



Research Article

Received: March 1, 2025

Accepted: March 25, 2025

Published: April 12, 2025

ISSN 2304-6295

Steel fiber-reinforced concrete half a step of the low vibration track

Mirsayapov, Ilshat Talgatovich¹ Pavlov, Maksim Nikolaevich¹ Khairullin, Rustem Ramilevich^{1*} Mirsayapov, Arslan Ilshatovich¹

¹ Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation; mirsayapovit@mail.ru (M.I.T.); pavlov.m.n@bk.ru (P.M.N.); dsselitepechenka@mail.ru (K.R.R.); arslan310792@mail.ru (M.A.I.)

Correspondence:* email dsselitepechenka@mail.ru; contact phone [+79872889678](tel:+79872889678)

Keywords:

Ansys Workbench, LVT (Low Vibration Track), steel fiber-reinforced concrete half a step, numerical half a step studies, experimental half a step studies.

Abstract:

The object of research is a half a step of the low vibration track. Current regulations strictly limit the formation and opening of cracks in these structures. The work of many researchers has shown that LVT half a steps need to increase crack resistance. To solve this problem, it is proposed to introduce steel fiber into concrete, which will increase the resistance of half a steps to the formation and opening of cracks. The purpose of this work is to increase the crack resistance of these half a steps by introducing steel fiber into the concrete. **Method.** Experimental studies were conducted to obtain experimental data, and the Ansys Workbench software package was used to evaluate the stress-strain state. The results obtained were compared with previous research papers. **Results.** Numerical results are presented for a steel-fiber-concrete half a steps, stress and strain diagrams, a crack formation map, and the nature of fracture are shown. A comparison of the research results of LVT half a steps made of heavy concrete and steel-fiber reinforced with steel rod reinforcement is presented. **Conclusions.** The bearing capacity of the half a step increased by 198% after the addition of steel fiber, and crack resistance by 300% (normal cracks) and 679% (inclined cracks).

1 Introduction

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 **новый** 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

Mirsayapov I., Pavlov M., Khairullin R., Mirsayapov A.

Steel fiber-reinforced concrete half a step of the low vibration track;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11606. doi: 10.4123/CUBS.116.6



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 нашей страны образование и раскрытие трещин в конструкциях шпал ограничено ТУ 5864-299-01124323-2012 и ГОСТ 33320-2015. Для увеличения трещиностойкости данных конструкций предлагается использовать сталефибробетон В_т80 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 [24] описывается фибробетонная полушпала, армированная композитной арматурой, которая обладает повышенными характеристиками трещиностойкости, долговечности и отсутствием электрокоррозии. В работе [25] 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 [26]-[28] 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 [29].

За основу данного исследования была взята работа [30], в которой в ходе численных и экспериментальных исследований были проанализированы прочностные и деформативные характеристики полушпал LVT. Актуальная задача – 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. Изготовить и испытать сталефибробетонные образцы полушпал LVT для получения новых 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 Materials and Methods

2.1 Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено и испытано 3 образца полушпал LVT на действие вертикальной статической нагрузки по аналогии с исследованием [30]. Полушпалы изготавливались в заводских условиях и поставлялись в лабораторию при КГАСУ. Образцы изготавливались из сталефибробетона СФБТ В_{т80} В_{т5}. Процент распределения фибры по объему 1%. Арматурный каркас полушпал выполнен по патенту [31], разработанного сотрудниками КГАСУ совместно с представителями 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.

Mirsayapov I., Pavlov M., Khairullin R., Mirsayapov A.

Steel fiber-reinforced concrete half a step of the low vibration track;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 116 Article No 11606. doi: 10.4123/CUBS.116.6

