



РЖД

- РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕИ
- ОБРАБОТКА РЕЛЬСОВ ПОТОКОМ ВОДЫ
- ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ОСТРЯКОВ
- КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ШПАЛ
- ДИНАМИКА ПОЕЗДОВ И СВОЙСТВА ОТТАИВАЮЩЕГО ГРУНТА
- ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПРОЧНОСТЬ РЕЛЬСОВ

путь

и путевое хозяйство

2 · 2025

НАУЧНО-
ПОПУЛЯРНЫЙ,
ПРОИЗВОДСТВЕННО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



ВЕК ПРОФЕССОРА С.П. ПЕРШИНА

Сергей Петрович Першин (1925–1998) – это имя знакомо многим инженерам-железнодорожникам. Выдающийся ученый, преподаватель, профессор, доктор технических наук, декан факультета «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство» (1968–1973 гг.), заведующий кафедрой «Строительное производство» МИИТа (1973–1994 гг.).

С.П. Першин родился 21 февраля 1925 г. в семье железнодорожника на станции Судимир Калужской области. Закончив в 1943 г. школу на станции Тихорецк (Краснодарский край), Сергей сразу ушел на фронт. Демобилизовавшись в 1947 г., он поступил на строительный факультет Московского института инженеров железнодорожного транспорта. После его окончания с 1953 по 1956 г. работал инженером, старшим инженером в Государственном институте по проектированию карьеров МПС (сейчас Проектно-изыскательский институт «Гипротранспуть»). А затем стал ассистентом на кафедре «Путь и путевое хозяйство железных дорог» МИИТа, руководимой тогда профессором Г.М. Шахунянцем.

В то время на сети российских дорог начинали внедрять бесстыковой путь, исследованием которого и занялся молодой инженер. Он изучил все известные тогда методы расчета этой конструкции и предложил свой способ учета температурных деформаций, предшествующих выбросу пути. Обоснование особенностей этого

процесса легло в основу его кандидатской диссертации на тему «Методы расчета устойчивости температурно-напряженного пути и способы ее повышения», которую он защитил в 1960 г.

В докторской диссертации на тему «Принципы и методы учета температурных воздействий при конструировании и эксплуатации рельсового пути» (1968 г.) С.П. Першин обосновал температурные воздействия как объективные условия работы бесстыкового и звеневого пути, влияющие на его прочность и устойчивость. В 1965–1973 гг., в период работы на кафедре «Путь и путевое хозяйство», он написал несколько учебных пособий по условиям и особенностям эксплуатации железных дорог в СССР, влиянию природных факторов на их деятельность, основным направлениям развития железнодорожного пути в связи с увеличением скоростей движения и грузонапряженности, а также подготовил обзор перспективных тенденций развития путевого хозяйства железных дорог мира.

После перехода в 1973 г. на должность заведующего кафедрой «Строительное производство» Сергей Петрович вел активную, напряженную научную и учебную деятельность. На протяжении двадцати лет заведования кафедрой С.П. Першин разработал и ввел в учебный план четыре новых курса: организация, планирование и управление строительным производством; введение в специальность «Строитель железных дорог»; математическое моделирование в расчетах на ЭВМ; основы научных исследований. По всем этим курсам разработаны программы, созданы учебно-методические пособия. В 1976 г. вышло в свет учебное пособие «Современное производство и транспорт СССР». Под его руководством сотрудники кафедры подготовили к печати учебник «Железнодорожное строительство: технология и механизация», который издавался дважды: в 1982 и в 1991 гг.

При Першине по-новому начали вести курсовое и дипломное проектирование. Именно тогда широко вошли в практику комплексные дипломные проекты: изыскания плюс строительное производство, путь и путевое хозяйство плюс строительное производство. Сергей Петрович предложил и ввел командную работу над дипломными проектами, подбирая для этого пять — семь студентов-дипломников.



Сергей Петрович Першин

(Окончание на с. 30)



Учредитель — ОАО «Российские железные дороги»

Научно-популярный производственно-технический журнал

Издается с января 1957 г.
(с 1936 г. по 1940 г. выходил под названием «Путеец»)

Главный редактор С.В. ЛЮБИМОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.Г. АКОПЯН, Е.С. АШПИЗ, д.т.н.,
В.П. БЕЛЬЮКОВ, д.т.н.,
Л.С. БЛАЖКО, д.т.н.,
Ю.А. БЫКОВ, д.т.н.,
Т.Н. ГОРЬКАНОВА, С.А. КОБЗЕВ,
И.Ю. КОВАЛЁВ — зам. главного редактора, А.И. ЛИСИЦЫН,
А.А. ЛОКТЕВ, д.ф.-м.н.,
А.А. МАРКОВ, д.т.н.,
В.И. НОВАКОВИЧ, д.т.н.,
О.А. ПАШЕНЦЕВА — ответственный секретарь,
А.В. САВИН, д.т.н.,
О.Б. СИМАКОВ, к.т.н.,
В.Ф. ТАНАЕВ,
В.Ф. ТАРАБРИН, к.т.н.,
М.Ю. ХВОСТИК, к.т.н.,
Т.В. ШЕПИТЬКО, д.т.н.,
А.С. ЯНОВСКИЙ

РЕДАКЦИЯ
А.Г. КЕТКИНА, И.В. МОЧАЛОВА,
Е.Ю. СТЕПАНОВА

Телефоны:
(499)262-00-56; (499)262-67-33

Адрес редакции
107996, Москва, Рижская площадь, д. 3
Телеграфный адрес: Москва, РЖ Путь
e-mail: rph@inbox.ru
Сайт: <http://pph-magazine.ru>
Электронная версия журнала: <http://elibrary.ru>;
<https://rucont.ru>; <http://www.ivis.ru/>
Аннотации статей: www.rzd-expo.ru

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-21830 от 07.09.2005

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования и Перечень ВАК

Рукописи не возвращаются.
Использование материалов возможно только с письменного согласия редакции.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов.

Подписано в печать 31.01.2025
Формат 60x84 1/8. Офсетная печать.
Заказ № 14 от 11.02.2025
Отпечатано в типографии ООО «Гран При»
152900, Ярославская область, г. Рыбинск,
ул. Орджоникидзе, 57

В НОМЕРЕ

Контроль и диагностика

Щербаков В.В., Бунцев И.А., Щербаков И.В.

и др. — Определение геометрических параметров пути по данным БПЛА с помощью технического зрения 2

Атапин В.В., Нечушкин А.С. — Возможности

ретроспективного анализа параметров рельсовой

колеи 5

Конструкции и сооружения

Шур Е.А., Федин В.М., Ронжина Ю.В. и др. —

Термическая обработка рельсов быстродвижущимся потоком воды 8

Третьяков К.И. — Повышение ресурса остряков стрелочных переводов 14

Красильников В.С. — Перспективы применения полимерных композиционных материалов для шпал.... 17

Царапов М.Н. — Влияние динамических нагрузок на формирование деформационных свойств оттаивающих грунтов 20

Абдурашитов А.Ю. — Разработка методики оценки воздействия подвижного состава на рельсы в части их прочности 24

Афанасьева Т.А., Харитоненко А.Л., Истомин С.В. — О нормативных документах на проектирование двухпутных тоннелей круглого сечения в метрополитене 27

На второй странице обложки

Шепитко Т.В., Луцкий С.Я., Спиридонов Э.С. —

Век профессора С.П. Першина 30

Проблемы и решения

Попов И.П. — Балка повышенной несущей

способности для пролетных строений мостов 32

На обложке

Первая страница — На магистралях России

Фото Широкова К.А.

УДК 625.111

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПУТИ ПО ДАННЫМ БПЛА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

ЩЕРБАКОВ В.В., Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), докт. техн. наук,
БУНЦЕВ И.А., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, канд. техн. наук,
ЩЕРБАКОВ И.В., СГУПС, канд. техн. наук, **АКИМОВ С.С.**, СГУПС, инженер, **ТИМОФЕЕВ Е.Н.**, СГУПС, аспирант

Аннотация. Цифровые технологии играют все более важную роль как в современных системах управления, так и в отрасли транспортной инфраструктуры. В статье рассмотрены достижения применения технологий технического зрения на железнодорожном транспорте, которые способствуют автоматизации управления, мониторингу путей и обеспечению безопасности. С 2017 г. СГУПС активно апробирует современные беспилотные системы и различные программные комплексы, которые также рассмотрены в данной статье. Представлены результаты исследования по автоматическому определению некоторых параметров геометрии рельсовой колеи при поддержке гранта ОАО «РЖД».

Ключевые слова: техническое зрение, геометрия рельсовой колеи, аэрофотосъемка, мониторинг, распознавание объектов, оценка точности.

Технологии технического зрения позволяют создавать системы, способные обучаться на статистических данных. Результаты обучения используются при распознавании объектов, лиц, речи и текста. Наибольшие успехи с применением технического зрения в транспортной отрасли достигнуты в беспилотных наземных, воздушных системах навигации и управления. Область применения данной технологии постоянно расширяется [1].

На железных дорогах ее применяют для решения различных задач:

- создание беспилотных поездов (техническое зрение электропоезда);
- обеспечение безопасности движения поездов;
- охранные системы (безопасность на переездах);
- мониторинг состояния пути;
- диагностика подвижного состава;
- мониторинг технического состояния электротехнических систем;
- мониторинг деятельности персонала.

Для оценки перспектив дальнейшего развития технологии технического зрения рассмотрим характерные примеры ее применения на сети.

Одно из перспективных направлений инновационного развития ОАО «РЖД» — разработка возможности использования функций автovedения, удаленного управления, беспилотного вождения («автоманистр») поездов [2, 3].

Успешный опыт внедрения технического зрения имеет компания Cognitive Pilot (дочернее предприятие Сбера и Cognitive Technologies), которая 25.01.2022 г. сообщила о начале серийного производства системы помощи машинисту маневрового локомотива на базе технологий искусственного интеллекта Cognitive Rail Pilot [4].

Одним из вариантов решения проблемы безопасности на железнодорожном переезде является детектирование объектов посредством использования алгоритмов компьютерного зрения, что позволяет выявлять определенные объекты из видеопоследовательности [5, 6].

Разработана технология применения технического зрения на железных дорогах при реализации проекта

«Цифровая железнодорожная станция» [2], в рамках которого специалистами Инской дистанции сигнализации, централизации и блокировки Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры и сотрудниками Ростовского филиала АО «НИИАС» разработан и запатентован комплекс компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей [7].

Для повышения эффективности работы сортировочных станций в 2020 г. успешно протестирован прототип сервиса «Цифровой помощник маневрового диспетчера», использующий искусственные нейросети.

Одним из новых перспективных направлений применения технического зрения является измерение геометрических размеров объектов, расстояний, высот и других параметров с помощью аэрофотосъемки и фотограмметрии. С 2017 г. СГУПС на Западно-Сибирской дороге выполняет контроль качества ремонта пути; создает цифровые модели пути в зонах затопления, деструкций различного типа; выполняет оценку соответствия поперечных профилей нормативным требованиям при паспортизации железных дорог; создает геоинформационные системы железнодорожных станций.

Для тиражирования накопленного опыта в СГУПСе ведется обучение (повышение квалификации) специалистов ОАО «РЖД» методам обработки данных и получения проектной (отчетной) документации. Данные работы выполняются по классической схеме с применением фотограмметрических методов, в основе которых лежат получение облака точек и создание ортофотоплана.

Фотограмметрические методы широко применяются при проектировании железных дорог с 1950-х годов. Эффективность и высокие технические возможности этого метода обеспечили в 1950–1970 гг. создание топографических карт всей территории России без линейных и угловых искажений, фотопланов железнодорожных станций.

В настоящее время благодаря использованию БПЛА значительно выросла экономическая эффек-

тивность фотограмметрических методов и расширились технические возможности. На железной дороге много задач, связанных с измерениями и получением данных в режиме реального времени (например, при аварийных или чрезвычайных ситуациях; мониторинге пути; определении габаритов приближения строений, дефектов верхнего и нижнего строений пути с оценкой соответствия результатов нормативным требованиям).

Классические методы, в том числе съемка и постобработка данных, создание 3D-модели местности, сооружения или цифровой модели рельефа, обеспечивают получение данных в течение определенного времени в соотношении съемки к обработке 1:7; при этом в режиме реального времени с применением традиционных технологий данные получить нельзя.

Использование системы технического зрения, компьютерного обучения цифровых данных аэрофотосъемки, возможности современных методов их обработки позволили создать технологию измерения геометрических параметров на железных дорогах в режиме реального времени и оценки их соответствия нормативным требованиям по гранту ОАО «РЖД» «Разработка системы контроля геометрических параметров на базе технического зрения и компьютерного обучения для контроля пространственных данных и геометрических параметров инфраструктуры железной дороги в режиме реального времени БПЛА» (2023 г.).

Новые технические решения позволяют отказаться от использования облака точек и постобработки данных. Компьютерное обучение позволяет создавать математическую модель объекта и при натурных измерениях распознавать образ, что обеспечивает возможность определять габариты в режиме реального времени.

Образ объекта определяется методом сопоставления [8, 9], т. е. рассматривается перемещение образа по одному положению полученных цифровых данных. В каждом текущем местоположении в процессе линейных и угловых перемещений рассчитывается метрика, показывающая, насколько искомый образ соответствует исходным (искомым) данным. Для каждого местоположения T (сопоставляемый образ) над I (полученный скан) метрика сохраняется в результате матрице R .

Каждое положение, представленное в виде пары значений x и y в матрице R размером $(W-w+1)(H-h+1)$, содержит метрику соответствия, где w и h — соответственно ширина и высота сопоставляемого образа; W и H — соответственно ширина и высота исходных цифровых данных.

Следовательно, функция для определения положения может быть выражена следующей формулой:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} (T'(x_i, y_j)I'(x+x_i, y+y_j))}{\sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} T'(x_i, y_j)^2 \sum_{i=1, j=1}^{n, m} I'(x+x_i, y+y_j)^2}},$$

где x_i, y_j — положение на искомом образе и данных лазерного сканирования.

Отдельно для каждого местоположения определяем сопоставляемый образ T и полученный скан I по следующим формулам:

$$T'(x_i, y_j) = T(x_i, y_j) - 1/(\omega h) \sum_{i=n+1, j=m+1}^{n, m} T(x_{i+1}, y_{j+1});$$

$$I'(x+x_i, y+y_j) = I(x+x_i, y+y_j) - 1/(\omega h) \sum_{i=n+1, j=m+1}^{n, m} I(x+x_{i+1}, y+y_{j+1}).$$

Данное решение позволяет с помощью технического зрения и компьютерного обучения в режиме реального времени определять геометрические параметры с использованием БПЛА. Систему может применять дорожный мастер для обнаружения дефектов и их характеристик (размеров) при текущем содержании пути и контроле выполненных ремонтных работ дистанционно. Дорожный мастер с помощью такого инструмента контроля параметров пути обеспечит оперативное получение данных с меньшими затратами.

Получение данных с использованием технического зрения и компьютерного обучения — это только одна из составляющих разрабатываемой технологии. Второй важной составляющей является обеспечение точности измерений, соответствующей нормативным требованиям, расчету для текущих данных допусков, и их сравнение с измеренными данными в режиме реального времени.

Для оценки точности на участке Иня-Восточная—Пашино Западно-Сибирской дороги создан эталонный базис протяженностью 3,2 км. Это двухпутный участок, на котором выполнены измерения высотных отметок и координат в сечениях опор контактной сети (ОКС). Высотные отметки определяли с использованием геометрического нивелирования в прямом и обратном направлениях, координаты — спутниковыми приемниками с использованием спутниковой референцной сети.

На рис. 1 показан фрагмент схемы участка с эталонными данными.

Подготовка опорной геодезической сети (ОГС) выполнена до начала аэрофотосъемки БПЛА, точки ОГС закреплены краской на ОКС, рельсах, шпалах. Аэрофотосъемка БПЛА проводилась на

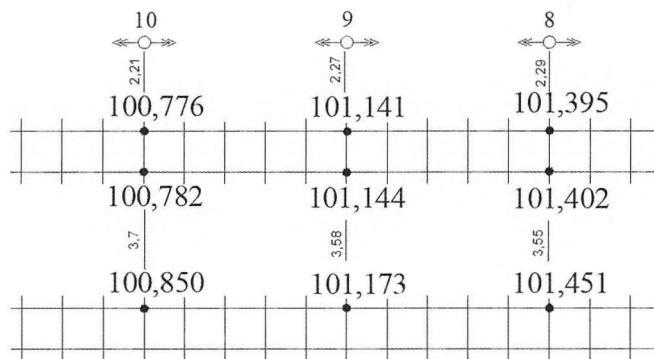


Рис. 1. Фрагмент схемы участка с эталонными данными

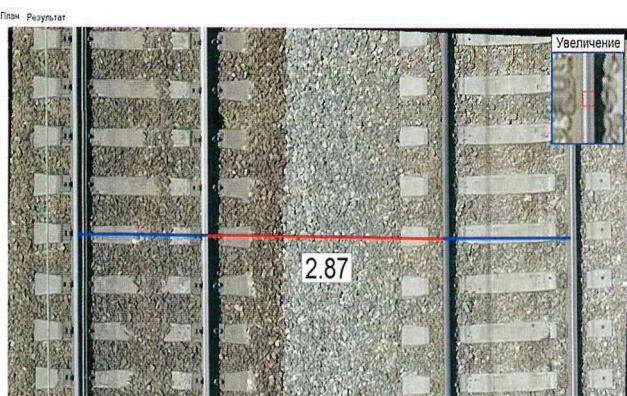


Рис. 2. Фрагмент измерения междупутья БПЛА в режиме реального времени

высоте 15, 20, 25 м; всего выполнено 19 циклов измерений в течение 30 дней.

На рис. 2 показан фрагмент измерения междупутья БПЛА в режиме реального времени с высоты аэрофотосъемки 15 м.

В таблице приведена оценка точности определения междупутья по результатам измерений БПЛА, выполненная с использованием среднеквадратичной погрешности по формуле Гаусса:

$$m = \sqrt{\frac{\sum (\Delta d)^2}{n}},$$

где Δd — разность эталонного и фактического междупутья; n — количество сечений, в которых определялись междупутья.

Из таблицы видно, что погрешность измерения междупутья на предельно низких (15 м) высотах съемки БПЛА составляет 1 см.

В течение часа дистанционно можно выполнить измерения габаритов приближения строений, получить данные для мониторинга оползней, деструкций и оценку дефектов на участке пути до 10 км.

Влияние параметров съемки на точность определения междупутья

Высота съемки, м	Количество циклов измерений	Количество сечений	Погрешность определения междупутья, см
15	9	10	1
20	5	10	2
25	5	10	3

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR DETERMINING GEOMETRIC PARAMETERS OF RAILWAY TRACK USING TECHNICAL VISION BASED ON DATA FROM UNMANNED AERIAL SYSTEMS

Shcherbakov Vladimir — Dr. Sci., Professor, Head of Department «Engineering Geodesy», Siberian State University of Railway Transport. Novosibirsk, Russia. SPIN-code: 3182-4010. vvs@stu.ru

Buntsev Ivan — Ph.D., Associate Professor, Department «Mathematical Modelling and Digital Development of Business Systems», Siberian State University of Telecommunications and Informatics. Novosibirsk, Russia. SPIN-code: 7422-2812.

Scherbakov Ivan — Ph.D., Senior Researcher, Research Laboratory «Diagnostics of Road Pavements and Earth Bed», Siberian State University of Railway Engineering. Novosibirsk, Russia. SPIN-code: 1552-9570.

Akimov Sergey — Engineer, Research Laboratory «Diagnostics of Road Pavements and Earth Bed», Siberian State University of Railway Engineering. Novosibirsk, Russia. SPIN-code: 8410-1916.

Timofeev Egor — Postgraduate Student, Department «Engineering Geodesy», Siberian State University of Railway Transport. Novosibirsk, Russia. SPIN-code: 6459-7131.

Abstract. Digital technologies play an increasingly important role in modern control systems as well as in the transport infrastructure industry. This article discusses the advances in the application of vision technologies in railway transport, which contribute to control automation, track monitoring and safety. Since 2017, Siberian State University of Railway Transport has been actively testing modern unmanned systems and various software systems, which are also discussed in this article and the results of a study on the automatic determination of some rail track geometry parameters are presented, supported by a grant from Russian Railways.

Keywords: technical vision, track geometry, aerial photography, monitoring, object recognition, accuracy assessment.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует прикладной характер применения системы технического зрения для автоматизированного контроля геометрических параметров пути с использованием БПЛА. Разработанный подход позволяет в режиме реального времени получать точные данные о плане пути, обнаруживать отступления и оценивать их размеры, что обеспечивает оперативность и эффективность контроля.

