см. рисунок П5.1а), то уравнение (П5.7) можно записать как:

$$S_0(z_0 - 0,5b) + (\tilde{E}_1 - 1) [S_{\sigma_2}(z_0 - e_2) - S_{\sigma_1}(e_1 - z_0)] + (\tilde{E}_2 - 1) [S_{y_2}(z_0 - e_2) - S_{y_1}(e_1 - z_0)] = 0 \quad (\text{П5.8})$$

Напоминаем, что $S_0 = ab$, $S_{\sigma_1} = \pi(R_1^2 - r_1^2)$, $S_{\sigma_2} = \pi(R_2^2 - r_2^2)$, $S_{y_1} = \pi r_1^2$, $S_{y_2} = \pi r_2^2$

Отсюда находим z_0 , т.е. расстояние от нижней (растянутой) грани шпалы до нейтральной оси:

$$z_0 = \frac{0,5S_0b + (\tilde{E}_1 - 1)(S_{\sigma_1}e_1 + S_{\sigma_2}e_2) + (\tilde{E}_2 - 1)(S_{y_1}e_1 + S_{y_2}e_2)}{S_0 + (\tilde{E}_1 - 1)(S_{\sigma_1} + S_{\sigma_2}) + (\tilde{E}_2 - 1)(S_{y_1} + S_{y_2})} \quad (\text{П5.9})$$

Найдем выражение для изгибающего момента $M_{изг}$, уравнение (П5.3) по аналогии с уравнением (П5.5) преобразуем к виду:

$$M_{изг} = \frac{E_M}{\rho} \int_{(S_0)} z^2 dS + \frac{E_{\sigma} - E_M}{\rho} \int_{(S_{\sigma_1})} z^2 dS + \frac{E_{\sigma} - E_M}{\rho} \int_{(S_{\sigma_2})} z^2 dS + \frac{E_y - E_M}{\rho} \int_{(S_{y_1})} z^2 dS + \frac{E_y - E_M}{\rho} \int_{(S_{y_2})} z^2 dS, \quad (\text{П5.10})$$

где $\int z^2 dS = J_y$ — момент инерции соответствующей фигуры относительно нейтральной оси y .

Для прямоугольника момент инерции относительно его центральной оси y_0 , равен $J_{c_0} = ab^3/12$, а относительно нейтральной оси $y - J_{y_0} = ab^3/12 + ab(z_0 - 0,5b)^2$.

Поэтому:

$$\int_{(S_0)} z^2 dS = J_{y_0}. \quad (\text{П5.11})$$

Найти моменты инерции относительно нейтральной оси для бамбуковых брусков. Момент инерции кольца относительно оси, отстоящей от его центра на расстояние « K », равен:

$$J_y^1 = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) + S_\sigma \cdot K^2 = S_\sigma \left(\frac{R^2 + r^2}{4} + K^2 \right) \quad (\text{П5.12})$$

Для круга момент инерции относительно оси, отстоящей от его центра на расстояние « K », равен:

$$J_y^2 = \frac{\pi}{4} r^4 + \pi r^2 \cdot K^2 \quad (\text{П5.13})$$

Теперь выражение для изгибающего момента (П5.10) запишем в виде:

$$M_{изз} = \frac{E_m}{\rho} \left[\frac{ab^3}{12} + ab(z_0 - 0,5b)^2 \right] + \frac{E_\sigma - E_m}{\rho} \left[S_{\sigma 1} \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} + K_1^2 \right) + S_{\sigma 2} \left(\frac{R_2^2 + r_2^2}{4} + K_2^2 \right) \right] + \frac{E_u - E_m}{\rho} \left[S_{u 1} \left(\frac{r_1^2}{2} + K_1^2 \right) + S_{u 2} \left(\frac{r_2^2}{2} + K_2^2 \right) \right] \quad (\text{П5.14})$$

Отсюда получаем формулу для изгибной жесткости шпалы:

$$G_{изз} = \rho M_{изз} = E_m \left[\frac{ab^3}{12} + ab(z_0 - 0,5b)^2 \right] + (E_\sigma - E_m) \left[S_{\sigma 1} \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} + K_1^2 \right) + S_{\sigma 2} \left(\frac{R_2^2 + r_2^2}{4} + K_2^2 \right) \right] + (E_u - E_m) \left[S_{u 1} \left(\frac{r_1^2}{2} + K_1^2 \right) + S_{u 2} \left(\frac{r_2^2}{2} + K_2^2 \right) \right] \quad (\text{П5.15})$$

Напоминаем, что z_0 определяется по формуле (П5.9), $K_1 = e_1 - z_0$, $K_2 = z_0 - e_2$.

В частном случае, когда бруски имеют одинаковые радиусы и расположены симметрично относительно центральной оси y_0 (рисунок П5.1а), формула для $G_{изз}$ упрощается:

$$G_{изз} = E_m \frac{ab^3}{12} + (E_\sigma - E_m) \cdot S_\sigma \left[\frac{R^2 + r^2}{2} + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right] + (E_u - E_m) \cdot S_u \left[r^2 + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right]. \quad (\text{П5.16})$$

Здесь $S_\sigma = \pi(R^2 - r^2)$, $S_u = \pi r^2$.

Выведем формулу для определения изгибной жесткости такой же композиционной шпалы $G_{ш}$, армированной четырьмя бамбуковыми брусками (рисунок

П5.2 а) и б)), при условии, что поперечные сечения всех четырёх брусков одинаковы.

По аналогии с формулами (П5.2)-(П5.16) получим формулы:

$$z_0 = \frac{0,5S_0b + (\tilde{E}_1 - 1)(S_{\sigma 1}e_1 + S_{\sigma 2}e_2) + (\tilde{E}_2 - 1)(S_{y1}e_1 + S_{y2}e_2)}{S_0 + (\tilde{E}_1 - 1)(S_{\sigma 1} + S_{\sigma 2}) + (\tilde{E}_2 - 1)(S_{y1} + S_{y2})} \quad (\text{П5.17})$$

$$M_{изз} = \frac{E_m}{\rho} \left[\frac{ab^3}{12} + ab(z_0 - 0,5b)^2 \right] + \frac{E_\sigma - E_m}{\rho} \left[S_{\sigma 1} \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} + K_1^2 \right) + S_{\sigma 2} \left(\frac{R_2^2 + r_2^2}{4} + K_2^2 \right) \right] + \frac{E_y - E_m}{\rho} \left[S_{y1} \left(\frac{r_1^2}{2} + K_1^2 \right) + S_{y2} \left(\frac{r_2^2}{2} + K_2^2 \right) \right] \quad (\text{П5.18})$$

$$G_{изз} = \rho M_{изз} = E_m \left[\frac{ab^3}{12} + ab(z_0 - 0,5b)^2 \right] + (E_\sigma - E_m) \left[S_{\sigma 1} \left(\frac{R_1^2 + r_1^2}{4} + K_1^2 \right) + S_{\sigma 2} \left(\frac{R_2^2 + r_2^2}{4} + K_2^2 \right) \right] + (E_y - E_m) \left[S_{y1} \left(\frac{r_1^2}{2} + K_1^2 \right) + S_{y2} \left(\frac{r_2^2}{2} + K_2^2 \right) \right] \quad (\text{П5.19})$$

Напоминаем, что $K_1 = e_1 - z_0$, $K_2 = z_0 - e_2$.

В частном случае, когда бруски имеют одинаковые радиусы и расположены симметрично относительно центральной оси y_0 (рисунок П5.2а), формула для $G_{изз}$ упрощается:

$$G_{изз} = E_m \frac{ab^3}{12} + (E_\sigma - E_m) \cdot S_\sigma \left[\frac{R^2 + r^2}{2} + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right] + (E_y - E_m) \cdot S_y \left[r^2 + 0,5b^2 + e_1^2 + e_2^2 - b(e_1 + e_2) \right] \quad (\text{П5.20})$$

Здесь $S_\sigma = 2\pi(R^2 - r^2)$, $S_y = 2\pi r^2$.

