

УДК 536.55

**А.Н. Вшивков<sup>1</sup>, А.Е. Прохоров<sup>1</sup>, С.В. Уваров<sup>2</sup>, О.А. Плехов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АРМКО-ЖЕЛЕЗА ПРИ ИСПЫТАНИИ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

В работе экспериментально исследуется механическое поведение армко-железа при испытаниях в режиме гигациклового усталости. Испытания проводились на ультразвуковой испытательной машине USF-2000 с частотой нагружения 20 КГц. В работе построена зависимость Веллера для данного материала на базе испытаний  $1 \cdot 10^{10}$  циклов. Для исследования особенностей процесса зарождения усталостных трещин разработаны две новые системы мониторинга физических свойств образца, основанные на измерении электрического тока и индукции магнитного поля. Показано, что существенное изменение физических процессов, сопровождающих эволюцию структурных дефектов в материале, наблюдается на завершающих стадиях эксперимента. Полученные данные позволяют оценить характерное время развития подповерхностных усталостных трещин, исследование которых затруднено стандартными методами регистрации.

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

**A.N. Vshivkov<sup>1</sup>, A.E. Prokhorov<sup>1</sup>, S.V. Uvarov<sup>2</sup>, O.A. Plekhov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

## **PECULIARITIES OF MECHANICAL BEHAVIOR OF ARMCO-IRON UNDER FATIGUE IN GIGACYCLIC REGIME**

The paper is devoted to the experimental investigation of the mechanical behavior of the Armco iron during gigacycle fatigue tests. The samples were tested on an ultrasonic testing machine USF-2000 with loading frequency 20 kHz. The Wöhler law was obtained for investigated material in the range from  $1 \cdot 10^6$  to  $1 \cdot 10^{10}$  cycles. To study the characteristics of the cracks nucleation two new systems for monitoring the physical properties of a sample were developed. The techniques were based on the measurements of electric current and magnetic field. It was shown that the significant change of the physical processes accompanying the evolution of structural defects in the material was observed on the final stages of the experiment. The obtained data allowed us to estimate the characteristic time of the sub-surface fatigue cracks evolution that cannot be monitored by the standard non-destructive methods.

**Keywords:** gigacyclic fatigue, armco-iron, crack length monitoring.

## **Введение**

Необходимость экономии ресурсов и повышения экономической эффективности производства требует обеспечения безопасного ресурса эксплуатации механизмов и конструкций, таких как мосты, железнодорожные рельсы, детали автомобильных и газотурбинных двигателей и т.д., вплоть до  $1 \cdot 10^{10}$  циклов нагружения. Проведение экспериментального исследования усталостных свойств материала на такой базе циклов предполагает существенные временные затраты. В настоящее время для получения результатов в обозримом будущем используются ультразвуковые испытательные машины [1–5].

Основными эффектами, характерными для поведения материала, испытываемого в режиме гигацикловой усталости, являются подповерхностное зарождение усталостной трещины и расщепление (дуальная или дуплексная), природа кривой Веллера [6–8]. Анализ опубликованных результатов исследований позволяет утверждать, что физические механизмы, лежащие в основе этих эффектов, до сих пор не получили объяснения. В настоящее время предложено несколько моделей данного явления, например модель, предложенная в работе [9–11].

Дальнейшее развитие и верификация предложенных моделей требуют детального экспериментального исследования процессов развития дефектов в материале на завершающей стадии циклического деформирования с малыми амплитудами. Результаты исследования эволюции структуры армко-железа в [12] показали, что в области гигацикловой усталости в чистом железе могут формироваться как полосы устойчивого сдвига на поверхности образца (аналогично меди или никелю), так и характерные подповерхностные структуры типа «рыбьего глаза».

Подобные структурные исследования требуют остановки усталостного эксперимента и не могут дать информацию о кинетике развития критического дефекта, приводящего к макроскопическому разрушению образца. В данной работе была поставлена задача разработать экспериментальную методику, позволяющую регистрировать процессы, сопровождающие эволюцию дефектов в материале, в ходе эксперимента на ультразвуковой испытательной машине.