Список источников

1. Сычугов А.Н., Михайчиков В.Н., Чернышов М.В. Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 2. С. 478–491.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018. № 769/р. URL: <https://www.irkups.ru>
3. Машинное зрение на железнодорожном транспорте (РЖД): Cognitive Rail Pilot. URL: <https://rzddigital.ru/technology/mashinnoe-zrenie>
4. Cognitive Rail Pilot. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> /Продукт: Cognitive_Rail_Pilot?ysclid=lfwl90xh5o174644139_tadviser.ru
5. Электротехнический комплекс для предупреждения аварийных ситуаций на железнодорожных переездах: пат. № 94202 / Чижма С.Н., Ананьева Н.Г.; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. № 2010102685/22; заявл. 27.01.2010; опубл. 20.05.2010.
6. Альтман Е.А., Ананьева Н.Г., Тихонова Н.А. Применение алгоритмов компьютерного зрения для детектирования объектов на железнодорожном переезде // Известия Транссиба. 2016. № 1 (15). С. 70–76.
7. Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов / А.Е. Хатламаджян, И.А. Ольгейзер, А.В. Суханов, В.В. Борисов // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 3. С. 8–11.
8. Щербаков В.В. Исследование мобильного лазерного сканера «Сканпуть» при определении геопространственного положения железнодорожного пути // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 2. С. 98–108.
9. Зачатейский Н.Д., Аржанников А.А., Альтман Е.А. Совершенствование метода «выделения фона» для нахождения подвижных объектов на железнодорожном переезде с помощью компьютерного зрения // Известия Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 74–80.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ



АТАПИН В.В., Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), канд. техн. наук,
НЕЧУШКИН А.С., ПривГУПС, аспирант

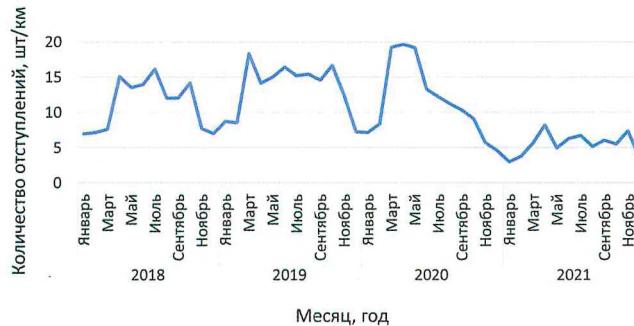
Аннотация. В статье рассмотрен ретроспективный анализ состояния геометрии рельсовой колеи, основанный на измерительной информации диагностических средств. Для детального изучения состояния отдельных локальных участков пути, а также планирования ремонтов на краткосрочную и среднесрочную перспективу авторами разработана тепловая карта накопления отступлений. Приведены примеры тепловых карт как по общему количеству отступлений, так и по отдельным геометрическим параметрам. Предложен алгоритм прогнозирования изменения состояния геометрии рельсовой колеи.

Ключевые слова: диагностика, ретроспективный анализ, геометрия рельсовой колеи, отступления, планирование, пропущенный тоннаж, прогнозирование, эксплуатационный ресурс, период времени.

Пассажирские и особенно грузовые перевозки стремительно развиваются, при этом растут нагрузки на железнодорожный путь и искусственные сооружения. В связи с этим элементы верхнего и нижнего строения пути подвержены сильному износу, что приводит к их деградации, появлению нежелательных отступлений и дефектов.

Оценка параметров геометрии рельсовой колеи, степени отступления их от номинальных значений, периодичность и порядок контроля главных и станционных путей осуществляется согласно Инструкции [1].

Для ретроспективного анализа деградации рельсовой колеи была выбрана дистанция пути, где рассмотрена частота развития отступлений II, III и IV степеней, входящих в качественную и качественную оценку колеи [2, 3]. На рисунке представлен график изменения основных геометрических параметров на 1 км пути по месяцам за 2018–2021 гг. Деградационные процессы в целом по дистанции пути происходят из-за роста пропущенного тоннажа, влияния природно-климатических факторов, подвижного состава и сезонных изменений. На графике отчетливо видны ежегодно появляющиеся характерные изменения, связанные с ростом от-



Общая динамика развития деградационных процессов в период 2018–2021 гг.

ступлений в весенне-летний период [4].

Однако задачи путевого комплекса требуют более детального анализа состояния отдельных локальных участков пути для рационального планирования ресурсов, а также возможности прогнозирования изменения их состояния на ближайшую и среднесрочную перспективу [5].

В табл. 1 представлена тепловая карта накопления отступлений по основным геометрическим параметрам рельсовой колеи за шестилетний период эксплуатации одного из участков длиной 16 км. Тепловая карта представляет собой графическое отображение данных (отступлений) при помощи цвета в зависимости от заданных уровней оценки и степени риска.

В табл. 1 наблюдается рост отступлений в весенне-летний период, а заметный спад — в осенне-зим-

Таблица 1
Тепловая карта накопления общего количества отступлений, шт., в геометрии рельсовой колеи

Месяц	Год					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Январь	81	118	59	82	59	0
Февраль	76	89	55	80	3	25
Март	135	116	111	104	78	43
Апрель	161	156	143	93	53	25
Май	178	142	121	89	62	19
Июнь	129	185	158	63	48	19
Июль	128	178	115	56	49	31
Август	74	97	64	75	59	19
Сентябрь	105	105	131	55	81	26
Октябрь	78	134	74	82	84	29
Ноябрь	76	131	70	77	45	30
Декабрь	92	97	77	47	66	21

Приложение: ячейки красного цвета — максимальное накопление отступлений, оранжевого — предельное, желтого — среднее, зеленого — минимальное.

ний [6]. Данную зависимость можно объяснить температурными изменениями, которые происходят в рельсовой колее, оттаиванием балласта и земляного

полотна. Поэтому в весенне-летний период необходимо детально обследовать путь и планировать объемы основных работ по устранению неисправностей, замены элементов верхнего и нижнего строения пути. Задачей осенне-зимнего периода является сохранение и поддержание проектного положения рельсовой колеи.

Таблица 2

Тепловая карта накопления отступлений, шт., по параметру «Уширение» за 2018–2021 гг.

Год	Месяц	Номер километра															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2018	Январь	3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Февраль	6	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Март	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Апрель	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
	Май	11	0	3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0
	Июнь	5	16	32	12	4	0	0	0	0	0	6	0	2	3	0	0
	Июль	0	5	13	5	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Август	0	0	5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сентябрь	3	3	2	10	3	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Октябрь	1	0	2	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ноябрь	2	0	2	5	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Декабрь	4	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	11	0	0	0
2019	Январь	4	0	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	13	0	0	0
	Февраль	3	3	2	0	1	0	0	0	0	0	5	0	16	4	0	0
	Март	1	4	0	0	3	0	0	0	0	0	5	0	4	1	0	0
	Апрель	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	5	0	0	0
	Май	3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	6	0	0	0
	Июнь	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	7	0	0	0
	Июль	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0
	Август	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сентябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0
	Октябрь	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0	0	0
	Ноябрь	1	3	0	0	4	0	0	0	0	0	2	0	5	0	0	0
	Декабрь	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0
2020	Январь	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	2	1	0	0
	Февраль	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Март	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Апрель	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Май	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Июнь	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Июль	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0
	Август	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Сентябрь	0	2	0	0	16	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	Октябрь	5	9	2	0	6	0	0	0	0	0	4	1	1	1	0	0
	Ноябрь	1	1	2	0	6	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	Декабрь	9	6	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	3	0	0
2021	Январь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Февраль	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Март	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Апрель	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Май	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Июнь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Июль	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Август	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Сентябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Октябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ноябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Декабрь	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для более детального анализа изменения рельсовой колеи авторами разработаны и представлены тепловые карты по каждому виду отступлений на рассматриваемом участке.

Отступления параметра «Ширина колеи (шаблон)» характеризуют расстояние (расположение) между внутренними рабочими гранями головок рельсовых нитей. Данный параметр обладает двумя видами отступлений: «Уширение» и «Сужение».

В табл. 2. представлена тепловая карта накопления отступлений по параметру «Уширение» за 2018–2021 гг., на которой можно проследить развитие отступлений на километрах № 1, 2, 3, 4, 5, 11, 13, 14. Пиковое значение приходится на километр № 3 и достигает 32 отступлений, однако после достижения данного значения наблюдается существенный спад до 13 шт/км, что в свою очередь может говорить о проведении мероприятий по устранению неисправностей данного вида.

Аналогичная тепловая карта составлена для рассматриваемого участка по параметру «Сужение», на которой путь практически не имеет отступлений, а их пик (16 шт/км) зафиксирован на километре № 1 в сентябре 2018 г.

При оценке рельсовой колеи в горизонтальной плоскости (в плане) особый интерес представляет контроль отступлений по параметру «Рихтовка» при длине неровности пути до 20 м включительно и более 20 м до 40 м. С введением новой инструкции [1] учитывают изменения положения пути в плане для скоростных и высокоскоростных линий, где установленные скорости движения поездов более 140 км/ч, и дополнительно определяют отступления в плане длиной до 60 м.

Более того, оценке подлежат наружные нити круговых и переходных кривых, а в прямых участках — рихтовочные нити, однако отступления IV степени в прямой измеряют по обеим нитям.

На стрелочном переводе отклонения фиксируют по нити без крестовины, а по боковому пути — по обеим нитям при $R < 1000$ м.

Таким образом, с учетом всех возможных факторов отступления по параметру «Рихтовка» оценивать сложнее.

При первоначальном анализе тепловой карты накопления отступлений по параметру «Рихтовка» без дифференциации по указанным выше факторам было отмечено, что наибольшее количество отклонений наблюдалось в июне 2017 г. на километре № 14 и составляло 12 шт. Благодаря выправочным работам, их число уменьшилось до 3 шт., что подтвердили данные автоматизированной системы дистанции пути. На остальных участках количество отступлений не превысило 6 шт./км.

Отступления по параметрам «Уровень», «Перекос» и «Просадка» в существенной мере характеризуют изменения, которые свойственны нижнему строению пути и происходящим в нем процессам. Оно воспринимает большие нагрузки, передающиеся от колес подвижного состава на рельсы, промежуточные рельсовые скрепления, шпалы, балластный слой, вследствие чего возникают повышенные напряжения, что дополнительно усугубляется влиянием природно-климатических факторов. Деградация нижнего строения пути возникает по причине развития дефектов, таких как пучины и весенние просадки, оползания и сплывы откосов, оседания, выпирания, обвалы и др.

На развитие отступлений «Уровень», «Перекос» и «Просадка» влияет также состояние шпал, их дефектность и кусты негодных шпал.

Проведенный анализ тепловых карт по параметрам «Уровень», «Перекос» и «Просадка» показал следующие пиковые значения отступлений:

по параметру «Уровень» на километрах № 7, 14, 15, 16 — 7 шт./км;

по параметру «Перекос» на километре № 2 — 14 шт./км, а также на километре № 14 — 16 шт./км;

по параметру «Просадка» на километре № 2 — 20 шт./км, а также на километре № 14 — 30 шт./км.

На километре № 2 максимальное количество отступлений отмечалось в 2016 г. в весенне-летний период, тогда как на километре № 14 — в мае—июле. Далее на обоих этих километрах путь привели в стабильное состояние и количество отступлений существенно сократилось.

Однако на сокращение отступлений потребовалось почти 12 мес, что говорит о нестабильном состоянии колеи или проблемах, которые связаны с содержанием нижнего строения пути.

Состояние геометрии рельсовой колеи на других километрах также имеет максимальное значение отступлений в весенне-летний период. Наибольшее ухудшение было отмечено на километрах № 2 и 14, где преобладали отступления по параметрам «Уровень», «Перекос» и «Просадка», о чем свидетельствовала общая тепловая карта накопления отступлений всех параметров геометрии рельсовой колеи на километрах № 1–16.

Заключение. Развитие современных средств диагностики и использование полученных ими данных

позволяют создавать методы предиктивной аналитики для определения деградации рельсовой колеи и предотказного состояния пути. Решить данную задачу позволяют тепловые карты накопления изменений пути. На их основе можно наглядно и с высокой степенью достоверности построить деградационные модели фактического состояния пути не только по результатам одной проверки, но и во времени. Определение функциональных зависимостей данных моделей и учет различных технических показателей пути — первоочередная задача авторов в этой работе.

Не менее важным является создание алгоритма прогнозирования изменения состояния геометрии рельсовой колеи, который позволит учитывать эксплуатационные показатели [7, 8, 9].

На начальном этапе предлагается определить эксплуатационный ресурс рассматриваемого элемента или параметра рельсовой колеи за период эксплуатации t по следующей формуле:

$$\tau_{ti} = \sum_i \Omega_i t_i,$$

где Ω_i — фактический ресурс рассматриваемого элемента или параметра рельсовой колеи, выраженный в количестве отступлений за одну проверку;

t_i — период времени от момента первоначальной укладки пути до исчерпания ресурса.

Прогнозный период времени от первоначальной укладки пути до момента, когда фактическая величина его ресурса перейдет в предотказное состояние, вычисляют следующим образом:

$$[t_i] = [\tau_{ti}] / \Omega_i,$$

где τ_{ti} — прогнозное значение эксплуатационного ресурса элемента или параметра рельсовой колеи по какому-либо отказу.

Значение τ_{ti} предполагается вычислять на основе полученных статистических данных о состоянии геометрии рельсовой колеи и математического моделирования, а также лабораторных исследований.

При статистическом анализе фактических отказов период времени должен определяться на основании данных о пропущенном тоннаже, а также учете типов обращающихся подвижных единиц, осевых нагрузок и грузонапряженности по следующей формуле:

$$[t_i] = T_i / P_i,$$

где T_i — тоннаж, пропущенный по рассматриваемому участку до момента появления отказа или неисправности;

P_i — средняя осевая нагрузка на рассматриваемом участке.

В дальнейшем по накопленным тепловым картам, отражающим изменения состояния геометрии рельсовой колеи, будут построены деградационные модели и в первом приближении выполнен расчет эксплуатационного ресурса каждого из геометрических параметров [10].

Список источников

- Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р (в ред. от 01.04.2021).

УДК 621.785

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЛЬСОВ БЫСТРОДВИЖУЩИМСЯ ПОТОКОМ ВОДЫ

ШУР Е.А., АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ), докт. техн. наук,
ФЕДИН В.М., Российской университет транспорта (МИИТ), докт. техн. наук,
РОНЖИНА Ю.В., ВНИИЖТ, канд. техн. наук, ЧЕРНЫШЕВ К.А., МИИТ, канд. техн. наук

Проведенная на рельсопрокатных заводах России и ряда других стран коренная реконструкция производства позволила существенно повысить ресурс рельсов в условиях роста грузонапряженности, осевых нагрузок и значительной доли кривых участков пути. Однако достигнутых результатов для современных условий эксплуатации сети ОАО «РЖД» уже недостаточно. Ставится задача дальнейшего повышения ресурса рельсов. Перспектива увеличения их работоспособности изучена в настоящее время недостаточно и требует проведения широких исследований. Это в полной мере относится к совершенствованию технологии упрочняющей термической обработки рельсов и, в частности, к закалке быстродвижущимся потоком воды с получением маргансита и его последующим отпуском (самоотпуском).

Половека назад в период массового внедрения упрочняющей термической обработки рельсов в качестве оптимальной структуры для них был выбран сорбит закалки, получающийся при одинарной термической обработке при непосредственном распаде аустенита на ферритоцементитную смесь с пластинчатой формой карбидов [1]. Этот выбор сохранил свою актуальность при всем разнообразии технологий охлаждения на разных рельсопрокатных заводах мира (воздушным потоком, погружением в раствор полимера, водовоздушной смесью и др.).

Однако при использовании воды для закалочного охлаждения рельсов на глубине действия максимальных напряжений metallurgi получали при контактном нагружении разнотипную структуру (переход от

2. Нечушкин А.С., Атапин В.В. Ретроспективный анализ деградации рельсовой колеи // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 5 (101). С. 45–54. EDN: QJFSZD.

3. Бельтюков В.П. Стратегия технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути // Инновационные методы управления техническим обслуживанием железнодорожного пути: сборник трудов научно-практического семинара. СПб.: ПГУПС, 2022. С. 5–12. EDN: XIQZSK.

4. Атапин В.В., Нечушкин А.С. Исследование деградационных процессов геометрии рельсовой колеи — путь к прогнозированию состояния верхнего строения пути // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 2 (92). С. 31–37. EDN: JFFGMY.

5. Бельтюков В.П., Симонюк И.А., Андреев А.В. Оптимизация среднесрочного планирования ремонтов железнодорожного пути // Железнодорожный транспорт. 2013. № 9. С. 47–50. EDN: RBWDDN.

6. Атапин В.В., Нечушкин А.С. Анализ состояния геометрии рельсовой колеи в зависимости от времени года // Наука и образование транспорту. 2022. № 2. С. 156–158. EDN: OYGBPI.

7. Прогнозирование и оптимизация затрат — основа

планирования ремонтов / В.П. Бельтюков, И.А. Симонюк, А.В. Андреев, А.В. Сенникова // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 2. С. 16–20. EDN: RZPPVL.

8. Атапин В.В., Нечушкин А.С. Обеспечение безопасности движения поездов с применением ретроспективного анализа состояния геометрии рельсовой колеи // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. Часть 1. Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2022. С. 300–302. EDN: WEKGEE.

9. Бельтюков В.П. Принципы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути // Инфраструктура транспорта. 2022. № 1 (3). С. 65–78. EDN: OESAOX.

10. Суслов О.А. Цифровые двойники — как основа принятия решений на железнодорожном транспорте // Материалы первой международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы». Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), 2022. С. 145–152. EDN: RLXDCU.

THE POSSIBILITIES OF RETROSPECTIVE ANALYSIS OF TRACK GAUGE PARAMETERS

Atapin Vitaliy — Ph.D., Associate Professor, Head of the department «Railway track and Construction», Volga State Transport University. Samara, Russia. atapin@samgups.ru

Nechushkin Alexander — Postgraduate of the department «Railway track and Construction», Volga State Transport University. Samara, Russia. a.s.nechuga@gmail.com

Abstract. The article considers a retrospective analysis of the state of the geometry of the rail track, based on the measurement information of diagnostic tools. For a detailed study of the condition of individual local sections of the track, as well as planning repairs for the short and medium term, the authors have developed a heat map of the accumulation of deviations. Examples of heat maps are given both for the total number of deviations and for individual geometric parameters. An algorithm for predicting changes in the state of the geometry of the rail track is proposed.

Keywords: diagnostics, retrospective analysis, track geometry, departure, planning, missed tonnage, forecasting, operational life, time period.

сорбита отпуска к сорбиту закалки), что снижало сопротивление контактной усталости. Этому же способствовало и наличие скоплений неметаллических включений в рельсовой стали. В итоге продольные контактно-усталостные дефекты зарождались на некоторой глубине от поверхности катания, а не на самой поверхности головки, как это происходит в настоящее время.

В более общем виде требование к структуре металла закаленных рельсов можно сформулировать как необходимость ее однородности на всей глубине действия контактных напряжений — примерно 10 мм от поверхности катания. Это позволяет использовать для охлаждения интенсивный поток воды с получением после самоотпуска структур типа сорбита отпуска на глубине, перекрывающей глубину действия максимальных контактных напряжений. Такая технология существенно повысит величину остаточных напряжений, что должно благоприятно сказаться на контактно-усталостной долговечности рельсов. В отличие от одинарной термической обработки, после которой максимальная твердость рельсов не превышает НВ 420–440, при двойной термической обработке через мартенсит ее можно повысить до НВ 450–480, что благотворно отразится на ресурсе рельсов, ограничиваемым сопротивлением контактной усталости и износом. Причем такую повышенную твердость можно получить не на рельсах из заэвтектоидной стали, где сохраняется опасность образования структурно-свободного цементита по границам зерен и, как следствие, охрупчивания, а на рельсах с эвтектоидным содержанием углерода.

Перед постановкой новых научно-исследовательских работ по интенсивному закалочному охлаждению рельсов быстровдвижущимся потоком воды целесообразно обобщить результаты ранее проведенных исследований [2, 3, 4].

Технологические аспекты закалки быстровдвижущимся потоком воды. Основные технологические особенности закалочного охлаждения рельса быстровдвижущимся потоком воды приведены в [2]. Сущность технологии заключается в следующем. Равномерно нагретый по сечению рельс подается в сектор закалочного охлаждения, где его головка и нижняя часть подошвы охлаждаются потоком воды, движущимся со скоростью выше 5 м/с. Подача воды на упрочняемые части рельса выполняется под углом 45° и в дальнейшем корректируется в соответствии с рекомендациями [4]. Подача быстровдвижущегося потока под определенным углом и жесткие экраны исключают попадание воды на шейку (рис. 1). При более совершенной системе раздачи воды и корректировке углов подачи необходимость в экранах отпадает. За счет тепла шейки реализуется процесс самоотпуска. Прямошлинейность рельса обеспечивает-

ся подачей воды в определенном соотношении на головку и подошву.

