

Фрактографическое исследование изломов образцов из упрочненной низколегированной стали после малоцикловых испытаний

Е.С. Александрова, А.М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Рассмотрены вопросы усталостного разрушения конструкционной низколегированной стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации. Малоцикловым испытаниям при «мягком» нагружении подвергались образцы из стали 09Г2С в состоянии поставки и после упрочнения равноканальным угловым прессованием. Проведен фрактографический анализ усталостных изломов методом сканирующей электронной микроскопии. Проанализировано влияние объемного упрочнения равноканальным угловым прессованием на микроморфологию поверхностей разрушения низколегированной стали. Показано различие в механизмах усталостного разрушения образцов из исходной стали и стали, упрочненной равноканальным угловым прессованием, в зависимости от параметров циклического нагружения. Установлено, что характер разрушения упрочненной равноканальным угловым прессованием стали 09Г2С при больших числах циклического нагружения отличается от исходного состояния. При высоких напряжениях цикла и малом числе циклов нагружения для стали 09Г2С в исходном и упрочненном состоянии характерен квазистатический характер разрушения. Для упрочненной стали 09Г2С присуще отличие в конфигурации зоны усталостного разрушения от излома исходного образца, а также хрупкий характер разрушения на завершающей стадии разрыва образца.

Ключевые слова: сталь, малоцикловые испытания, усталостное разрушение, фрактография, равноканальное угловое прессование, излом, сканирующая электронная микроскопия, напряжение, цикл.

Fractography of Strengthened Low Alloy Steel Samples after Low-Cycle Tests

E.S. Aleksandrova, A.M. Ivanov

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The problems of fatigue failure of structural low-alloy steel subjected to severe plastic deformation are reviewed. Specimens of steel 09G2S in the delivery state and after hardening by equal channel angular pressing were subjected low-cycle tests with soft loading. Fractographic analysis of fatigue breaks was performed by scanning electron microscopy. We analyzed the influence of the volume hardening by equal channel angular pressing on the surfaces fracture micromorphology of low-alloy steel. It shows the difference in the mechanisms of fatigue fracture of the samples from the initial steel and hardened by equal channel angular pressing, depending on the parameters of cyclic loading. It was found that the character of the fracture of hardened 09G2S steel by equal channel angular pressing, at high numbers of cyclic loading is different from the initial state. At high stresses of cycle and a small number of loading cycles 09G2S steel in the initial and hardened condition is characterized by a quasi-static character of fracture. For hardened steel 09G2S it is significant the difference in the configuration of fatigue fracture zone against the initial sample break and brittle character of fracture at the final stage of a specimen fracture.

Key words: steel, low-cycle testing, fatigue failure, fractography, equal channel angular pressing, break, scanning electron microscopy, stress, cycle.

Введение

Как известно, изучение изломов конструкционных материалов необходимо для диагностики характера повреждаемости и разрушения деталей и элементов конструкций в зависимости от различных факторов. При этом строение зон усталостного излома зависит от многих факторов: величины и характера приложенной нагрузки, свойств материала, температуры, агрессивности среды и др. [1].

