

Д.О. Маломыжев¹, Л. Б. Цвик¹, Е.В. Зеньков¹, А. А. Пыхалов¹

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

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС)

Аннотация. Любые транспортные средства и машины в испытывают как статические и динамические нагрузки различной величины и времени воздействия. Детали рассчитываются с требуемым запасом прочности в зависимости от сферы ее применения. Оценка проводится для наиболее нагруженного сечения. Допускаемые напряжения для материалов определяют исходя из диаграммы растяжения или сжатия материала, где образец подвергается одноосному нагружению. Однако реальные детали при работе имеют более сложный вид нагружения включая двухосное, что не учитывается при одноосном испытании материала, который в последующем будет использован для готового изделия. В результате реальный запас прочности снижается, что влияет на срок службы или неспособность выдержать разовую расчетную предельную нагрузку. Оценка надёжности деталей транспортных средств может быть выполнена с использованием испытаний образцов имеющих аналогичное двухосное напряжённое состояние, позволяющее получить такие характеристики, как: предел упругости, предел текучести и предел прочности. Для реализации таких испытаний существует ряд специализированных образцов и машин, позволяющих реализовать нагружение по взаимно перпендикулярным осям. Такие машины сложны и дороги по данной причине были разработаны различные адаптеры для реализации двухосного нагружения на одноосных испытательных машинах. Также разработаны образцы в которых посредством одноосного растяжения реализуется двухосный вид нагружения, что упрощает проведение испытаний материалов.

Ключевые слова: одноосные испытательные машины, двухосные испытательные машины, испытательные образцы, двухосное нагружение, механика разрушения.

D. O. Malomyzhev¹, L. B. Tsvik¹, E. V. Zenkov¹, A. A. Pykhalov¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

SAMPLES FOR OBTAINING VARIOUS TYPES OF VOLUMETRIC STRESS-STRAIN STATE (VAT)

Abstract. Any vehicles and machines in experience both static and dynamic loads of varying magnitude and exposure time. The parts are calculated with the required margin of safety, depending on the scope of its application. The assessment is carried out for the most loaded section. The allowable stresses for materials are determined based on the stretching or compression diagram of the material, where the sample is subjected to uniaxial loading. However, real parts have a more complex type of loading during operation, including biaxial, which is not taken into account during uniaxial testing of the material, which will subsequently be used for the finished product. As a result, the real margin of safety decreases, which affects the service life or inability to withstand a single calculated maximum load. The reliability assessment of the parts of vehicles can be performed using tests of samples having a similar two-axis stress state, which allows obtaining such characteristics as: elastic limit, yield strength and tensile strength. To implement such tests, there are a number of specialized models and machines that allow loading along mutually perpendicular axes. Such machines are complex and expensive, for this reason, various adapters have been implemented to implement biaxial loading on uniaxial test machines. Samples have also been developed in which a biaxial type of loading is realized by means of uniaxial stretching, which simplifies the testing of materials.

Keywords: uniaxial testing machines, biaxial testing machines, test samples, biaxial loading, fracture mechanics.

Введение

Экспериментальная механика, специализирующаяся на изучении разрушений является ключевой областью, сочетающей в себе общие принципы исследования поведения материалов при разрушении [1-3]. В данном разделе анализируется материал в деформированном состоянии с нарушением его целостности в виде трещины. В зоне разрушения определяются упругие и пластические деформации материала, а также определяются формы, размер и степень раскрытия трещины. В зависимости от упругопластических характеристик материала трещина

может иметь различный характер роста, что весомо влияет на усталостную прочность. По данной причине необходима оценка трещиностойкости от воздействия знакопеременных нагрузок.

В основном оценка конструкционных материалов выполняется на одноосных испытательных машинах, что в свою очередь не дает полной картины их разрушения, так как в эксплуатации трещины образуются при различных видах напряженно-деформированного состояния (НДС) включая двухосный, который является наиболее опасным для конструкции.

Типы образцов

Первые образцы позволяющие получить двухосный вид НДС в первую очередь были созданы для уточненной оценки пластичности материала [4]. Образцы в основном изготавливались в виде тонкостенных труб (рис.1). Такие образцы испытывались типовыми видами нагружения до разрушения: продольное и поперечное растяжение, кручение, сжатие. Для реализации нагружения необходимы специализированные испытательные установки, в результате чего для таких образцов не применимы наиболее распространенные одноосные испытательные машины. Напряжения определялись по теории сопротивления материалов в зависимости от деформаций окружных, радиальных и продольных, а также угла закручивания. Для измерения деформаций, особенно малых, требуются высокоточные приборы, что также ограничивает их применение.