Реализация такой системы закалочного охлаждения и самоотпуска обеспечивает получение прочного и пластичного упрочненного слоя. При этом на стали М76В может быть получена большая твердость и прочность по сравнению с одинарной закалкой в масле и водном растворе полимера. Также может быть достигнут существенно более высокий уровень сжимающих напряжений в упрочненном слое головки и подошвы рельса, что положительно отразится на износстойкости, усталостной и контактно-усталостной прочности. Влияние остаточных напряжений может быть выявлено только при испытаниях полно-профильных рельсовых проб. Лабораторные испытания роликов, вырезанных из рельса, на износ не могут оценить влияния остаточных напряжений, так как вырезка образцов из полнофильного рельса приводит к перераспределению напряжений. К настоящему времени определено установлено положительное влияние сжимающих остаточных напряжений на сопротивление усталости при изгибе. Вопрос влияния остаточных сжимающих напряжений на износстойкость и контактно-усталостную прочность рельсовой стали недостаточно изучен, хотя может стать еще одним источником экономической эффективности в работе системы «колесо—рельс».

Современная система контроля и регулирования подачи воды на головку и подошву рельса позволяет решить две задачи — получение высокой твердости на необходимой глубине с учетом допуска на износ головки и оптимальное распределение внутренних остаточных напряжений по сечению рельса, а именно: сжимающие напряжения в головке и подошве компенсируются растягивающими напряжениями в шейке. Эти задачи решаются при уровне твердости в головке НВ 450–480 и обеспечивают преимущество по сравнению с сорбитизацией при закалке в потоке воздуха, водовоздушной смесью или в растворе полимера.

Результаты экспериментов. Отработку технологии закалочного охлаждения быстровдвижущимся потоком воды проводили на рельсах типа Р65 из стали марки М76В.

Выбор режима закалочного охлаждения определяли соотношением объемов подаваемой воды через верхнее и нижнее охлаждающие устройства. Время закалочного

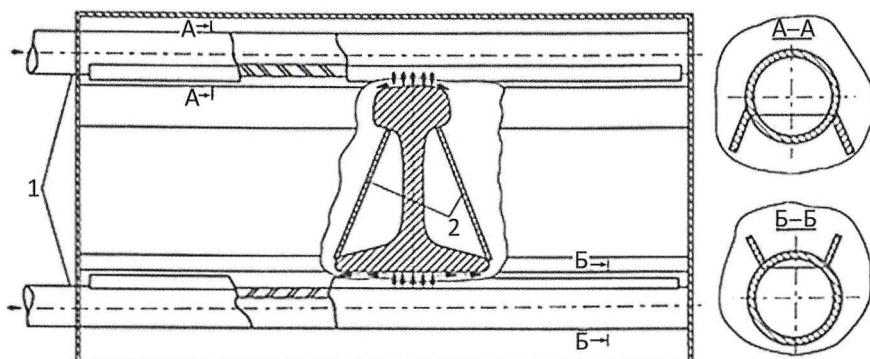


Рис. 1. Схема устройства закалочного охлаждения рельса быстровдвижущимся потоком воды:

1 — верхняя и нижняя системы подачи воды; 2 — защитные экраны



Рис. 2. Макроструктура на поперечном темплете рельса типа Р65 после закалки быстродвижущимся потоком воды. Конфигурация упрочненного слоя рельса охватывает всю поверхность головки и аналогично на подошве, без выхода на перо

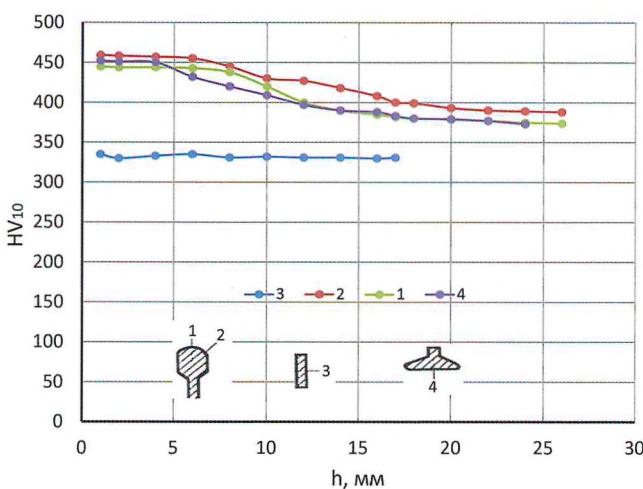


Рис. 3. Твердость по сечению в различных зонах рельсовой пробы после закалки быстродвижущимся потоком воды и отпуска при времени закалочного охлаждения 135 с:
1 — поверхность катания; 2 — выкружка; 3 — шейка; 4 — подошва

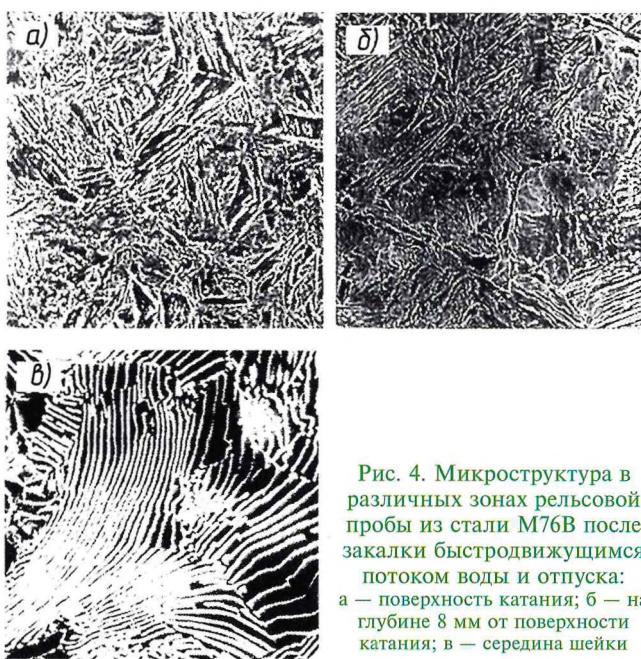


Рис. 4. Микроструктура в различных зонах рельсовой пробы из стали М76В после закалки быстродвижущимся потоком воды и отпуска:
а — поверхность катания; б — на глубине 8 мм от поверхности катания; в — середина шейки

охлаждения составляло от 15 до 135 с. Макроструктуру выявляли после травления на темплетах без отпуска (рис. 2).

Результаты замера твердости на рельсовой пробе из стали М76В, закаленной быстродвижущимся потоком воды по варианту охлаждения 135 с, показаны на графиках рис. 3.

Для представления характера изменения твердости по сечению рельсовой пробы приведены значения при охлаждении 135 с. Установлено, что при времени закалочного охлаждения менее 105 с уменьшается толщина упрочненного слоя. При увеличении времени свыше 135 с сохраняется высокая температура шейки. Это позволяет компенсировать возникающие при закалке напряжения и деформации, сохраняя прямолинейность рельса, а также способствует процессу самоотпуска в головке и подошве.

Исследование микроструктуры. Микроструктура металла в различных зонах рельса после закалки быстродвижущимся потоком воды и отпуска представляет следующую картину. Вблизи поверхности катания она соответствует дисперсной ферритокарбидной смеси типа троостосорбита с ориентацией фаз по бывшим мартенситным кристаллам (рис. 4, а). В головке рельса на глубине 8 мм от поверхности катания и более игольчатость структуры выражена заметно слабее (рис. 4, б). В данной зоне наряду с мартенситной составляющей присутствуют продукты непосредственно го распада аустенита (троостит закалки). Микроструктура в середине шейки (рис. 4, в) имеет явно выраженное пластинчатое строение тонкого перлита.

Оценка механических свойств и ударной вязкости. Механические свойства и ударную вязкость по сечению рельсовых проб после закалки быстродвижущимся потоком воды и отпуска выполняли на образцах, вырезанных согласно схеме, приведенной на рис. 5. Результаты испытаний сравнивали с результатами, полученными при закалке рельсов в масле с последующим отпуском.

Анализ типовых механических показателей, представленных в таблице (предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , ударная вязкость KCU) показывает, что применение быстродвижущегося потока воды

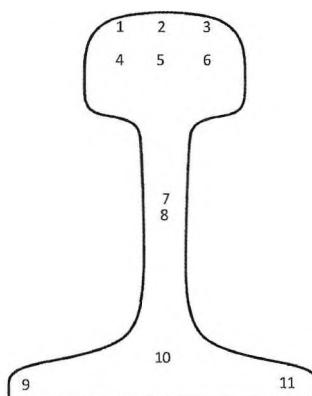


Рис. 5. Схема вырезки образцов из рельсовых проб для определения механических свойств

в качестве закалочной среды обеспечивает более высокий уровень прочностных свойств в головке и подошве рельсов при сохранении удовлетворительной пластичности и ударной вязкости.

При моделировании и апробации режимов закалочного охлаждения быстродвижущимся потоком воды с использованием тепла прокатного нагрева (закалочное охлаждение с 1100 °C) не выявлено принципиально новых результатов по сравнению с отдельным нагревом.

В перспективе с целью уменьшения мощности гидравлических насосов была рассмотрена замена схемы закалочного устройства, использующего прямоточное движение воды (поток) на головку и подошву, на схему с применением душирования. Из [5] известно, что при переходе подачи воды от потока к душированию происходит значительное увеличение коэффициента теплоотдачи.

Износостойкость. Испытания по оценке износостойкости проводили двумя способами:

по Шпинделю на образцах из поверхностного слоя головки;

на машине, моделирующей качение колеса по кривой, на образцах из различных зон головки с различной твердостью.

Рельсовые ролики, вырезанные на глубине 10 мм, испытывали в паре с колесными, вырезанными на глубине 30 мм (твердость 270–290 НВ). Рельсовые ролики из поверхностных слоев испытывали в паре с колесными, вырезанными на глубине 10 мм от поверхности катания (твердость 310–325 НВ).

Испытания показали, что износостойкость опытных рельсов выше, чем стандартных, как у поверхности, так и на глубине. На поверхности опытных рельсов имеется слой сорбита отпуска с зернистой формой карбидов. В технической литературе [6] существует устоявшееся мнение, что износостойкость зернистых структур рельсовой стали ниже, чем пластинчатых, имеющих ту же твердость. В связи с этим поверхностный слой опытных рельсов обрабатывался на большую твердость, чем стандартных (390–400 НВ вместо 380 НВ), и соответственно, характеризовался большей дисперсностью сорбита. При этом износостойкость не только не понизилась, но и оказалась выше на 12 % даже в паре с более твердыми колесными роликами (325 НВ).

Оценка остаточных напряжений на рельсовых пробах. Оценку остаточных напряжений проводили по расхождению паза по нормативной документации на рельсы и с помощью тензодатчиков. Обе методики показали более благоприятный уровень остаточных напряжений для эксплуатационного содержания рельсов при закалке быстродвижущимся потоком воды. На рельсовых пробах после этой закалки схождение

Механические свойства рельсов после различных режимов термообработки

Режим охлаждения при закалке (см. рис. 5)	№ образца	σ_b , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
Стандартный (в масле)	1–3	1259	931	10,8	36,0	25–26
	7, 8	1182	848	12,7	36,0	9–20
	9–11	1186	820	10,7	38,6	9–26
Быстродвижущийся поток поды, время охлаждения 105 с	1, 3, 4, 6	1325	1110	10,0	33,3	15–24
	2	1186	965	11,0	36,0	30
	5	1189	847	12,4	33,3	31
	7, 8	986	611	13,1	34,7	13–25
	10	1185	849	12,5	41,2	31
	9–11	1301	998	10,8	38,6	24–34
То же, время охлаждения 120 с	1, 3, 4, 6	1390	1013	11,8	36,0	25–33
	7, 8	901	695	12,0	34,0	29–30
	10	1121	811	13,6	43,7	31
То же, время охлаждения 135 с	1–3	1330	1111	9,8	29,2	21–22
	5	1268	923	10,9	36,0	27
	7, 8	986	639	13,4	33,3	15–17
	10	1204	871	12,0	42,5	22

паза не было менее 5 мм. Вторая методика дает значительно больший уровень информации по характеристике распределения остаточных напряжений по периметру рельса.

На рис. 6 представлены результаты замера остаточных напряжений после объемной закалки рельса в масле с отпуском и после закалки быстродвижущимся потоком воды. Анализ показывает, что во втором случае создается более благоприятная эпюра внутренних остаточных напряжений, а в головке и подошве формируются напряжения сжатия, что должно положительно отразиться на усталостной прочности и износостойкости.

Усталостная прочность рельсовых проб. Важным критерием работоспособности рельсов является усталостная прочность. Для оценки влияния концентраторов напряжений, а также во избежание перегрузки пульсатора на рельсовые пробы длиной 600 мм нанесли поперечный надрез глубиной 2,5 мм с радиусом у вершины 0,8 мм. За базу испытаний принимали 2 млн циклов нагружения. Режим нагружения — асимметричный знакопостоянный цикл с коэффициентом асимметрии $R\sigma = 0,1$. Расстояние между опорами — 500 мм. Нагрузка по схеме трехточечного изгиба прикладывалась к подошве, т. е. рельс располагался головкой вниз.

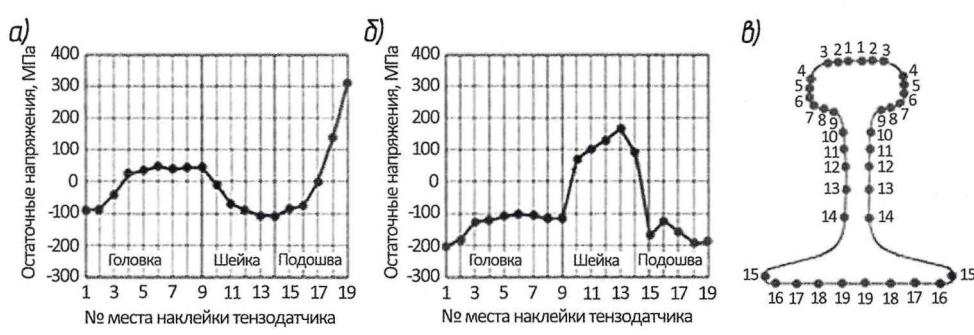


Рис. 6. Остаточные напряжения на поверхности в различных зонах рельсов после объемной закалки в масле с отпуском (а), быстродвижущимся потоком воды с отпуском (б) и сечение рельса с местами установки тензодатчиков (в)

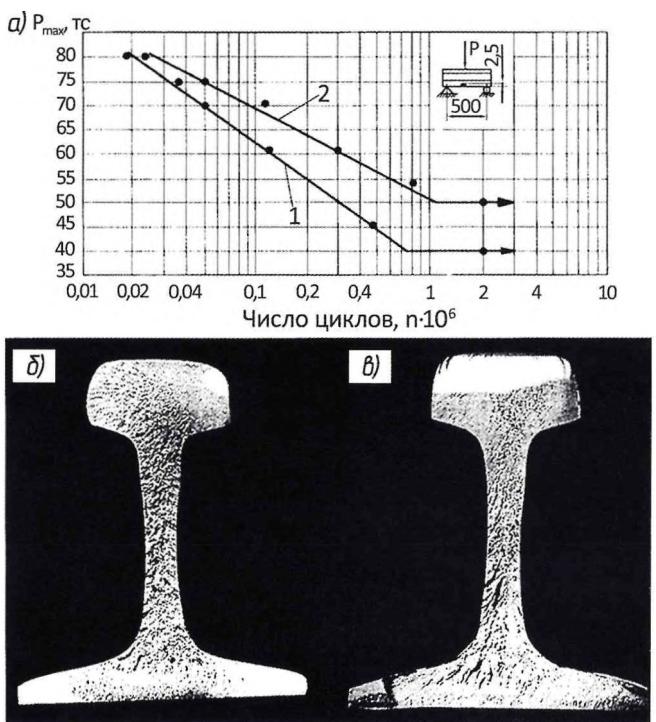


Рис. 7. Циклическая долговечность (а) и типичная макроструктура изломов рельсовых проб из стали М76В после объемной закалки в масле (1) (б) и быстродвижущимся потоком воды (2) (в); в обоих вариантах — отпуск

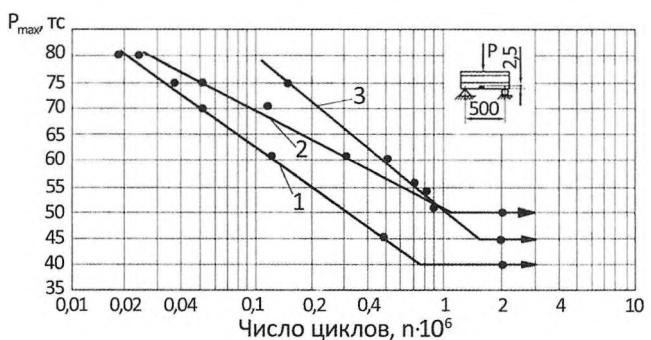


Рис. 8. Циклическая долговечность рельсовых проб из стали М76В после закалки в масле (1), быстродвижущимся потоком воды с отдельного нагрева с температурой 900 °С (2) и быстродвижущимся потоком воды с прокатного нагрева с температурой 1000 °С (3); отпуск во всех вариантах



Рис. 9. Три характерных усталостных излома рельсовых проб после непрерывно-последовательной закалки быстродвижущимся потоком воды с температурой 1000 °С и последующего отпуска

Анализ результатов, приведенных на рис. 7, а, показывает, что применение закалки быстродвижущимся потоком воды при испытаниях образцов с концентратором напряжений повышает предел выносливости рельсов Р65 с 40 (при закалке в масле) до 50 тс.

По глубине распространения трещины на изломах видно (рис. 7, б, в), что живучесть рельсовой пробы значительно выше после закалки быстродвижущимся потоком воды. Усталостная трещина распространяется фактически до середины головки рельса, и за этот период своего роста без особых сложностей может быть определена дефектоскопом.

По вязкости разрушения рельсовые пробы, закаленные быстродвижущимся потоком воды, также имеют преимущества по сравнению с закалкой в масле: величина K_{Ic} соответственно равна 70 и 40 МПа $\sqrt{\text{м}}$.

Аналогичным образом проводили усталостные сравнительные испытания рельсовых проб, закаленных с моделированием прокатного и отдельного нагрева с последующим отпуском. В результате установлено (рис. 8), что предел выносливости рельсов, закаленных быстродвижущимся потоком воды с температурой прокатного нагрева выше, чем у рельсов после стандартной термообработки, но ниже, чем у рельсов, при закалке которых использовали быстродвижущийся поток воды с отдельного нагрева.

Анализ характерных изломов рельсовых проб после усталостных испытаний показывает (рис. 9), что их разрушение при закалке с повышенной температурой происходит так же, как и рельсов, закаленных быстродвижущимся потоком воды с температурой 900 °С. Отличие заключается лишь в большей крупнозернистости стали в зоне долома. В обоих случаях в изломах выявляются следующие характерные зоны:

зарождения и устойчивого развития усталостной трещины на глубину до 20 мм от поверхности катания;

силового хрупкого разрушения, охватывающего нижнюю часть головки, шейку и часть подошвы;

вязкого излома в нижней части подошвы.

Коррозионно-усталостная прочность. Испытания проводили на рельсовых пробах длиной 600 мм после различных вариантов термической обработки на гидравлическом прессе с пульсатором с максимальным усилием 3000 кН. При испытаниях рельсы располагали головкой вверх. Расстояние между опорами составляло 500 мм; частота нагружения — 5 Гц. Коэффициент асимметрии цикла нагружения был постоянным — $R_{\sigma} = 0,1$. В качестве коррозионной среды использовали трехпроцентный раствор хлорида натрия, подаваемый через поролоновую вставку на нижнюю поверхность подошвы рельса. База испытаний — 2 млн циклов нагружения.

Анализ результатов (рис. 10) показывает, что закалка рельсовых проб быстродвижущимся потоком воды при нагреве 900 и 1000 °С позволяет соответственно на 18 и 11 % повысить предел выносливости по сравнению с его значением для проб, объемнозакаленных в масле при воздействии коррозионной среды.