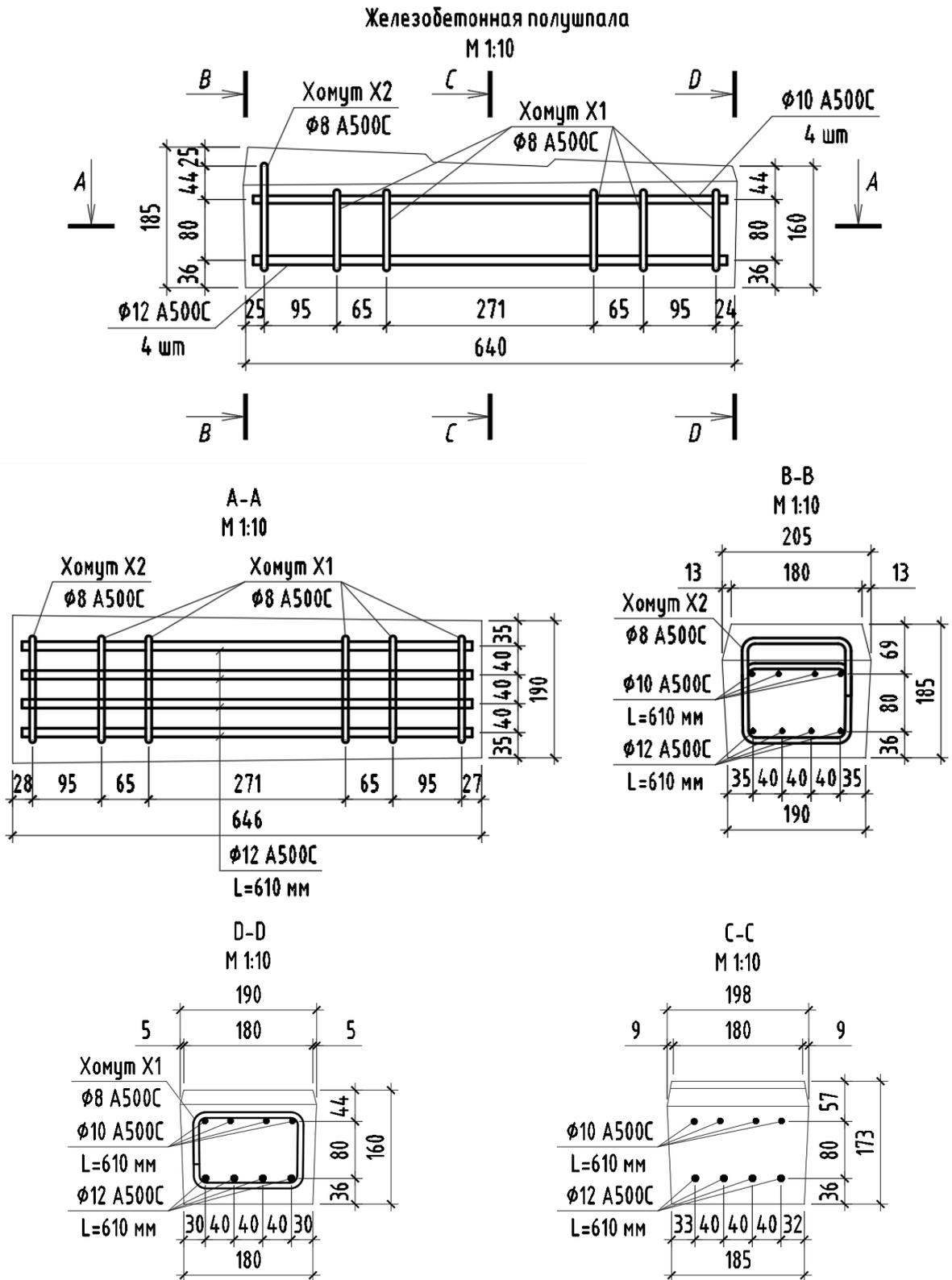


Fig. 1 - General appearance and reinforcement of the half-step [30]
Рис. 1 – Общий вид и армирование полушпалы [30]



Fig. 2 - Reinforcement of the half-step
Рис. 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.

Table 1. Properties of steel fiber concrete
Табл. 1 Характеристики сталефибробетона

№ испытываемого элемента	Процент содержания фибры, %	Призменная прочность сталефибробетона сжатию по испытанию серии образцов, МПа	Класс Фибробетона на сжатие	Нормативная прочность сталефибробетона на растяжение серии образцов-балок на изгиб, МПа	Класс Фибробетона на растяжение
1	1	60.7	В _т 80	7,9	В _т 5
2		60.5		7,4	
3		60.3		7,2	
Среднее значение		60.5	Среднее значение	7.5	

Table 2. Properties of steel reinforcement
Табл. 2 Характеристики стальной стержневой арматуры

№ испытываемого элемента	Армирование	Нормативное сопротивление арматуры растяжению, МПа
1	4 Ø12 A500C	500



2	4 Ø10 A500C хомуты Ø8 A500C	
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 [30].

Перед нагружением проводилась съемка начальных показаний приборов, замерялись размеры образцов, фиксировали существующие дефекты. Нагрузка прикладывалась через стальную пластину прессы 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.

2.2 Численные исследования

Численные исследования сталефибробетонных полушпал осуществлялись с помощью общеизвестного, современного 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 [32]. Граничные условия, расчетная схема и загрузки использовались по аналогии с исследованием [30].

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 СП 360.1325800.2017 (с Изменением N 1), в программном комплексе задавалась теория прочности и пластичности бетона «Menetrey-Willam» [33]. Образование и раскрытие трещин учитывается с помощью модели разупрочнения бетона «HSD6» (Hardening-Softening and Dilatation). Далее представлены характеристики сталефибробетона (см. табл. 3).

Table 3. Physical and mechanical properties of steel fiber concrete in Ansys Workbench (Engineering Data)
Табл. 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 ³
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 ¹
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 Грандтля в соответствии с СП 63.13330.2018 (с Изменениями N 1, 2), в программном комплексе использовалась модель Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали). Характеристики стали арматуры представлены в табл. 4.

Table 4. Physical and mechanical properties of steel reinforcement in Ansys Workbench (Engineering Data)

Табл. 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 ³
2	Словный модуль упругости стали (Young's Modulus)	$2.0 \cdot 10^5$	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: $F=2\,400\,000\text{ N}=244.732\text{ т}$.

3 Results and Discussion

3.1 Экспериментальные исследования

Результаты эксперимента приведены в таблице 5.

Table 5. Experimental analysis results

Табл. 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

Mirsayapov I., Pavlov M., Khairullin R., Mirsayapov A.

Steel fiber-reinforced concrete half a step of the low vibration track;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11606. doi: 10.4123/CUBS.116.6

	3	234	23	90
	Среднее значение, т	236.33	30	103,33

Среднее значение несущей способности полушпал составила $P_{ult1} = 236.33$ т, первые нормальные трещины полушпалы образовались при средней нагрузке равной $P_{cr1} = 30$ т, наклонные при $P_{cr2} = 103.33$ т.

