



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>

EDN: <https://elibrary.ru/mblopq>



Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации

П. В. Трегубчак✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализируется влияние конструктивных особенностей крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями (моноблочная крестовина) на возникновение опасных отказов, связанных с недостатками конструкции. Важным вопросом при проектировании крестовин является распределение напряжений с целью обеспечения равномерной жесткости и исключение возникновения опасных отказов изделия при обеспечении технологичности его производства. Достижение данных целей реализуется за счет рационального расположения продольного силового элемента отливки.

Материалы и методы. Для определения влияния места расположения силового элемента конструкции моноблочной крестовины на коэффициент запаса по усталостной прочности использовалось компьютерное моделирование с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS. Эксплуатационные испытания опытных крестовин прошли на втором главном пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и на станции Исылкуль Западно-Сибирской железной дороги.

Результаты. Изучено влияние геометрии продольного ребра крестовины и места его расположения на безотказность работы конструкции. По результатам расчетов и подтвердивших их испытаний были предложены окончательные геометрические размеры цельнолитого блока сердечника с усовиками с учетом технологичности производства изделий. Даны рекомендации по проектному расположению продольных ребер моноблочных крестовин при конструировании. Предложенная конструкция моноблочных крестовин принята к серийному производству.

Обсуждение и заключение. Представленная в статье одна из конструкций моноблочной крестовины со сдвоенными продольными ребрами жесткости показала наименьшие эквивалентные напряжения. Такая конструкция позволяет обеспечить работу изделия, исключая возникновение опасных отказов. Реализация использованных в работе принципов математического моделирования с учетом принятой расчетной схемы позволит в дальнейшем значительно сократить время разработки и постановки на производство крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стрелочный перевод, моноблочная крестовина, прочность, конструирование, тяжеловесное движение, компьютерное моделирование, циклическое нагружение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трегубчак П. В. Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 146–156. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>.

✉ tregubchak.pavel@vniizht.ru (П. В. Трегубчак)

© Трегубчак П. В., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>

EDN: <https://elibrary.ru/mblopq>



Design of monoblock crossing for heavy operating conditions

Pavel V. Tregubchak✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors analyse the influence of the design features of crossings with a solid core unit with wing rails and welded rail ends (monoblock crossing) on the occurrence of hazardous failures associated with design flaws. Stress distribution to ensure uniform stiffness and avoid dangerous failures while ensuring product manufacturability is an important issue in cross design. This is achieved by rationalising the casting's longitudinal force element.

Materials and methods. A computer simulation using ANSYS finite element analysis is used to determine the influence of the location of the force element in a monoblock crossing design on the fatigue safety factor. Operational tests of the prototype crossings were carried out on the second main track of the Experimental Loop of Railway Research Institute and at the Isilkul station of the West Siberian Railway.

Results. The influence of the geometry of the longitudinal rib of the crossing and its location on the failure-free operation of the structure is studied. Based on the calculation results and confirmed tests, the final geometric dimensions of the one-piece core unit with wing rails are proposed, taking into account product manufacturability. Recommendations are given for the positioning of the longitudinal ribs of the monoblock crossings during the design phase. The proposed design of the monoblock crossings is adopted for series production.

Discussion and conclusion. The lowest equivalent stresses are found in one of the monoblock crossing designs with two longitudinal stiffening ribs presented in the article. This design allows the product to operate in a way that prevents dangerous failures. The implementation of the principles of mathematical modelling used in this work, taking into account the adopted calculation scheme, ensures a significant reduction in the time required for the design and manufacture of crossings with a solid core unit with wing rails and welded rail ends.

KEYWORDS: railroad switch, monoblock crossing, strength, design, heavy-haul, computer simulation, cyclic loading

FOR CITATION: Tregubchak P.V. Design of monoblock crossing for heavy operating conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):146-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>.

✉ tregubchak.pavel@vniizht.ru (P. V. Tregubchak)

© Tregubchak P.V., 2023

Введение. Повышение объемов перевозок — одна из важнейших задач железнодорожного транспорта Российской Федерации в настоящее время. Увеличение пропускной и провозной способности без реконструкции и строительства дополнительных линий возможно несколькими способами: повышением весовых норм поездов, повышением осевых нагрузок, повышением скоростей движения.

Стрелочные переводы являются одним из важнейших технических средств инфраструктуры железных дорог, поэтому их конструкция и технология производства должны отвечать потребностям перевозочного процесса и обеспечивать реализацию перспективных планов железнодорожного транспорта. В настоящее время ведутся разработки новых и модернизация существующих стрелочных переводов с целью повышения их ресурса в условиях интенсификации перевозочного процесса [1, 2]. Внедрение такой продукции позволит снизить эксплуатационные затраты и периодичность проведения ремонтов пути, что необходимо для освоения заданного объема перевозок, эффективного применения тяжеловесного движения грузовых поездов, развития скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России.

Над проблемой увеличения ресурса стрелочной продукции работают специалисты в России и за рубежом. В этой области существует три основных направления для совершенствования конструкции: применение новых и модифицированных материалов; упрочнение рабочих поверхностей; разработка конструкции, наилучшим образом отвечающей условиям работы крестовины. Опыт исследований специалистов российских железных дорог показывает, что использование третьего направления позволяет получить наибольший эффект при наименьших затратах [3, 4].

Разработка инновационной элементной базы для создания стрелочных переводов нового поколения из комплектующих российского производства ведется с учетом отечественного и зарубежного опыта при участии предприятий-изготовителей, а также профильных институтов, компетентных в области проектирования и проведения сложных расчетов элементов инфраструктуры [5].

На российских железных дорогах наиболее распространены конструкции крестовин с неподвижным сердечником. Они применяются в стрелочных переводах, косоугольных глухих пересечениях и перекрестных съездах. При этом такие крестовины имеют наименьший ресурс в сравнении с основными элементами конструкции в целом.