Результаты испытаний свидетельствуют, что рельсовая пробы, закаленная быстродвижущимся потоком воды, после испытаний по оценке циклической долговечности содержит зону развития усталостной тре-

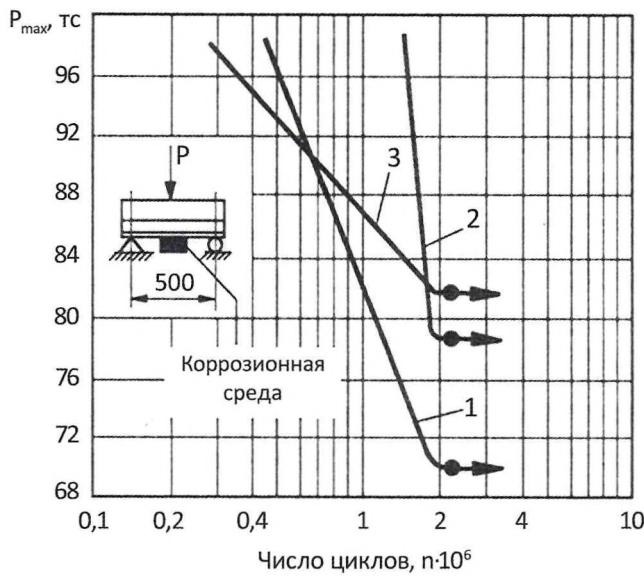


Рис. 10. Циклическая долговечность рельсовых проб после закалки с охлаждением в масле (1) и быстродвижущимся потоком воды с температурой 1000 °С (2) и 900 °С (3) при испытаниях под действием коррозионной среды; все образцы после отпуска

щины большей протяженности по сравнению с объемнозакаленными рельсами (рис. 11, а, б) и, следовательно, обладает большей живучестью (рис. 11, в).

Опыт по закалке рельсов с использованием быстродвижущегося потока воды может быть использован при дальнейшем совершенствовании термообработки рельсов.

Проблемы загрязнения окружающей среды. Исследования, проведенные экологами на НТМК в рельсобалочном цехе при годовом объеме выпуска 450 тыс. т объемнозакаленных рельсов в масле, показали, что на стенах цеха осаждается до 20 т масляных выделений. Такое положение создает тяжелую экологическую ситуацию.

Альтернативным решением является выпуск рельсов на ЗСМК с закалочным охлаждением сжатым воздухом. Применение такой системы охлаждения требует увеличения степени легирования стали или применения заэвтектоидной стали. Технологический процесс создает экологическую чистоту производства на хорошем уровне.

В ПАО «Мечел» в качестве закалочной среды применяют водный раствор полимера. Экологическая чистота производства при применении водных растворов полимеров вызывает большое сомнение и может вызывать более тяжелую атмосферу, чем при использовании масла в качестве закалочной среды. В [7] проводится масс-спектроскопический анализ различных полимеров, показывающий, что в процессе термической деструкции образуются такие летучие продукты как водород, окись углерода, двуокись углерода, метан, ацетилен, этилен, бензол, фенол, толуол и другие наряду с конденсированными полифениловыми соединениями и углекислым остатком (кокс).

На основе анализа отечественных и зарубежных технических решений будут разработаны рекомендации по совершенствованию системы закалочного охлаждения рельсов с применением быстродвижущегося потока воды.

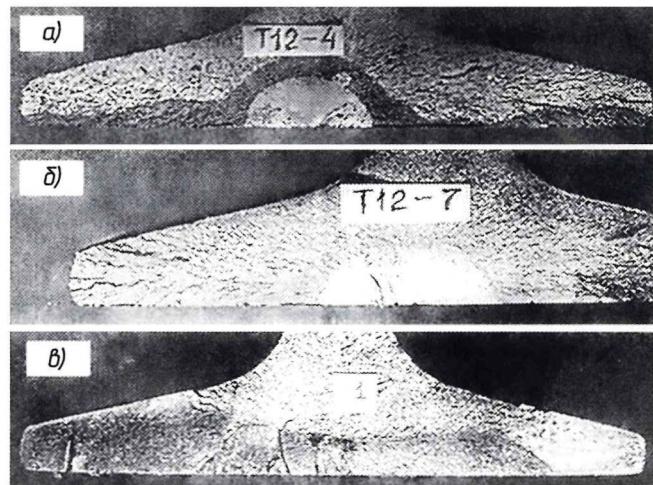


Рис. 11. Типичная макроструктура изломов рельсовых проб после испытаний на циклическую долговечность при воздействии коррозионной среды:
а, б — объемная закалка в масле, отпуск; в — закалка быстродвижущимся потоком воды, после отпуска

Заключение. Экспериментально показано, что с использованием при закалке рельсов быстродвижущегося потока воды можно получить большую твердость (на 40–70 НВ), более высокую прочность при равной пластичности, более высокое сопротивление усталости (в том числе коррозионной), большую живучесть и трещиностойкость за счет благоприятной эпюры остаточных напряжений, чем после современных способов сорбитизации при непосредственном спаде аустенита. Контактно-усталостная долговечность и износостойкость рельсов, закаленных быстродвижущимся потоком воды с благоприятной эпюрой остаточных напряжений, может быть оценена при полигонных испытаниях опытной партии таких рельсов.

Список источников

- Раузин Я.Р., Шур Е.А. Выбор оптимальной структуры закаленных рельсов // Производство, качество и стойкость железнодорожных рельсов: труды конференции. М.: Металлургия, 1966. С. 201–207.
- Патент № 2003705, С21Д 9/04. Способ термической обработки рельсов и установка для его осуществления / Федин В.М., Девяткин В.П., Шур Е.А., Великанов А.В., Ушаков Б.К., Пан А.В., Шумилин Е.Н., Киричков А.А., Школьник Л.М., Сафонова К.Э., Будницкий Г.Г., Меньшиков А.Г.; патентообладатель ВНИИЖТ. № 92 5036339; заявл. 03.01.1993; опубл. 30.11.1993; Бюл. № 43–44.
- Пан А.В. Разработка и освоение новых технологий для текущего и перспективного производства рельсов: дис. докт. техн.: 15.16.01. М., 1999. 123 с.
- Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. М.: Интекст, 2002. 208 с. (Труды НИИЖТ).
- Термическое упрочнение упругих элементов железнодорожного подвижного состава быстродвижущимся потоком воды: монография / В.М. Федин, Ю.В. Ронжина, А.И. Борц, С.П. Вакуленко, Д.П. Тихонов, Б.К. Ушаков. М.: ВИНИТИ РАН, 2012. 235 с.
- Поляков В.В., Великанов А.В. Основы производства железнодорожных рельсов. М.: Металлургия. 1990. 416 с.
- Коршак В.В. Химическое строение и температурные характеристики полимеров. М.: Наука, 1970. 420 с.

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ОСТРЯКОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ



ТРЕТЬЯКОВ К.И., начальник Центра испытаний и мониторинга стрелочной продукции Муромского стрелочного завода (ООО «ВСП-Центр»)

Для упрочнения поверхности катания остряков на российских стрелочных заводах уже почти 40 лет применяется технология их закалки сжатым воздухом с индукционным нагревом поверхности при предварительном упруго-пластическом выгибе изделия головкой вверх. Предварительный выгиб остряка перед закалкой необходим для получения требуемой прямолинейности после остывания. Нагрев головки выполняется токами высокой частоты до температуры 950–1150 °C, после чего производится резкое охлаждение нагретой поверхности сжатым воздухом до температуры порядка 400–500 °C. После остывания до температуры воздуха в цеху остряки на правильных прессах доводят до требуемой прямолинейности методом механической деформации.

Такова действующая серийная технология, которая имеет существенный недостаток. Предварительный упругий выгиб остряков с нагревом головки до высоких температур вызывает в поверхностных слоях металла высокие растягивающие напряжения (до 770 МПа), превышающие пределы

текучести металла. Это создает предпосылки к возникновению и развитию поверхностных трещин в головке. Последующая холодная правка остряков на прессах вызывает остаточные внутренние напряжения в подошве и головке. Все это приводит к появлению дефектов на рабочей поверхности остряков при эксплуатации, а также к увеличению интенсивности износа.

Проработка различных решений по изменению технологии закалки остряков, а также изучение опыта ведущих европейских и азиатских производителей стрелочной продукции показали, что для компенсации термических напряжений и уменьшения деформации остряка наиболее эффективно проводить закалку при одновременном двухстороннем индукционном нагреве головки и подошвы с последующим охлаждением сжатым воздухом.

Муромский стрелочный завод (АО «МСЗ») совместно с томской компанией ООО «Магнит-М» разработал конструкцию установки и внедрил в серийное производство новую технологию двухсторонней закалки остряков, которая дает возможность выполнять индукционный нагрев и охлаждение сжатым воздухом одновременно головки и подошвы без предварительного упругого выгиба детали. Установка оснащена приборами автоматизированного контроля и управления всеми основными параметрами нагрева и закалки, что позволяет стабилизировать технологический процесс и исключить влияние «человеческого фактора» на конечный результат.

Более двухсот образцов остряков было закалено в ходе опытов. В результате были отработаны режимы закалки, которые позволили на выходе получить прямолинейный остряк с минимальным выгибом и механическими свойствами более высокими, чем допускают требования новых технических условий ТУ 0921-364-01124323-2018, действу-

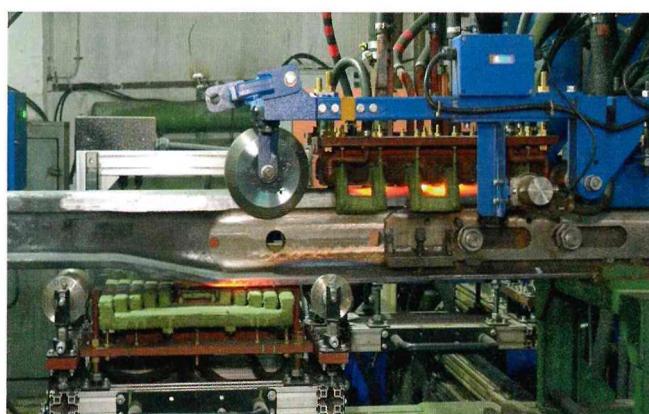


Рис. 1. Закалка остряков категории Д3350 токами высокой частоты без изгиба

ющих с 2018 г. Данные ТУ предусматривают специальную категорию остряков Д3350 с двухсторонней закалкой поверхности, при этом требования к ним предъявляются более высокие, чем к острякам с односторонней закалкой поверхности категории П3320.

Новая технология двухсторонней закалки остряков имеет существенные преимущества в сравнении с действующей: процесс нагрева и охлаждения полностью автоматизирован, а отсутствие необходимости выгибать изделия перед закалкой позволяет закаливать остряки без ограничения длины.

Результаты лабораторных испытаний остряков, упрочненных методом двухсторонней закалки на новой установке, показывают, что глубина закаленного слоя головки увеличилась в 1,5–2,0 раза по сравнению с типовым вариантом, поверхностная твердость головки повысилась на 20–30 НВ, все контролируемые показатели механической прочности закаленного металла выше, чем при серийной технологии, и превосходят контрольные требования по новым ТУ (см. таблицу).

Согласно данным таблицы твердость на поверхности катания остряков Д3350 на 6,2 % больше, чем остряков П3320, а предел прочности закаленной стали выше на 6,1 %.

Для подтверждения эффективности новой технологии были проведены сравнительные эксплуатационные испытания на станции Орехово-Зуево Московской дороги в соответствии с утвержденной ЦДИ ОАО «РЖД» программой и методикой. Цель испытаний заключалась в сравнении интенсивностей износа остряков категорий Д3350 и П3320.

Испытаниям были подвергнуты три стрелочных перевода серийных проектов 2750 и 2768, в каждый из которых поочередно были уложены ремонтные комплекты с криволинейными

Сравнительные характеристики остряков П3320 и Д3350

Наименование параметра	Требования ТУ 0921-364-01124323-2018		Фактические показатели	
	П3320	Д3350	П3320	Д3350
Твердость на поверхности катания, НВ	321-388	350-401	353	375
Предел прочности закаленной стали, МПа	>1080	>1100	1150	1220
Глубина закаленного слоя, мм:				
в полном сечении	7	10	8	15
в сечении 40 мм	9	10	11	15
в сечении 20 мм	9	10	11	20
в сечении 5 мм	9	10	11	16

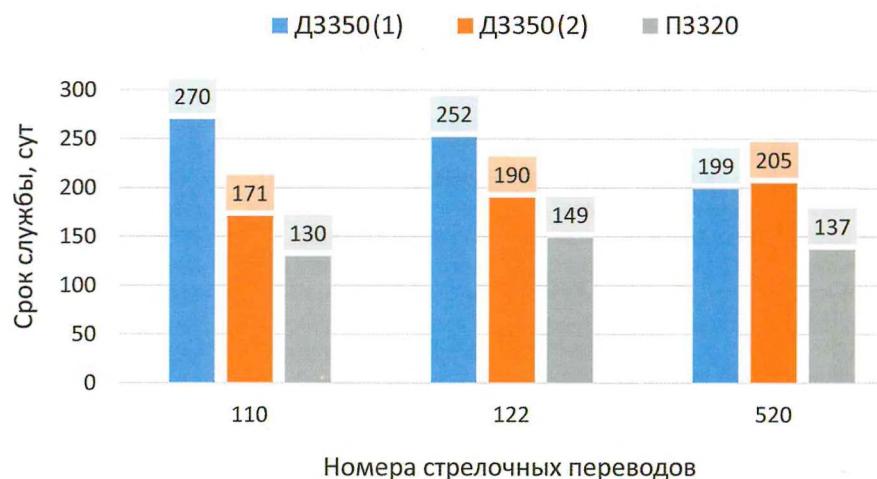


Рис. 2. Сравнительная диаграмма испытаний остряков П3320 и Д3350 на переводах № 110, № 122 и № 520. Среднее значение интервала жизни остряков П3320 взято из журналов дистанции пути. Цветом обозначены разные категории остряков

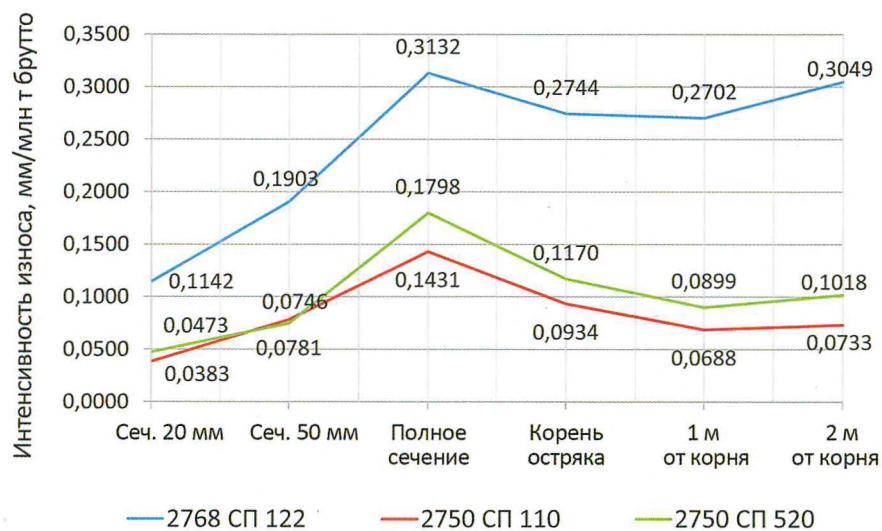


Рис. 3. Графики интенсивности износа остряков категории Д3350 в контрольных сечениях (внизу указаны проекты и номера стрелочных переводов)

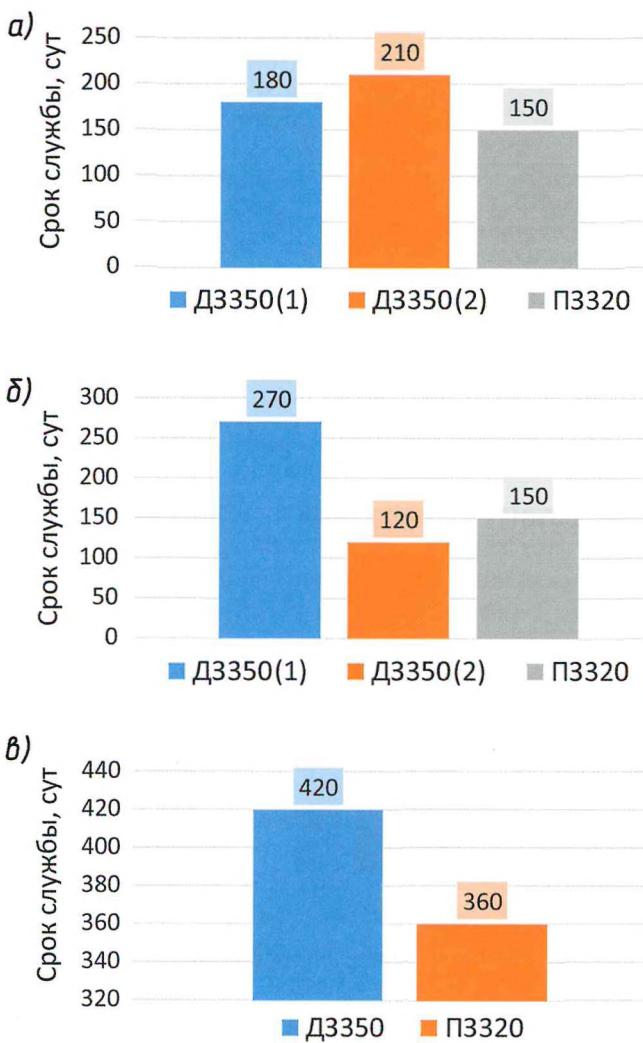


Рис. 4. Диаграммы сравнительных результатов эксплуатации остряков различных категорий на стрелочных переводах станции Ярославль-Главный. Данные по переводам № 2 (а), № 4 (б), № 536 (в)

остряками разных категорий (преимущественное движение на боковое направление).

С целью определения работы остряков в различных климатических условиях испытания проводили поэтапно летом и зимой с укладкой поочередно по два ремонтных комплекта с остряками категории Д3350 и П3320. Износ фиксировали ежемесячно в контрольных сечениях остряков до достижения предельных значений.

Анализируя диаграмму на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

на стрелочном переводе № 110 два остряка Д3350 (два столбика слева) изнашивались крайне неравномерно, что объясняется разными периодами их эксплуатации — тот, что испытывался летом (повышенное трение) скорее достиг предельного износа. Для чистоты эксперимента было взято

среднее значение по двум испытанным ремкомплектам с остряками Д3350 — оно составило 220 сут, что на 41 % больше, чем период службы остряка П3320 (130 сут), взятый из журналов дистанции пути;

на стрелочном переводе № 122 среднее значение ресурса по двум испытанным ремкомплектам с остряками Д3350 составило 221 сут, что на 33 % больше (149 сут), чем аналогичное значение для остряков П3320;

на стрелочном переводе № 520 то же соотношение выразилось в цифрах 202 сут к 137, что на 32 % больше.

Данные интенсивности износа остряков (рис. 3) свидетельствуют о более высоких значениях этого показателя на стрелочном переводе № 122, что, скорее всего, объясняется разностью проектов изделий — перевод № 122 имеет исполнение по проекту 2768, переводы № 110 и 520 — по проекту 2750. Испытания продолжаются в целях наблюдения за интенсивностью износа укладываемых в состав всех трех стрелочных переводов ремкомплектов с остряками категории П3320.

Помимо рассмотренных выше испытаний специалистами АО «МСЗ» проводились наблюдения за стрелочными переводами проекта МСЗ.8365, установленными на Северной дороге, станция Ярославль-Главный. Данные переводы в полном объеме укомплектованы остряками категории Д3350.

При анализе диаграмм на рис. 4 можно сделать следующие выводы по сроку службы остряков до предельного износа:

на стрелочных переводах № 2 и № 4 проекта МСЗ.8365 остряки категории Д3350 прослужили дольше на 23 % по сравнению с остряками П3320, которыми были оборудованы прежние переводы проекта 2750;

на стрелочном переводе № 536 то же соотношение сроков службы остряков Д3350 и П3320 не так велико — 14 %. Различные значения обусловлены различными условиями эксплуатации переводов, преимущественным движением против или по «шерсти» и другими факторами.

В целом по результатам эксплуатационных испытаний можно сделать вывод о значительно более высоком ресурсе остряков Д3350 по сравнению с П3320. Поскольку мощности АО «МСЗ» позволяют выпускать остряки категории Д3350 пока в ограниченном объеме, представляется целесообразным назначить рациональные сферы их применения на особо ответственных и грузонапряженных участках.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ШПАЛ



КРАСИЛЬНИКОВ В.С., Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), Нижегородский институт путей сообщения — Филиал «ПривГУПС», канд. физ.-мат. наук

Аннотация. В статье приводится анализ исследований по созданию долговечных полимерных композиционных материалов для изготавления шпал, способных заменить древесину и железобетон.

Ключевые слова: полимерные материалы, железнодорожные шпалы, рельсовый путь, композиты, утилизация.

