

## Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.023.142

doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-31-36

### ЗОНЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ – ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Николай Николаевич Воронин<sup>1✉</sup>, Николай Николаевич Воронин<sup>2</sup>, Ольга Николаевна Бударина<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия

<sup>1</sup> profvnn@mail.ru

<sup>2</sup> vnn2@mail.ru

<sup>3</sup> black\_hold@mail.ru

#### Аннотация

Рассмотрены вопросы влияния концентраторов напряжений в несущих конструкциях подвижного состава железных дорог на их усталостную долговечность и живучесть. Установлено, что в качестве концентраторов напряжений выступают не только сварные соединения, но и зоны конструкций, получившие повреждения в эксплуатации, имеющие внутренние дефекты, либо подвергшиеся термической или механической обработке с нарушением технологии. В качестве рационального критерия повреждаемости материала целесообразно рассматривать предельную плотность энергии деформации с учетом упругопластического деформирования материала в зоне концентрации напря-

жений. Анализ повреждаемости несущих конструкций показал, что концентрация усталостных разрушений фиксируется в околошовных зонах сварных соединений. На основе проведенного анализа повреждаемости несущих конструкций подвижного состава установлена необходимость исключения зон концентрации напряжений и обеспечение непрерывного контроля и своевременного устранения неисправностей.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние (НДС), плотность, энергия, деформация, соединения, микротрещины, повреждения.

Ссылка для цитирования:

Воронин Н.Н. Зоны концентрации напряжений – причины разрушений транспортных конструкций / Н.Н. Воронин, Н.Н. Воронин, О.Н. Бударина // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 11. – С. 31-36. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-31-36.

Original article

Open Access Article

### STRESS CONCENTRATION ZONES ARE CAUSES OF TRANSPORT STRUCTURAL FAILURES

Nikolay Nikolaevich Voronin<sup>1✉</sup>, Nikolay Nikolaevich Voronin<sup>2</sup>, Olga Nikolaevna Budarina<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia

<sup>1</sup> profvnn@mail.ru

<sup>2</sup> vnn2@mail.ru

<sup>3</sup> black\_hold@mail.ru

#### Abstract

The issues of the influence of stress concentrators in load-bearing structures of railway rolling stock on their fatigue life and survivability are considered. It

is found out that not only welded joints act as stress concentrators, but also structural zones that have been damaged in operation, have internal defects or have

been subjected to thermal or mechanical treatment with breakdowns in process. It is advisable to consider the limiting energy density of deformation as a rational criterion for material damage, taking into account elastic-plastic deformation of the material in the stress concentration zone. The analysis of the damage to load-bearing structures shows that the concentration of fatigue damage is fixed in the near-weld zones of joints.

*Reference for citing:*

*Voronin NN, Voronin NN, Budarina ON. Stress concentration zones are causes of transport structural failures. Transport Engineering. 2024;11:31-36. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-31-36.*

## **Введение**

Современная концепция в оценке прочности конструкции заключается в выявлении локальных зон, ответственных за разрушение, и рассмотрении процессов, происходящих в этих зонах. Современные численные методы и вычислительные средства позволяют проводить детальный анализ процессов деформирования материала в локальных зонах. Такими локальными зонами часто являются сварные соединения, в которых после завершения процесса сварки в шве и около шовной зоны остаются высокие растягивающие напряжения. Эти напряжения часто равны или близки к пределу текучести материала. В процессе последующей эксплуатации такой конструкции на них накладываются дополнительные рабочие нагрузки, которые суммируются с остаточными напряжениями после сварки. Если данная конструкция в процессе эксплуатации, не испытывает дополнительных нагружений в данном месте, то может проработать достаточно долгий период без каких-либо изменений напря-

Based on the conducted analysis of the damage to the load-bearing structures of the rolling stock, there is a need found to exclude stress concentration zones and ensure continuous monitoring and timely troubleshooting.

**Keywords:** stress-strain state (SSS), density, energy, deformation, joints, microcracks, damages.

жённо-деформированного состояния или разрушений, а если в этой зоне происходят дополнительные циклические или значительные пластические нагружения, то в этом месте происходит накопление повреждений, приводящих в конечном итоге к появлению вначале микротрещины и последующему её развитию [1].