Механические свойства образца определялись при испытаниях на серво-гидравлической испытательной машине INSTRON 8500Э, уста-

лостные эксперименты были проведены на ультразвуковой испытательной машине USF-2000 при частоте нагружения 20 КГц. В результате определены механические характеристики материала при квазистатическом нагружении и усталостные свойства на базе испытаний до  $1 \cdot 10^{10}$  циклов нагружения.

В качестве методов для исследования кинетики развития критического дефекта были выбраны магнитный метод и метод измерения разности потенциалов, позволяющие регистрировать появление как поверхностных, так и подповерхностных трещин. Методы были существенно доработаны с целью использования нелинейных эффектов для повышения порога их чувствительности. Полученные данные позволяют говорить о возможности регистрации кинетики развития подповерхностных трещин и подтверждают гипотезу о ее интенсивном развитии на завершающей стадии процесса деформирования.

### 1. Материал и условия эксперимента

Эксперимент проводился на образцах армко-железа. Химический состав образцов представлен в таблице. Исследовалось механическое поведение плоских образцов толщиной 4 мм, геометрия образцов соответствовала ГОСТ 1497–84.

#### Химический состав армко-железа

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %
0,004	0,04	0,05	0,005	0,005	0,06	0,038	0,01

Для обеспечения достоверности результатов были исследованы две серии образцов, изготовленных из одной партии армко-железа, прошедших одинаковую механическую и термическую обработку. Первая партия образцов была испытана на сервогидравлической разрывной машине INSTRON 8500, вторая партия – на электромеханической разрывной машине Zwick 100. Образцы нагружались в режиме одноосного растяжения со скоростью деформации в пределах от  $10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Результаты механических испытаний представлены на рис. 1.

Усталостные испытания проводились на ультразвуковой испытательной машине USF-2000 производства Shimadzu. Особенности проведения усталостных экспериментов на ультразвуковых испытатель-

ных машинах описаны в [13]. Внешний вид установки и геометрия образца представлены на рис. 2. В процессе деформирования образцы охлаждались воздушным потоком, эксперимент продолжался до момента существенного (более 10 %) изменения резонансной частоты образца.

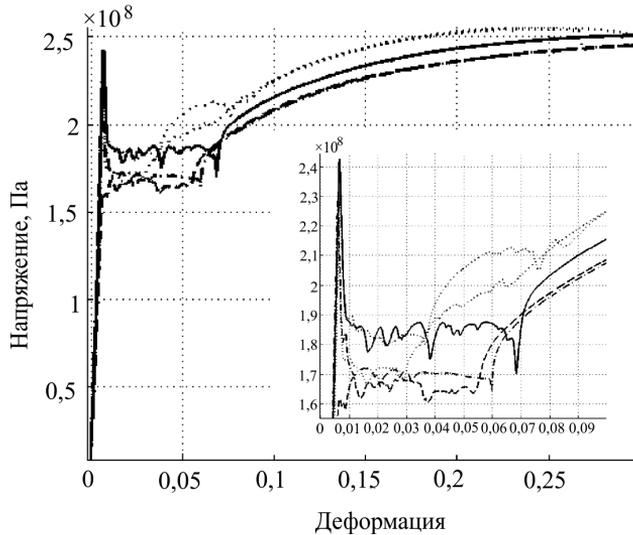


Рис. 1. Зависимость напряжения от деформации для армко-железа при различных скоростях нагружения (пунктирная линия – скорость деформирования  $5 \cdot 10^{-4}$ , штрихпунктирная – скорость деформирования  $10^{-3}$ , сплошная линия – скорость деформирования  $2 \cdot 10^{-3}$ )

