

УДК 669:620.19

*В.Б. Григоренко¹, Л.В. Морозова¹, И.П. Жегина¹, М.А. Фомина¹***ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ 1441 И В-1469 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ И ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-1-1

С помощью высокоразрешающих металлофизических методов исследования, включающих электронную, лазерную и оптическую микроскопию, изучена кинетика процесса накопления линий скольжения и коррозионных повреждений в образцах из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 при проведении испытаний на усталость по жесткому циклу в условиях совместного воздействия коррозионной среды и приложенных напряжений.

Выполнена количественная оценка деформационных параметров (плотности полос скольжения, размеров пластических зон под изломом, шероховатости поверхности в выделенных зонах) и параметров поврежденности (размеров и площади коррозионных питтингов).

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: жесткий цикл нагружения, накопление повреждений, поверхность, коррозионно-активная среда, линии скольжения, фрагментация, микроструктура.

By means of high-resolution methods of research including electron, laser and optical microscopy, the kinetics of glide lines accumulation process and corrosion damages of samples from aluminum-lithium alloys 1441 and V-1469 is studied at carrying out fatigue tests on rigid cycle in the conditions of combined influence of the corrosion environment and applied stress.

The quantitative assessment of deformation parameters (density of slip band, sizes of plastic zones under break, surface roughness in the allocated zones) and damage parameters (the sizes and the area of corrosion pittings) is executed.

The work is executed within the frames of the complex scientific direction 8.1. «High-strength welded aluminum and aluminum - lithium alloys of the lowered density with the increased fracture toughness» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: hard loading cycle, surface, damage accumulation, corrosive environment, slip lines, fragmentation, microstructure.

¹Федеральное 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

Сплавы на основе алюминия, отличающиеся пониженной плотностью благодаря введению в качестве легирующего элемента лития, представляют особый интерес для авиационной промышленности [2].

Сплав В-1469-T1 системы Al–Cu–Li–Mg с добавками Sc и Ag относится к свариваемым и высокопрочным. Особенностью сплава является технологичность при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокаткой [3, 4]. Сплав рекомендуется для изготовления элементов планера (лонжероны, балки и другие детали фюзеляжа), длительно работающих на сжатие во всеклиматических условиях до температуры 150°C.

Сплав 1441-T1 системы Al–Li–Mg–Cu относится к среднепрочным высокоресурсным, технологичен при обработке давлением, что позволяет получать из него холодной рулонной прокаткой листы толщиной до 0,3 мм. Освоено производство листов, плит, пресованных профилей и панелей. Рекомендуется для обшивки фюзеляжа и внутреннего силового набора [5–7].

Выбор сплавов В-1469 и 1441 для исследований степени надежности при эксплуатации обусловлен перспективностью использования листов из них толщиной 0,3–0,4 мм для создания биметаллических материалов с повышенной трещиностойкостью и высокопрочных слоистых металлополимерных материалов.

В научно-технической литературе имеются обширные данные о влиянии коррозионных сред, в том числе промышленной и приморской атмосферы, на деформационное поведение алюминиевых сплавов [8–13].

Стоит отметить работы [14–17], посвященные изучению влияния «жесткого» цикла нагружения на механизм развития и характер разрушения жаропрочных никелевых сплавов при испытаниях на малоцикловую усталость. При этом большое значение как с прикладной, так и с фундаментальной точки зрения, имеет эволюция повреждений при совместном воздействии нагрузки и коррозионной среды, так как количественная оценка деформационных параметров (плотности полос скольжения, размеров зон накопления пластической деформации у излома, шероховатости поверхности в выделенных зонах) и параметров поврежденности (глубины и площади коррозионных питтингов) позволяет оценить остаточную прочность материала и спрогнозировать остаточный ресурс деталей конструкций.

Цель работы – проведение сравнительного анализа воздействия приложенной нагрузки и коррозионно-активной среды на сплавы 1441 и В-1469, установление количественных закономерностей деформации и изменения рельефа поверхности с учетом суммарного влияния нагрузки и активной коррозионной среды.

Материалы и методы

Коррозионные испытания проводили в камере солевого тумана (VSC-1000) в течение заданного времени путем постоянного распыления 5%-ного раствора NaCl при температуре $(35\pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности 95–98%.