Крестовина с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями

(моноблочная крестовина) в большей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к конструкциям, работающим под воздействием высоких нагрузок. К преимуществам данных крестовин можно отнести отсутствие болтовых соединений рельсовых усовиков и сердечника из высокомарганцовистой стали, что позволяет обеспечить единство работы конструкции по сравнению со сборными крестовинами, а также отсутствие необходимости подтяжки болтов в процессе эксплуатации. Цельнолитой блок сердечника дает дополнительные возможности конструкторам по оптимизации формы верхней рабочей поверхности (геометрии поверхности катания). Моноблочные крестовины имеют повышенные эксплуатационные качества и способны воспринимать высокие нагрузки на ось благодаря конструктивным особенностям и способности к самоупрочнению (наклепу), а также высокой износостойкости стали марки 110Г13Л, из которой они изготавливаются.

С учетом тяжелых условий работы, сложной формы изделия и технологии изготовления, крестовины из высокомарганцовистой стали являются одними из наиболее трудоемких в проектировании элементов стрелочного перевода.

Объект исследования. Крестовина как элемент инфраструктуры должна обеспечивать выполнение следующих основных требований: безопасности; учета видов подвижного состава, на обращение которых должен быть рассчитан перевод; соответствия системе обслуживания; ресурсных требований к элементам перевода [6, 7], а также быть технологичной на всех стадиях производства. С целью достижения требуемых показателей при проектировании крестовин должны быть решены конструкторские, металлургические и технологические задачи, позволяющие обеспечить «проливаемость» (заполнение литейной формы) и бездефектность отливки крестовины, достижение соответствия всех геометрических параметров (геометрии) изделия.

В большей степени точность отливки и возможность получения геометрии, заложенной в конструкции изделия, определяются технологией изготовления форм. При этом конструктивные особенности крестовины из высокомарганцовистой стали в значительной степени будут влиять на прочность и устойчивость к возникновению дефектов, угрожающих безопасности движения в процессе эксплуатации, а также на ее долговечность, что является первоочередной задачей, решаемой при проектировании.

Важным вопросом при проектировании крестовин является распределение напряжений с целью обеспечения равномерной жесткости и исключение возникновения опасных отказов изделия при обеспечении технологичности его производства. Достижение

данных целей реализуется за счет рационального расположения в конструкции продольного силового элемента отливки.

В качестве моделируемого объекта был принят цельнолитой блок моноблочной крестовины типа Р65 марки 1/11. Для проведения анализа были подготовлены 3D-модели трех вариантов конструкции рассчитываемого объекта под формат конечно-элементного комплекса ANSYS (модуль ANSYS Design Modeler) с одинаковой геометрией поверхности катания, а также внешними, сопрягаемыми при сборке крестовины размерами (рис. 1).

При подготовке моделей учитывалась сложность и трудоемкость процесса изготовления литейных форм и характерные опасные зоны (рис. 2–4).

Расположение первой опасной зоны обусловлено увеличением расстояния между боковыми поверхностями клина по мере удаления от математического центра крестовины в сторону заднего торца и, как следствие, снижением перераспределения доли нагрузки на боковую поверхность клина, противоположную нагружаемой.

Расположение второй опасной зоны обусловлено перераспределением нагрузки между боковой поверхностью литого усовика и внешней боковой поверхностью цельнолитого блока от его горла до пазухи, находящейся со стороны переднего торца.

Первая модель конструкции крестовины имеет два продольных ребра, проходящих по центру отливки (рис. 2). С точки зрения конструкции и сложности изготовления литейной формы данный вариант является самым простым.

Вторая модель конструкции имеет два продольных ребра, начинающихся от тела отливки со стороны заднего торца отливки и объединяющихся в районе сечения клина сердечника крестовины шириной 50 мм. Два коротких продольных ребра клина идут от тела отливки со стороны переднего торца и объединяются в одно ребро, сопрягающееся с ребрами, расположенными с противоположной стороны (рис. 3). Переход в зоне сопряжения ребер выполнен в виде понижения их высоты до уровня диафрагмы, что обусловлено особенностями изготовления литейной формы. Учитывая геометрию соединения и перехода ребер, расположенных со стороны заднего торца отливки, данный вариант является наиболее технологически сложным для реализации.

Третья модель конструкции отличается от второй тем, что ребра, расположенные со стороны заднего торца отливки, объединяются в районе сечения клина сердечника крестовины шириной 80 мм, а два противоположных ребра — в районе ее горла (рис. 4). Ребра имеют увеличенную высоту по сравнению с первой и второй конструкцией. Изготовление литейной формы данной

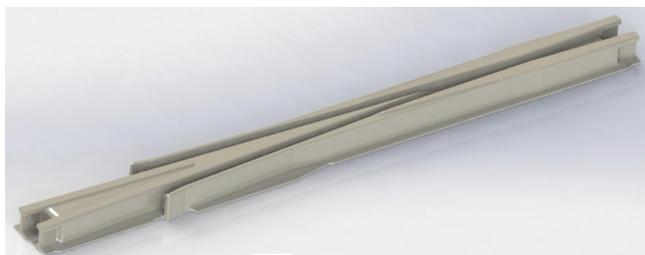


Рис. 1. 3D-модель цельнолитого блока моноблочной крестовины типа Р65 марки 1/11 (внешние поверхности)

Fig. 1. 3D model of a solid block of a P65 type monoblock crossing, grade 1/11 (external surfaces)

