

ИЛШАТ.Т. МИРСАЯПОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАВЛОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕ-ФИБРОБЕТОННОЙ ПОЛУШПАЛЫ ПУТИ ПОНИЖЕННОЙ ВИБРАЦИИ

**Аннотация.** В статье рассматривается решение актуальной проблемы ограничения трещинообразования в полушпалах, предназначенных для путей с пониженной вибрацией. В качестве эффективной конструктивной меры предлагается применение сталефибробетона, обладающего повышенными прочностными и деформативными характеристиками. Исследование, проведённое в два этапа, включало экспериментальные методы на натурных образцах и численное моделирование напряженно-деформированного состояния. В результате установлено, что сталефибробетонная полушпала превосходит традиционную железобетонную по несущей способности на 198 %. Также наблюдается многократный рост трещиностойкости: сопротивление образованию нормальных трещин увеличивается на 300 %, а наклонных — на 679 %. Полученные результаты подтверждают, что применение сталефибробетона позволяет не только выполнить строгие нормативные требования по трещиностойкости, но и существенно повысить общую надёжность и долговечность конструкции в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** путь пониженной вибрации, сталефибробетон, численные исследования полушпал, экспериментальные исследования полушпал.

ILSHAT.T. MIRSAYAPOV<sup>1</sup>, M.N. PAVLOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

## STRESS-STRAIN STATE OF A STEEL-FIBER-CONCRETE HALF-SLEEPER OF A LOW-VIBRATION TRACK

**Abstract.** The article addresses a pressing issue of limiting crack formation in semi-sleepers designed for tracks with reduced vibration. As an effective design solution, the use of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC), which possesses enhanced strength and deformation characteristics, is proposed. The study, conducted in two stages, involved experimental methods on full-scale specimens and numerical modeling of the stress-strain state. The results established that the steel-fiber-reinforced concrete semi-sleeper surpasses the traditional reinforced concrete one in load-bearing capacity by 198%. Furthermore, a multiple increase in crack resistance was observed: resistance to the formation of normal cracks increased by 300%, and to inclined cracks—by 679%. The obtained results confirm that the application of steel-fiber-reinforced concrete not only allows for meeting stringent regulatory requirements for crack resistance but also significantly enhances the overall reliability and durability of the structure under service conditions.

**Keywords:** low-vibration track (LVT), steel fiber concrete, numerical studies of half-sleepers, experimental studies of half-sleepers.

## 1. Введение

Рост грузопотока и пассажиропотока приводит к увеличению массы, скорости и осевой нагрузки подвижного состава, что в свою очередь требует замену традиционных железнодорожных путей по деревянным и железобетонным шпалам на индустриальный путь пониженной вибрации (LVT – Low Vibration Track), который получил свое распространение и широко используется в Европе, США, Канаде, Тайване, Корее и Китае [1]. Данный путь представляет из себя железобетонные полушпалы в резиновых чехлах с подшпальными и подрельсовыми демпфирующими прокладками. Полушпалы укладывают на опорную плиту основания и затем замоноличивают путевым неармированным бетоном [2].

В работах [3], [4] отмечено, что резиновые прокладки существенно увеличивают скорость затухания вибрации, уменьшают ускорение, а также амортизируют прямой удар полушпал по плите. Трещиностойкость конструкции пути пониженной вибрации на основе эксперимента полномасштабной модели была изучена в [5]-[7]. Численная модель резинового чехла и прокладок – модель Mooney-Rivlin solid изучена в [8], [9]. В работе [10] была получена нагрузка отказа в ходе численного исследования, она составила 36 т. Механические характеристики пути пониженной вибрации также изучались на основе новой модели усталостного повреждения бетона с концентрацией микротрещин II типа для бетона [11]. НДС плиты основания пути было описано авторами [12]-[15]. Износ рельса и исследование работы рельса под действием динамических нагрузок пути пониженной вибрации были исследованы в работах [16], [17]. Усталость пути пониженной вибрации была исследована авторами [18], [19] в ходе экспериментального исследования. В выводах было отмечено снижение виброгасящих свойств резиновых прокладок, а также увеличение динамической и статической жесткости крепежных элементов пути. В ходе исследования динамических характеристик пути пониженной авторы [20], [21] выявили, что из-за удара рельса о полушпалу и полушпалы о путевую плиту наблюдается неравномерное развитие продольных растягивающих напряжений в плите в зоне под местом удара, что может привести к образованию трещин, а в полушпале продольные растягивающие напряжения уменьшаются, т.е. удар вызывает в ней дополнительные сжимающие напряжения. Авторы провели исследование [22], в ходе которого изменили угол наклона короткой стороны железобетонной полушпалы LVT, а в работе [23] модифицировали форму резинового чехла под новые размеры полушпалы, и на основе полномасштабного эксперимента показали, что это привело к уменьшению вибрации в рельсе, полушпале и путевом бетоне, увеличению несущей способности полушпалы, росту устойчивости к опрокидыванию рельса и расширению колеи.

Во всех исследованиях железобетонных полшупал LVT наблюдается возникновение трещин в нижней части полушпалы (в растянутой зоне). Нормами Российской Федерации шпалы должны быть испытаны для обязательного подтверждения их соответствия техническим требованиям, указанных в российском государственном стандарте ГОСТ 33320-2015 «Шпалы железобетонные для железных дорог» [24], в том числе обеспечение трещиностойкости данных конструкций. Для увеличения трещиностойкости полушпал предлагается использовать сталефибробетон Vf80 со стальной фиброй взамен тяжелому бетону В40. Сталефибробетон имеет ряд преимуществ в сравнении с обычным бетоном, главные из которых – повышенная прочность бетона на изгиб/растяжение, увеличение вибрационной стойкости бетона, препятствие раскрытию трещин. В патенте [25] описывается фибробетонная полушпала, армированная композитной арматурой, которая обладает повышенными характеристиками трещиностойкости, долговечности и отсутствием электрокоррозии. В работе [26] приводится сравнительный анализ полушпал для метрополитена, который показал, что полушпалы из фибробетона обладают более высокими прочностными характеристиками, они имеют большую прочность на сжатие и на растяжение при изгибе. В исследовании [27]-[29] показано, что модуль упругости фибробетона повышается пропорционально расходу стальных и стеклянных волокон и снижается при

введении полипропиленовых волокон, а характер разрушения при этом переходит из хрупкого в вязко-пластичный [30].

За основу данного исследования была взята работа [31], в которой на основе численных и экспериментальных исследований были проанализированы прочностные и деформативные характеристики полушпал LVT. Результаты исследования [31] показали, что при испытании железобетонных полушпал нормальные трещины образуются при бт, что недопустимо по требованиям российского государственного стандарта ГОСТ 33320-2015 «Шпалы железобетонные для железных дорог» [24]. Поэтому актуальной задачей остается повышение трещиностойкости данных конструкций. Целью данной работы является увеличение трещиностойкости данных полушпал за счет введения в бетон стальной фибры. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Испытать сталефибробетонные образцы полушпал LVT для получения опытных данных в ходе экспериментальных исследований.
2. Полученные результаты верифицировать в ходе численных исследований в программном комплексе Ansys Workbench.
3. Провести сравнение прочностных и деформативных характеристик полушпал из обычного тяжелого бетона и сталефибробетона.

## 2. Методы и модели

### Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено и испытано 3 образца полушпал LVT на действие вертикальной статической нагрузки по аналогии с исследованием [31]. Полушпалы изготавливались в заводских условиях и поставлялись в лабораторию при КГАСУ (Казанском государственном архитектурно-строительном университете). Образцы изготавливались из сталефибробетона СФБТ В<sub>f80</sub> В<sub>f5</sub>.

