

УДК 629.463.62:620.169.1

Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ

Л. В. Цыганская¹, А. Н. Смирнов¹, Д. Г. Бейн²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, литера М, 1-й этаж, помещ. 5н

Для цитирования: Цыганская Л. В., Смирнов А. Н., Бейн Д. Г. Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 787–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800

Аннотация

Цель: обеспечение безопасности движения в железнодорожной отрасли. Проблема трещин, периодически выявляемых при эксплуатации вагонов-платформ, требует новых подходов к теоретической и практической оценке показателей сопротивления усталости и трещиностойкости их конструкции. Особо актуально возникновение трещин в условиях низких температур. **Метод:** разработан экспериментальный метод определения спектра вертикального нагружения вагонов-платформ для перевозки контейнеров, обоснован спектр продольных нагрузок для вагонов, эксплуатирующихся в районах с низкими температурами. Предложен метод оценки трещиностойкости по экстремумам напряжений, определенных экспериментально. В основе метода — положения механики разрушения, позволяющие учесть влияние отрицательных температур. **Результаты:** по экстремумам напряжений в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины, определенным на основании предложенного метода, установлено, что в качестве схемы испытаний для экспериментальной оценки показателей сопротивления усталости при вертикальных и продольных нагрузках возможно использовать одну обоснованную схему, которая максимально нагружает все зоны вагона. По предложенной методике возможно установить размер допустимого трещиноподобного дефекта исходя из условий начального роста трещины. Коэффициенты интенсивности напряжений, полученные на основании экспериментально определенных экстремумов напряжений, показали, что в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров возможен рост трещин при отрицательных температурах, что не согласуется с методикой оценки усталостной прочности стандарта ГОСТ 33211-2014. **Практическая значимость:** предложенный метод оценки спектра вертикального нагружения вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров позволяет из множества разнообразных схем загрузки вагона выбрать одну для проведения испытаний, которая максимально нагружает все его потенциально опасные зоны. Отдельные результаты исследований использованы для разработки типовой методики испытаний на сопротивление усталости вагонов-платформ увеличенной длины.

Ключевые слова: вагоны-платформы, коэффициент запаса сопротивления усталости, трещиностойкость, спектр нагружения

Введение

С проблемой возникновения трещин на протяжении всей истории его существования в реальных конструкциях подвижного состава железных дорог приходится сталкиваться. При этом, несмотря на большой накопленный опыт теоретических и экспериментальных

исследований, появляются новые факторы, влияющие на показатели усталостной прочности и трещиностойкости подвижного состава. Такие факторы, как правило, связаны с изменением условий эксплуатации или внедрением принципиально новых конструктивных решений, и их зачастую очень сложно учесть при проектировании новых изделий.

Последний случай массовых отказов подвижного состава на колее 1520 по причине образования трещин в элементах рам вагонов-платформ произошел в 2005–2006 годах и был связан с введением в эксплуатацию четырехосных вагонов-платформ увеличенной длины (с длиной по осям сцепления автосцепок более 21 м). Основное назначение таких вагонов — перевозка крупнотоннажных контейнеров. Увеличенная длина позволила на один вагон установить четыре контейнера типоразмера 1CCC, 1CC, 1C или два контейнера 1AAA, 1AA, 1A стандарта ISO 668:1995 «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики».

Трещины в конструкции рам вагонов-платформ увеличенной длины появлялись в течение первого года эксплуатации при назначенном сроке службы вагона 32 года. Развитие трещин происходило стремительно, не позволяя своевременно выявить их в эксплуатации, что ставило под угрозу безопасность движения. Очевидное отсутствие у рам вагонов должного запаса по усталостной прочности и низкая трещиностойкость потребовали оперативной разработки в 2006 году методики экспериментальных исследований, которая базировалась на отраслевом руководящем документе РД 24.050.37-95 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества».

В основу этой методики была положена широко известная гипотеза линейного суммиро-

вания повреждений (гипотеза Майнера), которая выражается равенством [1]:

$$\sum n_i / N_i = 1,$$

где n_i — число циклов приложенной нагрузки; N_i — число циклов до разрушения, определенное по кривой усталости при постоянной амплитуде) [1].

Возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений для оценки усталостной прочности рам вагонов-платформ, несмотря на то что на показатель $\sum n_i / N_i$ влияет множество факторов, обосновано большим количеством экспериментально определенных данных для типовых конструкций и сварных соединений, применяемых в вагоностроении.

Так, стандартом ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», а ранее отраслевыми документами, действующими на железнодорожном транспорте Российской Федерации, введен коэффициент запаса сопротивления усталости, который определяется отношением:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}},$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде (Па) составной части вагона на базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

$\sigma_{a,\varepsilon}$ — приведенная амплитуда динамического напряжения (Па), эквивалентная по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный ресурс составной части, приведенная к базовому числу циклов $N_0 = 10^7$.

При этом предел выносливости $\sigma_{a,N}$ должен определяться с учетом среднего значения предела выносливости базового материала и коэффициента снижения предела выносливости K_σ , который учитывает тип сварного соединения, влияние механической обработки сварного соединения, дробеструйной обработки или

оплавления и величины дефектов, определяемых методами неразрушающего контроля.

Методика экспериментальных исследований 2006 года помогла справиться с поставленной задачей оперативного одновременного тестирования продукции непосредственно на заводах-производителях с использованием их оборудования и мощностей.

Дальнейший опыт эксплуатации и испытаний в период с 2006 по 2022 год различных конструкций вагонов-платформ увеличенной длины показал, что задача обеспечения запаса сопротивления усталости решена не полностью. Вопросы оценки усталостной прочности грузовых вагонов с использованием основных положений действующих российских стандартов исследованы в работе [2].