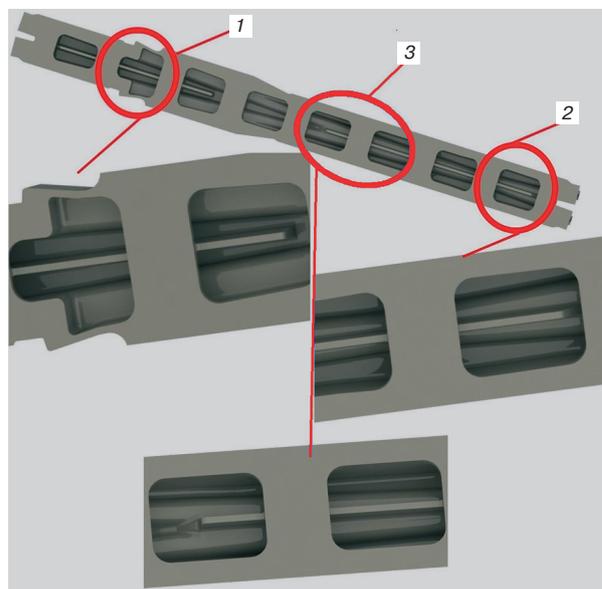


Рис. 2. Первая модель конструкции с одиночными продольными ребрами жесткости:
1 — первая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
2 — вторая опасная зона со стороны переднего торца крестовины;
3 — геометрия перехода ребра жесткости, расположенного со стороны переднего торца крестовины, в тело отливки

Fig. 2. First model designed with single longitudinal stiffeners:
1 — first danger zone at the rear end of the crossing;
2 — second danger zone at the front end of the crossing;
3 — transition geometry of the stiffener at the front end of the crossing into the casting body

отливки по технологической сложности является промежуточным между первым и вторым вариантами.

Данные сочетания расположения ребер в конструкции крестовин были выбраны с целью проведения анализа влияния длины, высоты и места расположения ребер относительно поверхности катания на особенности их работы.

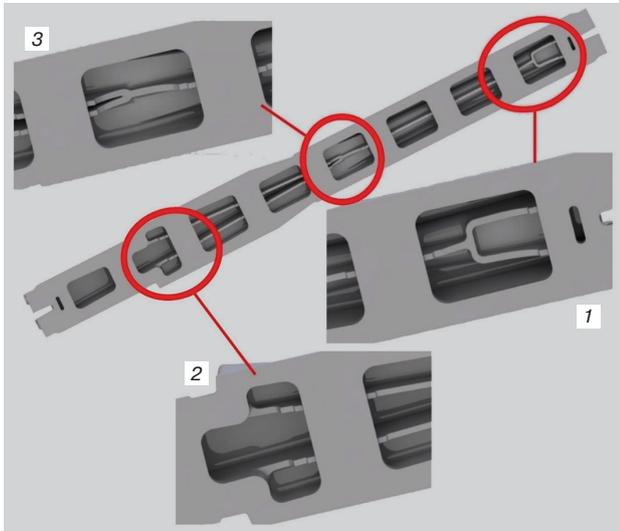


Рис. 3. Вторая модель конструкции со двоянными продольными ребрами жесткости:

- 1 — первая опасная зона со стороны переднего торца отливки;
- 2 — вторая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
- 3 — геометрия соединения ребер, идущих со стороны заднего торца крестовины

Fig. 3. Second model designed with double longitudinal stiffening:

- 1 — first danger zone at the front end of the casting;
- 2 — second danger zone at the rear end of the crossing;
- 3 — rib connection geometry from the rear end of the crossing

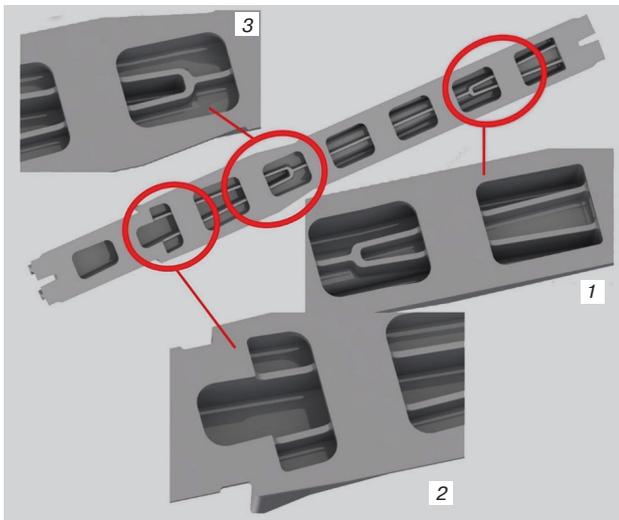


Рис. 4. Третья модель конструкции со двоянными продольными ребрами жесткости:

- 1 — первая опасная зона со стороны переднего торца отливки;
- 2 — вторая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
- 3 — геометрия соединения ребер, идущих со стороны заднего торца крестовины

Fig. 4. Third model designed with double longitudinal stiffeners:

- 1 — first danger zone at the front end of the casting;
- 2 — second danger zone at the rear end of the crossing;
- 3 — rib connection geometry from the rear end of the crossing

Моделирование цельнолитого блока моноблочной крестовины с помощью метода конечных элементов.

Составление математической модели осуществлялось с использованием расчетной платформы ANSYS Workbench. На данном этапе работ для проведения конечно-элементного моделирования были выбраны следующие модели поведения конструкции: нестационарный прочностной анализ (Transient Structural), статический структурный анализ (Static Structural) [8–10].

При моделировании материал модели принимался изотропным (использовалась модель изотропного поведения материала — Isotropic Elasticity). Модуль упругости первого рода (модуль Юнга E) принят $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,3; объемный модуль упругости K — $1,6667 \cdot 10^{11}$ Па; модуль сдвига G — $7,6923 \cdot 10^{10}$ Па. Величины пределов текучести и прочности на растяжение-сжатие использованы на основе данных [11, 12] и экспериментальных результатов лабораторных исследований фактически выплавляемой стали (табл. 1). Полный объем выборки составил 100 плавов. Механические свойства стали марки 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах соответствуют ГОСТ 7370–2015 [13].

Таким образом, пределы текучести при растяжении (Tensile Yield Strength) и сжатии (Compressive Yield Strength) равны $380 \div 490$ МПа. Пределы прочности при растяжении (Tensile Ultimate Strength) и сжатии (Compressive Ultimate Strength) — $810 \div 920$ МПа. При моделировании использованы нижние значения характеристик.

