

## Экспериментальное исследование процесса разрушения стали 40X13Т в режиме гигацикловой усталости

А.Е. Прохоров, О.А. Плехов

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
prokhorov.a@icmm.ru*

**Аннотация.** Исследовано усталостное разрушение термообработанной конструкционной стали 40X13 в режиме гигацикловой усталости. Испытания в режиме гигацикловой усталости проведены на ультразвуковой резонансной машине с частотой нагружения 20 кГц. В рамках работы во избежание эффекта перегрева образца под влиянием высокочастотной нагрузки разработана система поддержания температуры образца в процессе испытания. Рассмотрены особенности эволюции разрушения при воздействии на образец переменного магнитного поля посредством оригинальной системы намагничивания образца. Проведен структурный анализ испытанных образцов методом электронно-сканирующей микроскопии. В результате анализа показано влияние переменного магнитного поля на размеры зон медленного роста трещины. Так в образцах, испытанных под действием переменного магнитного поля, уменьшается площадь зоны медленного роста трещины по сравнению с образцами, испытанными в нормальных условиях.

**Ключевые слова:** усталостное разрушение, сталь, гигацикловая усталость, строительные конструкции.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 18-9-1-31.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-125-132

## Experimental investigation of process of fracture of steel 40X13T in mode of gigacycle fatigue

A.E. Prokhorov, O.A. Plekhov

*Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russia  
prokhorov.a@icmm.ru*

**Abstract.** The work is devoted to study of the process of fatigue fracture in samples of heat-treated structural steel 40X13 under gigacycle regime. The gigacycle tests were carried out on an ultrasound resonant machine with a loading frequency of 20 kHz. As part of the work, in order to avoid an effect of overheating of the sample under the influence of high-frequency load, a system to maintain the temperature of the sample during the test was developed. Features of evolution of fracture under the influence of an alternating magnetic field on the sample by means of the original magnetization system of the sample are considered. The structural analysis of the tested samples by electron scanning microscopy was carried out. The analysis shows the effect of the alternating magnetic field on the size of zones of slow crack growth. It is shown that in the samples tested under the action of the alternating magnetic field the area of the zone of slow crack growth is reduced in comparison with the samples tested under normal conditions.

**Key words:** gigacycle, steel fracture, ultrasound resonant machine, alternating magnetic field.

**Acknowledgments.** This work was carried out with the support of the Program of Fundamental Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 18-9-1-31.

### Введение

Долговременные (малоамплитудные) циклические нагрузки являются одними из наиболее часто встречающихся режимов эксплуатации конструкций из высокопрочных сталей. Обеспечение режима безопасной работы конструкции требует, как детального изучения процессов, связанных с образованием усталостных трещин и развитием усталостного разрушения, так, и развития методов неразрушающего контроля для проведения диагностических мероприятий и своевременного обслуживания конструкций. Исследования процессов разрушения материалов в условиях усталостного нагружения показали, что развитие усталостных трещин возможно не только с поверхности образца, как это обычно наблюдается в режиме многоциклового усталости, но и в объеме материала при его нагружении в режиме так называемой гигацикловой усталости [1–2]. Под нагружением в режиме гигацикловой усталости обычно понимают циклическое деформирование с амплитудой напряжений, не превышающей 0,2 предела пропорциональности, при этом количество циклов до разрушения увеличивается до значения  $10^7$ – $10^9$  циклов. На протяжении последних десятилетий эта область усталости служит предметом изучения многих групп исследователей [3–5]. Главная особенность усталостного разрушения в режиме гигацикловой усталости – зарождение трещины под поверхностью материала. Инициатором развития усталостной трещины в режиме гигацикловой усталости являются неоднородность в структуре материала, включение или скопление пор в объеме материала [5]. Развитие усталостной трещины в такой системе приводит к образованию на поверхности разрушения структуры типа «рыбий глаз», включающей в себя несколько областей с характерными масштабами зеренной структуры. Процесс эволюции структуры материала до стадии критического роста макроскопической трещины до сих пор является дискуссионным вопросом. В настоящее время существуют несколько моделей данного явления [6–7]. Развитие и верификация предложенных моделей требуют детального экспериментального изучения процесса разрушения материала в режиме гигацикловой усталости.