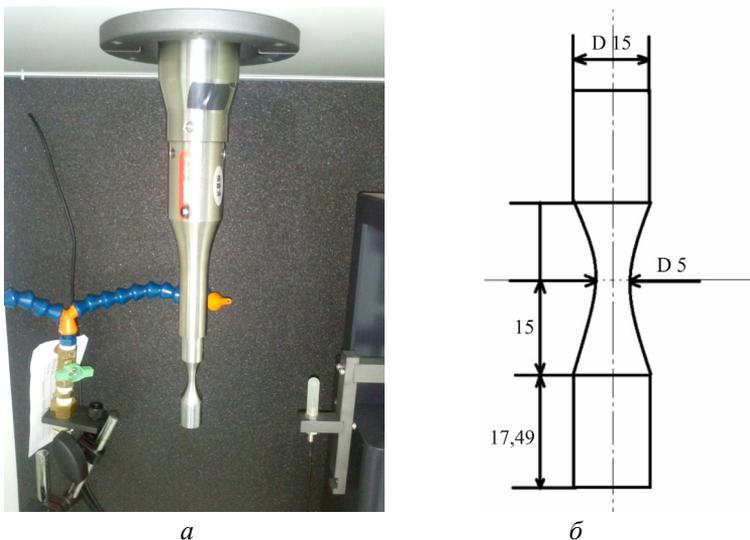


Рис. 2. Волновод ультразвуковой испытательной машины USF-2000 с закрепленным образцом (а); геометрические размеры образца (б)

Магнитный метод мониторинга процессов, сопровождающих эволюцию структуры материала, предполагает использование ферромагнитных свойств исследуемого материала. Разработанная установка может рассматриваться как модификация феррозондового метода неразрушающего контроля. В данном случае образец одновременно является объектом исследования и феррозондом. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

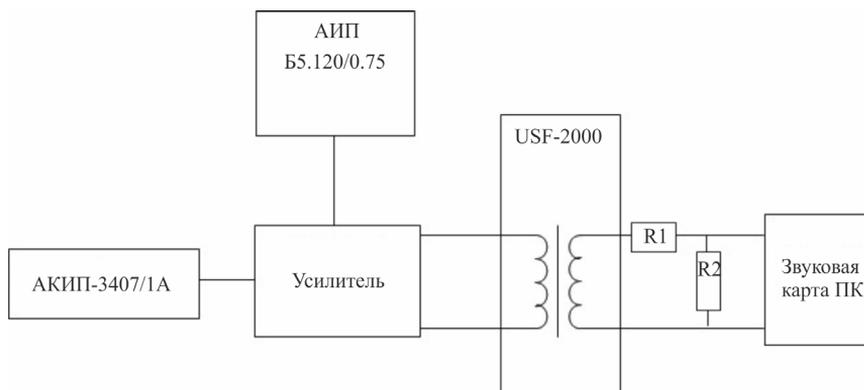


Рис. 3. Принципиальная схема установки, магнитного метода контроля эволюции структуры материала в процессе усталостных испытаний: генератор сигналов специальной формы АКИП3407/1А; источник питания АИП Б5.120/0.75; источник ультразвука USF-2000

В процессе эксперимента на образец помещались два соленоида, намагничивающий (медная проволока диаметром 0,5 мм, 800 витков) и измерительный (медная проволока диаметром 0,1 мм, 200 витков). Переменный ток внутри намагничивающего соленоида намагничивает образец до насыщения. При этом на измерительной катушке появляется нелинейный полезный сигнал. Особенно чувствительной к изменению магнитного поля внутри образца (индуктивности образца) является вторая гармоника сигнала на измерительном соленоиде.

Для создания переменного тока в намагничивающем соленоиде был собран усилитель на основе микросхемы TDA2030a (18 Вт HiFi усилитель мощности класса АВ). Собранный усилитель обеспечивает большой выходной ток, имеет малые гармонические и интермодуляционные искажения, широкую полосу частот усиливаемого сигнала, малый уровень собственных шумов, встроенную защиту от короткого замыкания выхода, автоматическую систему ограничения рассеиваемой

мощности, удерживающую рабочую точку выходных транзисторов ИМС в безопасной области. Встроенная термозащита обеспечивает выключение ИМС при нагреве кристалла выше 145 °С. Микросхема выполнена в корпусе Pentawatt и имеет 5 выводов.

Намагничивающий соленоид может быть включен в двух режимах: стабилизации напряжения и стабилизации тока. Измерительная катушка через делитель подключена к звуковой карте компьютера. Сигнал с измерительной катушки анализируется в программе LabVIEW.

