

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.021

doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-35-40

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА В МЕСТАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

Николай Николаевич Воронин^{1✉}, Николай Николаевич Воронин², Ольга Николаевна Бударина³

^{1,2,3} Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ profvnn@mail.ru

² vnn2@mail.ru

³ black_hold@mail.ru

Аннотация

Усовершенствована методика, учитывающая величины пластических деформаций в зоне, расположенной в непосредственной близости к концентратору напряжений, что в свою очередь позволяет определить как количество циклов до старта трещины, так и ее направление.

Ключевые слова: концентратор, напряжение, плотность, энергия, деформация, соединения, микротрещина, напряженно-деформированное состояние.

Ссылка для цитирования:

Воронин Н.Н. Методика оценки ресурса в местах концентрации напряжений при эксплуатации конструкции / Н.Н. Воронин, Н.Н. Воронин, О.Н. Бударина // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 08. – С. 35-40. doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-35-40.

Original article

Open Access Article

TECHNIQUE TO ASSESS THE RESOURCE IN PLACES OF STRESS CONCENTRATION DURING STRUCTURE USE

Nikolay Nikolaevich Voronin^{1✉}, Nikolay Nikolaevich Voronin², Olga Nikolaevna Budarina³

^{1,2,3} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ profvnn@mail.ru

² vnn2@mail.ru

³ black_hold@mail.ru

Abstract

A technique has been improved that takes into account the value of plastic deformations in the zone located in the immediate vicinity to the stress concen-

trator, which in turn allows determining both the number of cycles before the crack starts and its direction.

Keywords: concentrator, stress, density, energy, deformation, joints, microcrack, stress-strain state.

Reference for citing:

Voronin NN, Voronin NN, Budarina ON. Technique to assess the resource in places of stress concentration during structure use. Transport Engineering. 2023; 8: 35-40. doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-35-40.

Методика исследования

Сварные несущие конструкции подвижного состава железных дорог в большинстве случаев работают в сложных климатических условиях при высо-

ких и низких температурах окружающей среды, разной степени загрузки, воздействия эксплуатационных нагрузок и других внешних факторов. При этом сниже-

ние их повреждаемости является актуальной задачей, в том числе с учетом возможности перевозки пассажиров и опасных грузов. Современные вагоны изготавливаются с большим количеством сварных швов, которые, как правило, уже сразу после изготовления получают остаточные сварочные напряжения на уровне предела текучести материала. Помимо сварных швов возможны и другие дефекты в различных других местах. Дополнительные эксплуатационные нагрузки в виде перевозимого груза, резких торможений, разгонов и других воздействий создают дополнительные нагружения в уже нагруженных местах.

В связи с этим предлагается для оценки возможности зарождения и последующего развития трещины в том или ином месте конструкции проводить подробный анализ по накопления повреждаемости. Для этого может быть использована нелинейная механика разрушения, которая учитывает поэтапное накопление повреждаемости в различных опасных местах исследуемой конструкции. В первую очередь такими узлами являются сварные соединения различных элементов конструкции и другие места, в которых имеются те или иные концентраторы напряжений, в виде различных дефектов самого металла или других поверхностных повреждений. Повреждаемость металла в данных местах может оцениваться с учетом его упругопластического деформирования и использования синергетического подхода предельной плотности энергии деформации (W_C) [1-3].

Данная методика была проверена и сопоставлена с экспериментальными данными на лабораторных образцах, а далее на отдельных узлах полувагона, испытанных на специальном стенде и, наконец, на самих полувагонах при поездных испытаниях.

Предлагаемая методика на стадии проектирования позволяет учесть влияние основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, имеющих различные концентраторы напряжений в виде резких переходов одной по-

верхности к другой, наличие сварных швов, грубой обработки поверхности, а также наличия других дефектов.

При проведении прочностных расчетов проводится расчет всей конструкции, на которую будут воздействовать все возможные нагрузки, при её последующей эксплуатации. При этом оценивается общее напряженное состояние всех элементов и для них подбираются наиболее подходящие профили поперечного сечения и их толщины. Далее назначаются технологические процессы по их соединению: разъёмные и неразъёмные. В качестве неразъёмных соединений могут быть: заклёпочные, паянные и сварные.

При использовании сварки происходит нагрев и расплавление металла на участках, прилегающих к зонам соединения этих элементов и расплавление присадочных материалов, но при последующем охлаждении в этих местах и в самом сварном шве и околошовной зоне образуются остаточные напряжения на уровне предела текучести материала. В большинстве случаев работы по их снижению не проводятся, но при последующих эксплуатационных нагрузках происходит накопление дополнительных пластических деформаций, которые постепенно приближаются к критическим значениям и при этом возникают микротрещины [4-6].