Были приняты следующие параметры конечно-элементной модели (КЭМ): тип КЭМ — тетрагональная сетка; максимальный размер конечных элементов — 50 мм. На контактные поверхности крестовины, располагающиеся вдоль траектории перемещения колеса, а также на ее внутренние поверхности назначен минимальный размер конечного элемента — 2–4 мм (рис. 5).

В расчетной модели выделены и обозначены следующие контактные поверхности: Contact bodies — контактные поверхности вагонного колеса; Target bodies — контактные поверхности крестовины стрелочного перевода. Тип контакта — фрикционный (Frictional) с учетом трения-качения. Использован расширенный метод Лагранжа при обновлении матрицы жесткости на каждой итерации.

В настройках конечно-элементного анализа (Analysis Settings) были выбраны следующие параметры:

1. Количество начальных подшагов — 20, минимальное количество подшагов — 10, максимальное количество — 100.
2. Активирован контроль больших деформаций.
3. Активирован нелинейный контроль: вариант метода Ньютона — Рафсона (полный).
4. Активирован учет конвергенции нагрузки.

Механические свойства стали марки 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах

Table 1

Mechanical properties of 110G13L steel after heat treatment on test specimens

№ п/п	№ плавки	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²	Группа металла
1	155849	89,8	49,0	31,7	27,5	22,5	2
2	657466	93,9	49,0	42,0	36,4	32,3	1
3	657468	92,1	49,0	33,7	30,6	27,8	1
4	657487	81,4	49,0	22,2	21,0	31,9	3
5	205822	92,9	49,0	36,7	34,9	28,6	1
6	657497	89,2	49,0	32,0	29,4	22,6	2

Нижняя опорная поверхность цельнолитой крестовины была выбрана в качестве неподвижной опоры (fixed support).

Нагрузка на ось колесной пары составляет 270 кН. Соответственно, нагрузка на колесо равна 135 кН.

Моменту времени τ_1 соответствуют положения колес, представленные на рис. 6. Каждый последующий момент времени τ_n характеризует следующее положение колеса, отличающееся от предыдущего на расстояние 15 мм.

На рис. 7 представлены картины распределения полей: полных деформаций, эквивалентных напряжений по Мизесу, коэффициентов запаса по статической и усталостной прочности для момента времени τ_8 . Аналогичным образом были получены картины распределения полей для других сечений крестовины.

На рис. 8 и 9 представлено поле распределения эквивалентных напряжений, а на рис. 10 поле распределения коэффициента запаса по усталостной прочности в опасных зонах второй модели конструкции.

Картины распределения полей эквивалентных напряжений и коэффициента запаса по усталостной прочности показывают слабые места конструкции, они выделены красным цветом, и позволяют оценить ее ресурсный потенциал.

Результаты численного моделирования. Полученные в процессе моделирования максимальные уровни эквивалентных напряжений и минимальные значения коэффициента запаса по усталостной прочности в первой и второй опасных зонах (см. рис. 2–4) представлены в табл. 2.

В ходе проведенного конечно-элементного моделирования определено напряженно-деформированное состояние трех вариантов конструкций (моделей) цельнолитой крестовины, находящейся в условиях циклического нагружения.

Рекомендуется при проектировании моноблочных крестовин продольные ребра жесткости располагать непосредственно под поверхностью катания.

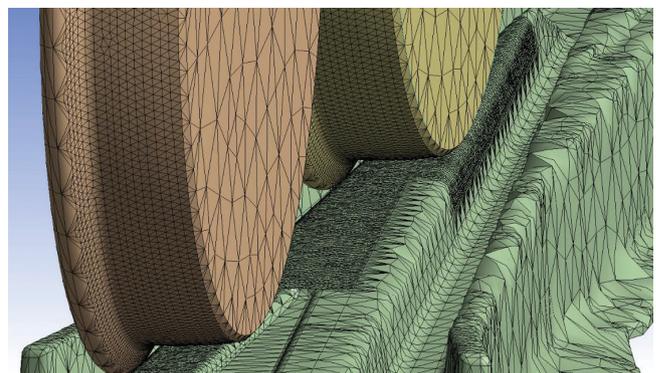


Рис. 5. Сгущение сетки вдоль траектории качения колеса на поверхности катания крестовины

Fig. 5. Grid clustering along the wheel path on the rolling surface of the crossing

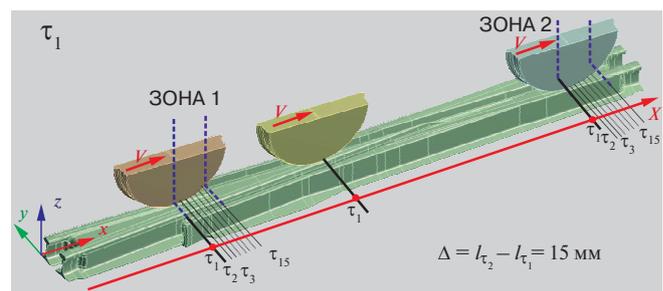


Рис. 6. Перемещение колеса относительно цельнолитой крестовины в процессе моделирования

Fig. 6. Wheel movement in relation to the solid crossing during modelling

Установлено, что из всех представленных конструкций цельнолитой крестовины наименьшей прочностью в условиях циклического нагружения обладает первая модель, а лучшими прочностными характеристиками — третья.