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

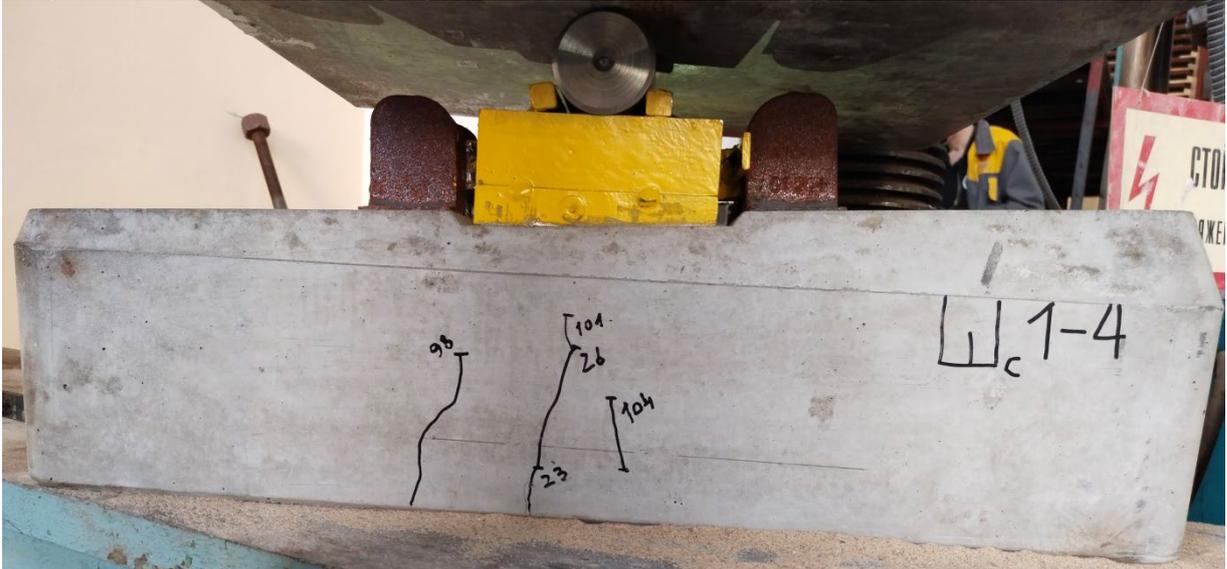


Fig. 3 - Sample of a half-scale during loading, formation of normal cracks

Рис. 3 – Образец полушпалы в процессе нагружения, образование нормальных трещин



Fig. 4 - Sample of a half-scale during loading, formation of inclined cracks

Рис. 4 – Образец полушпалы в процессе нагружения, образование наклонных трещин



Fig. 5 - The moment of failure (destruction) of a half-sleeper
Рис. 5 – Момент отказа (разрушения) полушпалы

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 $P_{cr1} = 30$ т, затем возникают наклонные трещины при нагрузке $P_{cr2} = 103.33$ т. Последние трещины имеют наклон к вертикальной плоскости за счет наклона верхней поверхности полушпалы.

В работе [30] 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 $P_{cr1} = 7.5$ т, а наклонные при $P_{cr2} = 13.25$ 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% или в 4 раза (для нормальных трещин) и 665.4% или в 7.65 раз (для наклонных трещин). Вид разрушения полушпалы имеет схожий характер.

3.2 Численные исследования

Отказ конструкции наблюдался на 0.88891 секунде после начала загрузки элемента в численной модели, несущая способность составила: $P_{ult2} = 2\,400\,000 \cdot 0.88891 = 2\,133\,384\,N = 217.55$ т.

Результаты численного исследования показаны в табл. 6. Средняя прочность сталефибробетона на сжатие была принята $R_{fb} = 60.5$ МПа, на растяжение $R_{ft} = 7.5$ МПа. Расчетные сопротивления арматуры на растяжение и сжатие, а также значения относительных деформаций сталефибробетона и арматуры приняты в соответствии с СП 63.13330.2018 (с Изменениями N 1, 2) и СП 360.1325800.2017 (с Изменением N 1).

Table 6. Numerical simulation results
Табл. 6. Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования

Исследуемый фактор	Растяжение/сжатие	Максимальное значение напряжения в элементе в момент отказа, 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
	Сжатие	63.06	-	60.5



Нормальные напряжения в сталефибробетоне по оси X	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 $\sigma_{\text{числ}}^+ = 8,53$ МПа, сжатого - $\sigma_{\text{числ}}^- = 86,65$ МПа, что выше значений максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, полученных в работе [30] $\sigma_{\text{числ}}^+ = 2,237$ МПа и $\sigma_{\text{числ}}^- = 43,6$ МПа. Полученные значения выше на 281,31% или в 3,81 раз и на 98,74% или 1,99 раз 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, полученные значения больше в 2,9–4 раза.

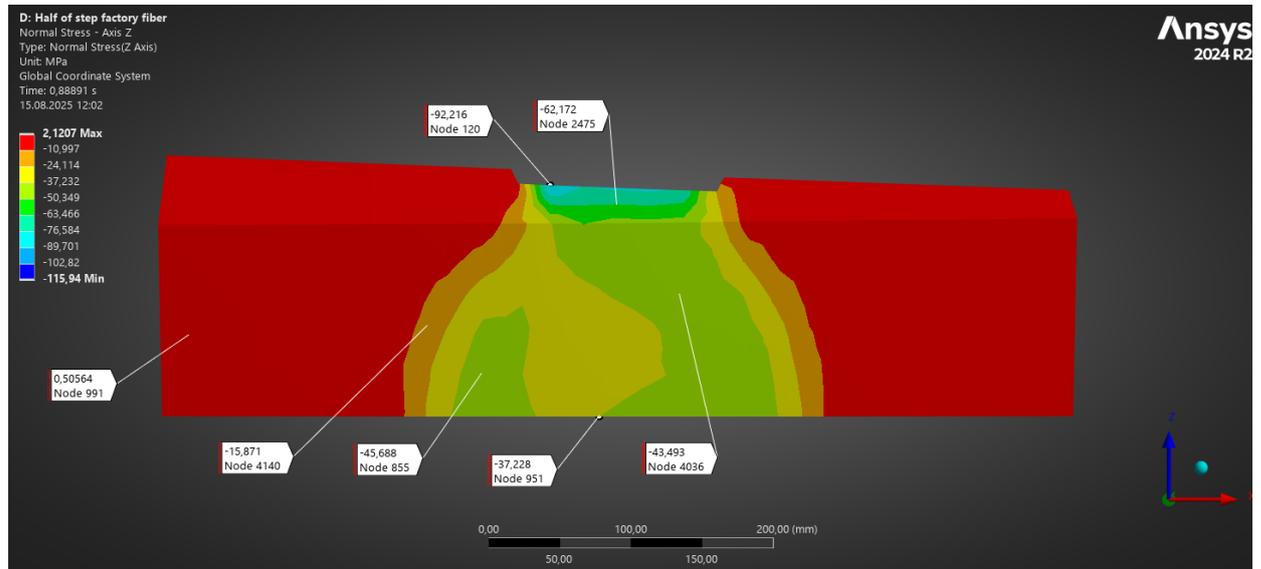
В момент разрушения локальные сжимающие напряжения сталефибробетона (под пластиной загрузки в верхней части полушпалы) на 43,22%, максимальные растягивающие напряжения на 13,73. Стоит отметить, что напряжения в продольной и поперечной арматуре не достигли своих пределов прочности и работают лишь на 60,3% и 5,4% от предела текучести. В работе [30] напряжения в продольной и поперечной арматуре составляют $\sigma_{\text{с}}^+ = 95,62$ МПа и $\sigma_{\text{sw числ}}^+ = 14,53$ МПа, их значения выросли по сравнению с полученными данными на 215,4% или в 3,15 раз и на 86,72% или в 1,87 раз.

