



УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-12-12

**РАЗРУШЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ175
В УСЛОВИЯХ ЖЕСТКОГО МАЛОЦИКЛОВОГО
НАГРУЖЕНИЯ**

В.Ф. Терентьев

доктор технических наук

М.С. Беляев

кандидат технических наук

М.М. Бакрадзе

кандидат технических наук

М.А. Горбовец

М.А. Гольдберг

кандидат технических наук

Ноябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-12-12

В.Ф. Терентьев¹, М.С. Беляев², М.М. Бакрадзе², М.А. Горбовец², М.А. Гольдберг¹

РАЗРУШЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ175 В УСЛОВИЯХ ЖЕСТКОГО МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Проведено исследование характера разрушения образцов жаропрочного никелевого сплава ВЖ175, испытанных на малоцикловую усталость (МЦУ) при заданной общей деформации цикла. Рассмотрены особенности разрушения образцов в зависимости от температуры и числа циклов испытания, а также величины заданной общей деформации. Испытания на МЦУ проведены в условиях постоянной общей (упругой и пластической) деформации за цикл нагружения ϵ_a . Характер малоциклового усталостного разрушения жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA//SB фирмы TESCAN. При комнатной температуре испытания наблюдается в основном вязкий характер разрушения с наличием типичного бороздчатого механизма распространения трещины. При температуре испытания 650°C наблюдается смешанный механизм разрушения: вязкий и квазихрупкий.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, никелевый сплав ВЖ175, исследование поверхности разрушения, вязкий характер разрушения.

V.F. Terentiev, M.S. Belyaev, M.M. Bakradze, M.A. Gorbovets, M.A. Goldberg

FRACTURE OF NI-BASED VZH175 SUPERALLOY UNDER STRAIN LOW CYCLE FATIGUE TESTS

Investigation of fracture character of specimens of Ni-based VZH175 superalloy tested under low cyclic fatigue (LCF) at the set total deformation of a cycle was carried out. The nature of destruction of specimens was investigated on specimens tested at two temperatures, different strain amplitude and number of cycles. The nature of destruction of specimens was investigated by SEM TESCAN VEGA//SB. At 20°C fractured surface

has a character of rough, ductile failure. At 650°C was observing mixed character of fracturing ductile and quasi-brittle.

Keywords: *low cycle fatigue, Ni-base superalloy VZН175, investigation of fractured surface, ductile fracture.*

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

[Institute of Metallurgy and Materials Science. AA Baykova RAS] E-mail: imet@imet.ac.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации

[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Исследование сопротивления малоциклового усталости (МЦУ) проводят для конструкционных материалов, подвергающихся в процессе эксплуатации усталостному нагружению. В качестве характеристики прочности материала МЦУ востребована с различными целями – при разработке материала, квалификации серийно производимого сплава, при расчетах деталей конструкции на прочность и ресурс [1–9]. Отличительной чертой испытаний на МЦУ является то, что в процессе испытаний прикладываемые нагрузки превышают предел текучести материала, реализуется циклическое упругопластическое деформирование. Для аналитического описания такого процесса используют два параметра – напряжение и деформация (σ – ϵ). Один из них выбирают в качестве независимого при проведении испытаний. Независимый параметр задается и поддерживается постоянным (или изменяемым по некоторой программе), а другой изменяется в процессе испытаний сложным образом, особенно в условиях действия высокой температуры. В данной работе проведено исследование характера разрушения образцов жаропрочного никелевого сплава ВЖ175, испытанных при заданной общей деформации цикла. Рассмотрены особенности разрушения образцов в зависимости от температуры и числа циклов испытания, а также величины заданной общей деформации. Отметим, что в отечественной научно-технической литературе недостаточно публикаций по исследованию МЦУ в условиях заданной деформации [4, 10, 11].

Материалы и методы

Жаропрочный дисперсионно-твердеющий сплав ВЖ175 нового поколения на никелевой основе предназначен для изготовления дисков турбин и других деталей ротора газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газотурбинных установок (ГТУ).