Испытания на базе  $10^7$  циклов и более требуют значительных временных затрат при испытаниях на классических усталостных сервогидравлических испытательных машинах с частотой нагружения 100 Гц. Современные испытательные резонансные ультразвуковые машины [2] позволяют проводить испытания с частотой 20 кГц, что значительно сокращает время испы-

тания, однако имеют недостатки, связанные с перегревом образцов в процессе испытания.

Исследования структуры поверхности разрушения после проведенного испытания позволяют ответить на ряд вопросов, связанных с механизмами образования дефектов [5], но не могут ответить на вопросы, связанные с кинетикой развития дефектной структуры на различных стадиях разрушения.

В данной работе делается попытка разработки методов контроля процессов (электрической проводимости и магнитной индукции), сопровождающих процесс эволюции материала в режиме реального времени, и проводится исследование поведения структуры материала при различных внешних воздействиях на образец в процессе испытания в режиме гигацикловой усталости.

### Материал и условия эксперимента

Для проведения испытания в режиме гигацикловой усталости в работе используется ультразвуковая резонансная машина USF-2000 производства Shimadzu. В основе испытательной установки лежит пьезоэлектрический элемент, создающий в системе механические колебания частотой 20 кГц. Далее через волновод колебания передаются в образец. Геометрия образца обеспечивает условия для возникновения резонанса на частоте нагружения.

Для определения механических свойств материала, необходимых для расчёта геометрических размеров образца, обеспечивающих режим резонанса, была использована электромеханическая разрывная машина AGX-plus производства Shimadzu с установленной динамометрической ячейкой с предельной нагрузкой 300 кН и классом точности 0,5. Для измерения деформаций в процессе квазистатического испытания применялся контактный экстензометр с базой измерения 25 мм и классом точности 0,5.

Испытания проводились на образцах конструкционной стали 40X13 в исходном состоянии и после термообработки. Закалка материала проводилась при температуре 1000 °С с последующим отпуском в масле при температуре 600 °С на протяжении 13 ч.

### Геометрия образцов для испытания

Для проведения механических испытаний на определение модуля упругости использовались образцы, изготовленные согласно ГОСТ 1497–84 (рис. 1).

Механические испытания проводились в условиях квазистатического растяжения на образцах стали 40X13 в исходном состоянии и после термообработки. Скорость движения за-

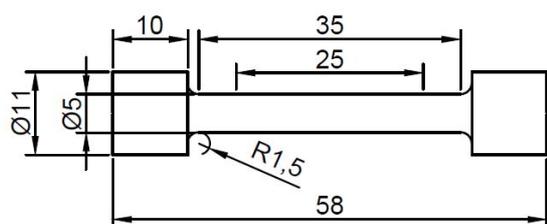


Рис. 1. Геометрия образцов для квазистатических испытаний

Fig. 1. Geometry of specimens for quasi-static tests

хватов испытательной машины равна 1 мм/мин (рис. 2).

По результатам механических испытаний был определен модуль упругости. Модуль упругости для стали до и после термообработки составил 2,1 ГПа, что соответствует среднему значению для данного класса материалов. Следует отметить, что предел прочности для стали после термообработки значительно выше предела прочности для стали в исходном состоянии, что тоже согласуется с теоретическими данными.

Для расчета геометрии образцов для испытаний в ультразвуковой резонансной машине использовалась методика [2]. Геометрия образца, обеспечивающая возникновение резонанса на частоте 20 кГц, представлена на рис. 3.

