

О МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕЁ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ НА ПРИМЕРЕ КОЛЕСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

Зеньков Е.В.

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

Ключевые слова: конструкционная прочность, жесткость напряженно-деформированного состояния, метод конечных элементов.

Аннотация. Рассматриваются особенности численного конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) материала конструкции на примере железнодорожного колеса подвижного состава железных дорог с плоскоконической формой диска по ГОСТ 10791-2011. Граничные условия закрепления и нагружения, принятые при моделировании упругого деформирования материала колеса, соответствуют движению вагона в криволинейном участке пути. Результаты анализа конечно-элементного моделирования показали, что в приободной зоне с внешней стороны колеса достаточно высокий уровень интенсивности напряжений и НДС более «жесткое», чем в приступичной зоне, что влияет на ресурс конструкционной прочности.

ON MODELING OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF A STRUCTURE MATERIAL FOR ESTIMATING ITS STRUCTURAL STRENGTH ON THE EXAMPLE OF A RAILWAY CARRIAGE WHEEL

Zenkov E.V.

Irkutsk State Transport University, Irkutsk

Keywords: structural strength, stiffness of the stress-strain state, finite element method.

Abstract. The features of the numerical finite element modeling of the stress-strain state (SSS) of the material of construction are considered on the example of a railway wheel of a rolling stock of railways with a flat-conical disk shape in accordance with GOST 10791-2011. The boundary conditions for fixing and loading, adopted when modeling the elastic deformation of the wheel material, correspond to the movement of the car in a curved section of the track. The results of the analysis of finite element modeling showed that in the edge zone on the outer side of the wheel, a sufficiently high level of stress intensity and SSS is more "stiff" than in the edge zone, which affects the structural strength resource.

Расчётная оценка надежности узлов и деталей механизмов может быть обеспечена при наличии достоверных экспериментальных сведений о прочности их элементов. При этом, ресурс работы указанных элементов зависит от «жесткости» напряженно-деформированного состояния (НДС) в возможном очаге их разрушения [1-3]. Величина «жесткости» НДС характеризуется коэффициентом Π , равный отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму и являющийся инвариантной

характеристикой НДС – её большим значениям соответствует (по терминологии Г.А. Смирнова-Аляева [4, 5]) более «жесткий» вид НДС, а её меньшим значениям – более «мягкий» вид НДС. Помимо физической инвариантности, особенностью и, одновременно, преимуществом коэффициента II , является его зависимость от всех трех главных напряжений в очаге возможного разрушения. По данным работ [3-5] параметр II существенно влияет на появление и развитие дефектов в материале конструкций, причём с уменьшением величины II в условиях статического и циклического нагружения пластичность и ресурс работы материала увеличивается.

На стадии лабораторных испытаний повышение точности в определении прочностных характеристик материала конструкции должно осуществляться за счет проведения испытаний специальных лабораторных образцов, позволяющих моделировать необходимую жесткость НДС зоны исследуемой конструкции. Предложенная в связи с этим расчетно-экспериментальная методика [4], позволяет реализовать механизм определения у рассматриваемой конструкции уточненных прочностных характеристик за счет разрушения в лабораторных условиях специальных образцов, имеющих в очаге их разрушения жесткость НДС, что и в очаге возможного разрушения рассматриваемой конструкции, с помощью типовой одноприводной испытательной машины.

Для обеспечения получения достоверных экспериментальных сведений о разрушении материала специальных образцов, моделирующих жесткость НДС оцениваемой конструкции, необходимо определять значения жесткости НДС этой конструкции с достаточной точностью и достоверностью с учетом действующих эксплуатационных нагрузок. Рассмотрим методику моделирования НДС на примере деформирования материала колеса железнодорожного вагона с плоскоконической формой диска по ГОСТ 10791-2011.

Характерной особенностью НДС цельнокатаных колёс железнодорожных вагонов является высокий уровень напряжений сжатия. В процессе эксплуатации в ряде случаев возникают усталостные трещины, располагающиеся в зоне стыка массивных элементов колеса (обода, ступицы) с его относительно тонкой дисковой частью.

Основной вклад в деформирование колеса в процессе эксплуатации, вносит вес вагона. В этой связи рассматриваются вертикальные статические усилия, определяемые допускаемой осевой нагрузкой на колёсную пару вагона. Для полноты моделирования нагрузок на колесо были приняты и горизонтальные поперечные для направления движения силы реакции, возникающие в кривом участке пути, характерного для Иркутского полигона железной дороги.