Натурно-ускоренные испытания образцов в приморском климате проводили в Геленджикском центре климатических испытаний им. Г.А. Акимова (ГЦКИ ВИАМ) на открытой площадке с дополнительным обливом морской водой 1 раз в сутки. Продолжительность экспозиции составляла 90 и 120 сут.

После окончания срока экспозиции с поверхности образцов продукты коррозии удаляли в 30%-ном растворе азотной кислоты согласно ГОСТ 9.913–90. Затем образцы промывали проточной водой, ополаскивали дистиллированной водой и сушили в термощкафу при температуре 40°C.

Проведение испытаний на малоцикловую усталость в условиях «жесткого» нагружения до и после коррозионного воздействия разной длительности осуществлялось с использованием сервогидравлической испытательной машины MTS (при нагрузке 5 т) с приспособлением для «жесткого» нагружения.

При проведении исследований использовали современное исследовательское оборудование, а также комплекс высокоразрешающих металлофизических методов, включая электронную и оптическую микроскопию.

Наличие фрагментации поверхности и выходов плоскостей скольжения на поверхность исследуемых образцов из литийсодержащих алюминиевых сплавов, а также изучение характера разрушения (изломов) осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490 LV фирмы Jeol. Исследование микроструктуры проводили с использованием оптического комплекса Leica и растровой электронной микроскопии.

Результаты

Механические испытания образцов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469, общий вид которых показан на рис. 1, проводили по следующим схемам нагружения:

– *схема 1* – испытания на МЦУ по «жесткому» циклу на воздухе как до разрушения, так и с остановкой испытания при достижении 0,7% деформации и частоте 1 Гц;

– *схема 2* – выдержка в коррозионно-активной среде камеры солевого тумана (КСТ) в течение 15; 30 и 45 сут и последующее испытание на МЦУ по «жесткому» циклу при максимальной степени деформации 0,7% и частоте 1 Гц;

– *схема 3* – выдержка в коррозионно-активной среде в условиях морского климата (ГЦКИ) в течение 90 и 120 сут и последующее испытание на МЦУ по «жесткому» циклу при максимальной степени деформации 0,7% и частоте 1 Гц.



Рис. 1. Общий вид образца для испытаний на МЦУ

Методами растровой микроскопии изучали кинетику процесса накопления линий скольжения и коррозионных повреждений на поверхности образцов, оценивали их плотность на различном расстоянии от излома.

В результате анализа поверхности испытанных до разрушения образцов установлено наличие двух зон (рис. 2), отличающихся степенью шероховатости и плотностью линий скольжения, – сильнодеформированной (h_{vh}) и слабодеформированной (h_v).

Сильнодеформированная зона (h_{vh}) в образцах из сплавов 1441 и В-1469 сосредоточена непосредственно у излома и занимает соответственно не более 8 и 16% от общей длины рабочей части. Именно в этой зоне наблюдаются множественные линии скольжения в виде разориентированных относительно друг друга «пакетов», фрагментация поверхности и вторичные микротрещины. Плотность линий скольжения вблизи излома составляет 400–600 мм⁻¹. На расстоянии 1,5–2 мм от излома плотность линий снижается до 100 мм⁻¹. В слабодеформированной зоне (h_v) обоих сплавов присутствуют только единичные линии скольжения (рис. 3).

Методом лазерной микроскопии определена шероховатость поверхности образцов из обоих сплавов в сильно- и слабодеформированных зонах. Показано, что шероховатость поверхности (R_a) в зоне h_{vh} в 1,5 (сплав 1441) или в 2 раза (сплав В-1469) превышает шероховатость в зоне h_v (рис. 4).

Установлено, что разрушение развивается от микротрещин, которые образовались непосредственно на линиях скольжения даже при наличии рисок от механической обработки на поверхности образцов (рис. 5).