Процент распределения фибры по объему 1%. Арматурный каркас полушпал выполнен по патенту [32], разработанного сотрудниками КГАСУ совместно с представителями АО «Казметростроя». Класс арматуры принят А500С, верхнее армирование представляет из себя 4 продольных стержня диаметром 10 мм, нижнее армирование – 4 продольных стержня диаметром 12 мм. Хомуты выполнены также из арматуры А500С, диаметр 8 мм. Общий вид и армирование полушпалы схематически представлены на рис. 1. Арматурный каркас представлен на рис. 2.

Значения прочностных характеристик сталефибробетонных полушпал были определены непосредственно в ходе лабораторных испытаний на заводе. Полученные данные приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 - Характеристики сталефибробетона

№ образца	Содержания фибры, %	Призменная прочность на сжатие серии образцов, МПа	Класс прочности на сжатие	Прочность на растяжение серии образцов-балок на изгиб, МПа	Класс прочности на растяжение
1	1	60.7	В <sub>f80</sub>	7.9	В <sub>f5</sub>
2		60.5		7.4	
3		60.3		7.2	
	Среднее значение	60.5	Среднее значение	7.5	

Таблица 2 - Характеристики стальной стержневой арматуры

№ образца	Армирование образцов	Сопротивление на растяжение, МПа
1 - 3	4 Ø12 A500C 4 Ø10 A500C хомуты Ø8 A500C	500

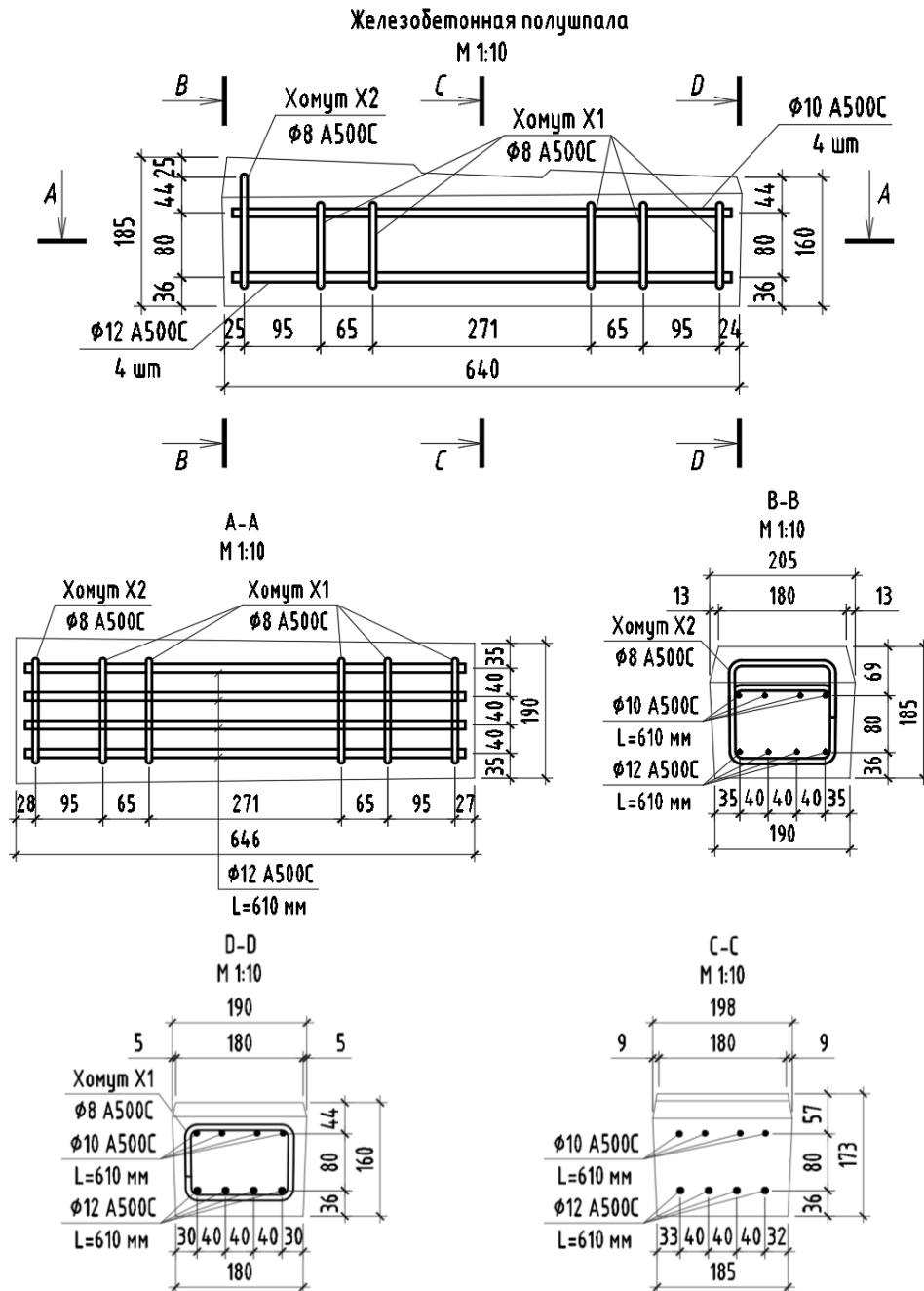


Рисунок 1 – Общий вид и армирование полушпалы [31]



*Рисунок 2 – Арматурный каркас полушпалы*

Значения прочностных характеристик сталефибробетонных полушпал были определены непосредственно в ходе лабораторных испытаний на заводе. Полученные данные приведены в табл. 1 и 2.

В процессе экспериментального исследования было испытано 3 образца сталефибробетонных полушпал. Испытание подготовленных образцов осуществлялись в учебно-лабораторном центре при КГАСУ. Для проведения испытаний использовались индикаторы часового типа, металлические измерительные линейки. Для того, чтобы провести более точный сравнительный анализ образцов из тяжелого бетона и фибробетона, армированных стальной стержневой арматурой, методика испытания, схема испытания, форма и размеры образцов принимались по аналогии с исследованием [31].

Перед нагружением проводилась съемка начальных показаний приборов, замерялись размеры образцов, фиксировали существующие дефекты. Нагрузка прикладывалась через стальную пластину пресса от 0 до 250 т с шагом нагружения 15 т. Каждая ступень загрузки сопровождалась выдержкой не менее 10 мин для стабилизации деформаций в полушпале. В этот промежуток времени обязательно снимались показания приборов и проводились необходимые замеры образца. Для определения осадок в нижних угловых точках полушпалы применялись индикаторы часового типа. Испытания проводились до отказа образцов.

#### **Численные исследования**

Численные исследования сталефибробетонных полушпал осуществлялись с помощью расчетного программного комплекса Ansys Workbench. В данном комплексе был проведен расчет сталефибробетонных полушпал с учетом нелинейной диаграммы деформирования сталефибробетона и стали, развития и раскрытия трещин [33]. Граничные условия, расчетная схема и загрузки использовались по аналогии с исследованием [31].

Моделирование железобетонного тела реализовано с помощью конечных элементов типа «solid 185/186» с размером сетки 25 мм. Арматурные стержни реализованы с помощью конечных элементов типа «beam 188» в виде стержней, приборазованных в элементы «reinforcement».

Характеристики материалов задавались с учетом нелинейной диаграммы деформации стали и бетона во вкладке «Engineering Data». Для сталефибробетона принята трехлинейная диаграмма работы в соответствии с пунктом 5.2.9 российского свода правил СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» (с Изменением N 1) [34], в программном комплексе задавалась теория прочности и пластичности бетона «Menetrey-Willam» [35]. Образование и раскрытие трещин учитывается с помощью модели

разупрочнения бетона «HSD6» (Hardening-Softening and Dilatation). Далее представлены характеристики сталефибробетона (см. табл. 3).

