

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ИССЛЕДОВАНИЯ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ*



А.Е. Прохоров,
Институт механики
сплошных сред УрО РАН



А.Н. Вшивков,
Институт механики
сплошных сред УрО РАН



О.А. Плехов,
Институт механики
сплошных сред УрО РАН

Работа посвящена разработке программно-аппаратного комплекса, позволяющего в течение хода усталостного испытания наблюдать за развитием дефектных структур, образующихся под поверхностью материала. Датчик, входящий в основу данного комплекса, базируется на методе феррозондового сканирования. Испытание образцов проводится в режиме гигациклового усталости при циклическом нагружении с частотой 20 кГц. На основе полученных результатов можно утверждать, что существенное изменение в структуре образца влечет за собой изменение магнитных характеристик образца. Это делает возможным прогнозирование последующего роста трещин на основе данных, полученных на ранних стадиях их развития.

Ключевые слова: гигацикловая усталость, армко-железо, методы измерения длины трещин.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема усталости материалов на базе $1 \cdot 10^{10}$ циклов стоит достаточно остро. В данном режиме использования находится ряд объектов, целостность которых неразрывно связана с жизнью и безопасностью людей. Явными примерами таких объектов являются авто- и железнодорожные мосты, конструктивно

* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых предприятий в научно-технической сфере.

важные элементы транспортных средств, такие как лопадки реактивных двигателей, винты двигателей морских судов, а также колесные оси железнодорожных поездов. Проблема детектирования момента начала разрушения материала в гигацикловом режиме не является тривиальной, поскольку рядом исследователей было показано, что возникновение дефектов, приводящих к разрушению, происходит под поверхностью материала, а поверхностные признаки появляются уже на конечной стадии разрушения. Ввиду этого эффекта стандартные визуальные методы дефектоскопии не подходят для исследования материалов в таком режиме. В связи с этим требуется разработка метода, позволяющего оценить состояние элемента конструкции

задолго до его макроскопического разрушения. Актуальность использования высокочастотных усталостных тестов обусловлена как современными требованиями дефектоскопии конструкций, работающих в области частот нагружения (1 кГц и выше), так и необходимостью исследования усталостных свойств материалов на базе испытаний на базе миллиарда циклов и более. Основным инструментом для исследования усталостных свойств металлических материалов в области гигацикловой усталости являются ультразвуковые испытательные машины. В данной работе предлагается разработка и проектирование бесконтактного метода, использующего изменение магнитных свойств исследуемого материала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемый метод заключается в детектировании магнитного поля материала при нарушениях сплошности образца и является развитием феррозондовой методики неразрушающего контроля. Основным преимуществом предлагаемого метода является анализ нелинейных эффектов, возникающих в образце в области перехода от линейного к нелинейному поведению. Анализ нелинейных эффектов позволяет существенно повысить чувствительность метода и детектировать процесс образования дефектов на его начальных стадиях.

На исследуемый образец устанавливаются два соленоида: один намагничивающий, другой измерительный (рис. 1). Переменное поле намагничивающего соленоида вводит образец в состояние маг-

нитного насыщения, вследствие чего на измерительном соленоиде появляется нелинейный полезный сигнал. Результаты первичных испытаний показали, что к изменению магнитного поля материала особенно чувствительна вторая гармоника детектируемого сигнала.

На рис. 2 представлен график изменения второй гармоники детектируемого сигнала на завершающей стадии испытания. Из графика видно, что в момент времени 60 с рост амплитуды принимает лавинообразный характер и в течение еще 60 с свойства образца меняются достаточно, для того чтобы считать его разрушенным. Следует отметить, что время 60 с на испытательной машине соответствует $1,2 \cdot 10^{10}$ циклов.