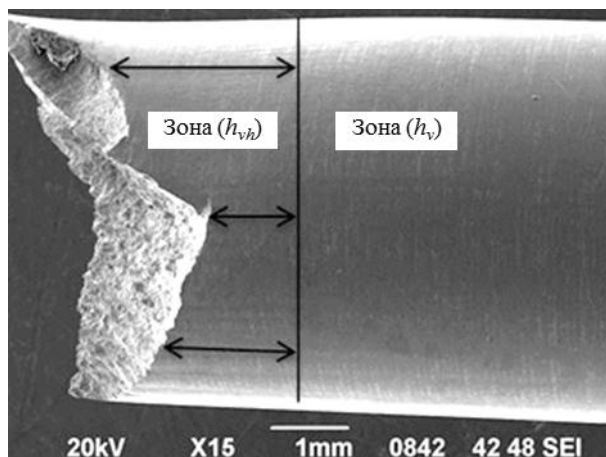


Рис. 2. Общий вид разрушенного после испытаний на МЦУ образца

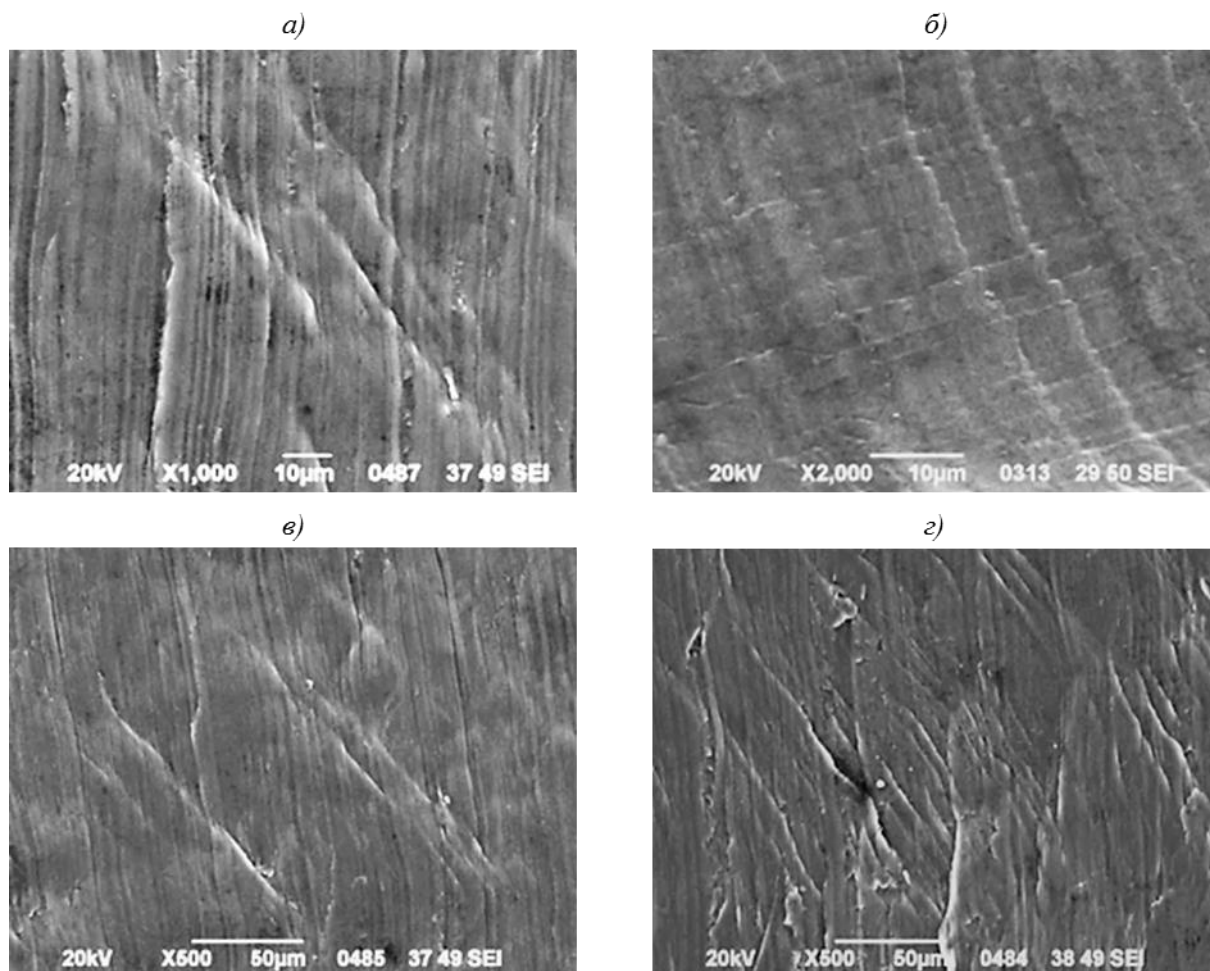


Рис. 3. Линии скольжения в слабо- (а, в) и сильнодеформированной зонах (б, г) образцов из сплавов В-1469 (а, б) и 1441 (в, г)