При равенстве модулей упругости безусадочного цемента, бамбуковых брусков и бамбукового пластика $E_y = E_\sigma = E_m$, и из формул (П5.16) и (П5.20) получаем изгибную жёсткость однородного материала

$$G_{изз} = \frac{ab^3}{12} E = JE, \quad (\text{П5.21})$$

из чего следует корректность вывода формул (П5.16) и (П5.20) для изгибной жесткости композиционной шпалы конструкции, показанной на рисунке П5.1 и П5.2.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ АЛГОРИТМ

расчёта модуля упругости E_m , коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) материала композиционной шпалы α_m и массы шпалы m_s

1 Исходные данные

Условные обозначения: □ – обозначение знака в числе, принимающее целочисленные значения от 0 до 9, индексы f – фибра бамбука, q – кварцевый песок, p – полимер ПВХ, ce – цементно-песчаный камень.

Зерна кварцевого песка принимаются в виде изотропных линейно-упругих сферических частиц, поливинилхлорид (ПВХ) является полимерной матрицей композита, а бамбуковая фибра рассматривается в виде изотропных линейно-упругих вытянутых частиц.

ρ – плотность компонентов

- средняя плотность ρ_f фибры бамбука задается в виде □,□□□·10³ кг/м³;
- истинная плотность ρ_q кварцевого песка задается в виде □,□□□·10³ кг/м³;
- истинная плотность ρ_p ПВХ задается в виде □,□□□·10³ кг/м³;
- истинная плотность ρ_{ce} цементно-песчаного камня задается в виде □,□□□·10³ кг/м³.

E – модуль упругости компонентов

- модуль упругости фибры бамбука E_f задается в виде □□□□·10⁸ Па (E_f применяется вдоль фибры бамбука);
- модуль упругости кварцевого песка E_q задается в виде □□□□·10⁸ Па;
- модуль упругости ПВХ E_p задается в виде □□□□·10⁸ Па.

μ – коэффициент Пуассона компонентов

- коэффициент Пуассона фибры бамбука μ_f задается в виде 0,□□, отн. ед. (μ_f применяется вдоль направления фибры бамбука);
- коэффициент Пуассона кварцевого песка μ_q задается в виде 0,□□, отн. ед.;
- коэффициент Пуассона ПВХ μ_p задается в виде 0,□□, отн. ед.

α – коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР)

- КЛТР фибры бамбука α_f задается в виде $\square\square\square, \square\square\square \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (например, $23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);
- КЛТР зерен кварцевого песка α_q задается в виде $\square\square\square, \square\square\square \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- КЛТР поливинилхлорида (ПВХ) α_p задается в виде $\square\square\square, \square\square\square \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

x – относительное содержание компонентов

- x_f, x_q, x_p , представляют собой относительное содержание исходных компонентов (фибра, кварцевый песок, полимер) по массе. Они принимают значения $0 \leq x_f, x_q, x_p \leq 1$ при условии $x_f + x_q + x_p = 1$, задаваемые с точностью до второго знака после запятой $0, \square\square$.

- параметры фибры

- l – обозначение длины фибры, вычисляемая с точностью $\square\square, \square\square \cdot 10^{-3}$ м (это переменный параметр, который не задается в исходных данных);
- средний радиус фибры бамбука r_f задаваемый с точностью $\square, \square\square \cdot 10^{-3}$ м;
- l_1 – первый параметр длины фибры, задаваемая с точностью, $\square\square, \square\square \cdot 10^{-3}$ м (принимается по кривой распределения длин фибры);
- l_2 – второй параметр длины фибры, $\square\square, \square\square \cdot 10^{-3}$ м (принимается по кривой распределения длин фибры);
- $F(l_1)$ – вероятность длин фибры короче l_1 , $\square, \square\square \cdot \text{отн. ед.}$;
- $F(l_2)$ – вероятность длин фибры короче l_2 , $\square, \square\square \cdot \text{отн. ед.}$
- $g(\theta, \phi) = g(\theta)g(\phi) / \sin \theta = 1/2\pi$ – закон стохастического распределения по сечению и ориентации волокон в матрице композита в пространстве;
- средний радиус фибры бамбука r_f задается в виде $\square, \square\square \cdot 10^{-3}$ м.

- параметр χ

- χ_q – параметр ($0 < \chi_q < 1$), учитывающий влияние частиц на модуль упругости полимерного композита, $\square, \square\square \cdot \text{отн. ед.}$

- параметры композиционной шпалы

- L – длина шпалы, $\square, \square\square\square$ м;
- B – ее ширина, $\square, \square\square\square$ м;

- H – высота шпалы, м, □, □□ м;
- t – количество армирующих стержней бамбука, □, штук;
- R_2 – внешний радиус бамбукового стержня, м, □, □□;
- R_1 – внутренний радиус бамбукового стержня, м, □, □□.
- L_b – длина бамбукового стержня в шпале, □, □□ м, $L_b \leq L$.
- L_{ce1} – длина цементно-песчаного камня в верхнем стержне бамбука в шпале, □, □□ м;
- L_{ce2} – длина цементно-песчаного камня в нижнем стержне бамбука в шпале, □, □□ м.

2 Расчеты

2.1 Расчет модуля упругости материала композиционной шпалы

Модуль упругости E_m материала композиционной шпалы, армированного стохастически распределенной короткой фиброй, определяется ЛАА-методом по формуле [1]:

$$E_m = \frac{\overline{A_{11}A_{22}} - \overline{A_{12}}^2}{\overline{A_{22}}}, \quad (\text{П6.7})$$

где:

$$\overline{A_{11}} = \frac{3}{8} Q_{11} + \frac{3}{8} Q_{22} + \frac{1}{4} Q_{12} + \frac{1}{2} Q_{66}; \quad (\text{П6.8})$$

$$\overline{A_{12}} = \frac{1}{8} Q_{11} + \frac{1}{8} Q_{22} + \frac{3}{4} Q_{12} - \frac{1}{2} Q_{66}; \quad (\text{П6.9})$$

$$\overline{A_{22}} = \frac{3}{8} Q_{11} + \frac{3}{8} Q_{22} + \frac{1}{4} Q_{12} + \frac{1}{2} Q_{66}. \quad (\text{П6.10})$$

В (П6.8)-(П6.10) значения Q_{11} , Q_{12} , Q_{22} и Q_{66} определяют по формулам:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})}; \quad (\text{П6.11})$$

$$Q_{12} = \mu_{21} Q_{11}; \quad (\text{П6.12})$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})}; \quad (\text{П6.13})$$

$$Q_{66} = G_{12}, \quad (\text{П6.14})$$

в которых продольный модуль упругости однонаправленного композита E_{11} с короткими волокнами рассчитывается по формуле:

$$E_{11} = \lambda E_f v_f + E_c v_c, \quad (\text{П6.15})$$

где v_f и v_c – относительные объемные содержания соответственно фибры и ПВХ с кварцевым песком, определяемых по формулам:

$$v_f = \frac{V_f}{V_q + V_p + V_f}; \quad (\text{П6.16})$$

$$v_c = \frac{V_p + V_q}{V_q + V_p + V_f}; \quad (\text{П6.17})$$

где расходы компонент по объему, м^3 , в 1 м^3 композита шпалы V_f , V_q и V_p определяют по формулам (П6.18):

$$V_f = \frac{x_f \rho_m}{\rho_f} \times 1 (\text{м}^3); V_q = \frac{x_q \rho_m}{\rho_q} \times 1 (\text{м}^3); V_p = \frac{x_p \rho_m}{\rho_p} \times 1 (\text{м}^3), \quad (\text{П6.18})$$

где x_f – относительное содержание компонент (обозначения расходов компонент композита в кодированном масштабе), отн. ед., фибры из бамбука по массе, x_q – кварцевого песка и x_p ПВХ; число $1 (\text{м}^3)$ в числителе принято в качестве множителя из условия, что расход составляющих определяется в 1 м^3 ; V_f – расход фибры, м^3 ; V_q – то же, кварцевого песка, м^3 ; V_p – то же, ПВХ, м^3 ; значение плотности материала композиционной шпалы ρ_m , $\text{кг}/\text{м}^3$ определяют по формуле:

$$\rho_m = 1(\text{м}^3)/(x_f/\rho_f + x_q/\rho_q + x_p/\rho_p), \quad (\text{П6.19})$$

Примечание. Под расходами составляющих по объему V_f и V_q подразумеваются не расходы по объему в насыпном состоянии для бамбука и песка, а по объему, занимаемому зернами песка или частицами фибры бамбука.