Вопросам изучения этапов процесса усталостного разрушения металлов и сплавов посвящены работы В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, В.В. Шевеля, В.Т. Трощенко, С.Я. Яремы и других авторов. Существуют разные подходы к описанию стадийности накопления повреждений при циклическом нагружении материалов [2]. Так, по Я.Б. Фридману на усталостном изломе можно выделить пять зон: фокус излома, очаг разрушения, участок избирательного развития трещины, участок ускоренного развития трещины и зона долома [3]. Иванова В.С. весь процесс усталости разделяет на четыре периода: инкубационный, разрыхления, развития микротрещин до макротрещин критического размера и окончательного разрушения [4]. Терентьев В.Ф. в своих работах в диапазоне циклических напряжений от σ_k^u до σ_r^u весь процесс усталости в зависимости от числа циклов нагружения разделяет на два основных периода: зарождения и распространения усталостных трещин, которые в свою очередь можно разбить на несколько этапов [5]. Так период зарождения усталостных трещин он разделяет на три стадии: стадию циклической микротекучести, стадию циклической текучести и стадию циклического упрочнения. А в периоде распространения усталостных трещин выделяет три стадии: стадию порогового роста усталостной трещины при скорости распространения трещины v в интервале 10^{-5} – 10^{-6} мм/цикл, стадию стабильного роста усталостной трещины (10^{-5} – $5 \cdot 10^{-6}$ $v < 10^{-3}$ мм/цикл) и стадию ускоренного (нестабильного) роста усталостной трещины при $v > 10^{-3}$ мм/цикл. По некоторым другим работам процесс развития усталостной трещины включает стадии медленного стабильного роста трещины (зона I_s), ускоренного нестабильного развития трещины (зона I_r) и стадию долома (зона I_d), разрушение в которой происходит по механизмам статического разрушения [6]. Зона долома наступает при достижении усталостной трещиной длины критического значения $l_f = l_s + l_r$ (зона усталостного развития трещины). В последние годы исследования проблемы усталости материалов охватывают и область гигациклов [7].

С развитием и применением методов интенсивной пластической деформации в задачах

упрочнения встал вопрос исследования особенностей усталостного разрушения металлических материалов с ультрамелкозернистой структурой. В настоящее время имеется очень мало экспериментальных данных по влиянию интенсивной пластической деформации на характер усталостного разрушения конструкционных сталей. Обзор работ, посвященных изучению закономерностей циклического упрочнения/разупрочнения и усталостного разрушения субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов, представлен в [8]. Повышение прочностных свойств стали 06МБФ с субмикрокристаллической структурой (СМК) при циклических нагружениях отмечено в [9]. При испытаниях на циклическое растяжение разрушение образцов с надрезом из стали 06МБФ с СМК структурой характеризуется типичным бороздчатым рельефом с усталостными бороздками в области стабильного роста усталостной трещины, переходной областью с микротрещинами и вязкой ямочной зоной долома образца. Повышение усталостной прочности стали 08Х18Н10Т после РКУП вызвано измельчением и двойникованием структуры аустенита и появлением мартенсита [10]. Различие в картинах поверхности усталостного разрушения у образцов из магниевого сплава МА2-1 в исходном состоянии и после РКУП отмечено в [11]. Если в крупнозернистых титане ВТ1-00 и циркониевом сплаве Zr-2,5%Nb стабильное распространение усталостной трещины связано с пластичным бороздчатым рельефом поверхности разрушения, то в СМК материалах после РКУП наблюдается межзеренное разрушение, а также разрушение с образованием квазивязкого бороздчатого рельефа и развитие вторичного растрескивания вдоль бороздок [12]. Информация о макро- и микростроении изломов необходима для оценки эффективности методов упрочнения, в том числе интенсивной пластической деформации.

Поскольку получение сплавов с оптимальной структурой для работы в условиях циклического нагружения является важной задачей для повышения надежности и долговечности деталей машин и элементов конструкций, работающих в условиях усталости [13], то формирование представлений о механизмах усталостного разрушения сталей с ультрамелкозернистой структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией – актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в исследовании механизма разрушения конструкционной низколегированной стали, упрочненной интенсивной пластической деформацией, при малоцикловых испытаниях.

Материал и методика исследований

Исследовался характер разрушения низколегированной стали 09Г2С, химический состав которой: 0,1 % С, 0,85 % Si, 1,41 % Mn, 0,17 % Cr, 0,18 % Ni, 0,35 % Cu, остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)».

Результаты механических испытаний образцов из стали 09Г2С на малоцикловую усталость представлены в [14]. В этой работе малоцикловым испытаниям при «мягком» нагружении подвергались образцы из стали 09Г2С в состоянии поставки и после упрочнения равноканальным угловым прессованием в два прохода по маршруту С при температуре 673 К.