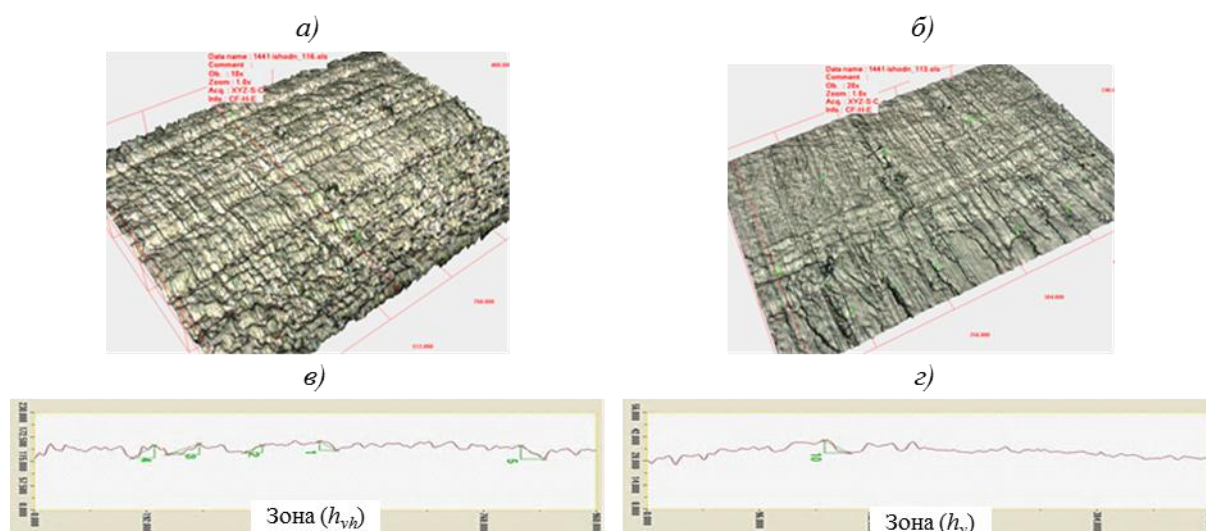


Рис. 4. Шероховатость поверхности образца из сплава 1441 в сильно- (а, в) и слабодеформированной зонах (б, г)

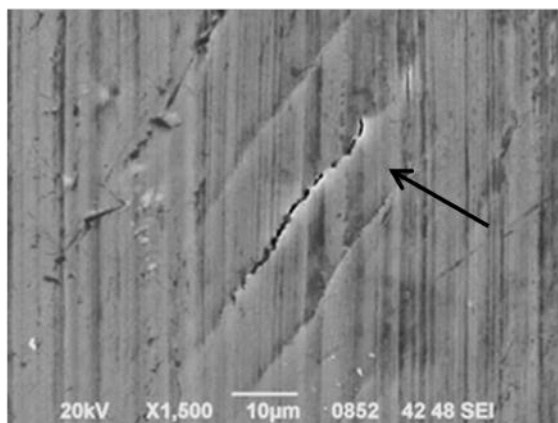


Рис. 5. Образование микротрещины по полосе скольжения

Испытания, проведенные в камере солевого тумана (КСТ), и натурно-ускоренные испытания позволили определить кинетику накопления коррозионных повреждений на поверхности образцов из сплавов 1441 и В-1469.

При испытаниях в КСТ среднее значение скорости коррозии для сплавов 1441 и В-1469 составило 0,1 и 0,25 г/(м²·сут) соответственно. После выдержки в условиях морского климата среднее значение скорости коррозии для сплава 1441 составляет 0,03 и 0,34 г/(м²·сут) для сплава В-1469.

Коррозионные поражения исследуемых сплавов носят различный характер. В сплаве 1441 преобладает развитие общей коррозии, при которой коррозионные питтинги распространяются преимущественно по поверхности и не имеют четко очерченных границ. Сплав В-1469 характеризуется появлением глубоких питтингов, вытянутых вдоль оси образца и имеющих четкие границы (рис. 6). Увеличение продолжительности коррозионных испытаний приводит к углублению питтингов и увеличению площади, занимаемой коррозионными повреждениями. В сплаве В-1469 в большей степени выражена склонность к потере материала в ходе воздействия коррозионной среды.