Сплав ВЖ175 имеет сложную систему легирования (кобальт, хром, вольфрам, молибден, алюминий, титан и др.). Он упрочняется интерметаллидными нано- и микрочастицами γ' -фазы, а также карбидными (Nb, Ti)C и боридными фазами типа Me_3B_2 [12–15]. Для достижения высоких механических свойств разработан многоступенчатый технологический процесс производства [16, 17]. Основные механические свойства сплава ВЖ175 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства сплава ВЖ175

Температура испытания, °С	Предел прочности при растяжении	Предел текучести	Удлинение, %
	МПа		
20	1600	1190	14
650	1530	1080	12

Испытания на МЦУ проведены на сервогидравлической испытательной машине LFV-100 фирмы Walter+Bai в условиях постоянной общей (упругой и пластической) деформации за цикл нагружения ϵ_a . Управление процессом испытания и запись параметров (величина напряжений, петли гистерезиса) проведены при помощи экстензометра фирмы Epsilon с базой 12,5 мм. Испытаны гладкие цилиндрические образцы с длиной рабочей части 15 мм и $\varnothing 5$ мм, частота составляла 1 Гц, цикл нагружения асимметричный (циклическое растяжение) – $R_e=0$. Испытания проведены при различных значениях амплитуды заданной деформации ($\epsilon_a=0,4-0,6\%$), при температурах 20 и 650°С, долговечность до разрушения изменялась в интервале $10^3-1,3 \cdot 10^4$ циклов.

Характер малоциклового усталостного разрушения сплава ВЖ175 исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA//SV фирмы TESCAN.

Результаты

Результаты испытаний на МЦУ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний сплава ВЖ175 на малоцикловую усталость (МЦУ)

Температура испытания, °С	Амплитуда деформации, %	Количество циклов до разрушения N
20	0,6	2483
	0,4	10251
650	0,5	894
	0,5	1040
	0,4	4222
	0,4	13063

Все образцы в результате испытаний были разрушены путем разделения на две части, т. е. поверхность разрушения не подвергалась никакому иному воздействию кроме

циклического деформирования. Последнее имеет значение в связи с тем, что стандарт по испытаниям на малоцикловую усталость ASTM E606 предусматривает несколько критериев разрушения. В частности такие, при которых разделения образца на части не происходит.

На рис. 1–3 представлены результаты изучения особенностей поверхностного рельефа, образованного в результате распространения усталостной трещины, в процессе испытаний образцов сплава ВЖ175 на МЦУ при заданной деформации.