В настоящей работе после серии циклических испытаний образцы для анализа изломов были выбраны следующим образом: максимальные напряжения цикла лежали в пределах $\sigma_{\text{ти}} < \sigma < \sigma_{\text{ви}}$, и $\sigma < \sigma_{\text{ти}}$ – для исходного состояния, $\sigma \sim \sigma_{\text{ву}}$, $\sigma \sim \sigma_{\text{ту}}$ и $\sigma < \sigma_{\text{ту}}$ – для упрочненной стали соответственно (рис. 1). Здесь $\sigma_{\text{ти}}$ и $\sigma_{\text{ту}}$, $\sigma_{\text{ви}}$ и $\sigma_{\text{ву}}$ – статические пределы текучести и прочности для исходной и упрочненной стали соответственно.

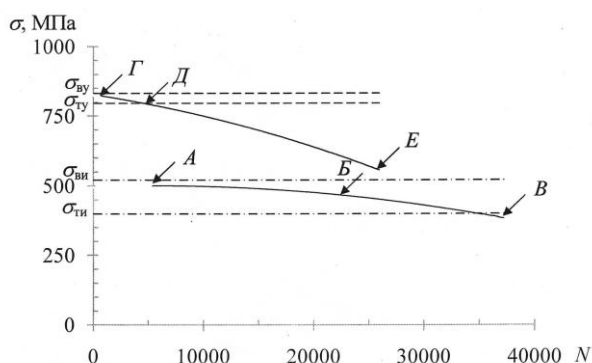


Рис. 1. Кривая малоциклового усталости для образцов из стали 09Г2С в исходном состоянии (линия А–В) и подвергнутых РКУП (линия Г–Е)

Анализ строения изломов образцов проводился методами оптической и электронной фрактографии. Исследование поверхности разрушения образцов с круглым сечением, испытанных на циклическое нагружение при температуре 293 К, проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI TM 3030 в режиме вторичных электронов.

Результаты исследований и обсуждение Сталь 09Г2С в исходном состоянии

А. Область $\sigma_{\text{ти}} < \sigma < \sigma_{\text{ви}}$ ($1,27\sigma_{\text{ти}} = \sigma = 0,96\sigma_{\text{ви}}$): 5431 цикл. Разрушение на 5431-ом «отнулевом» цикле при амплитуде напряжения цикла, близкой к значению статической прочности 09Г2С $\sigma_{\text{ви}}$, по своему характеру относится к области квазистатического разрушения (рис. 2). Вязкое разрушение с образованием «чашечного» излома в шейке растянутого образца произошло при значительной утяжке (рис. 2, а) и характеризуется наличием ямочного микрорельефа (рис. 2, б, в). Очаг разрушения расположен в центральной зоне усталостного разрушения. Вдоль всего периметра излома имеется срез от касательных напряжений. Структура поверхности разрушения матовая, неровная. В центральной части 1 шейки образца вязкое разрушение характеризуется наличием образовавшихся путем слияния микропор равноосных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями (рис. 2, б). При достижении центральной трещиной периферийной зоны 2 шейки образца скорость её распространения резко возрастает и меняется направление её развития. Внутри полос сдвига в периферийной зоне зарождаются новые трещины путем разрыва перемычек между порами, разрыв образца по периферии происходит срезом вдоль полос сдвига (рис. 2, в). Излом в периферийной зоне характеризуется вытянутыми ямками сдвига.