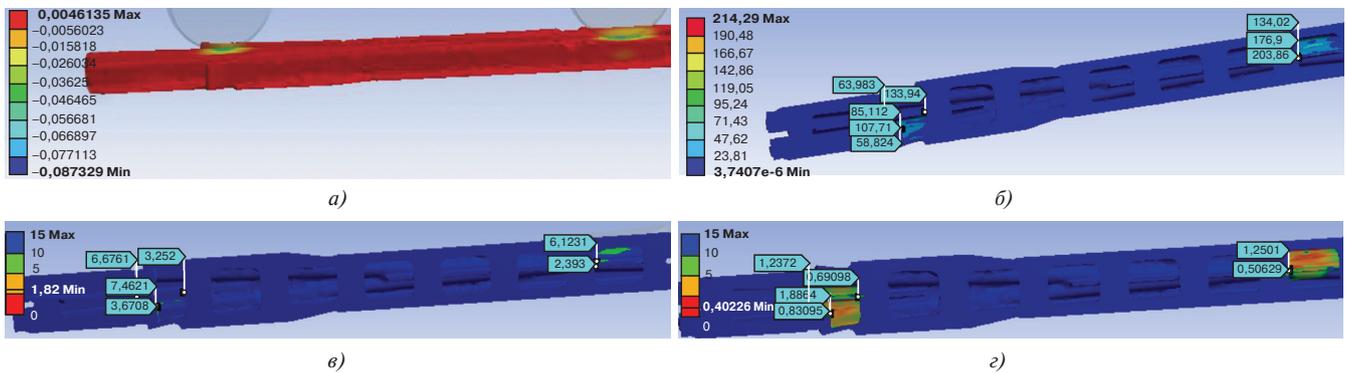


Рис. 7. Результаты расчета для восьмого момента времени в первой и второй опасных зонах для первой модели конструкции: *a* — абсолютная деформация по вертикальной компоненте, мм; *б* — эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа; *в* — коэффициент запаса по статической прочности; *з* — коэффициент запаса по усталостной прочности

Fig. 7. Calculation results for the eighth time point in the first and the second danger zones for the first design model: *a* — absolute vertical component strain, mm; *b* — equivalent von Mises stresses, MPa; *v* — static safety factor; *z* — fatigue safety factor

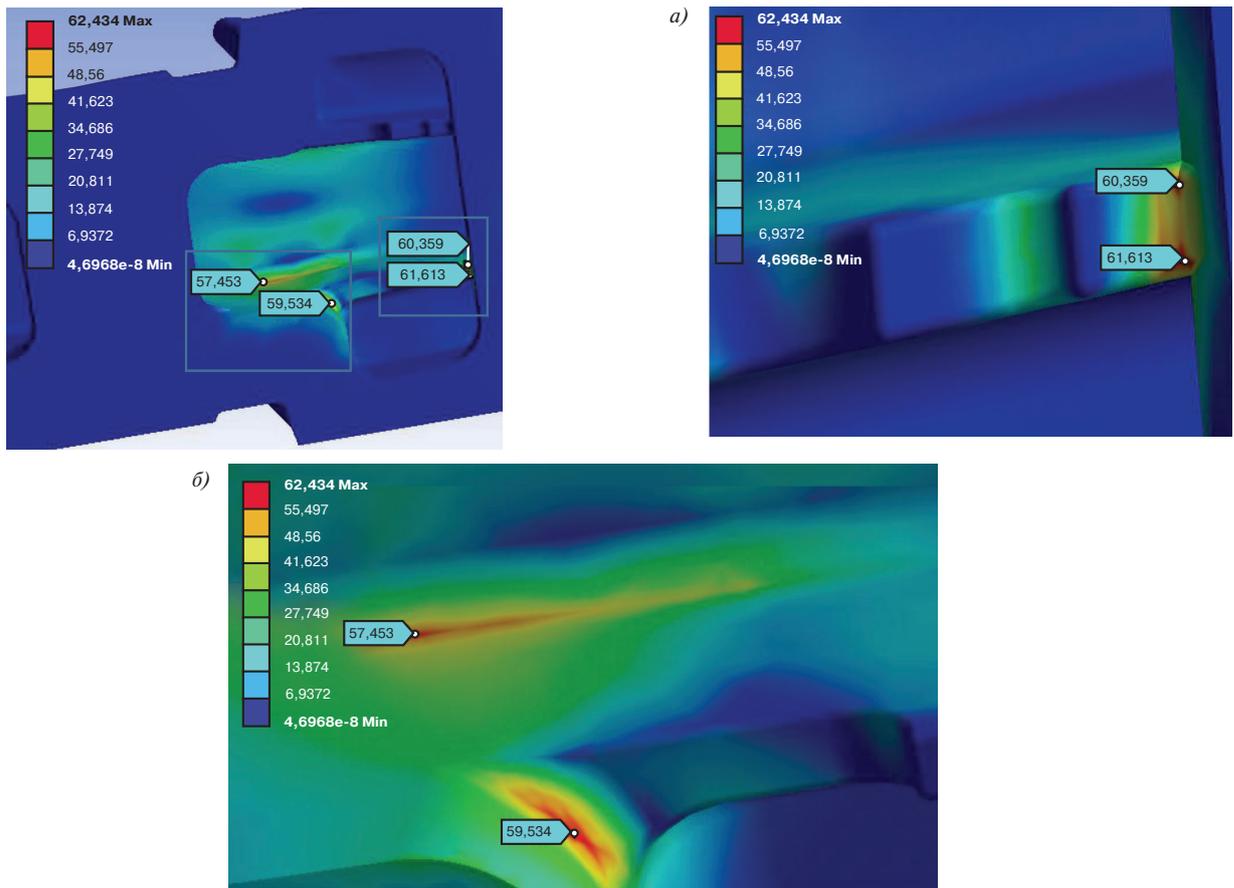


Рис. 8. Поле эквивалентных напряжений в первой опасной зоне для второй модели конструкции, МПа: *a* — правый выделенный фрагмент (увеличен); *б* — левый фрагмент (увеличен)

Fig. 8. Equivalent stress field in the first danger zone for the second design model, MPa: *a* — right selected fragment (enlarged); *b* — left fragment (enlarged)

Принимая во внимание отличие в 2,3 раза коэффициента запаса по усталостной прочности между первой и второй зонами третьей модели конструкции,

а также его локальный характер, для увеличения коэффициента запаса в первой опасной зоне рекомендовано провести изменение конструкции путем

