

С. В. Пахомов¹, О. Л. Маломыжев¹, Л. Б. Цвик¹, И. Н. Лебедев¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация. Работа деталей и сборочных единиц подвижного состава железнодорожного транспорта связана с воздействием на них переменных по величине нагрузок в том числе циклических. Наличие таких эксплуатационных нагрузок вызывает возникновение усталостных трещин в деталях с последующим их разрушением. Учёт влияния усталостного разрушения на ресурс деталей оценивается, как правило, путём ресурсного испытания опытных образцов изделий, а также опыта эксплуатации подобных конструкций. Такой подход связан со значительными затратами, связанными с необходимостью изготовлением испытываемых образцов и последующего их испытаниями.

В данной работе предложен метод исследования материалов, из которых будут изготовлены будущие детали путем создания специально выполненных образцов, позволяющих сформировать в них напряжённо-деформированное состояние, соответствующее тому, которое будет создаваться в деталях при их эксплуатации. В результате испытания образцов материалов на специально разработанном стенде, можно получить количественную оценку усталостной прочности проектируемых деталей в лабораторных условиях минуя этап проведения ресурсных испытаний опытных образцов.

Разработанный метод оценки усталостной прочности материалов позволит снизить сроки и стоимость ввода в эксплуатацию новых деталей и сборочных единиц, что подчёркивает его актуальность.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, подвижной состав, усталостная прочность, испытательное оборудование, ресурсные испытания, двухосное напряжённо-деформированное состояние, испытания образцов материалов, датчики силоизмерительные.

S. V. Pakhomov¹, O. L. Malomyzhev¹, L. B. Cvik¹, I. N. Lebedev¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF MATERIALS UNDER BIAXIAL CYCLIC LOADING

Abstract. The work of parts and assembly units of railway transport rolling stock is associated with the impact on them of variable loads, including cyclic loads. The presence of such operational loads causes fatigue cracks in the parts with their subsequent destruction. Taking into account the impact of fatigue failure on the service life of parts is estimated, as a rule, by resource testing of prototypes of products, as well as the experience of operating such structures. This approach is associated with significant costs associated with the need to produce test samples and then test them.

In this paper, we propose a method for studying the materials from which the components will be made by creating specially designed samples that allow them to form a stress-strain state corresponding to the one that will be created in the parts during their operation. As a result of testing samples of materials on a specially designed stand, it is possible to obtain a quantitative assessment of the fatigue strength of the designed parts in laboratory conditions, passing the stage of conducting resource tests of prototypes.

The developed method for assessing the fatigue strength of materials will reduce the time and cost of commissioning new parts and assembly units, which underlines its relevance.

Keywords: railway transport, rolling stock, fatigue strength, testing equipment, resource tests, biaxial stress-strain state, testing of material samples, force-measuring sensors.

Введение

Детали подвижного состава железнодорожного транспорта подвергаются изменяющимся по величине нагрузкам. Так, например колёса и оси колёсных пар, подшипники букс работают под постоянным воздействием циклически изменяющихся нагрузок. Известно, что циклически изменяющиеся нагрузки вызывают усталостные разрушения, обусловленные рядом факторов, таких, как неоднородность структуры металла, литейные пороки, пр. В свою очередь усталостные разрушения снижают сроки службы деталей и сборочных единиц конструкций, что вызывает необходимость учёта их влияния на ресурс.

В настоящее время, учёт влияния циклических нагрузок на усталостные разрушения, при проектировании принято оценивать с применением общетехнических требований [1, 2], учёта опыта изготовления подобных конструкций, а также проведения ресурсных испытаний опытных образцов деталей [3, 5]. В проекте "Межгосударственного стандарта Вагоны грузовые и пассажирские Правила проектирования" предлагается выполнять расчет на сопротивление усталости при многоцикловом нагружении с применением кривой усталости (Веллера) [6] по формуле

$$\sigma_i^m N_i = const,$$

где σ_i – напряжение в i -ой точке детали; N_i – число циклов в i -ой точке детали; m – эмпирический коэффициент, учитывающий прочностные свойства материала. Коэффициент запаса сопротивления усталости n вычисляют по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,0} K_{\text{н}}} \geq [n],$$

где $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости (по амплитуде) натурной детали при установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов N_0 , для конструкций из сталей принимают $N_0 = 10^7$ (для колес и осей колесных пар – $N_0 = 10^8$).