Одним из направлений, где можно использовать полимерные композитные материалы, является изготовление шпал, обеспечивающих постоянство рельсовой колеи. В настоящее время широко применяются шпалы двух типов: деревянные и железобетонные, содержащие стальную арматуру, залитую бетоном. Деревянные шпалы обрабатывают антисептиками, поэтому они приносят вред окружающей среде, для их производства и утилизации нужны большие затраты. Фактический срок службы железобетонных шпал на участках с высокой грузонапряженностью составляет всего лишь 15 лет. Кроме того, стальная арматура железобетонных шпал подвержена электрокоррозии [1–3], что ускоряет их выход из строя.

Несовершенство деревянных и железобетонных шпал обусловило перспективный запрос на применение более надежных материалов для этих ответственных элементов верхнего строения пути. Рассмотрим возможность использования полимерных композиционных материалов для изготовления шпал.

Полимерные композиционные материалы. Достоинства полимерных материалов обусловлены такими качествами как прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, а также химической стойкостью и диэлектрическими свойствами [4]. В качестве конструкционных материалов полимеры успешно заменяют металлы.

Композиционные материалы состоят из пластичного матричного материала — основы (матрицы) — и более твердых и прочных компонентов — наполнителей (армирующих элементов), распределенных в объеме матрицы. Соответственно свойства композиционных материалов зависят от свойств основы, наполнителей, прочности связи между ними и методов получения. Термопластичные полимеры при нагревании размягчаются, а при охлаждении затвердевают. При повторном нагревании и охлаждении вновь происходит размягчение и затвердевание. Поэтому термопластичные полимеры можно перерабатывать в изделия неоднократно. Полимерные композиционные материалы (полимерные композиты), применяемые для изготовле-

ния шпал, имеют термопластичную полимерную матрицу.

Композиты на основе фурановых смол. В [1] были исследованы полимерные композиционные материалы на основе фурановых смол и отходов древесины. Анализ прочности при сжатии и анализ поглощения агрессивных сред показал, что данные материалы имеют область свойств, в которой наблюдается наименьшее поглощение и наибольшая прочность.

Композиты на основе поливинилхлорида. В ходе исследований [2] были получены композитные материалы для изготовления шпал, в которых матрицей служил поливинилхлорид, а наполнителем — смесь хвойной муки и мела. Изменение плотности и температурного расширения композита достигалось варьированием содержания компонентов. Установлено, что коэффициенты линейного температурного расширения полученных материалов значительно меньше, чем у поливинилхлорида без наполнителей.

Материалы на основе дисперсных композитов. Экспериментальное изучение механических свойств дисперсных композитов на основе пластиковых отходов, армированных угольной золой, отражено в [5]. Было выявлено равномерное распределение наполнителей в полимерной матрице. Результаты исследования дисперсных композитов показали, что композиты на основе переработанного пластика с добавлением угольной золы до 60 % наилучшим образом подходят для изготовления шпал.

Свойства композитных шпал. Заинтересованность предприятий железнодорожной инфраструктуры в композитных шпалах объясняется тем, что они имеют большой эксплуатационный ресурс. Различные типы композитных шпал и методы их изготовления исследовались в [6–8].

Композитные шпалы на основе полиэтилена низкого давления. В качестве полимерного материала для изготовления композитных шпал может использоваться полиэтилен низкого давления (ПЭНД) с применением стабилизаторов, концентраторов и других присадок. Дополнительно в композитную смесь вводят стекловолокно для повышения прочности материала. Результаты исследования [6] показали, что значения физико-механических характеристик, влияющих на эксплуатационную

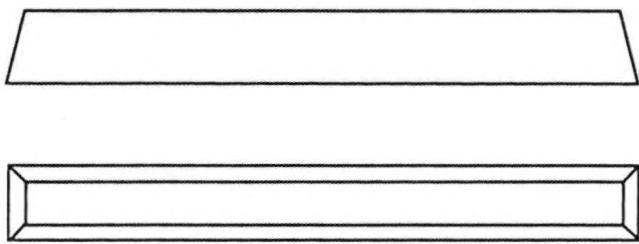


Рис. 1. Схематическое изображение композитной брусковой шпалы трапециевидной формы [9]. Вверху — вид сбоку, внизу — сверху

надежность и работоспособность, у композитных шпал значительно выше, чем у деревянных.

В отличие от деревянных и железобетонных шпал характерным свойством шпал из композиционных материалов на основе полиэтилена низкого давления является более высокий коэффициент термического расширения.

Композитные шпалы из переработанного полиэтилена со стекло-наполненным полимером. В [7] приведены результаты исследования композитных шпал, в которых основным компонентом выступала полимерная матрица из полиэтилена высокой плотности со стекло-наполненным полимером. При сравнении физико-механических и эксплуатационных характеристик этих композитных шпал с деревянными установлено, что их работоспособность намного выше.

Композитные шпалы с армирующими волокнами. В [8] исследовали три типа композитных шпал с использованием разнообразных методик армирования в зависимости от длины и ориентации волокон в них.

Шпалы 1-го типа изготавливали из переработанных полимеров или битума, в которых наполнителями служили песок, гравий, переработанное стекло или резаное стекловолокно длиной не более 20 мм. Прочностные свойства этих шпал в основном определялись используемым полимером. Преимущество их изготовления заключалось в простоте обработки резкой и сверлением. В качестве недостатков необходимо указать на низкую прочность и жесткость, ограниченную свободу выбора конструкции, повышенную зависимость жесткости от температуры и слабую огнестойкость.

Шпалы 2-го типа армированы в продольном направлении длинными непрерывными стекловолокнами,



Рис. 2. Композитные шпалы с текстурированной поверхностью [10]

нами, а в поперечном содержат очень короткие волокна. Прочность и жесткость в продольном направлении определялась, в основном, непрерывным стеклянным волокном, а в поперечном — используемым полимером.

Ко 2-му типу также относят шпалы из вспененного уретана, армированные волокном. Основными особенностями уретана являются малый удельный вес, гидрофобность, термостойкость, простота обработки и длительный срок службы (более 50 лет). Изучение акустических и динамических характеристик шпал из вспененного уретана показало, что они эквивалентны шпалам из твердой древесины [8]. Достоинствами шпал 2-го типа помимо легкости обработки при резке и сверлении являются высокая прочность на изгиб, высокий модуль упругости и долговременная прочность.

Шпалы 3-го типа армированы длинными волокнами, ориентированными в продольном и поперечном направлениях, т.е. волокна работают как на изгиб, так и на сдвиг. Конструкцию таких шпал можно изменять укладкой волокон под углами в разных направлениях. Большая прочность на изгиб и сдвиг, простота обработки и хорошая огнестойкость — основные преимущества шпал 3-го типа. К ним также относятся шпалы из полимерной сэндвич-конструкции и шпалы из гибридных композитов, волокна в которых ориентированы в двух направлениях [8]. Однако процесс изготовления шпал 3-го типа очень медленный, что увеличивает производственные затраты.

Влияние формы шпал на стабильность железнодорожного пути. В [9] предложена композитная брусковая шпала из полиэтилена высокой плотности со стекло-наполненным полимером.

Шпала имеет трапециевидную форму как в поперечном, так и в продольном сечении (рис. 1), что повышает сопротивление поперечному и продольному сдвигу, обеспечивает стабильность пути и снижение расходов на его текущее содержание.

Преимущество шпал из композиционных материалов по сопротивлению поперечному сдвигу обеспечивается также текстурированием нижней плоскости и боковых поверхностей (рис. 2), что увеличивает сопротивление поперечному сдвигу до полутора раз [10].

Результаты испытаний композитных шпал. Испытания композитных шпал на прочность при различных скоростях движения и осевых нагрузках [11] выявили их следующие преимущества перед шпалами из древесины. Рельсошпальная решетка обладает большей стабильностью по ширине и уровню за счет более высокой износостойкости и дефектостойкости композитных шпал. В [6–12] было установлено, что композитные шпалы выдерживают высокие и низкие температуры (от -60 до +60 °C), а по основным эксплуатационным характеристикам и решению экологических проблем превосходят традиционные шпалы из древесины и железобетона.

Достоинства композитных шпал. Одним из основных достоинств шпал этого типа является их ремонтопригодность. Применение ремонтной смеси позволяет полностью восстанавливать изношенные отверстия в шпалах и обеспечивать нормативную величину усилия вытягивания. Также возможна заливка сколов шпал после схода подвижного состава. Композитные шпалы

могут использоваться при ремонте пути на новых материалах, а также при одиночной замене деревянных шпал. Композитные шпалы легче и проще в установке, а это сокращает время и затраты на их укладку.

Большим преимуществом композитных шпал перед деревянными и железобетонными является возможность их полной утилизации при невосстановляемых дефектах, так как непригодные композитные шпалы могут служить сырьем для новых шпал. Шпалы из полимерных материалов могут заменить деревянные шпалы в тех местах, где укладка железобетонных нецелесообразна, в первую очередь на пучинистых участках.

Композитные шпалы обладают лучшими физико-механическими характеристиками, более высокой эксплуатационной надежностью, работоспособностью и длительным сроком эксплуатации по сравнению с деревянными и железобетонными. В том числе при высоких влажности и температуре. Сопротивление поперечному сдвигу композитных шпал может быть увеличено за счет текстурирования нижней и боковых поверхностей.

Недостатки композитных шпал. Шпалы 1-го типа, армированные короткими волокнами или не армированные, имеют низкую прочность и жесткость и чувствительны к ползучести. Шпалы 2-го типа, армированные непрерывными стекловолокнами в продольном направлении, имеют малую прочность на сдвиг и не подходят для применения на мостах и для мостовых балок, т. е. в условиях, сочетающих большие изгибные и сдвиговые напряжения. Ввиду этого шпалы 1-го и 2-го типов имеют ограниченность конструктивных решений, а кроме того, и низкую огнестойкость [8]. Полимерные композитные шпалы больше подвержены температурному влиянию, чем деревянные. При зимних испытаниях наблюдались изломы композитных шпал на участках с неравномерно уплотненным щебеночным балластом [11].

Из изложенного следует, что композитные шпалы из-за возможности растяжения, усугубляемого температурным влиянием, не могут применяться в кривых участках пути. Причиной растяжения шпал в кривых может являться действие центробежных сил на внешний рельс со стороны гребней колесных пар подвижного состава. Однако это не препятствует укладке композитных шпал на прямых участках, где центробежная сила отсутствует.

Заключение. Применение полимерных композиционных материалов для создания железнодорожных шпал обеспечивает следующие основные преимущества: простота монтажа, уменьшение трудоемкости при ремонте, минимизация затрат на обслуживание пути, длительный срок эксплуатации. Композитные шпалы из термопластичных полимеров можно полностью утилизировать и перерабатывать вторично. По основным эксплуатационным характеристикам и решению экологических проблем композитные шпалы в целом превосходят традиционные

шпалы из древесины или железобетона. Композитные шпалы обладают диэлектрическими свойствами, устойчивы к агрессивным средам, не содержат токсичных веществ, снижают шум и вибрацию при движении поездов.

Шпалы из полимерных композиционных материалов из-за возможности растяжения и температурной зависимости не могут применяться в кривых. Их следует использовать на прямых участках пути, в том числе и на высокоскоростных магистралях.

Список источников

1. Бондарев Б.А., Борков П.В., Бондарев А.Б. Модифицированный древесноволокнистый композиционный материал для железнодорожных шпал // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 1. С. 75–80. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.06. EDN: YLXSMV.
2. Composite material for the manufacture of plastic sleepers / V.I. Kondrschshenko, C. Wang, T.A. Matseevich, A.A. Askadskii // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 899. P. 150–157. DOI: 10.4024/www.scientific.net/KEM.899.150. EDN: JPWNXB.
3. Красильников В.С. Применение полимерных материалов для датчиков определения схода подвижного состава // Современные тенденции развития транспортной отрасли: материалы Междунар. научн.-практич. конф., Нижний Новгород, 15–16 февраля 2024 года. Нижний Новгород: СамГУПС, 2024. С. 238–243. EDN: IBCUXI.
4. Трофимов Н.Н., Канович М.З. Прочность и надежность композитов. М.: Наука, 2014. 420 с.
5. Mechanical properties of coal ash particle-reinforced recycled plastic-based composites for sustainable railway sleepers / S. Ju, S. Pyo, J. Yoon, D. Sung // Polymers. 2020. Vol. 12, No. 10. P. 1-15. DOI: 10.3390/polym12102287. EDN: LXVEIK.
6. Ершова Д.С., Лычковский А.А. Перспективы применения полимерных шпал в железнодорожном строительстве // Молодой ученый. 2019. № 13 (251). С. 73–75. EDN: XXEPZR.
7. Хвостик М.Ю. Шпалы композитные как альтернатива деревянным // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т. 75, № 3. С. 179–182. EDN: WBKDSZ.
8. Костин А.В., Криволапов В.Г. Современные разработки в области композитных шпал // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития: материалы VI Междунар. научн.-исслед. конф. Самара; Оренбург, 2023. С. 125–127. EDN: FOSVNQ.
9. Пат. 185684 РФ, Е01В 3/00. Композитная брусковая железнодорожная шпала / Мироненко Е.В. № 2017144659; заявл. 19.12.17; опубл. 2017144659; заявл. 19.12.2017: опубл. 13.12.18. Бюл. N 35 (II ч.). 5 с.: ил. EDN: ZSBJRB.
10. Композитные шпалы с текстурированной поверхностью. URL: [https://www.google.com/search?sc_esv=4d99e13e2c53c783&q=\(Дата обращения 13.06.2024\)](https://www.google.com/search?sc_esv=4d99e13e2c53c783&q=(Дата обращения 13.06.2024)).
11. Савин А.В., Борц А.И., Светозарова И.В., Дорошевич А.А. Применение композитных материалов на железнодорожном транспорте // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 1. С. 15–17. EDN: MPWKIP.
12. Кондращенко В.И., Ван Ч. Композиционные подрельсовые основания. Материалы // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 95–111. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-95-111. EDN: QAVQRV.

PROSPECTS FOR THE USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR SLEEPERS

Krasilnikov Vladimir — Ph.D., Associate Professor of the Department of General Education and Professional Disciplines, Volga Region State University of Railway Transport, Branch in Nizhny Novgorod, Russia. vskrasilnikov@ya.ru. SPIN code: 2304-4962

Abstract. The paper provides an analysis of research on the creation of durable polymer composite materials for the manufacture of sleepers that can replace wood and reinforced concrete.

Keywords: polymer materials, railway sleepers, rail track, composites, recycling.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ



ЦАРАПОВ М.Н., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
канд. геол.-минерал. наук

Аннотация. Представлены результаты лабораторных статико-динамических компрессионных испытаний оттаивающих грунтов. Изучено влияние динамических нагрузок на формирование деформационных свойств мерзлых грунтов при оттаивании. Исследования показали, что для определения несущей способности оттаивающих оснований земляного полотна и опор мостов обязательно должны учитываться динамические нагрузки.

Ключевые слова: оттаивающие грунты, деформационные свойства, модуль деформации, коэффициент оттаивания и коэффициент сжимаемости, динамические нагрузки, виброподъемность.

К деформационным свойствам оттаивающих грунтов согласно действующим нормативным документам относятся модуль деформации, коэффициент оттаивания и коэффициент сжимаемости. Исследованию влияния динамических нагрузок на данные характеристики в современной отечественной науке уделяется весьма мало внимания. Это связано как с довольно небольшим количеством научных центров и лабораторий, занимающихся указанной проблематикой, так и с нежеланием государственных и коммерческих учреждений финансировать научные исследования по данному направлению.

Однако, многолетние наблюдения [1–4] за объектами транспортной инфраструктуры показывают, что на несущую способность как насыпей земляного полотна, так и оснований опор мостов в первую очередь

существенно влияют вертикальные колебания, возникающие при проследовании поездов, а именно частота таких колебаний.

В настоящее время в отечественных исследованиях влияния вибродинамических нагрузок на грунты основания транспортной инфраструктуры используют методы и средства сейсмики [5]. В свою очередь, применение такой аналогии для изучения влияния вибродинамических нагрузок на формирование деформационных свойств оттаивающих грунтов не имеет достаточного научного обоснования, что послужило причиной для разработки комплексного подхода к решению данной проблемы.

Действующие в России нормативные документы [6–9] выдвигают основное требование — обеспечение заданного уровня надежности по прочности, стабильности и устойчивости грунтов основания земляного полотна при динамическом воздействии проходящих поездов.

Методика исследований

Наиболее достоверным способом определения динамических воздействий на грунты земляного полотна являются натурные полевые исследования. Для наблюдений был выбран участок опоры № 1 моста на 603 км линии Коротчаево–Новый Уренгой (Северный широтный ход) (рис. 1), где по данным геотехнического мониторинга происходят деформации опоры моста, предположительно связанные с оттаиванием грунтов основания, которое усугубляет снижение деформационных характеристик под воздействием проходящих поездов.

Для отбора образцов грунта и обустройства пункта наблюдений за вибрациями в 2023 г. были пробурены скважины (25 м) буровой установкой типа ПБУ-2 на базе УРАЛ-4320.

Для определения динамических нагрузок использовали виброметрический комплекс с автоматической записью и визуализацией данных. Анализ полученных



★ Инженерно-геологическая скважина

Рис. 1. Мост на 603 км линии Коротчаево–Новый Уренгой
(фото с квадрокоптера Калабиной М.В.)

параметров колебаний в скважине, возникающих при движении локомотива, показал следующее. Преобладающие частоты на спектрах виброускорений при скоростях движения локомотива от 20 до 45 км/ч за весь период наблюдений совпадают между собой в диапазоне от 16 до 125 Гц (рис. 2).

Скорость подвижного состава от 20 до 50 км/ч, при которой наблюдаются колебания с преобладающими частотами от 10 до 16 Гц, можно охарактеризовать как «опасная», так как при ней повышается вероятность тиксотропных явлений в оттаивающем грунте, способных вызвать понижение его прочностных и деформационных характеристик (рис. 3).

На рис. 4 показана зависимость среднеквадратического значения виброперемещения в основании опоры от скорости подвижного состава. Зависимость имеет вид линейной функции $s_e = 0,1255V$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,875$.

При скорости движения локомотива 20 км/ч среднеквадратическое значение виброперемещения достигает 5 мкм, при скорости от 20 до 30 км/ч — увеличивается в два раза (10 мкм), при дальнейшем повышении скорости от 30 до 50 км/ч среднеквадратическое значение виброперемещения в три раза больше, чем при скорости 20 км/ч.

Полученные зависимости параметров колебательного процесса от скорости движения позволили использовать их при изучении оттаивающих грунтов в условиях компрессии для оценки устойчивости опоры моста.

Испытания проводили на грунтах нарушенной структуры и с заданными характеристиками, без включений размером больше 2–5 мм (т. е. по заполнителю): суглинок легкий пылеватый, влажность $W = 21\%$, плотность грунта $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$, число пластичности $I_p = 9,2\%$ [10–11].

Образцы исследовали при природной влажности, которая составляла 21 %, с заданной начальной плотностью (пористостью) и коэффициентом пористости e . Для приготовления образцов суглинистый грунт укладывали в кольцо компрессионного прибора объемом $V = 140 \text{ см}^3$. Один образец сначала подвергали статическому нагружению, а затем идентичный — воздействию вибрационной нагрузки.

Следует отметить, что после приложения статической нагрузки образцы уплотнялись. Увеличение плотности можно определить по формуле:

$$\rho = m(V_0 + \Delta V) = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (1)$$

где m — масса грунта;

V_0 — начальный объем грунта;

ΔV — изменение объема грунта, $\Delta V = \Delta S_{ct} \cdot 40 \text{ см}^2$, ΔS_{ct} — осадка образца после приложения статической нагрузки;

ρ_0 — плотность грунта;

$\Delta\rho$ — изменение плотности грунта.

