

ров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

5. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials. Informatics / K. Pansialeyeu [et al.] // Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. – 2020. – № 10, vol. 4. – P. 57–60.

6. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик / В.А. Микитевич [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 18–26.

7. Универсальный цифровой зондовый электродметр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.

УДК 620.179.14/15

## МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ НА УСТАЛОСТЬ С ЗАДАННЫМ АЛГОРИТМОМ НАГРУЖЕНИЯ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработана эффективная методика и создано устройство для проведения циклических механических усталостных испытаний при изгибе стальных образцов одно- или двухчастотным нагружением. Показаны схема устройства и описан принцип работы. Эффективность механических испытаний достигается за счет применения дополнительных силовых элементов в виде подшипников качения с разным их количеством и разными диаметрами. Использование предлагаемой методики и устройства позволяет осуществлять нагружение испытываемых образцов по заданному алгоритму с повышенной производительностью испытаний.

**Ключевые слова:** механические испытания, машины, стенды и устройства для циклических испытаний на усталость, стальные образцы.

## METHODOLOGY AND DEVICE FOR MECHANICAL FATIGUE TESTING OF FERROMAGNETIC SPECIMENS WITH A GIVEN LOADING ALGORITHM

Busko V.N.

*Institute of Applied Physics of Belarus National Academy of Sciences  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** An effective methodology is developed and a device for cyclic mechanical fatigue bending tests of steel specimens by single- or dual-frequency loading is created. The scheme of the device is shown and the principle of operation is described. The efficiency of mechanical testing is achieved by using additional force elements in the form of rolling bearings with different numbers and diameters. The use of the proposed methodology and device allows to carry out loading of test specimens according to a given algorithm with increased productivity of tests.

**Key words:** mechanical testing, machines, benches and devices for cyclic fatigue testing, steel specimens.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Для механических усталостных испытаний образцов стальных материалов применяют различные типы испытательных машин, установок, стендов и устройств одно- или двухчастотным нагружением [1]. Большинство из них основано на использовании кинематической схемы, конькового или чистого изгиба с применением различных кривошипных механизмов, шатунов, вибраторов, гидроцилиндров, пружин, рычагов и других узлов и вспомогательных устройств [1; 2]. Такая схема имеет недостатки из-за сложности регулирования амплитуды нагружения, необходимости иметь множество разноразмерных элементов, усложняющих установку уровня напряжений, снижающих функциональные возможности и производительность механических испытаний. Сложность реализации данного

принципа усугубляется дороговизной и громоздкостью оборудования, большими временными и трудовыми затратами при переналадке устройства под задачу испытаний и низкая производительность механических испытаний. К тому же большинство такого оборудования основано на одночастотном нагружении испытываемого образца.

При испытании образца на усталость с помощью двухчастотного нагружения увеличивается информативность получаемой информации, а на практике, в основном встречаются случаи, когда на образец или изделие одновременно воздействуют две частоты нагружения (низкочастотная и высокочастотная компоненты) [3].

Цель работы – повышение эффективности, производительности испытаний и расширение функциональных возможностей испытательного

оборудования при мало- и многоцикловых испытаниях образца при изгибе с применением одно- или двухчастотного нагружения.

На рисунке 1 показана схема устройства для механических испытаний образцов на усталость (а), фронтальный вид (б) размещения дополнительных силовозбудителей для создания в образце одно- или двухчастотного нагружения и примерный закон изменения создаваемых напряжений в испытуемом образце (в).

При двухчастотном нагружении на обоих концах образца независимо друг от друга создаются разновеликие по частоте и амплитуде изгибающие моменты. Подбором диаметров дополнительных силовозбудителей с помощью индикатора прогиба устанавливают необходимую величину прогибов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  обоих концов образца, создавая в его центре максимальные изгибные напряжения низкой частоты (НЧ) при квазинизком (доли Герца) и высокочастотном (ВЧ) нагружении. Один конец образца подвергается НЧ циклированию с частотами  $f^1, 2f^1, 3f^1, 4f^1$ , второй – высокочастотному с частотой  $f^2$  или  $2f^2$ . В результате вблизи его центра возникают усталостные трещины, снижающие прочность и приводящие к разрушению.