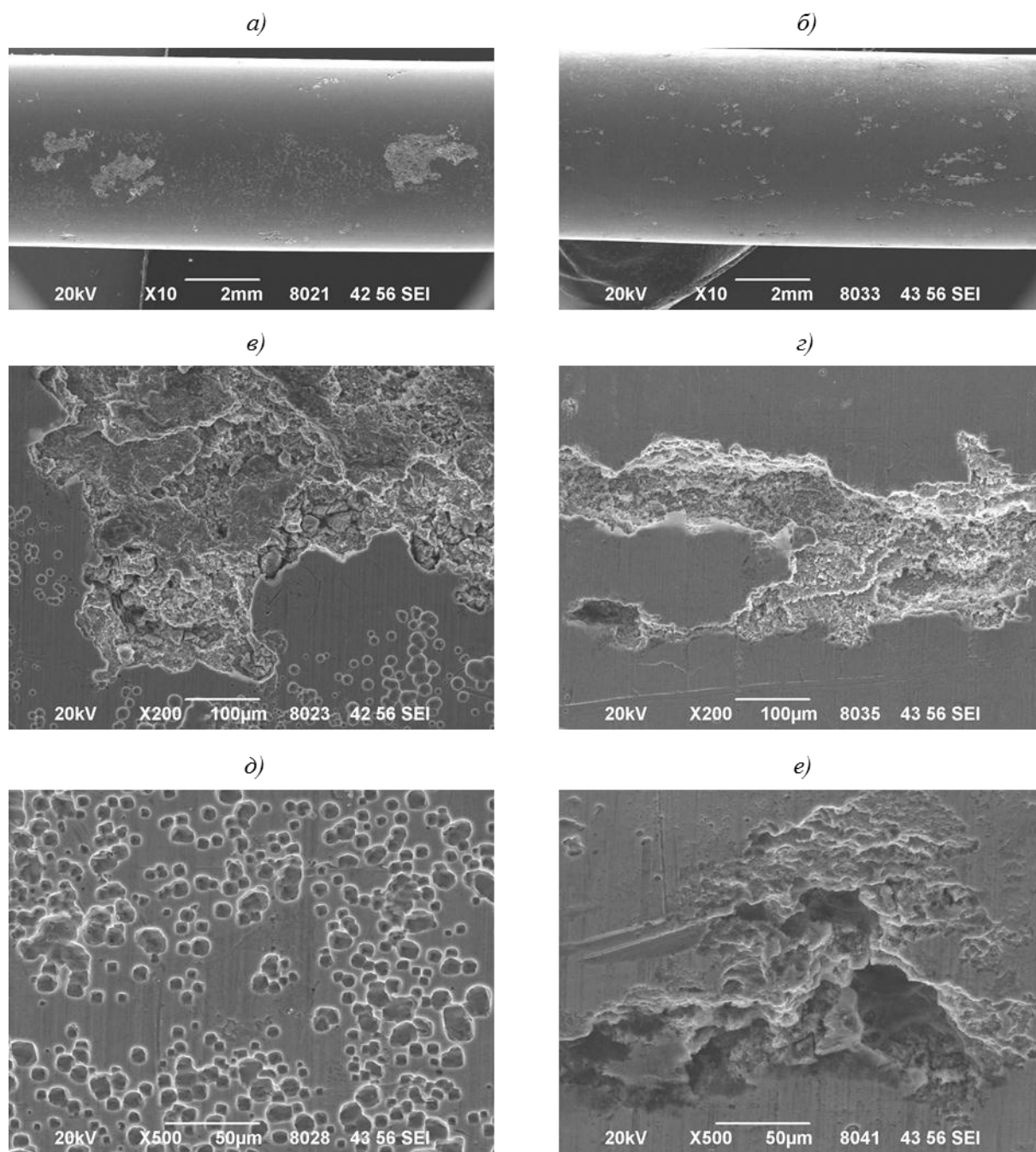


Рис. 6. Коррозионные поражения на поверхности сплавов В-1469 (а, в, д) и 1441 (б, г, е) после 4 мес натурно-ускоренных испытаний в условиях ГЦКИ

Фрактографический анализ образцов из сплавов 1441 и В-1469, испытанных на МЦУ после выдержки в КСТ, показал, что для обоих сплавов многоочаговое разрушение начинается от коррозионных поражений (рис. 7) с развитием рельефа, характерного для «жесткой» схемы испытания. На усталостных плато наблюдаются грубые бороздки и вторичные трещины, в зоне статического разрушения разрушение проходит преимущественно по механизму вязкого среза и с формированием ямочного рельефа.