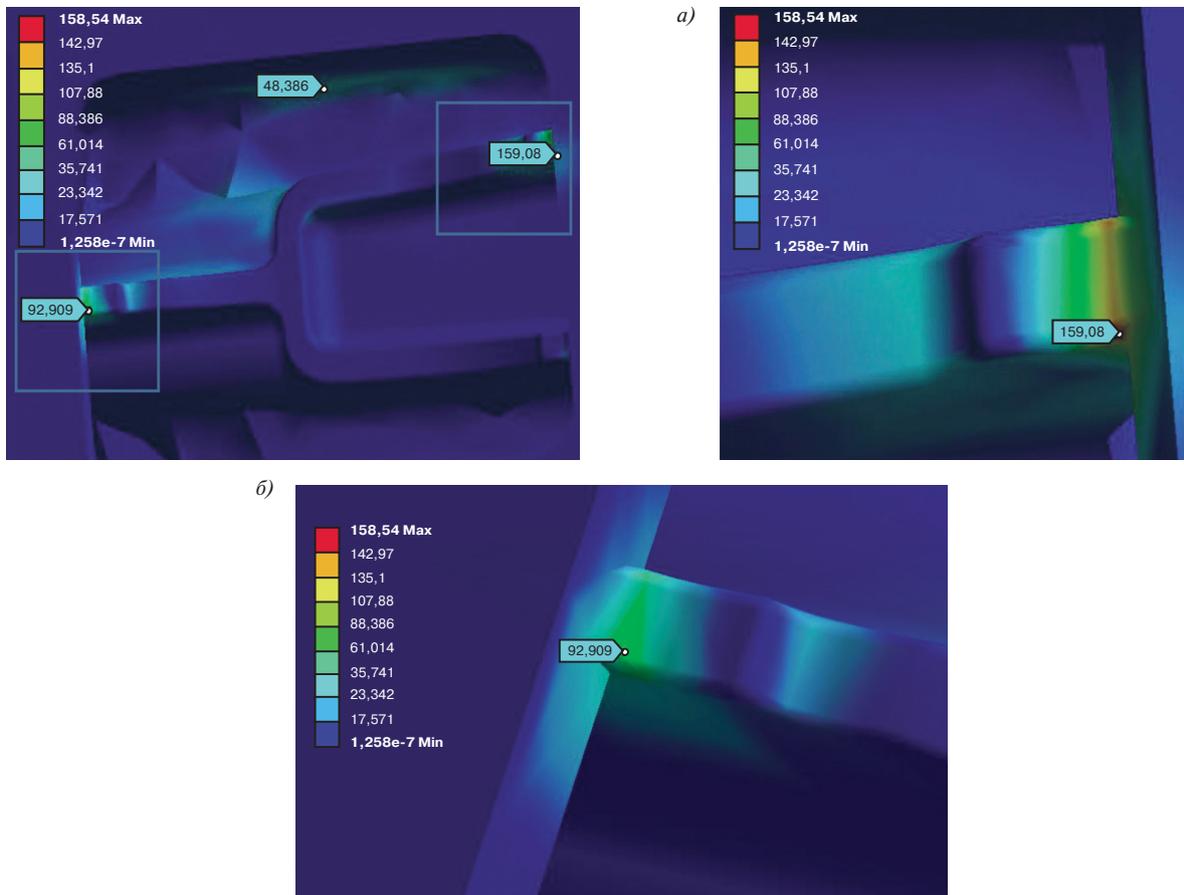


Рис. 9. Поле эквивалентных напряжений во второй опасной зоне для второй модели конструкции, МПа:
a — правый выделенный фрагмент (увеличен); *б* — левый фрагмент (увеличен)

Fig. 9. Equivalent stress field in the second danger zone for the second design model, MPa:
a — right selected fragment (enlarged); *б* — left fragment (enlarged)

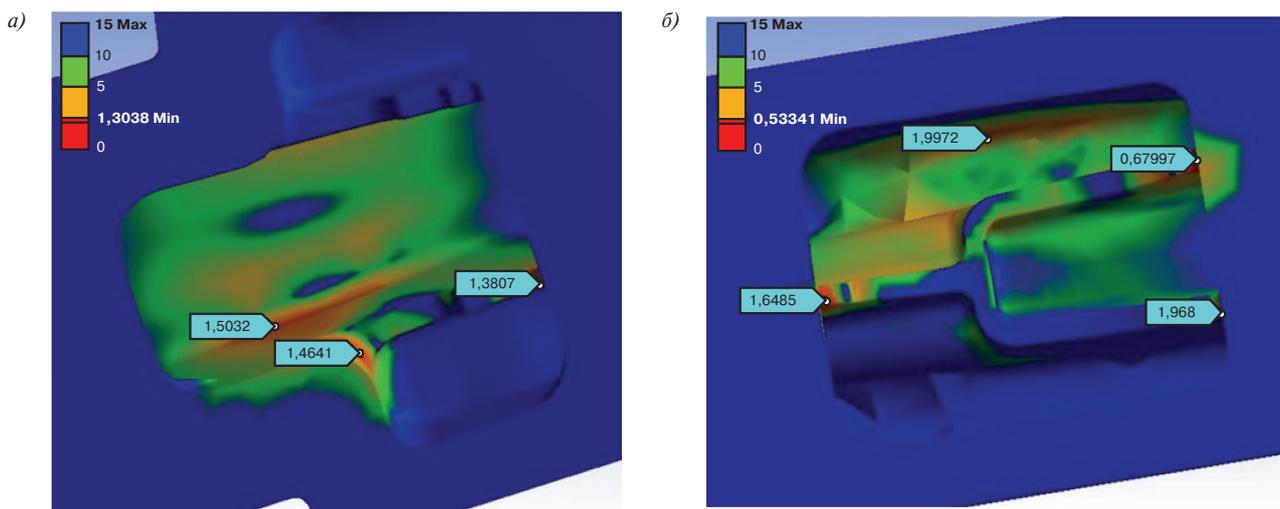


Рис. 10. Коэффициент запаса по усталостной прочности для второй модели конструкции:
a — в первой опасной зоне; *б* — во второй опасной зоне