Таблица 3 - Физические и механические свойства сталефибробетона в Ansys Workbench (Engineering Data)

№	Название параметра	Значение	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	2400	кг/м <sup>3</sup>
2	Условный модуль упругости бетона (Young's Modulus)	42250	МПа
3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0.2	-
Menetrey-Willam Base (Менетри-Виллам базовый параметры)			
4	Прочность бетона при одноосном сжатии (Uniaxial Compressive Strength)	60.5	МПа
5	Прочность бетона при одноосном растяжении (Uniaxial Tensile Strength)	7.5	МПа
6	Прочность бетона при двухосном сжатии (Biaxial Compressive Strength)	72.6	МПа
7	Угол дилатации бетона при сдвиге (Dilatancy Angle)	13	град.
Softening HSD 6 (разупрочнение по экспоненциальному закону)			
8	Пластические относительные деформации бетона, соответствующие вершине диаграммы (Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength)	0.0016946	мм/мм
9	Предельные пластические относительные деформации, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0.0029798	мм/мм
10	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в конце упругого участка диаграммы (Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening)	0.6	-
11	Относительные сжимающие напряжения в бетоне, соответствующие предельным относительным деформациям, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0.85	-
12	Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии полного разрушения (Residual Compressive Relative Stress)	0.2	-
13	Внутренняя энергия деформирования единичной площадки при растяжении (Mode 1 Area Specific Fracture Energy)	155.55	Н/м <sup>-1</sup>
14	Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне, соответствующие трещинообразованию (Residual Tensile Relative Stress)	0.1	-

За основу диаграммы деформирования для арматуры была принята двухлинейная диаграмма деформации Прандтля в соответствии с российским сводом правил СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» (с Изменениями N 1, 2) [36], в программном комплексе использовалась модель Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали). Характеристики стали арматуры представлены в табл. 4.

Таблица 4 - Физические и механические свойства стальной стержневой арматуры в Ansys Workbench (Engineering Data)

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	7850	кг/м <sup>3</sup>
2	Условный модуль упругости стали (Young's Modulus)	2.0 · 10 <sup>5</sup>	МПа

3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0.3	-
Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали)			
4	Параметры в таблице (относительные деформации)	Значение: 0	мм/мм
		Значение равняется пределу упругой работы диаграммы: $\varepsilon_{s0} = 0.0025$	мм/мм
		Значение равняется пределу площадки текучести диаграммы: $\varepsilon_{s2} = 0.0025$	мм/мм
5	Параметры в таблице (напряжения)	Значение: $10^{-10}$	МПа
		Значение равняется началу текучести стали: 500	МПа
		Значение равняется пределу текучести стали: 500	МПа

Для корректной передачи усилий от стальных пластин к сталефибробетонному блоку в Ansys Mechanical создавались контакты «Frictional» между этими элементами с коэффициентом трения равным 0.1, если предположить, что работа силы трения переходит в потенциальную энергию формоизменения резиновых прокладок.

Для исключения возникновения углов поворота, смещений были приняты следующие граничные условия: 1) верхняя поверхность стальной пластины (пресс) закреплялась с помощью ограничения вида «Displacement», которое ограничивает перемещения по X и Y; 2) нижняя поверхность опорной стальной пластины ограничена от перемещений и поворотов во всех плоскостях с помощью закрепления «Fixed Support».

Приняты следующие силовые воздействия на испытуемый образец: 1) Собственный вес «Standard Earth Gravity»; 2) на верхнюю поверхность стальной пластины (пресс) задана осевая статическая нагрузка «Force» с значением:  $F=2400000$  N= $244.732$  т.

### 3. Результаты исследования и их анализ

#### Экспериментальные исследования

Результаты эксперимента приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты экспериментального исследования

Цель испытания	№ испытываемого элемента	Несущая способность, т	Нагрузка трещинообразования, т	
			Нормальные трещины	Наклонные трещины
Определение несущей способности	1	236	44	122
	2	239	23	98
	3	234	23	90
	Среднее значение, т	236.33	30	103.33

Среднее значение несущей способности полушпал составила  $R_{ult} = 236.33$  т, первые нормальные трещины полушпалы образовались при средней нагрузке равной  $R_{cr1} = 30$  т, наклонные при  $R_{cr2} = 103.33$  т.

На рис. 3-5 показаны фотографии, сделанные в ходе экспериментального исследования.



На рис. 5 можно заметить, что отказ конструкции происходит в результате местного сжатия под площадкой нагружения, предположительно из-за образования клина уплотнения, который после образования начинает «заклиниваться». Появление трещин происходит в следующем порядке: сначала образуются нормальные трещины, в среднем при нагрузке  $P_{срс1} = 30$  т, затем возникают наклонные трещины при нагрузке  $P_{срс2} = 103.33$  т. Последние трещины имеют наклон к вертикальной плоскости за счет наклона верхней поверхности полушпалы.

В работе [31] несущая способность полушпалы из тяжелого бетона В40 составляет  $P_{ult3} = 79.33$  т. Образование трещин имеет схожий характер. При этом первые нормальные трещины образовались в среднем при нагрузке  $P_{срс1} = 7.5$  т, а наклонные при  $P_{срс2} = 13.25$  т. Как видно из результатов, при введении стальной фибры в бетон, несущая способность полушпалы выросла на 198% или в 2.97 раз. Нагрузка трещинообразования также увеличилась на 300% (для нормальных трещин) и 665.4% (для наклонных трещин). Вид разрушения полушпалы имеет схожий характер.

#### Численные исследования

Отказ конструкции наблюдался на 0.88891 секунде после начала загрузки элемента в численной модели, несущая способность составила:  
 $P_{ult2} = 2400000 \times 0.88891 = 213384N = 217.55t$

Результаты численного исследования показаны в табл. 6. Средняя прочность сталефибробетона на сжатие была принята  $R_{fb} = 60.5$  МПа, на растяжение  $R_{fbt} = 7.5$  МПа. Расчетные сопротивления арматуры на растяжение и сжатие, а также значения относительных деформаций сталефибробетона и арматуры приняты в соответствии с СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» (с Изменением N 1) [34] и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» (с Изменениями N 1, 2) [36].

Таблица 6 - Результаты численного моделирования

Исследуемый фактор	Растяжение/ сжатие	Максимальное значение напряжения в элементе в момент отаказа, МПа	Максимальное значение относительных деформаций, мм/мм	Предельно допустимые значения
Нормальные напряжения в сталефибробетоне по оси Z	Сжатие	86.65	-	60.5
	Растяжение	2.12	-	7.5
Нормальные напряжения в сталефибробетоне по оси X	Сжатие	63.06	-	60.5
	Растяжение	8.53	-	7.5
Нормальные напряжения в продольной арматуре	Сжатие	-	-	500
	Растяжение	301.62	-	
Нормальные напряжения в поперечной арматуре	Сжатие	-	-	500
	Растяжение	27.13	-	
Относительные деформации сталефибробетона	Сжатие	-	0.0018	0.003
	Растяжение	-	0.00033	0.004
Относительные деформации арматуры	Сжатие	-	0.000	0.025
	Растяжение	-	0.00096	0.025

Напряжения растянутого сталефибробетона составляют  $\sigma_{числ}^+ = 8.53$  МПа, сжатого –  $\sigma_{числ}^- = 86.65$  МПа, что выше значений максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, полученных в работе [31]  $\sigma_{числ}^+ = 2.237$  Мпа и  $\sigma_{числ}^- = 43.6$  МПа. Полученные значения выше на 281.31% и на 98.74% соответственно после введения стальной фибры в бетон. По сравнению с работами [5,10,22], в которых максимальные растягивающие напряжения составляют 2.14–2.94 МПа.