Проведенные численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне концентрации напряжений вагонных конструкций показали, что в них проходят значительные пластические деформации при сварочном нагреве и охлаждении в период изготовления, а к ним при эксплуатации добавляются нагрузки от перевозимого груза, которые постепенно накапливаются за счёт циклического нагружения за период эксплуатации и в этих местах зарождаются микротрещины, которые постепенно увеличиваются и могут приводить к их подрастанию и дальнейшему разрушению.

## **Анализ методов прогнозирования повреждаемости металла**

После определения НДС при упругом или упругопластическом деформировании материала в локальных зонах оценка прочности сварных соединений может быть проведена на основании линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений. Однако, в более общем виде, задача определения повреждаемости металла при упругопластическом деформировании может быть решена при использовании подходов синергетики с учетом концепции Д. Си – пре-

дельной плотности энергии деформации [2-4].

Накопление повреждений в материале можно связать со скоростью диссипации энергии в единице объема, при этом данные при одноосном растяжении можно перенести на элемент с трехосным напряженным состоянием путем учета изменения плотности энергии деформации. Решение этой задачи требует учета нелинейности повреждения локальных объемов, т.е. работу материала за пределом упругости. Таким образом, плот-

ность энергии деформации является базовым критерием для оценки локальной повреждаемости металлов и сплавов при упругопластическом деформировании.

Этот критерий контролирует зарождение устойчивых зародышей микротрещин, способных к самопроизвольному росту (рис. 1).

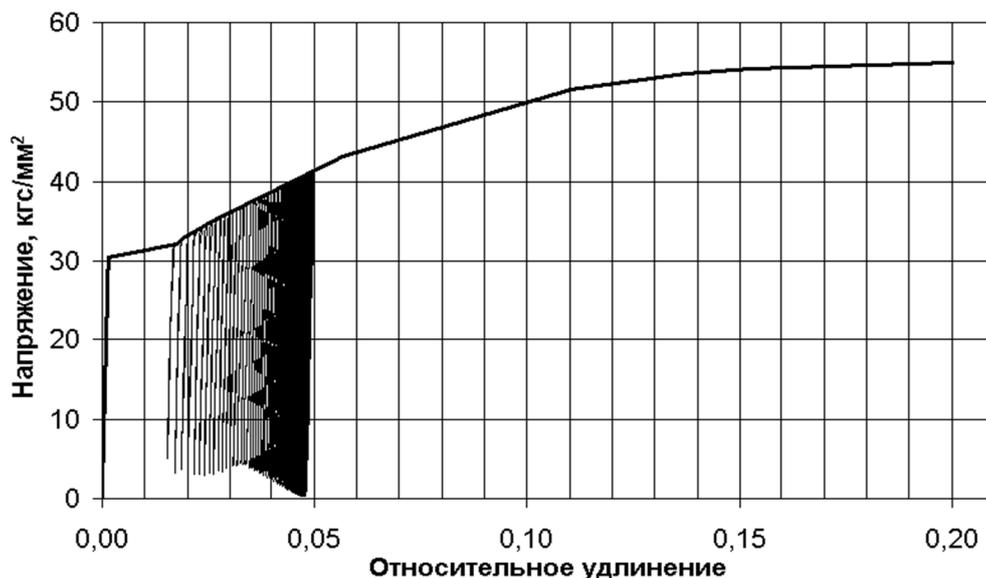


Рис. 1. Диаграмма растяжения и расчетная кривая накопления повреждаемости в зоне соединения котла цистерны с опорной лапой  
*Fig. 1. The stretching diagram and the calculated curve of damage accumulation in the boiler connection area tanks with a support foot*

В зависимости от вида концентратора напряжений, которыми могут быть не только сварные швы, но и изделия с достаточно плавными переходами, которые при эксплуатации получили даже небольшие повреждения или имеющие невидимые внутренние дефекты в виде различных включений, нарушения технологии термической или механической обработки того или иного элемента подвижного состава [5, 6]. Все эти дефекты в процессе эксплуатации постепенно увеличиваются в размерах, достигают критических размеров и приводят в начале к небольшой трещине, а затем к её увеличению и дальнейшему разрушению.

Объем перевозок по железным дорогам в настоящее время остается достаточно высоким. Проблема снижения повреждаемости основных несущих узлов, как новых, так и эксплуатируемых узлов подвижного состава весьма актуальна. Особое внимание следует уделять сварным соединениям, так как большое количество выходов вагона из строя происходит по причине разрушения именно

сварных узлов конструкции. Это связано с тем, что сварка приводит к изменениям структуры и механических свойств металла за счёт высокого нагрева. Одновременно в зонах сварных швов из-за неравномерного высокого нагрева образуются локальные зоны с высокими растягивающими напряжениями, которые суммируются с рабочими и при этом накапливаются повреждения, что снижает общую работоспособность этих элементов подвижного состава.