Альтернативным методом контроля момента зарождения усталостной трещины является метод контроля падения электрического напряжения. На образце, закрепленном внутри ультразвуковой испытательной машины, были размещены четыре контакта. Пара внешних контактов использовалась для подачи постоянного тока 5А на образец. Пара внутренних контактов – для снятия напряжения с образца. Данные на вольтметр АКИП В78/1 поступают через колебательный LC контур, настроенный на резонансную частоту 19,6 КГц. Схема подключения показана на рис. 4.

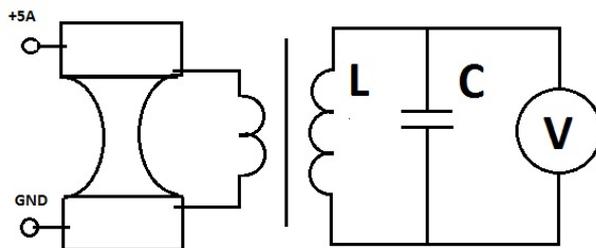


Рис. 4. Принципиальная схема установки измерения падения потенциала для контроля эволюции структуры материала в процессе усталостных испытаний

В процессе экспериментов для контроля температуры образца использовалась инфракрасная камера Flir SC 5000 (спектральный диапазон 3–5 мкм, температурная чувствительность 0,25 К). Для калибровки камеры использовалась стандартная калибровочная таблица для времени экспозиции 1000 мс.

## **2. Результаты усталостных экспериментов**

На рис. 5 представлены результаты испытания 11 образцов из армко-железа на ультразвуковой испытательной машине USF-2000 при частоте нагружения (20±5) КГц. Анализ данных, представленных на

рис. 5, позволяют сделать вывод о том, что для рассматриваемого материала предел усталости на базе испытаний  $3 \cdot 10^9$  циклов равен 160 МПа.

Необходимо отметить, что процесс разрушения образцов армко-железа имел необычный характер. По литературным данным [5], потеря образцом резонансной частоты на ультразвуковой машине является необратимым процессом и соответствует зарождению подповерхностной усталостной трещины. В случае армко-железа потеря резонансной частоты и, как следствие, выключение машины не означало механическое (макроскопическое) разрушение образца.

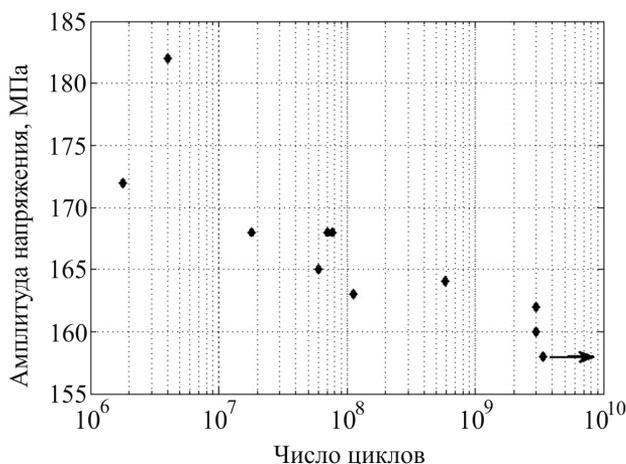


Рис. 5. Зависимость амплитуды напряжения от числа циклов до разрушения для армко-железа

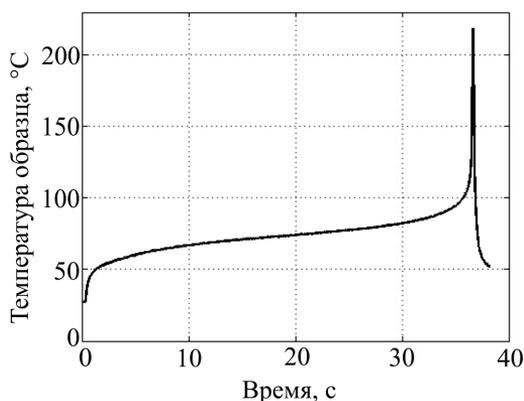


Рис. 6. Зависимость температуры образца от времени в процессе усталостного нагружения

Образец выдерживал практически неограниченное число последующих блоков нагружений длительностью  $1 \cdot 10^6$  циклов. Увеличение времени выдержки между последующими блоками нагружения позволяло незначительно увеличить длительность блока до  $2 \cdot 10^6$  циклов. На рис. 10 представлены результаты измерения напряжения на образце в процессе нагружения блоками по  $1 \cdot 10^6$  циклов после выхода его из резонансной частоты в ходе основного испытания.