Предлагаемый подход упрощает процесс проектирования новых деталей и снижает затраты времени на проведение ресурсных испытаний. Следует заметить, что предлагаемые в различных источниках, например [8, 9], методы определения усталостной прочности материалов основаны, в основном на исследовании циклического одноосного режима нагружения (растяжения) материалов. В реальных условиях эксплуатации, детали подвижного состава сложному напряжённо-деформированному состоянию от воздействия сил в различных направлениях. При этом, поверхностный слой материала, наиболее подверженный возникновению усталостных трещин, подвергается двухосному нагружению в перпендикулярных направлениях: одновременные растяжение и сжатие; одновременное сжатие; одновременное растяжение. При таких условиях, усталостная прочность материала изменяется, что подтверждено в работах [10, 11, 12] и, соответственно влияет на ресурс деталей и сборочных единиц подвижного состава железнодорожного транспорта, а также указывает на актуальность проведения исследований прочностных свойств материалов при двухосном циклическом нагружении (ДЦН).

Анализ способов исследования двухосного напряженно-деформированного состояния в образцах материалов

В настоящее время, прочностные свойства материалов в условиях ДЦН испытываются, в основном, с применением сложных, дорогостоящих стендов (рис. 1), позволяющих создавать независимые друг от друга силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.



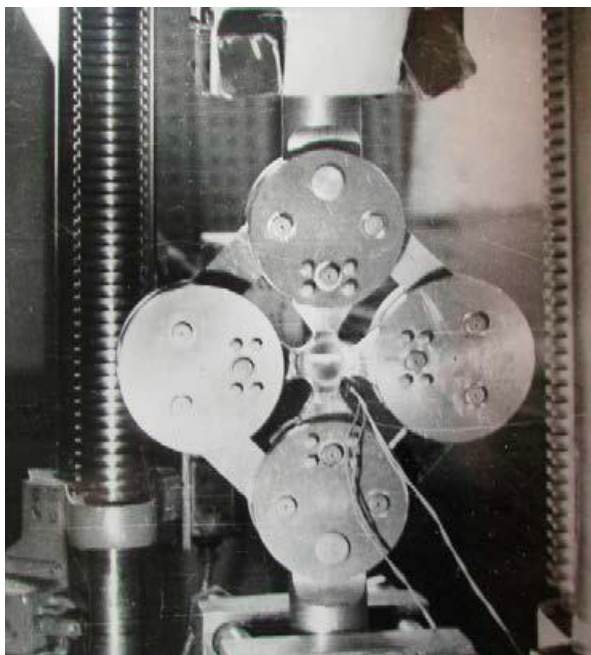
а)



б)

**Рис. 1. Стенды для двухосных испытаний крестообразных образцов:
а) фирмы Zwick; б) фирмы Instron**

В работах [11, 12] предложены способы создания двухосного нагружения образцов на одноосных испытательных стендах обеспечивающих нагружения растяжение-растяжение и растяжение-сжатие (рис. 2).



а)



б)

**Рис. 2. Способы создания двухосного нагружения:
а) – растяжение-сжатие; б) – растяжение-растяжение**

Данные способы создания двухосного деформируемого состояния являются сложными в изготовлении, имеют высокую стоимость (рис. 1), требуют изготовления специального приспособления для изменения соотношения взаимно перпендикулярных сил.

В данной работе предлагается методика исследования усталостной прочности материалов, позволяющая моделировать различные виды двухосного нагружения, путём применения образцов специальной формы на стенде, создающем однонаправленную силу.

Использование предлагаемого метода исследования, позволит моделировать на образцах материала условия двухосного нагружения, которому будут подвергаться проектируемые детали подвижного состава в реальных условиях эксплуатации и заменить ресурсные испытания опытных образцов деталей стендовыми в лабораторных условиях. Применение предлагаемого метода позволит существенно снизить сроки и стоимость введения в эксплуатацию новых деталей и сборочных единиц без существенных временных и материальных затрат.