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)



b)

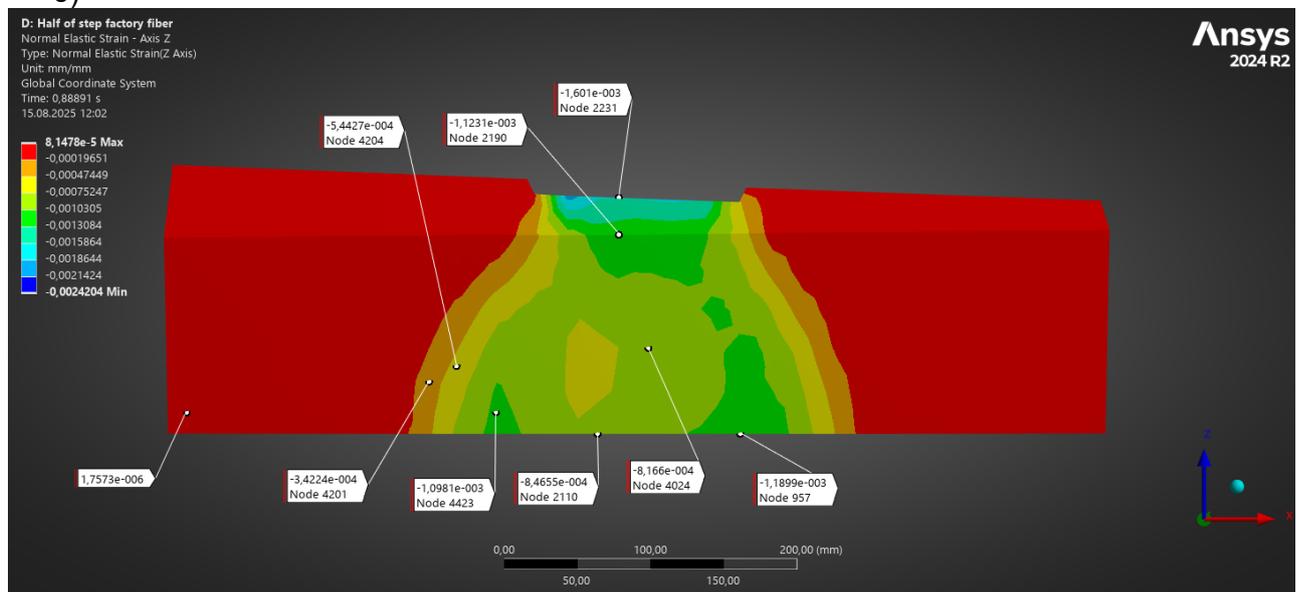
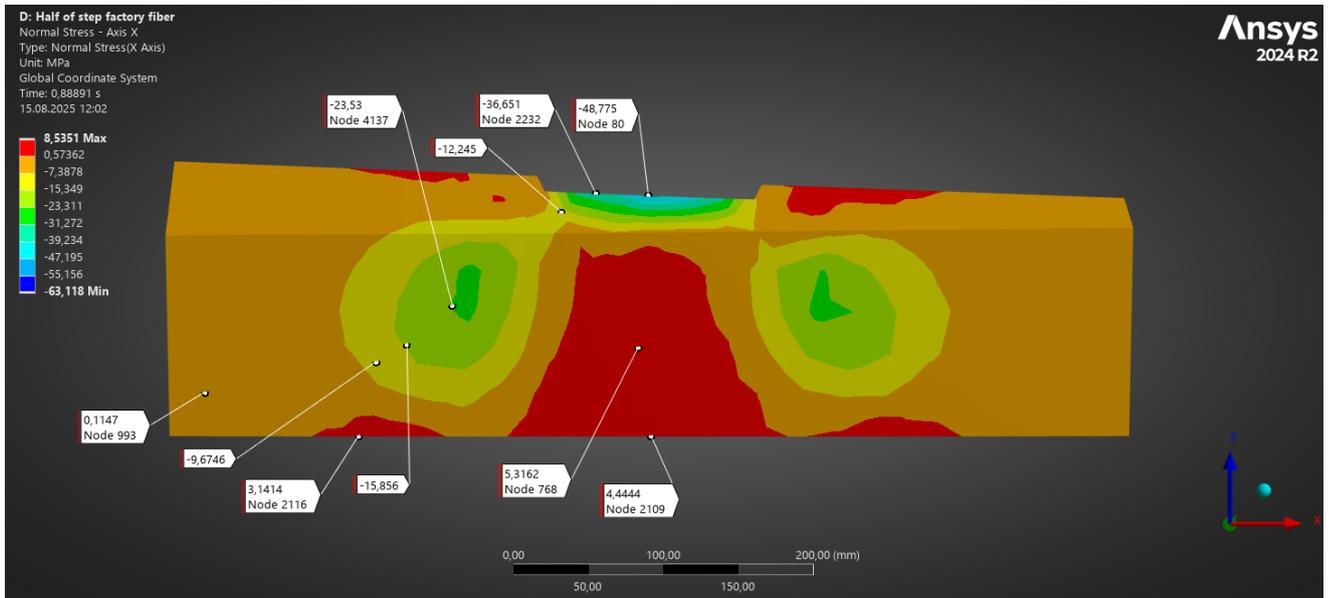


Fig. 6 - Distribution of stresses and relative deformations along the Z axis:
 a) normal stresses in the half-scale longitudinal section (MPa);
 b) relative deformations in the longitudinal section of the half-scale (mm/mm);
 Рис. 6 – Распределение напряжений и относительных деформаций по оси Z:
 а) нормальные напряжения в поперечном сечении полуступы (Мпа);
 б) относительные деформации в поперечном сечении полуступы (мм/мм);

a)



b)