Анализ жесткости НДС колеса осуществлён численно путем использования уравнений теории упругости, решение которых определялось с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для достижения приемлемой

инженерной точности расчёта критериальных характеристик, прежде всего, компонент главных напряжений и интенсивности напряжений в очагах возможного разрушения создана дискретная объёмная конечно-элементная модель колеса по методике [6], обеспечивая при этом относительную погрешность моделирования эквивалентных напряжений, не превышающую 5%. При этом при расчете принимались следующие значения физических характеристик материала колеса: модуль упругости (E) – $2,06 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига (G) – $0,79 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент поперечной деформации (ν) – 0,3; плотность (ρ) – 7850 кг/м³.

Граничные условия закрепления в виде ограничений на степени свободы в координатных направлениях были наложены на внутреннюю поверхность ступицы колеса (рис. 1,а). В качестве нагрузок на колесо были приняты горизонтальные поперечные для направления движения силы реакции, возникающие в кривом участке пути, схематически представленные на рисунке 1,б. Указанные силы приложены к внутренней поверхности гребня колеса в его нижней части (см. рис. 1,б). К поверхности катания колеса приложено вертикальное статическое усилие, определяемое допускаемой осевой нагрузкой на колёсную пару (см. рис. 1,б). Принятые значения нагрузок на колесо приложены в виде сил, определенных по формулам вероятностного метода расчета прочности оси колесной пары [7].

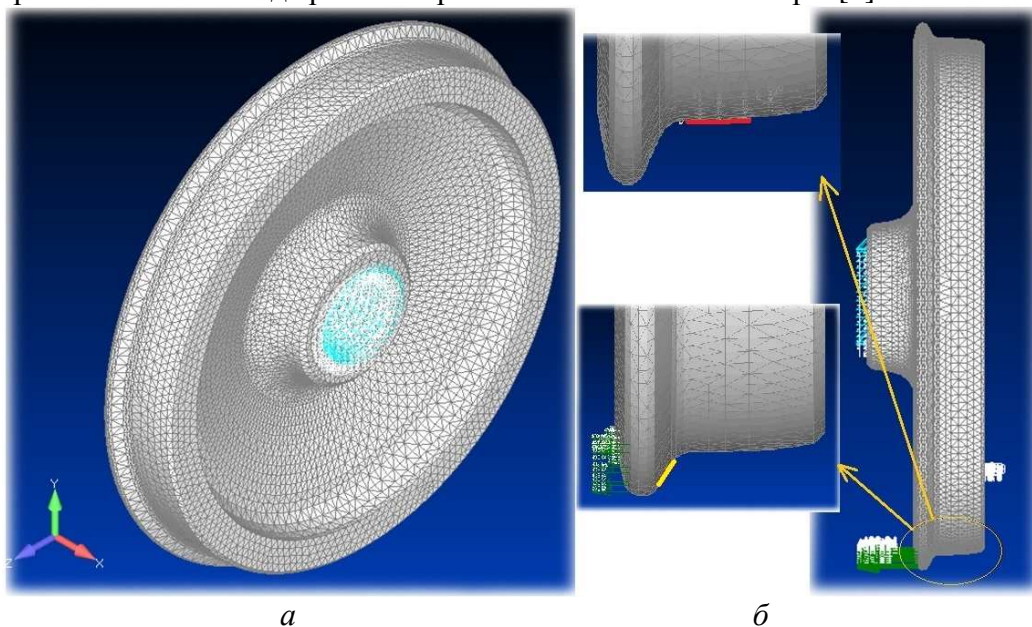


Рис. 1. Граничные условия для расчета НДС цельнокатаного колеса:
а – условия закрепления, б – условия нагружения

Результаты анализа конечно-элементного моделирования деформирования колеса от расчетной нагрузки представлены на рисунке 2 в виде распределения полей эквивалентных напряжений.