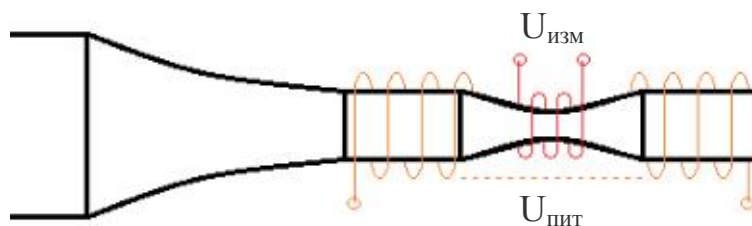


Рис. 1. Схема установки соленоидов на образец

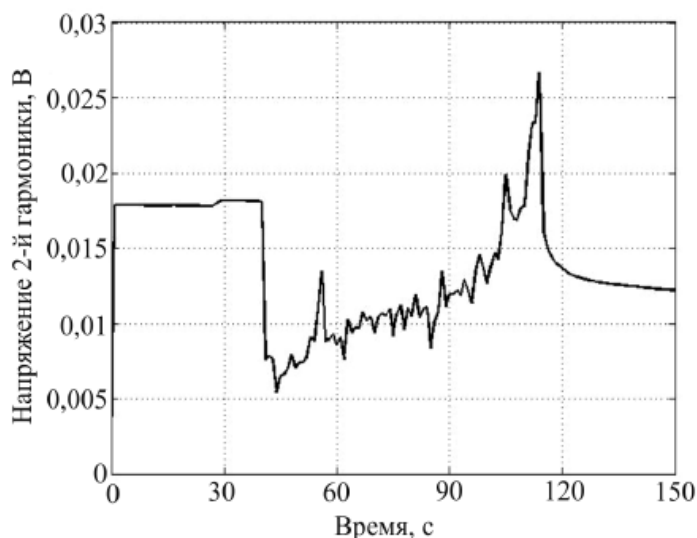


Рис. 2. Изменение амплитуды второй гармоники электрического напряжения на измерительном соленоиде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы следует отметить, что разработанный программно-аппаратный комплекс, основанный на методе феррозондового неразрушающего контроля, позволяет наблюдать за развитием дефектов развивающихся под поверхностью образца в ходе усталостного испытания. Оценки чувствительности метода дают возможность прогнозировать возможность детектирования момента зарождения дефектов с характерным размером до 50 мкм, что соответствует характерному размеру зеркальных зон (fish-eye) являющихся основным механизмом начала разрушения в условиях гигацикловой усталости. Детальное исследование начальной стадии разрушения является актуальным как с практической,

так и с фундаментальной точки зрения, что обеспечивает востребованность разрабатываемого прибора не только в научных лабораториях, но и, при незначительной доработке, в составе реальных инженерных конструкций. С фундаментальной точки зрения прибор позволяет в режиме реального времени изучить принципиальный и на сегодня до конца не понятный процесс – процесс образования усталостной трещины в режиме гигацикловой усталости. Предварительные испытания, проведенные на образцах из армко-железа, показали эффективность как датчика, так и программного комплекса. Предвестники разрушения образца были зарегистрированы за миллион циклов до потери несущей способности образца.

Библиографический список

1. Sakai T. Review and prospects for current studies on very high cycle fatigue of metallic materials for machine structural use // J. of solid mechanics and materials engineering. – 2009. – Vol. 3. – № 3. – P. 425–439.
2. Shiozawa K., Morii Y., Nishino S., Lu L. Subsurface crack initiation and propagation mechanisms in high strength steel in a very high cyclic fatigue regime // Int. J. Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 1521–1532.
3. Bathias C., Paris P. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice // New York: CRC Press, 2004. – 328 p.
4. Shaniavski A.A., Skvortsov G.V. Crack growth in the gigacycle fatigue regime for helicopter gears // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1999. – Vol. 22. – № 7. – P. 609–619.
5. Вишневков А.Н., Прохоров А.Е., Уваров С.В., Плехов О.А. Особенности механического поведения армко-железа при испытании в режиме гигацикловой усталости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 4. – С. 18–32.
6. Наймарк О.Б., Плехов О.А., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. Кинетика накопления дефектов и дуальность кривой Веллера при гигацикловой усталости металлов // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, вып. 3. – С. 89–94.

**DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR MONITORING AND STUDYING
OF FRACTURE OF METALS IN VERY HIGH CYCLE FATIGUE REGIME**

A.E. Prohorov, A.N. Vshivkov, O.A. Plekhov

Institute of continuous media mechanics Ural Branch of the RAS

The paper deals with the development of hardware and software for monitoring of the internal defect structures under the material surface initiated during the fatigue test. The hardware is based on ferromagnetic detector. The detector is a modification of ferro-probes method. The fatigue test is conducted in a very high cycle fatigue regime with frequency 20 kHz. The obtained data allow us to conclude that the specimen fracture leads to the changes of magnetic properties of material. This makes it possible to predict crack propagation using the data obtained on the early stages of their evolution.

Keywords: very high cycle fatigue, Armco-iron, crack length measuring methods.

Сведения об авторах

Прохоров Александр Евгеньевич, аспирант, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: alexproher@gmail.com

Вшивков Алексей Николаевич, аспирант, ИМСС УрО РАН; e-mail: aleksey.1992@mail.ru

Плехов Олег Анатольевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, ИМСС УрО РАН; e-mail: roa@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 25.05.2015 г.