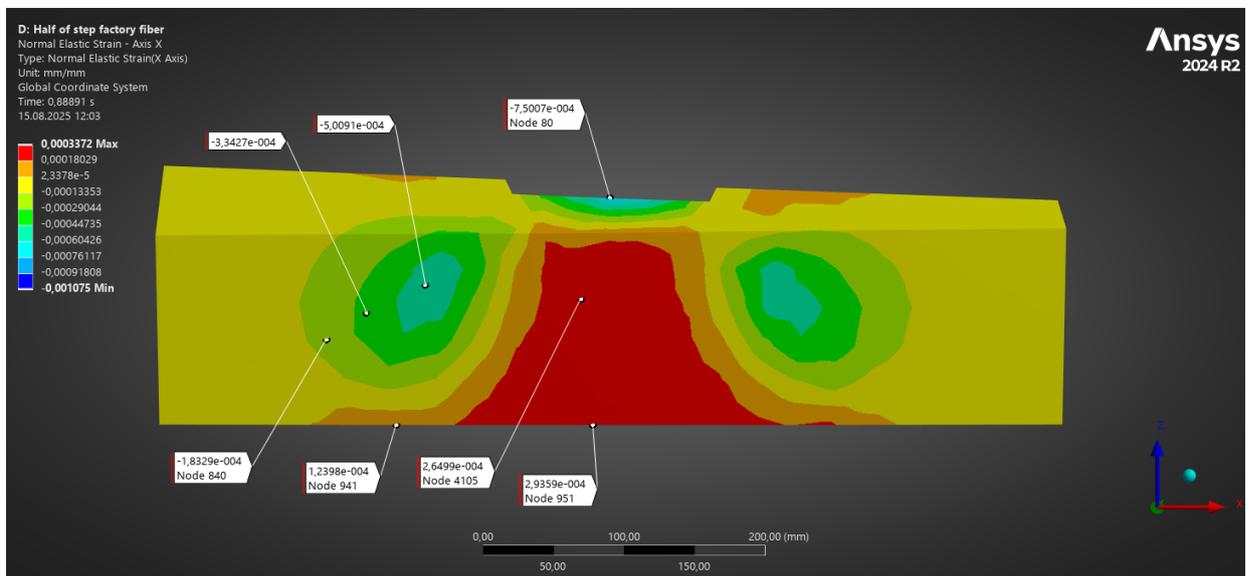


Fig. 7 – Distribution of stresses and relative deformations along the X axis:

a) normal stresses in the half-scale longitudinal section (MPa);

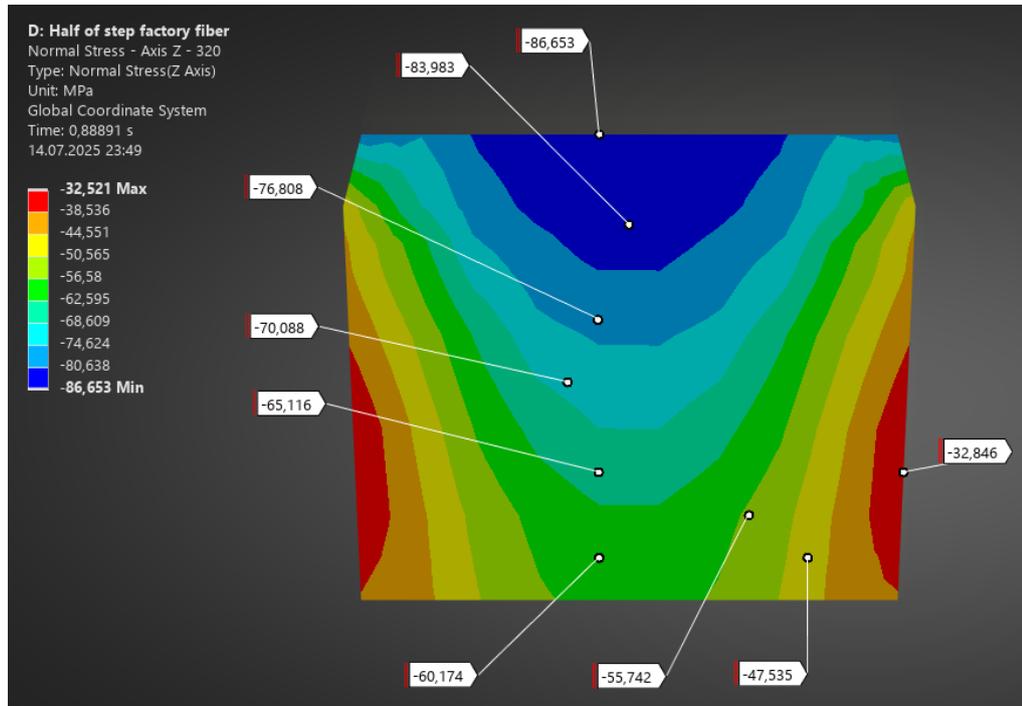
b) relative deformations in the longitudinal section of the half-scale (mm/mm);

Рис. 7 – Распределение напряжений и относительных деформаций по оси X:

a) нормальные напряжения в поперечном сечении полупалы (Мпа);

b) относительные деформации в поперечном сечении полупалы (мм/мм);

a)



b)