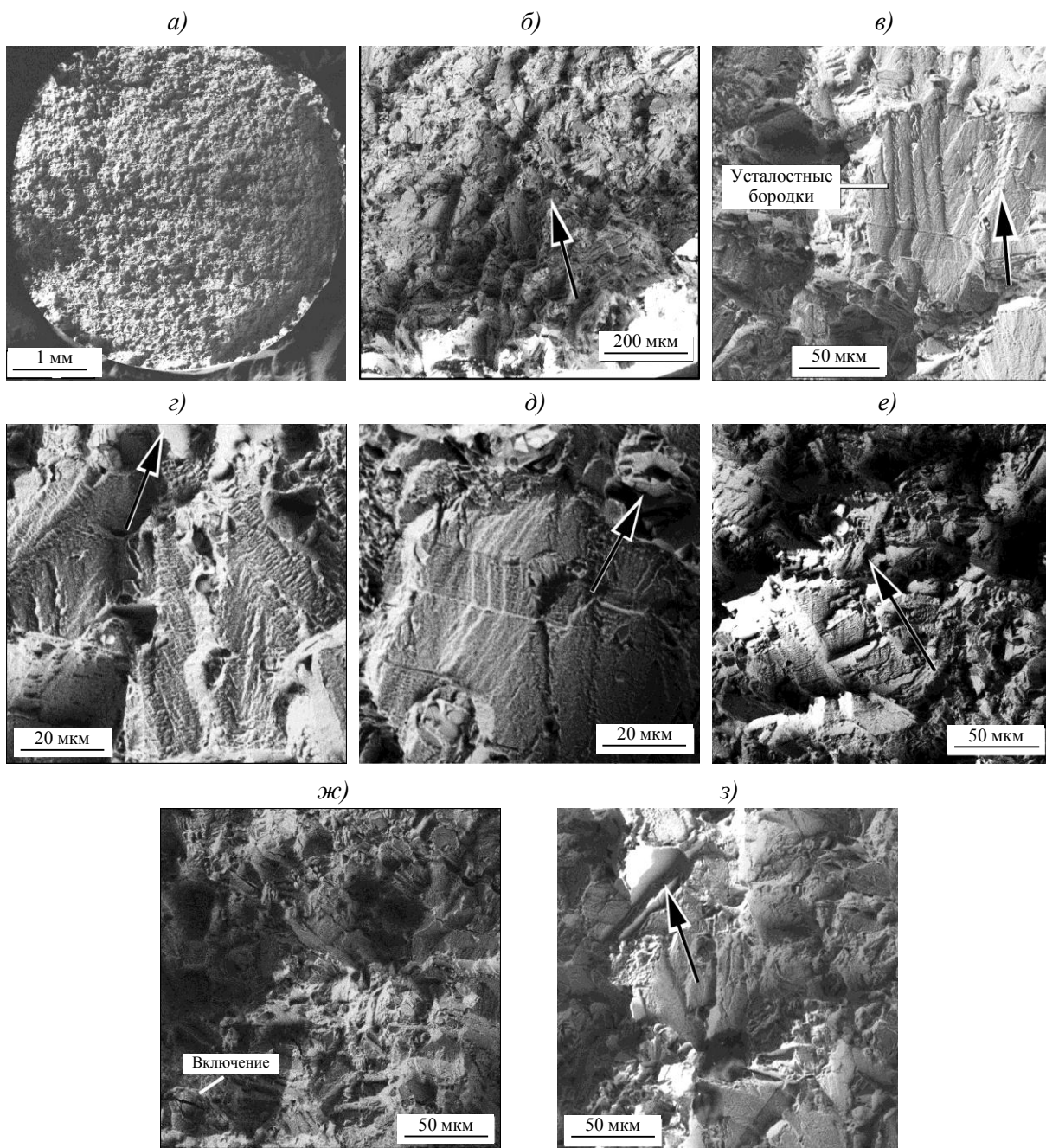


Рисунок 1. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при комнатной температуре: *а, е, з* – амплитуда деформации 0,6%, число циклов до разрушения 2483; *б–д, ж* – амплитуда деформации 0,4%, число циклов до разрушения 10251