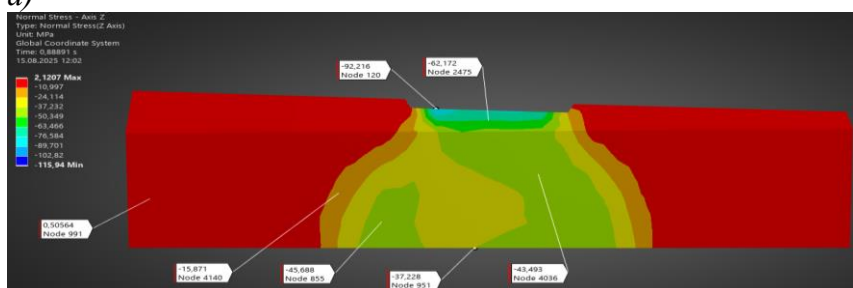
В момент разрушения локальные сжимающие напряжения сталефибробетона (под пластиной загрузки в верхней части полушпалы) на 43.22%, максимальные растягивающие напряжения на 13.73 МПа. Стоит отметить, что напряжения в продольной и поперечной арматуре не достигли своих пределов прочности и работают лишь на 60.3% и 5.4% от предела текучести. В работе [31] напряжения в продольной и поперечной арматуре составляют  $\sigma_{S\text{числ}}^+ = 95.62$  МПа и  $\sigma_{SW\text{числ}}^+ = 14.53$  МПа, их значения выросли по сравнению с полученными данными на 215.4% и на 86.72%.

На рис. 6 и 7 показано распределение напряжений и относительные деформации в продольном сечении полушпалы по осям Z и X соответственно.

На рис. 8 и 9 показано распределение напряжений и относительные деформации в поперечном сечении полушпалы по осям Z и X соответственно. Отсюда видно, что в сечении растягивающие и сжимающие напряжения и предельные относительные деформации растянутого сталефибробетона превышают свои предельные значения.

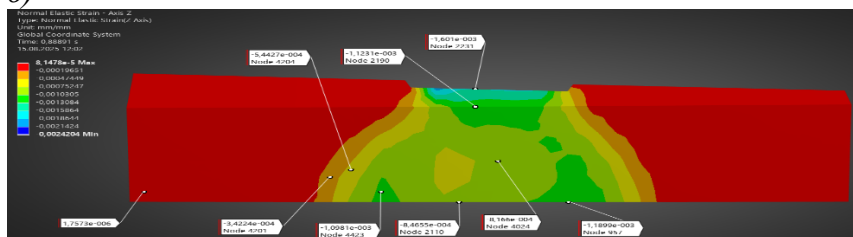
На рис. 10 и 11 представлены эпюры напряжений и деформаций поперечного сечения полушпалы по осям Z и X соответственно.

а)

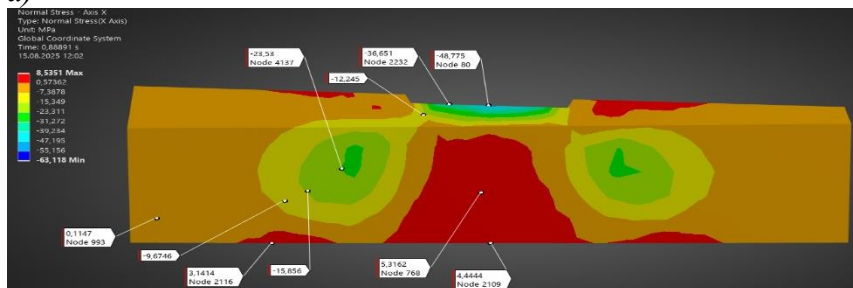


**Рисунок 6 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси Z:**  
а) нормальные  
напряжения в поперечном  
сечении полушпалы (МПа);  
б) относительные  
деформации в поперечном  
сечении полушпалы  
(мм/мм)

б)

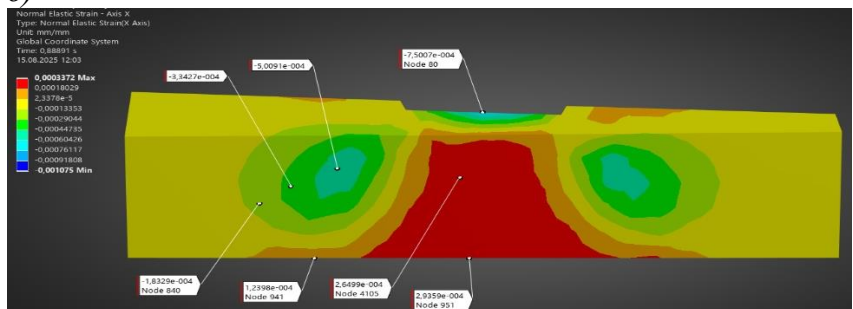


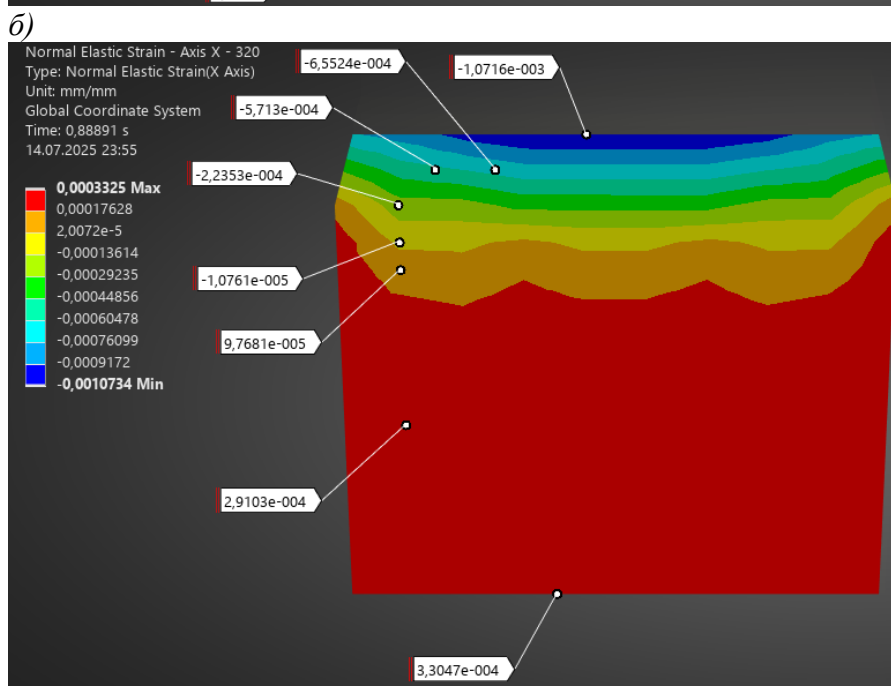
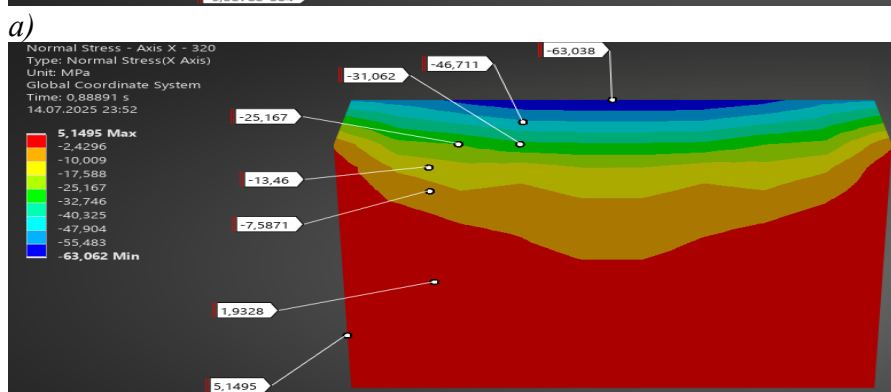
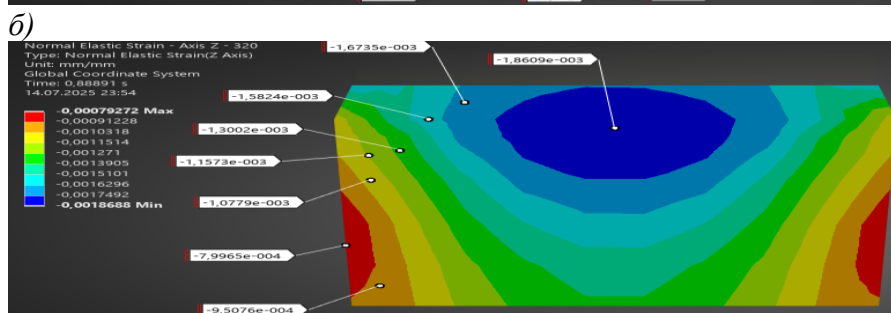
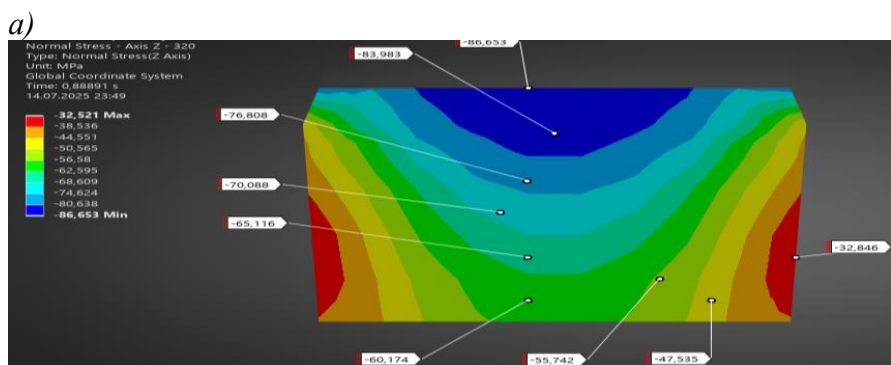
а)