Основным недостатком методики 2006 года, по мнению авторов настоящей статьи, является неполный спектр нагружения, не учитывающий продольные нагрузки, а только спектр вертикального нагружения, который определен для одной схемы загрузки вагона, максимально нагружающей центральное сечение рамы. Выбор спектра нагружения при экспериментальной оценке сопротивления усталости вагонных конструкций представляет собой отдельную сложность, так как условия нагру-

жения конструкций вагона существенно отличаются в зависимости от схемы нагружения и характера перевозимого груза. Кроме этого, методика не предусматривала учет отрицательных температур, которые могут стать дополнительным фактором, приводящим к трещинообразованию.

Влияние частоты и спектра нагружения на усталость конструкции показана в работах [3, 4].

Спектры распределения сил в эксплуатации в соответствии со стандартом ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», действующим в Российской Федерации, для грузового подвижного состава, оборудованного поглощающими аппаратами различной энергоемкости (не менее 70 кДж для аппарата класса Т1 и не менее 100 кДж для аппарата класса Т2), приведены в табл. 1. Исследования в части определения параметров поглощающих аппаратов приведены в [5].

Определенную сложность представляет учет отрицательных температур. Экспериментальное определение характеристик статической прочности с учетом отрицательных температур не позволяет соотнести их с характеристиками усталостной прочности, поскольку нет достоверно установленных

ТАБЛИЦА 1. Спектр распределения продольных сил

Среднее значение силы в интервале, МН, для поглощающих аппаратов энергоемкостью не менее 70 кДж (не менее 100 кДж)	Число приложений силы за 1 год	
	растягивающей	сжимающей
0,3 (0,2)	2432 (2650)	800 (800)
0,6 (0,4)	5700	2000
1 (0,7)	5120	2230
1,4 (1)	3050	1410
1,8 (1,3)	800	800
2,2 (1,6)	180	200
2,6 (1,9)	0	50
3 (2,1)	0	9
3,35 (2,4)	0	1

зависимостей, связывающих данные характеристики. Определение необходимых параметров усталостной прочности на реальных вагонных конструкциях в условиях отрицательных температур является процессом экономически не оправданным.

Статические показатели прочности сталей имеют экспериментально подтвержденные зависимости от температуры. Например, в работе [15] предложена формула определения предела текучести материала в зависимости от температуры испытаний:

$$\sigma_{\tau T} = \sigma_{\tau} \exp \left\{ 340 \left[\exp \left(-\frac{\sigma_{\tau}}{220} \right) + 0,1 \right] \cdot \left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_0} \right) \right\}, \quad (1)$$

где σ_{τ} — предел текучести стали при температуре $T_0 = 20$ °С;

T — температура испытания, °С.

При этом известны работы в области механики разрушения, которые позволяют прогнозировать развитие трещиноподобных дефектов в зависимости от напряжений и показателей ударной вязкости. Например, путем оценки по диаграмме трещиностойкости коэффициент интенсивности напряжений K_I связывается с вязкостью разрушения и напряжением с помощью уравнения [7, 8]:

$$K_I \leq \frac{K_{mat}}{m_{FAD}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_0} \right)^2}, \quad (2)$$

где K_{mat} — вязкость разрушения;

m_{FAD} — коэффициент запаса по трещиностойкости (коэффициент безопасности [7]);

σ_p — расчетное напряжение в конструкции.

В выражении (1) согласно [3] локальная прочность у вершины трещины определяется в зависимости от предела текучести материала уравнением вида:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{\tau}} = -\frac{\beta}{2n_{\tau}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{n_{\tau}} \right)^2 - \frac{(1+\nu^2-\nu)(\beta/n_{\tau})^2 - 1}{(1-2\nu)^2}}, \quad (3)$$

где ν — коэффициент Пуассона, функция относительной длины трещины, геометрии и условий нагружения;

n_{τ} — коэффициент запаса по пределу текучести.

Коэффициент безопасности определяется по формуле, приведенной в [3]:

$$m_{FAD} = n_{\tau} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\tau}/n_{\tau}}{\sigma_0} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_0} \right)^2}}. \quad (4)$$

Упрощенный метод определения коэффициента безопасности, предложенный в работе [7], возможно применить на практике, однако отсутствуют сведения об экспериментальном подтверждении этого метода для реальных конструкций.

Вопросам разработки силовых критериев прочности, устанавливающих влияние отрицательных температур на трещинообразование, посвящены также работы [9, 10]. Однако использование метода конечных элементов для оценки коэффициентов интенсивности напряжений в зонах локальных концентраторов [9] в вагонных конструкциях требует дополнительного изучения в связи с необходимостью правильно подобрать размер и функцию формы конечного элемента в каждой конкретной практической задаче. Наиболее простым с точки зрения практического применения выглядит вычисление методом J-интеграла с использованием ANSYS, который хорошо согласуется со многими экспериментальными методами [11].

Значительный практический интерес для оценки процесса трещинообразования в вагонных конструкциях при отрицательных температурах представляют экспериментально подтвержденные зависимости коэффициентов интенсивности напряжений K_{c^*} и K_{1c} , определенных при температуре 20 °С, которые представлены в работе [12]:

$$K_{c^*}(K_{1c}) = K_{c^*}^{20}(K_{1c}^{20}) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{q_{mp}}, \quad (5)$$

где q_{mp} — постоянная материала, определяемая экспериментально.

Коэффициенты, определенные по стандарту ГОСТ 25.506-85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [12] показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты интенсивности напряжений

Марка стали	K_{c^*} , МПа√м	K_{1c} , МПа√м
Ст3	73,3	49
09Г2С	89	60
10Г2С	84	56

Подходы к моделированию динамики развития трещин рассмотрены в работах [13, 14, 15], однако применение такого метода затруднительно ввиду сложности его использования при решении практических инженерных задач.

Таким образом, проведенный обзор показал, что влияние низких температур на развитие трещин в конструкции вагонов-платформ можно оценить методами механики разрушений по коэффициенту интенсивности напряжений.