В формуле (П6.15) λ определяется по формуле:

$$\lambda = 1 - \frac{\text{th}\left(\frac{\eta \cdot l_f}{2}\right)}{\frac{\eta \cdot l_f}{2}}, \quad (\text{П6.20})$$

где $\text{th}(\eta \cdot l_f/2)$ – гиперболический тангенс, вычисляемый по формуле

$$\text{th} \frac{\eta l_f}{2} = \frac{e^{\frac{\eta l_f}{2}} - e^{-\frac{\eta l_f}{2}}}{e^{\frac{\eta l_f}{2}} + e^{-\frac{\eta l_f}{2}}}; \quad (\text{П6.21})$$

$$l_f = \int_0^{\infty} l f(l) dl = s^{-\frac{1}{u}} \Gamma\left(\frac{1}{u+1}\right), \quad (\text{П6.22})$$

в формуле (П6.22) функция распределения длины волокон в композите $f(l)$ имеет значение, определяемое по формуле (П6.23), но в программе определяют l_f с использованием гамма-функции $\Gamma\left(\frac{1}{u+1}\right)$ от аргумента $1/(u + 1)$, вычисляемой, например, по https://www.johndcook.com/blog/cpp_gamma/,

$$f(l) = s u l^{u-1} \exp(-s l^u) \quad (0 < l < \infty), \quad (\text{П6.23})$$

в формуле (П6.22) коэффициенты u , $\square\square, \square\square$, отн. ед., и s , $\square\square, \square\square$, отн. ед., вычисляют по формулам (П6.24) и (П6.25):

$$u = \frac{\ln\{\ln[1 - F(l_1)] / \ln[1 - F(l_2)]\}}{\ln(l_1 / l_2)}; \quad (\text{П6.24})$$

$$s = -\frac{\ln[1 - F(l_1)]}{l_1^u}. \quad (\text{П6.25})$$

а в формулах (П6.20) и (П6.21) η вычисляем по формуле (П6.26):

$$\eta = \sqrt{\frac{2G_c}{r_f^2 E_f \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)}}, \quad (\text{П6.26})$$

в котором (для гексагональной укладки волокон, где R – среднее расстояние между фибрами перпендикулярно оси волокна) $\ln(R/r_f)$ принимает значение

$$\ln \frac{R}{r_f} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}v_f}\right), \quad (\text{П6.27})$$

а E_{22} , μ_{12} , μ_{21} , G_{12} , используемые в (П6.11)-(П6.14), рассчитываются по формулам:

$$E_{22} = \frac{1+2\eta_1 v_f}{1-\eta_1 v_f} E_c, \quad (\text{П6.28})$$

$$\mu_{12} = \mu_f v_f + \mu_c v_c, \quad (\text{П6.29})$$

$$\mu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \mu_{12}, \quad (\text{П6.30})$$

$$G_{12} = \frac{1+\eta_2 v_f}{1-\eta_2 v_f} G_c, \quad (\text{П6.31})$$

где:

$$\eta_1 = \frac{\frac{E_f}{E_c} - 1}{\frac{E_f}{E_c} + 2}, \quad (\text{П6.32})$$

здесь модули упругости E_f – модуль упругости фибры, приведенный в исходных данных, E_c – *двухкомпонентного* композита, состоящего из кварцевого песка и полимера определяется по формуле:

$$E_c = \chi_q E_q v_q^c + E_p v_p^c, \quad (\text{П6.33})$$

в которой относительные объемные содержания v_q^c и v_p^c , входящие в формулу (П6.33), вычислим по формулам:

$$v_q^c = \frac{V_q}{V_q + V_p}; \quad (\text{П6.34})$$

$$v_p^c = \frac{V_p}{V_q + V_p}, \quad (\text{П6.35})$$

где V_q и V_p – соответственно содержание кварцевого песка и ПВХ в 1 м³ *трехкомпонентного* композита (композит содержит также фибру с объемным содержанием V_f , которая не учитывается при расчетах v_q^c и v_p^c), м³.

- v_f и v_c – относительные объемные содержания соответственно фибры и ПВХ с кварцевым песком, определяемых соответственно по формулам (П6.16) и (П6.17).

- μ_f и μ_c – коэффициенты Пуассона соответственно фибры (см. исходные данные) и ПВХ с кварцевым песком, вычисляемый по формуле:

$$\mu_c = \frac{\mu_p \mu_q}{\mu_q v_p^c + \mu_p v_q^c}; \quad (\text{П6.36})$$

(здесь μ_q и μ_p – коэффициенты Пуассона кварцевого песка и ПВХ, приведенные в исходных данных; v_q^c и v_p^c – относительные объемные содержания кварцевого песка и ПВХ, определяемые соответственно по формулам (П6.34) и (П6.35));

- E_{11} – модуль упругости, вычисляемый по формуле (П6.15);

- параметр η_2 , вычисляемый по формуле

$$\eta_2 = \frac{\frac{G_f}{G_c} - 1}{\frac{G_f}{G_c} + 1}. \quad (\text{П6.37})$$

(здесь G_c и G_f определяются по формулам

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu_c)}; \quad (\text{П6.38})$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\mu_f)}; \quad (\text{П6.39})$$

в которых E_f и μ_f – модуль упругости и коэффициент Пуассона фибры приведены в исходных данных, а их аналоги E_c и μ_c вычисляются соответственно по формулам (П6.33) и (П6.36)).

2.2 Расчет КЛТР материала композиционной шпалы α_m

Значение КЛТР материала композиционной шпалы α_m определяют по формуле [1]:

$$\alpha_m = \frac{1}{3}\alpha_1^0 + \frac{2}{3}\alpha_2^0, \quad (\text{П6.40})$$

где:

$$\alpha_1^0 = \frac{\lambda E_f \alpha_f v_f + E_c \alpha_c (1 - v_f)}{\lambda E_f v_f + E_c (1 - v_f)}, \quad (\text{П6.41})$$

$$\alpha_2^0 = (1 + \mu_f) \alpha_f v_f + (1 + \mu_c) \alpha_c (1 - v_f) - \alpha_1^0 (\mu_f v_f + \mu_c (1 - v_f)), \quad (\text{П6.42})$$

(здесь v_f определяется по формуле (П6.16); E_c – модуль упругости двухкомпонентного композита, вычисляемый по формуле (П6.33); μ_c – то же, коэффициент Пуассона, вычисляемый по формуле (П6.36); λ – коэффициент, определяемый по формуле (П6.20); α_c – КЛТР двухкомпонентного композита из ПВХ и кварцевого песка, вычисляемый по формуле:

$$\alpha_c = v_q^c \alpha_q + v_p^c \alpha_p + \frac{4v_p^c v_q^c (K_q - K_p) (\alpha_q - \alpha_p) G_p}{3K_q K_p + 4G_p (v_q^c K_q + v_p^c K_p)}, \quad (\text{П6.43})$$

где: K_q – объемный модуль упругости кварцевого песка, равный $K_q = E_q / 3(1 - 2\mu_q)$ и вычисляемый с точностью $\square\square\square\square \cdot 10^8$ Па; K_p – объемный модуль упругости ПВХ, равный $K_p = E_p / 3(1 - 2\mu_p)$ и вычисляемый с точностью $\square\square\square\square \cdot 10^8$ Па; G_p – модуль сдвига ПВХ, вычисляемый по формуле $G_p = E_p / 2(1 + \mu_p) = \square\square\square\square \cdot 10^8$ Па).