**Рисунок 7 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси X:**  
а) нормальные  
напряжения в поперечном  
сечении полушпалы (МПа);  
б) относительные  
деформации в поперечном  
сечении полушпалы  
(мм/мм)

б)





**Рисунок 8 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси Z:**  
а) нормальные  
напряжения в  
поперечном сечении  
полушпалы (МПа)  
б) относительные  
деформации в  
поперечном сечении  
полушпалы (мм/мм)

**Рисунок 9 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси X:**  
а) нормальные  
напряжения в  
поперечном сечении  
полушпалы (МПа)  
б) относительные  
деформации в  
поперечном сечении  
полушпалы (мм/мм)

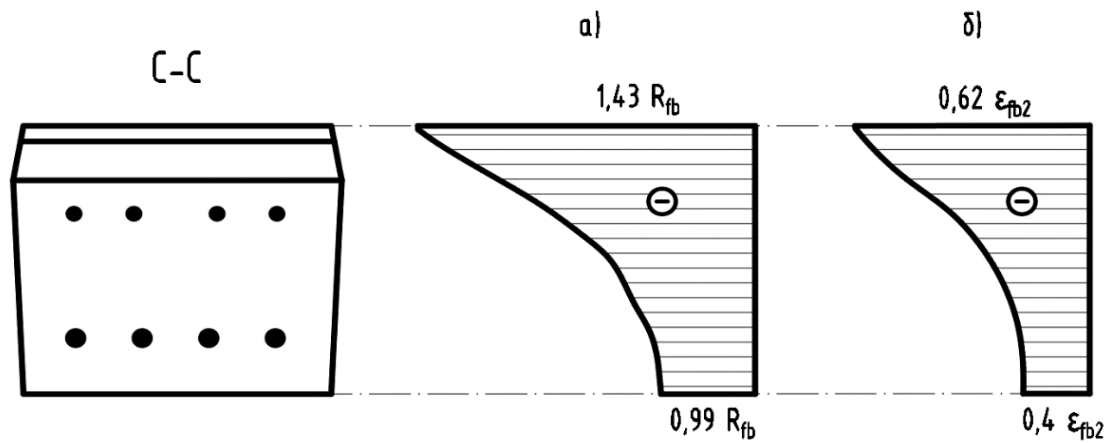


Рисунок 10 - Эпюры напряжений и деформаций по оси Z в поперечном сечении C-C:  
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации

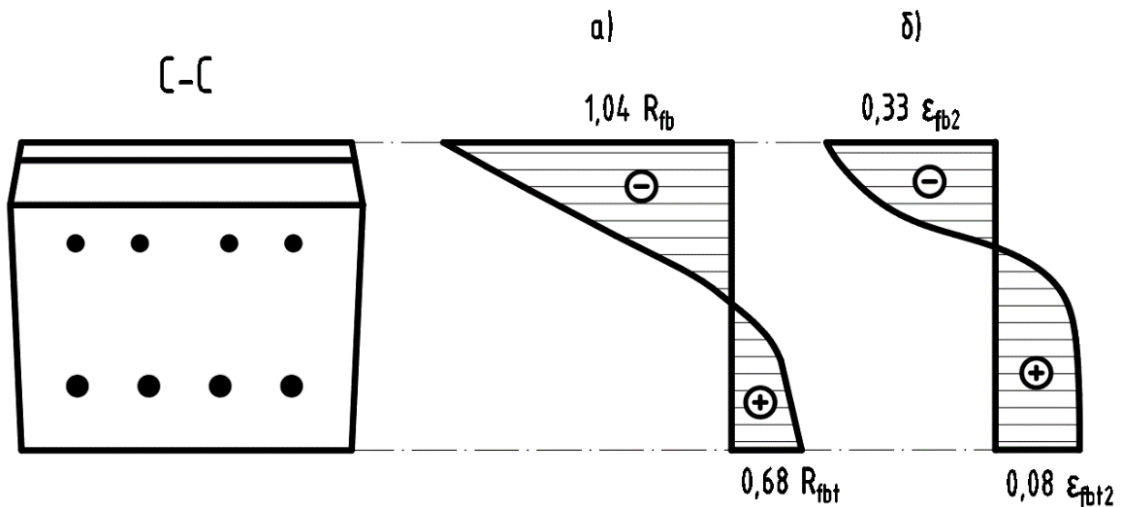


Рисунок 11 - Эпюры напряжений и деформаций по оси X в поперечном сечении C-C:  
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации

В работе [31] было предположено, что под площадкой нагружения образуется клин уплотнения (рис. 5 и 7), который раскалывает бетон под пластиной. Сопротивление элемента сопровождается образованием клина (см. рис. 10), который появляется под стальной пластиной пресса из-за наличия сил трения между элементами. На гранях клина образуются нормальные и касательные напряжения, которые растут при увеличении нагрузки. Бетон в данном случае работает на срез (по грани клина) и скол (из-за возникновения растягивающих напряжений  $R_{bt}$ ). Как видно из результатов данного исследования, сталефибробетонная полушпала сопротивляется также с образованием клина под площадкой загрузки.

На рис. 3–5 можно заметить образование и раскрытие первых нормальных трещин происходит по оси нагружения согласно модели [31, 37] от раскалывания бетона по вертикальной плоскости В-Д между вершиной клина и основанием полушпалы от растягивающих напряжений (см. рис.10 а).

После появления нормальной трещины по оси загрузки сечение полушпалы делится на 2 условные части, разделенные трещиной, которые продолжают сопротивляться по отдельности согласно модели [31, 37] (см. рис.10 б). Образование и раскрытие 2-ой и 3-ей наклонных трещин происходит по вертикальным плоскостям  $E_1-E_2$  и  $E_3-E_4$  от раскалывания бетона. Площадка нагружения имеет отклонение от горизонтали из-за формы полушпалы, поэтому нормальные трещины имеют некоторый наклон к основанию полушпалы.