Статические испытания грунтов проводили на

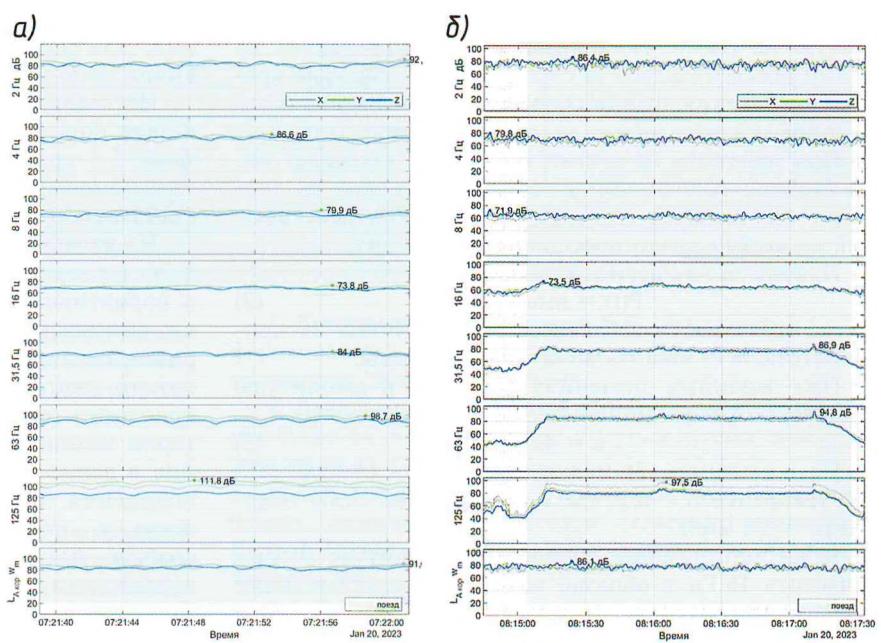


Рис. 2. Зависимость максимального уровня виброускорений, от частоты колебаний:
а — 16 Гц; б — 125 Гц

компрессионном приборе — одометре в соответствии с [12] при высоте цилиндрического образца $H = 35 \text{ мм}$ и площади поперечного сечения $F = 40 \text{ см}^2$.

Нагрузка на штамп передавалась рычажной системой ступенями после условной стабилизации осадки от каждой ступени согласно [12]. Осадку штампа измеряли индикаторами часового типа с точностью 0,01 мм.

Динамические (вибрационные) испытания проходили на том же компрессионном приборе, оборудованном устройством для создания вибрационной нагрузки

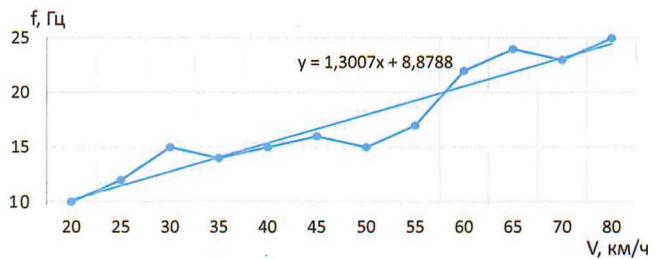


Рис. 3. График зависимости частоты колебаний от скорости движения локомотива

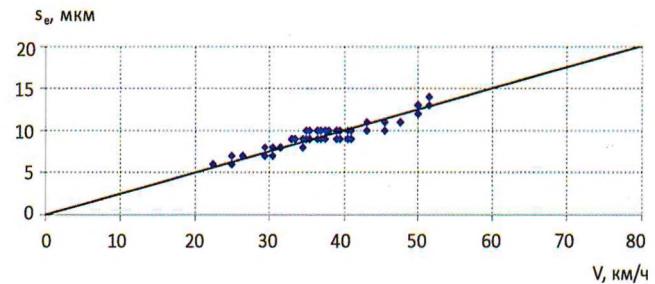


Рис. 4. Зависимость среднеквадратического значения виброперемещения оттаивающего грунта от скорости движения подвижного состава

(рис. 5). В опытах использовали установку, представленную на рис. 6. Постоянное статическое усилие на штамп обеспечивалось за счет рычажной системы прямого нагружения штампа. Суммарное накопление осадки штампа измерялось индикатором часового типа.

При действии на штамп вибратора возникает направленная периодическая сила, происходит ее сложение (вычитание) со статической силой, действующей на штамп от компрессионного прибора.

Направленная периодическая сила

$$P(t) = mg\omega^2 \sin\omega t, \quad (2)$$

где m — масса дебаланса; g — величина эксцентриситета; ω — частота возмущающей силы.

При заданных значениях частоты и амплитуды колебаний A образец испытывает ускорение

$$a = 4\pi^2 A \omega^2. \quad (3)$$

На основании (3) можно определить относительное ускорение $\eta = a/g$, где g — ускорение силы тяжести ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

В рассматриваемом случае при амплитуде 10 мкм и частоте 16 Гц в образце возникают максимальные ускорения в интервале 0,1g.

Для возбуждения колебаний нагрузочного штампа установки использовали малогабаритный вибратор направленного действия дебалансного типа, в качестве электродвигателя — однофазный электромотор с возможностью регулировки оборотов. В данном эксперименте регулятор оборотов был установлен на 600, 1200, 3000 и 6000 об/мин, где 600 об/мин соответствует частотам 16 Гц. По показаниям обоих датчиков максимальные амплитуды смещений находились

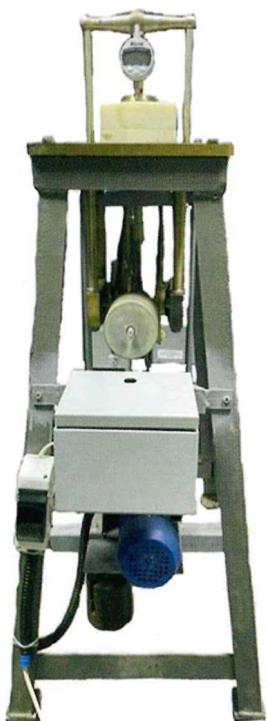


Рис. 5. Установка для статико-динамических исследований грунтов

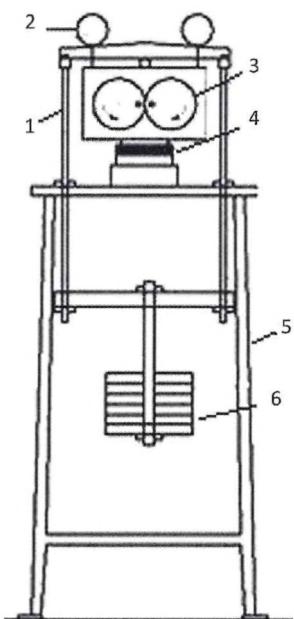


Рис. 6. Принципиальная схема статико-динамического компрессионного прибора:
1 — тяги; 2 — индикатор часового типа; 3 — вибратор; 4 — компрессионный прибор; 5 — штамп; 6 — груз

в пределах 5–10 мкм при стабильной частоте колебаний. Для регулирования амплитуды колебаний до величин 5–10 мкм изменяли массу дебалансов.

Исследования были разделены на два этапа. На первом определяли характеристики в статическом режиме — коэффициент оттаивания и коэффициент скимаемости методом компрессионного сжатия по стандартной методике [12]. Проведено 12 испытаний.

На втором этапе измерения выполняли в динамическом режиме. Сложность их заключалась в том, что в нормативных документах РФ отсутствуют методики, описывающие регламент проведения таких экспериментов в условиях компрессии методом компрессионного сжатия. В настоящее время на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ в лаборатории механики мерзлых грунтов ведутся исследования в данном направлении и выработаны некоторые положения проведения таких испытаний [13], что и легло в основу получения данных механических свойств оттаивающих грунтов при динамическом воздействии на основание опоры моста на линии Коротчаево—Новый Уренгой.

Для определения компрессионных характеристик оттаивающих грунтов в динамическом режиме с учетом [14, 15] были проведены испытания в специальном компрессионном приборе с возможностью задания динамической составляющей вертикальной нагрузки частотой $\omega = 16 \text{ Гц}$ и амплитудой воздействия $A = 10 \text{ мкм}$ (0,01 мм), при статических нагрузках — в соответствии с [12] для образцов нарушенной структуры (суглинок) с заданными физическими характеристиками (плотность и влажность). В результате лабораторных испытаний 12 образцов грунта при статическом нагружении и 12 при динамическом получена информация о деформационных свойствах оттаивающих грунтов основания данного сооружения, а именно коэффициент виброползучести K_{vph} . Под виброползучестью понимается процесс накопления дополнительных осадок без потери устойчивости оттаивающих грунтов при динамическом воздействии, величина которого недостаточна для того, чтобы вызвать мгновенное изменение напряженного состояния всего массива. Дополнительная возможная осадка за счет виброползучести оценивается снижением модуля деформации оттаивающего грунта E_{th} до величины E_{vph} , отношение которых характеризуется коэффициентом виброползучести K_{vph} .

Результаты исследований

Рост деформаций, вызванных вибрациями (до частоты 16 Гц) от проходящих через мост поездов, которые передаются через опоры на грунты основания в условиях оттаивания, привел к необходимости определения свойств виброползучести оттаивающих грунтов.

Анализ результатов лабораторных испытаний грунтов основания позволил рекомендовать величину понижающего коэффициента к модулю деформации оттаивающего грунта согласно результатам статических испытаний. Установлены пределы понижающего коэффициента для статического модуля

деформации в зависимости от частоты вибрационного воздействия 16 Гц. Коэффициент виброползучести K_{vpth} составил 0,60–0,65 (см. таблицу).

Полученные результаты показали, что применяемая схема линейного деформирования оттаивающих грунтов, отраженная в [6], не может быть применена в полной мере для расчета несущей способности оттаивающих оснований при динамических нагрузках, что в свою очередь может являться причиной повышенных осадок оснований железнодорожных насыпей и сооружений.

Выводы

- Испытания в компрессионном приборе с возможностью задания динамической составляющей нагрузки показали, что исследуемые грунты под воздействием динамической нагрузки проявляют свойства виброползучести.
- Интенсивность прироста деформаций в оттаивающих грунтах при динамических нагрузках выше, чем в оттаивающих грунтах без их воздействия.
- При оттаивании и динамических нагрузках в грунтах формируется сложное напряженное состояние.
- Исследуемые грунты под воздействием статической и динамической нагрузки при амплитуде 5 мкм и частоте 16 Гц имеют в среднем коэффициент виброползучести $K_{vpth} = 0,63$ (рекомендуемый).

Полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что для определения несущей способности оттаивающих оснований насыпей и сооружений при динамических нагрузках требуется внесение изменений в расчетную схему действующей нормативной документации.

Следует отметить необходимость дальнейших экспериментальных исследований влияния вибродинамического воздействия поездов, в зависимости от интенсивности их движения, на оттаивающие основания железнодорожной инфраструктуры.

Список источников

- Петряев А.В. Основы методики расчета несущей способности железнодорожного земляного полотна при оттаивании грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. канд. техн. наук: 05.22.06 / Место защиты: ЛИИЖТ. Л., 1989. 184 с.
- Стоянович Г.М. Натурное изучение величины вибродинамического воздействия подвижной нагрузки на грунты. Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2005. 147 с.

Результаты испытаний оттаивающего суглинистого грунта при статическом и динамическом режимах

Статический режим (ГОСТ 12248.10–2020)			Динамический режим (частота 16 Гц)			Коэффициент виброползучести, K_{vpth}	$\Sigma A, \%$	$\Sigma m, \%$
A_{th} , д.е.	m_{th} , МПа ⁻¹	E_{th} , МПа	A_{vpth} , д.е.	m_{vpth} , МПа ⁻¹	E_{vpth} , МПа			
0,082	0,093	8,7	0,097	0,148	5,46	0,60–0,65	16	37

П р и м е ч а н и е. A_{th} — статический коэффициент оттаивания; m_{th} — статический коэффициент сжимаемости; A_{vpth} — динамический коэффициент оттаивания; m_{vpth} — динамический коэффициент сжимаемости; ΣA , Σm — соотношения деформационных характеристик оттаивающих грунтов в статическом и динамическом режимах.

3. Курдяевцев С.А., Пупатенко В.В., Данильянц Е.С. Деформационный критерий и остаточный потенциал // Мир транспорта. 2008. № 2. С. 136–142.

4. Данильянц Е.С., Пупатенко В.В. Сезонное изменение устойчивости откосов насыпей // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 10. С. 17–19.

5. ГОСТ Р ИСО 14837–1–2007. Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство. Введ. 01.10.2008. М.: Стандартинформ, 2008.

6. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах (с Изменением № 1). Введ. 01.07.2021. Изд. 31.05.2022. М.: Стандартинформ, 2021.

7. СП 119. 11330.2017. Железные дороги колеи 1520. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95 (с Изменением N 1). Введ. 13.06.2018. Изд. 24.12.2019. М.: Стандартинформ, 2018.

8. ЦПИ-36. Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна. М.: Информпроект, 2004.

9. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Введ. 01.01.2021. Изд. 01.07.2023. М.: Стандартинформ, 2020. 45 с.

10. ГОСТ 12071–2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Введ. 01.07.2015. Изд. 01.02.2019. М.: Стандартинформ, 2019.

11. ГОСТ 30416–2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. Введ. 01.09.2021. Изд. 01.07.2023. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

12. ГОСТ 12248.10–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия (с Поправкой). Введ. 01.06.2021. Изд. 01.07.2023. М.: Стандартинформ, 2021.

13. Посоbие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов, С.С. Волохов, Р.Г. Мотенко, А.М. Черкасов, А.И. Штейн, А.И. Костоусов. М.: Издательство КДУ, 2018. 187 с.

14. ГОСТ Р 56353–2022. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. Введ. 01.05.2022. М.: Стандартинформ, 2022. 39 с.

15. ГОСТ 22733–2016. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности (с Поправками). Введ. 01.01.2017. Изд. 01.12.2021. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOADS ON THE FORMATION OF DEFORMATION PROPERTIES OF THAWING SOILS AT THE BASE OF THE BRIDGE SUPPORT

Tsarapov Mikhail — Ph.D. Geol.-Mineral, Senior Researcher of the Department of Geocryology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia. tsarapov@geol.msu.ru

Abstract. The results of laboratory static-dynamic compression tests of thawing soils are presented. The influence of dynamic loads on the formation of deformation properties of frozen soils during thawing is presented. Studies have shown that dynamic loads must be taken into account to determine the bearing capacity of thawing foundations of railways.

Keywords: thawing soils, deformation properties, modulus of deformation, thawing coefficient and compressibility coefficient, dynamic loads, vibration creep

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА РЕЛЬСЫ В ЧАСТИ ИХ ПРОЧНОСТИ



АБДУРАШИТОВ А.Ю., ОАО «Российские железные дороги», Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре, канд. техн. наук

Аннотация. Представлены основные виды расчетов рельсов, а именно: циклической при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке; циклической контактной при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке регламентированного вида и размера; живучести с учетом наличия дефектов и трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения. Проанализированы основные виды контакта колеса и рельса: гребневой, вертикальный и боковой.

Ключевые слова: расчет рельсов на прочность, усталостные трещины, гребневой контакт, ресурс рельсов, живучесть.

Методы расчетов рельсов на основе видов несущей способности. Начиная с работ профессора Вериго М.Ф. [1] в качестве главного концептуального положения в расчетах на прочность основного элемента верхнего строения пути — рельсов, при выборе допускаемых напряжений отказались от пределов текучести при статической нагруженности [2] и перешли к пределам выносливости при циклическом нагружении. Таким образом, расчет рельсов на прочность должен проводиться, как и все расчеты на прочность деталей машин, при переменных во времени нагрузках [3]. Предполагалось, что на первом этапе прочностные расчеты рельсов выполняются по коэффициентам запаса прочности, как это было сделано для рам локомотивных тележек [4], с учетом асимметрии цикла нагружения, концентрации напряжений, качества поверхности, остаточных напряжений и ряда других факторов, оказывающих существенное влияние на сопротивление усталости.

В настоящее время существует ряд методик прогнозирования срока службы рельсов, основанных, как правило, на величинах вертикальных осевых и боковых динамических сил [10, 11], однако не учитывающих многообразие вариантов напряженно-деформированного состояния рельсов при различном нагружении. В связи с этим переход от усилий, передаваемых от подвижного состава непосредственно на путь, к напряжениям, возникающим в процессе воздействия подвижного состава, выглядит вполне оправданным как фактор, уточняющий и дополняющий существующие методики прогнозирования отказа рельсов.

Дальнейший прогресс в развитии методов расчета рельсов на прочность при переменных напряжениях связан с внедрением в практику расчетов вероятностных представлений. Возможны расчеты рельсов

с использованием основных видов их несущей способности [5]:

циклической при недопущении образования усталостных трещин в подошве и шейке;

циклической контактной при недопущении в пределах ресурса (или регламентации вероятности) образования трещин контактной усталости в головке регламентированного вида и размера;

живучести с учетом наличия дефектов и трещин при недопущении полного хрупкого разрушения всего сечения.

Определены критерии и показатели, которые необходимо пересматривать:

экспериментальные показатели;

расчетные показатели;

значения показателей по данным проведенных испытаний;

новые показатели по результатам теоретических расчетов;

экспериментальные и теоретические критерии и показатели для новых элементов верхнего строения пути.

Разработан алгоритм определения критериев прочности для рельсов при наработке тоннажа до нормативных значений, а также алгоритм прогнозирования ресурсов рельсов по контактно-усталостным дефектам, основанный на возможности «переноса» результатов наблюдений за выходом рельсов по этим дефектам на опытном участке пути на любой другой участок пути [6].

Вертикальная и боковая силы, действующие на сечение пути в момент прохода колеса через это сечение, являются случайными величинами. Их статистические характеристики определяются с помощью программы «Взаимодействия экипажа в пути» (ВЭИП — А.Я. Коган).

За меру повреждаемости рельсов контактно-усталостными дефектами в одном цикле нагружения (при проходе по рельсу одной оси экипажа) принимается квадрат равнодействующей вертикальной и боковой нагрузок, передаваемой от колеса экипажа на рельс.

Предусмотрено определение следующих показателей:

характера нагружения с учетом множества всех поездов, обращающихся на заданном участке;

меры повреждаемости рельсов контактно-усталостными дефектами (КУД) за один цикл нагружения;

характера нагружения с учетом множества всех поездов;

меры повреждаемости рельсов КУД за один цикл нагружения.

Величина прогнозного тоннажа, который можно пропустить по заданному участку до исчерпания ресурса контактно-усталостной прочности (КУП) рельсов, устанавливается из условий:

$$n_i D_i = n_0 D_0 = G = \text{const},$$

где n_i — число осей, которое можно пропустить по участку i до исчерпания ресурса КУП;

D_i — показатель повреждаемости рельсов КУД на участке i при проходе одной оси поезда;

n_0 — число осей, пропущенных по опытному участку до исчерпания ресурса КУП;

D_0 — показатель повреждаемости рельсов КУД на опытном участке при проходе одной оси поезда.

Предлагаемый алгоритм и методика дают возможность решить ряд следующих эксплуатационных задач:

исследование влияния изменения эксплуатационных факторов на участке пути, в том числе влияние повышения осевой нагрузки или скорости движения поездов на усталостную долговечность рельсов;

исследование влияния различных конструктивных параметров подвижного состава и пути на усталостную долговечность рельсов;

учет влияния состояния пути (в том числе геометрического) в плане, профиле и по уровню на усталостную долговечность рельсов;

анализ существующих межремонтных норм и выявление их соответствия изменяющимся условиям эксплуатации пути.

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) в стыковых отверстиях рельсов Р65 и Р71 стыка болтового типа при различной нагрузке от колеса подвижного состава, а также при различном положении колеса [7]. Ниже в качестве примера представлены данные, полученные для случая нахождения колеса посередине стыка (см. таблицу).

Результаты анализа НДС участка пути в зоне стыковых скреплений с рельсами Р71 при использовании

Нагрузка, кН	Рельс	Напряжения, МПа									Разница напряжений, % (положительное значение обозначает снижение НДС при использовании рельса Р71)	
		Рельс типа Р65			Рельс типа Р71							
		1-е отверстие	2-е отверстие	3-е отверстие	1-е отверстие	2-е отверстие	3-е отверстие	1-е отверстие	2-е отверстие	3-е отверстие		
113	0	38,08	28,87	36,00	40,30	26,88	34,49	-5,50	7,43	4,38		
132	0	42,27	29,70	37,24	44,00	27,34	35,68	-3,92	8,64	4,37		
152	0	46,54	30,57	38,64	47,82	28,04	36,94	-2,66	9,03	4,60		
113	59	47,31	31,51	36,99	50,12	27,89	35,20	-5,60	13,00	5,07		
132	59	51,59	32,02	38,92	53,46	28,20	36,37	-3,50	13,54	7,01		
152	59	57,87	32,76	40,51	57,08	28,62	37,58	1,37	14,48	7,80		
113	118	60,19	34,13	39,632	55,73	29,30	37,89	8,00	16,49	4,60		
132	118	66,38	34,25	41,29	59,90	29,54	39,03	10,83	15,96	5,77		
152	118	72,66	35,33	42,97	64,09	30,27	40,40	13,38	16,73	6,34		
Среднее значение										1,38	12,81	5,55

стыка болтового типа показывают снижение эквивалентных напряжений в среднем от 6 до 37 % относительно стыка с рельсами Р65 в зависимости от положения колеса.

Наибольшее среднее снижение уровня НДС на 62 % при использовании рельса типа Р71 наблюдается в 1-м отверстии принимающего рельса при положении колеса над этим отверстием.