Анализ собственных частот для указанной геометрии проводился методом конечных эле-

ментов в программном продукте Comsol Multiphysics (рис. 4). По результатам анализа показано, что собственная частота колебаний образца 20,1 кГц, максимальные перемещения на торцах образца, а в центре перемещения равны нулю.

### Испытания образцов в режиме гигацикловой усталости

Перед началом проведения испытания в режиме гигацикловой усталости необходимо оценить предел усталости материала для выбора рабочей нагрузки при испытании. Существует ряд методик для оценки предела усталости, один из них итерационный метод с построением кривой усталости (кривой Веллера) [8]. В настоящей работе для оценки предела усталости использовался метод саморазогрева, предложенный в работе [9]. Суть метода состоит в том, что образец испытывается в режиме многоциклового усталости с постепенным увеличением нагрузки. В процессе испытания регистрируется температура на поверхности образца. Количество циклов на каждом уровне нагрузки выбирается таким образом, чтобы на каждом участке устанавливался постоянный температурный режим. По итогам испытания строится диаграмма зависимости постоянного значения температуры, достигнутого на каждом участке, от нагрузки, приложенной к образцу на данном участке нагружения (рис. 5).

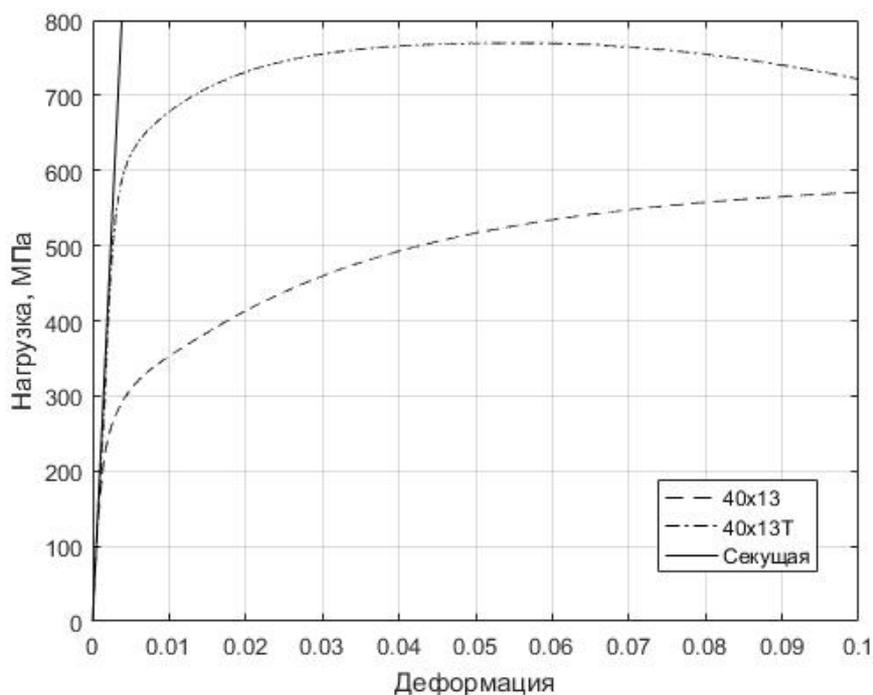


Рис. 2. Диаграмма нагружения образцов стали 40X13 и 40X13Т при квазистатическом растяжении

Fig. 2. Loading diagram of 40X13 and 40X13T steel samples under quasi-static tension.