Такой характер поведения образцов позволяет сделать вывод о наличии необратимых изменений в структуре материала, которые можно считать критическими с точки зрения деформационного ресурса образца при ультразвуковом нагружении. При этом эти изменения не связаны с образованием усталостной трещины и механически соответствуют резкому повышению диссипативной способности образца и невозможности его испытаний со стандартным (воздушным) охлаждением, предусмотренным на усталостной машине. При построении графика (см. рис. 5) данное состояние образца считалось разрушением.

Измерения температуры образца в процессе испытаний показали, что на завершающей стадии процесса наблюдается резкий рост температуры образца до  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6), сопровождающийся падением резонансной частоты.

### **3. Результаты использования магнитного метода и метода падения потенциала для исследования поведения образца на заключительной стадии эксперимента**

Для исследования процесса изменения магнитной проницаемости образца и его электрического сопротивления были реализованы две испытательные программы. В рамках первой образец испытывался до разрушения (перегрева), в рамках второй образец испытывался пошагово блоками нагружения с увеличивающейся амплитудой.

Характерный график изменения амплитуды второй гармоники на измерительном соленоиде в рамках первой экспериментальной программы представлен на рис. 7. При достижении числа циклов  $9 \cdot 10^8$  амплитуда второй гармоники существенно возрастает в результате насыщения образца из-за изменения магнитной проницаемости. Изменение магнитной проницаемости может быть вызвано рядом физических процессов, таких как дисперсное накопление дефектов, образование усталостной трещины или изменение сопротивления вследствие пере-

грева образца. По данным магнитного метода длительность процесса колебаний амплитуды второй гармоники магнитного поля не превышает  $2 \cdot 10^6$  циклов.

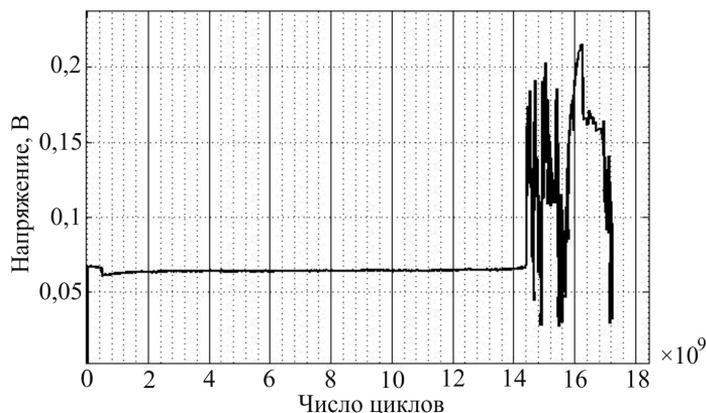


Рис. 7. Изменение амплитуды второй гармоники элетрического напряжения на измерительном соленоиде в процессе усталостных испытаний с амплитудой механических напряжений 160 МПа

При нагружении с амплитудой выше предела усталости процесс протекает значительно быстрее (рис. 8), амплитуда второй гармоники сразу начинает возрастать, примерно после 60 с ( $1,2 \cdot 10^6$  циклов нагружения) процесс становится лавинообразным и в течение 20 с ( $4 \cdot 10^5$  циклов) образец теряет резонансную частоту.

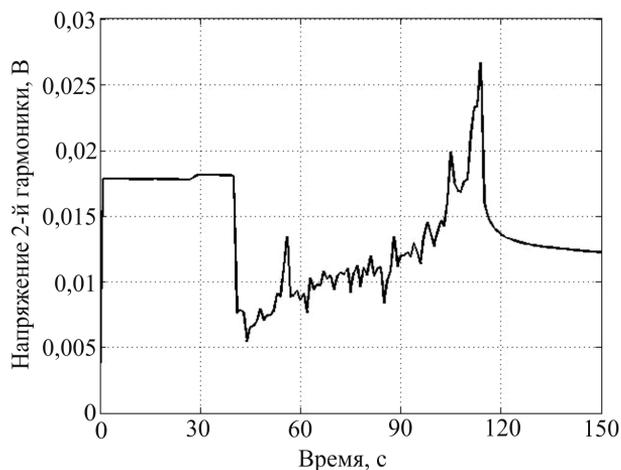


Рис. 8. Изменение амплитуды второй гармоники элетрического напряжения на измерительном соленоиде в процессе усталостных испытаний с амплитудой механических напряжений 165 МПа