Целью проведенных исследований было предложить метод и порядок выбора спектра вертикальных нагрузок для проведения испыта-

ний на сопротивление усталости вагонов-платформ, оценить спектр продольных нагрузок с учетом применения поглощающих аппаратов различной энергоемкости, оценив при этом влияние вертикальных и продольных нагрузок на возможность образования трещин в конструкции с учетом отрицательных температур.

Метод выбора спектра вертикальных сил, действующих на вагон-платформу

К вертикальным силам, действующим на вагон, относятся собственная сила тяжести вагона, сила тяжести груза и вертикальная динамическая нагрузка, возникающая при колебаниях вагона на рессорном подвешивании. Напряжения от массы брутто (при загрузке вагона) оценены по результатам испытаний при вертикальном динамическом воздействии и приняты равными амплитудам напряжений при динамической нагрузке, пересчитанным на величину динамической нагрузки от веса груженого кузова вагона по линейной зависимости. Нагрузка оценена по чувствительной схеме согласно стандарту ГОСТ 33788-2016 «Методы испытаний на прочность и динамические качества».

Вертикальное динамическое воздействие и величины напряжений от веса брутто вагона оценены в ходе проведенных испытаний по сбросу с клиньев. При таких испытаниях производится сброс груженого вагона с клиньев (при укладке клиньев высотой 28 мм под все колеса исследуемого вагона, установленного на рельсовой колее) и измерение динамических напряжений, возникающих в конструкции в момент сброса. Величины напряжений от веса брутто груженого вагона σ_{br} определены по формуле:

$$\sigma_{br} = \sigma_a^{sbr} / K_{dv}^{kl}, \quad (6)$$

где σ_a^{sbr} — амплитуда динамических напряжений при сбрасывании вагона с клиньев,

определяемая как полуразность экстремумов динамических напряжений;

K_{dv}^{kl} — отношение показаний (максимальное значение) чувствительной схемы вертикальной нагруженности при сбросе вагона с клиньев к показаниям при подъемке грузевого кузова над тележкой (абсолютное значение).

Затем для каждой зоны, в которой $\sigma_{br} > 0$, вычислены амплитуды $\sigma_{aэ}^{sbr}$, приведенные к симметричному циклу и эквивалентные по повреждающему воздействию полученным при сбросе циклам с учетом постоянно действующих напряжений брутто, по формуле:

$$\sigma_{aэ}^{sbr} = \sigma_a^{sbr} + \sigma_{br} \frac{\bar{\sigma}_{a,N}}{\sigma_B}, \quad (7)$$

где σ_b — предел прочности материала;

$\bar{\sigma}_{a,N}$ — среднее значение предела выносливости в контрольной зоне кузова.

В зонах, где $\sigma_{br} \leq 0$, значения $\sigma_{aэ}^{sbr}$ приняты равными σ_a^{sbr} .

Выбор спектра вертикального нагружения проводился в процессе испытаний реальной конструкции вагона-платформы с длиной по осям сцепления автосцепок 25,47 м, изготовленного из стали 09Г2С с нормируемыми показателями ударной вязкости до температуры -700°C . В контрольных зонах рамы (рис. 1) вагона-платформы и на боковой раме тележки были установлены тензорезисторы для контроля перемещений и напряжений.

В ходе испытаний по сбросу с клиньев вагон-платформа загружался по разным схемам, выбранным из учета максимального нагружения рамы вагона в разных сечениях. Первая схема — два контейнера 1ААА, вторая — четыре контейнера типоразмера 1СС, третья — один контейнер 1ААА, четвертая — два контейнера 1СС и один контейнер 1ААА (рис. 2). Масса контейнеров брутто для каждой схемы выбиралась по максимальным изгибающим моментам, действующим на раму, от вертикальных нагрузок.

Для оценки спектра продольного нагружения проведены исследования номинальной и максимальной энергоемкости поглощающих аппаратов фрикционного типа, изготовленных по российскому стандарту ГОСТ 32913-2014, заявленной номинальной энергоемкостью 70 кДж и 100 кДж. Для проведения испытаний были использованы два грузовых вагона, загруженных до максимальной массы брутто 94 т. На один вагон, стоящий в свободном незаторможенном состоянии, поочередно устанавливались испытываемые поглощающие аппараты. На второй вагон устанавливался серийно изготавливаемый поглощающий аппарат энергоемкостью 70 кДж. Испытания проводились путем соударения двух типовых грузовых вагонов. При испытаниях сила соударения вагонов контролировалась динамометрической