Образец в виде тонкостенной трубы (рис.1) позволяет определить не только пределы прочности материала в зависимости от вида нагрузки, но и циклическую прочность при двухосном нагружении [5].

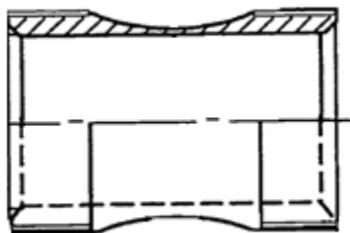


Рис. 1. Образец в виде тонкостенной трубы

Образцы имеющие сложную форму в виде трубы, эллипса или сферы имеют недостаток из-за их тонкостенности, который выражается неравномерным распределением напряжений по стенкам, что ограничивает их область применения изучением только сквозных трещин (реальные объекты могут иметь несквозные трещины) [6]. Таким примером может служить образец на рисунке 2, имеющий форму сектора тонкостенной трубы с уширением в виде креста в поперечном сечении, образующим эллипс, нагружающая сила передается к центру точки наблюдения через данные уширения. В данной точке создается двухосное напряжение [7].



Рис. 2. Образец в виде сектора трубы с уширением в виде креста

Схожий конструктивно образец ранее описанному представлен на рисунке 3. Он представляет собой половину тонкостенной трубы с кольцевой проточкой на наружной поверхности. Нагружение выполняется двухстороннее (силы сжимающие или растягивающие) по проточке по противоположным краям поперек осевой линии образца.

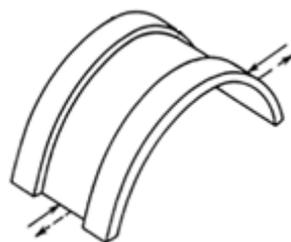


Рис. 3. Образец в виде половины трубы с кольцевой проточкой

Такие образцы (рис.2,3) имеют подобные недостатки: используется дополнительная оснастка для установки их в испытательный стенд, сложность изготовления, а также сложность определения напряжений в образцах.

Особое внимание заслуживают специально разработанные плоские образцы, которые позволяют реализовать двухосное нагружение в точке наблюдения образца в процессе растяжения на одноосной испытательной машине (рис.4) [8-12].

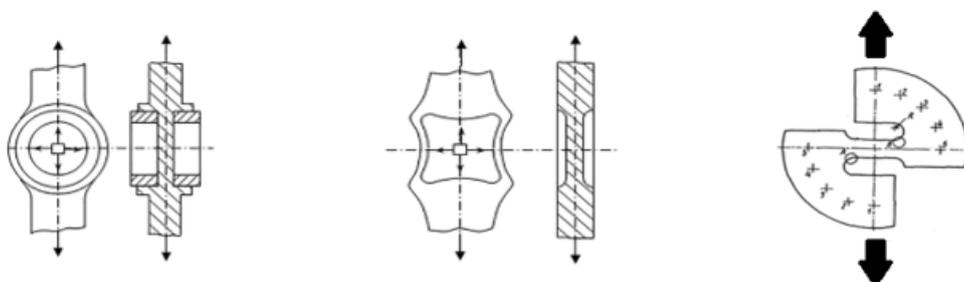


Рис. 4. Образцы для одноосных испытательных машин, реализующие двухосный вид нагружения

Также среди образцов для испытаний на одноосных испытательных установках существует образец с трещиной, позволяющий выполнять циклическое нагружение для оценки на усталость при двухосном виде НДС (рис.5) [13].



Рис. 5. Образец с трещиной для двухосного испытания

Образцы рисунок 4 и 5 наиболее универсальны за счет того, что не требуют специализированной оснастки, однако они не позволяют выполнять испытание на сжатие из-за продольной податливости. Также немаловажным является простота изготовления образцов, и регулировка их геометрических параметров в зависимости от требований к испытаниям (изменение коэффициента интенсивности концентрации напряжений или коэффициента двухосности нагружения), что весьма затруднительно при изготовлении ранее перечисленных образцов из-за сложности их формы.

На рисунке 6 представлен один из наиболее распространенных образцов в виде пластины с четырьмя взаимно перпендикулярными приливами для закрепления в испытательной установке. Позволяет оценить характеристики материала при двухосном виде напряженно-деформированного состояния.