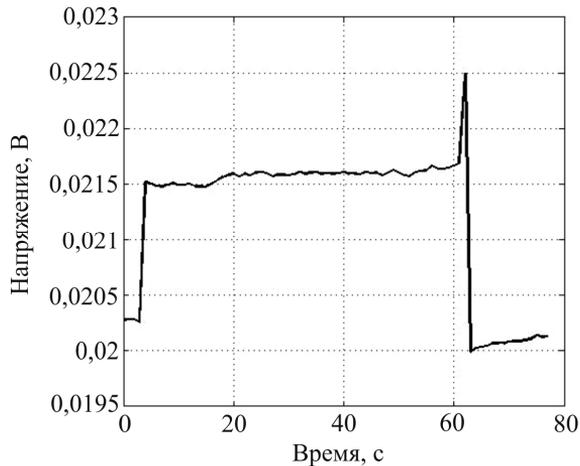


Рис. 9. Изменение напряжения в образце в процессе усталостных испытаний с амплитудой механических напряжений 258 МПа

Аналогичные результаты были получены при использовании метода измерения падения потенциала. На рис. 9 представлены результаты измерения на образце на завершающей стадии эксперимента с амплитудой напряжения 258 МПа.

Результаты нагружения образцов блоками циклов представлены на рис. 10. При анализе результатов необходимо отметить, что разработанные методы не могут быть одновременно использованы на одном образце. В силу этого на рис. 10 сопоставляются результаты для двух различных испытаний.

На рис. 10, *а* представлены 7 блоков нагружения с различными амплитудами механических напряжений (от 198 до 258 МПа). Для каждого блока нагружения использовалось относительное время, определяющее длительность текущего блока нагружения. В силу конструктивных особенностей при применении магнитного метода данные записывались единым массивом (рис. 10, *б*). Провалы на графике соответствуют моментам выключения установки и переходу к следующему блоку нагружения с более высокой амплитудой.

Для малых амплитуд механического напряжения наблюдается постоянство амплитуды второй гармоники напряжения на измерительном соленоиде в магнитном методе и постоянство напряжения на образце в методе измерения падения потенциала (см. рис. 10, *а*, первый участок на графике рис. 10, *б*).

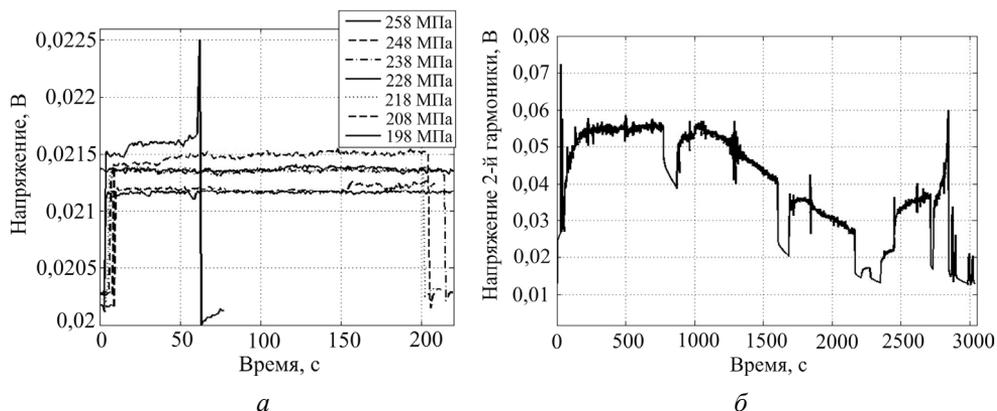


Рис. 10. Изменение электрического сопротивления образца (а) и изменение амплитуды второй гармоники магнитного поля при ступенчатом нагружении образца (б)

Повышение амплитуды механического сопротивления приводит к росту напряжения в образце и падению амплитуды второй гармоники на измерительном соленоиде. При достижении достаточно высокого механического напряжения наблюдаются резкие скачки в данных, полученных обоими методами, соответствующие моменту разрушения (перегрева) образца.