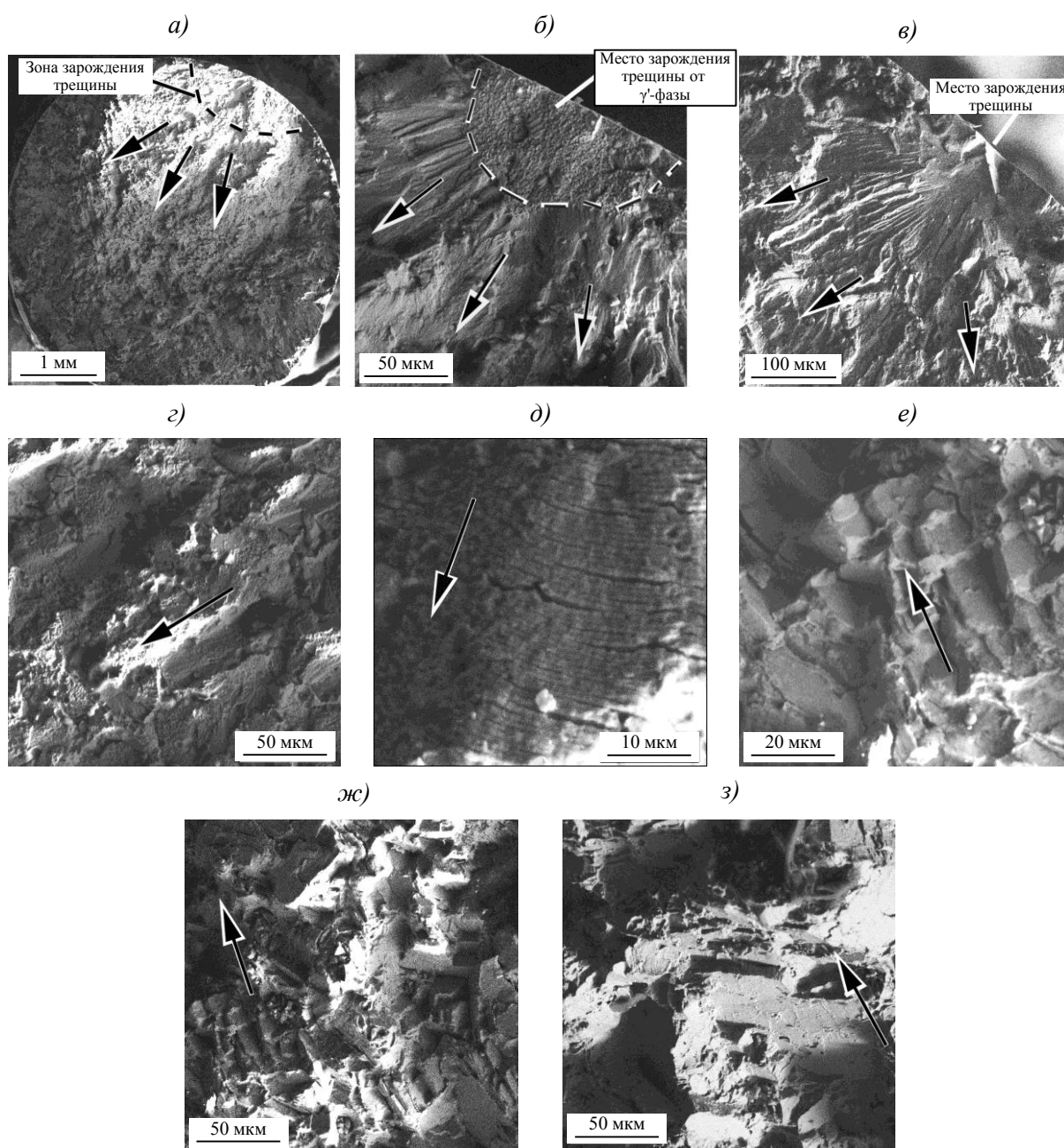


Рисунок 2. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при температуре 650°C и амплитуде нагружения 0,4%: *а, б* – число циклов до разрушения 4222; *в–ж* – число циклов до разрушения 13063