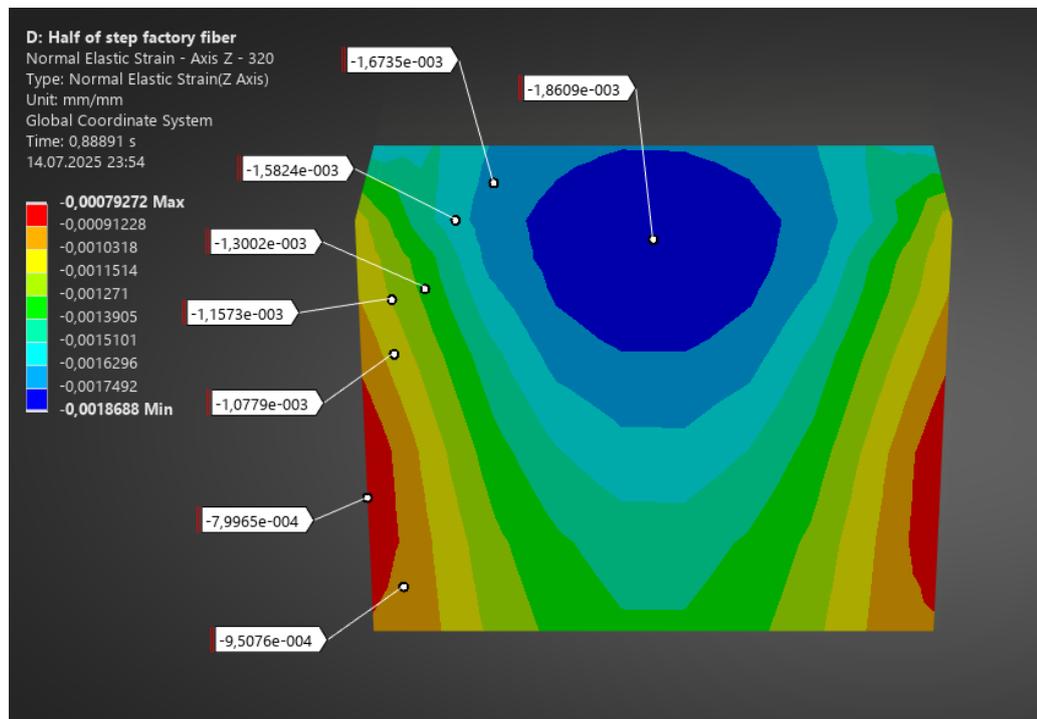
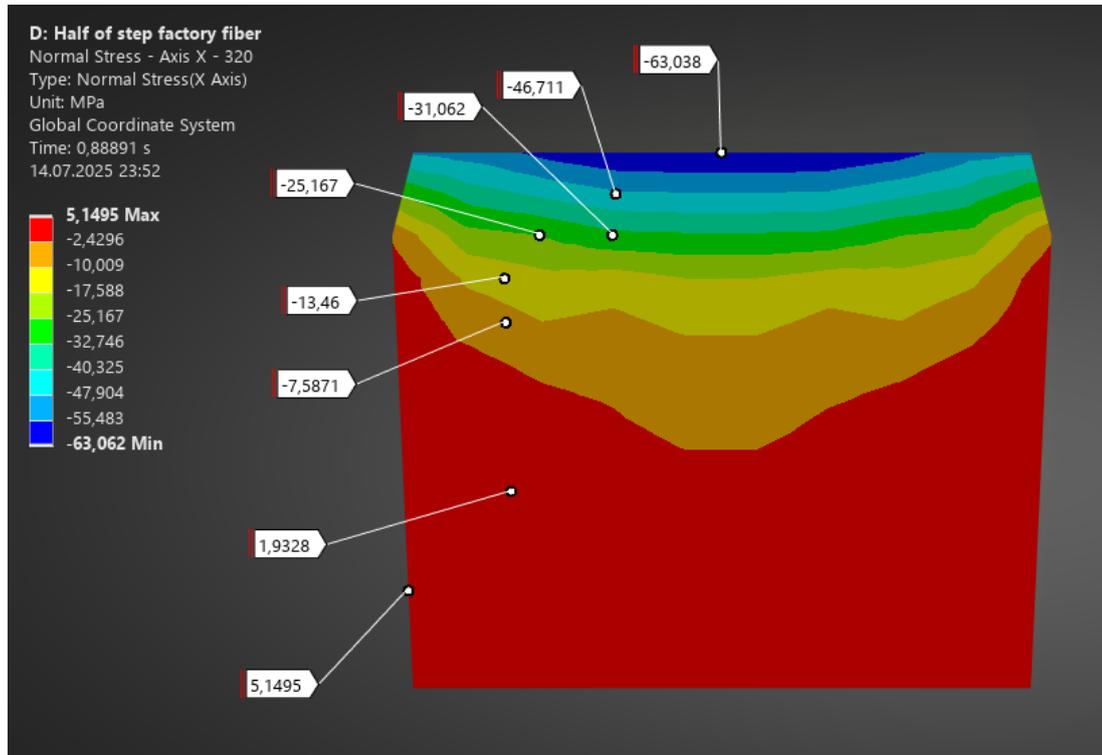


Fig. 8 - Distribution of stresses and relative deformations along the Z axis:
 a) normal stresses in the half-scale cross-section (MPa);
 b) relative deformations in the cross section of the half-scale (mm/mm);

Рис. 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);

a)



6)