При наличии на диске первого двигателя с НЧ четыре подшипника с разными диаметрами ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ) вместо одного, и соблюдая неравенство  $D_1 < D_2 < D_3 < D_4$ , а на диске с ВЧ два подшипника вместо одного, тем самым, во столько же раз происходит увеличение номиналов НЧ и ВЧ компонент частот нагружения за один оборот вращения вала.

В итоге коэффициент полезного действия низкочастотных испытаний повышается в 4 раза. Меняя поочередно последовательность размещения подшипников, можно изменять алгоритм нагружения в соответствии с целями эксперимента. Аналогично установив на второй диск с ВЧ-нагружением, например, 2 силовых элемента вместо одного, получим двойной эффект [4].

В зоне образования максимальных напряжений (вблизи центра образца) с увеличением  $N$  (количество циклов нагружения) преобразователем Баркгаузена (ПБ) измеряют уровень магнитного шумового сигнала, зависящего от  $\Delta, f, N$  и физико-механических свойств (ФМС) образца. Построив и проанализировав зависимости уровня сигнала от  $\Delta, f, N$ , соотношений  $f^1/f^2$ , или кривые усталости с увеличением  $N$ , можно оценить влияние одно- и двухчастотного нагружения и его алгоритма на усталостную прочность и ФМС образца. То есть, меняя алгоритмы нагружения обеих ветвей нагружения и их комбинации, можно оценить их влияние на прочность и ФМС испытуемого образца.

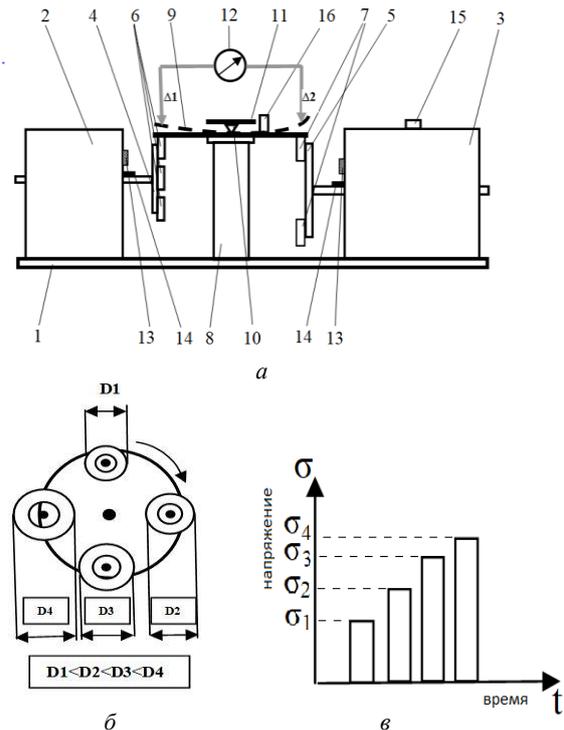


Рисунок 1 – Схема устройства для повышения эффективности механических испытаний на усталость при двухчастотном нагружении образца (а), фронтального расположения силовозбудителей (б) и график закона изменения нагрузки на образец: 1 – станина; 2 – НЧ-двигатель;

3 – ВЧ-двигатель; 4, 5 – стальные диски; 6, 7 – подшипники качения; 8 – основание; 9 – образец; 10 – призма; 11 – пластина; 12 – индикатор прогиба; 13 – герконы; 14 – постоянные магниты; 15 – счетчик числа оборотов; 16 – преобразователь Баркгаузена

Пересчет прогибов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в значения создаваемых в любой точке поверхности образца механических напряжений  $\sigma$  (в МПа) производится с помощью формул сопромата с учетом размеров образца, упругих постоянных стали и расстояний между местом приложения силы и точкой измерения сигнала.