The x-axis represents deformation. The y-axis represents load, MPa

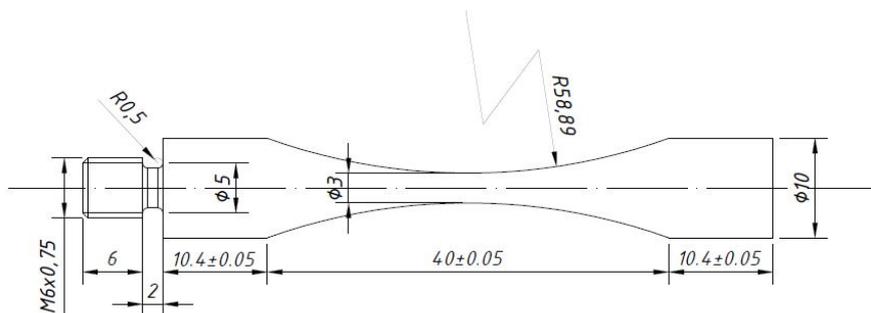


Рис. 3. Геометрия образца для проведения усталостных испытаний на ультразвуковой испытательной установке

Fig. 3. Geometry of sample for fatigue testing on ultrasonic test setup

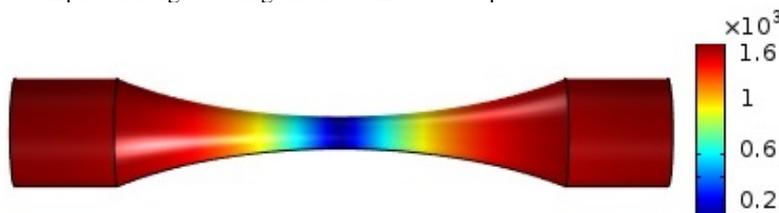


Рис. 4. Результат расчета задачи на определение собственных частот

Fig. 4. Result of mathematical simulation of problem to determine eigen frequencies

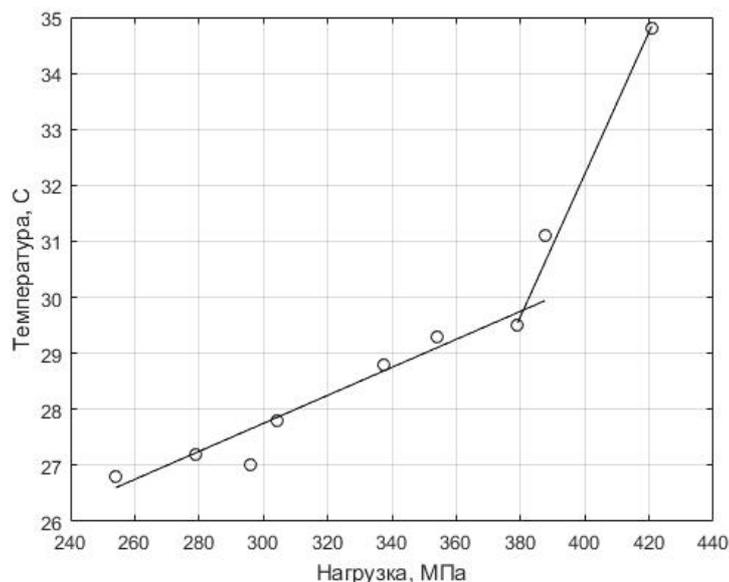


Рис. 5. Зависимость температуры на поверхности образца от приложенной нагрузки

Fig. 5. Temperature dependence at sample surface on applied load.

The x-axis represents load, MPa. The y-axis represents temperature, °C

Из графика видно, что зависимость имеет билинейный характер, согласно гипотезе, предложенной в работе [9], предел усталости находится в точке пересечения линий аппроксимации этой зависимости. По результатам испытания предел усталости для данного материала составляет 360 МПа. Для проведения эксперимента в режиме гигацикловой усталости была выбрана нагрузка 305 МПа. В процессе испытания образцов с приложенной нагрузкой 305 МПа с частотой 20 кГц происходит перегрев образца, о чем свидетельствует характерное потемнение его рабочей части.

Для исключения перегрева в процессе испытания регистрировалась температура поверхности образца инфракрасным пирометром. При достижении значения температуры 40 °C испытание останавливалось до тех пор, пока температура поверхности не опускалась до значения комнатной температуры 27 °C, после чего нагружение возобновлялось.