2.3 Расчет массы шпалы m_s

Масса композиционной шпалы определяется по формуле:

$$m_s = \rho_m(V_s - tV_b) + tm_b + m_{ce}, \quad (\text{П6.44})$$

где: m_s – масса композиционной шпалы, кг, □□□, □; ρ_m – плотность материала композиционной шпалы, кг/м³, определяемая по формуле (П6.19); V_s – объем композиционной шпалы, □,□□□ м³, вычисляемый по формуле

$$V_s = LBH, \quad (\text{П6.45})$$

V_b («b» обозначает «bar») – внешний объем одного стержня бамбука, □,□□□ м³, вычисляемый по формуле

$$V_b = L_b \pi R_2^2, \quad (\text{П6.46})$$

m_b – масса одного стержня бамбука, кг, □□□, □., определяется по формуле:

$$m_b = \rho_f L_b \pi (R_2^2 - R_1^2), \quad (\text{П6.47})$$

m_{ce} – масса цементно-песчаного камня в стволах бамбука в шпале, кг, □□□, □., определяется по формуле:

$$m_{ce} = \rho_{ce} \frac{t}{2} (L_{ce1} + L_{ce2}) \pi R_1^2. \quad (\text{П6.48})$$

4 Результаты расчета

Выходными данными выполненного расчета являются:

- исходные данные;
- значение модуля упругости композита E_m , вычисляемого по формуле (П6.7);
- КЛТР композита α_m , вычисляемого по формуле (П6.33);
- масса шпалы m_s , вычисляемая по формуле (П6.36).

Литература к Приложению 6

1. FU Shao-yu. Science and Engineering of Short Fiber-Reinforced Polymer Composites (2nd edition) / Shao-yu FU, Bernd LAUKE, Yiu-wing MAI. – Sawston: Woodhead Publishing, 2019. – 472 p. – ISBN: 978-0-08-102623-6. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

КОЭФФИЦИЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Таблица П7.1 – Значения коэффициентов математических моделей для свойств композита системы «поливинилхлорид – мел – древесная мука»

Функция отклика	Значения коэффициентов функций отклика Y				
	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}
Y_E (Па)	9,000E+09	3,172E+10	3,400E+09	-1,854E+10	-1,125E+09
Y_α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,814E-05	2,889E-05	7,000E-05	-9,135E-06	-1,989E-05
$Y_{m(t=2)}$ (кг)	73,7	191,4	127,0	-110,7	-31,05

Окончание таблицы П7.1

Функция отклика	Значения коэффициентов функций отклика Y				
	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	β_{123}
Y_E (Па)	-1,208E+10	1,467E+10	3,600E+08	-2,903E+09	7,205E+10
Y_α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,287E-05	5,085E-06	4,905E-06	2,520E-06	1,879E-04
$Y_{m(t=2)}$ (кг)	-30,15	5,22E+01	1,13E+01	-4,50E+00	5,76E+02

Таблица П7.2 – Значения коэффициентов математических моделей для свойств композита системы «поливинилхлорид – мел – бамбуковая фибра»

Функция отклика	Значения коэффициентов функций отклика Y				
	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}
Y_E (Па)	1,257E+10	3,172E+10	3,400E+09	-1,235E+10	5,400E+08
Y_α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,584E-05	2,889E-05	7,000E-05	-9,990E-06	-3,206E-05
$Y_{m(t=2)}$ (кг)	73,7	191,4	127,0	-110,7	-31,05

Окончание таблицы П7.2

Функция отклика	Значения коэффициентов функций отклика Y				
	β_{23}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	β_{123}
Y_E (Па)	-1,208E+10	1,366E+10	-5,850E+08	-2,903E+09	9,628E+10
Y_α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1,287E-05	4,995E-06	1,082E-05	2,520E-06	1,647E-04
$Y_{m(t=2)}$ (кг)	-30,15	5,22E+01	1,13E+01	-4,50E+00	5,76E+02

Примечания. 1. Обозначения функций отклика: Y_E – модуль упругости матрицы композиционной шпалы, Па; Y_α – коэффициент линейного температурного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $Y_{m(t=2)}$ – масса композиционной шпалы при числе арматурных стержней $t = 2$ (шт); 2. Обозначение E соответствует 10, т.е. $E+3 = 10^3$ или $E-2 = 10^{-2}$; 3. Коэффициенты β и γ представляют собой положительные, отрицательные или равные нулю числа, полученные при построении адекватных математических моделей свойств.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ИЗГИБНУЮ ЖЕСТКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШПАЛ

Из рисунка П8.1 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях модуля упругости матрицы шпалы $E_m(x_2)$ и расстояния их верхнего ряда от растянутой пласти шпалы $e(x_4)$, равных их основным уровням ($E_m = 11 \cdot 10^9$ Па и $e = 0,14$ м, см. таблицу 8) на величину G оказывают практически равнозначное влияние изменения модуля упругости бамбуковых брусков $E_b(x_1)$ и радиуса бамбуковых брусков $R(x_3)$, увеличивая жесткость композиционной шпалы с ростом как одного, так и другого фактора.

В точках базового поля F_1 при фиксированных значениях $E_b(x_1)$ и $R(x_3)$ влияние модуля упругости матрицы шпалы $E_m(x_2)$ и геометрического параметра $e(x_4)$ (локальные поля F_2) на величину G вполне однозначно во всех точках факторного пространства базового поля F_1 – наибольшее влияние на градиент изменения изгибной жесткости ΔG_{max} оказывает изменение модуля упругости матрицы композиционной шпалы $E_m(x_2)$.

Из рисунка П8.2 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях модуля упругости матрицы шпалы $E_m(x_2)$ и радиуса бамбуковых брусков $R(x_3)$, равных их основным уровням ($E_m = 11 \cdot 10^9$ Па и $R = 0,02$ м, см. таблицу 8) на величину G в области наименьших значений модуля упругости бамбукового стержня $E_b(x_1)$ и наибольших значений геометрического параметра $e(x_4)$ степень влияния этих факторов на изгибную жесткость композиционной шпалы G оказывается равнозначным – с их ростом увеличивается и G . В тоже время с повышением модуля упругости бамбуковых стержней E_b их влияние на изгибную жесткость композиционной шпалы G оказывается определяющим.

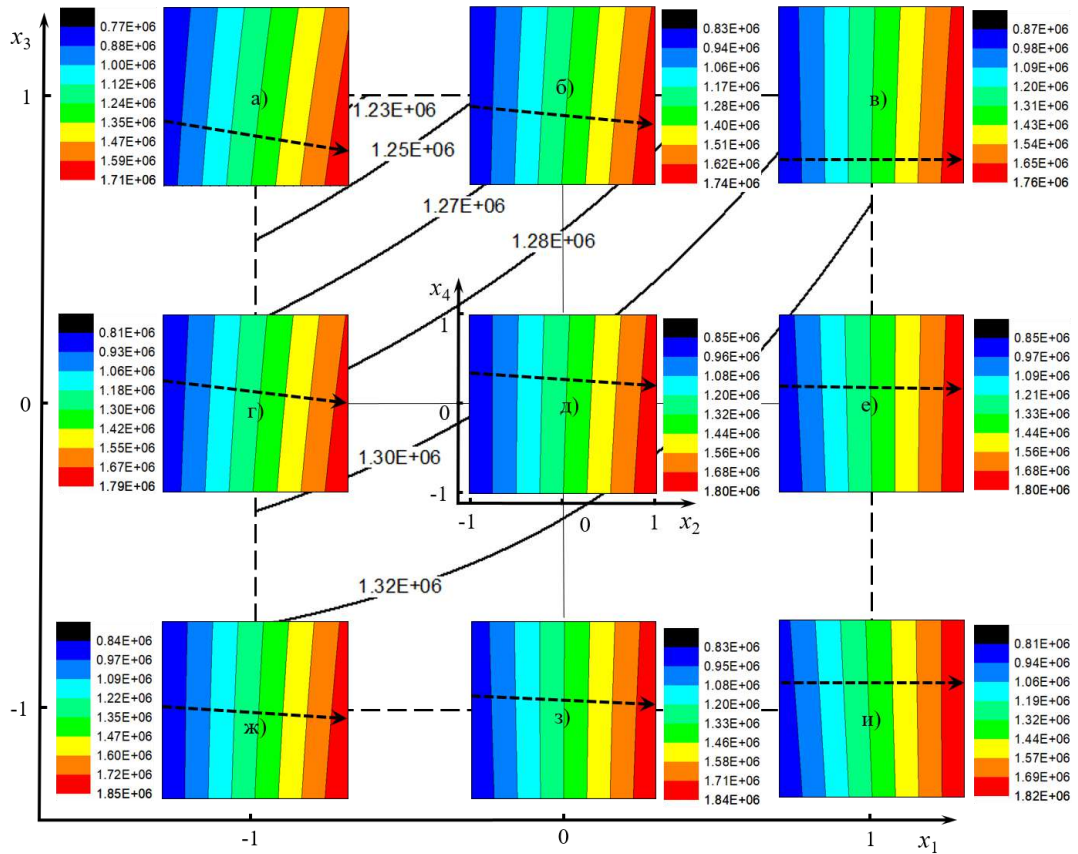


Рисунок П8.1 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , Па·м⁴, в области варьируемых факторов x , отн. ед.