Применение рельса Р71 в стыковых скреплениях болтового типа вызывает перераспределение нагрузки и деформаций, возникающих в результате воздействия колес подвижного состава, что в целом приводит к снижению величин эквивалентных напряжений в стыковых отверстиях.

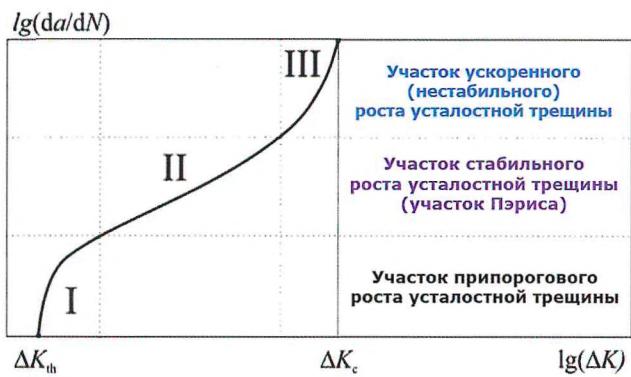
Результаты анализа НДС участка пути в зоне стыковых скреплений с рельсами Р71 при использовании стыка с композитными накладками показывают значительное снижение эквивалентных напряжений в среднем на 16–27 % относительно стыка с рельсами Р65 в зависимости от положения колеса.

Для анализа развития трещин широко применяются кинетические диаграммы разрушения материала, на которых экспериментальные результаты представляются в виде зависимости скорости роста трещины от амплитуды изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) [8].

На приведенной диаграмме (см. рисунок) имеются три характерных участка, соответствующие различным механизмам роста трещины.

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния гребневого контактирования вышеуказанных конфигураций системы «колесо-рельс» разработаны конечно-элементные модели, физико-механически и геометрически идентичные условиям эксплуатации. В местах непосредственного контактирования и в области концентрации эквивалентных напряжений проведено сгущение сетки элементов до размера 0,4–0,5 мм.

С применением данной модели проведен многовариантный расчет напряжений и давлений, возникаю-



Кинетическая диаграмма усталостного разрушения (схема)

ших при боковом контакте колеса и рельса для различных конфигураций поперечных профилей. При **вертикальном контакте** для расчетов использовали:

профили рельса без износа, с незначительным износом, с сильным износом;

профили колес без износа (новый профиль), с износом, профиль после ремонта без износа.

Нагрузку, передаваемую от колеса на рельс, принимали 4,91, 29,43, 112,82, 132,44 и 152,06 кН. Такое задание нагрузок позволяет в дальнейшем выполнить аппроксимацию результатов с коэффициентом корреляции Пирсона, близким к единице.

Положение колес подвижного состава по оси катания учитывали следующим образом: при уширении колеи на 8 мм — смещение колеса внутрь колеи относительно оси катания на 8 мм, а при сужении колеи на 4 мм — смещение колеса наружу колеи относительно оси катания на 4 мм. При недостаточном зазоре и переходе на боковое контактирование величина сужения подбирается, исходя из условия недопущения гребневого контакта.

Подуклонку рельсов принимали 1/20, 1/60 и 1/12.

При расчете сил в случае бокового контакта использовали:

профили рельса без износа, с незначительным износом, с сильным износом;

профили колеса без износа (новый профиль), с износом, ремонтный профиль без износа, конформный профиль УНИСОН.

В расчетах величину вертикальной нагрузки, передаваемую от колеса на рельс, принимали 28,2, 33,1, 38,01, 112,82, 132,44 и 152,06 кН; боковую силу — 19,62, 29,43, 58,86 и 117,72 кН; подуклонку рельсов — 1/20, 1/60 и 1/12.

Для прогнозирования отказа рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения в головке рельсов, образование и развитие которых зависит и возрастает по мере наработки тоннажа, была разработана методика. За основу принято известное математическое выражение, описывающее усталостную кривую металлов:

$$\sigma_0^m n_0 = G = \text{const.}$$

Окончательная формула, определяющая размеры тоннажа брутто, который можно пропустить по

участку i с заданными эксплуатационными характеристиками, при известном тоннаже брутто, пропущенном на опытном участке:

$$T_i = T_0 \frac{\bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}_i} \frac{P_i}{P_0} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3,$$

где T_i , T_0 — тоннаж брутто, пропущенный соответственно по i-му и опытному участкам до исчерпания ресурса контактно-усталостной прочности рельсов;

$\bar{\sigma}_0$, $\bar{\sigma}_i$ — средневзвешенные механические напряжения (контактные, эквивалентные, нормальные, изгибающие) в рельсах, возникающие соответственно на опытном и i-м участках;

P_i , P_0 — средняя нагрузка от колес подвижного состава соответственно на i-м и опытном участках;

α_1 — коэффициент, учитывающий влияние шлифовки рельсов;

α_2 — коэффициент, учитывающий кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия;

α_3 — коэффициент, учитывающий влияние климатических условий.

Основные параметры, которые учитываются в предлагаемой методике:

осевая нагрузка, нагрузка от колес подвижного состава (различные типы подвижного состава);

план линии — за счет добавления расчетных параметров боковых сил при прохождении кривых, а также оценки напряженено-деформированного состояния рельсов при боковом воздействии гребня колеса;

скорость движения подвижного состава — за счет добавления динамической составляющей в расчет напряженено-деформированного состояния рельсов;

наличие отступлений в профиле — за счет добавления дополнительных вертикальных усилий при прохождении неровностей в профиле железнодорожного пути;

влияние шлифовки рельсов — за счет добавления поправочного коэффициента;

кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия — за счет добавления поправочного коэффициента;

влияние климатических условий — за счет добавления поправочного коэффициента;

специфика воздействия подвижного состава на конкретном рассматриваемом участке — за счет введения весовых коэффициентов дефектов головки рельса.

Для реализации представленной методики определены зависимости контактных напряжений в системе «колесо—рельс» при различных осевых и боковых силах.

Список источников

1. Вериго В.Ф., Крепкогорский С.С. Общие предпосылки для корректировки правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил // Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность:

О НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВУХПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ В МЕТРОПОЛИТЕН



АФАНАСЬЕВА Т.А., Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), канд. техн. наук,
ХАРИТОНЕНКО А.Л., ПГУПС, канд. техн. наук,
ИСТОМИН С.В., Поволжский региональный учебный центр (ГАУ ДПО СО «ПРУЦ»),
докт. техн. наук

Метрополитен является одним из наиболее быстрых и удобных средств передвижения для крупных городов. Например, в Санкт-Петербурге доля метрополитена в структуре перевозок городского пассажирского транспорта достигает 49 % [1], провозная способность составляет около 400 тыс. пассажиров в час при максимальной суммарной вместимости подвижного состава 387,1 тыс. мест [1].

Определяющими факторами при проектировании и строительстве новых линий метро становятся экономия денежных средств и сокращение сроков сдачи объектов. Одним из эффективных способов, отвечающим этим запросам, является использование одного двухпутного тоннеля вместо двух однопутных. Это позволяет исключить необходимость устройства перекрестных съездов, эвакуационных сбоек, пере-

сборник. М.: Транспорт, 1972. С. 1–50. (Труды ВНИИЖТ; вып. 466.)

2. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность / Военная академия тыла и транспорта. Л., 1964. 56 с.

3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

4. Мейснер Б. А. Прочность и надежность рам локомотивных тележек (оценка и прогнозирование): автореф. дис. доктора техн. наук: 05.22.07 / ЦНИИ МПС. М., 1973. 43 с.

5. Шур Е.А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1977. № 8. С. 38–41.

6. Коган А. Я., Абдурашитов А. Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2014. № 4. С. 3–7.

7. Ovchinnikov D., Pokatsky V., Gallyamov D. Factors affecting the dynamic rail canting of the railway track // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 54. P. 544–551. DOI: doi:10.1016/j.trpro.2021.02.106.

8. Шур Е.А. К вопросу о совершенствовании расчетов рельсов на прочность // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т.75, № 4. С. 207–216.

9. Исследование и моделирование возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах / И.Г. Горячева, А.И. Борц, С.М. Захаров, К.Л. Загоричек, Е.А. Шур // Трибология — машиностроению: труды конференции. Ижевск, 2018. С. 146–149.

10. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами / Н.А. Махутов, В.С. Коссов, Э.С. Оганьян, Г.М. Волохов, М.Н. Овечников, А.Л. Протопопов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86, № 4. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55>.

11. Abdurashitov A.Y., Sychev V.P. Evaluation of the strain-stress condition of rails // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). 2020. P. 012001. doi: 10.1088/1757-899X/760/1/012001. (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; Vol. 760.)

12. Ovchinnikov D.V., Gallyamov D.I. Evaluation of rail overturning under the influence of lateral forces by mathematical modeling // Transportation Research Procedia. 2023. P. 717–725. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.099.

13. Ovchinnikov D.V., Dorofeev Ya.V. Method of laying rail and sleeper grids in curves of small radius // AIP conference proceedings. 2023. Vol. 2476, Iss.1. P. 030037. — DOI 10.1063/5.0103324.

Development of a methodology for assessing the impact of rolling stock on rails in terms of their strength and stability

Abdurashitov Anatoly — Ph.D, Head of the Rails Department of the Infrastructure Design Bureau — Branch of JSC Russian Railways. Moscow, Russian Federation. abdran@yandex.ru

Abstract. The main types of calculations of rails are presented, namely: cyclic when preventing the formation of fatigue cracks in the sole and neck; cyclic contact when preventing the formation of contact fatigue cracks in the head of a regulated type and size within the resource (or regulation of probability); survivability, taking into account the presence of defects and cracks, while preventing complete brittle destruction of the entire section. The main types of wheel and rail contact, ridge, vertical and lateral, are analyzed.

Keywords: calculation of rails for strength, fatigue cracks, ridge contact, rail life, survivability.

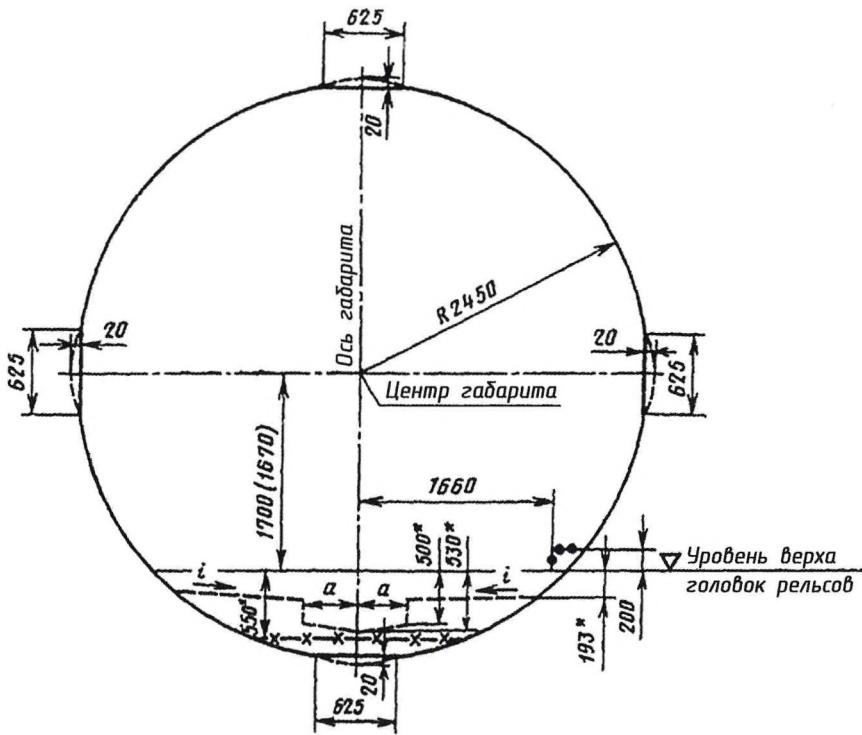


Рис. 1. Габарит приближения строений Смк для тоннелей кругового очертания на перегонах

ходов из тоннеля в тоннель. Также при этом повышается безопасность пассажиров, поскольку эвакуационные выходы будут располагаться в стволах шахт тоннелей [2].

Основными руководящими нормативными документами по строительству и проектированию метро-

политенов на сегодняшний день являются ГОСТ 23961–80 [3] и СП 120.13330.2022 [4].

Свод правил [4] содержит требования по проектированию, строительству и приемке в эксплуатацию новых и реконструируемых линий, объектов и устройств метрополитена. С точки зрения обеспечения безопасности персонала и работников, находящихся в тоннелях и на парковых путях, интерес представляют пп. 5.4.2.1–5.4.2.2. В них указывается, что перегонные тоннели должны иметь внутренние размеры, обеспечивающие пропуск поездов в соответствии с требованиями [3], а также размещение в них путевых устройств, служебных мостиков, оборудования, светильников, кабельных коммуникаций и др. Однако уже в п. 5.3.15 [4] появляется следующая формулировка: «В двухпутных перегонных тоннелях банкетку для укрытия обслуживающего персонала следует выполнять в соответствии с заданием на проектирование». Данный пункт отсутствовал в СП 120.13330.2012, действовавшем

до 2023 г. на момент проектирования и строительства первых двухпутных тоннелей в Москве и Санкт-Петербурге [5].

В разделе 3 и приложении № 1 Постановления Правительства РФ № 87 [6] в технической части вообще не содержится предписаний о наличии служебных мостиков либо банкетки.

В то же время п. 1.2 [3] четко регламентирует, что пространство между габаритами приближения строений и оборудования предназначено для размещения устройств пути, автоматики, телемеханики и связи, электроснабжения, освещения, санитарной техники, а также дорожек для прохода обслуживающего персонала, пешеходных мостиков и платформ на перегонах между станциями.

Необходимо отметить, что [3] устанавливает требования при проектировании и строительстве однопутных тоннелей кругового очертания на перегонах с указанием габаритов приближения строений (рис. 1) и не содержит обязательных требований для двухпутного тоннеля. Вследствие этого п. 5.3.15 [4] позволяет пренебречь п. 1.2 [3], а, следовательно, не обеспечивается безопасность персонала метрополитена, так как задание на проектирование может вообще не содержать упоминания о банкетке.

В настоящее время и в Москве, и в Санкт-Петербурге уже сооружены первые двухпутные тоннели. Проектирование двухпутного участка для тоннелей кругового очертания на перегонах выполнено

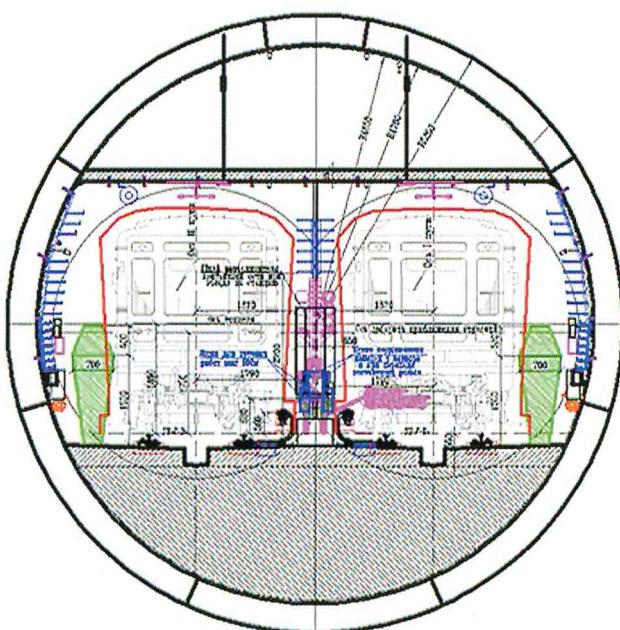


Рис. 2. Поперечное сечение двухпутного тоннеля

методом наложения очертаний габаритов двух тоннелей кругового очертания (см. рис. 1) [3], что хорошо видно на рис. 2 [7].

На основании чертежей поперечных сечений можно сделать вывод, что при наложении очертаний габаритов двух однопутных тоннелей создается один двухпутный, при этом наложение происходит по левым сторонам габаритов.

Изучение открытых источников, в том числе находящихся в свободном доступе чертежей поперечных сечений построенных двухпутных тоннелей (см. рис. 2), показало, что в тоннеле с боковых сторон отсутствуют служебные мостики или банкетки. Это означает, что при проектировании не закладывалось обязательное по ГОСТ требование места для укрытия обслуживающего персонала. Такая проблема возникла, в частности, при строительстве первых двухпутных тоннелей в Санкт-Петербурге.

Согласно п. 5.3.15 [4] в перегонных тоннелях внутренним диаметром 5,2 м и менее со стороны, противоположной контактному рельсу, следует располагать пешеходную дорожку для прохода обслуживающего персонала на высоте 0,2 м от уровня головки рельсов. Несмотря на то, что двухпутные тоннели могут иметь внутренние диаметры от 9,3 до 9,6 м [2], габарит приближения строений соответствует [3] и выполнен у каждого из двух путей диаметром 4,9 м. Это позволяет рассматривать каждый путь как самостоятельную единицу, подпадающую под характеристику данного пункта.

Для обеспечения безопасности пассажиров в случае экстренной эвакуации и работников, если в тоннеле нет иного безопасного прохода (банкетки), можно предусмотреть средства подмащивания не только перед входом в соединительные сбоки и в местах установки оборудования, но и на всем протяжении перегонного тоннеля. Они представляют собой глубокий путевой лоток внутри колеи и выступающих частей подкладок рельсов. Такая рекомендация соответствует п. 10.2.6 [8], в котором указано, что, если верхнее строение пути между ходовыми рельсами используется в качестве прохода людей во время эвакуации, то над путевым лотком следует располагать средства подмащивания, как на рис. 3.

В заключение отметим, что использование двухпутных тоннелей круглого сечения имеет много преимуществ с точки зрения экономии денежных средств, сокращения времени и уменьшения площадей строительства. Однако отсутствие полноценных государственных стандартов на их проектирование приводит к смещению акцентов и изменению формулировок в сопутствующих нормативно-правовых актах по вопросам мер безопасности при нахождении работников в двухпутном тоннеле. Последующая эксплуатация таких перегонов может повлечь за собой незащищенность персонала на месте выполнения работ, увеличение времени ремонтов, сбой в графике прохождения поездов, а также создать опасность для

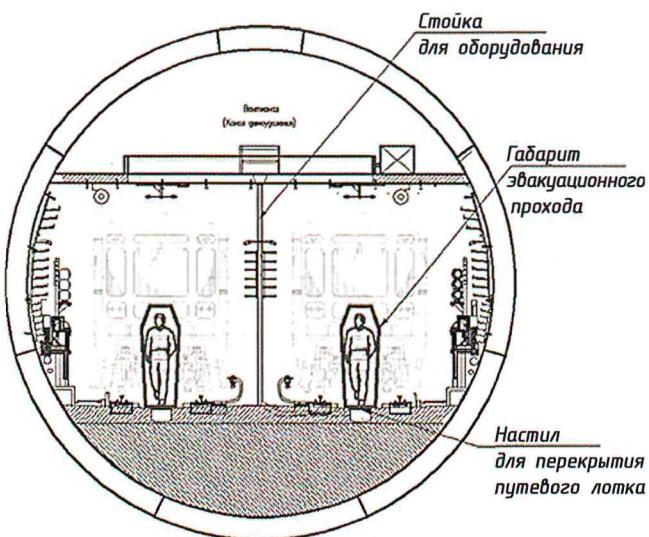


Рис. 3. Вариант размещения эвакуационного пути внутри колеи

обычных пассажиров во время нештатных ситуаций в двухпутном тоннеле метрополитена.

Список источников

1. О внесении изменений в постановление Правительства Санкт-Петербурга от 30.06.2014 N 552: Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 19.10.2021 № 792. URL: <https://docs.cntd.ru/document/72654779?section=text> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Двухпутный тоннель на участке «Проспект славы» – «Шушары»: // Подземный эксперт: Информационный портал. 2013. 18 марта. URL: <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/tehnologii/dvukhputnyj-tonnel/print/> (дата обращения: 1.04.2024).
3. ГОСТ 23961-80. Метрополитены. Габариты приближения строений, оборудования и подвижного состава. Введ. 01.07.1980. М.: Издательство стандартов, 1980.
4. СП 120.1330.2022. Свод правил. Метрополитены. Введ. 28.01.2023. Доступ через Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (дата обращения: 1.04.2024).
5. Построен первый двухпутный тоннель на Кожуховской линии метро / М. Хуснуллин // BUSTREN: инжиниринговая компания: сайт. 2018. 1 февр. URL: <https://bustrenrm.ru/pervyi-dvuhputnyi-tonnel-kozhuhovskaya/> (дата обращения: 1.04.2024).
6. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 года № 87 (ред. от 15.09.2023). Доступ через Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (дата обращения: 1.04.2024).
7. Лебедев М.А. Безопасность строительства двухпутного тоннеля метро в четвертичных отложениях // Подземный эксперт: информационный портал: сайт. 2023. URL: <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/nauchnye-stati/bezopasnost-tonnel-v-chetvertichnykh-otlozheniyakh/?ysclid=lutqub5iw9186002124> (дата обращения: 1.04.2024).
8. Технические рекомендации по проектированию двухпутных тоннелей метрополитена щитами с активным пригрузом забоя и водонепроницаемой сборной железобетонной обделкой в гидрогеологических условиях Московского региона: ДГП 16-34-ГП: утв. 11.05.2018 / Правительство г. Москвы; Департамент градостроительной политики. М., 2018. 106 с.