Анализ напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений показывает, что в них могут возникать области с пластическим деформированием материала. При повторных нагружениях этих зон происходит постепенное накопление повреждений, что приводит к появлению усталостных трещин, их подрастанию и окончательному разрушению данного элемента конструкции. Предотвращение таких отказов конструкций является актуальной задачей. Особенно важно решение этой проблемы в транспорте, где важна безопас-

ность большого количества людей и сохранности грузов [3].

Трещины, которые не допускаются по условиям безопасности движения, сохранности грузов и экологичности, возникают главным образом в сварных швах или в околошовной зоне. Это связано с тем, что при выполнении сварочных ра-

бот в сварном шве и околошовной зоны нагретых до высоких температур образуются остаточные напряжения на уровне предела текучести материала. Наличие даже незначительных повреждений в этих местах способствует развитию трещин и разрушений элементов конструкции вагона [3].

### Анализ влияния концентраторов напряжений на срок службы несущих конструкций подвижного состава железных дорог

В качестве примера можно привести интенсивное возникновение поломок боковых рам тележек грузовых вагонов, у которых срок службы свыше тридцати лет, а после некоторой модернизации технических условий изготовления – их

разрушения в проёме для крепления осей колёсных пар (буксовый узел) начались в первые годы эксплуатации. Разрушения стали возникать даже на первом году эксплуатации (рис. 2).

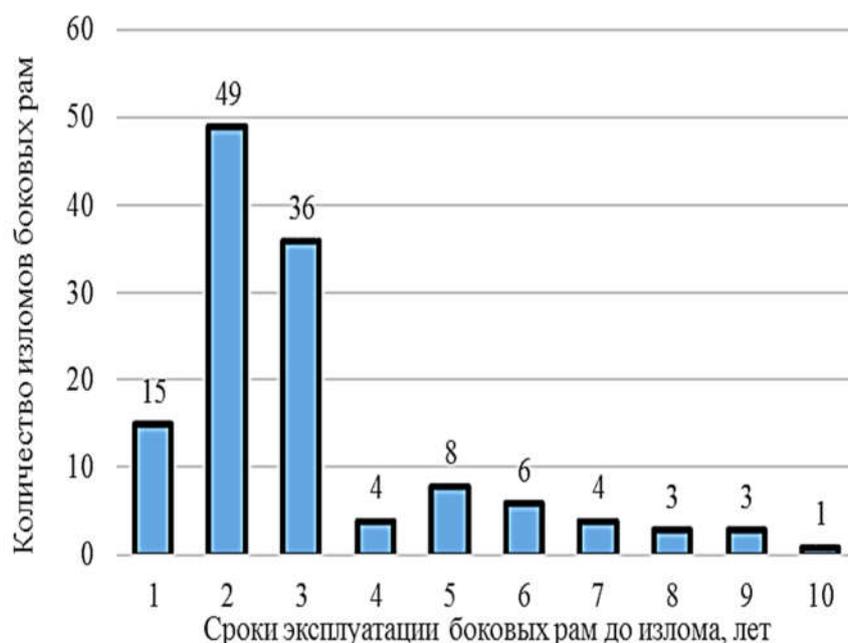


Рис. 2. Распределение количества изломов боковых рам в зависимости от срока их эксплуатации до излома за 2006 – 2016 гг.

*Fig. 2. Distribution of the number of side frame fractures depending on the period of their operation before the fracture in 2006 – 2016*

Основной причиной стали изменения стандарта, разрешающего проведение сварочных работ в большом количестве на отливках боковых рам тележек грузовых вагонов, в том числе и в местах буксовых проёмов, в которых категорически ранее было запрещено выполнять какие-либо сварочные работы [8, 9]. Возникающие ударные нагрузки на колесо при движении состава передавались на боковую раму в зону сварного шва зава-

ренных дефектов и суммировались с остаточными напряжениями от этих сварных швов, что повышало напряжения в этой опасной зоне. Далее в этой зоне образовывалась микротрещина, подрастала до критического размера и распространялась на всё поперечное сечение.

Но в другом примере сварка, наоборот, помогла существенно продлить срок службы грузовых полувагонов, когда у

них в нижней части крепления к раме стали разрушаться сложные сварные соединения. Для этой цели была разработана достаточно простая методика усиления мест крепления стоек с помощью ду-

говых точечных соединений с использованием сварки.