Испытания проводились в двух постановках: в нормальных условиях и при воздействии внешнего переменного магнитного поля. Схема испытания во внешнем магнитном поле представлена на рис. 6.

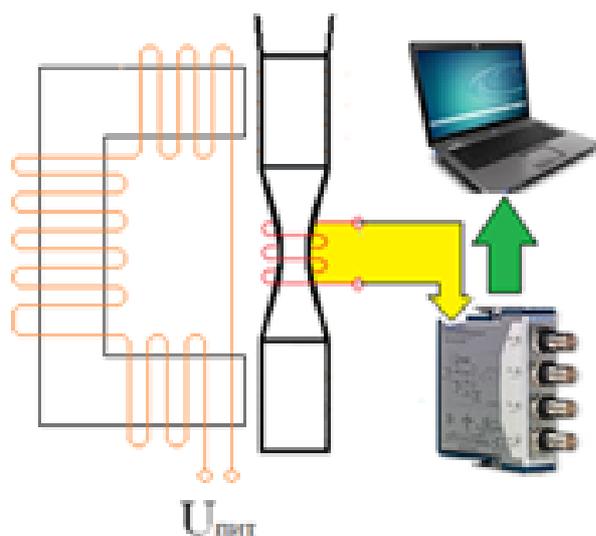


Рис. 6. Схема испытания во внешнем магнитном поле  
Fig. 6. Scheme of testing in external magnetic field

В схеме (рис. 7) образец устанавливался в разрез магнитопровода, по обмотке которого протекает переменный электрический ток с частотой 500 Гц. В области рабочей части образца устанавливалась катушка индуктивности, регистрирующая изменения магнитного поля. В такой схеме образец является частью сердечника трансформатора, возникновение в образце неоднородностей в виде разрыва или скопления пор должно повлечь за собой возникновение неоднородностей в сигнале вторичной обмотки катушки индуктивности, расположенной на образце. Наиболее подробно система описана в работе [10].

### Исследование поверхностей разрушения

По итогам проведенных испытаний были исследованы поверхности разрушения двух испытанных образцов термообработанной стали 40Х13Т. На обоих образцах очаг зарождения