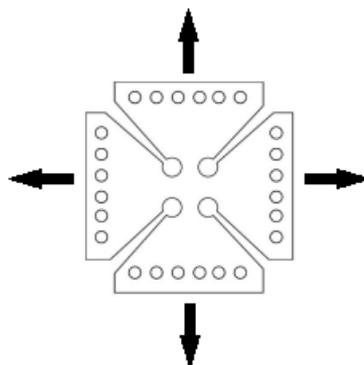


Рис. 6. Пластина в виде креста

Однако для реализации двухосной нагрузки необходимы испытательные установки с двумя перпендикулярными зависимыми или независимыми приводами, что позволяет задать различное соотношение между взаимно перпендикулярными силами нагружения. Также их применение возможно на одноосных испытательных машинах с применением специальных адаптеров.

В последнее время были разработаны и успешно используются установки, которые позволяют нагружать образцы независимо в двух перпендикулярных направлениях (рис.7).



Рис. 7. Двухосная испытательная машина

Чтобы реализовать нагружение образцов в виде креста на одноосных стендах применяются регулируемые адаптеры (изменение соотношения между перпендикулярными нагружающими силами), общий вид подобных устройств продемонстрирован на рисунке 8.

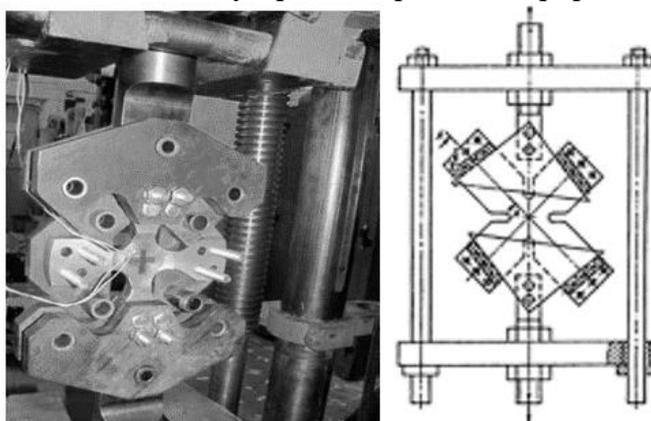


Рис. 8. Устройство для одноосных испытательных установок

Несмотря на большое количество различных типов образцов, они имеют общий недостаток, используются для оценки сквозных трещин в материале. Не решается проблема оценки несквозных трещин, однако образец в виде призмы решает данное ограничение по исследованию трещин.

Образец в виде буквы «П» и боковыми приливами [14] (рис.9) позволяет выполнить испытание при двухосном нагружении на одноосных стендах. Нагружение происходит за счет вертикальной силы создаваемой стендом, а перпендикулярная ей сила реализуется за счет боковой опоры. Такой образец позволяет задать любую величину двухосности в зависимости от геометрических параметров.

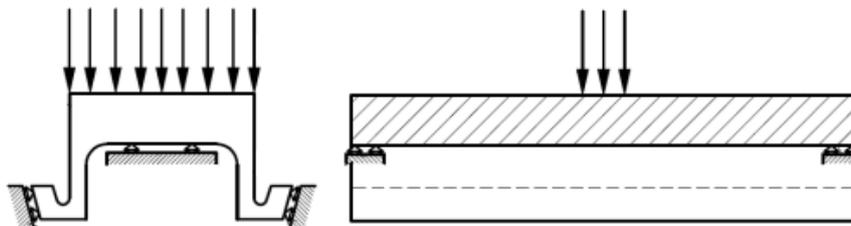


Рис. 9. Призматический образец

В свою очередь, в работах [15–18] предложено создавать, при механических испытаниях, в том числе в условиях циклического нагружения, сложное НДС с использованием дисковых образцов (рис.10). Которые позволяют задавать абсолютно любую толщину образца, что позволяет уйти от недостатка, возникающего в ранее описанных типах образцов связанного с ограничениями их толщины.

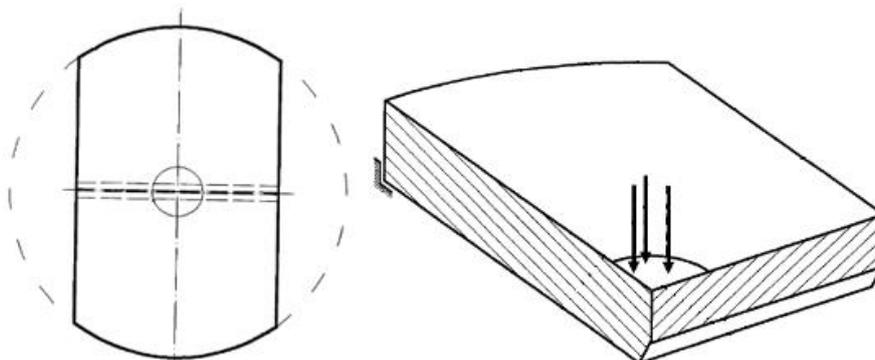


Рис. 10. Образец в виде диска

В образцах (рис.10) напряженно-деформированное состояние рассматривается в дне диаметральной выточки в продольной оси образца (в центре выточки), в которой жесткость вида НДС характеризуется Π , которое равно отношению инвариантов тензоров напряжений [19] (1):