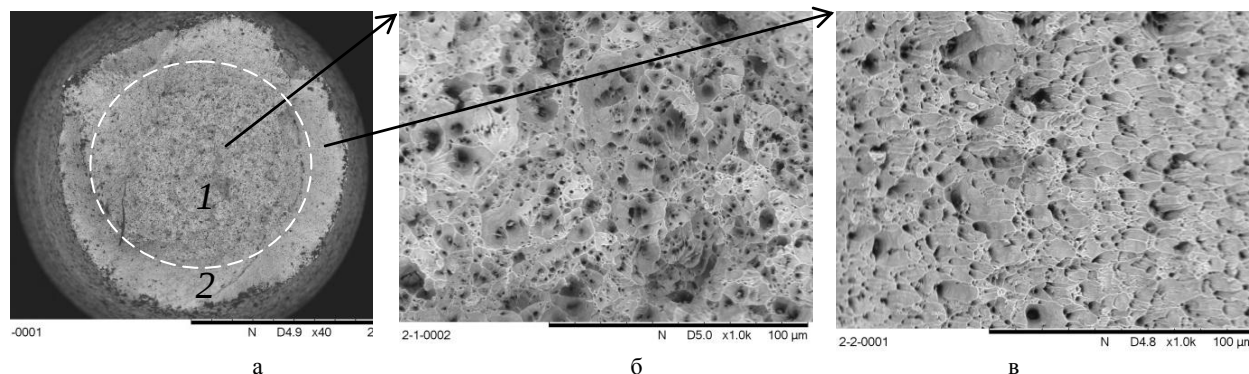


Рис. 2. Макро- и микрорельеф излома образца из стали 09Г2С в состоянии поставки после нагружения в 5431 цикл: а – общий вид; б – зона 1; в – зона 2

Б. Область $\sigma_{\text{ти}} < \sigma < \sigma_{\text{ви}}$ ($1,18\sigma_{\text{ти}} = \sigma = 0,89\sigma_{\text{ви}}$): 22919 циклов. Малоцикловые испытания проведены при номинальном напряжении, близком к середине интервала напряжений. На макроизломе образца (рис. 3, а) наблюдаются три основные зоны: зона медленного развития трещины 1, которая характеризуется малой степенью шероховатости поверхности излома на этом участке, зона ускоренного развития трещины 2 с более шероховатой поверхностью и зона долома 3 с утяжкой со стороны, диаметрально противоположной очагу разрушения [6]. Участок медленного избирательного развития 1, включая очаг разрушения, занимает примерно 0,25 площади поперечного сечения образца. В зоне ускоренного развития (40–45 % поперечного сечения) траектория трещины располагается в плоскости, составляющей угол $\sim 45^\circ$ с осью образца, затем она меняет направление своего развития, составляя угол 105° с этой плоскостью. В этой зоне видны макробороздки-ступеньки распространения трещины. Зона долома обладает признаками статического разрушения (рис. 3, г).

В зоне медленного развития трещины 1 видны линии усталости, расположенные перпендикулярно направлению распространения усталостной трещины (рис. 3, б). Для данного размаха напряжений и количества циклов нагружения на этой фотографии видна полоса шириной

~ 4 мкм, на которой расположены линии усталости. Волнистая линия усталости отражает форму фронта трещины и определяется ориентацией отдельных зерен. На отдельных участках также отмечены следы усталостных линий. Вязкий характер разрушения в зоне ускоренного развития трещины идентифицируется наличием ямочного микрорельефа (рис. 3, в). Наблюдаются ямки нормального отрыва. Зона долома имеет микроструктуру, типичную для вязкого разрушения при статических испытаниях – ямочный микрорельеф (рис. 3, г), но размеры ямок меньше, чем в зоне 2.

В. Область $\sigma < \sigma_{\text{ти}}$ ($\sigma = 0,97\sigma_{\text{ти}}$): 37195 циклов. При напряжениях ниже предела текучести на макроизломе также наблюдаются три основные зоны качественно с такими же характеристиками, что и в случае Б ($\sigma_{\text{ти}} < \sigma < \sigma_{\text{ви}}$), но при этом зона развития трещины (зона медленного развития трещины и зона ускоренного развития трещины) занимает относительно большую площадь в поперечном сечении по сравнению со случаем Б. Здесь утяжка расположена также со стороны, диаметрально противоположной очагу разрушения. В зоне ускоренного развития трещины имеются макроскопические бороздки-ступеньки, как и в случае Б, но они более четко выражены и их количество больше. В зоне ускоренного развития направление трещины составляет угол $\sim 60^\circ$ с осью образца, после изменения траектории угол между направлениями трещин равен $\sim 110^\circ$.