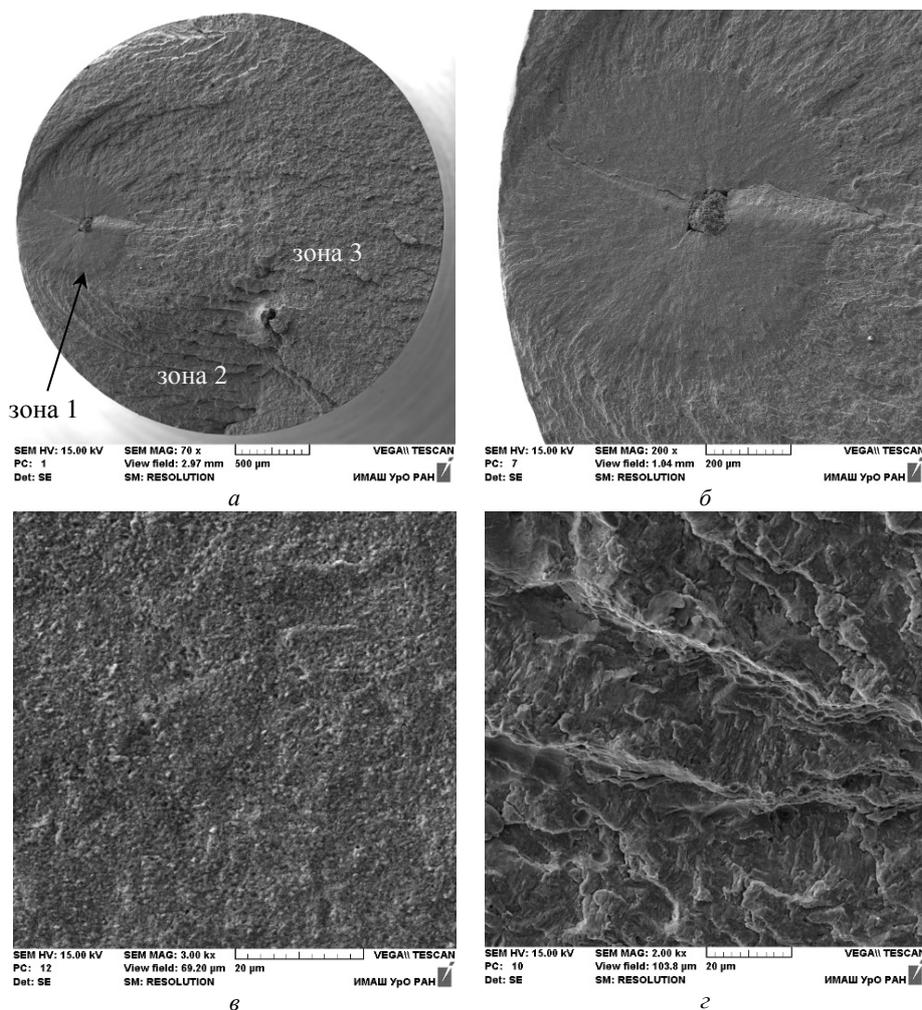
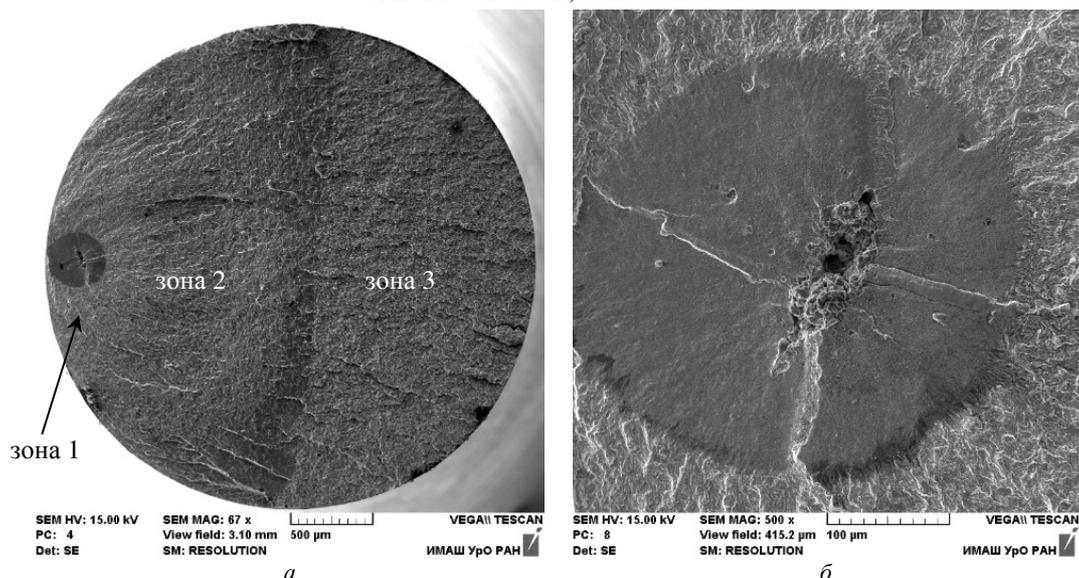


Рис. 7. Поверхность разрушения образца, испытанного в нормальных условиях: а – общий вид поверхности излома; б – включение в очаге разрушения; в – зона 1, зона медленного роста трещины; г – зона 2, зона усталостного разрушения  
Fig. 7. Fracture surface of sample tested under normal conditions: a – General view of fracture surface, b – inclusion in fracture site, c – zone 1, zone of slow crack growth, d – zone 2, zone of fatigue fracture



**Рис. 8.** Поверхность разрушения образца, испытанного в условиях воздействия переменного магнитного поля: *a* – общий вид поверхности излома; *б* – включение в очаге разрушения

**Fig. 8.** Fracture surface of sample tested under influence of alternating magnetic field: *a* – General view of fracture surface, *b* – inclusion in fracture site

усталостной трещины располагается под поверхностью образца и имеет вид «рыбьего глаза» с крупным включением в его центре, которое инициировало зарождение и начало распространения усталостной трещины.

