

УДК 620.179.14/15

## ЛАБОРАТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИМЕРЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

*Бусько В.Н., Винтов Д.А.*

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

*Приведена структурная схема лабораторной системы для исследования усталостной деградации ферромагнитных материалов методом магнитных шумов. Описан принцип работы системы, приведены практические результаты ее использования при оценке степени усталостной деградации ряда конструкционных ферромагнитных сталей и сплавов на основе проведения циклических испытаний и измерения интенсивности магнитного шума. (E-mail: busko@iaph.bas-net.by)*

**Ключевые слова:** усталостные испытания, изгибные напряжения, усталостная деградация, магнитный шум, метод эффекта Баркгаузена.

### Введение

Усталость, как физическое явление, обусловлена действием на металл переменных нагрузок и характеризует его циклическую прочность и долговечность [1]; определяется многими факторами: структурой материала, условиями и способами нагружения, состоянием и свойствами поверхностного слоя, амплитудой, частотой, формой, длительностью и асимметричностью цикла нагружения, условиями эксплуатации (температура, влажность), технологичностью изготовления изделия и др.

Главным источником усталостного разрушения металла конструкции, работающей под нагрузкой, является действие переменных напряжений [2]. При длительной эксплуатации под действием циклических нагрузок в нем возникает усталостная деградация (УД), которая представляет собой процесс изменения основных физико-механических характеристик. Соппротивление усталости, или предел выносливости металла конструкции, определяют путем испытаний образцов, подвергнутых нагружениям различными способами. Диагностика УД металла в последнее время все чаще входит в число необходимых процедур при прогнозировании долговечности изделий и конструкций. Диагностирование и прогнозирование, разработка методов и средств неразрушающего

контроля, а также исследование УД с помощью различных физических методов в настоящее время относятся к важным направлениям и задачам не только физики, неразрушающего контроля, материаловедения, но и приборостроения и измерительной техники. Очевидно, что без соответствующих методик, приборов и специального лабораторного оборудования для испытаний образцов на усталость не представляется возможным достоверно оценить степень УД как критерия прогнозирования долговечности металла элементов конструкции.

В работах [3–5] описаны основные методы и способы испытаний образцов на усталость, большинство которых в настоящее время реализуются в различных устройствах, стендах, прессах, машинах. Однако, высокие стоимость (от 10 тыс. до 100 тыс. \$ в комплекте с программным обеспечением), вес (от 200 кг до 10 т) и значительные габариты (площадь 10–20 м<sup>2</sup>) практически исключают возможность их использования в лабораторных условиях. Кроме того, отсутствие в комплекте с такими устройствами соответствующей измерительной аппаратуры не позволяет создать малогабаритную лабораторную систему для испытаний и исследований материалов на усталость с высокой производительностью.

Целью работы являлось создание малогабаритной недорогостоящей системы для исследования в лабораторных условиях УД образцов

ферромагнитных материалов. В основу идеи работы предлагаемой системы положен принцип создания в испытуемом образце двухсторонних изгибных напряжений с возможностью регулирования амплитуды напряжений, длительности и частоты циклирования, коэффициента асимметрии цикла с одновременной регистрацией изменений физико-механического состояния образца с помощью измерения интенсивности магнитного шума. Изгибные напряжения в образце создаются с помощью механического силового возбудителя в виде двух специально расположенных подшипников качения, обеспечивающего колебательное движение незащемленной части образца. Новизна подхода для создания таким образом напряжений в образце и появления УД подтверждена патентами [6–9].

### Схема и описание эксперимента

Разработанная и созданная в Институте прикладной физики НАН Беларуси лабораторная система для испытания и исследования плоских образцов на усталость состоит из устройства для защемления образца, использующего консольную схему его крепления и создания в нем изгибных напряжений; преобразователя

Баркгаузена (ПБ) накладного типа, устанавливаемого на поверхность образца; магнитошумовой аппаратуры, измеряющей интенсивность магнитного шума (МШ) при оптимальных (исходя из получения максимальной чувствительности к изменению контролируемого параметра) значениях частоты, амплитуды тока перемагничивания и частотного спектра или числа скачков намагниченности в оптимальном диапазоне полосы частот полосового фильтра, периода перемагничивания и уровня амплитудной дискриминации. Система позволяет создавать в образце циклические изгибные напряжения с различными формами, амплитудами и коэффициентами асимметрии циклов нагружения и измерять интенсивность или число скачков намагниченности МШ. Для обеспечения работы системы необходимо использовать специальные образцы, соответствующие ГОСТ по форме, размерам, предельным техническим параметрам блоков I, II (рисунок 1) и целям исследований, адаптируемые к ним по размеру и техническим характеристикам ПБ, измерительную аппаратуру, а также предварительно разработанную методику проведения экспериментальных исследований. Структурная схема лабораторной системы состоит из двух блоков (рисунок 1).

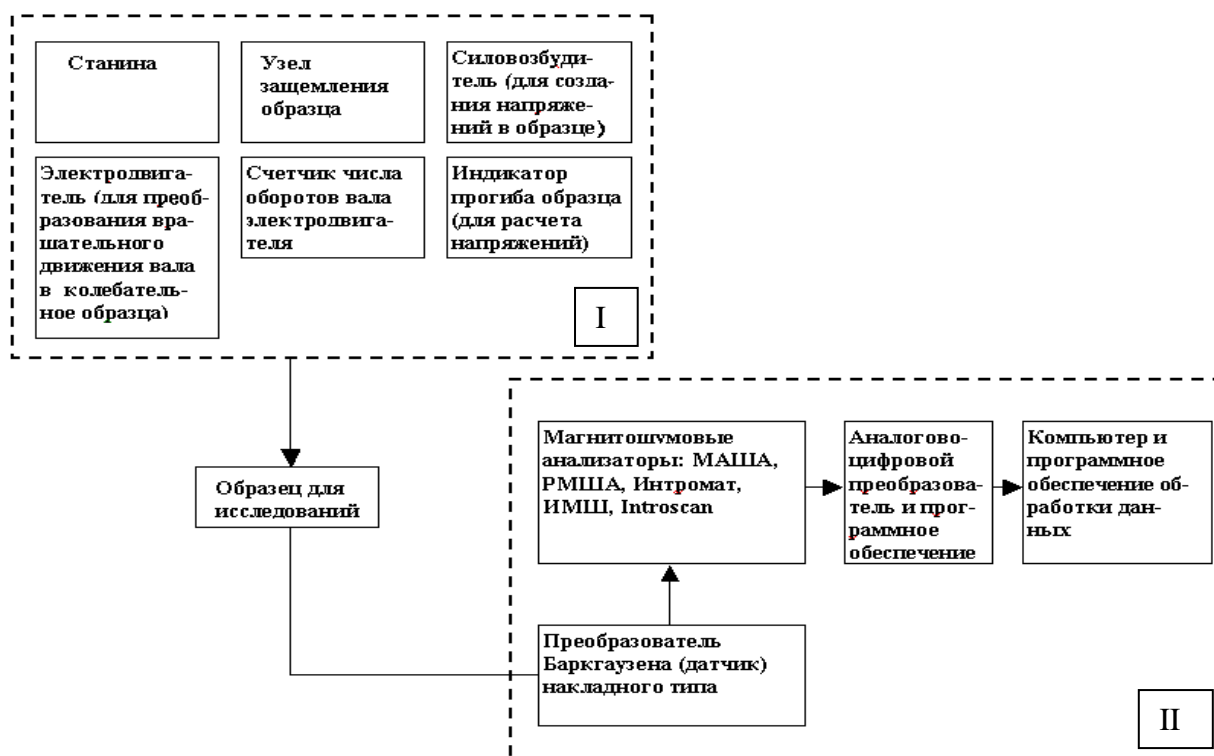


Рисунок 1 – Структурная схема лабораторной системы для исследования усталостной деградации в ферромагнитных материалах методом магнитных шумов

Блок I, состоит из узла для заземления образца, силовозбудителя для создания в нем изгибных напряжений, электродвигателя, индикатора прогиба для расчета амплитуды напряжений и счетчика числа оборотов электродвигателя для определения количества циклов нагружения  $N$ . Принцип работы блока I, основные технические характеристики, примеры расчета действующих на поверхности исследуемого образца при изгибе амплитуд напряжений с использованием калибровочной кривой подробно приведены в работах [10, 11]. Блок анализа и измерения сигнала II комплекса содержит ПБ, магнитошумовой анализатор, аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер. Основные технические характеристики используемых в системе разработанных в Институте прикладной физики НАН Беларуси и ООО «НПФ «Диагностика» магнитошумовых анализаторов Интроскан и ИМШ [12, 13], приведены в таблице.

Проведение усталостных испытаний системы состоит из следующих основных этапов.

1) Испытуемый плоский образец прямоугольного сечения с регламентируемыми по ГОСТ [14] размерами и формой устанавливаются в узел заземления блока I лабораторной системы.

2) С помощью электродвигателя, на валу которого расположен специальный диск с уста-

новленным на нем силовозбудителем в виде двух подшипников качения, в испытуемом образце создаются знакопеременные изгибные напряжения (растяжения и сжатия), амплитуда которых, как и коэффициент асимметрии цикла напряжений, частота циклирования, длительность цикла нагружения, может изменяться в широких пределах.

3) После каждой ступени циклирования на образец в зону образования и развития усталостных трещин устанавливается ПБ накладного типа и с помощью магнитошумового анализатора производится измерение интенсивности МШ или числа скачков намагниченности. Регистрируемый и измеряемый ПБ аналоговый сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, где производится предварительная обработка сигнала (усиление, подавление помех), далее с помощью специальной программы, сигнал преобразовывается в цифровую форму по следующим параметрам: частота дискретизации 1 МГц, число выборок 200, длина выборки 65536. Оцифрованный сигнал поступает в компьютер, где отображается на дисплее в удобном для пользователя виде с помощью специального программного обеспечения, разработанного в лаборатории вычислительной диагностики.

Таблица

**Основные технические характеристики магнитошумовых анализаторов Интроскан и ИМШ [8–9]**

Характеристика	Интроскан	ИМШ
Частота перемагничивания ПБ, Гц	Ступенчато: 15; 30; 45; 60; 90; 120	64; 128
Частота анализа МШ, кГц	20–200; 3–15	10–500
Амплитуда тока перемагничивания ПБ, мА	1–200, шаг – 1 мА	Ступенчато: 0; 50; 70; 90; 120; 150; 200 (при 128 Гц); 30; 70; 90; 120; 170; 210 (64 Гц)
Форма представления результатов	В абсолютных значениях контролируемого параметра, в относительных единицах	В относительных единицах, в абсолютных значениях (после калибровки)
Время измерения, с	0,1–10 (устанавливается)	2
Габариты, мм	318×180×105	200×200×65
Масса, кг (без преобразователя)	5	1,4
Комплектация	Набор преобразователей, программное обеспечение, методика контроля и сервисное обслуживание	Преобразователь, адаптер
Питание	От сети 50 Гц, 220 В; от аккумулятора 12 В	От сети 50 Гц, 220 В; От аккумулятора 12 В

На рисунке 2 в качестве примера представлены графики интенсивности и частотного спектра магнитного шума, полученные путем преобразования изображений компьютерных информационных окон для образцов сталей Ст. 3 и ВНС-2, которые свидетельствуют о качественных и количественных отличиях этих материалов по микромагнитным параметрам.

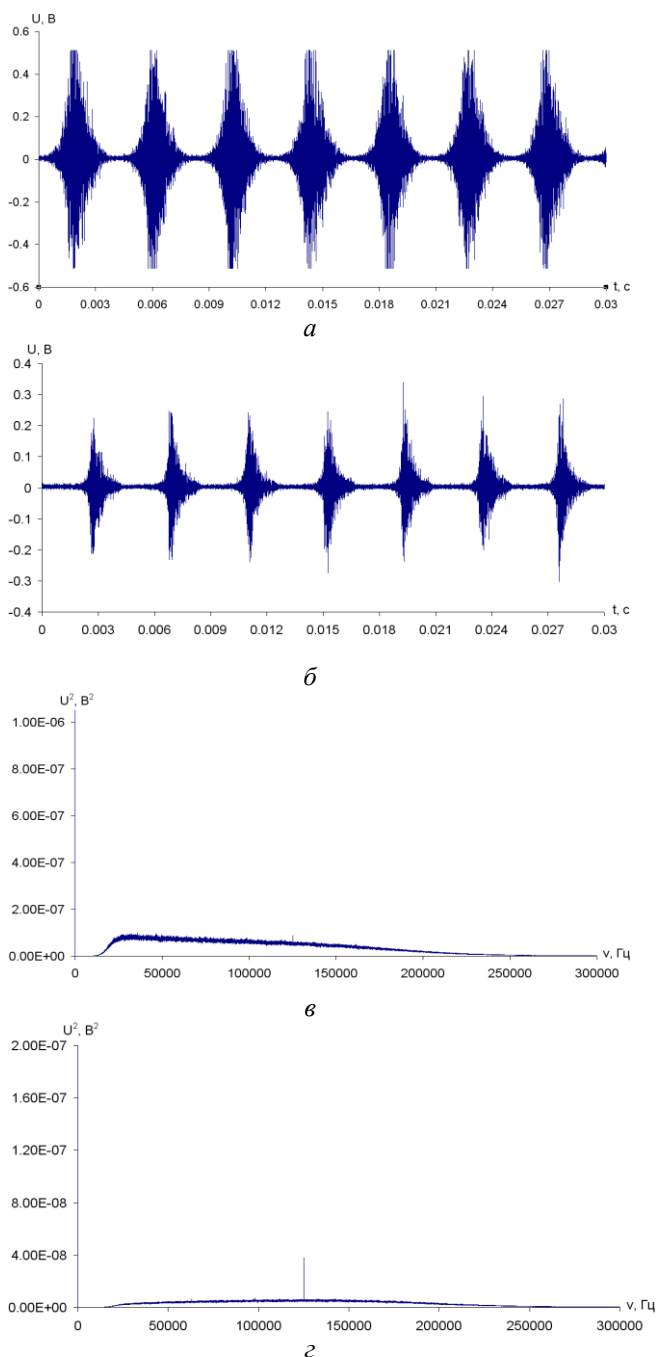


Рисунок 2 – Интенсивность (а, б) и частотный спектр (в, г) магнитного шума образцов стали Ст. 3 (а, в) и сплава ВНС-2 (б, г)

Разработанная система позволяет изменять в широких пределах условия нагружения образцов, а также регистрировать и измерять в реальном масштабе времени основные параметры полезного сигнала – интенсивность МШ, спектральную плотность мощности МШ, ее частоты подъема и спада, огибающую спектра, длительность, скважность.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для иллюстрации реализации системы на рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости интенсивности  $U_{эф}$  МШ от количества циклов изгибных нагружений  $N$ , полученные на представительских образцах различного класса материалов: образца в виде пластины размером  $140 \times 20 \times 3$  мм конструкционной стали Ст. 3 (рисунок 3а), образцов в виде балок размером  $70 \times 30 \times 15$  толщиной 2 мм из низколегированной стали для сварных конструкций 10ХСНД (рисунок 3б), высокопрочного малоуглеродистого сплава ВНС-2 (08Х15Н5Д2Т) мартенситно-старееющего класса (рисунок 3в) и конструкционной стали 40Х (рисунок 3г) с предварительно имеющимися в шейке усталостными трещинами. Представленные зависимости получены при перпендикулярном положении ПБ относительно центральной оси образцов. С помощью блока I (рисунок 1) в образцах создавались изгибные напряжения с амплитудой цикла, близкой к симметричной форме. Максимальные значения амплитуды напряжений  $\sigma_{макс}$  на поверхности образца и количества циклов нагружения  $N_{макс}$  составляли: в стали Ст. 3  $\sigma_{макс} = 38$  МПа ( $N_{макс} = 1,098 \cdot 10^6$  циклов, вплоть, до разрушения); 10ХСНД – 390 МПа ( $9,9 \cdot 10^6$  циклов); ВНС-2 – 600 (1200) МПа ( $14,2 \cdot 10^6$  циклов, до разрушения) и 40Х – 240 МПа (7290 циклов, до разрушения). С ростом  $N$  в области шейки, соответствующей переходной зоне от зоны заземления к постоянной ширине образцов, образовывались магистральные усталостные трещины (в стали 40Х наблюдался их рост), достижение  $N$  до  $N_{макс}$  приводило к разрушению образца.

Полученный с ПБ полезный сигнал измерялся с помощью магнитошумового анализатора с обеих сторон образцов (так как условия нагружения сторон отличались), обрабатывался и индцировался в блоке II (рисунок 1). Измерение МШ производилось после каждого этапа циклирования путем установки ПБ на

образце в зоне наиболее вероятного образования усталостных трещин. Измерения МШ с помощью прибора Интроскан производились при напряженности поля  $H = 80$  А/м,  $f = 120$  Гц

и  $F = 20\text{--}200$  кГц; с помощью прибора ИМШ – при  $H = 55$  А/м (в стали 40Х – 30 А/м),  $f = 64$  Гц (в стали 40Х – 128 Гц) и  $F = 5\text{--}500$  кГц.

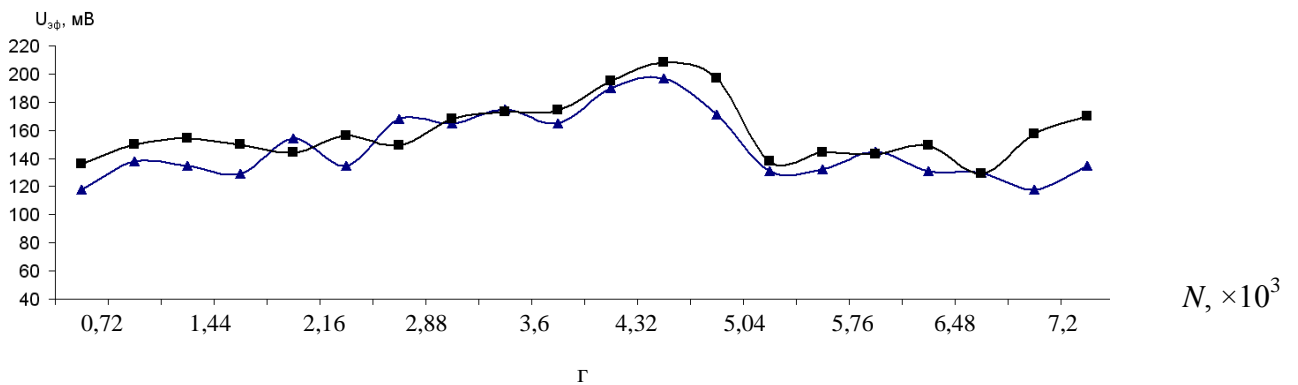
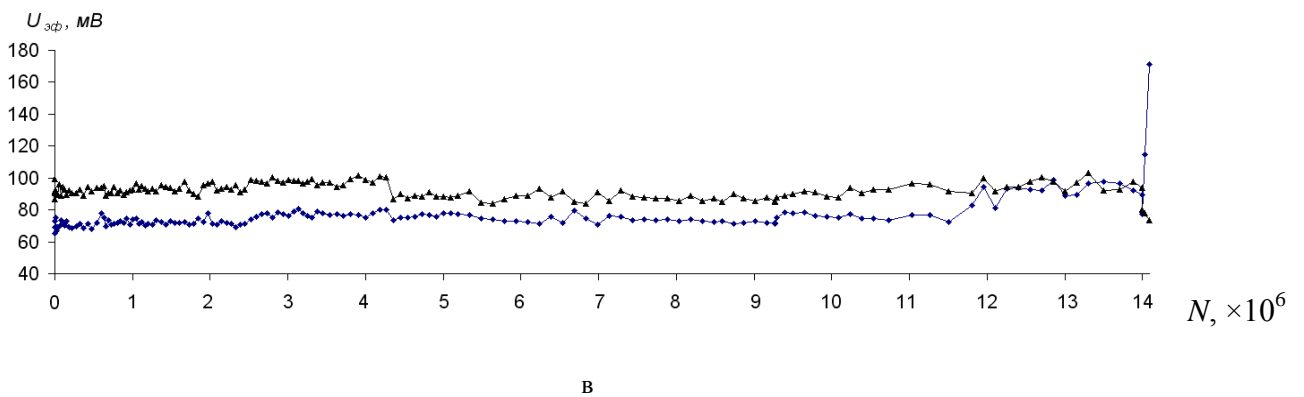
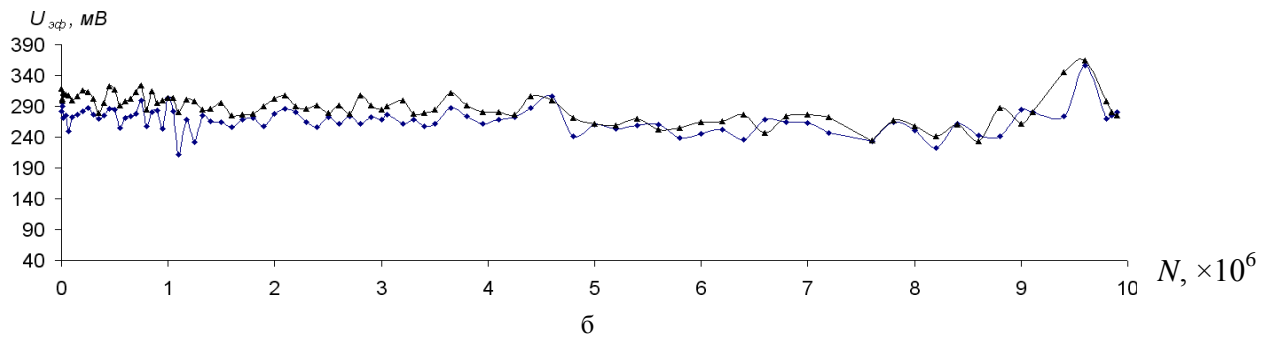
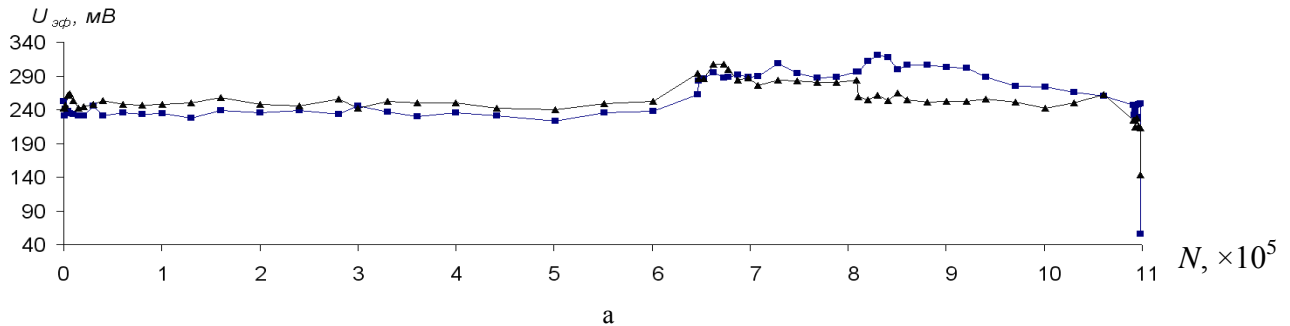


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности магнитного шума  $U_{эф}$  от количества циклов нагружения  $N$  для обеих сторон (сторона 1 – ■, 2 – ▲) образца: а – сталь Ст. 3 (прибор Интроскан); б – 10ХСНД (ИМШ); в – ВНС-2 (Интроскан); г – сталь 40Х (ИМШ)

Анализ результатов экспериментальных исследований основывался на изучении полученных зависимостей  $U_{\text{эф}}$  магнитного шума от числа циклов нагружения  $N$  (и их трендов), определении времени начала, окончания и длительностей участков изменения МШ, а также критического значения  $N_{\text{макс}}$ , соответствующего состоянию предразрушения образца. Из представленных на рисунке 3 графиков видно, что в процессе УД зависимости  $U_{\text{эф}}$  от  $N$  имеют сложный характер и состоят из чередующихся между собой интервалов возрастания и падения МШ, вероятно, характеризующих стадии разупрочнения и упрочнения металла соответственно. Из рисунка 3а видно, что при достижении  $N = 6,5 \cdot 10^5$  начинает резко возрастать интенсивность МШ, обусловленная разупрочнением металла и снижением твердости, а по достижении  $N = 8,1-8,2 \cdot 10^5$  интенсивность МШ падает (металл упрочняется). Затем снова происходит резкое изменение уровня МШ, которое связано с последующим разрушением образца. Из рисунка 3б следует, что  $U_{\text{эф}}$  постепенно снижается до  $N = 8,3 \cdot 10^6$  циклов, а затем резко возрастает. Приведенные на рисунке 3в незначительные и только перед самым разрушением образца резкие изменения  $U_{\text{эф}}$ , а на рисунке 3г неоднозначные зависимости  $U_{\text{эф}}$  от  $N$ , также характеризуют происходящие в образцах структурные изменения при УД. Таким образом, анализ представленных на рисунках 3а–3г зависимостей свидетельствует об изменениях  $U_{\text{эф}}$  с ростом  $N$ . Сложный характер данных зависимостей отражает процесс взаимодействия доменных границ с изменением структурно-напряженного состояния и образующимися дефектами при УД, которые способствуют образованию микротрещин и приводят к разрушению материала. Наличие относительно резких максимумов на представленных кривых для стали Ст. 3 ( $N \geq 10^6$ ) и сплава ВНС-2 ( $N \geq 14 \cdot 10^6$ ) совпадает с началом образования в образце микротрещин, что было подтверждено оптическим методом с использованием микроскопа МБС-9. При этом наблюдается влияние механической прочности образца на поведение МШ: высокопрочный сплав ВНС-2, в отличие от, например, пластичной стали Ст. 3, является малоэластичным и имеет более низкое значение вязкости, поэтому интенсивность МШ с ростом  $N$  изменяются в меньшей степени, разрушение наступает значительно позже, что подтверждает сравнение приведенных на ри-

сунке 3а и 3в кривых. Для стали 40Х малое значение  $N_{\text{макс}}$  объясняется наличием усталостных микротрещин до начала эксперимента. Отметим, что условием повышения достоверности полученных с помощью метода эффекта Баркгаузена данных при оценке УД является измерение МШ при ортогональных положениях ПБ на поверхности образца, учитывающем направления развития усталостных трещин, а также оптимизация способа математической обработки полученных таким способом сигналов. Таким образом, накопление усталостной повреждаемости в материале с ростом  $N$  приводит к изменению интенсивности МШ. В качестве критериев оценки УД можно использовать критические значения числа циклов нагружения  $N_{\text{макс}}$ , при которых происходят резкие изменения МШ, обусловленные взаимодействием доменных стенок с образующимися в процессе усталости дефектами структуры и изменениями структурно-напряженного состояния в материале.

### Заключение

Разработана и создана лабораторная система для исследования усталостной деградации в ферромагнитных материалах, состоящая из блока закрепления и создания в образце знакопеременных циклических изгибных напряжений и блока регистрации, измерения и анализа магнитного шума. Наличие широкой возможности изменения условий испытаний образцов и измерения полезного сигнала позволяют исследовать процесс накопления усталостной деградации широкого класса ферромагнитных сталей и сплавов. Анализ полученных графических зависимостей интенсивностей магнитного шума от числа циклов нагружения показал, что для всех исследуемых материалов имеются участки с резкими изменениями (возрастаниями и падениями) интенсивностей МШ, которые характеризуют кинетику процесса накопления усталостной повреждаемости, что согласуется с результатами, полученными ранее нами и другими авторами [15]. Длительности этих участков зависят не только от свойств материала и условий нагружения образца, но и от параметров ПБ и положения его относительно направления распространения усталостных трещин.

Представленные примеры реализации лабораторной системы показали ее работо-

способность и эффективность при исследовании процессов накопления усталостной повреждаемости в ферромагнитных материалах. Система может быть использована в лабораторных и заводских условиях при исследовании усталостной деградации образцов изделий, а также мало- и многоцикловых испытаниях.

Авторы благодарят д.т.н. В.Л. Венгриновича и к.т.н. Ю.Б. Денкевича за оказанное содействие при выполнении работы.

#### Список использованных источников

1. Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов / С. Коцаньба. – М. : Металлургия, 1990. – 623 с.
2. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.
3. Механика разрушения и прочность материалов : справочное пособие в 4-х томах. – Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1990. – 680 с.
4. Тимошук, Л.Т. Механические испытания металлов / Л.Т. Тимошук. – М. : Металлургия, 1971. – С. 224.
5. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний / Л.М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 300 с.
6. Устройство для испытания плоских образцов на усталость: патент РБ № 5248; заявитель – ИПФ НАН Беларуси / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, А.Г. Довгялло // А.б., № 2, 2009. – С. 202–203.
7. Устройство для циклических испытаний плоских образцов прямоугольного сечения: патент РБ № 6032; заявитель – ИПФ НАН Беларуси / В.Н. Бусько // А.б. № 1, 2010. – С. 208.
8. Устройство для испытания образцов на усталость: патент РБ № 7899, заявитель – ИПФ НАН Беларуси / В.Н. Бусько // А.б. № 1. – 2012. – С. 250.
9. Устройство для создания в образце изгибных напряжений: патент РБ № 8113; заявитель – ИПФ НАН Беларуси / В.Н. Бусько.
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. Бусько, В.Н. Методика и экспериментальная установка для испытания плоских образцов на усталость / В.Н. Бусько // Материалы, технологии, инструменты. – 2011. – Т. 16, № 2. – С. 107–113.
12. Венгринович В.Л. Новые возможности НК напряжений методом эффекта Баркгаузена / В.Л. Венгринович, В.Л. Цукерман, Ю.Б. Денкевич // В мире неразрушающего контроля. – № 1 (27), март 2005. – С. 36–39.
13. Бусько, В.Н. Возможность контроля методом магнитных шумов деградации металла в результате поверхностного изнашивания / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, А.Г. Довгялло [и др.] // Химическая техника. – 2007. – № 7. – С. 46–48.
14. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – 14 с.
15. Гришаков, С.В. Оценка напряжений и повреждений в ферромагнитных материалах методом магнитных шумов / С.В. Гришаков, А.И. Ковалев. – Киев : Наукова думка, 1991. – 168 с.

Busko V.N., Vintov D.A.

#### Laboratory system for investigation of fatigue degradation in ferromagnetic materials and examples of its implementation

Shows the block diagram of the laboratory system for investigation of fatigue degradation in ferromagnetic materials by method of magnetic noise. Describes the principle operation of the system, given the practical results its using in assessment of the degree fatigue degradation in ferromagnetic structural steels and alloys on the basis of cyclic testing and measuring the intensity of the magnetic noise.  
(E-mail: busko@iaph.bas-net.by)

**Key words:** fatigue tests, bending stress, fatigue degradation, magnetic noise, Barkhausen effect.

Поступила в редакцию 12.06.2012.