Анализ поверхности и изломов образцов исследуемых сплавов после пребывания в условиях ГЦКИ с ежедневным обливом морской водой выявил аналогичную картину разрушения (рис. 8).

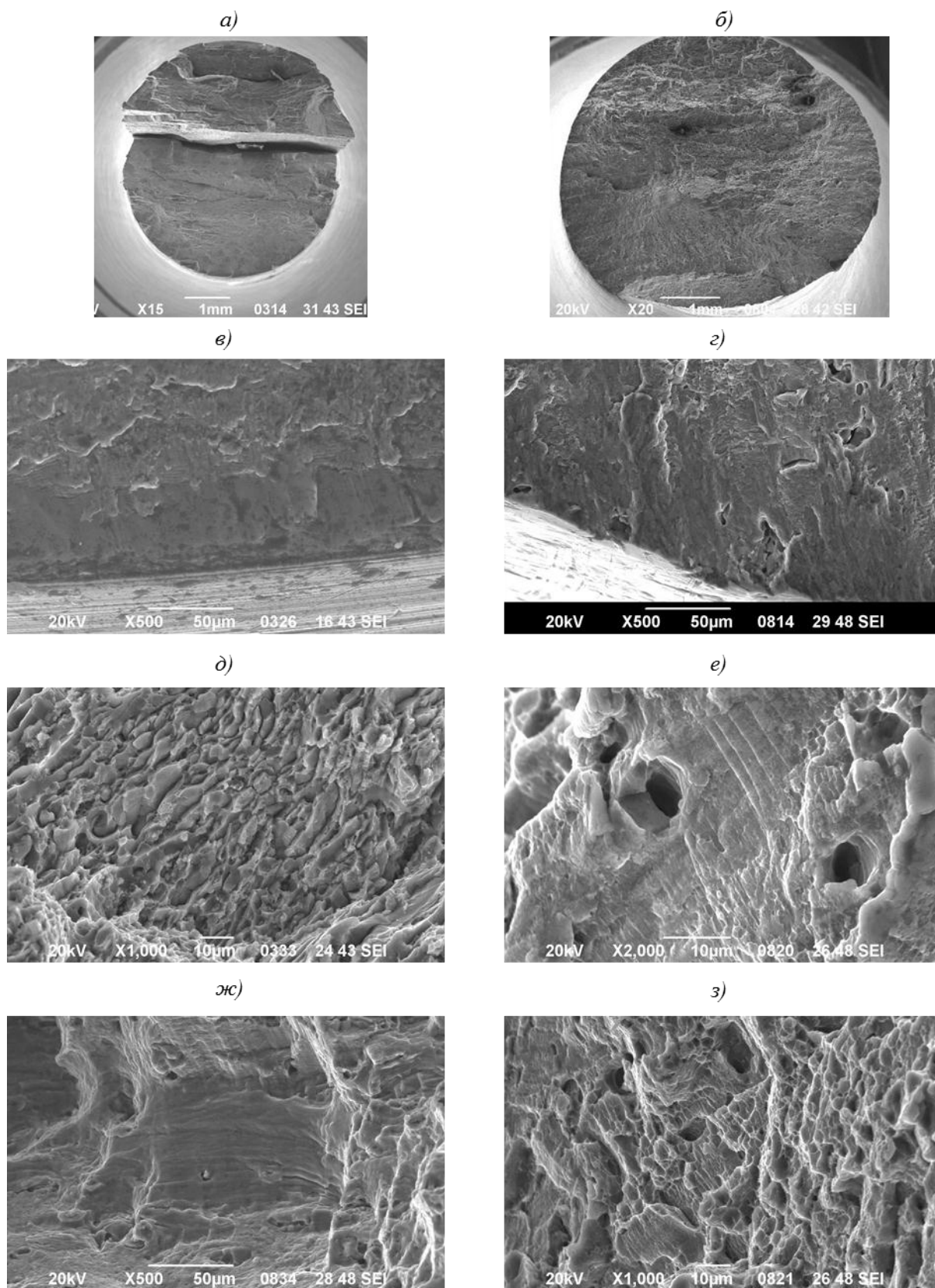


Рис. 7. Характерный вид изломов после испытаний на МЦУ образцов из сплавов В-1469 (а, в, д) и 1441 (б, г, е-з) после выдержки в КСТ