Описание конструкций испытуемых образцов материалов

На основании анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) образцов различной формы, имеющих искусственно созданные концентраторы напряжений при создании одноосного нагружения, была получена наиболее оптимальная форма, представляющая собой пластину цилиндрической формы, имеющей на противоположных плоскостях взаимно перпендикулярные концентраторы напряжений в виде канавок U – и V –образных форм (рис. 3) [13].

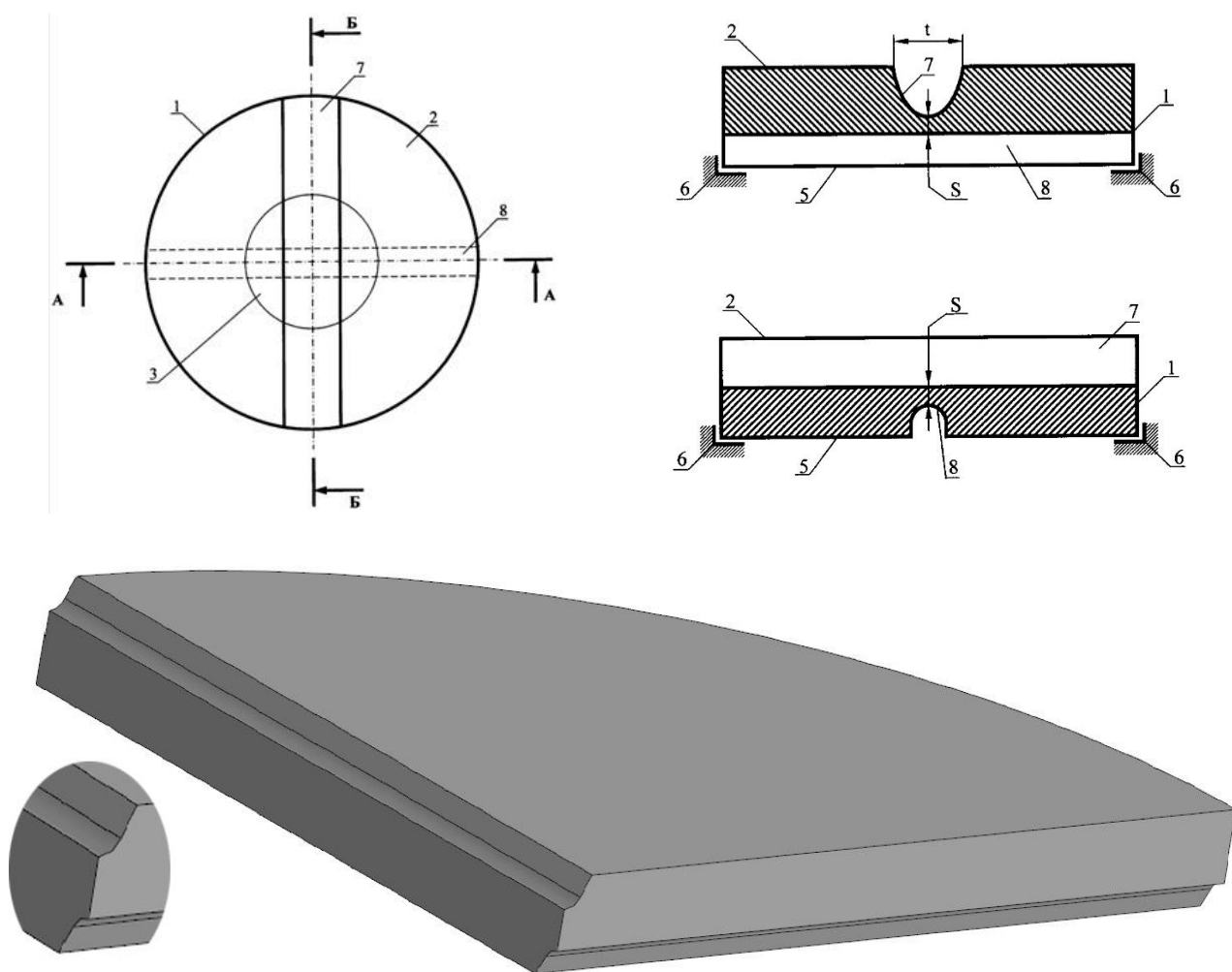


Рис. 3. Схема образца материала

Взаимно-перпендикулярное расположение канавок 7 и 8, позволяет путём изменения их глубины, ширины и применения различных форм из профиля (U – , V –образных, прямоугольных) позволяет в зоне их взаимного перекрещивания изменять в широком диапазоне коэффициент жёсткости НДС $0,2 < k < 0,8$.