Микрорельеф поверхности разрыва образца в зоне медленного развития трещины для данного режима испытаний качественно схож со случаем Б. Обнаружены микротрещины, проходящие через систему микропор. Зона ускоренного развития трещины характеризуется также вязким ямочным характером разрушения. Размеры ямок нормального отрыва значительно больше, чем для случая Б. Зона долома имеет микроструктуру, аналогичную случаю Б, и типичный ямочный микрорельеф.

Сталь 09Г2С после РКУП

Конфигурация границ и характеристика зон усталостного излома для упрочненной стали 09Г2С при больших числах циклов нагружения отличаются от изломов исходных образцов.

Г. Область $\sigma \approx \sigma_{\text{ви}}$: 862 цикла. Макростроение излома практически идентично случаю А ($\sigma = 0,96\sigma_{\text{ви}}$), т.е. излом разрушенного образца из 09Г2С, подвергнутого РКУП, представляет собой качественно такую же картину, что и излом образца в состоянии поставки. Общим в режиме циклического нагружения для обоих случаев является то, что напряжение цикла практически равно пределу прочности и число циклов

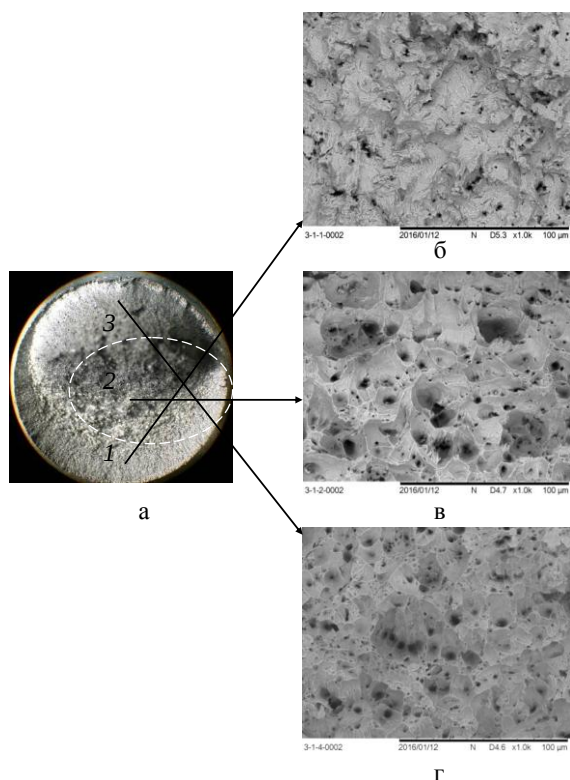


Рис. 3. Макро- и микрорельеф излома образца из стали 09Г2С в состоянии поставки после нагружения в 22919 циклов: а – общий вид; б – зона 1; в – зона 2; г – зона 3

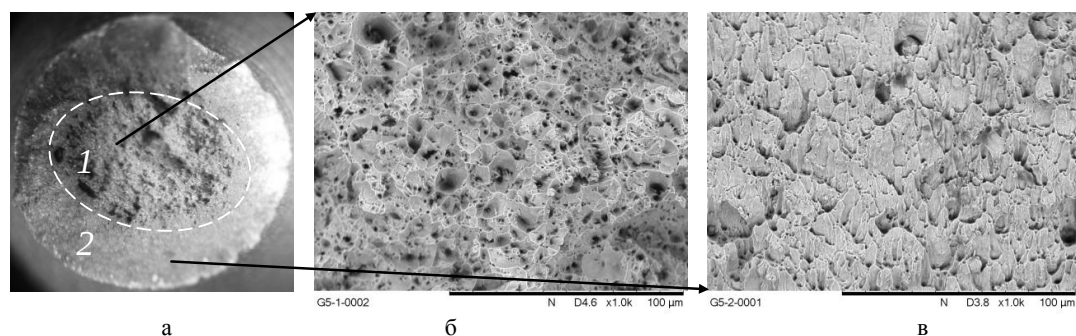


Рис. 4. Макро- и микрорельеф излома образца из стали 09Г2С, подвергнутого РКУП, после нагружения в 862 цик-
ла: а – общий вид; б – зона 1; в – зона 2

нагружения до разрушения образца мало. В данном случае разрушение произошло при меньшей, чем для исходного состояния, утяжке, что связано с более высокой прочностью материала в результате воздействия РКУП. Очаг разрушения так же, как и в случае А, расположен в центре зоны усталостного разрушения, но имеет эллиптическую форму. Срез от касательных напряжений вдоль всего периметра излома по сравнению с исходным состоянием (поз. А) шире.