В образце, испытанном в нормальных условиях, очаг зарождения усталостной трещины концентрируется вокруг крупного включения (до 100 мкм) (рис. 7, б), находящегося под поверхностью образца, от которого идут несколько глубоких вторичных трещин через всю зону медленного роста трещины (зона 1). По результатам микрорентгеноспектрального анализа было определено, что включение содержит в своем составе 51 % Al, 43 % O и 4 % Ti, что позволяет отнести его к оксиду алюминия и титана. Зона 1 в диаметре составляет ~730 мкм и имеет практически бесструктурный макрорельеф (рис. 7, в). Однако на микроуровне в этой зоне наблюдаются мелкодисперсные элементы вязкого разрушения похожие на мелкие ямки.

Макрорельеф зоны ускоренного роста трещины (зона 2) состоит из вязких и хрупких элементов разрушения, которые прослеживаются также и на микрорельефе этой зоны при большем увеличении в сочетании с более выраженными пластичными усталостными бороздками (рис. 7, г).

В образце, испытанном в условиях воздействия внешнего переменного магнитного поля, наблюдается аналогичный сценарий развития разрушения (рис. 8, а). Источником зарождения и роста усталостной трещины так же послужил агломерат включений размером до 100 мкм, который по результатам микрорентгеноспектрального анализа представляет собой скопление ок-

сидов алюминия и титана (до 40 % O, 56 % Al, 60 % Ti) (рис. 8, б).

Отличительной особенностью данного образца от образцов, испытанных в нормальных условиях, является значительно (2–2,5 раза) меньшая зона 1, зона медленного роста трещины (350 мкм) при равных размерах включения и приблизительно равных значениях времени испытания (25 млн. циклов и 46 млн. циклов соответственно). Следует отметить, что в этом образце на микрорельефе в зоне ускоренного роста трещины более выражены пластические усталостные бороздки по сравнению с образцами, испытанными в нормальных условиях.

### Заключение

В рамках экспериментального исследования особенностей разрушения образцов стали 40X13 после термообработки в условиях гигацикловой усталости на испытательной ультразвуковой резонансной машине с частотой нагружения 20 кГц осуществлены работы по подготовке испытательной установки и материала для проведения ультразвуковых испытаний.

Определены механические характеристики исследуемого материала, в том числе оценка предела усталости, проведены испытания материала в режиме гигацикловой усталости в нормальных условиях и при воздействии внешнего магнитного поля.

Проведен структурный анализ поверхности разрушения испытанных образцов.

В ходе подготовительных работ использована методика оценки предела усталости по анализу поля температур на поверхности образца в

условиях многоциклового усталости с частотой нагружения 100 Гц.

Разработана система контроля температуры поверхности образца для исключения эффекта перегрева в процессе гигациклового испытания на основе бесконтактного инфракрасного пирометра.

Проведены испытания образцов стали 40Х13Т в нормальных условиях и при воздействии внешнего переменного магнитного поля с использованием оригинального технологического решения.

Исследованы поверхности разрушения испытанных образцов. На поверхностях разрушения наблюдаются усталостные трещины в виде «рыбьего глаза». Поверхности разрушения могут быть разделены на несколько зон: зона очага разрушения или медленного роста трещины, зона ускоренного роста трещины и зона долома. В зоне медленного роста трещины наблюдается бесструктурный макрорельеф, в зоне ускоренного роста – выраженные усталостные бороздки, что соответствует движению роста трещины в режиме Париса, в зоне долома – рельеф хрупкого квазискола, при этом на фасетках квазискола отмечаются гребни отрыва. Важным наблюдением в данной работе является значительно меньший размер зоны медленного роста трещины в образце, находившемся в переменном магнитном поле.