Для расширения возможности оценки двухосного НДС предложено использование симметричной усечённой пластины цилиндрической формы (рис.4) [14].

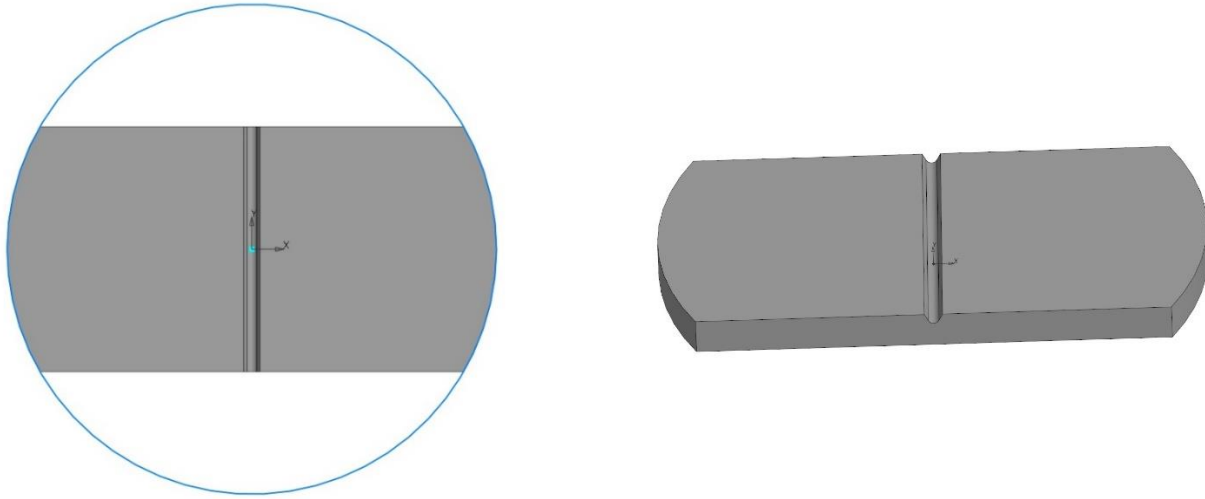


Рис. 4. Схема усечённого образца материала

Путём изменения степени усечения пластины удаётся изменять коэффициент вида НДС

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в очаге разрушения;

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

Результаты расчёта, образцов с различной степенью усечения приведены на рис. 5.

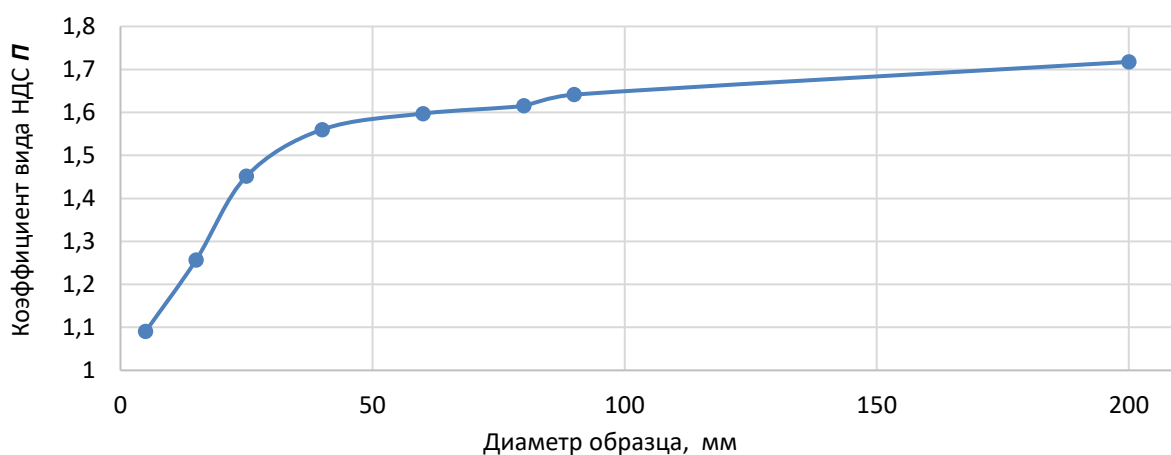


Рис. 5. Влияние усечения образца на коэффициент вида НДС Π

В результате, расчётным путём установлена возможность получения коэффициент вида НДС в диапазонах $-2 \leq \Pi \leq -1$ до $1 \leq \Pi \leq 2$, что соответствует диапазонам высоконагруженных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта.

