

## ДВУХОСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ С ОДНОЙ ОСЬЮ НАГРУЖЕНИЯ

**Обоснована необходимость экспериментальных исследований по оценке скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении. Сделан обзор испытательных машин для проведения двухосных испытаний металлических образцов, устройств и приспособлений, используемых для обеспечения двухосного нагружения. Описано оригинальное приспособление для распределения вертикального усилия испытательной машины по двум осям крестообразного образца.**

**Ключевые слова:** усталостные испытания, крестообразный образец, поверхностная трещина, двухосное нагружение, коэффициент двухосности нагружения, испытательная машина.

Известные решения линейной механики разрушения предполагают отсутствие возмущения напряжений в направлении параллельном плоскости трещины. При этом для трещин, развивающихся по типу нормального отрыва, решающее значение на процесс разрушения должны оказывать напряжения, перпендикулярные плоскости трещины, поле которых характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений. В связи с этим рост усталостных трещин, как правило, изучался на основе экспериментов, проведенных при одноосном нагружении.

В последние годы было проведено достаточно много исследований, в том числе и экспериментальных, по оценке скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении. В результате удалось установить, что результаты испытаний при двухосном нагружении значительно отличаются от результатов одноосных испытаний, если эти сравнения проведены корректно. Двухосное нагружение оказывает влияние на развитие напряжений и деформаций в области фронта трещины, на направление и скорость роста трещины, на размеры и форму зоны пластической деформации в вершине трещины.

Экспериментальная механика разрушения является составной частью экспериментальной механики и механики разрушения [1–3]. Она рассматривает экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния тел с трещинами, определения упругих и пластических деформаций в вершине трещины, регистрации формы, размеров и величины раскрытия трещин, оценки скорости роста усталостных трещин при переменных нагрузках, определения вязкости разрушения материалов и др.

Большинство исследователей проводят испытания по изучению трещин на образцах простой формы при одноосном нагружении, хотя в реальных

условиях трещина, как правило, развивается при сложном напряженном состоянии и, в частности, при двухосном напряженном состоянии.

Проведение экспериментальных исследований, в которых создавали двухосное напряженное состояние в образцах, первоначально было связано с необходимостью проверки критериев пластичности [4, 5]. В основном эти исследования проводились на тонких трубчатых образцах, нагруженных внутренним давлением, осевой силой и крутящим моментом (рис. 1а). Напряжения в таких образцах вычисляются из условия равновесия, а деформации по приращению диаметра образца, изменению базовой длины и угла закручивания. Техника таких испытаний достаточно сложна и требует специальных машин и высокоточных измерительных приборов. Несмотря на это, подобные испытания широко применяются, так как они являются практически единственным способом, позволяющим непосредственно проверить условие пластичности в широком диапазоне изменения соотношений между напряжениями. На рис. 1б изображен цилиндрический образец для усталостных испытаний при двухосном нагружении [6]. Недостатком таких испытаний является то, что реализуется только плоское напряженное состояние.

Образцы с криволинейной поверхностью имеют форму цилиндров, эллиптических или сферических сегментов [7]. Недостатками образцов такого типа является неоднородность напряженного состояния по толщине стенки и невозможность исследования несквозных трещин из-за малой толщины образцов.

На рис. 2а показан образец, выполненный в виде сегмента полого цилиндра 1, имеющего в плане крестообразную форму с лучами 2 [8, 9].

Передача внешнего усилия в центральную зону осуществляется при помощи торцов сегмента. В центральной зоне сегмента образуется локальное двухосное напряженное состояние. На рис. 2б

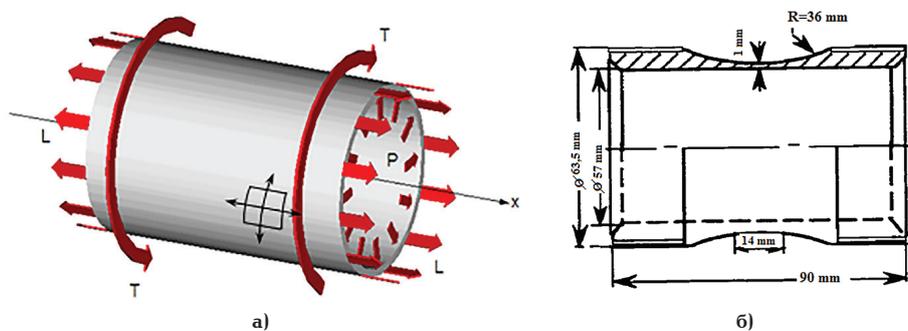


Рис. 1. Цилиндрический образец для двухосных испытаний:  
а) образец для усталостных испытаний; б) схема нагружения