#### Литература

1. Wang C., Wagner D., Wang Q., Bathias C. International Journal of Fatigue. 2012. 45(12). P. 91–97.
2. Bathias C., Paris P. Gigacycle fatigue in mechanical practice (New York: Marcel Dekker Publisher Co., 2005).
3. 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. 28. P. 1566–1571.
4. Botvina L. Gigaciklovaya ystalost – novaya problema fiziki I mehaniki razrysheniya. Plants laboratory. Materials diagnostic. 2005. 70(4). P. 41–51.
5. 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. V. 3(3). P. 425–439.
6. 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. V. 462, no. 1. P. 367–370.
7. 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. V. 76, no. 1. P. 67–75.
8. Wang Q.Y., Berard J.Y., Rathery S., Bathias C. Technical note High-cycle fatigue crack initiation and propagation behaviour of highstrength sprin steel wires, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1999. V. 22. P. 673–677. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1460-2695.1999.t01-1-00184.x/abstract>.
9. Luong M.P., Dang-Van K. Metal fatigue limit evaluation using infrared thermography. Proceedings of workshop advanced infrared technology and applications, Capri, Sept. 20–21, 1993. P. 245–253.
10. Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Uvarov S.V., Plekhov O.A. Peculiarities of mechanical behavior of armco-iron under fatigue in gigacycle regime // PNPRU Mechanics bulletin. 2013. No. 4. P. 18–32.

#### References

1. Wang C., Wagner D., Wang Q., Bathias C. International Journal of Fatigue. 2012. 45(12). P. 91–97.
2. Bathias C., Paris P. Gigacycle fatigue in mechanical practice (New York: Marcel Dekker Publisher Co., 2005).
3. 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. 28. P. 1566–1571.
4. Botvina L. Gigaciklovaya ystalost – novaya problema fiziki I mehaniki razrysheniya. Plants laboratory. Materials diagnostic. 2005. 70(4). P. 41–51.
5. 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. V. 3(3). P. 425–439.
6. 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. V. 462, no. 1. P. 367–370.
7. 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. V. 76, no. 1. P. 67–75.
8. Wang Q.Y., Berard J.Y., Rathery S., Bathias C. Technical note High-cycle fatigue crack initiation and propagation behaviour of highstrength

sprin steel wires, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999. V. 22. P. 673–677. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1460-2695.1999.t01-1-00184.x/abstract>.

9. *Luong M.P., Dang-Van K.* Metal fatigue limit evaluation using infrared thermography. *Proceed-*

*ings of workshop advanced infrared technology and applications*, Capri, Sept. 20–21, 1993. P. 245–253.

10. *Vshivkov A.N., Prokhorov A.E., Uvarov S.V., Plekhov O.A.* Peculiarities of mechanical behavior of armco-iron under fatigue in gigacyclic regime // *PNPRU Mechanics bulletin*. 2013. No. 4. P. 18–32.

*Поступила в редакцию 28.10.2018*

#### *Об авторах*

ПРОХОРОВ Александр Евгеньевич, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6511-2105>, [prokhorov.a@icmm.ru](mailto:prokhorov.a@icmm.ru);

ПЛЕХОВ Олег Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, зам. директора, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-0378-8249>, [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru).

#### *About the authors*

PROKHOROV Aleksander Evgenievich, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS (UB RAS), 1 Akademik Korolev St., Perm, 614013, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6511-2105>, [prokhorov.a@icmm.ru](mailto:prokhorov.a@icmm.ru);

PLEKHOV Oleg Anatolievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of RAS, Deputy Director, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, 1 Akademik Korolev St., Perm, 614013, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-0378-8249>, [poa@icmm.ru](mailto:poa@icmm.ru).