- - - - - базовое поле F_1 при изменениях x_1, x_3 и фиксированных $x_2 = x_4 = 0$;
 ————— локальные поля F_2 при изменениях x_2, x_4 в точках базового поля F_1 с координатами: а – $x_1 = -1$ и $x_3 = 1$; б – $x_1 = 0$ и $x_3 = 1$; в – $x_1 = 1$ и $x_3 = 1$; г – $x_1 = -1$ и $x_3 = 0$; д – $x_1 = 0$ и $x_3 = 0$; е – $x_1 = 1$ и $x_3 = 0$; ж – $x_1 = -1$ и $x_3 = -1$; з – $x_1 = 0$ и $x_3 = -1$; и – $x_1 = 1$ и $x_3 = -1$; ← - - - - - направление наибольшего градиента ΔG_{max}

В точках базового поля F_1 при фиксированных значениях $E_b(x_1)$ и $e(x_4)$ наблюдаются аналогичные с предыдущим случаем (см. рисунок П8.1) закономерности – влияние модуля упругости матрицы шпалы $E_m(x_2)$ и геометрического параметра $R(x_3)$ (локальные поля F_2) на величину G вполне однозначно во всех точках факторного пространства локального поля F_1 – наибольшее влияние на градиент изменения изгибной жесткости ΔG_{max} оказывает изменение модуля упругости матрицы композиционной шпалы $E_m(x_2)$.

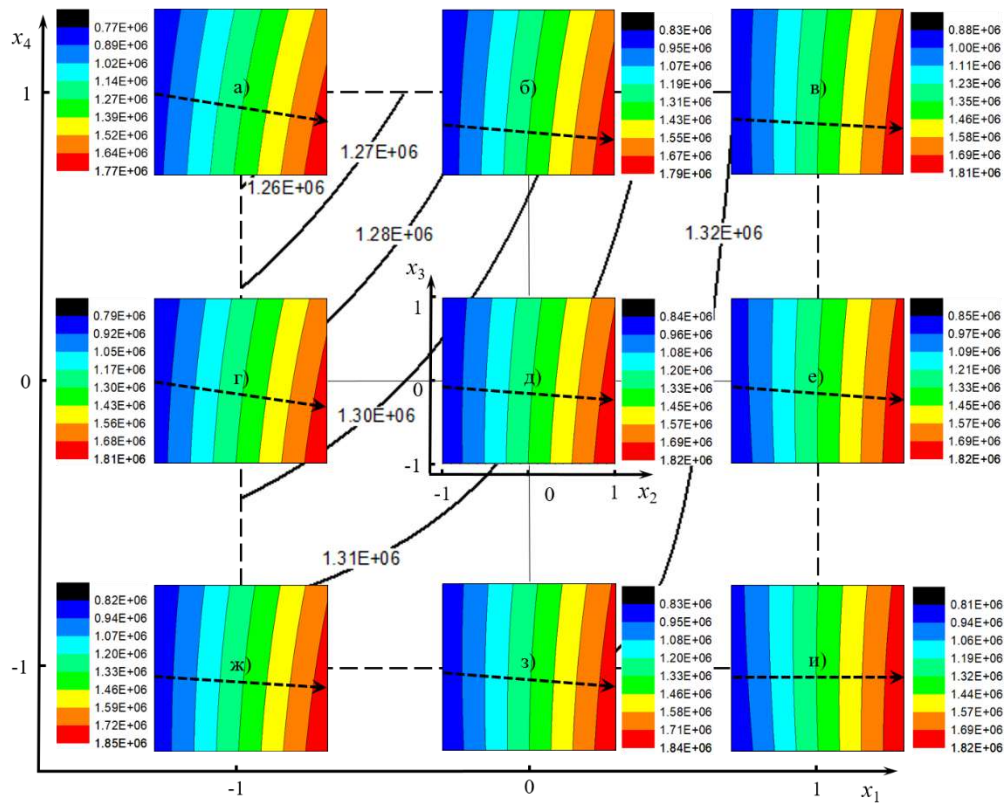


Рисунок П8.2 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , Па·м⁴, в области варьируемых факторов x , отн. ед.

----- базовое поле F_1 при изменениях x_1, x_4 и фиксированных $x_2 = x_3 = 0$;
 ————— локальные поля F_2 при изменениях x_2, x_3 в точках базового поля F_1
 с координатами: а – $x_1 = -1$ и $x_4 = 1$; б – $x_1 = 0$ и $x_4 = 1$; в – $x_1 = 1$ и $x_4 = 1$; г – $x_1 = -1$ и $x_4 = 0$; д – $x_1 = 0$ и $x_4 = 0$; е – $x_1 = 1$ и $x_4 = 0$; ж – $x_1 = -1$ и $x_4 = -1$; з – $x_1 = 0$ и $x_4 = -1$; и – $x_1 = 1$ и $x_4 = -1$; ←----- направление наибольшего градиента увеличения G .

Из рисунка П8.3 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях модуля упругости бамбуковых брусков $E_{\delta}(x_1)$ и такого геометрического параметра, как $e(x_4)$, равных их основным уровням ($E_{\delta} = 15 \cdot 10^9$ Па и $e = 0,14$ м, см. таблицу 8) определяющее влияние на жесткость композиционной шпалы G во всем диапазоне изменений радиуса бамбуковой арматуры R оказывает влияние модуль упругости матрицы шпалы.

В точках базового поля F_1 при фиксированных значениях $E_m(x_2)$ и $R(x_3)$ наблюдаются существенное изменение характера влияния варьируемых факторов $E_{\delta}(x_1)$ и $e(x_4)$ на величину изгибной жесткости композиционной шпалы G и градиента ΔG_{max} .

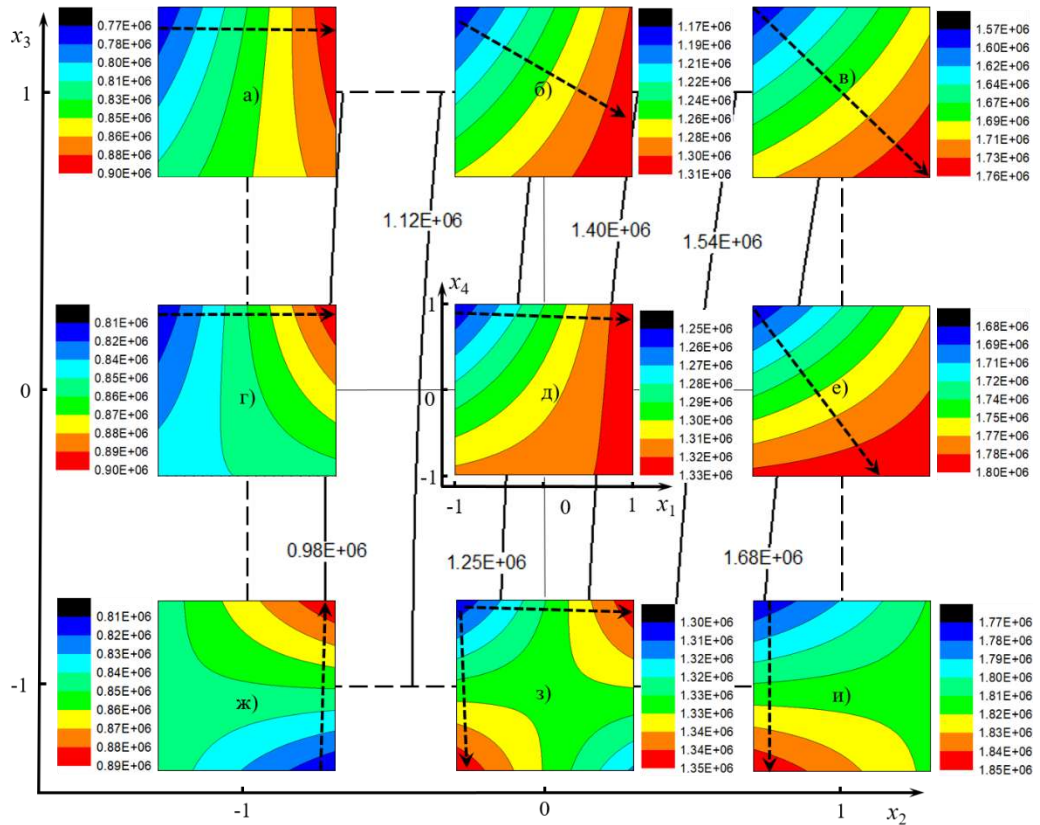


Рисунок П8.3 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , Па·м⁴, в области варьируемых факторов x , отн. ед.