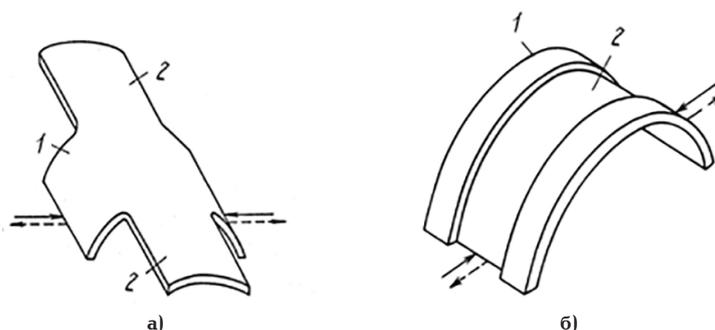


Рис. 2. Образцы в виде цилиндрического сегмента

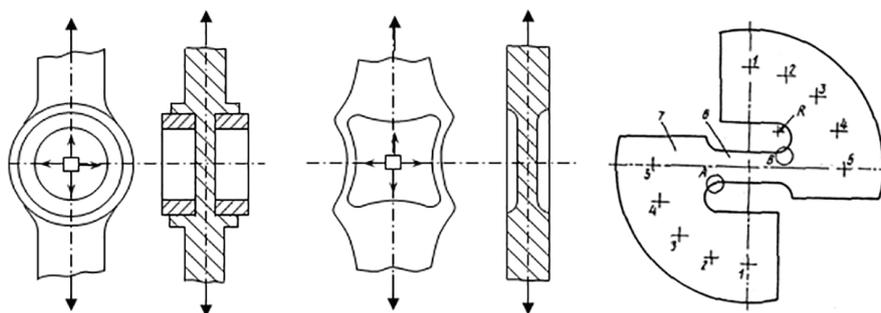


Рис. 3. Специальные образцы для двухосных испытаний

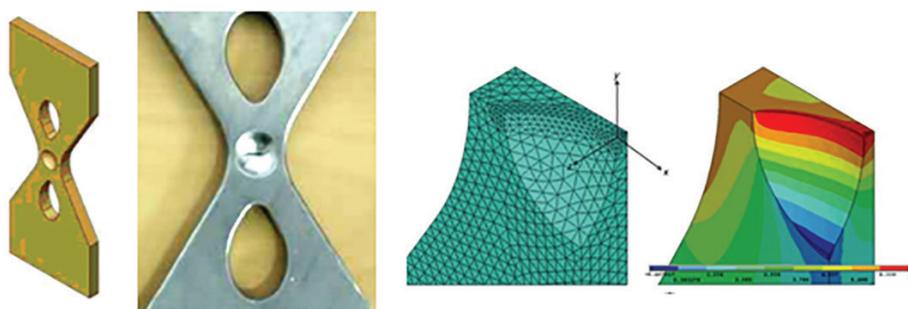


Рис. 4. Образец для двухосных испытаний и его конечноэлементная модель

представлен образец, выполненный из части испытуемой трубы в виде разрезанного кольца. Концы кольца 1 предназначены для нагружения образца. Образец предназначен для нагружения усилиями, направленными по одной оси. Рабочая часть 2 образца выполнена в виде проточки на его наружной поверхности.

Особо стоит отметить плоские образцы специальной формы, которые позволяют создать двух-

осное напряженное состояние в рабочей части при испытании на одноосное растяжение (рис. 3) [10–14].