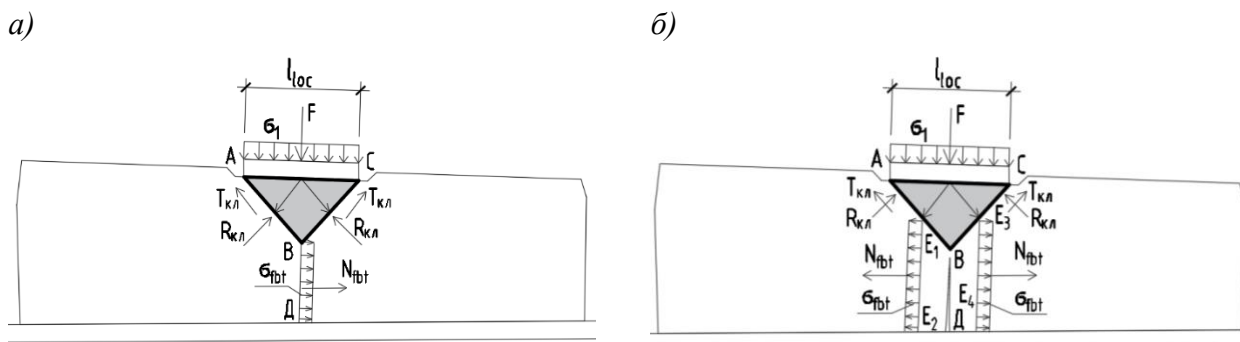


Рисунок 12 - Модель сопротивления сталефибробетонной полушпалы с образованием клина: а) до появления нормальной трещины; б) после появления нормальной трещины

Погрешность несущей способности железобетонной полушпалы между экспериментальным и численным исследованиям составляет:

$$\Delta = (P_{ult1} - P_{ult2}) / P_{ult1} \times 100\% = (236,33 - 217,55) / 236,33 \times 100\% = 7,9\% \quad (1)$$

Расхождение между полученными результатами составило менее 10%, данный результат можно считать удовлетворительным.

Сравнение результатов исследований сталефибробетонной и железобетонной полушпалы [31] для удобства приведено в табличной форме (см. табл. 7).

Таблица 7 - Сравнение результатов исследований

Исследуемый фактор	Железобетонная полушпала	Сталефибро бетонная полушпала	Ед. изм.	Разница значений, %
Несущая способность	79.33	236.33	т	198
Нагрузка трещинообразования (нормальные трещины)	7.5	30	т	300
Нагрузка трещинообразования (наклонные трещины)	13.25	103.33	т	679
Максимальные нормальные сжимающие напряжения в бетоне/сталефибробетоне	43.6	86.65	МПа	98.7
Максимальные нормальные растягивающие напряжения в бетоне/сталефибробетоне	2.237	8.53	МПа	281
Максимальные нормальные напряжения в продольной арматуре	95.62	301.62	МПа	215.4

#### 4. Заключение

1. Анализ напряженно-деформированного состояния и характер разрушения сталефибробетонных полушпал показал, что добавление стальной фибры привело к увеличению сопротивлению сжимающей нагрузке, увеличению несущей способности и трещиностойкости данных конструкций.

2. Несущая способность сталефибробетонной полушпалы увеличилась на 198%.

3. Сопротивление образованию нормальных и наклонных трещин сталефибробетонной полушпалы, а также их раскрытие выросло на 300% и 679% соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурсанова И.А., Емельянова Г.А. Применение конструкции пути сниженной вибрации в России // Проблемы науки. 2023. № 4. С. 51-56. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795730>
2. Гешка А., Лаборенц П. Резиноармированная железобетонная полушпала для метрополитена: пат. RU186427U1 № 2018140003; заявл. 2018. [https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1\\_20190121?ysclid=meahr9a559042449](https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1_20190121?ysclid=meahr9a559042449)
3. Цинле Х., Цай Ч., Чжу Ш., Цзявэй Чж., Чжай В. Динамические характеристики бесстыкового пути с низким уровнем вибрации на совместной высокоскоростной пассажирской и грузовой железной дороге // Транспорт. 2018. Т. 33. С. 669-678. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
4. Чжиу Ю., Ин С., Чжи С., Сяо Л. Усталостные характеристики бесстыковой пути конструкции типа CRTS III под нагрузкой от высокоскоростного поезда на основе закона конститутивного повреждения бетона при усталости // Современные бетонные технологии. 2018. Т. 16. С. 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
5. Го В., Цзэн З., Ли С., Ван В., Шуайбу А.А., Чэнь З. Экспериментальное исследование механических свойств тяжеловесного пути с низкой вибрацией под статической нагрузкой поезда // Научный прогресс и исследования. 2020. Т. 103. <https://doi.org/10.1177/0036850420927249>
6. Цзайвэй Л., Сяочжоу Л., Хунъюэ Л., Юэлэй Х., Юньлай Чж. Обнаружение поверхностных трещин в предварительно изготовленных плитах пути для высокоскоростного рельсового транспорта с помощью инфракрасной термографии // Материалы. 2020. Т. 13. <https://doi.org/10.3390/ma13214837>
7. Хэ Ю., Шэнь Ц., Ли Чж., Лу Х. Фрактальные характеристики распространения поперечных трещин в плитах пути типа CRTS II // Математические задачи в инженерии. 2019. Т. 10. С. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6587343>
8. Чжан Л., Ли Чж., Ма Х. Исследование параметрических характеристик модели Муни-Ривлина для резины // Шум и вибрация: материалы конференции и выставки. 2018. Т. 38. С. 427-430. <https://doi.org/10.4261/2018-01-11250>
9. Сяоан Л., Цзявэй Ш., Ихун О., Вэньбинь Я.С. Идентификация параметров модели Муни-Ривлина для резинового амортизатора на основе суррогатной модели // Шум и вибрация: материалы конференции и выставки. 2023. Т. 13. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
10. Цзэн З., Ху Г., Хуан С., Ван В., Кахтан А.А.С., Шуайбу А.А., Ван Ц. Статические характеристики пути с низкой вибрацией для тяжеловесных железных дорог при различных условиях нагружения с использованием метода конечных элементов // Научный прогресс. 2021. Т. 104. С. 1-19. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
11. Юй Чж., Се Ю., Се Ю., Ли С. Усталостные характеристики бесстыковой пути конструкции типа CRTS III под нагрузкой от высокоскоростного поезда на основе закона конститутивного повреждения бетона при усталости // Современные бетонные технологии. 2018. Т. 16. С. 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
12. Чжипин Чж., Сяньфэн Х., Сяньфэн Х., Куньтэн Чж. Экспериментальное исследование механических характеристик плиты пути CRTS II под вертикальной нагрузкой от поезда // Железнодорожная наука и инженерия. 2015. Т. 40. <https://doi.org/10.2991/icache-15.2015.96>
13. Боян М., Жарко П., Марина М., Слободан Р. Механические характеристики самоуплотняющегося бетона, изготовленного с крупным заполнителем, полученным при переработке сборных железобетонных элементов // Румынский журнал материалов. 2016. Т. 46. С. 167-174. [https://www.researchgate.net/publication/305320567\\_Mechanical\\_characteristics\\_of\\_self-compacting\\_concrete\\_made\\_with\\_coarse\\_aggregate\\_obtained\\_from\\_concrete\\_prefabricated\\_elements\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/305320567_Mechanical_characteristics_of_self-compacting_concrete_made_with_coarse_aggregate_obtained_from_concrete_prefabricated_elements_recycling)
14. Куньтэн Чж., Чжипин Чж., Бинь В., Бинь Л. Исследование основных механических характеристик бесстыкового пути типа CRTS III // Международная конференция по мехатронике, электронике, промышленности и управлению (MEIC 2015). 2015. <https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.338>
15. Цзюнь Л., Шэньян Чж., Ваньмин Чж. Передовая пространственно-связанная модель динамики системы «поезд-плита»: теоретические методы и численные приложения // Звук и вибрация. 2021. Т. 501. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116059>
16. Ван В.Дж., Го Х.М., Ду Х., Го Ц., Лю Ц.Ю., Чжу М.Х. Исследование механизма повреждения и предотвращения повреждений рельсов на тяжеловесных железных дорогах // Анализ инженерных отказов. 2013. Т. 35. С. 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.033>
17. Ваньмин Чж., Цзяньминь Г., Пэнфэй Л., Кайюнь В. Снижение бокового износа рельсов на кривых участках тяжеловесных железных дорог на основе динамического взаимодействия колеса и рельса // Международный журнал динамики транспортных систем. 2014. Т. 52. С. 440-454. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.906633>
18. Чжипин Чж., Ван Ц., Шэнь Ш., Пин Л., Шуайбу А.А., Ван В. Экспериментальное исследование эволюции механических свойств бесстыкового пути типа CRTS III под усталостной нагрузкой // Строительные материалы. 2019. Т. 210. С. 639-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.080>
19. Чжун В., Ху Ц., Шэнь П., Ван Ч., Лю Ц. Экспериментальное исследование связи между усталостью при контактном нагружении и износом рельсов для высокоскоростных и тяжеловесных железных дорог и выбор материала рельса // Износ. 2011. Т. 271. С. 2485–2493. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.053>
20. Цзэн З., Сяо Ю., Ван В., Хуан Чж., Вэй В., Худу Ш.Б. Исследование динамических характеристик бесстыкового пути типа CRTSIII в условиях длительной эксплуатации // Материалы. 2022. Т. 15. <https://doi.org/10.3390/ma15062033>