— — — — — базовое поле F_1 при изменениях x_2, x_3 и фиксированных $x_1 = x_4 = 0$;
 ————— локальные поля F_2 при изменениях x_1, x_4 в точках базового поля F_1
 с координатами: а – $x_2 = -1$ и $x_3 = 1$; б – $x_2 = 0$ и $x_3 = 1$; в – $x_2 = 1$ и $x_3 = 1$; г – $x_2 = -1$ и $x_3 = 0$; д – $x_2 = 0$ и $x_3 = 0$; е – $x_2 = 1$ и $x_3 = 0$; ж – $x_2 = -1$ и $x_3 = -1$; з – $x_2 = 0$ и $x_3 = -1$; и – $x_2 = 1$ и $x_3 = -1$; ← — — — — — направление наибольшего градиента увеличения G

Если при больших радиусах бамбуковых стержней R (x_3) (локальные поля F_2 а, б, в) первоначально (поле F_2 а) ΔG_{max} зависел от изменения модуля упругости бамбуковых стержней $E_b(x_1)$, то с увеличением модуля упругости матрицы $E_m(x_2)$ на его величину в равной степени влияют как $E_b(x_1)$, так и $e(x_4)$ (локальные поля F_2 б, в). При средних значения диаметра брусков (локальные поля F_2 г, д, е) такой переход наблюдается только при максимальных величинах модуля упругости матрицы композита $E_m(x_2)$ – в локальной поле F_2 е. При малых диаметрах бамбуковых брусков (локальные поля F_2 ж, з, и) наблюдается совершенно другая картина: при низких значениях $E_m(x_2)$ на величину ΔG_{max} оказывает влияние параметр $e(x_4)$, ха-

рактически характеризующий расстояние между бамбуковыми брусками (локальное поле F_2 ж), при средних (локальное поле F_2 з) это уже зависит от соотношения $E_6(x_1)$ к $e(x_4)$, а при высоких (локальное поле F_2 и) снова полностью определяется геометрическим параметром $e(x_4)$, но с «обратным знаком» по отношению к локальному полю F_2 ж.

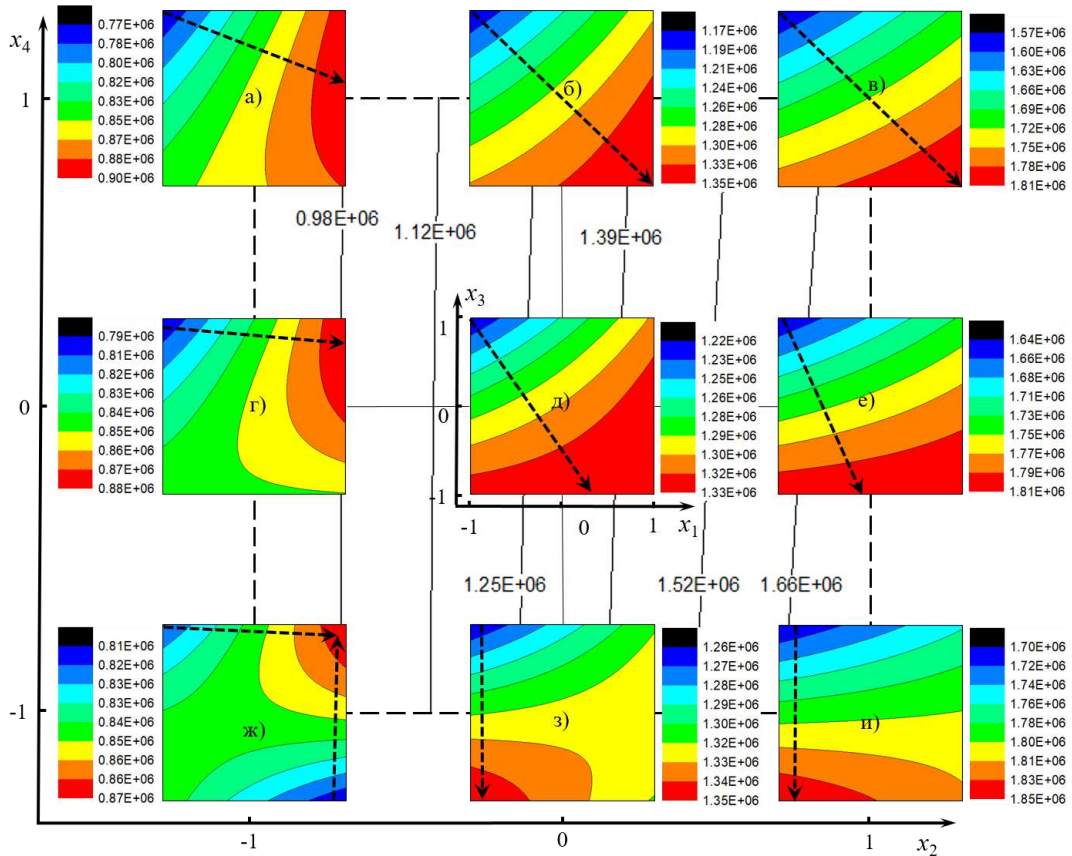


Рисунок П8.4 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , Па·м⁴, в области варьируемых факторов x , отн. ед.

— — — — — базовое поле F_1 при изменениях x_2, x_4 и фиксированных $x_1 = x_3 = 0$;
 ————— локальные поля F_2 при изменениях x_1, x_3 в точках базового поля F_1 с координатами: а – $x_2 = -1$ и $x_4 = 1$; б – $x_2 = 0$ и $x_4 = 1$; в – $x_2 = 1$ и $x_4 = 1$; г – $x_2 = -1$ и $x_4 = 0$; д – $x_2 = 0$ и $x_4 = 0$; е – $x_2 = 1$ и $x_4 = 0$; ж – $x_2 = -1$ и $x_4 = -1$; з – $x_2 = 0$ и $x_4 = -1$; и – $x_2 = 1$ и $x_4 = -1$; ←----- направление наибольшего градиента увеличения G

Из рисунка П8.4 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях модуля упругости бамбуковых брусков $E_6(x_1)$ и их диаметра $R(x_3)$, равных их основным уровням ($E_6 = 15 \cdot 10^9$ Па и $R = 0,02$ м, см. таблицу 8) во всем диапа-

зоне изменений геометрического параметра $e(x_4)$ определяющее влияние на жесткость композиционной шпалы G оказывает влияние модуль упругости матрицы шпалы $E_M(x_2)$.