В работе [15] представлен новый образец для усталостных испытаний с трещиной (рис. 4), в котором двухосное напряженное состояние достигалось с помощью одноосного нагружения. Это позволило решать проблему двухосного нагружения с использованием обычных одноосных испытательных ма-

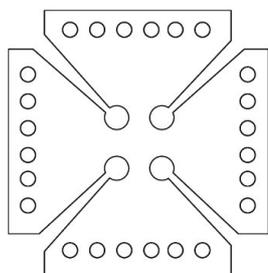


Рис. 5. Типичный крестообразный образец

шин. В этом исследовании напряженное состояние всего образца и его рабочей части определялось методом конечных элементов (МКЭ). Для этого образца коэффициент двухосности напряжений  $\lambda$ , определяемый как отношение нормальных напряжений по горизонтальной оси  $\sigma_x$  к нормальным напряжениям по вертикальной оси  $\sigma_y$ ,  $\lambda = \sigma_x/\sigma_y$ , оказался равным примерно 0,45.

Из группы плоских образцов наибольшее распространение для двухосных испытаний получили крестообразные образцы (рис. 5) [16]. Размеры и форма крестообразных образцов, как правило, зависят от испытательных машин и оборудования для создания двухосного нагружения.

Создание двухосного нагружения крестообразных образцов может осуществляться двумя способами:

— на специальных испытательных машинах, создающих двухосное нагружение;

— на одноосных испытательных машинах с помощью дополнительных устройств или приспособлений для двухосного нагружения крестообразных образцов [17–19].

В настоящее время созданы и успешно применяются испытательные машины, в которых нагружение осуществляется независимо по двум взаимно перпендикулярным направлениям (рис. 6).

Для реализации двухосного нагружения крестообразных образцов на одноосных испытательных машинах разработано и создано большое количество оборудования и приспособлений, некоторые из которых [20–23] представлены на рис. 7 и 8.

При всем многообразии представленные в обзоре устройства и образцы для реализации двухосного нагружения в металлах имеют существенный недостаток. Как правило, они предназначены для создания двухосного напряженного состояния в тонкостенных конструкциях или образцах.

В рамках исследования зависимости скорости роста несквозных усталостных трещин от степени двухосности нагружения  $\lambda = \sigma_x/\sigma_y$  для проведения усталостных испытаний возникла необходимость испытания толстостенных стальных образцов при значительных циклических нагрузках.

Особенностью поверхностных трещин является тот факт, что для одинаковых размеров трещины, измеренных по поверхности пластины, сквозная трещина по сравнению с поверхностной трещиной имеет значительно больший коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ . Это означает, что для

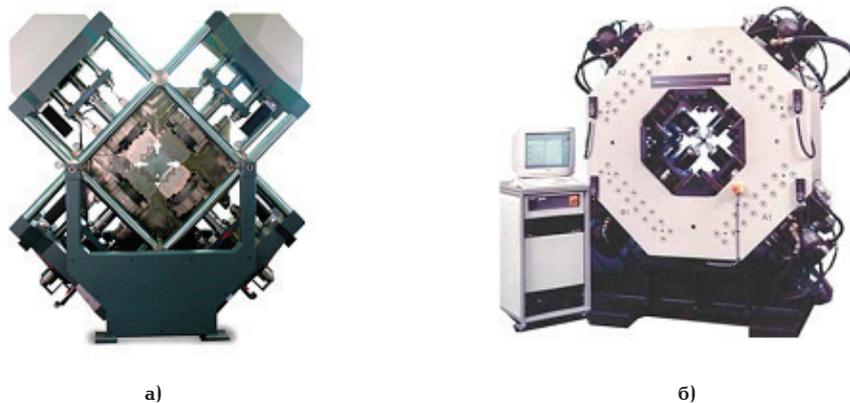


Рис. 6. Машины для двухосных испытаний: а) машина фирмы Zwick; б) машина фирмы Instron

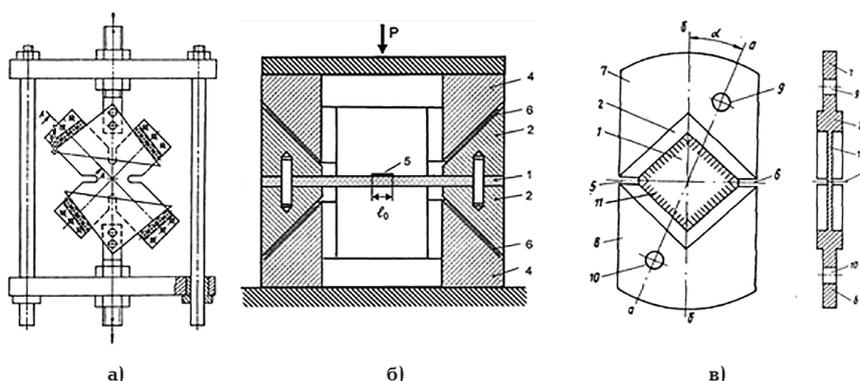


Рис. 7. Приспособления для создания двухосного нагружения: а) [20], б) [21], в) [22]



Рис. 8. Рычажный механизм для создания двухосного нагружения фирмы Zwick

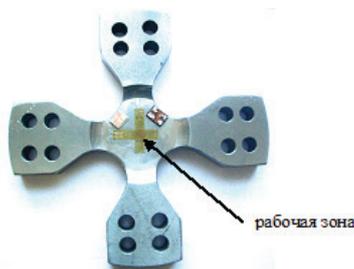


Рис. 9. Толстостенный крестообразный образец

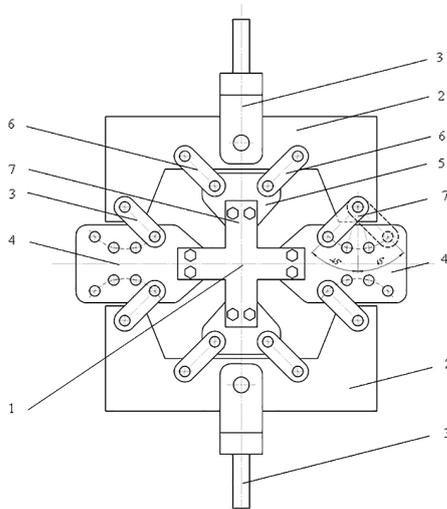


Рис. 10. Устройство для двухосного нагружения крестообразного образца

испытательной машины, способной создавать большое одноосное растяжение, необходимо создание специальных устройств повышенной прочности для двухосного нагружения образцов. Такое приспособление должно преобразовывать одноосное растяжение по вертикальной оси в двухосное нагружение для испытаний на растяжение-растяжение и растяжение-сжатие. Величина нагрузки испытательной машины должна быть достаточной для того, чтобы значение коэффициента интенсивности

напряжений  $K_I$  превысило пороговое значение  $K_{th}$ , и поверхностная трещина развивалась в стабильном режиме. В результате несложных вычислений было установлено, что компромиссным вариантом является толщина образца, равная 10 мм. В этом случае можно ограничиться величиной одноосной нагрузки испытательной машины до 20 тонн и наблюдать рост поверхностных трещин по толщине образца на глубину от 3 до 10 мм.

После проведенного анализа достоинств и недостатков описанных двухосных испытаний для проведения экспериментов были выбраны крестообразные образцы (рис. 9) с толщиной рабочей зоны 10 мм.

Для проведения экспериментов на крестообразных образцах большой толщины была использована гидравлическая испытательная машина ГРМ-1 с пульсатором, способная создавать циклические нагрузки с большой амплитудой. Испытательная машина ГРМ-1 способна создавать усилие по вертикальной оси до 50 тонн. Гидравлический пульсатор позволяет создавать отнулевой синусоидальный цикл нагружения с частотой до 10 Гц.

Однако данная испытательная машина способна создавать лишь одноосное нагружение по вертикальной оси, в то время как целью исследований являлись двухосные испытания на растяжение-сжатие и растяжение-растяжение.

Для распределения вертикального усилия испытательной машины по двум осям крестообразного образца было разработано специальное приспособление [24]. С помощью приспособления в вертикальном направлении перпендикулярно плоскости трещины создается растягивающее усилие, а в горизонтальном направлении параллельно плоскости трещины создается как растягивающее, так и сжимающее усилие.

Данный технический результат был получен путем введения в кинематическую схему дополнительного элемента в виде траверсы с промежуточными тягами.

Применяемая в устройстве система тяг распределяет вертикальную растягивающую нагрузку от испытательной машины по двум взаимно перпендикулярным осям крестообразного образца. Изменяя угол установки тяг, можно добиться широкого диапазона соотношений нагрузок по осям  $\lambda = P_x/P_y$  (от  $-1$  до  $1$ ), где  $P_x$  и  $P_y$  — нагрузки, соответственно по горизонтальной и вертикальной осям.

Устройство для испытаний на прочность испытательного образца (рис. 10) является шарнирным механизмом, который состоит из верхней и нижней траверсы 2, силовых тяг 3, горизонтальных 4 и вертикальных 5 накладок, передающих тяг 6 и 7.

Траверсы представляют собой сдвоенные металлические пластины. В сквозном отверстии, расположенном на вертикальной оси траверсы, через шарнирный палец крепится силовая тяга 3, которая, в свою очередь, закрепляется в стандартных захватах испытательной машины. Кроме этого, в траверсе имеются еще 4 сквозных отверстия, расположенных симметрично относительно вертикальной оси. В двух отверстиях, расположенных ближе к центру, через шарнирные пальцы установлены тяги 6, передающие усилие от траверсы 2 к вертикальным накладкам 5. В двух крайних отверстиях через аналогичные шарниры закрепляются тяги 7, предназначенные для передачи усилия от траверсы к горизонтальным накладкам 4.



по формуле:  $P_{x_r} = P_r \cdot \sin \alpha_r$ . Как и в вертикальных накладках, горизонтальные усилия, возникающие в тягах, суммируются, а их результирующая  $P_{x_{\Sigma}}$  направлена вдоль горизонтальной оси крестообразного образца. Конструкция горизонтальной накладки 4 (рис. 10) предусматривает установку тяг 7 под различным углом наклона к вертикальной оси  $\alpha_r$ . Это решение позволяет при неизменном угле наклона тяг 6, передающих вертикальное усилие, изменять величину горизонтальной силы  $P_{x_{\Sigma}}$  в большом диапазоне. При отрицательном значении угла  $\alpha_r$  меняется и направление силы  $P_{x_{\Sigma}}$ . На рис. 11 приведены примеры установки тяг под углом  $\alpha_r = 45^\circ$  и  $\alpha_r = -45^\circ$ . Так, в случае абсолютной жесткости элементов устройства, создающих силовые цепочки и отсутствия трения в шарнирах при  $\alpha_r = \alpha_b = 45^\circ$  соотношений нагрузок по осям  $\lambda = 1$ , т.к.  $P_{y_{\Sigma}} = P_{x_{\Sigma}}$ , а при  $\alpha_r = -45^\circ$  соотношений нагрузок по осям  $\lambda = -1$ , т.к.  $P_{y_{\Sigma}} = -P_{x_{\Sigma}}$ . Изменение угла наклона тяг осуществляется путем переноса точки установки соответствующего шарнира на горизонтальной планке.

Описываемая конструкция применима для плоского асимметричного нагружения испытываемых образцов на испытательных машинах большой нагружающей способности, предназначенных для одноосных испытаний.

Конструктивные особенности устройства позволяют реализовать нагружение трех типов: одноосное растяжение; двухосное растяжение; растяжение-сжатие.

Применяемая в устройстве система тяг распределяет вертикальную растягивающую нагрузку от испытательной машины по двум взаимно перпендикулярным осям крестообразного образца. Изменяя угол установки тяг, можно добиться широкого диапазона соотношений нагрузок по осям  $\lambda = P_x/P_y$ , где  $P_x$  и  $P_y$  — нагрузки, соответственно по горизонтальной и вертикальной осям. В идеальном случае этот диапазон может принимать значение от  $-1$  до  $+1$ .