### Заключение

В работе экспериментально исследуется механическое поведение армо-железа при испытаниях в режиме гигацикловой усталости. Испытания проведены на ультразвуковой испытательной машине USF-2000 с частотой нагружения 20 КГц и воздушным охлаждением. В результате построена зависимость Веллера для данного материала на базе испытаний  $1 \cdot 10^{10}$  циклов. Величина предела усталости равна 160 МПа.

В ходе экспериментов обнаружен необычный характер исчерпания деформационного ресурса армо-железа. Процесс падения резонансной частоты сопровождался резким (до 220 °С) нагревом образца. При этом на поверхности образца не фиксировалось образование структурных дефектов, видимых в стандартный металлографический микроскоп. При повторных испытаниях перегрев образца возникал после  $1 \cdot 10^6$  циклов нагружения.

Для исследования особенностей процесса зарождения усталостных трещин были разработаны две новые системы мониторинга физи-

ческих свойств образца, основанные на измерении электрического напряжения и индукции магнитного поля. Показано, что существенное изменение физических процессов, сопровождающих эволюцию структурных дефектов в материале, наблюдается на завершающих стадиях эксперимента.

Предварительные эксперименты позволяют говорить о возможности применения данных методов для контроля процессов эволюции структуры материала в ходе усталостных испытаний на ультразвуковой испытательной машине и оценить продолжительность финальной стадии процесса исчерпания деформационного ресурса. При малых амплитудах механического напряжения значительные изменения регистрируемых параметров наблюдались в течение последних 3еб циклов нагружения, при этом катастрофические изменения, приводящие к нагреву образца на 200 °С, имели продолжительность порядка 1е5 циклов нагружения.

Исчерпывающий ответ на вопрос, какие изменения в структуре материала приводят к повышению его диссипативной способности, требует проведения структурных исследований.

### **Библиографический список**

1. Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles / X. Zhu, A. Shyam, J.W. Jones, H. Mayer, J.V. Lasecki, J.E. Allison // *Int. J. Fatigue*. – 2006. – Vol. 28. – P. 1566–1571, available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112306000946>.

2. Bathias C., Paris P. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. – Taylor & Francis, 2004. – 328 p.

3. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2004. – Т. 70, № 4. – С. 41.

4. Shaniavski A.A., Skvortsov G.V. Fatigue limit – Material property as an opened or closed system? Practical view on the aircraft components failures in GCF area // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1999. – Vol. 22. – No. 7. – P. 609–619.

5. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography / O. Plekhov, T. Palin-Luc, O. Naimark, S. Uvarov, N. Saintier // *Fatigue and fracture of engineering materials and structures*. – 2005. – Vol. 28. – Iss. 1. – P. 169–178.

6. Sakai T. Review and prospects for current studies on very high cyclic fatigue of metallic materials for machine structural use // *Journal of solid mechanics and materials engineering*. – 2009. – Vol. 3. – No. 3. – P. 425–439.

7. Technical note High-cycle fatigue crack initiation and propagation behaviour of high-strength spring steel wires / Q.Y. Wang, J.Y. Berard, S. Rathery, C. Bathias // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1999. – Vol. 22. – P. 673–677.

8. Кинетика накопления дефектов и дуальность кривой Веллера при гигацикловой усталости металлов / О.Б. Наймарк, О.А. Плехов, В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, М.В. Нарыкова // *ЖТФ*. – 2014. – Т. 84, вып. 3. – С. 89–94.

9. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading / O. Plekhov, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Uvarov, O. Naimark // *Material Science and Engineering A*. – 2007. – Vol. 462. – No.1. – P. 367–370.

10. Plekhov O.A., Naimark O., Saintier N. Experimental study of energy accumulation and dissipation in iron in an elastic-plastic transition // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 52, No. 9. – С. 1236–1238.