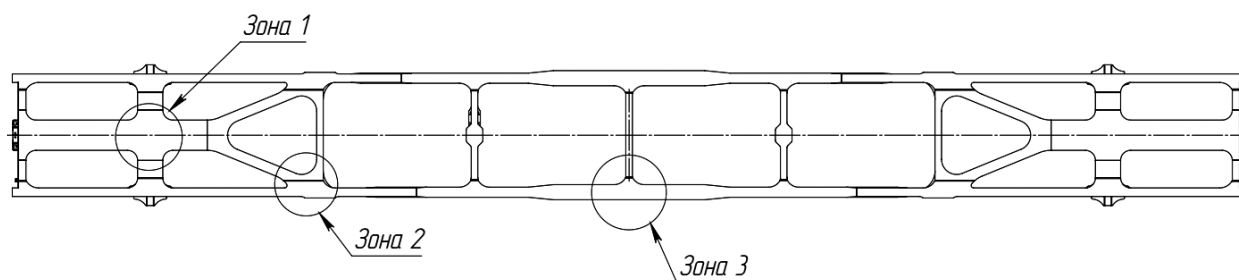


Рис. 1. Контрольные зоны рамы вагона-платформы

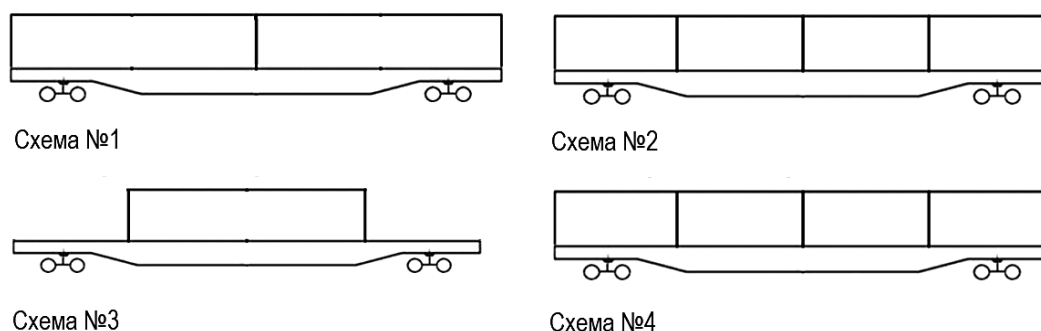


Рис. 2. Схемы нагружения вагона-платформы при сбросе с клиньев

автосцепкой, а ход поглощающего аппарата — датчиком перемещения.

Аналогичным способом (путем соударения двух вагонов) были оценены максимальные напряжения в конструкции вагона-платформы увеличенной длины при максимально допускаемой в эксплуатации скорости соударения 15 км/ч.

Максимальные значения перемещений в местах установки тензодатчиков, полученные при испытаниях по сбросу с клиньев и соударении вагонов, использовались в качестве граничных условий для оценки коэффициентов интенсивности напряжений в контролируемых зонах при действии вертикальных сил. Оценка проводилась методом конечных элементов, путем вычисления J-интеграла в широко известном программном комплексе ANSYS [11].

Значения полученных коэффициентов интенсивности напряжений по формуле (5) сравнивались с пороговыми значениями, полученными с помощью зависимости (5) для температуры -60°C , с использованием данных табл. 1.

Результаты исследований

Проведенные испытания реальных конструкций вагонов-платформ увеличенной длины показали, что, несмотря на все многообразие схем нагружения вагона, при исполь-

зовании метода оценки спектра вертикального нагружения при сбросе с клиньев возможно выбрать схему нагружения вагона, практически максимально загружающую все его сечения. Результаты показаны в табл. 3. Из нее следует, что наихудшей стала схема № 4 установки двух контейнеров 1СС, 1С, 1СХ и одного контейнера 1ААА, 1АА, 1А, 1АХ.

Результаты испытаний на соударение в рассматриваемых зонах рам вагона-платформы увеличенной длины для тех же схем представлены в табл. 4.

Определенные на основании экспериментальных данных коэффициенты интенсивности напряжений в исследуемых зонах представлены на рис. 3 и 4. Из графиков видно, что первоначальный рост трещин при пороговом значении коэффициента интенсивности напряжений для температуры -60°C в зоне 3 (рис. 1) возможен под действием вертикальных нагрузок, в то время как в зонах 1 и 2 (рис. 1) первоначальный рост трещин происходит под действием продольных нагрузок.

Результаты исследования номинальной и максимальной энергоемкостей поглощающих аппаратов фрикционного типа, изготовленных по российскому стандарту ГОСТ 32913-2014, заявленной номинальной энергоемкостью 70 кДж и 100 кДж показаны на рис. 5 и 6.

ТАБЛИЦА 3. Напряжения в исследуемых зонах рамы от вертикальных нагрузок

Схема для сброса с клиньев	Динамические напряжения в исследуемых зонах σ_{\max} (σ_{\min}), МПа		
	Зона 1	Зона 2	Зона 3
Схема № 1: два контейнера 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	18 (-15)	14 (-13)	29 (-20)
Схема № 2: четыре контейнера 1CC, 1C, 1CX	-7 (6)	15 (-20)	21 (-26)
Схема № 3: один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	-7 (2)	20 (-11)	15 (-6)
Схема № 4: два контейнера 1CC, 1C, 1CX и один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	18 (-14)	21 (-14)	33 (-22)

ТАБЛИЦА 4. Напряжения в исследуемых зонах рамы от продольных нагрузок

Схема для соударения	Динамические напряжения в исследуемых зонах σ_{\max} (σ_{\min}), МПа		
	Зона 1	Зона 2	Зона 3
Схема № 1: два контейнера 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	28 (-71)	38 (-29)	41 (-37)
Схема № 2: четыре контейнера 1CC, 1C, 1CX	32 (-84)	33 (-39)	27 (-84)
Схема № 3: один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	-10 (-58)	12 (-30)	24 (-34)
Схема № 4: два контейнера 1CC, 1C, 1CX и один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	30 (-74)	40 (-33)	43 (-39)