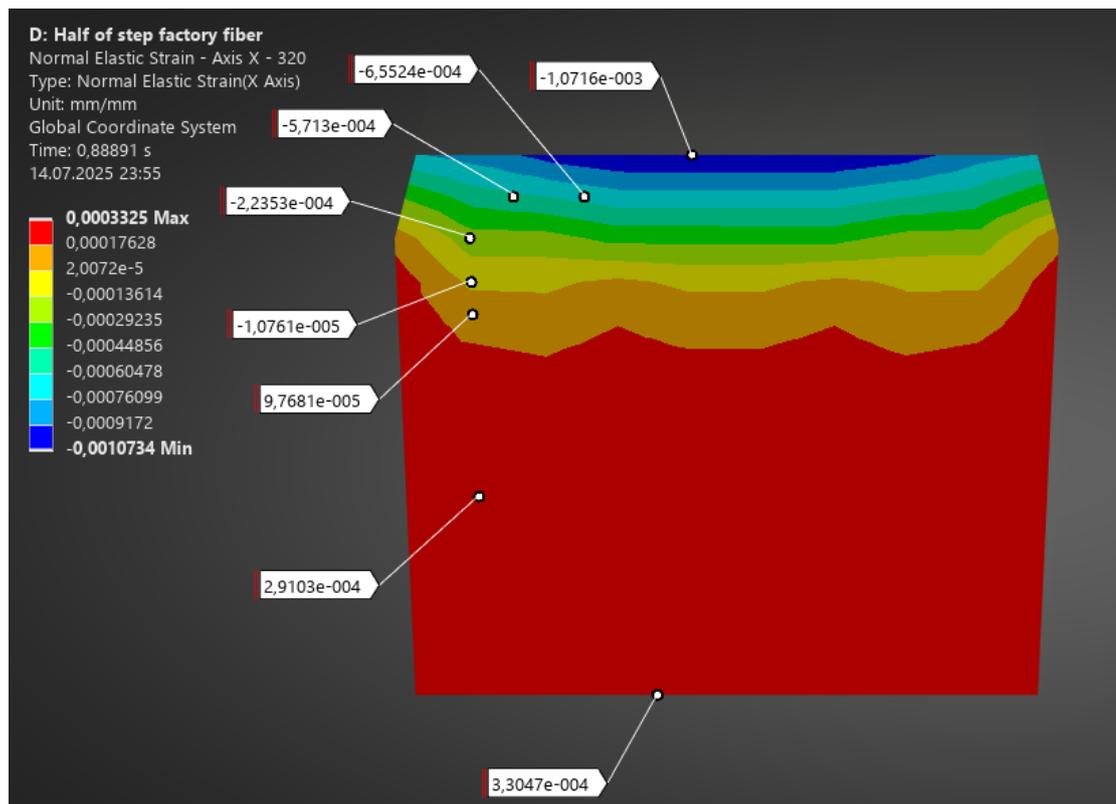


Fig. 9 - Distribution of stresses and relative deformations along the X axis:
 a) normal stresses in the half-scale cross-section (MPa);
 b) relative deformations in the cross section of the half-scale (mm/mm);
Рис. 9 – Распределение напряжений и относительных деформаций по оси X:
 а) нормальные напряжения в поперечном сечении полустпалы (Мпа);
 б) относительные деформации в поперечном сечении полустпалы (мм/мм);

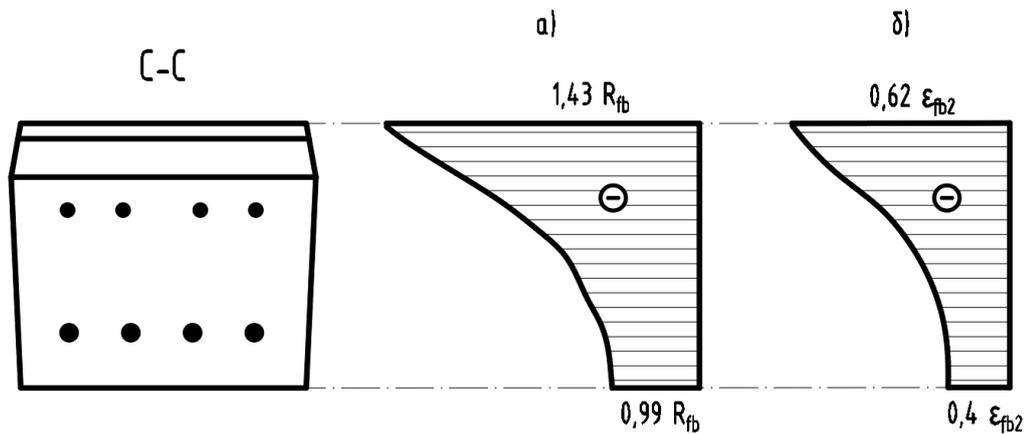


Fig. 10 Эпюры напряжений и деформаций по оси Z в поперечном сечении С-С:
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации;
 Рис. 10 Stress and strain diagrams along the Z axis in the C-C cross section:
 а) normal stresses; б) relative deformations;