Микрорельефы излома образца стали 09Г2С после РКУП в исследованных участках (рис. 4, б, в) не имеют качественных отличий по сравнению с исходным состоянием (рис. 2, б, в).

Д. Область $\approx \sigma_{\text{ту}}$: 4200 циклов. На макроизломе образца наблюдаются все три основные зоны (рис. 5, а), но конфигурация 1-й и 2-й зон отличается от соответствующего излома исходного образца, когда $\approx \sigma_{\text{ти}}$.

В зоне медленного развития трещины 1 (рис. 5, б) усталостные бороздки менее выражены, чем в исходном образце. В зоне ускоренного развития трещины 2 также наблюдаются ступенчатые макробороздки перемещения трещины. В начале этой зоны трещина распространяется под углом примерно 45° к оси образца. Здесь механизм разрушения носит вязкий ямочный характер (рис. 5, в).

Отличием от исходного состояния является то, что зона долома 3 представляет собой участок хрупкого разрушения (рис. 5, г). Неоднородность поверхности излома свидетельствует о нестабильном развитии хрупкой трещины. Эта зона характеризуется тем, что при циклическом испытании трещина по ней распространялась по механизму внутризеренного скола, для которого характерно появление фасеток скола с ручьистым узором и язычков. Доля зоны хрупкого разрушения в изломе образца составляет примерно 30 %. Утяжка образца в месте разрыва небольшая.

Е. Область $\sigma < \sigma_{\text{ту}}$ ($\sigma = 0,7 \sigma_{\text{ти}}$): 26428 циклов. При низком напряжении и большем количестве циклов нагружения до разрушения образца со-

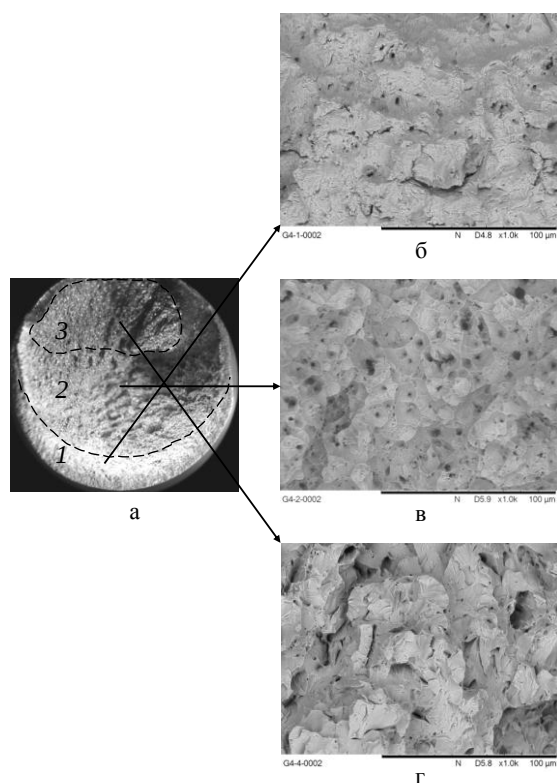


Рис. 5. Макро- и микрорельеф излома образца из стали 09Г2С, подвергнутого РКУП, после нагружения в 4200 циклов: а – общий вид; б – зона 1; в – зона 2; г – зона 3

храняются те же основные зоны, но изменяются их размеры: зона медленного развития трещины увеличивается и составляет примерно 45–50 %.

В зоне медленного развития трещины микроследы её перемещения наблюдаются на большей площади. Ямочный характер разрушения в зоне ускоренного развития трещины свидетельствует о вязком разрушении на этом участке. Направление развития трещины составляет $\sim 30^\circ$ к продольной оси образца. В зоне долома имеются фасетки скола с ручьистым узором и язычки, т.е. на данном участке разрушение хрупкое.