Для нагружения образца НЧ (малоцикловая усталость) использовался однофазный реверсивный электродвигатель типа РД-09 с коэффициентом передачи (редукцией), равной 1/137 и частотой вращения вала двигателя  $n = 8,8$  об/мин ( $f_1 = 0,15$  Гц), что позволяет создавать в образце не только упругие, но и пластические деформации с разными частотными комбинациями НЧ и ВЧ-ветвей. Для ВЧ нагружения использовался электродвигатель переменного тока ДАСМ-2УХЛ4 с номинальной скоростью  $v = 2900$  об/мин (частота циклирования образца 21 Гц). Меняя напряжение питания двигателя можно изменять частоту  $f^2$  нагружения образца в пределах от 14 до 48 Гц.

Изменения ФМС испытуемого образца в зависимости от закона нагружения при одно- или

двухчастотном нагружении при малоцикловых ( $N < 10^5$  циклов) или многоцикловых ( $N > 10^5$ ) испытаниях регистрировались с помощью ПБ и магнитошумовой аппаратуры, разработанной и созданной в ИПФ НАНБ.

Методика и устройство с повышенной производительностью механических испытаний и контроля с применением дополнительных силовых элементов и широкой вариативностью установочных параметров могут быть использованы в лабораторных и заводских условиях для исследования усталости и ФМС материала благодаря снижению материальных, временных и трудовых затрат.

УДК 621

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ**  
Васильцов К.А., Казеко Д.Н., Баранова В.С., Лешкевич С.В., Саечников В.А.

*Белорусский Государственный университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработана система контроля и управления движением аэродинамической платформы для предполетных испытаний студенческих наноспутников в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** аэродинамическая платформа, предполетные испытания, управление движением.

**DEVELOPMENT OF AN AERODYNAMIC PLATFORM MOTION CONTROL  
AND CONTROL SYSTEM**

Vasiltsov K., Kazeka D., Baranova V., Liashkevich S., Sajechnikov V.

*Belarusian State University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** A system for monitoring and controlling the movement of an aerodynamic platform for pre-flight tests of student nanosatellites in laboratory conditions has been developed.

**Keywords:** aerodynamic platform, pre-flight tests, motion control.

*Адрес для переписки: Казеко Д.Н., ул. Курчатова, 5, г. Минск, 220108, Республика Беларусь  
e-mail: dkazeko@gmail.com*

**Введение.** Платформа разрабатывается для тестирования системы управления движением наноспутника или беспилотного летательного аппарата в условиях имитации невесомости в лабораторных условиях. Платформа левитирует на воздушном подшипнике над горизонтально выровненной стеклянной поверхностью. Движение осуществляется с двумя поступательными степенями свободы и одной вращательной с использованием электродвигателей для коррекции движения [1]. Прототип устройства представлен на рисунке 1.

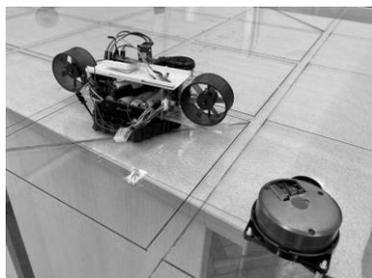


Рисунок 1 – Прототип подвижной аэродинамической платформы

**Литература**

1. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний / Л.М. Школьник. – М. : Metallurgiya, 1978. – 300 с.
2. Испытательная техника : справочник: в 2-х кн.; под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
3. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения / В.Н. Бусько // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 2. – С. 181–187.
4. Устройство для механических испытаний на усталость ферромагнитных образцов бигармоническим нагружением : пат. РБ № 13191 / В.Н. Бусько. – Оpubл. 30.06.2023.

**Устройство аэродинамической платформы.** Платформа состоит из напечатанной на 3D-принтере пластины с профилированными каналами, воздушного микрокомпрессора, подруливающего устройства и системы управления платформой.

Микрокомпрессор подает воздух на воздушные каналы, создавая зазор между платформой и опорной поверхностью, на которой находится платформа (воздушный подшипник [2]). Макет несущей части платформы представлен на рисунке 2. Макет подруливающего устройства представлен на рисунке 3.

Система управления платформой обеспечивается микроконтроллером Raspberry Pi Pico. Для приема внешнего управляющего сигнала на платформу используется ИК-приемник. В качестве подруливающего устройства используется два электродвигателя управляемых драйвером L9110S. Принципиальная электрическая схема модуля управления аэродинамической платформой представлена на рисунке 4.