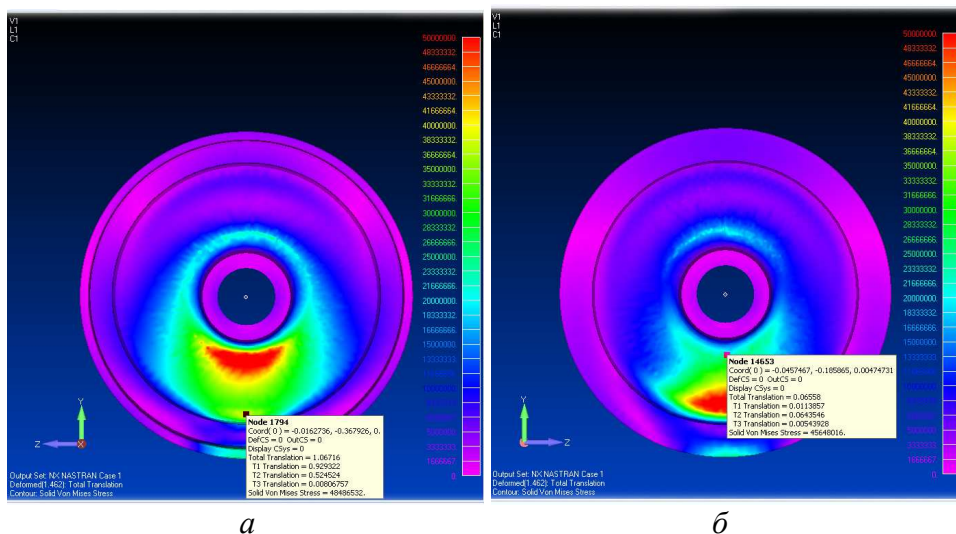


Рис. 2. Результаты НДС колеса: *a* – внешняя сторона, *б* – внутренняя сторона

Необходимо отметить, что максимальная интенсивность эквивалентных напряжений (для колеса в целом) располагается в приободной зоне с внешней стороны (в зоне образования в процессе эксплуатации кольцевых трещин). Оказалось, что в рассмотренном случае жесткость НДС равна $\Pi = -0,7$. В свою очередь, в приступичной зоне на внутренней поверхности колеса уровень интенсивности напряжений на 30 МПа ниже (рис. 2, б). При этом расчетная величина Π в этой зоне имеет значение, равное $\Pi = -0,9$.

Полученные значения Π показывают, что в приободной зоне жесткость НДС более «жестко», чем в приступичной, а ресурс усталостной работы материала, как показывает опыт эксплуатации колес рассмотренного типа, более низкий.

Список литературы

1. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Изд-во Дельта, 2008. – 816 с.
2. Лебедев А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук и др. – Киев: Изд-во Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
3. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
5. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 40. – P. 124-132. – DOI: 10.18720/МПМ.4012018_15.
6. Зеньков Е.В. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок / Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик, А.А. Пыхалов // Вестник ИрГТУ. – 2011. – №7(54). – С. 6-12.

7. Кулешов А.В. Оценка прочности несущих элементов железнодорожных вагонов: метод. пособие по лабораторному курсу дисциплины «Конструирование и расчет вагонов» / А.В. Кулешов, Л.Б. Цвик. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – 208 с.

References

1. Pisarenko G.S. Reference book on resistance of materials / G.S. Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. – Kiev: Publ. house Delta, 2008. – 816 p.
2. Lebedev A.A. Mechanical properties of structural materials in a complex stress state / A.A. Lebedev, B.I. Kovalchuk and others. – Kiev: Pub. house "In Yure", 2003. – 540 p.
3. Kogaev V.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov, A.P. Gusenkov. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – 224 p.
4. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012128.
5. Zenkov E.V. Accuracy improvement for combined static strength criterion for structures under complex loading / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 40. – P. 124-132. – DOI: 10.18720/МПМ.4012018_15.
6. Zenkov E.V. Discrete modeling of the stress-strain state of plane-cylindrical specimens with stress concentrators in the form of grooves / E.V. Zenkov, L.B. Tsvik, A.A. Pykhalov // Bulletin of ISTU. – 2011. – No. 7 (54). – P. 6-12.
7. Kuleshov A.V. Strength assessment of load-bearing elements of railway cars: method. Manual for the laboratory course of the discipline "Design and calculation of cars" / A.V. Kuleshov, L.B. Tsvik. – Irkutsk: ISTU, 2015. – 208 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

<p>Зеньков Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры управления качеством и инженерной графики, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, jovanny1@yandex.ru</p>	<p>Zenkov Evgeniy Vyacheslavovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Quality Management and Engineering Graphics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, jovanny1@yandex.ru</p>
--	---

Получена 01.12.2021