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, в центре выточки;

σ_i – эквивалентное напряжение (фон Мизеса), определяемое формулой (2)

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

В зависимости от геометрических параметров образца, возможно получение коэффициента вида НДС Π в широком диапазоне от 1 до 2, такой диапазон соответствует реальным изделиям, находящимся под воздействием эксплуатационным нагрузок.

Заключение

Одноосные испытания материалов не позволяют в полной мере оценить характеристики материала, так как в реальности детали находятся в сложном виде напряженно-деформированного состояния. В настоящий момент учеными со всего мира были разработаны различные испытательные образцы, позволяющие на одноосных машинах реализовать двухосный вид нагружения. Как итог совершенствование испытательных машин и образцов позволяет упростить испытания и повысить их доступность для всех сфер производственной деятельности. Оценка прочности материалов при двухосном виде нагружения является актуальной при проектировании и модернизации транспорта и машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браун У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации/ У. Браун., Дж. Сроули. – М.: Мир, 1972. – 246 с.
2. Кобаяси А. Экспериментальная механика/ А. Кобаяси. – М.: Мир. 1990. – 615 с. ISBN 5-03-001543-4.
3. Керштейн И. М. Основы экспериментальной механики разрушения/ И. М. Керштейн, В. Д. Ключников, Е. В. Ломакин. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 138 с. ISBN 5-211-00318-7.
4. Жуков А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии // Инженерный сборник. 1956. Т. 20. С. 37–48.
5. Варвани-Фарахани А. Рост и закрытие двухосных усталостных трещин в стали 1045 при постоянной амплитуде и периодических перегрузках при сжатии / А. Варвани-Фарахани. – Ватерлоо: Ун-т Ватерлоо 1998. – 179 с.
6. Кузнецов А. С., Зилова Т. К., Фридман Я. Б. Методика оценки механических свойств листовых материалов при двухосном растяжении эллипсоидных сегментов // Заводская лаборатория. 1967. № 5. С. 608–612.
7. Патент на изобретение SU 1832186 А1 СССР, МПК G01N 3/32 Образец для испытания металлических труб на усталость при двухосном напряженном состоянии / Есиев Т. С., Басиев К. Д., Стеклов О. И.; опубликован: 07.08.93; патентообладатели: Северо-Кавказский горно-металлургический институт.
8. Лебедев А. А., Бойко А. В., Музыка Н. Р. Метод испытаний при равномерном двухосном растяжении // Проблемы прочности. 1982. № 2. С. 105–107.
9. Авторское свидетельство 532782 СССР, МПК G01N 3/08. Способ испытания материалов при плоском напряженном состоянии / Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Ламашевский В. П. [и др.]; опубликован: 25.10.76; патентообладатели: Институт проблем прочности АН УССР.
10. Авторское свидетельство 1670506 СССР, МПК G01N 3/32. Способ усталостных испытаний материала при неоднородном напряженном состоянии и образец для его осуществ-

ления / Капустин В. И., Сидоров О. Т.; опубликован: 15.08.91; патентообладатели: Государственный союзный сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина и Новосибирский институт инженеров водного транспорта.

11. Ахрименко В. Л., Козлов И. А. К исследованию двухосного растяжения на плоских образцах // Заводская лаборатория. 1969. № 8. С. 996–997.

12. Бутушин С. В., Смыков В. Г. Метод проведения испытаний на усталость при двухосном напряженном состоянии // Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций и систем: сб. науч. тр. М., 1978. Вып. 2. С. 3–8.

13. Беллетт Д. А., Морель Ф., Морель А. [и др.]. Двухосный усталостный образец для одноосного нагружения // Напряжение. 2011. №. 47 (3). С. 227–240.

14. Патент на изобретение RU 2516599 Российская Федерация, МПК G01N 1/28 Призматический образец для оценки прочности материала / Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Пыхалов А.А. и др.; опубликован: 20.05.2014; патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU).

15. Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Пыхалов А.А. Влияние геометрических параметров плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений на вид их напряженно-деформированного состояния. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование №3 (31), Иркутск, ИрГУПС, 2011 – С. 35–41.

16. Патент на изобретение RU 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; 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).

17. 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. №7. С. 64 – 69.

18. Патент на изобретение RU 2734276 Российская Федерация, МПК G01N 1/28 Дисковый образец для оценки конструкционной прочности материала / Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Бочаров И.С. и др. ; опубликован: 14.10.2020; патентообладатели: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU).

19. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы/ Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: «Машиностроение». 1968. – 272 с.

REFERENCES

1. Braun U. Ispytaniya vy`sokoprochny`x metallicheskih materialov na vyazkost` razrusheniya pri ploskoj deformacii [Testing of high-strength metal materials for fracture toughness during flat deformation]/ U. Braun., Dzh. Srouli. – М.: Mir, 1972. – 246 s.

2. Kobayasi A. E`ksperimental`naya mexanika [Experimental mechanics]/ A. Kobayasi. – М.: Mir. 1990. – 615 s. ISBN 5-03-001543-4.

3. Kershtejn I. M. Osnovy` e`ksperimental`noj mexaniki razrusheniya [Fundamentals of experimental fracture mechanics]/ I. M. Kershtejn, V. D. Klyushnikov, E. V. Lomakin. – М.: Izd-vo MGU, 1989. – 138 s. ISBN 5-211-00318-7.

4. Zhukov A. M. Plasticheskie svojstva i razrushenie stali pri dvuxosnom napryazhen-nom sostoyanii [Plastic properties and fracture of steel under biaxial stress] // Inzhenerny`j sbornik [Engineering collection]. 1956. T. 20. S. 37–48.

5. Varvani-Faraxani A. Rost i zakry`tie dvuxosny`x ustalostny`x treshhin v stali 1045 pri postoyannoj amplitude i periodicheskix peregruzkax pri szhatii [Growth and closure of biaxial fatigue cracks in 1045 steel at constant amplitude and periodic compression overloads] / A. Varvani-Faraxani. – Vaterloo: Un-t Vaterloo 1998. – 179 s.

6. Kuznecov A. S., Zilova T. K., Fridman Ya. B. Metodika ocenki mexanicheskix svojstv listovy`x materialov pri dvuxosnom rastyazhenii e`llipsoidny`x segmentov [A method for evaluating the mechanical properties of sheet materials under biaxial tension of ellipsoidal segments] // Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory]. 1967. № 5. С. 608–612.

7. Patent na izobretenie SU 1832186 A1 SSSR, MPK G01N 3/32 Obrazecz dlya ispy`taniya metallicheskih trub na ustalost` pri dvuxosnom napryazhennom sostoyanii [A sample for testing metal pipes for fatigue in a biaxial stress state] / Esiev T. S., Basiev K. D., Steklov O. I.; opublikovan: 07.08.93; patentoobladateli: Severo-Kavkazskij gorno-metallurgicheskij institut.

8. Lebedev A. A., Bojko A. V., Muzy`ka N. R. Metod ispy`tanij pri ravnomernom dvux-osnom rastyazhenii [Test method for uniform biaxial tension] // Problemy` prochnosti [Strength problems]. 1982. № 2. S. 105–107.

9. Avtorskoe svidetel`stvo 532782 SSSR, MPK G01N 3/08. Sposob ispy`taniya materialov pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Method of testing materials in a flat stressed state] / Lebedev A. A., Koval`chuk B. I., Lamashevskij V. P. [etc.]; opublikovan: 25.10.76; patentoobladateli: Institut problem prochnosti AN USSR.

10. Avtorskoe svidetel`stvo 1670506 SSSR, MPK G01N 3/32. Sposob ustalostny`x ispy`tanij

materiala pri neodnorodnom napryazhennom sostoyanii i obrazecz dlya ego osu-shhestvleniya [A method for fatigue testing of a material under an inhomogeneous stress state and a sample for its implementation] / Kapustin V. I., Sidorov O. T.; opublikovan: 15.08.91; patentoobladateli: Gosudarstvenny`j soyuzny`j sibirskij nauchno-issledovatel`skij institut aviacii im. S. A. Chaply`gina i Novosibirskij institut inzhenerov vodnogo transporta.

11. Axrimenko V. L., Kozlov I. A. K issledovaniyu dvuxosnogo rastyazheniya na plos-kix obrazczax [To study biaxial stretching on flat samples] // Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory]. 1969. № 8. S. 996–997.