ВЕК ПРОФЕССОРА С.П. ПЕРШИНА

Также С.П. Першин организовал учебные лаборатории кафедры «Строительное производство» по технологии и автоматизации строительных процессов, оснащенные современным на тот период оборудованием: дозатором, автоматическими устройствами по управлению технологическими процессами в строительстве, тренажером экскаватора, схемами ведения технологических процессов.

Сергей Петрович разработал Автоматизированную систему организации, регулирования, исследования, оптимизации и нормализации (АС ОРИОН), которая представляет собой совокупность моделей и программ, позволивших создать вычислительный аппарат для анализа и аванпроектирования. АС ОРИОН была принята за основу прогнозирования и перспективного развития сети железных дорог России. В рамках АС ОРИОН спроектированы и получили распространение модели автоматизированных мест для экспертизы проектов железнодорожных линий.

На кафедре под руководством С.П. Першина был составлен аванпроект Лено-Беринговской железной дороги, а после обсуждения в научно-координационном центре Совета «Трансконтиненталь» проанализирована целесообразность железнодорожных выходов из России через

Сахалин в Японию, а также в Индию. Сейчас такие идеи обретают новую жизнь в связи с изменившимися геополитическими условиями.

В рамках АС ОРИОН С.П. Першин создал научную школу по моделированию и расчету параметров комплексов работ, составляющих систему железнодорожного строительства, которая основана на декомпозиции процесса сооружения железной дороги на подпроцессы по комплексам работ. Он подготовил по данным направлениям более 20-ти кандидатов и одного доктора технических наук.

Опираясь на расчетные материалы, полученные аспирантами, коллектив преподавателей кафедры под руководством Першина написал учебник «Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог» (издан в 1991 г.)

В 1993–1994 гг. профессор С.П. Першин предложил автоматизированную систему управления качеством пути для повышения безопасности движения.

Сергея Петровича всегда отличала способность просто и доступно описывать сложные процессы железнодорожного строительства и их взаимосвязи. Им подготовлено в общей сложности около 120 научных работ. Всегда поражала его трудоспособность в выполнении большого объема аналитических исследований, понимании сложных процессов.

Сергей Петрович много лет занимался проблемами рационализации скоростных режимов движения поездов. Он разработал алгоритмы и расчетные программы для теоретических исследований проблемы, возникающей при смешанном движении поездов, т. е. когда в поездопоток включены легкие пассажирские и тяжелые грузовые поезда.

В 1996–1998 гг., будучи уже нездоровым, С.П. Першин сформировал на кафедре «Строительное производство» впервые в истории факультета «Строительство железных дорог» авторский класс, где студенты дополнительно углубленно изучали вопросы системного анализа и подхода к такой сложнейшей инфраструктуре, как железнодорожный транспорт.

Большое место в жизни профессора С.П. Першина занимала международная деятель-



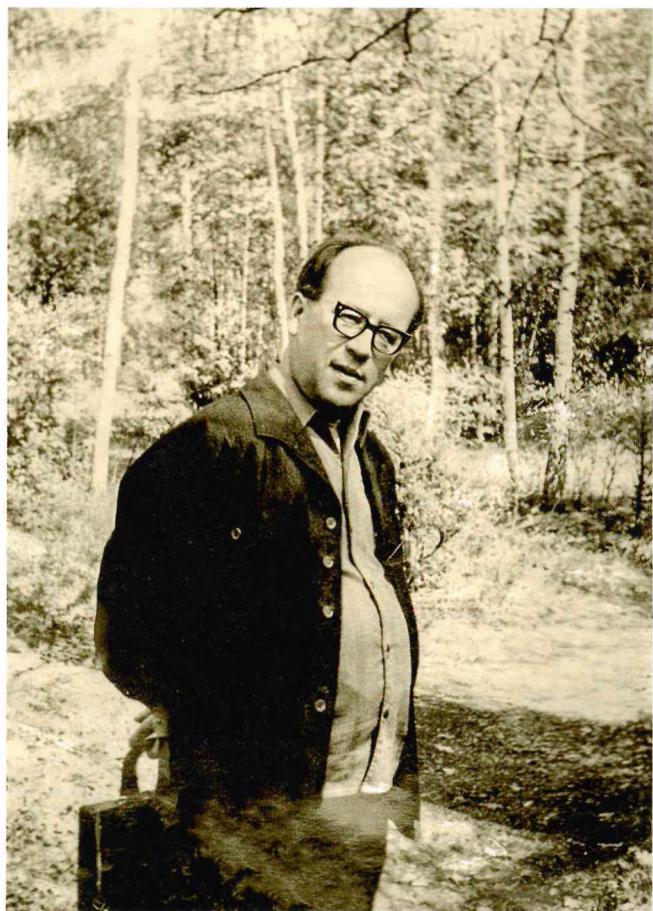
С.П. Першин — студент МИИТа, 1948г.

ность, которая выражалась в подготовке аспирантов и ведении международных курсов лекций для студентов КНР, Вьетнама, Сирии и др.

Сергей Петрович был постоянным автором и членом редколлегий ведущих отраслевых журналов, таких как «Путь и путевое хозяйство», «Железнодорожный транспорт», «Транспортное строительство». Его рецензии и заключения на статьи представляли собой глубокий анализ материала, и в то же время по форме это был доброжелательный разговор с автором, а не нравоучение. Символично, что выход в 1957 г. первой статьи С.П. Першина совпал с годом создания журнала «Путь и путевое хозяйство», в котором за годы тесного сотрудничества было опубликовано 85 его статей!

Сергей Петрович активно интересовался историей развития железнодорожного дела. Им написаны очень познавательные книги, изданные в издательстве «Транспорт». Среди них: «Развитие строительно-путевого дела на отечественных железных дорогах» (1978 г.); «Строитель железных дорог. Производство. Инженер. Творчество» (1985 г.); словарь (монография) «Азбука железнодорожного дела: термины, понятия, определения» (1990 г.) и др. В них дается систематизированный научно-технический обзор развития строительно-путевого дела с момента зарождения железнодорожного транспорта в России, проанализировано развитие техники, технологий и инженерных воззрений в области путевого хозяйства, основанное на материалах, опубликованных в дореволюционный и в послереволюционный периоды. Исторические факты излагаются в такой последовательности, которая позволяет понять, как и почему возникли те или иные конструктивные решения и инженерные концепции. Освещены условия и особенности отраслевого строительства в дореволюционный период, рассмотрена разработка основ конструирования пути и его содержания, приведены краткие сведения о развитии железнодорожного транспорта в послереволюционный период, изложены некоторые частные закономерности развития идей и факторов совершенствования пути.

Сергей Петрович вообще был разносторонним человеком. Он любил проводить свободное время на природе и часто в выходные дни вместе с супругой Ольгой Александровной выезжал на пленэр. Им написаны красивые пейзажи, не-



С.П. Першин — заведующий кафедрой «Строительное производство» МИИТа, 1984 г.

сколько автопортретов, которые, к сожалению, утеряны. Сергей Петрович любил музыку, играл на нескольких музыкальных инструментах, посещал филармонию.

С.П. Першин удостоен званий Заслуженный деятель науки и техники СССР, Почетный профессор МИИТа, знака «Почетный железнодорожник». Как участник Великой Отечественной войны награжден орденами Октябрьской революции, Трудового Красного Знамени, медалями «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За победу над Японией».

Сергей Петрович Першин воспитал не одно поколение инженеров, которые успешно трудятся в различных отраслях народного хозяйства, прежде всего, на транспорте и в транспортном строительстве. Со всеми он общался на равных, чем снискдал о себе добрую память.

ШЕПИТЬКО Т.В., докт. техн. наук,
ЛУЦКИЙ С.Я., докт. техн. наук,
СПИРИДОНОВ Э.С., канд. техн. наук

УДК 691-462; 691.714.018.8; 691-404

БАЛКА ПОВЫШЕННОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ



ПОПОВ И.П., Курганская государственная академия, канд. техн. наук

Аннотация. При нагружении гидравлической балки, которая представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью заполненную жидкостью, ее боковая поверхность стремится деформироваться. Следовательно, внутренний объем трубы стремится уменьшиться. Но поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

Ключевые слова: трубчатая балка, двутавровая балка, гидравлическая балка, жидкый наполнитель, полость.

Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Однако на практике нередко используются и трубчатые балки, что связано с их широким распространением и доступностью.

Сравнивать несущую способность этих типов балок следует при условии их равной массы, например, двутавровой балки по ГОСТ Р 57837–2017 и трубы по ГОСТ 33228–2015, масса каждой из которых составляет 194 кг/м.

Осевой момент сопротивления, см^3 , двутавровой балки ${}^{l-b}W_x = 5625$, а трубчатой балки — ${}^pW_x = 2950$. При этом несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой (${}^{l-b}W_x / {}^pW_x = 5625/2950 \approx 1,9$).

В настоящее время исследуются [1–4] трубобетонные балки, в частности с преднатянутой нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзоарматуры. Они обладают значительной несущей способностью при невысокой себестоимости и хорошей технологичностью.

Рассмотрим далее повышение несущей способности трубчатых балок в целях расширения ассортимента строительных конструкций и улучшения их эксплуатационных свойств.

Трубчатая балка с жидким наполнителем. Использование жидкого наполнителя для трубчатых балок возможно благодаря такому свойству жидкости, как ее практическая несжимаемость.

Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, об-

ладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга. Этому условию соответствует круглая труба.

Трубчатая балка с жидким наполнителем (далее — гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью (см. рисунок).

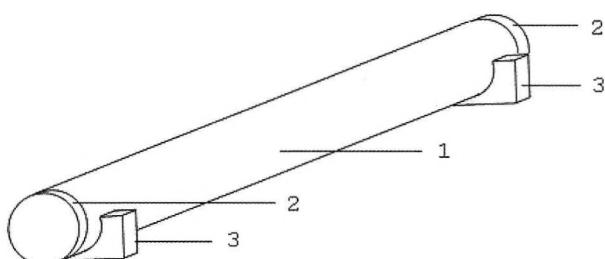
При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться, а следовательно, внутренний объем трубы — уменьшиться. Но поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

При нагружении гидравлической балки, например, прямоугольного сечения и соответствующем повышении давления жидкость будет стараться деформировать стенки, вследствие чего прямоугольный профиль будет стремиться трансформироваться в круглый, а площадь профиля — увеличиться. Это может привести к недопустимому прогибу балки.

Другими словами, в гидравлической балке прямоугольного сечения уменьшение внутреннего объема, вызванного прогибом, компенсируется увеличением объема, обусловленного трансформацией профиля (суммарный объем несжимаемой жидкости остается неизменным). И чем больше прямоугольный профиль будет трансформироваться в круглый, тем больше будет прогиб.

У круглой трубы нет возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно, нет резерва увеличения внутреннего объема. Таким образом, исключено уменьшение внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости изменяться не может. В идеальном варианте прогиб круглой гидравлической балки исключается.

Приведем пример. Если пустой расправленный матерчатый мешок (аналог балки) положить на два стула (аналог опор), то он под действием собственного веса прогнется и провалится между стульями. Если этот же мешок плотно заполнить, например керамзитом, и завязать его, то он не только не провалится между



Гидравлическая балка:

1 — труба с жидкостью; 2 — концевые заглушки; 3 — опоры

стульями, но и сможет выдержать дополнительную нагрузку.

Несущая способность. Пусть при сверхпределном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), которое приведет к выходу ее из строя, пластической деформации подвергается часть поверхности трубы s . В самом первом приближении, достаточном для предварительной оценки, предельное напряжение в деформированных участках поверхности трубы:

$$\sigma^* = F^*/s,$$

где F^* — сила нагружения.

Благодаря жидкости вся нагрузка равномерно распределится по внутренней поверхности гидравлической балки (в соответствии с законом Паскаля). При этом давление на внутреннюю поверхность трубы, не принимая во внимание площадь концевых заглушек, составит:

$$p = F^*/S,$$

где S — площадь всей поверхности трубы.

Следовательно, $q = \sigma^*/p = S/s$, т. е. в первом приближении несущая способность гидравлической балки выше, чем трубчатой, в q раз.

По некоторым экспертным оценкам при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается около 10 % поверхности трубы ($q \approx 10$). Несущая способность гидравлической балки примерно в 10 раз выше, чем трубчатой, и в пять раз выше, чем двутавровой.

Конструктивные особенности. В случае если концевые заглушки плоские, места их сварки с трубой являются сильным концентратором напряжений. Оптимальной формой концевых заглушек является полусфера.

Полости соседних гидравлических балок в силовой конструкции, например в пролетном строении моста, могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков). Это позволит равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Суммарная «рабочая» площадь всех гидравлических (сообщающихся) балок увеличивается кратно их количеству, и давление в балках

$$p = F/(nS), \quad (1)$$

где n — количество сообщающихся гидравлических балок. Соответственно в n раз увеличивается несущая способность.

В качестве жидкого наполнителя гидравлических балок во многих случаях следует использовать незамерзающие жидкости. В целях экономии внутренние полости балок можно частично заполнять твердым дисперсным материалом, например керамическим ломом, щебнем и т. п.

Заключение. Перспективность применения железобетонных балочных конструкций, а также рассмотренной гидравлической балки заключается в замещении металла. Приведенные выше расчеты несущей способности являются грубым приближением. В слу-

чае практического применения таких элементов потребуются более тщательные исследования с учетом площади поверхности концевых заглушек, различий между давлением и напряжением (например, смятия), упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов.

При этом полученное пятикратное превышение несущей способности гидравлической балки, по сравнению с двутавровой, и 10-кратное превышение, по сравнению с трубчатой, могут быть скорректированы как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок в соответствии с формулой (1) можно добиться значительного повышения несущей способности пролетных конструкций [5–9].

Преимущество гидравлической балки перед всеми другими типами балок заключается в том, что у нее «работает» (в одинаковой мере) весь материал, из которого она изготовлена.

Список источников

1. Патент № 2675273 РФ, Е04C 3/293, Е01D 19/00. Трубобетонная балка / Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.Г., Харин В.В., Овчинников И.И., Харин А.В., Попов И.П., Воронкин В.А. № 2017145446; заявл. 22.12.2017; опубл. 18.12.2018, Бюл. № 35.
2. Патент 2702444 РФ, Е01D 2/00. Пролетное трубобетонное строение моста / Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Мосин А.А., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Харин В.В., Попов И.П., Харин А.В., Воронкин В.А. № 2019103410; заявл. 06.02.2019; опубл. 08.10.2019; Бюл. № 28.
3. Применение трубобетона в транспортном строительстве / Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков, И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.Ю. Моисеев, В.И. Копырин, В.В. Харин, И.П. Попов, В.А. Воронкин // Дорожная держава. 2019. № 90. С. 74–80.
4. Малые мосты на трубобетонных элементах — технологический прорыв в нацпроекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Ч. 1 / Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков, И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, О.Ю. Моисеев, В.И. Копырин, В.В. Харин, И.П. Попов, В.А. Воронкин // Дорожная держава. 2019. № 91. С. 34–39.
5. Соловьев Л.Ю. Тепловой метод контроля усталостных трещин в сварных пролетных строениях мостов // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 24–27.
6. Каптелин С.Ю., Марченко М.С. Предварительное напряжение балочных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 9. С. 25–28.
7. Усилия в элементах металлических пролетных строений с ортотропным балластным корытом / И.В. Засухин, А.М. Усольцев, К.О. Жунев, К.В. Кобелев // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 5. С. 20–22.
8. Кондратов В.В., Олеков В.М., Румянцев Е.И. Результаты испытаний на выносливость металла пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 10. С. 22–26.
9. Кондратов В.В., Рупасова И.В. Оценка грузоподъемности стальных решетчатых пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 9. С. 10–14.

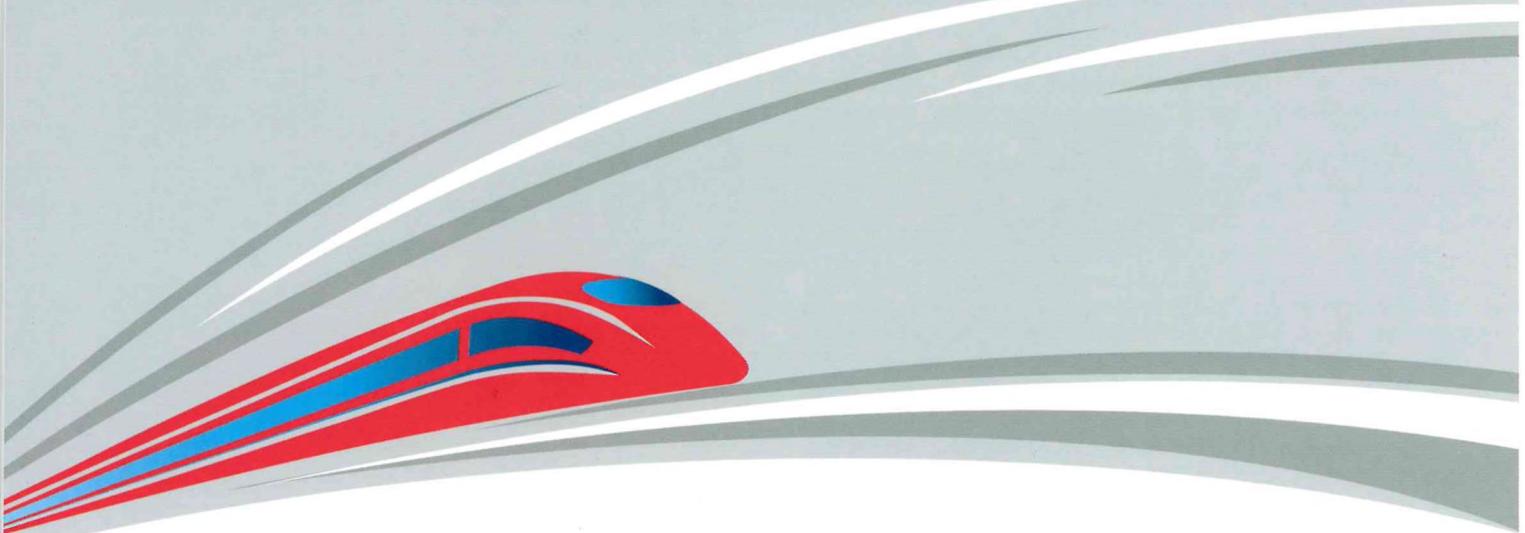
INCREASED LOAD CAPACITY BEAM FOR BRIDGE SUPPLY STRUCTURES

Popov Igor — Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Metal-Cutting Machine Tools and Tools, Kurgan State University. Kurgan, Russia. uralakadem@kurganstalmost.ru. SPIN-code: 9668-2780.

Abstract. The hydraulic beam is a round pipe plugged at both ends and completely filled with liquid. When a hydraulic beam is loaded, its side surface tends to deform. Consequently, the internal volume of the pipe tends to decrease. But, since the liquid is incompressible, it does not allow a decrease in volume, which, in turn, prevents the pipe from deforming.

Keywords: tubular beam, I-beam, hydraulic beam, liquid filler, cavity.

Рекламно-информационное сотрудничество – эффективная поддержка в продвижении вашего бизнеса



Наши отраслевые журналы ориентированы на широкий круг читателей – от руководителей и специалистов до студентов и учащихся железнодорожных учебных заведений.

- Журнал «Железнодорожный транспорт» издается с 1826 г.
- Журнал «Путь и путевое хозяйство» издается с января 1957 г.
- Журнал «Локомотив» издается с 1957 г.
- Журнал «Вагоны и вагонное хозяйство» издается с 2005 г.
- Журнал «Железные дороги мира» издается с 1961 г.
- Журнал «Автоматика, связь, информатика» издается с 1923 г.

Нас читают во всех регионах России, в десятках стран ближнего и дальнего зарубежья, на предприятиях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.

Наше сотрудничество будет полезным для налаживания взаимовыгодных контактов, деловых партнерских отношений.

**По вопросам размещения рекламы
обращаться в ЦНТИБ ОАО «РЖД»**

Телефон: (499) 262-54-29

Факс: (499) 262-69-11

E-mail: cntib@css-rzd.ru

Почтовый адрес: 107996, г. Москва, Рижская площадь, д. 3