В вершине микротрещины в свою очередь образуется концентратор напряжений, в котором постепенно накапливаются пластические деформации до критического уровня и после этого происходит её подрастание. На начальном этапе такие подрастания идут достаточно медленно, если металл имеет высокую пластичность, но по мере подрастания трещины скорость её роста увеличивается, а достигнув критического размера, остальной участок разрушается мгновенно. Такой момент получил название, точка бифуркации, которая отвечает за переход деформируемого тела к неустойчивости пластической деформации. При этом меняется механизм диссипации энергии и тем самым механизм накопления повреждений. До достижения данной точки повреждаемость вызвана эффектами дилатации кристаллической

решетки путем накопления критической плотности дислокаций в локальных объемах. При переходе через точку бифуркации повреждаемость связана с эффектами дисторсии, за счет накопления несплошностей в областях с критической плотностью дислокаций. Тогда в качестве критерия плотности энергии деформации может быть принята повреждаемость металлов при их деформировании

$$W \leq W_C, \quad (1)$$

где W , W_C – текущая и предельная плотность энергии деформации.

В [1] предложена нелинейная теория повреждаемости, основанная на функции плотности энергии деформации. Величина W_C является постоянной материала и мо-

жет быть использована в качестве энергетического критерия локальной прочности, контролирующего возникновение устойчивых зародышей микротрещин, способных к самопроизвольному росту. Данное свойство критерия W_C делает его удобным для оценки прочности в локальных объемах металла с использованием метода конечных элементов, а также позволяет устанавливать взаимосвязь между свойствами материала и напряженно-деформированным состоянием объекта.

Критическую плотность энергии деформации, а также приращения плотности энергии деформации можно представить в виде двух составляющих:

$$(dW / dV)_C = (dW / dV)_{Cd} + (dW / dV)_{Cv}, \quad (2)$$

дисторсия (изменению формы) и дилатация (изменения объема). Тогда указанные составляющие плотности энергии деформации можно описать через нормальные и касательные октаэдрические напряжения в упругой и упругопластической областях:

$$(dW / dV)_v = f(\sigma_{окт}); \quad (3)$$

$$(dW / dV)_d = f(\tau_{окт}), \quad (4)$$

где $\sigma_{окт}$, $\tau_{окт}$ – октаэдрические нормальные и касательные напряжения.

Плотность энергии деформации является интегральной характеристикой, учитывающей поврежденность как в макро-, так и в микрообъемах.

При этом деформирование любой сварной несущей конструкции можно представить как эмиссию в нее энергии, расходуемой в дальнейшем на ее деформацию. Учитывая конструктивные особенности реальной несущей системы, указанная энергия распределяется по объему неравномерно концентрируясь в определенных областях -концентраторах напряжений. В связи с этим при решении задачи оценки несущей способности конструкции на стадии проектирования целесообразно оценивать напряженно-деформированное состояние в зоне концентрации напряжений с последующим расчетом величины плотности энергии деформации. Критерием прочности конструкции будет являться не

достижение критического значения плотности энергии деформации.

Критическая плотность энергии деформации определяется площадью под кривой диаграммы растяжения в координатах «истинное напряжение-истинная деформация» [7]. Величина предельной энергии деформации, достаточной для разрушения локального объема материала, не зависит от условий достижения пределов пластичности, в связи с тем, что предельная энергия деформации константой материала, определяемой прочностью межатомной связи в конкретных условиях.

В вершине трещиноподобного дефекта при нагружении конструкции возникают как упругие, так и пластические деформации, что требует расчета приращений плотности энергии деформации в рамках обобщенной зависимости. Традиционно несущие конструкции подвижного состава эксплуатируются в условиях отсутствия резких изменений температуры (ΔT) и концентрации среды (ΔC). Тогда $f(\Delta T, \Delta C)$ можно считать равной нулю и записать выражение для плотности энергии деформации в виде:

$$dW / dV = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}. \quad (5)$$

Плотность энергии деформации может быть описана тензорами напряжений и

деформаций рассчитанным в ортогональных координатах или на основе трех главных напряжений и деформаций. При решении упругопластических задач численными методами в большинстве случаев пользуются идеальной упругопластической диаграммой, либо диаграммой с линейным упрочнением. Замена диаграммы растяжения в координатах "истинное напряжение - истинная деформация" на диаграммы для идеального упругопластического деформирования материала или диаграмму с упрочнением возможна лишь при условии равенства их площадей под кривыми, т. е. равенства критических значений плотности энергии деформации (W_C).

Примеры применения методики

Апробация предложенных в работе алгоритма и программы расчета плотности энергии деформации в зоне концентрации напряжений трещиноподобного дефекта выполнена на моделях типовых сварных

Поскольку величина W_C не зависит от вида нагружения начало роста трещины происходит при достижении в зоне концентрации критического значения плотности энергии деформации (при условии монотонного нагружения). При циклическом нагружении плотность энергии деформации суммируется на каждом цикле, достигшем пластической деформации у вершины дефекта. При достижении критического значения происходит разрушение, это условие может быть записано в виде:

$$W_C = W_{ynp} + \sum_{j=1}^{\Delta N} (\Delta W_{nl})_j, \quad (6)$$

где (ΔN) – количество циклов, за которое произошло разрушение.

соединений несущих конструкций подвижного состава железных дорог. В частности, рассмотрены стыковые, нахлесточные, тавровые и угловые сварные соединения (рисунок).

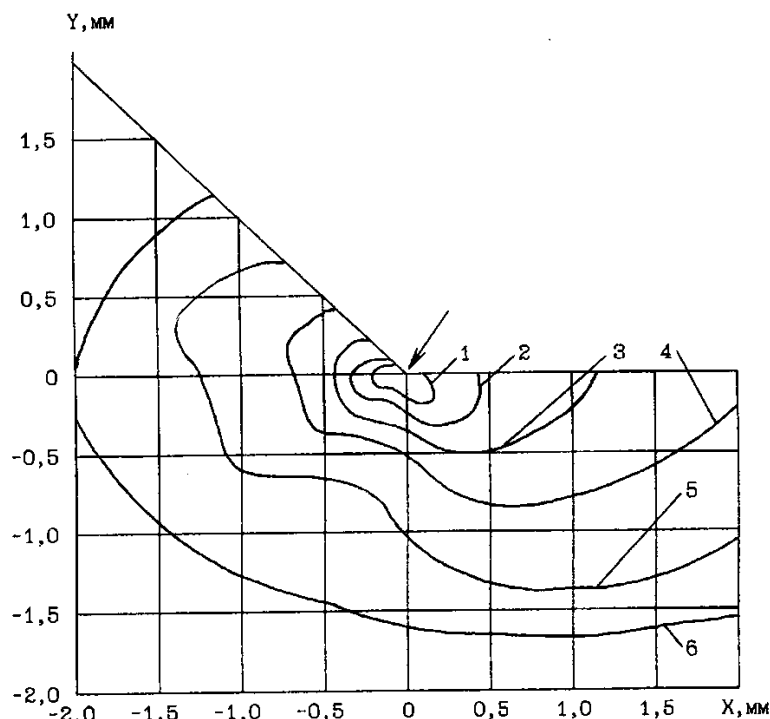


Рис. Пример распределения изолиний при аккумуляции плотности энергии деформации в зоне концентрации:
1 – 0,03 МДж/м³; 2 – 0,02 МДж/м³; 3 – 0,015 МДж/м³;
4 – 0,01 МДж/м³; 5 – 0,006 МДж/м³; 6 – 0,004 МДж/м³

Fig. An example of the distribution of isolines during the accumulation of strain energy density in the concentration zone:
1 – 0.03 MJ/m³; 2 – 0.02 MJ/m³; 3 – 0.015 MJ/m³;
4 – 0.01 MJ/m³; 5 – 0.006 MJ/m³; 6 – 0.004 MJ/m³

Для наиболее распространенных несущих конструкций подвижного состава, изготовленных из стали 09Г2С, были про-

ведены усталостные испытания, которые позволили определить пределы выносливости таких соединений [8, 9].

Заключение

Таким образом в рамках предложенной методики существует возможность оценить количество циклов до начала старта трещины, величину шага ее подрастания и направление старта роста трещины на основе данных о плотности энергии деформации в зоне концентраторов напряжений. В отличие от традиционных подходов, описанная в статье синергетическая концепция повреждаемости металла и

трещиностойкости, обеспечивает возможность учета величины пластических деформаций непосредственно в областях концентрации напряжений. В отличие от изложенных ранее подходов вычисления приращения плотности энергии деформации [10] в методике предусмотрен дополнительный блок, позволяющий рассчитать величины пластических деформаций в зонах концентрации напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sih, G.C. Mechanics and physics of energy density theory // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1985. v. 4. № 3. D. 157-173.
2. Z. Li, P. La, J. Sheng, Y. Shi, X. Zhou, Q. Meng Outstanding synergy of superior strength and ductility in heterogeneous structural 1045 carbon steel Met Mater Int, 27 (2021), pp. 2562-2574.
3. Kim, Rae Eon & Gu, Gang & Kwon, Hyeonseok & Ahn, Soung Yeoul & Kwon, Jihye & Lee, Jeong & Choi, Yeon & Seo, Min & Kim, Hyoung. (2022). Role of synergistic hardening and damage evolution on the stretchability of Al1050/Steel/Al1050 sheets. Journal of Materials Research and Technology. 21. 10.1016/j.jmrt.2022.10.143.
4. Sun, D. & Swift, K. & Paulls, A.. (2007). Stress Concentrations Optimisation Process for Engineering Structures. The International Journal of Multiphysics. 1. 175-187. 10.1260/175095407781421612.
5. Carl T. F. Ross, The late John Case, A. Chilver Strength of Materials and Structures. Elsevier, 1999. 720 p.

6. Liu, T.JC. (2014). Strain Energy Density Factor. In: Hetnarski, R.B. (eds) Encyclopedia of Thermal Stresses. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_656.
7. Czoboly, E. In: Proc. of Symp. on Absorbed Spec. Energy-strain energy density criterion / I. Havas, F. Gillemot / Budapest: Academ. kiado, 1982. D.107-129.
8. Воронин, Н.Н. Оценка работоспособности сварных соединений стоек полувагонов / Н. Н. Воронин, В.М. Скляр. – Текст : непосредственный // Сб. науч. трудов к 100-летию МИИТ. – Москва : МИИТ, 1996. Вып. 903. С. 54 -57.
9. Воронин, Н. Н. Оценка ресурса сварных узлов в ответственных конструкциях / Н.Н. Воронин. – Текст : непосредственный // «Металлы». 2002 № 2. С.86-93.
10. Иванова, В. С. Количественная фрактография. Усталостное разрушение / В. С. Иванова, А.А. Шаняевский // Металлургия, Челябинское отделение. Челябинск : 1988. 400 с. Текст : непосредственный.

REFERENCES

1. Sih GC. Mechanics and physics of energy density theory. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1985;4(3):157-173.
2. Li Z, La P, Sheng J, Shi Y, Zhou X, Meng Q. Outstanding synergy of superior strength and ductility in heterogeneous structural 1045 carbon steel. Met Mater Int. 2021;27:2562-2574.
3. Kim, Rae Eon Gu, Gang Kwon, Hyeonseok Ahn, Soung Yeoul Kwon, Jihye Lee, Jeong Choi, Yeon Seo, Min Kim, Hyoung. Role of synergistic hardening and damage evolution on the stretchability of Al1050/Steel/Al1050 sheets. Journal of Materials Research and Technology. 2022;21. 10.1016/j.jmrt.2022.10.143.
4. Sun D Swift, Paulls KA. Stress Concentrations Optimisation Process for Engineering Structures.

- The International Journal of Multiphysics. 2007;1:175-187. 10.1260/175095407781421612.
5. Carl TF, Ross. The late John Case, A. Chilver Strength of Materials and Structures. Elsevier; 1999.
6. Liu TJC. Strain Energy Density Factor. In: Hetnarski RB, editor. Encyclopedia of Thermal Stresses. Springer, Dordrecht. Available from: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_656.
7. Czoboly E. In: Proc. of Symp. on Absorbed Spec. Energy-strain energy density criterion. Budapest: Academ. Kiado; 1982.
8. Voronin NN, Sklyarov VM. Evaluation of welded joints operability of gondola car racks. Collection of Scientific Papers for the 100th anniversary of MIIT; Moscow: MIIT; 1996.

9. Voronin NN. Evaluation of the resource of welded joints in critical structures. Metals. 2002;2:86-93.

10. Ivanova VS, Shanyavsky AA. Quantitative fractography. Fatigue destruction. Chelyabinsk; 1988.

Информация об авторах:

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

Воронин Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта по-

движного состава» Российского университета транспорта, e-mail: vnn2@mail.ru, тел. +7(495)274-02-74 доб.3348.

Бударина Ольга Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновациями на транспорте» Российского университета транспорта, e-mail: black_hold@mail.ru, тел. + 7(495) 274-02-74 доб.3731.

Voronin Nikolay Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Rolling Stock Repair at Russian University of Transport, e-mail: profvnn@mail.ru, 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: e-mail: vnn2@mail.ru, 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, e-mail: black_hold@mail.ru, phone: +7(495)274-02-74 ext.3348.

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 12.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 27.07.2023. Рецензент – Болдырев А.П., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 12.07.2023; approved after review on 17.07.2023; accepted for publication on 27.07.2023. The reviewer is Boldyrev A.P., Doctor of Technical Sciences, Professor of Bryansk State Technical University.