12. Butushin S. V., Smy`kov V. G. Metod provedeniya ispy`tanij na ustalost` pri dvux-osnom napryazhennom sostoyanii [A method for conducting fatigue tests in a biaxial stress state] // Dinamika, vy`noslivost` i nadezhnost` aviacionny`x kon-strukcij i system [Dynamics, endurance and reliability of aircraft structures and systems]: sb. nauch. tr. M., 1978. Vy`p. 2. S. 3–8.

13. Bellett D. A., Morel` F., Morel` A. [etc.]. Dvuxosny`j ustalostny`j obrazecz dlya odnoosnogo nagruzheniya [Biaxial fatigue pattern for uniaxial loading] // Napryazhenie [Stress]. 2011. № 47 (3). S. 227–240.

14. Patent na izobretenie RU 2516599 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 1/28 Priz-maticheskij obrazecz dlya ocenki prochnosti materiala [A prismatic sample for evaluating the strength of the material] / Czvik L.B., Zen`kov E.V., Py`xalov A.A. i dr.; opublikovan: 20.05.2014; patentoobladateli: Federal`noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya Irkutskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya (FGBOU VO IrGUPS) (RU).

15. Czvik L.B., Zen`kov E.V., Py`xalov A.A. Vliyanie geometricheskix parametrov ploskocilindricheskix obrazczov s koncentratorami napryazhenij na vid ix napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [The influence of geometric parameters of flat-cylindrical samples with stress concentrators on the appearance of their stress-strain state]. Sovremenny`e texnologii. Sistemny`j analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling] №3 (31), Irkutsk, IrGUPS, 2011 – S. 35–41.

16. Patent na izobretenie RU 2360227 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 3/08 Obrazecz dlya ocenki prochnosti materiala pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [A sample for evaluating the strength of a material in a complex stress state] / Czvik L.B. Che-repanov A.P., Py`xalov A.A. i dr.; opublikovan: 27.01.2009; patentoobladateli: Otkry`toe akcionernoe obshhestvo «Irkutskij nauchno-issledovatel`skij i konstruktorskij institut ximicheskogo i nefryanogo mashinostroeniya» (OAO «IrkutskNIIximash») (RU), Gosudarstvennoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego professional`nogo obrazovaniya «Irkutskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet» (GOU IrGTU) (RU), Otkry`toe akcioner-noe obshhestvo «Angarskaya nefteximicheskaya kompaniya» (OAO «ANXK») (RU).

17. Zen`kov E.V., Czvik L.B., Py`xalov A.A. Diskretnoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ploskocilindricheskix obrazczov s koncentratorami napryazhenij v vide kanavok [Discrete modeling of the stress-strain state of flat-cylindrical samples with stress concentrators in the form of grooves] // Vestnik IrGTU. 2011. №7. S. 64 – 69.

18. Patent na izobretenie RU 2734276 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 1/28 Dis-kovy`j obrazecz dlya ocenki konstrukcionnoj prochnosti materiala [A disk sample for evaluating the structural strength of a material] / Czvik L.B., Zen`kov E.V., Bocharov I.S. i dr. ; opublikovan: 14.10.2020; patentoobladateli: Federal`noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya Irkutskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya (FGBOU VO IrGUPS) (RU).

19. Smirnov-Alyayev G.A. Mexanicheskie osnovy` plasticheskoy obrabotki metallov. Inzhenerny`e metody` [The mechanical foundations of plastic processing of metals. Engineering methods]/ G.A. Smirnov-Alyayev. – L.: «Mashinostroenie». 1968. – 272 s.

Информация об авторах

Маломыжнев Дмитрий Олегович – аспирант кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kbprf13@gmail.com

Цвик Лев Беркович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: tsvik_1@mail.ru

Зеньков Евгений Вячеславович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Управление качеством и инженерная графика», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zen_e@mail.ru

Пыхалов Анатолий Александрович - д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy Olegovich Malomyzhev - Post-Graduate Student of Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kbprf13@gmail.com

Lev Berkovich Tsvik - Doctor of Engineering Science, the Full Professor of Department «Cars and carriage facilities», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tsvik_1@mail.ru

Evgeniy Vyacheslavovich Zenkov - Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the department «Quality management and engineering graphics», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zen_e@mail.ru

Anatolij Aleksandrovich Pykhalov –Doctor of Engineering Science, the Full Professor of Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru