

УДК 620.179.14/15

## Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения

Бусько В.Н.

Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила 17.08.2015

Принята к печати 05.11.2015

Ситуация, когда металл конструкции подвергается одновременному воздействию двух и более источников простых напряжений широко распространена в машиностроении, авиастроении, строительстве. Усталостная долговечность материала в результате бигармонического нагружения, в 1,5–4 раза ниже, чем одночастотном. В отличие от одночастотного при бигармоническом нагружении за счет интенсификации процесса накопления усталостных повреждений происходит ускоренное наступление процесса разрушения конструкции. Процесс накопления усталостной повреждаемости в материале при бигармоническом нагружении отражает более близкую к реальности ситуацию в конструкции. Цель работы – создание эффективной малогабаритной установки для испытаний и исследований на усталость. Для решения поставленных задач разработана и изготовлена лабораторная установка для испытания и исследования ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. При исследованиях использовался магнитный метод эффекта Баркгаузена. В работе представлена конструкция установки, подробно описан принцип действия, а также приведены основные технические характеристики. Принцип работы основан на использовании бигармонического нагружения на оба конца образца с использованием двух электродвигателей и двух специальных силовозбудителей в виде подшипников качения. Установка и методика испытаний образцов путем независимого регулирования двухчастотных циклических нагружений позволяет моделировать состояние исследуемого образца, приближенного к реальным условиям работы конструкции. Установка позволяет более детально исследовать трещиностойкость материала, стадии распространения усталостных трещин, выявлять новые закономерности развития процесса усталости. В отличие от аналогов установка имеет малые размеры и вес (длина образцов – до 0,2 м; ширина – 0,13 м; высота – 0,25 м; вес – 12 кг) и позволяет повысить производительность и достоверность испытаний в 1,5–2 раза.

**Ключевые слова:** бигармоническое (двухчастотное) нагружение, изгибные напряжения, циклирование, усталость, магнитный шум.

---

**Адрес для переписки:**

Бусько В.Н.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

---

**Address for correspondence:**

Busko V.N.  
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

---

**Для цитирования:**

Бусько В.Н.  
Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость  
с помощью бигармонического нагружения  
Приборы и методы измерений  
2015. – Т. 6, № 2. – С. 181–187

---

**For citation:**

Busko V.N.  
Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of  
biharmonic lading  
Devices and Methods of Measurements  
2015, vol. 6, No. 2, pp. 181–187

## Введение

Усталостное разрушение металлических материалов, обусловленное действием динамических, повторных и знакопеременных нагрузок относится к основному виду разрушения материалов [1]. В процессе эксплуатации значительная часть деталей машин и элементов различных конструкций подвергаются бигармоническому (двухчастотному) циклическому нагружению, при котором на циклическую (периодическую) нагрузку наложены гармоники малых амплитуд относительно высоких частот. При таком виде нагружения, в отличие от одночастотного, за счет интенсификации процесса накопления усталостных повреждений происходит ускоренное наступление процесса разрушения. Обычно усталостная долговечность, обусловленная бигармоническом нагружением, в 1,5–4 раза ниже, чем при одночастотном (гармоническом) [2]. Процесс накопления усталостной повреждаемости в материале становится более близким к реально работающему элементу конструкции. Нагружение, при котором металл подвергается одновременному воздействию двух и более источников сложнапряженного состояния, широко распространено в машиностроении (элементы автомобильных рам, кузовов, лопадки двигателей, сварные соединения), авиастроении (фюзеляж, нервюры крыла), строительстве (фермы и опоры мостов, мачт). Кроме того, испытания и исследования образцов на основе бигармонического нагружения позволяют более детально исследовать трещиностойкость материалов, стадии распространения усталостных трещин и выявлять новые закономерности развития процессов усталости в различных материалах.

Оптимальным вариантом и необходимым условием для изучения усталостных явлений при бигармоническом нагружении является проведение механических испытаний с помощью различных машин, установок, стендов, устройств с использованием образцов.

Бигармоническое нагружение реализуется различными схемами, описанными в [2–7]. Однако существующие испытательные машины, установки и оборудование подобного рода, как правило, громоздки, дороги и трудоемки в эксплуатации, представляют собой технически сложные системы, содержат кривошипные механизмы, электродинамические вибраторы, комплекты гидроцилиндров и другие многочисленные узлы, блоки [3–7], что в лабораторных условиях сложно обеспечить

и реализовать. Важность учета моделирования условий нагружения на экспертную оценку эксплуатационной нагруженности материала отмечалась, например, в [8, 9]. В связи с этим целью работы являлось создание эффективной малогабаритной установки для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе, основанной на расширении функциональных возможностей испытательной техники, повышении производительности испытаний и достоверности исследований физико-механического состояния на основе нерегулярного (двухчастотного) нагружения испытуемых образцов, изготовленных из материала элемента контролируемой конструкции или изделия.

## Описание конструкции установки и принцип работы

В работе представлена разработанная и изготовленная лабораторная малогабаритная установка, основанная на бигармоническом нагружении и предназначенная для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. Установка реализует двухчастотный режим нагружения образца, пример которого представлен на рисунке 1 [2].

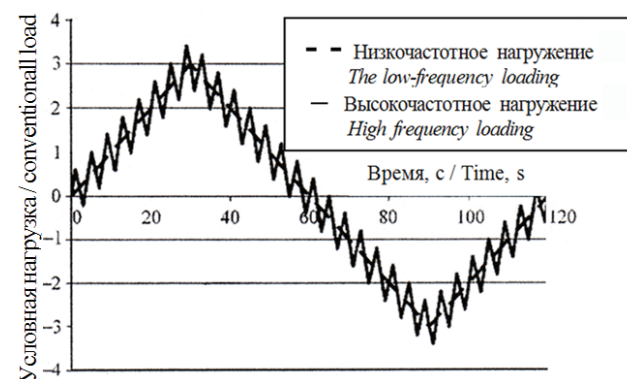


Рисунок 1 – Условная схема бигармонического нагружения образца при усталостных испытаниях

Figure 1 – Schematic diagram of biharmonic sample loading during fatigue tests

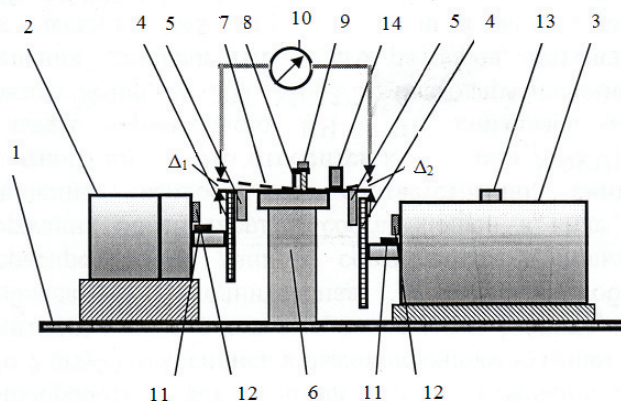
При создании установки использовались предложенные нами ранее устройство и методика создания в образце изгибных напряжений с помощью электродвигателя и силовозбудителя в виде подшипника качения, позволяющих осуществлять одночастотное нагружение свободного конца консоли закрепленного образца [10, 11]. Для реализации бигармонического нагружения установка дополнительно содержит второй электродвига-

тель, второй силовозбудитель, а образец закрепляется посередине таким образом, чтобы оба конца образца оставались свободными.

Принцип работы установки состоит в том, что нагружение на испытуемый образец производится одновременно двумя частотами  $f_1$  и  $f_2$ , при этом изгибающие моменты создаются на обоих концах испытуемого плоского образца прямоугольной формы независимо: один конец образца подвергается низкочастотному циклированию с частотой  $f_1$ , второй – высокочастотному с частотой  $f_2$ . В результате одновременного воздействия двух частот нагружения с амплитудами напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в образце (преимущественно в зоне образования максимальных изгибных напряжений) с увеличением числа низкочастотного  $N_1$  и высокочастотного  $N_2$  циклов нагружения происходит накопление усталостной повреждаемости и образуются вначале невидимые, затем видимые усталостные трещины, вследствие чего снижается механическая прочность образца и происходит разрушение.

На рисунке 2 представлена схема малогабаритной лабораторной установки (без измерительного магнитошумового прибора) для бигармонических испытаний образцов на усталость.

Установка содержит станину 1, на которой установлены два электродвигателя: двигатель 2 с редуктором с низкой частотой вращения вала и двигателя 3 (высокая частота) для создания в образце двухчастотных изгибных напряжений. На валах электродвигателей 2 и 3 установлены стальные диски 4 с размещенными на них подшипниками качения 5, основание 6, на котором размещен испытуемый образец 7 плоской формы, прижимаемый Г-образной пластиной 8 и закрепленной с помощью двух болтов 9 к основанию 6 так, чтобы она прижимала образец 7 сверху, механический или электронный индикатор прогиба образца 10, закрепленный к станине 1, основанию 6 или электродвигателям 2 или 3, два постоянных магнита 11, два геркона 12 с замыкающимися контактами от магнитного поля, двухшкальный (на каждую частоту циклирования) электронный счетчик 13 оборотов вала электродвигателей и магнитошумовой (магнитоакустический) преобразователь Баркгаузена (ПБ) 14. Для создания изгибающих моментов в образце использовались описанные в [10, 11] схема и методика нагружения образца, основанные на применении специального силовозбудителя при консольном защемлении образца и циклических знакопеременных нагружениях.



**Рисунок 2** – Схема макета действующей установки для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения: 1 – станина; 2 – электродвигатель с низкой частотой вращения вала с редуктором; 3 – электродвигатель с высокой частотой вращения вала; 4 – стальные диски; 5 – подшипники качения; 6 – основание; 7 – образец; 8 – Г-образная пластина; 9 – болты крепления; 10 – индикатор; 11 – постоянные магниты; 12 – герконы; 13 – двухшкальный электронный счетчик оборотов; 14 – магнитошумовой преобразователь Баркгаузена

**Figure 2** – Layout settings for sample testing of fatigue using the bi-harmonic loading: 1 – frame; 2 – the a low speed electric motor with; 3 – the high speed electric motor at; 4 – steel wheels; 5 – power pathogens; 6 – base; 7 – sample; 8 – pressing plate; 9 – bolts; 10 – the deflection indicator; 11 – permanent magnets; 12 – sealed contact; 13 – electronic rev counter; 14 – magnetic-noise Barkhausen converter

Установка работает следующим образом. Испытуемый образец 7 плоской формы устанавливается на основание 6 и с помощью специальной Г-образной прижимной пластины 8 болтами 9 закрепляется к основанию 6. С помощью перемещения подшипников качения 5, установленных на плоскостях стальных дисков 4, подбора их диаметров или изменения положения основания 6 по высоте с помощью механического индикатора перемещения часового типа 10 (или электронного) устанавливается необходимая величина прогиба обоих концов образца  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , характеризующих амплитуду максимальных изгибных напряжений. Пересчет величин прогибов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в значения создаваемых в любой точке поверхности образца 7 механических напряжений (в МПа)  $\sigma$  производится предварительно с помощью известных формул с учетом размеров образца, механических характеристик (упругих постоянных) и расстояний между местом приложения силы и точкой измерения сигнала. После включения электродвигателей 2 и 3 при вращении стальных дисков 4 установ-

ленные на них подшипники 5, выполняющие роль силовозбудителей нагружения, надавливают снизу поперек продольной оси на противоположные концы образца 7, создавая в нем прогибы  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  соответственно. Формы и размеры образцов для исследований приведены на рисунке 3. В соответствии с ГОСТом 25.502-79 соблюдались основные соотношения между геометрическими размерами, что позволяет использовать как специальные, так и стандартные образцы плоской формы, учитывались требования к состоянию поверхности образца (шероховатость и качество обработки). Точность задания нагрузки в процессе испытаний для лабораторной нестандартизованной и не сертифицированной установки не регламентируется, поэтому не оценивалась. При необходимости изучить влияние коэффициентов асимметрии и форму циклов нагружения на кинетику процесса накопления усталостных повреждений с помощью магнитного шума при бигармоническом режиме можно установить на стальных дисках вторую пару подшипников [10, 11].

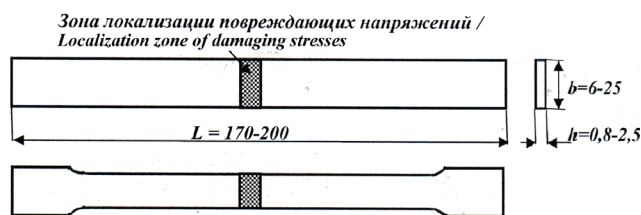


Рисунок 3 – Условная схема бигармонического нагружения образца при усталостных испытаниях

Figure 3 – Schematic diagram of biharmonic sample loading during fatigue tests

В качестве источника низкочастотного нагружения образца 7 в установке использовался однофазный реверсивный электродвигатель типа РД-09 с передаточным отношением 1/137 и частотой вращения вала двигателя  $n = 8,8$  об/мин ( $f_1 = 0,15$  Гц). Такое передаточное отношение позволяет испытывать образцы толщиной до 2–2,5 мм, создавая в них упруго-пластические деформации. Для высокочастотного нагружения использовались электродвигатели переменного тока типа АВЕ-071 со скоростью вращения вала 1350 об/мин ( $f_2 = 23$  Гц) и типа ДАСМ-2УХЛ4 с  $n = 2900$  об/мин ( $f_2 = 48$  Гц). В зависимости от напряжения питания используемого электродвигателя диапазон изменения  $f_2$  может находиться в пределах от 14 до 48 Гц. При использовании двигателей других модификаций частоты вращения могут быть другими.

В результате одновременного действия на образец 7 циклических знакопеременных двухчастотных нагружений в нем с ростом  $N_1$  и  $N_2$  со временем изменяются физико-механические свойства, регистрируемые накладным магнитошумовым (магнитоакустическим) ПБ 14. С помощью ПБ 14 можно производить сканирование вдоль поверхности образца 7, измеряя магнитный шум в любой его части по поверхности и получая его распределение по длине образца. Значения  $N_1$  и  $N_2$  определяются с помощью электронного счетчика импульсов 13, сигнал на который поступает от двух магнитоуправляемых герконов 12, расположенных на корпусах двигателей 2 и 3 и срабатывающих от двух постоянных магнитов 11, закрепленных на валах электродвигателей. В качестве электронного счетчика для определения количества циклов нагружения использовался двухшкальный электронный счетчик с автономным питанием постоянным напряжением 9 В.

Установка обеспечивает независимое регулирование низкой и высокой компонент частот нагружения и максимальных амплитуд изгибных напряжений на обоих концах образца. В результате суперпозиции бигармонического нагружения в образце (в месте его закрепления) происходит накопление усталостной повреждаемости, которая приводит к изменению физико-механического состояния образцов и регистрируется ПБ.

Основные технические характеристики: частоты циклирования:  $f_1 = 0,15$  Гц;  $f_2 = (12–48)$  Гц; амплитуда создаваемых напряжений при низкочастотном циклировании приблизительно равна  $\pm (0–500)$  МПа, высокочастотном  $\pm (0–350)$  МПа; длина образца – 170–200 мм, ширина – (6–25) мм; толщина – 0,8–2,5 мм; максимальный прогиб образца – (0–10) мм; габариты установки – 500 × 130 × 250 мм; масса – 12 кг.

## Заключение

Разработана и изготовлена малогабаритная (длиной до 0,5 м, шириной 0,13 м, высотой 0,25 м и весом 12 кг) лабораторная установка для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. Принцип работы основан на использовании бигармонического (двухчастотного) нагружения образца с применением двух электродвигателей и двух силовозбудителей в виде подшипников качения, предложенных нами ранее для создания изгибных напряжений.

Установка позволяет расширить функциональные возможности испытательной техники за счет упрощения (используется один образец) и универсализации конструкции (схема нагружения представляет собой моноблок), увеличить в 2 раза производительность испытаний, а также осуществлять неразрушающий контроль и исследование усталости с помощью метода магнитных шумов.

Отличается простотой конструкции, малыми габаритами и удобством использования в сравнении с аналогичными громоздкими, сложными в исполнении и эксплуатации дорогостоящими машинами и стендами. Появилась возможность создавать одновременно и независимо бигармонические знакопеременные циклические нагружения с возможностью регулирования частот и амплитуд напряжений, моделируя и приближая состояние образца элемента конструкции, близкого к реальным условиям.

#### Список использованных источников

1. Терентьев, В.Ф. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. – М. : Наука, 2003. – 254 с.
2. Воробьев, А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.
3. Патент РФ 1826031А1, МПК G 01N3/32. Установка для испытания образцов при двухчастотном нагружении / М.Е. Колотников, В.А. Соляников //

БИ. – № 25. – 07.07.1993.

4. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2 / Н.А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – 610 с.

5. Патент РФ 2115910, МПК G 01N3/32. Установка для испытания образцов при двухчастотном нагружении / М.Е. Колотников, В.А. Соляников. – 20.07.1998.

6. Патент РФ 2047134, МПК G 01N3/20. Установка для испытаний образцов на изгиб / Е.В. Лодус // БИ. – № 4. – 27.10.1995.

7. А.с. СССР 1259145, МПК G 01N3/32. Установка для испытаний на усталость при бигармоническом воздействии / В.М. Филонов, В.П. Руденко, К.Б. Кацов // БИ. – № 3. – 23.01.1987.

8. Benasciutti, D. Spectral methods for lifetime prediction under wideband stationary random processes / D. Benasciutti, R. Tovo // Int J Fatigue. – 2005. – № 27(8). – P. 867–877.

9. Benasciutti D. On fatigue cycle distribution in non-stationary switching loadings with Markov chain structure / D. Benasciutti, R. Tovo // Prob Eng Mech. – 2010. – № 25. – P. 406–418.

10. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов / В.Н. Бусько // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 165–167.

11. Патент РБ 5248, МПК G 01N3/32, G 01N27/30. Устройство для испытания плоских образцов на усталость / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, А.Г. Довгялло; заявитель – ГНУ «ИПФ НАН Беларуси» // Оф. Бюлл. – 2009. – № 2. – С. 202–203.

# Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of biharmonic lading

**Busko V.N.**

*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus*

*Received 17.08.2015*

*Accepted for publication 05.11.2015*

**Abstract.** The situation when the metal structure is subjected to the simultaneous impact of two or more sources of simple stress is common in mechanical engineering, aviation and civil engineering. The fatigue life of the material by the impact of Biharmonic loading is 1.5–4 times lower than in single-frequency operation loading. Unlike the single-frequency loading under Biharmonic loading degradation of the material is accelerated because of the intensification of the process of fatigue damage accumulation. Description of the process of damage accumulation of fatigue in the material under biharmonic loading is closer to the real situation. The aim of the work is – to create an effective setting for testing of ferromagnetic samples for fatigue and durability. To achieve the objectives small-sized laboratory facility for testing ferromagnetic sample flexural fatigue developed and produced. Studies have been conducted using the method of magnetic Barkhausen effect. The article describes the design and its basic characteristics, as well as the basic technical characteristics the sample. The principle of operation is based on the bi-harmonic load acting on both ends of the sample. The device use two electric motors with two special agents of power, based on the use of rolling bearings. Installation and testing of samples by the method of independent regulation of dual-frequency cyclic loading allows to simulate the condition of the test sample in the approximation to the real working conditions. This allows a detailed investigation of fracture toughness of the material, the stages of fatigue crack propagation and identify new patterns of development of fatigue. Unlike analog unit has small dimensions and weight (the length of the sample does not exceed 20 cm, width – 13 cm, height – 25 cm, weight of the unit is 12 kg). Use of the setting can improve performance and reliability of tests in two times.