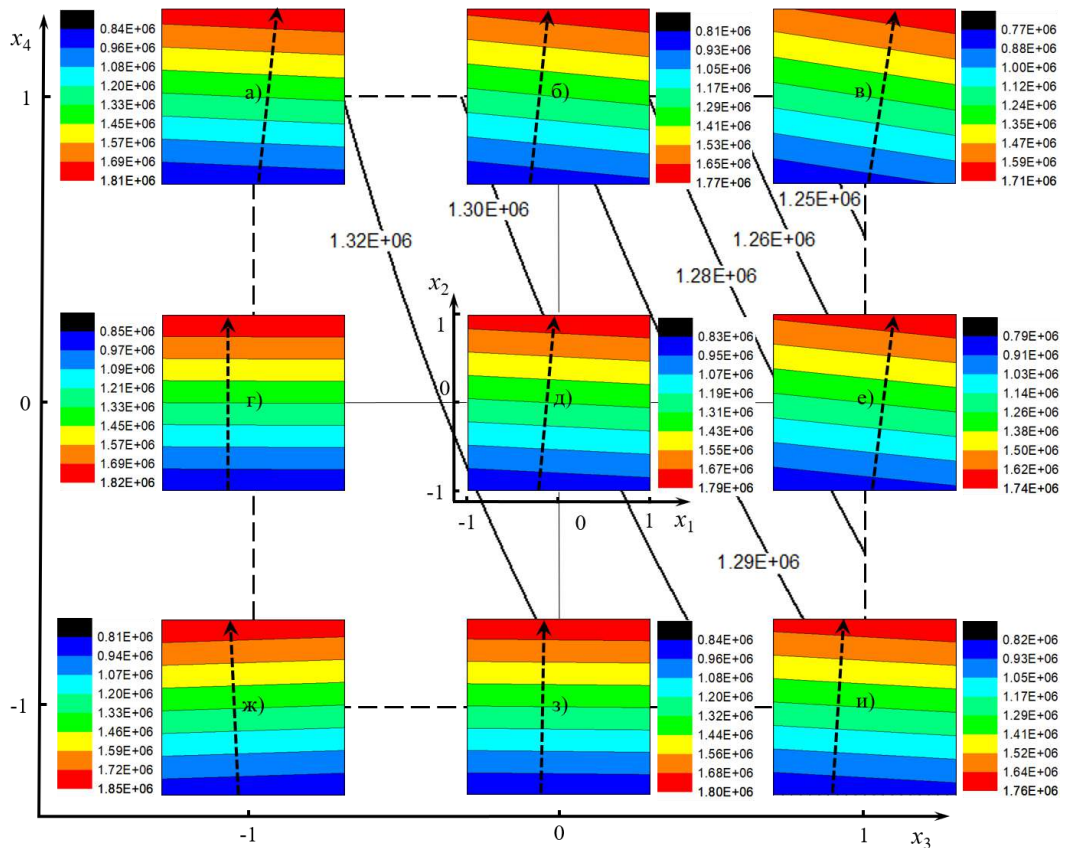


Рисунок П8.5 – Изолинии изгибной жесткости композиционной шпалы G , $\text{Па} \cdot \text{м}^4$, в области варьируемых факторов x , отн. ед.

----- базовое поле F_1 при изменениях x_3, x_4 и фиксированных $x_1 = x_2 = 0$;
 ————— локальные поля F_2 при изменениях x_1, x_2 в точках базового поля F_1 с координатами: а – $x_3 = -1$ и $x_4 = 1$; б – $x_3 = 0$ и $x_4 = 1$; в – $x_3 = 1$ и $x_4 = 1$; г – $x_3 = -1$ и $x_4 = 0$; д – $x_3 = 0$ и $x_4 = 0$; е – $x_3 = 1$ и $x_4 = 0$; ж – $x_3 = -1$ и $x_4 = -1$; з – $x_3 = 0$ и $x_4 = -1$; и – $x_3 = 1$ и $x_4 = -1$; ←----- направление наибольшего градиента увеличения G

В точках базового поля $F_1(x_2, x_4)$ при фиксированных значениях $E_M(x_2)$ и $e(x_4)$ при высоких и средних значениях параметра $e(x_4)$ (см. локальные поля F_2 а, б, в, г, д, е на рисунке П8.4) со снижением расстояния между брусками возрастает влияние модуля упругости матрицы шпалы $E_M(x_2)$ на градиент ΔG_{max} и при больших расстояниях между ними влияние варьируемых факторов $E_\delta(x_1)$ и $R(x_3)$ равнозначно (см. локальное поле F_2 в), а с уменьшением параметра $e(x_4)$ влияние

диаметра брусков становится преобладающим (см. локальное поле F_2 е). При низких значениях $E_m(x_2)$ и $e(x_4)$ (см. локальное поле F_2 ж) влияние варьируемых факторов $E_b(x_1)$ и $R(x_3)$ неоднозначно: при высоких значениях модуля упругости бамбуковых брусков их характеристики являются определяющими, а при их больших диаметрах – поперечные размеры брусков. В тоже время с ростом модуля упругости матрицы снижение диаметра брусков на рост ΔG_{max} является основным (см. локальные поля F_2 з, и).

Из рисунка П8.5 (см. базовое поле F_1) следует, что при фиксированных значениях физических параметров материала композиционной шпалы – модуля упругости бамбуковых брусков $E_b(x_1)$ и матрицы шпалы $E_m(x_2)$, равных их основным уровням ($E_b = 15 \cdot 10^9$ Па и $E_m = 11 \cdot 10^9$ Па, см. таблицу 8), степень влияния на величину G изменений геометрических параметров – $R(x_3)$ и $e(x_4)$, практически равнозначно, с той только разницей, что в области высоких их значений (при $R(x_3) > 0$ и $e(x_4) > 0$) изменение значений геометрических параметров более интенсивно, чем в области их более низких значений – при $R(x_3) \leq 0$ и $e(x_4) \leq 0$. Кроме того, с увеличением диаметра армирующих брусков происходит снижение жесткости композиционной шпалы G , а со снижением геометрического параметра e – ее увеличение во всем диапазоне их изменений.

В точках базового поля F_1 при фиксированных значениях геометрических параметров $R(x_3)$ и $e(x_4)$ наблюдаются аналогичные с предыдущим случаем (см. рисунок П8.1) влияние модуля упругости матрицы композиционной шпалы $E_m(x_2)$ на величину ΔG_{max} оказалось однозначным во всей области базового поля F_1 – градиент ΔG_{max} направлен в сторону увеличения E_m .

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНЫХ
ШПАЛ НА Ж.Д ПУТИ В ТЕЧЕНИЕ 50 ЛЕТ**

Таблица П9.1 – Воздействие на окружающую среду применения деревянных шпал
на 1 км однопутного пути в течение экономического срока службы 50 лет

Этапы		Углеродный след / кг экв. CO ₂		Общий спрос на энергию / МДж	
		Отдельные значения	Совокупные значения	Отдельные значения	Совокупные значения
Производство		87137,4	87137,4	2597779,6	2597779,6
Перевозка		914,8	88052,2	14353,8	2612133,4
Эксплуатация (лет)	1	4402,6	92454,8	-51333,2	2560800,1
	2	4402,6	96857,4	-51333,2	2509466,9
	3	4402,6	101260,0	-51333,2	2458133,6
	4	4402,6	105662,6	-51333,2	2406800,4
	5	4402,6	110065,2	-51333,2	2355467,2
	6	4402,6	114467,8	-51333,2	2304133,9
	7	4402,6	118870,4	-51333,2	2252800,7
	8	4402,6	123273,0	-51333,2	2201467,4
	9	4402,6	127675,6	-51333,2	2150134,2
	10	4402,6	132078,2	-5915,6	2098801,0
	11	4402,6	136480,8	-51333,2	2047467,7
	12	4402,6	140883,4	-51333,2	1996134,5
	13	4402,6	145286,0	-51333,2	1944801,2
	14	4402,6	149688,6	-51333,2	1893468,0
	15	4402,6	154091,2	-51333,2	1842134,8
Обновление	Утилизация	0,0	154091,2	-3638798,2	-1796663,4
	Производство	87137,4	241228,6	2597779,6	801116,2
	Перевозка	914,8	242143,4	14353,8	815469,9
Эксплуатация (лет)	16	4402,6	246546,0	-51333,2	764136,7
	17	4402,6	250948,6	-51333,2	712803,4
	18	4402,6	255351,2	-51333,2	661470,2
	19	4402,6	259753,8	-51333,2	610137,0
	20	4402,6	264156,4	-51333,2	558803,7
	21	4402,6	268559,0	-51333,2	507470,5
	22	4402,6	272961,6	-51333,2	456137,2
	23	4402,6	277364,2	-51333,2	404804,0
	24	4402,6	281766,8	-51333,2	353470,8
	25	4402,6	286169,4	-5915,6	302137,5

Окончание таблицы П9.1

Эксплуатация (лет)	26	4402,6	290572,0	-51333,2	250804,3
	27	4402,6	294974,6	-51333,2	199471,0
	28	4402,6	299377,2	-51333,2	148137,8
	29	4402,6	303779,8	-51333,2	96804,6
	30	4402,6	308182,4	-51333,2	45471,3
Обновление	Утилизация	0,0	308182,4	-3638798,2	-3593326,9
	Производство	87137,4	395319,7	2597779,6	-995547,3
	Перевозка	914,8	396234,5	14353,8	-981193,5
Эксплуатация (лет)	31	4402,6	400637,1	-51333,2	-1032526,8
	32	4402,6	405039,7	-51333,2	-1083860,0
	33	4402,6	409442,3	-51333,2	-1135193,3
	34	4402,6	413844,9	-51333,2	-1186526,5
	35	4402,6	418247,5	-51333,2	-1237859,7
	36	4402,6	422650,1	-51333,2	-1289193,0
	37	4402,6	427052,7	-51333,2	-1340526,2
	38	4402,6	431455,3	-51333,2	-1391859,5
	39	4402,6	435857,9	-51333,2	-1443192,7
	40	4402,6	440260,5	-5915,6	-1494525,9
	41	4402,6	444663,1	-51333,2	-1545859,2
	42	4402,6	449065,7	-51333,2	-1597192,4
	43	4402,6	453468,3	-51333,2	-1648525,7
	44	4402,6	457870,9	-51333,2	-1699858,9
	45	4402,6	462273,5	-51333,2	-1751192,1
Обновление	Утилизация	0,0	462273,5	-3638798,2	-5389990,3
	Производство	87137,4	549410,9	2597779,6	-2792210,7
	Перевозка	914,8	550325,7	14353,8	-2777857,0
Эксплуатация (лет)	46	4402,6	554728,3	-5915,6	-2829190,2
	47	4402,6	559130,9	-51333,2	-2880523,5
	48	4402,6	563533,5	-51333,2	-2931856,7
	49	4402,6	567936,1	-51333,2	-2983189,9
	50	4402,6	572338,7	-51333,2	-3034523,2
Утилизация (конец жизни)		0,0	572338,7	-3638798,2	-6673321,4

Таблица П9.2 – Воздействие на окружающую среду применения композиционных шпалы на 1 км однопутного пути в течение экономического срока службы 50 лет

Этапы		Углеродный след / кг экв. CO ₂		Общий спрос на энергию / МДж	
		Отдельные значения	Совокупные значения	Отдельные значения	Совокупные значения
Производство		309921,4	309921,4	8876288,0	8876288,0
Перевозка		949,5	310870,8	14897,8	8891185,8
Эксплуатация (лет)	1	4212,0	315082,8	57108,2	8948294,0
	2	4212,0	319294,8	57108,2	9005402,2
	3	4212,0	323506,8	57108,2	9062510,4
	4	4212,0	327718,7	57108,2	9119618,6
	5	4212,0	331930,7	57108,2	9176726,8
	6	4212,0	336142,7	57108,2	9233835,0
	7	4212,0	340354,7	57108,2	9290943,3
	8	4212,0	344566,6	57108,2	9348051,5
	9	4212,0	348778,6	57108,2	9405159,7
	10	4212,0	352990,6	57108,2	9462267,9
	11	4212,0	357202,6	57108,2	9519376,1
	12	4212,0	361414,5	57108,2	9576484,3
	13	4212,0	365626,5	57108,2	9633592,5
	14	4212,0	369838,5	57108,2	9690700,8
	15	4212,0	374050,5	57108,2	9747809,0
	16	4212,0	378262,4	57108,2	9804917,2
	17	4212,0	382474,4	57108,2	9862025,4
	18	4212,0	386686,4	57108,2	9919133,6
	19	4212,0	390898,4	57108,2	9976241,8
	20	4212,0	395110,4	57108,2	10033350,0
	21	4212,0	399322,3	57108,2	10090458,3
	22	4212,0	403534,3	57108,2	10147566,5
	23	4212,0	407746,3	57108,2	10204674,7
	24	4212,0	411958,3	57108,2	10261782,9
	25	4212,0	416170,2	57108,2	10318891,1
	26	4212,0	420382,2	57108,2	10375999,3
	27	4212,0	424594,2	57108,2	10433107,5
	28	4212,0	428806,2	57108,2	10490215,7
	29	4212,0	433018,1	57108,2	10547324,0
	30	4212,0	437230,1	57108,2	10604432,2
	31	4212,0	441442,1	57108,2	10661540,4
	32	4212,0	445654,1	57108,2	10718648,6
	33	4212,0	449866,0	57108,2	10775756,8
	34	4212,0	454078,0	57108,2	10832865,0

Эксплуатация (лет)	35	4212,0	458290,0	57108,2	10889973,2
	36	4212,0	462502,0	57108,2	10947081,5
	37	4212,0	466713,9	57108,2	11004189,7
	38	4212,0	470925,9	57108,2	11061297,9
	39	4212,0	475137,9	57108,2	11118406,1
	40	4212,0	479349,9	57108,2	11175514,3
	41	4212,0	483561,8	57108,2	11232622,5
	42	4212,0	487773,8	57108,2	11289730,7
	43	4212,0	491985,8	57108,2	11346839,0
	44	4212,0	496197,8	57108,2	11403947,2
	45	4212,0	500409,8	57108,2	11461055,4
	46	4212,0	504621,7	57108,2	11518163,6
	47	4212,0	508833,7	57108,2	11575271,8
	48	4212,0	513045,7	57108,2	11632380,0
	49	4212,0	517257,7	57108,2	11689488,2
	50	4212,0	521469,6	57108,2	11746596,5
Утилизация (конец жизни)		110326,7	631796,3	-3180364,4	8566232,1

АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ АПРОБАЦИИ ЭКСТРУЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛА КОМПОЗИ- ЦИОННОЙ ШПАЛЫ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор РУТ (МИИТ)
доктор технических наук
А.В. Савин
« июля 2021 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
компании ООО "ТД "Savewood"
П.А. Мороз
«19» июля 2021 г.



Акт

опытно-промышленной апробации экструзионной технологии изготовления
образцов материала композиционных шпал

С целью установления возможности производства композиционных шпал, на базе производства изделий из древеснополимерных композитов (ДПК) на технологической линии компании Savewood была выполнена опытно-промышленная апробация изготовления образцов материала композиционных шпал по экструзионной технологии.

Температура экструзии в различных зонах экструдера составляла стандартное значение для производства изделий из ДПК на основе поливинилхлорида (ПВХ) и варьировала в диапазоне от 145 до 200⁰С. Скорость экструзии также была стандартной при изготовлении изделий из ДПК и не превышала 2,0 м/мин.

Свойства материала композиционных шпал состава, отн. ед. (по массе): древесная мука – 0,436; карбонат кальция – 0,436; ПВХ – 1,0, составили средние (по выборке из шести результатов измерений) значения: средняя плотность – 1420 кг/м³; удельная ударная вязкость – 4,64 кДж/м²; прочность при консольном изгибе – 36,88 МПа; прочность при осевом растяжении – 12,67 МПа; относительное удлинение при разрыве – 4,67%; модуль упругости при растяжении – 1619 МПа; коэффициент линейного температурного расширения – 55·10⁻⁶ К⁻¹.

Заключение

По результатам опытно-промышленной апробации изготовления образцов материала композиционных шпал и определения его физико-технических свойств можно сделать заключение о возможном промышленном изготовлении таких конструкций по экструзионной технологии.

От РУТ (МИИТ):

Профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», д.т.н., с.н.с.

.....В.И. Кондращенко
«20» июля 2021 г.

Аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии»

.....ВАН Чжуан
«20» июля 2021 г.

От производства:

Главный технолог

Е.И. Романова
«19» июля 2021 г.