Если сравнивать характеры разрушения образцов из стали 09Г2С в исходном и упрочненном состояниях при относительно близких значениях количества циклов нагружения (состоя-

ние B : 22919 и E : 26428 циклов), но при разных уровнях напряжения ($1,18\sigma_{\text{ти}} = \sigma = 0,89\sigma_{\text{ви}}$ и $\sigma = 0,7\sigma_{\text{ти}}$ соответственно), то различие заключается в схеме расположения зон разрушения и в том, что на завершающей стадии разрушения исходному образцу присущ ямочный микрорельеф, характеризующий вязкое разрушение, а упрочненной стали – типичный для хрупкого разрушения микрорельеф в виде фасеток скола с ручьистым узором и язычками.

Выводы

Таким образом, фратографическое исследование изломов образцов с круглым сечением из низколегированной стали 09Г2С после малоциклового «отнулевого» нагружения показало, что характер разрушения упрочненной равноканальным угловым прессованием стали при больших числах циклического нагружения отличается от исходного состояния.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

При высоких напряжениях цикла (близких к пределу прочности) и малом числе циклов нагружения для стали 09Г2С в исходном и упрочненном состоянии характерен квазистатический характер разрушения с присущими ему характеристиками излома. На изломе упрочненной стали изменяются размер и форма зоны вязкого разрушения в центральной части поперечного сечения, которая приобретает форму эллипса.

В отличие от исходной крупнозернистой стали 09Г2С, в которой распространение трещины в зоне медленного развития происходит с образованием типичных усталостных линий, а зона ускоренного развития трещины и зона долома характеризуются вязким характером разрушения с ямочным микрорельефом, механизм разрушения упрочненной РКУ-прессованием стали носит смешанный характер – на завершающей стадии наблюдается хрупкий характер разрушения, для которого присущ микрорельеф в виде фасеток скола с ручьистым узором и язычками. Кроме того, в упрочненной стали 09Г2С конфигурация зоны усталостного разрушения отличается от излома образца в исходном состоянии.

Результаты исследований могут быть полезны для установления закономерностей усталостного разрушения конструкционных сталей с ультрамелкозернистой структурой.

Исследование выполнено в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН.

Литература

1. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. и др. Фратография – средство диагностики разрушенных деталей. М.: Машиностроение, 1987. 112 с.
2. Пачурин Г.В., Гуцин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: Учебное пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2006. 176 с.
3. Фридман Я.Б., Гордеева Т.А., Зайцев А.М. Строение и анализ изломов металлов. М.: Машгиз, 1960. 128 с.
4. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Металлургия, 1979. 166 с.
5. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 288 с.
6. Иванова В.С., Маслов Л.И., Ботвина Л.Р. Фратографические особенности и вязкость разрушения стали при циклическом нагружении // Проблемы прочности. 1972. №2. С. 37–41.
7. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
8. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов (обзор) // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2010. №1. С. 8–24.
9. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Левин В.П. и др. Особенности статического, ударного и усталостного разрушения стали 06МБФ с субмикрокристаллической структурой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74, №1. С. 43–49.
10. Добаткин С.В., Терентьев В.Ф., Скродьки В. и др. Структура и усталостная прочность стали 08Х18Н10Т после равноканального углового прессования и нагрева // Металлы. 2012. №6. С. 45–55.
11. Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Провсирнин Д.В. и др. Усталостная прочность магниевого сплава МА2-1 после равноканального углового прессования // Металлы. 2010. №5. С. 79–86.
12. Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Никулин С.А. и др. Влияние равноканального углового прессования на усталостную прочность титана и циркониевого сплава // Деформация и разрушение материалов. 2010. №8. С. 26–33.
13. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
14. Лукин Е.С., Иванов А.М. Малоцикловая усталость стали 09Г2С, упрочненной методом интенсивной пластической деформации // Фундаментальные исследования. 2015. №11 (часть 1). С. 92–95.

Поступила в редакцию 18.02.2016