Конструкция стенда для испытания образцов материалов

Для реализации испытаний материалов на усталостную прочность разработан и изготовлен стенд, позволяющий создавать циклическую нагрузку на образцы (рис. 6).

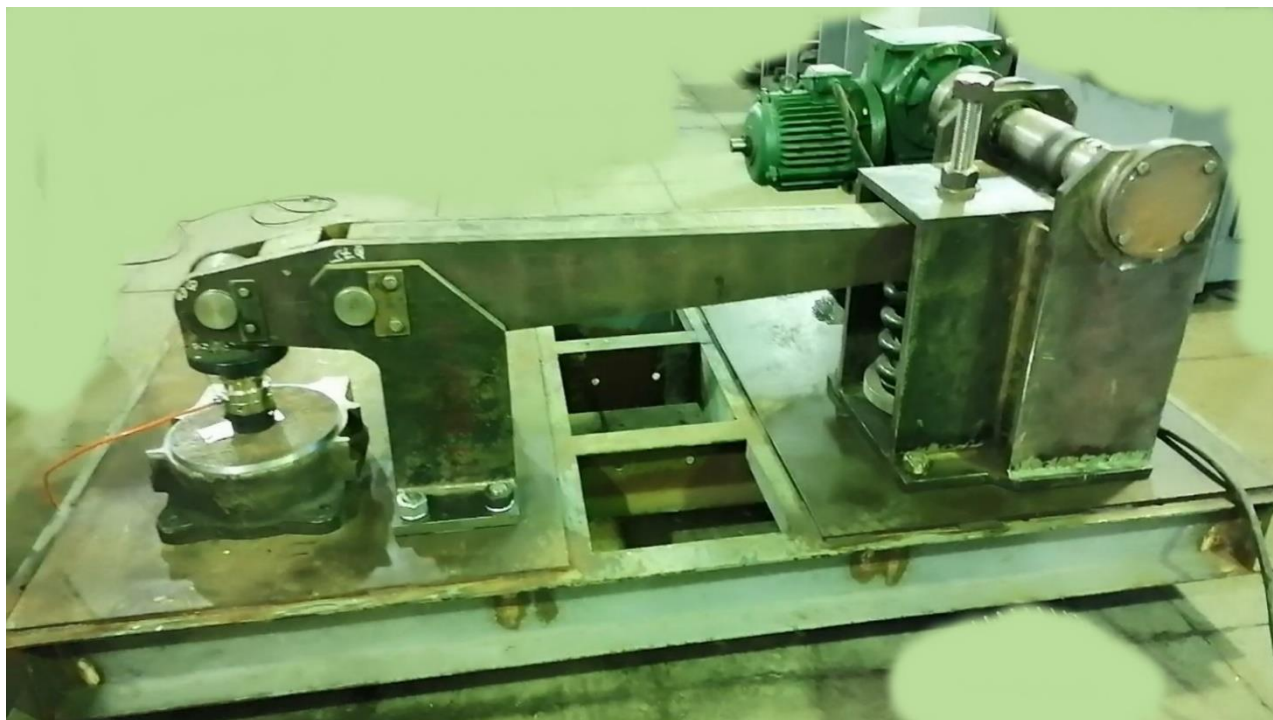


Рис. 6. Стенда для испытания образцов материалов

Схема стенда приведена на рис. 7. Испытуемый образец 1, опирается на закреплённый на раме стенда полый цилиндр. Циклически изменяющаяся сила прикладывается к образцу толкателем 2, имеющим форму полого цилиндра. Сила, воздействующая на образец, создаётся предварительно сжатой пружиной 4, через двуплечий рычаг 3, имеющий соотношение плечей 5/1 и может изменяться в диапазоне $0 \div 100$ кН. Сила предварительного сжатия пружины осуществляется винтовым регулировочным устройством 6. Значение силы измеряется тензометрическим датчиком 7. Снижение силы осуществляется эксцентриком 5, воздействующим на край рычага 3. Эксцентрик приводится во вращение червячным мотор-редуктором, обеспечивающим частоту вращения 0,83 Гц. Характер изменения силы, воздействующей на образец представлен на графиках (рис. 8).