21. Цай Ч., Сюй П. Динамическое оптимизационное проектирование структурных параметров пути с низкой вибрацией // Железные дороги Китая. 2011. Т. 33. С. 73–79. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
22. Цзэн З., Пэн Г., Го В., Хуан С., Ван В., Ху Ц., Ли С., Шуайбу А.А., Юань Ю., Ду Х. Исследование механических характеристик усовершенствованного пути с низкой вибрацией и анализ его применимости для тяжеловесных железных дорог // Прикладные науки. 2021. Т. 11. С. 10232. <https://doi.org/10.3390/app112110232>
23. Цзэн З., Ван Ц., Инь Х., Шэнь Ш., Шуайбу А.А., Ван В. Экспериментальное исследование виброгасящих характеристик оптимизированного пути с низкой вибрацией для тяжеловесных железных дорог // Удар и вибрация. 2019. Т. 3. С. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2019/1539564>
24. ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. <https://docs.cntd.ru/document/1200124225>
25. Зыков Ю. Шпала композитобетонная: пат. RU177753U1 № 2017139725; заявл. 2017. [https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1\\_20180312](https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1_20180312)
26. Байчорова, А. А. Исследование напряженно деформированного состояния полушпалы метрополитена из базальтового бетона / А. А. Байчорова, Д. С. Ноздрин, М. Харун // Системные технологии. – 2023. – № 3(48). – С. 54–61. [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_54](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_54)
27. Леонович, И. А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона / И. А. Леонович, А. А. Леонович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 3(16). – С. 148–155. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-uprugih-kharakteristik-kompozitnogo-materiala-na-svoystva-fibrobeta>
28. Жаворонков, М. И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона / М. И. Жаворонков // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3(33). – С. 114–120. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kharakteristik-razrusheniya-i-modulya-uprugosti-fibrobeta>
29. Ю. В. Пухаренко. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, В. И. Морозов, У. Х. Магдеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 107–111. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25576066>
30. Е. М. Щербань. Влияние вида заполнителя и дисперсного армирования на деформативность виброцентрифугированных бетонов / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах, М. Г. Холодняк [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 5. – С. 72. – EDN YTRWNF. <https://esj.today/PDF/51SAVN518.pdf>
31. Мирсаяпов Илшат Т., Павлов М.Н., Хайруллин Р.Р., Мирсаяпов А.И., Исследование напряженно-деформированного состояния полушпал для метрополитена // Известия КГАСУ, No 2(72), с. 108–123. [https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2\\_2025&idizv=18](https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2_2025&idizv=18)
32. Мирсаяпов И.Т., Рахимов М., Хорев Н., Хорьков Е., Лим В. Арматурный каркас железобетонной полушпалы для метрополитена: пат. RU230832U1 № 2024110369; заявл. 2024. <https://elibrary.ru/item.asp?id=76433464>
33. Мирсаяпов, И. Т. Численный анализ нелинейного поведения железобетонных конструкций на твердотельных моделях / И. Т. Мирсаяпов, Г. Т. Апхадзе, В. Д. Симаков. – Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – 211 с. <https://st.kgasu.ru/iblock/536/p6bjc2w8hcyr8vcaa2bposov8gj97qi/Monografiya.-CHislenyy-analiz-nelineynogo-povedeniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-na-tverdotelnykh-modelyakh.pdf>
34. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М., 2017. <https://docs.cntd.ru/document/550566433>
35. Дмитриев А., Новижилов И., Михалюк Д., Лалин В. Калибровка и валидация конститутивной модели Менетри-Вильяма для бетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 88. <https://doi.org/10.18720/CUBS.88.4>
36. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М., 2018. <https://docs.cntd.ru/document/554403082>
37. Мирсаяпов И., Антаков А., Павлов М. Моделирование работы кирпичной кладки при сжатии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2024. № 113. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.8>

## REFERENCES

1. Chursanova I.A. and Yemelyanova G.A. (2023) Application of the design of the path of reduced vibration in Russia. *Journal of Problems of Science*, 4, 51–56. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795730>
2. Geshka A. and Laborenz P. (2019) Rubber cover reinforced concrete half-sleepers for the subway. *Patent RU186427U1*, No. 2018140003. [https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1\\_20190121?ysclid=meahryy9a559042449](https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1_20190121?ysclid=meahryy9a559042449)
3. Qinglie H., Cai C., Zhu S., Jiawei Z. and Zhai W. (2018) Dynamic performance of low vibration slab track on shared high-speed passenger and freight railway. *Journal of Transport*, 33, 669–678. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
4. Zhiwu Y., Ying X., Zhi S. and Xiao L. (2018) Fatigue Performance of CRTS III Slab Ballastless Track Structure under High-speed Train Load Based on Concrete Fatigue Damage Constitutive Law. *Journal of Advanced Concrete Technlpgy*, 16, 233–249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>