11. Nonlinear and structural aspects of transitions from damage to fracture in composites and structures / O.B. Naimark, M. Davydova, O.A. Plekhov, S.V. Uvarov // *Computers & Structures*. – 2000. – Vol. 76, No. 1. – С. 67–75.

12. Gigacycle fatigue initiation mechanism in Armco iron / C. Wang, D. Wagner, Q.Y. Wang, C. Bathias // *International Journal of Fatigue* – 2012. – P. 91–97.

13. Bathias C., Paris P.C. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. – New York: CRC Press, 2004. – 328 p.

### **References**

1. Zhu X., Shyam A., Jones J.W., Mayer H., Lasecki J.V., Allison J.E. Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles. *Int. J. Fatigue*, 2006, vol. 28, pp. 1566-1571, available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112306000946>.

2. Bathias C., Paris P. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. Taylor & Francis, 2004. 328 p.

3. Botvina L. Gigaciklovaya ystalost – novaya problema fiziki i mehaniki razrysheniya [Gigacycle fatigue – new problem of physics and mechanical damage]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2004, vol. 70, no. 4, pp. 41-51.

4. Shaniavski A.A., Skvortsov G.V. Fatigue limit – Material property as an opened or closed system? Practical view on the aircraft components failures in GCF area. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, vol. 22, no. 7, pp. 609-619.

5. Plekhov O., Palin-Luc T., Naimark O., Uvarov S., Saintier N. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue and fracture of engineering materials and structures*, 2005, vol. 28, iss. 1, pp. 169-178.

6. Sakai T. Review and prospects for current studies on very high cyclic fatigue of metallic materials for machine structural use. *Journal of solid mechanics and materials engineering*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 425-439.

7. Wang Q.Y., Berard J.Y., Rathery S., Bathias C. Technical note High-cycle fatigue crack initiation and propagation behaviour of high-strength spring steel wires, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, vol. 22, pp. 673-677, available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1460-2695.1999.t01-1-00184.x/abstract>.

8. Naimark O., Plekhov O., Betekhtin V., Kadomcev A., Narikova M. Kinetika nakopleniya defektov i dyalnost krivoi Vellera pri gigaciklovoi ystalosti metallov [The kinetics accumulation of defects and duality Weller's curve by gigacycle fatigue of metals]. *TPJ*, 2014, vol. 84, no. 3, pp. 89-94.

9. Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading. *Material Science and Engineering*, 2007, vol. 462, no. 1, pp. 367-370.

10. Plekhov O.A., Naimark O., Saintier N. Experimental study of energy accumulation and dissipation in iron in an elastic-plastic transition. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 52, no. 9, pp. 1236-1238.

11. Naimark O.B., Davydova M., Plekhov O.A., Uvarov S.V. Nonlinear and structural aspects of transitions from damage to fracture in composites and structures. *Computers & Structures*, 2000, vol. 76, no. 1, pp. 67-75.

12. Wang C., Wagner D., Wang Q.Y., Bathias C. Gigacycle fatigue initiation mechanism in Armco iron. *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 45, pp. 91-97.

13. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. New York: CRC Press, 2004. 328 p.

### **Об авторах**

**Вшивков Алексей Николаевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: aleksey.1992@mail.ru).

**Прохоров Александр Евгеньевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: alexproher@gmail.com).

**Уваров Сергей Витальевич** (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1, e-mail: usv@icmm.ru).

**Плехов Олег Анатольевич** (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, заместитель директора по научным вопросам Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1, e-mail: poa@icmm.ru).

### **About the authors**

**Vshivkov Aleksey Nikolaevich** (Perm, Russian Federation) – student of Perm State National Research University (15, Bukireva st., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: aleksey.1992@mail.ru).

**Prokhorov Alexander Evgenievich** (Perm, Russian Federation) – student of Perm State National Research University (15, Bukireva st., 614990, Perm, Russian Federation, email: alexproher@gmail.com).

**Uvarov Sergey Vitalievich** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. In Technical Sciences, Senior Researcher Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy of Sciences (1, Academic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: usv@icmm.ru).

**Plekhov Oleg Anatolievich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy director Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy of Sciences (1, Academic Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: poa@icmm.ru).

Получено 25.11.2013