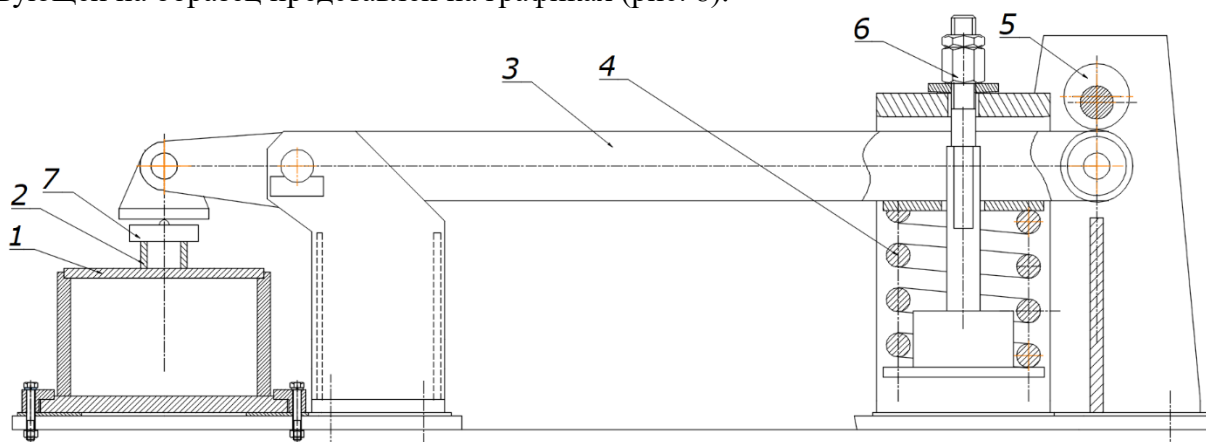


Рис. 7. Схема стенда для испытания образцов материалов

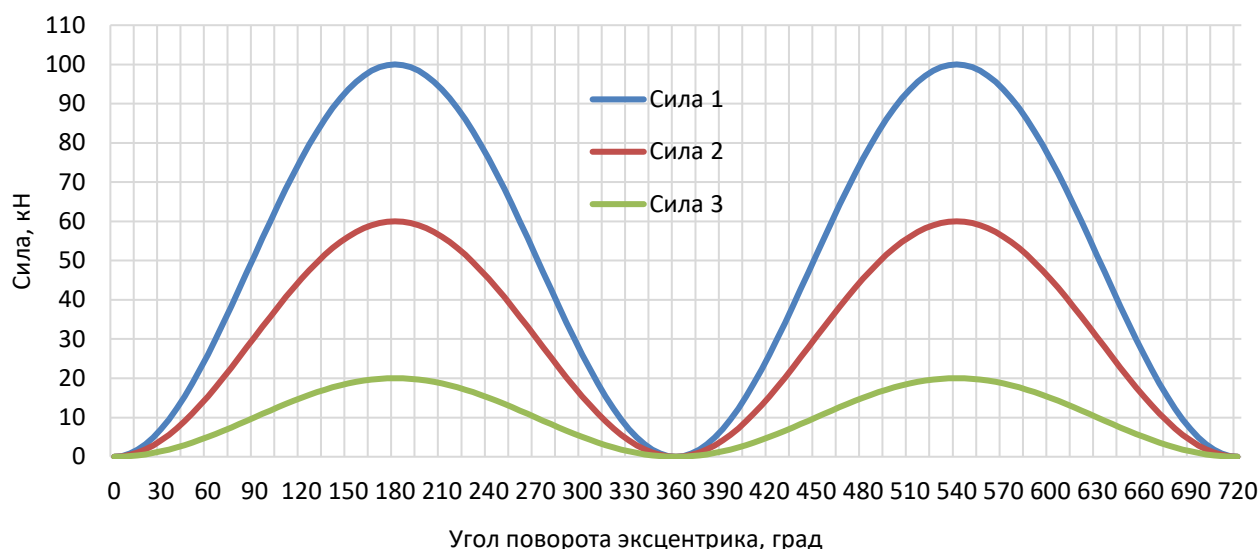


Рис. 8. Характер изменения силы на образце

Перед началом проведения испытаний, эксцентрик 5 устанавливается в положение максимального нажатия на рычаг 3. Предварительно подготовленный образец из материала соответствующего испытываемой детали, и имеющий необходимые: толщину; диаметр; канавки расчётной глубины и формы сечения, укладывается на опору. Далее, эксцентрик устанавливается в противоположное положение (отсутствие воздействия на рычаг 3). Создается необходимая максимальная расчётная сила, воздействующая на образец с помощью устройства предварительного сжатия пружины 6. Силы измеряется тензометрическим датчиком LPA-10t (рис. 9), а её значение отображается на дисплее блока преобразования DT-50-A (рис. 10).



Рис. 9. Датчик LPA-10t



Рис. 10. Блок преобразования DT-50-A

В процессе проведения испытаний производится счёт числа циклов нагружения образца с помощью датчика Холла, с регистрацией значений на CD карту, подключенную к микроконтроллеру платы Arduino UNO. Одновременно, на ту же CD карту осуществляется запись значений силы, воздействующей на образец через интерфейс RS-485. В момент, разрушения образца материала происходит автоматическое отключение стенда.

Заключение

Разработан метод оценки усталостной прочности материалов деталей подвижного состава железнодорожного транспорта в лабораторных условиях, позволяющий моделировать на образцах материала условия двухосного нагружения, соответствующего работе деталей в условиях эксплуатации. Применение предлагаемого метода позволит существенно снизить сроки и стоимость введения в эксплуатацию новых деталей и сборочных единиц без существенных временных и материальных затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 25.101–83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
2. ГОСТ 25.506–85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
3. ГОСТ 33211–2014 Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.
4. ГОСТ 10791–2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия.