5. Guo W., Zeng Z., Li S., Wang W., Shuaibu A.A., and Chen Z. (2020) Experimental study on mechanical properties of heavy-haul low-vibration track under train static load. *Journal of Scientific Progress & Research*, 103. <https://doi.org/10.1177/0036850420927249>
6. Zai-Wei L., Xiao-Zhou L., Hong-Yao L., Yue-Lei H. and Yun-Lai Z. (2020) Surface Crack Detection in Precasted Slab Track in High-Speed Rail via Infrared Thermography. *Journal of Materials*, 13. <https://doi.org/10.3390/ma13214837>
7. He Y., Shen J., Li Z., and Lu H. (2019) Fractal Characteristics of Transverse Crack Propagation on CRTSII Type Track Slab. *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, 10, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6587343>
8. Zhang L, Li Z. and Ma X. (2018) Study on parameter characteristics of rubber Mooney-Rivlin model. *Journal of Noise and Vibration Conference & Exhibition*, 38, 427-430. <https://doi.org/10.4261/2018-01-11250>
9. Xiao-Ang L., Jiawei S., Yi-Hong O. and Yang Wen-Bin S. (2023) Parameters Identification of Mooney-Rivlin Model for Rubber Mount Based on Surrogate Model. *Journal of Noise and Vibration Conference & Exhibition*, 13. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
10. Zeng Z., Hu G., Huang X., Wang W., Qahtan A.A.S., Shuaibu A.A. and Wang J. (2021) Statics performance of heavy-haul railway low-vibration track (LVT) under varying loading condition with the finite element method. *Journal of Science Progress*, 104, 1-19. <https://doi.org/10.1177/00368504211036330>
11. Yu Z., Xie Y., Xie Y. and Li X. (2018) Fatigue performance of CRTS III slab ballastless track structure under high speed train load based on concrete fatigue damage constitutive law. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16, 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
12. Zhiping Z., Xianfeng H., Xianfeng H. and Kunteng Z. (2015) Experimental study on mechanical characteristics of CRTS II slab track under the vertical load of train. *Journal of Railway Science and Engineering*, 40. <https://doi.org/10.2991/icache-15.2015.96>
13. Bojan M., Zarko P., Marina M. and Slobodan R. (2016) Mechanical characteristics of self-compacting concrete made with coarse aggregate obtained from concrete prefabricated elements recycling. *Romanian journal of materials*, 46, 167-174. [https://www.researchgate.net/publication/305320567\\_Mechanical\\_characteristics\\_of\\_self-compacting\\_concrete\\_made\\_with\\_coarse\\_aggregate\\_obtained\\_from\\_concrete\\_prefabricated\\_elements\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/305320567_Mechanical_characteristics_of_self-compacting_concrete_made_with_coarse_aggregate_obtained_from_concrete_prefabricated_elements_recycling)
14. Kunteng Z., Zhiping Z., Bin W. and Bin L. (2015) Study on the basic mechanical characteristics of CRTS III slab ballastless track. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015)*. <https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.338>
15. Jun L., Shengyang Z. and Wanming Z. (2021) An advanced train-slab track spatially coupled dynamics model: Theoretical methodologies and numerical applications. *Journal of Sound and Vibration*, 501. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116059>
16. Wang W. J., Guo H. M., Du X., Guo J., Liu Q. Y. and Zhu M. H. (2013). Investigation on the damage mechanism and prevention of heavy-haul railway rail. *Journal of Engineering Failure Analysis*, 35, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.033>
17. Wanming Z., Jianmin G., Pengfei L. and Kaiyun W. (2014) Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel–rail dynamic interaction. *International Journal of Vehicle System Dynamics*, 52, 440-454. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.906633>
18. Zhi-ping Z., Wang J., Shen S., Ping L., Shuaibu A.A. and Wang W. (2019) Experimental study on evolution of mechanical properties of CRTS III ballastless slab track under fatigue load. *Journal of Construction and Building Materials*, 210, 639-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.080>
19. Zhong W., Hu J. J., Shen P., Wang C. Y. and Lius Q. Y. (2011). Experimental investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed and heavy-haul railway and selection of rail material. *Journal of Wear*, 271, 2485–2493. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.053>
20. Zeng Z., Xiao Y., Wang W., Huang Z., Wei W. and Houdou S.B. (2022) Research on Dynamic Performance of CRTSIII Type Slab Ballastless Track under Long-Term Service. *Journal of Materials*, 15. <https://doi.org/10.3390/ma15062033>
21. Cai C., Xu P. (2011) Dynamic optimization design of the structural parameters of low vibration track. *Journal of China Railway*, 33, 73–79. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
22. Zeng Z., Peng G., Guo W., Huang X., Wang W., Hu J., Li S., Shuaibu A.A., Yuan Y. and Du X. (2021) Research on Mechanical Performance of Improved Low Vibration Track and Its Feasibility Analysis for Heavy-Haul Railway Applications. *Journal of Applied Sciences*, 11, 10232. <https://doi.org/10.3390/app112110232>
23. Zeng Z., Wang J., Yin H., Shen S.G., Shuaibu A.A. and Wang W. (2019) Experimental Investigation on the Vibration Reduction Characteristics of an Optimized Heavy-Haul Railway Low-Vibration Track. *Journal of Shock and Vibration*, 3, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2019/1539564>
24. Russian state standard GOST 33320-2015. (2015) Ferroconcrete cross ties for railways. General specifications. <https://docs.cntd.ru/document/1200124225>
25. Zykov Y. (2018) Composite concrete trope. *Patent RU177753U1, No. 2017139725*. [https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1\\_20180312](https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1_20180312)
26. Baychorova A. A., Nozdrin D. S. and Mahmud H. (2023) Investigation of the stressed and deformed state of basalt concrete metropoliten half-trees. *Journal of System Technologies*, 3, 54-61. [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_54](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_54)

27. Leonovich I. A., Leonovich A. A. (2007) Influence of the elastic characteristics of a composite material on the properties of fiber concrete. *Journal of Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-uprugih-harakteristik-kompozitnogo-materiala-na-svoystva-fibrobeta>
28. Zhavoronkov M. I. (2015) Determination of the Fracture Characteristics and the Elastic Modulus of Fiber Concrete. *Journal of Izvestiya KGASU*, 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-harakteristik-razrusheniya-i-modulya-uprugosti-fibrobeta>
29. Pukhareno Yu. V., Panteleev D. A., Morozov V. I. and Magdeev U. Kh. (2016) Strength and Deformability of Polyreinforced Fiberglass Concrete Using Amorphous Metal Fiber. *Journal of Architecture and Construction*, 1, 107-111. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25576066>
30. Shcherban E.M., Stelmakh S.A., Kholodnyak M.G., Nazhnev M.P., Rymova E.M. and Liev R.A. (2018) Influence of the type of aggregate and dispersed reinforcement on the deformability of vibrocentrifuged concrete. *The Eurasian Scientific Journal*, 5. <https://esj.today/PDF/51SAVN518.pdf>
31. Mirsayapov Ilshat T., Pavlov M.N., Khairullin R.R. and Mirsayapov A.I. (2025) Resistance of a stress-strain state of a half a step of the low vibration track. *Journal of Izvestiya KGASU*, 72, 10-10. [https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2\\_2025&idzv=18](https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2_2025&idzv=18)
32. Mirsayapov Ilshat T., Rakhimov M., Khorev N., Khorkov E. and Lim V. (2024) Reinforcement frame of a reinforced concrete half-sleeper for the metro. *Patent RU230832U1*, No. 2024110369. <https://elibrary.ru/item.asp?id=76433464>
33. Mirsayapov, Ilshat T., Apzadze G., Simakov V. (2023) Numerical analysis of nonlinear behavior of reinforced concrete structures on solid-state models: a monograph. *Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Kazan State University of Architecture and Civil Engineering Kazan: KGASU Publishing House*, 207. <https://st.kgasu.ru/iblock/536/p6bqjc2w8hcyr8vcaa2bposov8gj97qi/Monografiya.-CHislenyy-analiz-nelineynogo-povedeniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-na-tverdotelnykh-modelyakh.pdf>
34. Russian set of rules SP 360.1325800.2017/ (2017) Steel fiber reinforced concrete structures. Design rules. <https://docs.cntd.ru/document/550566433>
35. Dmitriev, A., Novozhilov, I., Mikhaliuk, D., and Lalin, V. (2020) Calibration and validation of the Menetrey-Willam constitutive model for concrete. *Journal of Construction of Unique Buildings and Structures*, 88. <https://doi.org/10.18720/CUBS.88.4>
36. Russian set of rules SP 63.13330.2018. (2018) Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. <https://docs.cntd.ru/document/554403082>
37. Mirsayapov I., Antakov A., Pavlov M. (2024) Modeling the work of brickwork under compression. *Journal of Construction of Unique Buildings and Structures*, 113. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.8>

#### Информация об авторах

**Илшат Талгатович Мирсайпов**, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Российская Федерация, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций.  
E-mail: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru)

**Максим Николаевич Павлов**, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Российская Федерация, аспирант.  
E-mail: [pavlov.m.n@bk.ru](mailto:pavlov.m.n@bk.ru)

#### Information about authors

**Ilshat T. Mirsayapov**, «Kazan State University of Architecture and Civil Engineering», Kazan, Russian Federation, doctor of technical sciences, associate professor, head of the department of reinforced concrete and masonry structures.  
E-mail: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru)

**Maksim N. Pavlov**, «Kazan State University of Architecture and Civil Engineering», Kazan, Russian Federation, postgraduate student.  
E-mail: [pavlov.m.n@bk.ru](mailto:pavlov.m.n@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 25.10.2025  
Одобрена после рецензирования 05.02.2026  
Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 25.10.2025  
Approved after reviewing 05.02.2026  
Accepted for publication 13.02.2026