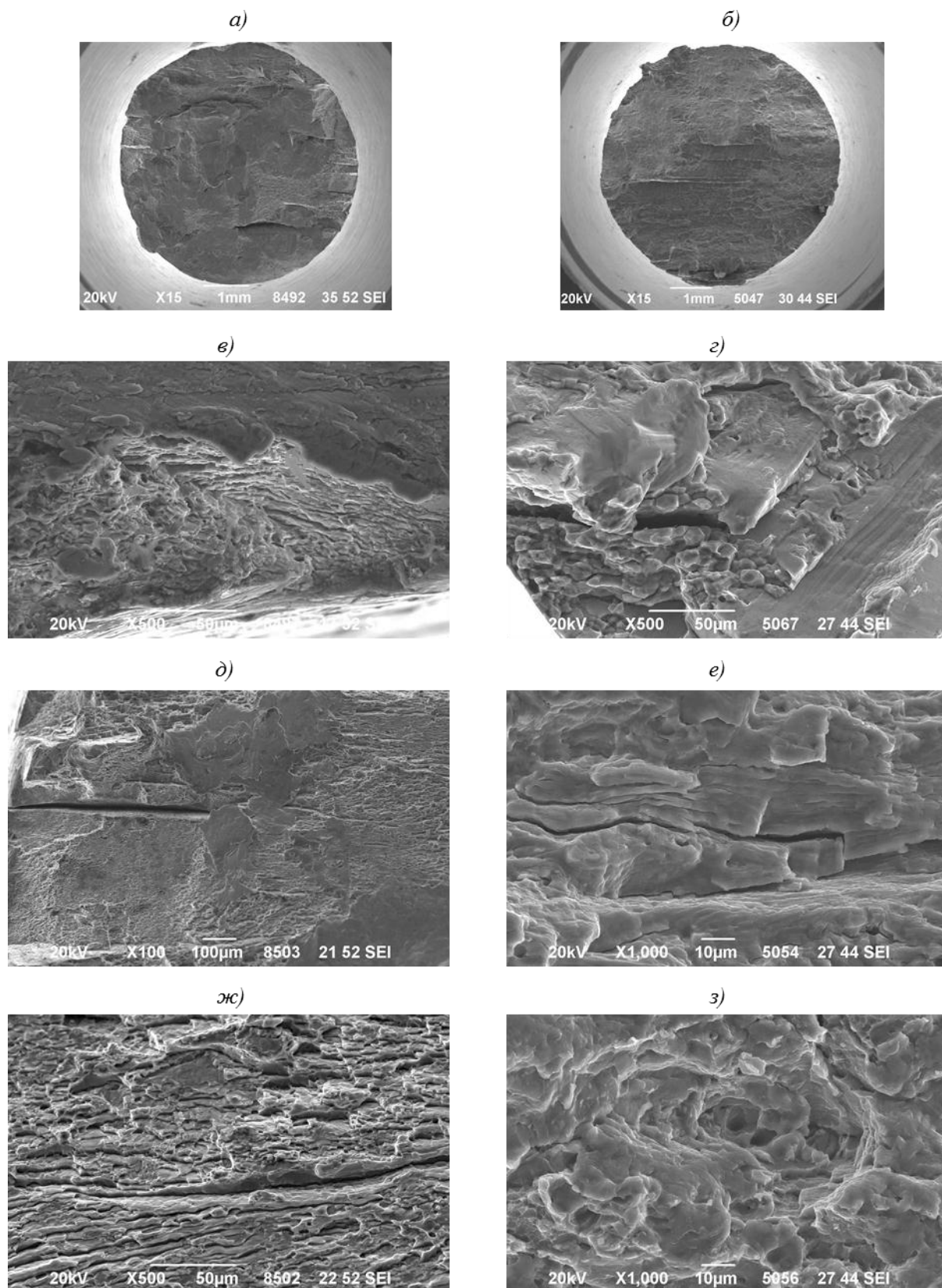


Рис. 8. Характерный вид изломов после испытаний на МЦУ образцов из сплавов В-1469 (а, в, д, ж) и 1441 (б, г, е, з) после натурно-ускоренных испытаний