5. ГОСТ 33200–2014 Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава.
6. ГОСТ 1497–84(ИСО 6892–84) Металлы. Методы испытаний на растяжение.
7. ГОСТ 25.502–79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
8. Когаев, В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1993. – 354 с.
9. В. Ф. Терентьев. Усталостная прочность металлов и сплавов. М., Интермет инжиниринг. 2002. –288 с.
10. В.П. Голуб К решению задач усталости при двухосном комбинированном нагружении на основе классических критериев разрушения. Вестник двигателестроения № 2. Запорожье: ОАО Мотор Сич. 2014 – С. 139–146.
11. К. А. Вансович, В. И. Ядров Двухосные испытания металлических образцов на испытательных машинах с одной осью нагружения. Омский научный вестник № 5 (173), ОмГУПС, Омск, , 2020 – С. 10–16.
12. И. П. Аистов, К. А. Вансович, А. Н. Крючков Исследование скорости роста усталостных трещин в алюминиевом сплаве АК6 в зависимости от характеристик напряжённого состояния в области их распространения. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета №2 (40), Самара, 2013 – С. 68–76.
13. Патент на изобретение № 2360227 Российская Федерация, МПК G01N 3/08 Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии / Цвик Л.Б. Черепанов А.П., Пыхалов А.А. и др. ; опубликован: 27.01.2009; заявители и патентообладатели: Открытое акционерное общество "Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения" (ОАО "ИркутскНИИхиммаш") (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Иркутский государственный технический университет" (ГОУ ИрГТУ) (RU), Открытое акционерное общество "Ангарская нефтехимическая компания" (ОАО "АНХК") (RU).
14. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Дискретное моделирование напряженно-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок. – Вестник ИрГТУ. – 2011 г., №7. С. 64 – 69.
15. Патент на изобретение № 2717571 Российская Федерация, МПК G01M 3/34 Устройство для испытания пластинчатого образца на усталостную прочность / Федюкович Г.И., Цвик Л.Б., Железняк и др.; опубликован: 24.03.2020; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU).