Fig. 10. Fatigue safety factor for the second design model:
a — in the first danger zone; *б* — in the second danger zone

Таблица 2
Результаты расчета для моделей 1–3

Calculation results for models 1–3

Модель конструкции	Эквивалентные напряжения max, МПа		Коэффициент запаса по усталостной прочности, min	
	Первая зона	Вторая зона	Первая зона	Вторая зона
1	376	221	0,36	0,46
2	62	159	1,38	1,63
3	58	81	2,02	4,73

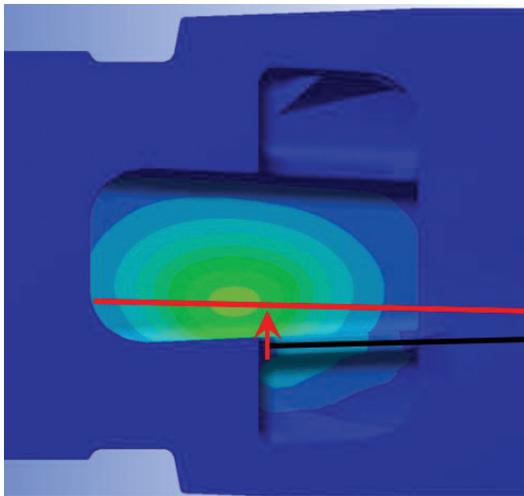


Рис. 11. Рекомендуемое место расположения ребра жесткости относительно зоны контакта колеса с поверхностью катания крестовины (третья модель конструкции, вид снизу отливки)

Fig. 11. Recommended location of the stiffener in relation to the contact area of the wheel with the crossing rolling surface (third design model, view from below the casting)



Рис. 12. Трещины литой части цельнолитого блока моноблочной крестовины в районе улавливающего желоба:
а — вид слева; б — вид справа

Fig. 12. Cracks in the cast part of the solid block of the monoblock crossing in the area of the catch chute:
а — left side view; б — right side view

смещения существующего ребра жесткости в сторону области контакта колеса с поверхностью катания крестовины, как показано на рис. 11, или введения дополнительного элемента жесткости. Данное решение позволит усилить конструкцию крестовины, повысить ее долговечность и безотказность работы.

После усиления конструкции крестовины третьей модели расчетный уровень эквивалентных напряжений снизился до 47 МПа, а коэффициент запаса по усталостной прочности увеличился до 4,18.

По разработанным с помощью моделирования конструкциям крестовин изготовлены опытные образцы. Результаты математического моделирования были проверены в эксплуатационных испытаниях.

Эксплуатационные испытания моноблочных крестовин. Испытания проходили в составе модернизированного стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.001 при установленных скоростях движения по прямому и боковому путям 80 и 40 км/ч соответственно, максимальные статические нагрузки на ось подвижного состава не превышали 25 т.

При проведении эксплуатационных испытаний моноблочных крестовин ширина колеи и желобов на стрелочных переводах находилась в пределах регламентируемых норм и допусков, отклонений критического расстояния между элементами крестовины и контрольного узла, превышающих установленные нормы, не отмечено. Отказов в работе креплений за время проведения испытаний не наблюдалось.

Крестовина первой конструкции эксплуатировалась на месте стрелочного перевода № 111 на втором главном пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и вышла из строя, пропустив 86,4 млн т брутто груза, из-за трещин литой части цельнолитого блока моноблочной крестовины в районе улавливающего желоба и переднего вылета (рис. 12, 13). На момент изъятия



Рис. 13. Трещина в районе переднего вылета цельнолитого блока моноблочной крестовины

Fig. 13. Crack in the area of the front outrigger of the solid block of the monoblock crossing

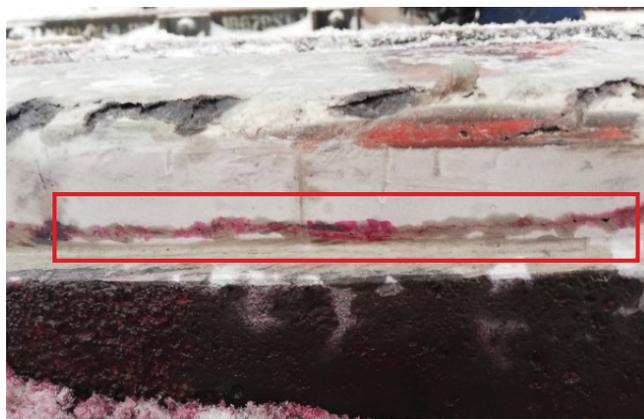


Рис. 14. Результат проверки трещины методом цветной дефектоскопии, подозрение на дефект ДС.30Г.2

Fig. 14. Result of crack inspection by means of colour defectoscopy, suspected defect DS.30G.2

износ элементов поверхности катания находился в пределах 1 мм.

Крестовины второй и третьей конструкции эксплуатировались на станции Исилькуль Западно-Сибирской железной дороги на переводах № 5 и 35 соответственно. На момент проведения испытаний грузонапряженность участка, на котором расположены данные стрелочные переводы, составляла до 186,7 млн т·км брутто на км в год.

После пропуска груза в 235,6 млн т брутто была выявлена продольная горизонтальная трещина литой части сердечника в районе первой опасной зоны, подозрение на дефект по коду ДС.30Г.2 (рис. 14).

Износ литых усювиков по прямому и боковому направлениям составил 4,4 и 2,1 мм соответственно. Износ клина сердечника в сечении шириной 40 мм — 3,8 мм. На поверхности клина имелись выкрашивания по коду дефекта ДС.13.2 глубиной до 1,6 мм.