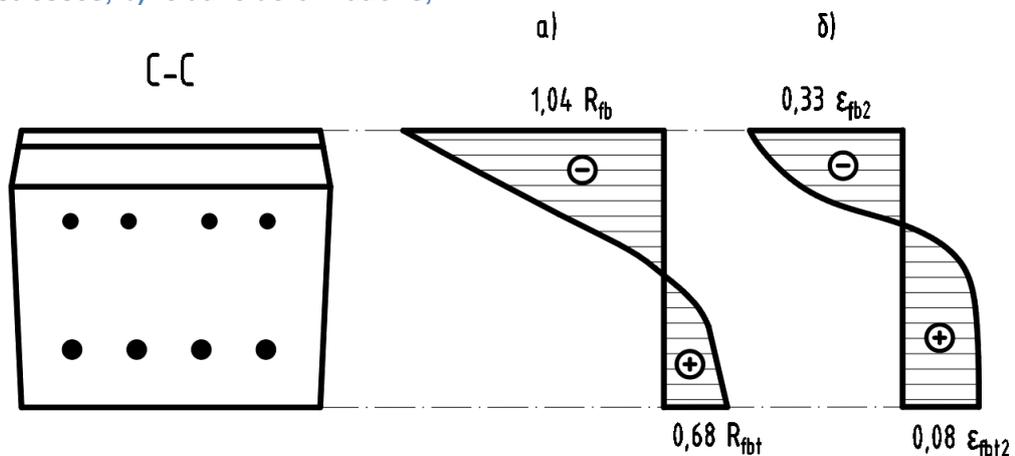


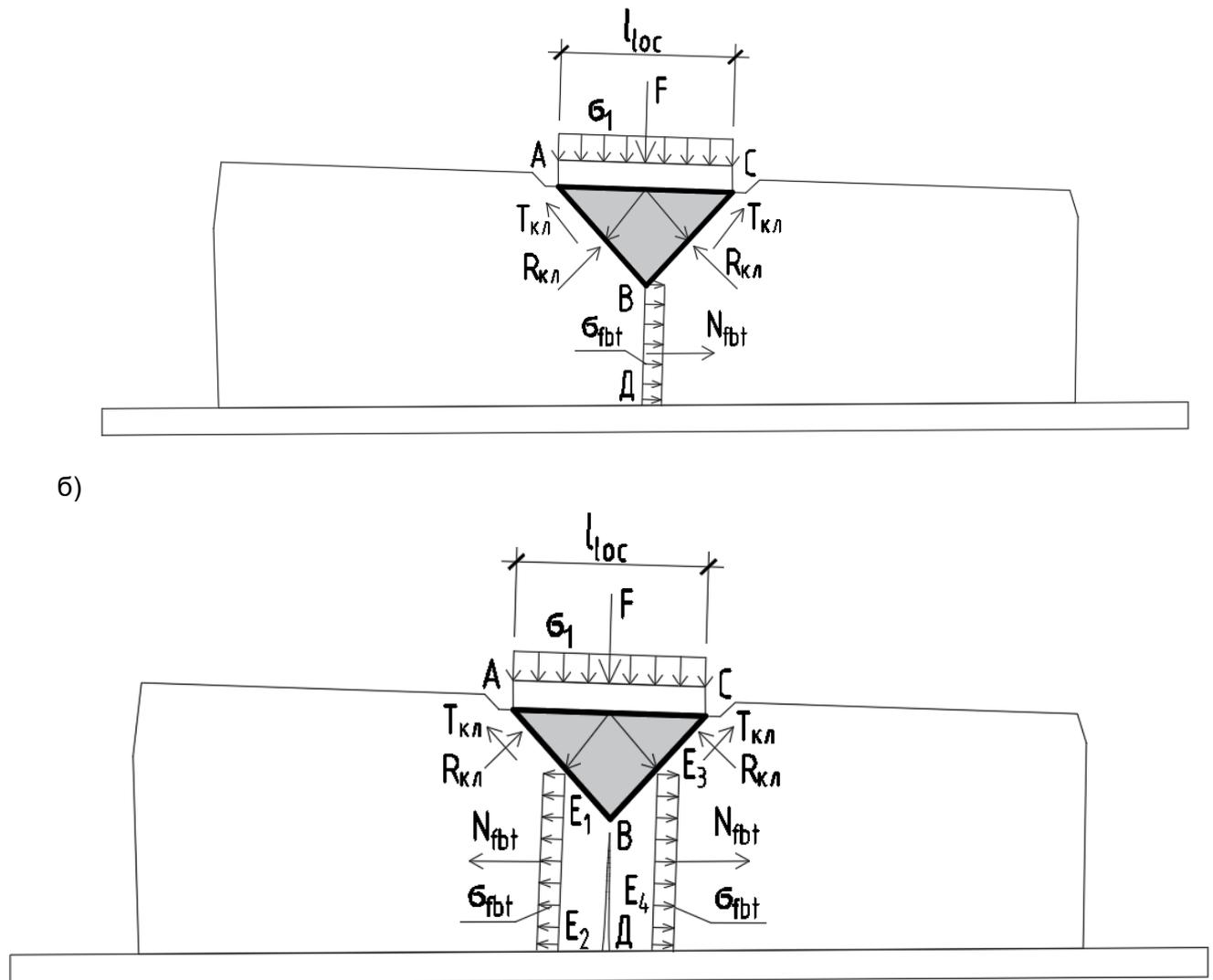
Fig. 11 Эпюры напряжений и деформаций по оси X в поперечном сечении С-С:
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации;
 Рис. 11 Stress and strain diagrams along the X axis in the C-C cross section:
 а) normal stresses; б) relative deformations;

В работе [30] 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 срез (по грани клина) и скол (из-за возникновения растягивающих напряжений R_{bt}). Как мы видим их результатов данного исследования, сталефибробетонная полушпала сопротивляется также с образованием клина под площадкой загрузки.

Как мы видим по рис. 3-5 образование и раскрытие первых нормальных трещин происходит по оси нагружения согласно модели [30, 34] 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 [30, 34] (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.

а)



б)

Рис. 12. Модель сопротивления сталефибробетонной полушпалы с образованием клина: а) до появления нормальной трещины; б) после появления нормальной трещины (иллюстрация авторов)
Fig. 12. Model of the Steel fiber-reinforced concrete half a step resistance with wedge formation: a) in the cross-section C-C half-sleepers; b) in the longitudinal section of the half-sleepers (illustration by the authors)

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

$$\Delta = \frac{P_{ult1} - P_{ult2}}{P_{ult1}} \cdot 100\% = \frac{236.33 - 217.55}{236.33} \cdot 100\% = 7.9\%$$

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

Сравнение результатов исследований сталефибробетонной и железобетонной полушпалы [30] для удобства приведено в табличной форме (см. табл. 7).

Таблица 6

Table 6. Comparison of research results
Табл. 6. Сравнение результатов исследований

Исследуемый фактор	Железобетонная полушпала	Сталефибробетонная 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 Conclusions

- 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.

5 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

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
- 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 Technolpgy*, **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>.

Mirsayapov I., Pavlov M., Khairullin R., Mirsayapov A.

Steel fiber-reinforced concrete half a step of the low vibration track;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11606. doi: 10.4123/CUBS.116.6



- 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
- 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 Zykov Y. (2018) Composite concrete trope. *Patent RU177753U1, No. 2017139725*. https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1_20180312.
- 25 Baychorova A. A., Nozdrin D. S. and Mahmud H. (2023) Investigation of the stressed and deformed state of basalt concrete metropolitan half-trees. *Journal of System Technologies*, **3**, 54-61. https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_54.
- 26 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/vliyaniye-uprugih-harakteristik-kompozitnogo-materiala-na-svoystva-fibrobeta>.
- 27 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/opredeleniye-harakteristik-razrusheniya-i-modulya-uprugosti-fibrobeta>.
- 28 Pukharenko 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>.
- 29 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> (in Russian).
- 30 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
- 31 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>.
- 32 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/p6bqjc2w8hcy8vcaa2bposov8gj97qi/Monografiya.-CHislenny-analiz-nelineynogo-povedeniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-na-tverdotelnykh-modelyakh.pdf>
- 33 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>.
- 34 Mirsayapov I., Antakov A. and 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>.