REFERENCES

1. GOST 25.101-83 Calculations and strength tests. Methods of schematization of the random loading processes of machine elements and structures and statistical presentation of the results.
2. GOST 25.506-85 Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Determination of the characteristics of crack resistance (fracture toughness) under static loading.
3. GOST 33211-2014 Freight cars. Requirements for strength and dynamic properties.
4. GOST 10791-2011 All-rolled wheels. Technical conditions.
5. GOST 33200-2014 Axles of wheel sets of railway rolling stock.
6. GOST 1497-84 (ISO 6892-84) Metals. Methods of tensile testing.
7. GOST 25.502-79 Calculations and strength tests in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Methods of fatigue testing.
8. Kogaev, V. P. Calculation of strength at stresses, variables in time / V. P. Kogaev. - M.: Mashinostroenie, 1993 – - 354 p.
9. V. F. Terentyev. Fatigue strength of metals and alloys. M., Internet Engineering. 2002. - 288 p.
10. V. P. Golub On the solution of fatigue problems in biaxial combined loading on the basis of classical failure criteria. Engine Building Bulletin No. 2. Za-porozhye: JSC Motor Sich. 2014-p. 139-146.
11. K. A. Vansovich, V. I. Yadrov Biaxial tests of metal samples on testing machines with one loading axis. Omsk Scientific Bulletin No. 5 (173), OmGUPS, Omsk., 2020-p. 10-16.
12. I. P. Aistov, K. A. Vansovich, A. N. Kryuchkov Investigation of the growth rate of fixed cracks in aluminum alloy ak6 depending on the characteristics of the stress state in the region of their propagation. Bulletin of the Samara State Aerospace University No. 2 (40), Samara, 2013-pp. 68-76.
13. Patent for invention No. 2360227 Russian Federation, IPC G01N 3/08 Obra-zets for assessing the strength of a material under a complex stress state / Tsvik L. B. Chepanov A. P., Pykhalov A. A., et al.; published: 27.01.2009; applicants and patent holders: Open Joint-Stock Company "Irkutsk Research and Design Institute of Chemical and Petroleum Engineering" (JSC "Irkutskniihimash") (RU), State Educational Institution of Higher Professional Education "Irkutsk State Technical University" (GOE IrSTU) (RU), Open Joint-Stock Company "Angarsk Petrochemical Company" (JSC "ANKhK") (RU).
14. Zenkov E. V., Tsvik L. B., Pykhalov A. A. Discrete modeling of the stress-strain state of flat-cylindrical samples with stress concentrators in the form of grooves. - Bulletin of the IrSTU – - 2011, No. 7. pp. 64-69.
15. Patent for invention No. 2717571 Russian Federation, IPC G01M 3/34 Device for testing a plate sample for fatigue strength / Fedyukovich G. I., Tsvik L. B., Zheleznyak et al.; published: 24.03.2020; applicant and patentee Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk State University of Railway Engineering (FGBOU VO IrGUPS) (RU).

Информация об авторах

Пахомов Сергей Васильевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pahomov_sv@irgups.ru

Маломыжев Олег Львович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olm@bk.ru

Цвик Лев Беркович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tsvik_l@mail.ru

Лебедев Иван Николаевич – аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vchde8_lebedevin@esrr.ru

Authors

Sergey Vassilyevich Pakhomov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Physics, Mechanics and Instrumentation», Irkutsk State University of Railway Engineering, Irkutsk, e-mail: pahomov_sv@irgups.ru

Oleg Lvovich Malomyzhev – Candidate of technical Sciences, associate Professor, Department «Cars and wagon management», Irkutsk state University of Railway transport, Irkutsk, e-mail: olm@bk.ru

Lev Berkovich Cvik – Doct. of techn. Sciences, Professor of the Department «Cars and wagon management», Irkutsk state University of Railway transport, Irkutsk, e-mail: tsvik_l@mail.ru

Ivan Nikolayevich Lebedev – Post-graduate student, Department «Cars and wagon management», Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: vchde8_lebedevin@esrr.ru

Для цитирования

Пахомов С.В. Исследование прочности материалов в условиях двухосного циклического нагружения [Электронный ресурс] / С. В. Пахомов, О. Л. Маломыжев, Л. Б. Цвик, И. И. Лебедев // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — №12. — Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/121-2021>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 07.06.2021)

For citation

Pakhomov S.V., Malomyzhev O.L., Cvik L.B., Lebedev I.N. *Investigation of the strength of materials under biaxial cyclic loading. Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. 12. [Accessed 07/06/21]