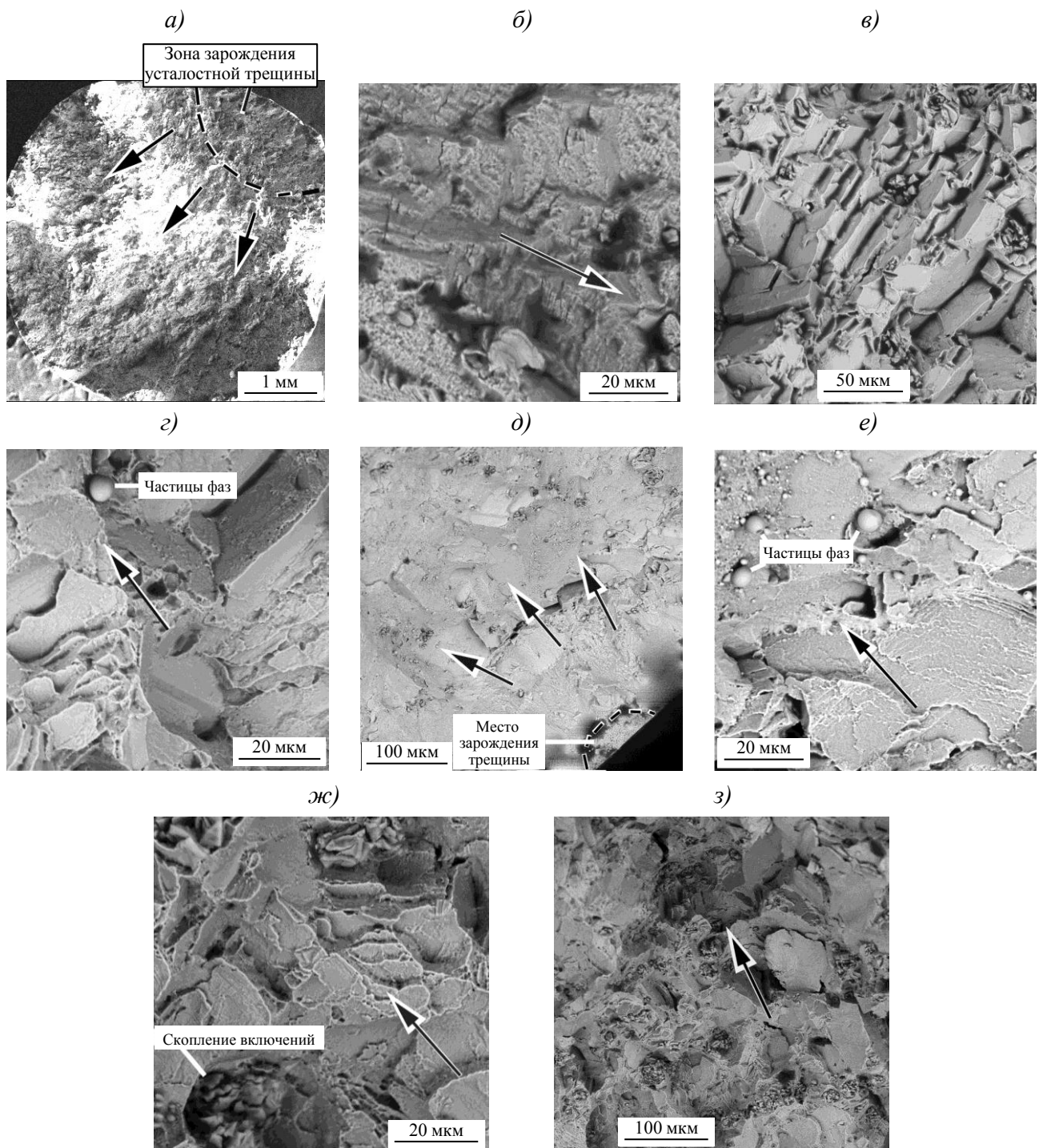


Рисунок 3. Фрактография усталостного разрушения сплава ВЖ175 при температуре 650°C и амплитуде нагружения 0,5%: а-г – число циклов до разрушения 1040; д-з – число циклов до разрушения 894

Обсуждение и заключения

Показано, что механизм малоциклового усталостного разрушения при температуре 20°C мало зависит от амплитуды деформации и связан с довольно грубым вязким характером разрушения, отражающим поликристаллическую структуру материала. По контуру поверхности разрушения видно, что происходит зарождение микротрещины от нескольких очагов (рис. 1, *а*). В зоне начального распространения усталостной трещины наблюдается развитый вязкий характер разрушения с наличием гребенчатых образований и усталостных бороздок (рис. 1, *б*). В зоне стабильного роста трещины отчетливо виден бороздчатый рельеф поверхности разрушения (рис. 1, *в*), а направление распространения усталостной трещины поперек бороздок меняется в зависимости от ориентации отдельных зерен матрицы (рис. 1, *г–е*). Ускоренное развитие усталостных трещин и статический долом связаны с развитым вязким характером разрушения (рис. 1, *ж, з*).

Испытания на усталость при температуре 650°C и амплитуде деформации $\epsilon_a=0,4\%$ показали, что на поверхности разрушения четко наблюдается основной очаг зарождения усталостной трещины, от которого расходятся гребенчатые образования с наличием усталостных бороздок (рис. 2, *а–в*). При этом режиме нагружения было исследовано два образца: один образец простоял до разрушения 4222 цикла, а другой почти в три раза больше – 13063 цикла. В первом случае зарождение трещины произошло от γ' -фазы, которая располагалась на поверхности образца (рис. 2, *б*), а во втором – от поверхности хрупкого скола, которая возможно образовалась от разрушения карбида (рис. 2, *в*). Как и при комнатной температуре при этой амплитуде деформации в зоне начального развития трещины наблюдается вязкий бороздчатый рельеф с усталостными бороздками, вытянутый по направлению распространения усталостной трещины (рис. 2, *г–е*). Видимо, из-за частичного охрупчивания материала при этой температуре испытания вдоль усталостных бороздок наблюдается вторичное растрескивание (рис. 2, *е*). Ускоренное развитие усталостной трещины связано с вязким характером разрушения (рис. 2, *ж*), а на поверхности статического долома наблюдаются участки вязкого и квазихрупкого разрушения (рис. 2, *з*).

При амплитуде деформации $\epsilon_a=0,5\%$ и температуре 650°C (долговечность до разрушения 1040 циклов) так же, как и при $\epsilon_a=0,4\%$, на поверхности разрушения можно отчетливо выделить зону зарождения усталостной трещины и область ее стабильного развития (рис. 3, *а*). Вблизи от места зарождения трещины наблюдается вязкий характер разрушения с усталостными бороздками, между которыми наблюдаются микротрещины (рис. 3, *б*). На стадии стабильного распространения трещины наблюдается специфическая структура в виде вытянутых пластин или плато, между которыми в ряде

случаев наблюдаются трещины. Видны также скопления карбидов (рис. 3, в, з). У другого образца, который испытывался при таком же режиме – $\varepsilon_a=0,5\%$ и температуре 650°C , но простоял меньшее число циклов (долговечность до разрушения 894 цикла), зарождение и начальное распространение усталостной трещины происходило, по видимому, от γ' -фазы. При этом поверхность разрушения на начальном участке роста трещины имеет квазихрупкий характер (рис. 3, д, е). На ускоренном участке роста трещины наблюдается в основном вязкий характер разрушения (рис. 3, ж, з).