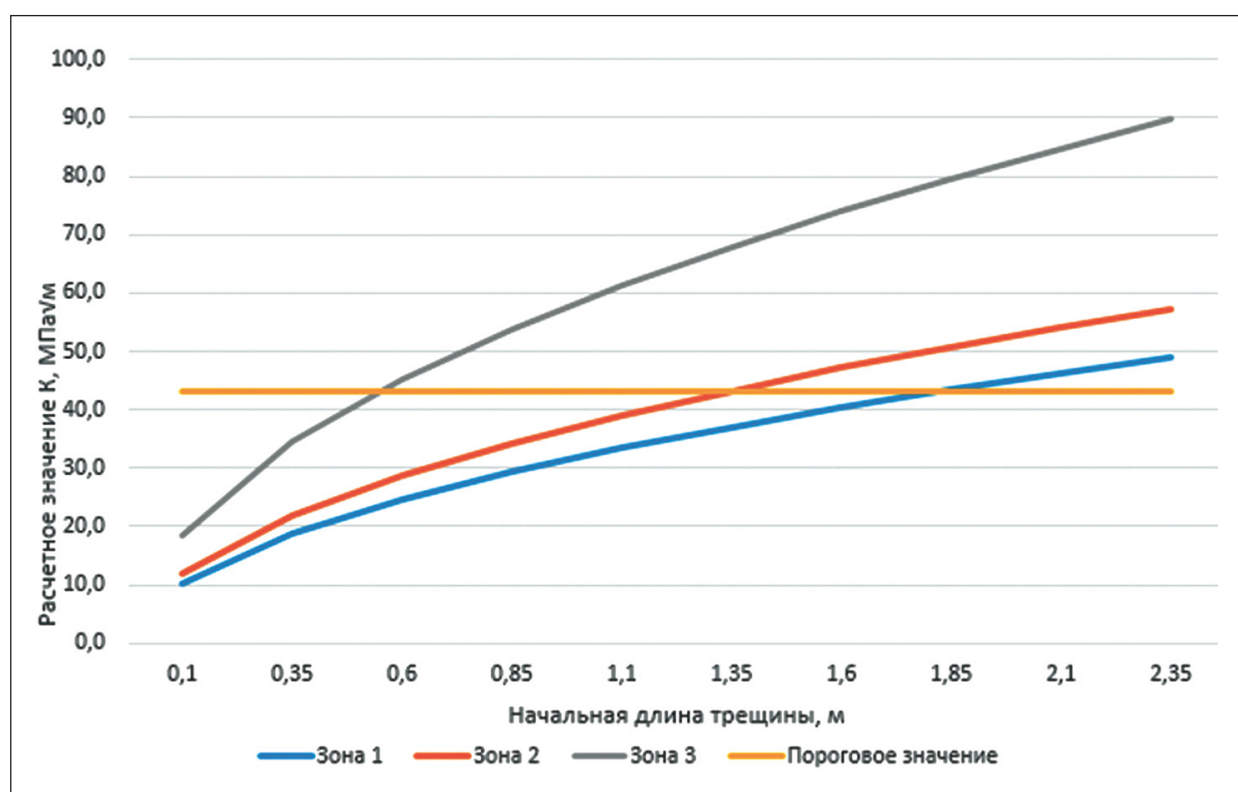


Рис. 3. График зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины при вертикальном нагружении

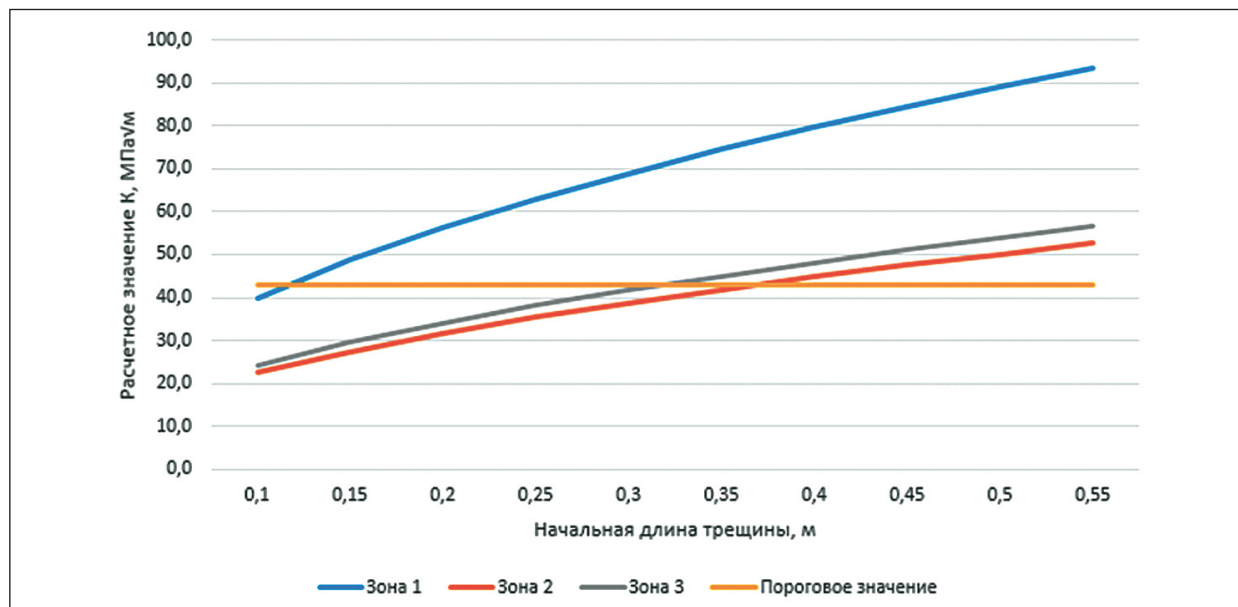


Рис. 4. График зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины при продольном нагружении

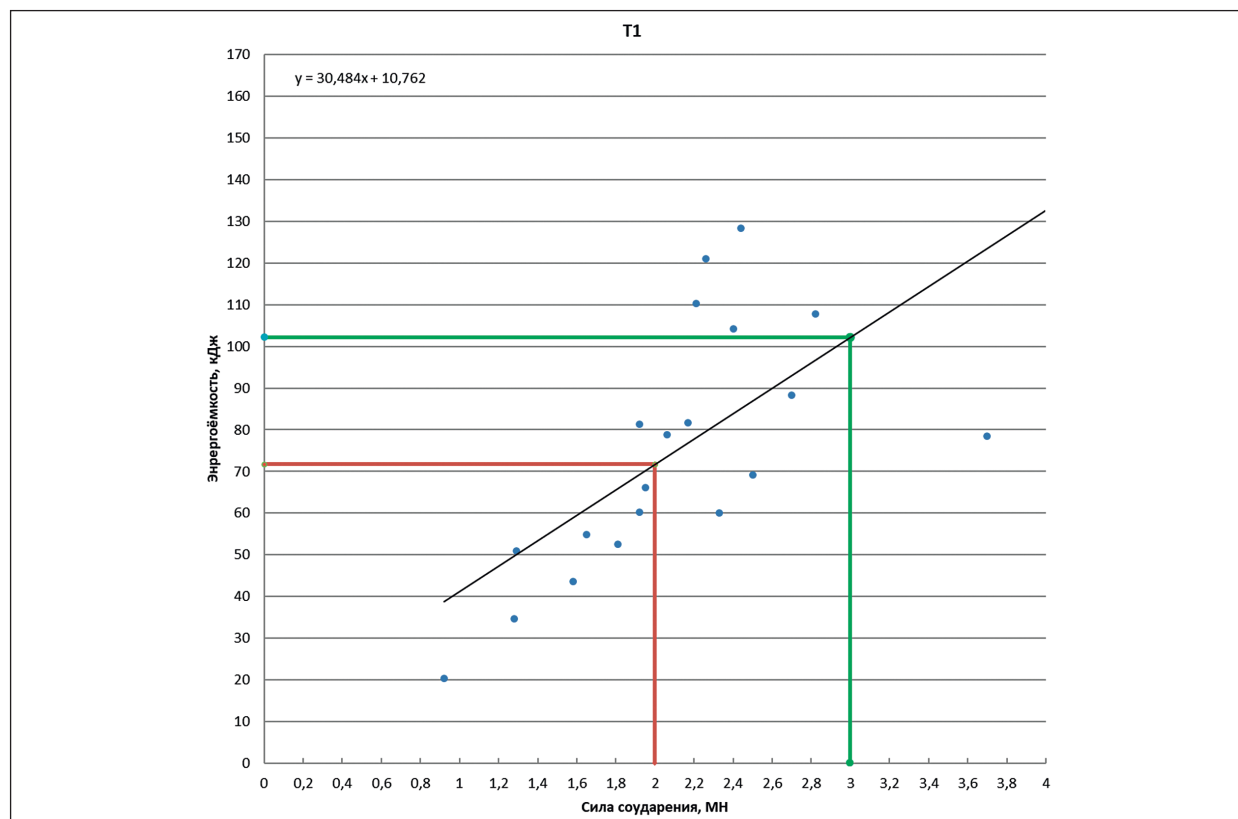


Рис. 5. Результаты испытаний поглощающего аппарата с заявленной номинальной энергоемкостью 70 кДж

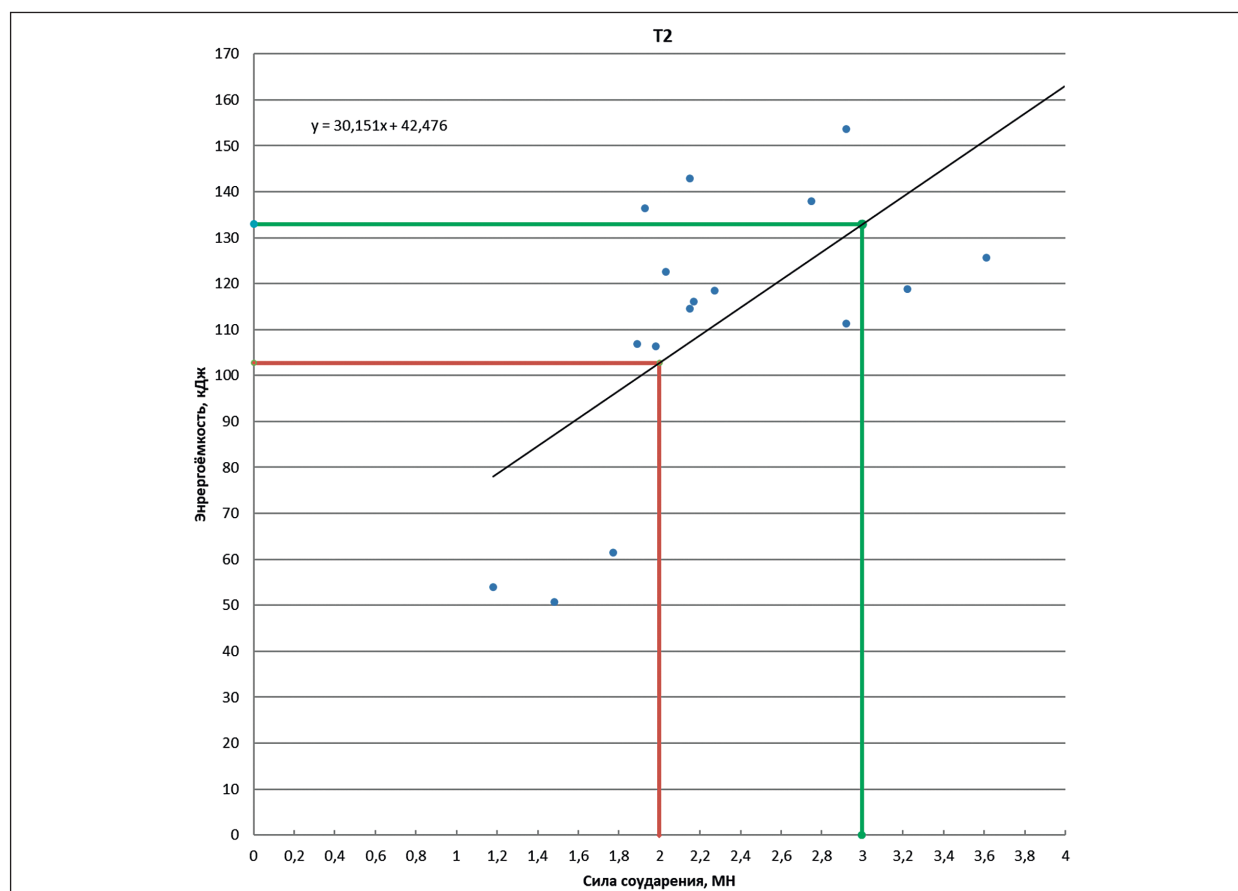


Рис. 6. Результаты испытаний поглощающего аппарата с заявленной номинальной энергоемкостью 100 кДж

Основываясь на полученных данных испытаний поглощающих аппаратов, получен фактический спектр продольного нагружения вагонов, оборудованных поглощающими аппаратами энергоемкостью более 100 кДж (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Фактический спектр продольного нагружения вагонов

Среднее значение силы в интервале, МН	Число приложений силы за 1 год	
	растягивающей	сжимающей
0,175	2540	0,126
0,42	5760	0,285
0,7	5660	0,28
0,98	3700	0,183
1,26	1554	0,077
1,54	725	0,036
1,82	202	0,0102
2,1	48	0,0024
2,38	6	0,0003

Анализ результатов

Предложенный метод оценки спектра вертикального нагружения вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров позволяет из множества разнообразных вариантов схем загрузки вагона выбрать для проведения испытаний одну, по которой максимально нагружаются все его потенциально опасные зоны.

По определенным на основании предложенного метода экстремумам напряжений в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины установлено, что в качестве схемы испытаний для экспериментальной оценки показателей сопротивления усталости при вертикальных и продольных нагрузках возможно использовать одну обоснованную схему, которая максимально нагружает все зоны вагона.

Определенные коэффициенты интенсивности напряжений, полученные на основании экспериментально определенных экстремумов напряжений, показали, что в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров возможен рост трещин при отрицательных температурах, что не согласуется с методикой оценки усталостной прочности, приведенной в ГОСТ 33211-2014.

По предложенной методике возможно установить размер допустимого трещиноподобного дефекта, исходя из условий начального роста трещины. Для реально испытанной конструкции вагона допустимая величина дефекта (начальной трещины) из условия экстремумов напряжений от вертикальных нагрузок при действии отрицательных температур составила 0,54 мм, а из условия экстремумов напряжений от действия продольных нагрузок — 0,12 мм.

Для снижения коэффициентов интенсивности напряжений в конструкциях вагонов-платформ при действии продольных нагрузок

предлагается в условиях отрицательных температур на вагонах использовать только поглощающие аппараты энергоемкостью не менее 100 кДж (класса Т2 по ГОСТ 32913-2014).

При этом условия работы поглощающих аппаратов в условиях отрицательных температур подлежат дальнейшему исследованию.

Заключение

Отдельные результаты исследований использованы при разработке специалистами ФГБОУ ВО «ПГУПС» типовой методики испытаний на сопротивление усталости вагонов-платформ увеличенной длины [16], утвержденной ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
2. Bityutsky A. A. Analysis of supporting body structure freight cars fatigue resistance estimation methods development // Research of fatigue resistance bonds and data selection of new freight cars characteristics / ed. by A. A. Bityutskiy; Railcar-building Engineering Center. Edition 7. St. Petersburg: OM-Press, 2009. P. 6–13.
3. Мыльников В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 5. С. 427–435.
4. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra / V. V. Myl'nikov [et al.] // Steel in translation. 2019. Vol. 49, No. 10. P. 678–682.
5. Беспалько С. В., Козлов М. П. Комплексный подход к оценке параметров поглощающих аппаратов автосцепного оборудования подвижного состава железных дорог // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сб. тр. по результатам междунар. интернет-конф. (Москва,

7 апреля 2020 года) / под общ. ред. К. А. Сергеева. М.: Российский университет транспорта, 2020. С. 192–195.

6. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

7. Матвиенко Ю. Г. Упрощенный вероятностный метод оценки коэффициентов запаса (безопасности) по трещиностойкости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 22–30.

8. Matvienko Yu. G. The simplified approach for estimating probabilistic safety factors in fracture mechanics // Eng. Fail. Anal. 2020. Vol. 117. Art. 104814.

9. Соколов С. А., Грачев А. А., Васильев И. А. Анализ прочности элемента конструкции с трещиной в условиях отрицательных климатических температур // Вестник машиностроения. 2019. № 11. С. 42–46.

10. Vadholm T. Investigation of low temperature toughness and crack initiation in welded structural steels. Norwegian University of Science and Technology, 2014.

11. Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: механика разрушения. Изд. 2-е, испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. 456 с.

12. Зайнуллин Р. С., Харисов Р. А., Мухаметзянов А. Н. Оценка влияния низких температур на трещиностойкость сталей, применяемых в нефтегазовой отрасли // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 116–119.

13. Ignatiev M. O., Petrov Y. V., Kazarinov N. A. Simulation of dynamic crack initiation based on the peridynamic numerical model and the incubation time criterion // Technical Physics. 2021. No. 66(3). P. 422–425.

14. Ignatev M., Kazarinov N., Petrov Y. Peridynamic modelling of the dynamic crack initiation // Procedia Structural Integrity. 2020. No. 28. P. 1650–1654.

15. Smirnov V. I. Fracture assessment diagram for solid with circular crack subjected to concentrated forces // Materials Physics and Mechanics. 2017. No. 31(1–2). P. 71–74.

16. Вагоны-платформы увеличенной длины. Типовая методика испытаний на сопротивление усталости, утв. 05.05.2023 заместителем генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» А. М. Храпцовым.

Дата поступления: 23.07.2024

Решение о публикации: 01.09.2024

Контактная информация:

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

СМИРНОВ Анатолий Николаевич — доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; smirnovnvc@mail.ru

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; dgbain@mail.ru

Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of frame elements of flat cars

L. V. Tsyganskaya¹, A. N. Smirnov¹, D. G. Bein²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² Joint Stock Company “Scientific Research Center “Vagony”, room 5N, 1st floor, litera M, 22, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Tsyganskaya L.V., Smirnov A.N., Bein D.G.* Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of frame elements of flat cars // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 787–800. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800

Abstract

Purpose: traffic safety is a priority goal for the railway industry. The existing problem of cracks periodically detected during operation in the structures of flat cars requires new approaches to the theoretical and practical assessment of the fatigue resistance and crack resistance of their structures. The problem of crack formation under low temperature conditions is of particular relevance. **Methods:** an experimental method has been developed for determining the spectrum of vertical loading of platform cars for transporting containers and the spectrum of longitudinal loads for cars operating in areas with low temperatures has been substantiated; a method for assessing crack resistance based on stress extrema determined experimentally has been proposed. The method is based on the principles of fracture mechanics, which take into account the influence of negative temperatures. **Results:** based on the stress extremes in the design of extended-length platform cars, determined on the basis of the proposed method, it was established that it is possible to use one well-founded scheme that maximally loads all zones of the car as a test scheme for experimental assessment of fatigue resistance indicators under vertical and longitudinal loads. Using the proposed method, it is possible to determine the size of an acceptable crack-like defect based on the conditions of the initial crack growth. Stress intensity factors obtained on the basis of experimentally determined stress extrema showed that in the design of flatcars of increased length for transporting containers, crack growth is possible at subzero temperatures, which is not consistent with the methodology for assessing fatigue strength of the GOST 33211-2014 standard. **Practical significance:** the proposed method for assessing the spectrum of vertical loading of flatcars of increased length for the transportation of containers allows, from a variety of options for car loading schemes, to select one scheme for testing, which maximally loads all its potentially dangerous zones. Some research results were used to develop a standard test method for fatigue resistance of extended-length flat cars.

Keywords: flat cars, fatigue resistance safety factor, crack resistance, load spectrum

References

1. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost': spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 s. (In Russian)
2. Bityutsky A.A. Analysis of supporting body structure freight cars fatigue resistance estimation methods development // Research of fatigue resistance bonds and data selection of new freight cars characteristics / ed. by A.A. Bitiutskiy; Railcar-building Engineering Center. Edition 7. St. Petersburg: OM-Press, 2009. P. 6–13.
3. Myl'nikov, V. V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnyh materialov // Nauka i tekhnika. 2019. T. 18, No. 5. S. 427–435. (In Russian)
4. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra / V. V. Myl'nikov [et al.] // Steel in Translation. 2019. Vol. 49, No. 10. P. 678–682.
5. Bepal'ko S.V., Kozlov M.P. Kompleksnyj podhod k ocenke parametrov pogloshchayushchih

apparator avtoscepnogo oborudovaniya podvizhnogo sostava zheleznih dorog // *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta: sb. tr. po rezul'tatam mezhdunar. internet-konf. (Moskva, 7 aprelya 2020 goda) / pod obshch. red. K.A. Sergeeva. M.: Rossijskij universitet transporta, 2020. S. 192–195. (In Russian)*

6. Mahutov N.A. Deformacionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstrukcij na prochnost'. M.: Mashinostroenie, 1981. 272 s. (In Russian)

7. Matvienko Yu. G. Uproshchennyj veroyatnostnyj metod ocenki koefitsientov zapasa (bezopasnosti) po treshchinostojkosti // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2021. No. 3. S. 22–30. (In Russian)*

8. Matvienko Yu.G. The simplified approach for estimating probabilistic safety factors in fracture mechanics // *Eng. Fail. Anal. 2020. Vol. 117. Art. 104814.*

9. Sokolov S.A., Grachev A.A., Vasil'ev I.A. Analiz prochnosti elementa konstrukcii s treshchinoj v usloviyah otricatel'nyh klimaticheskikh temperatur // *Vestnik mashinostroeniya. 2019. No. 11. S. 42–46. (In Russian)*

10. Vadholm T. Investigation of low temperature toughness and crack initiation in welded structural steels. Norwegian University of Science and Technology, 2014

11. Morozov E. M., Mujzemnek A. Yu., SHadskij A.S. ANSYS v rukah inzhenera: mekhanika razrusheniya. Izd. 2-e, ispr. M.: LENAND, 2010. 456 s. (In Russian)

12. Zajnullin R. S., Harisov R. A., Muhametzyanov A.N. Ocenka vliyaniya nizkikh temperatur na

treshchinostojkost' stalej, primenyaemyh v neftegazovoj otrasli // *Neftyanoe hozyajstvo. 2017. No. 10. S. 116–119. (In Russian)*

13. Ignatiev M.O., Petrov Y.V., Kazarinov N.A. Simulation of dynamic crack initiation based on the peridynamic Nnerical model and the incubation time criterion // *Technical Physics. 2021. No. 66(3). P. 422–425.*

14. Ignatev M., Kazarinov N., Petrov Y. Peridynamic modelling of the dynamic crack initiation // *Procedia Structural Integrity. 2020. No. 28. P. 1650–1654.*

15. Smirnov V. I. Fracture assessment diagram for solid with circular crack subjected to concentrated forces // *Materials Physics and Mechanics. 2017. No. 31(1–2). P. 71–74.*

16. Vagony-platformy uvelichennoj dliny. Tipovaya metodika ispytanij na soprotivlenie ustalosti, utv. 05.05.2023 zamestitelem general'nogo direktora — glavnym inzhenerom OAO «RZHD» A. M. Hramcovym. (In Russian)

Received: 23.07.2024

Accepted: 01.09.2024

Author's information:

Lyudmila.V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of Departament of Railway Cars; tcyganskaya@gmail.com

Anatolii N. SMIRNOV — Associate Professor of Departament of Railway Cars; smirnovnc@mail.ru

Dmitrii G. BEIN — PhD in Engineering, deputy chief designer; dgbain@mail.ru