Опытный образец крестовины третьей конструкции был изъят из эксплуатации по причине износа. Трещин в теле крестовины не выявлено. В процессе эксплуатации на крестовине также выявлялись дефекты по коду ДС.13.2.

В ходе эксплуатационных испытаний было отмечено, что моноблочные крестовины из-за конструктивных особенностей в меньшей степени склонны к образованию дефектов по кодам ДУ.13.2 и ДУ.14.2. Картина распределения эквивалентных напряжений и коэффициента запаса по усталостной прочности для крестовин первой и второй конструкции соответствует характеру их разрушения в процессе эксплуатации.

Исследования образцов металла, вырезанных из отливок крестовин первой и второй конструкции, показали отсутствие литейного характера образования

выявленных дефектов [13]. Очевидно, что причиной образования трещин при эксплуатации моноблочных крестовин являлись недостатки конструкций.

Результаты расчетов и подтвердивших их испытаний показали, что конструкцию моноблока следует проектировать на основе третьего варианта, рассмотренного в исследовании. Окончательная геометрия моноблока была доработана с учетом возможности получения бездефектной отливки и технологичности изготовления. Разработанная конструкция моноблочных крестовин принята к серийному производству.

Заключение. Результаты расчетов и эксплуатационных испытаний показали, что рассматриваемые в работе геометрии ребер жесткости моноблочных крестовин оказывают значительное влияние на картину распределения и величины напряжений, а также на надежность всего изделия. Конструкция моноблочной крестовины со сдвоенными продольными ребрами жесткости по третьей модели расположения показала наименьшие эквивалентные напряжения, что позволило исключить возникновение опасных отказов при работе изделия.

Представленный способ определения прочности конструкции крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усювиками и приварными рельсовыми окончаниями может быть использован при проектировании аналогичных конструкций. Это позволит значительно сократить время разработки и постановки на производство моноблочных крестовин. Кроме того, даст возможность исключить затраты на разработку и изготовление литейной оснастки, а также на проведение испытаний опытных образцов моноблочных крестовин, не отвечающих предъявляемым к ним требованиям по надежности конструкции.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Новый стрелочный перевод типа Р65 марки 1/22 для высокоскоростного движения / М. Е. Березовский [и др.] // Студент — инновации России. 2017. № 2. С. 29–35 [Berezovskiy M. E., Tregubchak P. V., Tsittser I. V., Korolev V. V. New switch of P65 type and 1/22 make for high-speed traffic. *Student — innovatsii Rossii*. 2017;(2):29-35. (In Russ.)].

2. Глюзберг Б. Э. Разработка и внедрение новых конструкций стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 31–36 [Gluzberg B. E. Development and implementation of new automatic switch designs. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2012;(3):31-36 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/oxvrfv>.

3. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Увеличение ресурса крестовин стрелочных переводов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XV Междунар. науч.-техн. конф.: чтения, посвященные памяти проф. Г. М. Шахунянца, Москва, 4–5 апреля 2018 г.: тр. М.: РУТ, 2018. С. 186–187 [Gluzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Increasing the life of simple switch crossings. In: *Modern problems of railway design, construction and operation: XV International Scientific-Technical Conference: readings in memory of Prof. G. M. Shakhunyants, Moscow, 4–5 April 2018: proc.* Moscow: RUT; 2018. p. 186–187. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/hhkygj>.

4. Королев В. В. Совершенствование системы учета дефектов элементов стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 7. С. 14–16 [Korolev V. V. Improvement of the simple switch defect accounting system. *Railway Track and Facilities*. 2016;(7):14-16 (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/whctbd>.

5. Глюзберг Б. Э. Модернизация и совершенствование стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 54–57 [Gluzberg B. E. Modernising and improving simple switches. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2015;(7):54-57 (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/udlfpf>.

6. Глюзберг Б. Э. Проблемы стрелочного хозяйства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 // Транспортное строительство: сб. ст. Второй Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 12–14 апреля 2021 г. М.: Перо, 2021. С. 14–22 [Gluzberg B. E. Problems of switch management of the high-speed railway line VSZhM-1. In: *Transport Construction: Collection of article, Second All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, 12–14 April 2021*. Moscow: Pero; 2021. p. 14–22. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zzxzlj>.

7. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б. Э. Глюзберг [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 20–22 [Gluzberg B. E., Zverkova N. V., Korolev V. V., Shishkina I. V. Stages of railway technical infrastructure design. *Railway Track and Facilities*. 2018;(2):20-22. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/yqdyhc>.

8. Lee H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15*. Mission, Kansas: SDC Publications; 2014. 600 p.

9. Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. 1st. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2014. 411 p. <https://doi.org/10.1201/b17284>.

10. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 1st ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2006. 453 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6875-0.X5030-3>.

11. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. 2-е изд. доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с. [Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V., Astakhov Yu. I., Gerasimov V. I., Golen'shina L. G., et al. *Handbook of steels and alloys*. 2nd revised and enlarged edition. Moscow: Mashinostroenie; 2003. 784 с. (In Russ.)].

12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с. [Sorokin V. G., Volosnikova A. V., Vyatkin S. A., Gervasev M. A., Greditor M. A., Krylova K. M., et al. *Handbook of steels and alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 640 с. (In Russ.)].

13. ГОСТ 7370–2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия: дата введения 2016–07–01. М.: Стандартинформ, 2015. 66 с. [GOST 7370–2015. *Railway frogs. Specifications*. Introduction date 2016–07–01. Moscow: Standartinform; 2015. 66 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК,

начальник отдела, отдел устройств верхнего строения пути и стрелочных переводов, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. TREGUBCHAK,

Head of the Department, Department of Devices of the track superstructure and turnouts, Research Center for Railway Infrastructure and Issues of Wheel – Rail Interaction, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 21.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 24.04.2023, принята к публикации 17.05.2023.

The article was submitted 16.03.2023, first review received 21.04.2023, second review received 24.04.2023, accepted for publication 17.05.2023.