Отсюда вытекает необходимость исключения зон концентрации напряжений, постоянного контроля и своевременного устранения неисправностей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Винокуров, В.А. Концентрация напряжений в соединениях с лобовыми швами и ее учет в расчетах на выносливость / В.А. Винокуров, В.В. Аладинский, В.А. Дубровский / Автомат. сварка. 1987. № 7. С. 18-23.
2. Sih, G.C. Mechanics and physics of energy density theory / G.C. Sih // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1985. v.4. - 3. p. 157-173.
3. Тутышкин, Н. Д. Тензорная теория деформационной повреждаемости / Н. Д. Тутышкин, В. Ю. Травин // Чебышевский сборник. 2022. Т. 23, № 5(86). С. 320-336.
4. Журавлев, Г. М. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов / Г. М. Журавлев, А. Е. Гвоздев. Тула : Тульский государственный университет, 2014. 114 с.
5. Voronin, N. N. The influence of technological parameters on the thermal cycle at butt flash welding of rails / N. N. Voronin, N. B. Sey-

- dakhmetov, V. A. Rezanov // Welding International. 2019. Vol. 33, No. 7-9. P. 327-333.
6. Воронин, Н. Н. Влияние технологических параметров на термический цикл при стыковой контактной сварке рельсов / Н. Н. Воронин, В. А. Резанов, Н. Б. Сейдахметов // Сварочное производство. 2019. № 11. С. 21-28.
7. Воронин, Н.Н. Оценка ресурса сварных узлов в ответственных конструкциях / Н.Н. Воронин. // Металлы. 2002 № 2. С. 86-93.
8. Воронин, Н.Н. Основные причины излома боковых рам тележек грузовых вагонов / Воронин Н.Н., Воронин Н.Н., Бударина О.Н. // Технология машиностроения. 2018 № 4. С. 34-37.
9. ГОСТ 32.183-2013 Межгосударственный стандарт. Рама боковая и балка наддресорная литых тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. Москва : Стандартиформ, 2014, 50 с.

## REFERENCES

1. Vinokurov VA, Aladinsky VV, Dubrovsky VA. Stress concentration in joints with frontal seams and its accounting in endurance calculations. Automatic Welding. 1987;7:18-23.
2. Sih GC. Mechanics and physics of energy density theory. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1985;4(3):157-173.
3. Tutyshkin ND, Travin VYu. Tensor theory of deformation damage. Chebyshevsky Collection. 2022; 23(5(86)):320-336.
4. Zhuravlev GM, Gvozdev AE. Plastic dilatancy and deformation damage of metals and alloys. Tula: Tula State University; 2014.
5. Voronin NN, Seydakhmetov NB, Rezanov VA. The influence of technological parameters on the

- thermal cycle at butt flash welding of rails. Welding International. 2019;33(7-9):327-333.
6. Voronin NN, Rezanov VA, Seydakhmetov NB. The influence of technological parameters on the thermal cycle during butt resistance welding of rails. Welding Production. 2019;11:21-28.
7. Voronin NN. Resource assessment of welded joints in critical structures. Metals. 2002;2:86-93.
8. Voronin NN, Voronin NN, Budarina ON. The main reasons for the fracture of the side frames of freight car bogies. Tekhnologiya Mashinostroeniya. 2018;4:34-37.
9. GOST 32.183-2013 Molded side frame and bolster beam of bogies for railway freight wagons. Specifications. Moscow: Standartinform; 2014.

## Информация об авторах:

**Воронин Николай Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта, тел. +7 (495) 274 02 74 доб. 3348.

**Воронин Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техно-

логия транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта, тел. +7(495)274 02 74 доб.3348.

**Бударина Ольга Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновациями на транспорте» Российского университета транспорта, тел. + 7(495) 274 02 74 доб. 3731.

**Voronin Nikolay Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Rolling Stock Repair at Russian University of Transport, phone: +7(495)274 02 74 ext.3348.

**Voronin Nikolay Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and

Rolling Stock Repair at Russian University of Transport, phone: +7(495)274 02 74 ext.3348.

**Budarina Olga Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation Management in Transport, phone: + 7(495) 274 02 74 ext.3731.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 02.10.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 28.10.2024. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 02.10.2024; approved after review on 24.10.2024; accepted for publication on 28.10.2024. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**