#### Библиографический список

1. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. М.: Мир, 1972. 246 с.
2. Кобаяси А. Экспериментальная механика. В 2 кн. / пер. с англ. под ред. Б. Н. Ушакова. М.: Мир, 1990. Кн. 1. 615 с. ISBN 5-03-001543-4.
3. Керштейн И. М., Ключников В. Д., Ломакин Е. В. [и др.]. Основы экспериментальной механики разрушения. М.: Изд-во МГУ, 1989. 138 с. ISBN 5-211-00318-7.
4. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2003. 701 с. ISBN 5-9221-0141-2.
5. Жуков А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии // Инженерный сборник. 1956. Т. 20. С. 37–48.
6. Varvani-Farahani A. Biaxial fatigue crack growth and crack closure under constant amplitude and periodic compressive overload histories in 1045 steel. Ontario, Waterloo, 1998. 179 p.
7. 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.
8. А. с. 1832186 СССР, МКИ G 01 N 3/32. Образец для испытания металлических труб на усталость при двухосном напряженном состоянии / Есиев Т. С., Басиев К. Д., Стеклов О. И. № 4915829/28; заявл. 04.03.91; опубл. 07.08.93, Бюл. № 29.
9. Пат. 2073842 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/08. Образец для испытания металла труб при двухосном напряженном состоянии / Есиев Т. С., Басиев К. Д., Стеклов О. И. [и др.]. № 5042491/28; заявл. 18.05.92; опубл. 20.02.1997, Бюл. № 7.
10. Лебедев А. А., Бойко А. В., Музыка Н. Р. Метод испытаний при равномерном двухосном растяжении // Проблемы прочности. 1982. № 2. С. 105–107.
11. А. с. 532782 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Способ испытания материалов при плоском напряженном состоянии / Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Ламашевский В. П. [и др.]. № 2043922/28; заявл. 09.07.74; опубл. 25.10.76, Бюл. № 39.
12. А. с. 1670506 СССР, МКИ G 01 N 3/32. Способ усталостных испытаний материала при неоднородном напряженном состоянии и образец для его осуществления / Капустин В. И., Сидоров О. Т. № 4739727/28; заявл. 25.09.89; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.
13. Ахрименко В. Л., Козлов И. А. К исследованию двухосного растяжения на плоских образцах // Заводская лаборатория. 1969. № 8. С. 996–997.
14. 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.
15. Bellett D. A., Morel F., Morel A. [et al.]. Biaxial Fatigue Specimen for Uniaxial Loading // Strain. 2011. No. 47 (3). P. 227–240.
16. Mathiak F., Krawietz A., Nowack H., Trautmann K.-H. Cruciform Planar Specimen for Biaxial Materials Testing. US patent 5144844; filed April 21st, 1990; published September 8th, 1990.
17. А. с. 769399 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Устройства для испытания плоских крестообразных образцов на двухосное растяжение / Лебедев А. А., Музыка Н. Р. № 2649991/25-28; заявл. 31.07.78; опубл. 07.10.80, Бюл. № 37.
18. А. с. 638871 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Установка для испытания образцов на двухосное растяжение / Максименков В. И., Баскаков С. Т., Одинг С. С. № 2409830/25-28; заявл. 04.10.76; опубл. 25.12.78, Бюл. № 47.
19. А. с. 476484 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Устройства к машине для испытания крестообразных образцов при двухосном растяжении / Макушек Е. М., Резников В. И., Сегал В. М. 1975, № 1929305/25-28; заявл. 13.06.72; опубл. 05.07.75, Бюл. № 25.
20. А. с. 769399 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Устройство для испытания плоских крестообразных образцов на двухосное растяжение / Лебедев А. А., Музыка Н. Р. № 2649991/25-28; заявл. 31.07.78; опубл. 07.10.80, Бюл. № 37.
21. Clay S. B. Biaxial Testing Apparatus. US patent 5905205; filed April 6th, 1998; published May 18th, 1999.
22. Пат. 2377531 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/08. Способ нагружения плоского образца / Захаров В. А., Ульянов А. И. № 2008146466/28; заявл. 24.11.08; опубл. 27.12.09, Бюл. № 36.
23. А. с. 1525550 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Способ испытания материалов при плоском напряженном состоянии / Островский А. А., Бондаренко А. А. № 4416574/25-28; заявл. 27.04.88; опубл. 30.11.89, Бюл. № 44.
24. Пат. 176972 Российская Федерация, МПК G 01 M 13/00. Устройство для двухосных испытаний крестообразных образцов / Вансович К. А., Ядров В. И. № 2017126593; заявл. 24.07.17; опубл. 05.02.18, Бюл. № 4.

«Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология».

SPIN-код: 5083-9579

AuthorID (РИНЦ): 685945

Адрес для переписки: vansovichka@mail.ru

**ЯДРОВ Виктор Иванович**, кандидат технических наук, доцент Военного учебного центра.

SPIN-код: 5500-7943

AuthorID (РИНЦ): 891137

Адрес для переписки: ja-vi@mail.ru

#### Для цитирования

Вансович К. А., Ядров В. И. Двухосные испытания металлических образцов на испытательных машинах с одной осью нагружения // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 10 – 16. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-10-16.

Статья поступила в редакцию 14.07.2020 г.

© К. А. Вансович, В. И. Ядров