Из представленных на рис. 1–3 данных по анализу поверхности разрушения образцов из сплава ВЖ175 можно сделать предварительный вывод о том, что при малоцикловом упругопластическом деформировании при комнатной температуре испытания наблюдается в основном вязкий характер разрушения с наличием типичного бороздчатого механизма распространения трещины, при температуре испытания 650°C – смешанный механизм разрушения: вязкий и квазихрупкий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №13-08-12084.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
2. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1981. 222 с.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
4. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин //Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30–33.
5. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. 185 с.
6. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.

7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
8. Способ получения изделия из деформируемого жаропрочного никелевого сплава: пат. 2387733 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
9. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (Часть I) //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.
10. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах //Деформация и разрушение материалов. 2009. №8. С. 41–48.
11. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях упругопластической деформации //Деформация и разрушение материалов. 2014. №7. С. 27–33.
12. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. и др. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
13. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава ЭК151-ИД //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
14. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.
16. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.

17. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
2. Birger I.A., Balashov B.F., Dul'nev R.A. i dr. Konstrukcionnaja prochnost' materialov i detalej gazoturbinyh dvigatelej [The structural strength of materials and components of gas turbine engines]. M.: Mashinostroenie. 1981. 222 s.
3. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
4. Inozemcev A.A., Ratchiev A.M., Nihamkin M.Sh. i dr. Malociklovaja ustalost' i ciklicheskaja treshhinostojkost' nikelovogo splava pri nagruzenii, harakternom dlja diskov turbin [Low-cycle fatigue and cyclic fracture toughness of nickel alloy under loading characteristic of turbine disks] //Tjzheloe mashinostroenie. 2011. №4. S. 30–33.
5. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. 185 c.
6. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and manufacturing technologies for aircraft engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Prioritetnye napravlenija razvitija tehnologij proizvodstva zharoprochnyh materialov dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [Priorities for the development of production technologies, high temperature materials for aircraft engine] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2013. №3. S. 47–54.
8. Sposob poluchenija izdelija iz deformiruемого zharoprochnogo nikelovogo splava [A method of manufacturing a deformable heat-resistant nickel alloy]: pat. 2387733 Ros. Federacija; opubl. 31.03.2009.

9. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy dlja lit'ja lopatok s napravlennoj i monokristallicheskoj strukturoj [Nickel superalloys for blades casting with directional and single-crystal structure] (Chast' I) //Materialovedenie. 1997. №4. S. 32–39.
10. Golubovskij E.R., Svetlov I.L., Petrushin N.V. i dr. Malociklovaja ustalost' monokristallov zharoprochnyh nikelovyh splavov pri povyshennyh temperaturah [Low cycle fatigue of single crystals of high-temperature nickel alloys at elevated temperatures] //Deformacija i razrushenie materialov. 2009. №8. S. 41–48.
11. Beljaev M.S., Terent'ev V.F., Bakradze M.M. i dr. Malociklovaja ustalost' zharoprochnogo splava VZh175 v uslovijah uprugoplasticheskoj deformacii [Low-cycle fatigue superalloy VZh175 under elastic-plastic deformation] //Deformacija i razrushenie materialov. 2014. №7. S. 27–33.
12. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M. i dr. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovyje splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engines parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 52–57.
13. Bakradze M.M., Ovsepjan S.V., Shugaev S.A., Letnikov M.N. Vlijanie rezhimov zakalki na strukturu i svojstva shtampovok diskov iz zharoprochnogo nikelovogo splava JeK151-ID [Effect of quenching on the structure and properties of the disk forgings of heat-resistant nickel alloy EK151-ID] //Trudy VIAM. 2013. №9. St. 01 (viam-works.ru).
14. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M. Osobennosti legirovanija i termicheskoj obrabotki zharoprochnyh nikelovyh splavov dlja diskov gazoturbinyh dvigatelej novogo pokolenija [Features alloying and heat treatment of heat-resistant nickel alloys for turbine engines drive of a new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 3–8.
15. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Kompleksnaja innovacionnaja tehnologija izotermicheskoj shtampovki na vozduhe v rezhime sverhplastichnosti diskov iz superzharoprochnyh splavov [Integrated innovative technology isothermal forging in air super-plasticity disks from super heat-resistant alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 129–141.
16. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovyje splavy dlja detalej gazoturbinyh dvigatelej [High-

temperature heat-resistant nickel alloys for turbine engines parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 52–57.

17. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Litejnye zharoprochnye nikelovye splavy dlja perspektivnyh aviacionnyh GTD [Casting nickel superalloys for advanced gas turbine engines] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №2. S. 6–16.