**Keywords:** biharmonic (twofrequency), loading, flexural tensions, cycling, fatigue, magnetic Barkhausen Noise.

---

**Адрес для переписки:**

*Бусько В.Н.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

---

**Address for correspondence:**

*Busko V.N.  
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

---

**Для цитирования:**

*Бусько В.Н.  
Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость  
с помощью бигармонического нагружения  
Приборы и методы измерений  
2015. – Т. 6, № 2. – С. 181–187*

---

**For citation:**

*Busko V.N.  
Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of  
biharmonic lading  
Devices and Methods of Measurements  
2015, vol. 6, No. 2, pp. 181–187*

## References

1. Terentiev V.F. Uсталost' metallicheskih materialov [Fatigue of metal materials]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 254 p. (in Russian).
2. Vorobiov A.Z, Olkin B.I., Srebenev V.N. Soprotivleniye ustalosti elementov konstrukcij [Fatigue resistance of structural elements]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 240 p. (in Russian).
3. Kolotnikov M.E., Soliannikov V.A. Ustanovka dlia ispytaniy obrazcov pri dvukhchastotnom nagruczeniyi [Installation for testing samples at two-frequency loading]. Patent RU no. 1826031A1, IPC G 01N3/32. Bulletin of inventions, no. 25, 07.07.1993.
4. Makhutov N.A. Konstrukcionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Chast' 2 [Structural strength, resources and technological safety. Part 2], Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 610 p. (in Russian).
5. Kolotnikov M.E., Soliannikov V.A. Ustanovka dlia ispytaniya obrazcov pri dvukhchastotnom nagruczeniyi [Installation for testing samples at two-frequency loading]. Patent RU no. 2115910, IPC G 01N3/32, 20.07.1998.
6. Lodus E.V. Ustanovka dlia ispytaniy obrazcov na izgib [Installation for testing of samples for bending]. Patent RU no. 2047134, IPK G 01N3/20. Bulletin of inventions, no. 4. 27.10.1995.
7. Filonov V.M., Rudenko V.P., Kacov K.B. Ustanovka dlia ispytaniy pri bigarmonicheskom vozdeystvii [Installation for testing testing on the effects of fatigue under Bi-harmonic impact]. USSR Author's Certificate no 1259145, IPC G01N3/32. Bulletin of inventions, № 3, 23.01.1987.
8. Benasciutti D., Tovo R. Spectral methods for lifetime prediction under wideband stationary random processes. Int J Fatigue, 2005, no. 27(8), pp. 867–877.
9. Benasciutti D., Tovo R. On fatigue cycle distribution in non-stationary switching loadings with Markov chain structure. Prob Eng Mech, 2010, no. 25, pp. 406–418.
10. Busko V.N. Laboratory unit for investigating fatigue of damage to the plane of the ferromagnetic sample. Russian Journal «Instruments and Experimental Techniques», 2011, no. 1, pp. 165–167.
11. Busko V.N., Vengrinovich V.L., Dovgiallo A.G. Ustrojstvo dlia ispytaniy ploskikh obrazcov na ustalost' [The device for testing flat samples fatigue]. Patent BY № 5248, IPC G01N3/32, G 01N27/30. The applicant—«IAP National Academy of Sciences of Belarus» NASB. Official Bulletin, 2009, no. 2, pp. 202–203.