Фрактографические исследования выявили превалирующие механизмы разрушения при испытаниях по двум вариантам:

– в случае испытаний по *схеме 1* – на участке слияния поверхностных микротрещин, образовавшихся на линиях скольжения, формируется зона развития усталостной трещины;

– в случае испытаний по *схемам 2 и 3* – усталостная трещина развивается от коррозионных повреждений поверхности как от глубоких, так и от мелких питтингов.

В зоне статического разрушения формируется преимущественно вязкий срез и ямочный излом.

Исследования показали, что в сплаве 1441 наблюдается выраженная локализация деформации и при воздействии активной коррозионной среды проявляется склонность к общей коррозии. Сплав В-1469 отличается меньшей локализацией деформации и при воздействии среды более склонен к коррозионному растрескиванию.

Обсуждение и заключения

При проведении исследований кинетики накопления повреждений в поверхностных слоях образцов литийсодержащих алюминиевых сплавов 1441 и В-1469, испытанных на усталость по «жесткому» циклу нагружения в условиях совместного воздействия приложенной нагрузки и коррозионно-активной среды, получено:

– сильнодеформированная зона в образцах из сплавов 1441 и В-1469 сосредоточена непосредственно у излома и занимает соответственно не более 8 и 16% от общей длины рабочей части. Независимо от марки сплава плотность линий скольжения в этой зоне в 4–6 раз превышает плотность линий скольжения в слабодеформированной зоне;

– при воздействии коррозионно-активной среды сплав 1441 более склонен к коррозионному растрескиванию, а сплав В-1469 – к общей коррозии;

– с помощью фрактографического анализа установлено, что испытания на МЦУ в условиях «жесткого» цикла нагружения приводят к образованию многоочагового разрушения и ускоренному росту трещины с формированием грубых усталостных бороздок и мелких ямок в усталостной зоне; в зоне статического разрушения формируется преимущественно вязкий срез и ямочный излом;

– наличие коррозионной среды приводит к локализации деформации (уменьшению зон пластической деформации);

– наличие линий скольжения и фрагментации поверхности, сосредоточенных на малом участке, позволяет прогнозировать возникновение разрушения именно на этом участке, что может быть использовано для диагностики состояния материала детали в процессе эксплуатации, прогнозирования остаточного ресурса, а также при разработке новых материалов;

– сравнительный анализ деформационного поведения алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 в условиях воздействия коррозионной среды и приложенной нагрузки показал, что в сплаве В-1469 зона значительной локализации деформации, предшествующей разрушению, и сопротивление разрушению в условиях усталостных испытаний по «жесткому» циклу в 1,5–2 раза больше, чем в сплаве В-1441, но при этом и скорость коррозии выше в 2 раза.

Полученные результаты позволят более точно рекомендовать область использования сплавов, обосновывать выбор материала для применения в различных условиях эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-12081-офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 174–183.
3. Ключкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №1. С. 8–12.
4. Ключков Г.Г., Грушко О.Е., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.Ю. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 167–182.
6. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 183–195.
7. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик // *Физическая мезомеханика*. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
8. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
9. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В. и др. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015).
10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность при морской атмосфере. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
11. Курс М.Г., Каримова С.А., Махсидов В.В. Сравнение коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях // *Вопросы материаловедения*. 2013. №1 (73). С. 182–190.
12. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Медведев И.М., Фролов А.С. Коррозия и старение поверхности конструкционных материалов по данным 3D микроскопии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №12. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12.
13. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 18–22.
14. Терентьев В.Ф., Беляев М.С., Бакрадзе М.М. и др. Разрушение жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях жесткого малоциклового нагружения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №11. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-12-12.
15. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 35–40.
16. Жегина И.П., Морозова Л.В. Определение диагностических признаков предразрушения по состоянию поверхностных слоев жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-4-4.
17. Глезер А.М., Шурыгина Н.А., Зайченко С.Г., Пермякова И.Е. Взаимодействие полос деформационного сдвига и наночастиц в аморфно-нанокристаллических сплавах // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. №4. С. 2–12.