



УДК 669.01

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-8-8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ
РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ
ИЗ АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОСКОПИИ**

Л.В. Морозова

И.В. Исходжанова

Октябрь 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.

Л.В. Морозова¹, И.В. Исходжанова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОСКОПИИ

Методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии проведено исследование закономерностей изменения рельефа (шероховатости поверхности (R_a), глубины коррозионных питтингов) образцов из сплавов 1441 и В-1469, испытанных при растяжении до разрушения как без участия коррозионной среды, так и с коррозионным воздействием. Построены 3D-модели и проведена количественная оценка рельефа поверхности путем статистической обработки данных шероховатости с использованием стандартного программного обеспечения КЛСМ Olympus Lext OLS3100. Показано, что шероховатость поверхности (R_a) по мере приближения к излому возрастает в 1,5 (для образцов из сплава 1441) или в 3 раза (для образцов из сплава В-1469), что свидетельствует о более выраженной локализации деформации в сплаве 1441.

Ключевые слова: *конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, алюминийлитиевый сплав, шероховатость, поверхность, коррозия.*

L.V. Morozova, I.V. Iskhodzhanova

STUDY OF RELATIONSHIPS OF SURFACE RELIEF CHANGING OF SPECIMENS FROM ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS BY LASER MICROSCOPY METHOD

By method of laser scanning confocal microscopy a study of relief changing (surface roughness(R_a), depth of corrosion pittings) of specimens tested under extension till fracture both without corrosion environment and under corrosion attack was carried out.

3D-models were drawn up and a quantitative evaluation of surface relief by statistical data processing of roughness, using standard software of LSCM Olympus Lext OLS3100 was carried out. It was shown, that a surface roughness (R_a), as approaching to the fracture location was increasing in 1,5 (for 1441alloy specimens) or in 3 times (for V-1469 alloy specimens) that indicates of more expressed localization of deformation in 1441 alloy.

Keywords: *laser scanning confocal microscopy, aluminum-lithium alloy, roughness, surface, corrosion.*

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

Своевременная диагностика состояния изделия в процессе эксплуатации является важным фактором в решении такой актуальной проблемы, как повышение надежности изделий [1–7].

Изучение процесса накопления повреждений [8–10] делает возможным прогнозирование времени разрушения детали и ее остаточного ресурса. Большое количество исследований посвящено решению этой проблемы и изучению изменений, протекающих в поверхностных слоях, которые являются наиболее нагруженными и подвержены воздействию различных внешних факторов [11, 12].

Известно, что в процессе деформирования материала в местах торможения пластических сдвигов в объеме кристалла, где имеются препятствия для скольжения дислокаций или мезополос, может произойти образование микро- и мезотрещин, в результате чего инициируется дополнительная концентрация напряжений [13, 14]. Все виды локализованного пластического течения зарождаются и развиваются на внутренних границах раздела. Накопление дислокаций от пластической деформации в поверхностном слое оказывается более интенсивным, чем в объеме материала за счет энергетического состояния поверхностного слоя и воздействия на него внешних факторов [15–17].

Известно, что алюминийлитиевые сплавы склонны к локализации деформации [18–21]. Различают два основных вида локализации:

– макроскопические полосы сосредоточенной деформации, возникающие при горячей обработке давлением. Их развитию способствует местный адиабатический разогрев, связанный с низкой теплопроводностью материала. При исчерпании пластичности разрушение зарождается в этих полосах. Локальный адиабатический нагрев усиливается при низких температурах и высоких скоростях деформации;

– микроскопические полосы скольжения, ограниченные размером кристаллитов. Их образование связано с консервативным скольжением парных дислокаций, перерезающих когерентные частицы δ' -фазы, особенно при большом их количестве. Этот вид локализации наблюдается при низких температурах и высоких скоростях деформации и способствует зернограничному разрушению.

Оба вида понижают механические свойства полуфабрикатов.

Как показывают ранее проведенные исследования, разрушению предшествует пластическая деформация поверхности материала, на ней возникает микрорельеф (шероховатость), все более выраженный по мере увеличения пластической деформации и приближе-

ния момента разрушения материала [22]. Измеряя степень шероховатости поверхности на различных стадиях нагружения и сравнивая полученные результаты с шероховатостью поверхности разрушенных образцов, можно будет с определенной уверенностью прогнозировать время, оставшееся до разрушения, а также определить стадию предразрушения объектов задолго до появления в них явно выраженных дефектов (микротрещин).

Для обеспечения необходимой точности измерений в данной работе использован конфокальный лазерный сканирующий микроскоп (КЛСМ), который является разновидностью оптического микроскопа, но при этом не требует создания вакуума для исследования объекта, обладает высокой глубиной резкости и позволяет наблюдать объект исследований в 3D-формате [23].

Целью данного исследования является изучение изменения микрорельефа поверхности алюминийлитиевых сплавов после проведения механических испытаний при одноосном растяжении и воздействии коррозионно-активной среды.

Материалы и методы

Методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии проведено исследование закономерностей изменения рельефа (шероховатости поверхности (R_a) и глубины коррозионных питтингов) образцов из алюминийлитиевых сплавов 1441 и В-1469. Образцы испытывали по двум схемам:

– *схема 1* – испытание при растяжении при комнатной температуре (без влияния коррозионно-активной среды);

– *схема 2* – выдержка в коррозионно-активной среде камеры солевого тумана (КСТ) в течение 10 сут и последующее испытание при растяжении.

Для оценки и сравнения влияния коррозионного воздействия партия образцов была также выдержана в КСТ в течение 45 сут.

Количественная оценка рельефа поверхности путем статистической обработки данных шероховатости проведена с использованием стандартного программного обеспечения КЛСМ Olympus Lext OLS3100.

В соответствии с ГОСТ 2789–73 и ISO 4287:1997/ISO 1302:2002 измеряли шероховатость, усредненную по всей площади кадра (S_k), а по ГОСТ 2789–73 определяли параметр шероховатости R_a – среднее арифметическое отклонение профиля.

Результаты и обсуждение

На основании лазерного сканирования построены 3D-модели поверхности, на которых проводились измерения. В ходе исследования образцов, испытанных по *схеме 1*, установили, что шероховатость поверхности образцов из сплава 1441 возрастает по ме-

ре приближения к излому: на расстоянии 8 мм – $R_a=0,5$ мкм, а в непосредственной близости к излому – $R_a=0,8$ мкм (рис. 1). Максимальный уровень шероховатости наблюдается в довольно узкой зоне вблизи излома (≤ 10 мм), что иллюстрирует склонность алюминийлитиевых сплавов к локализации деформации.

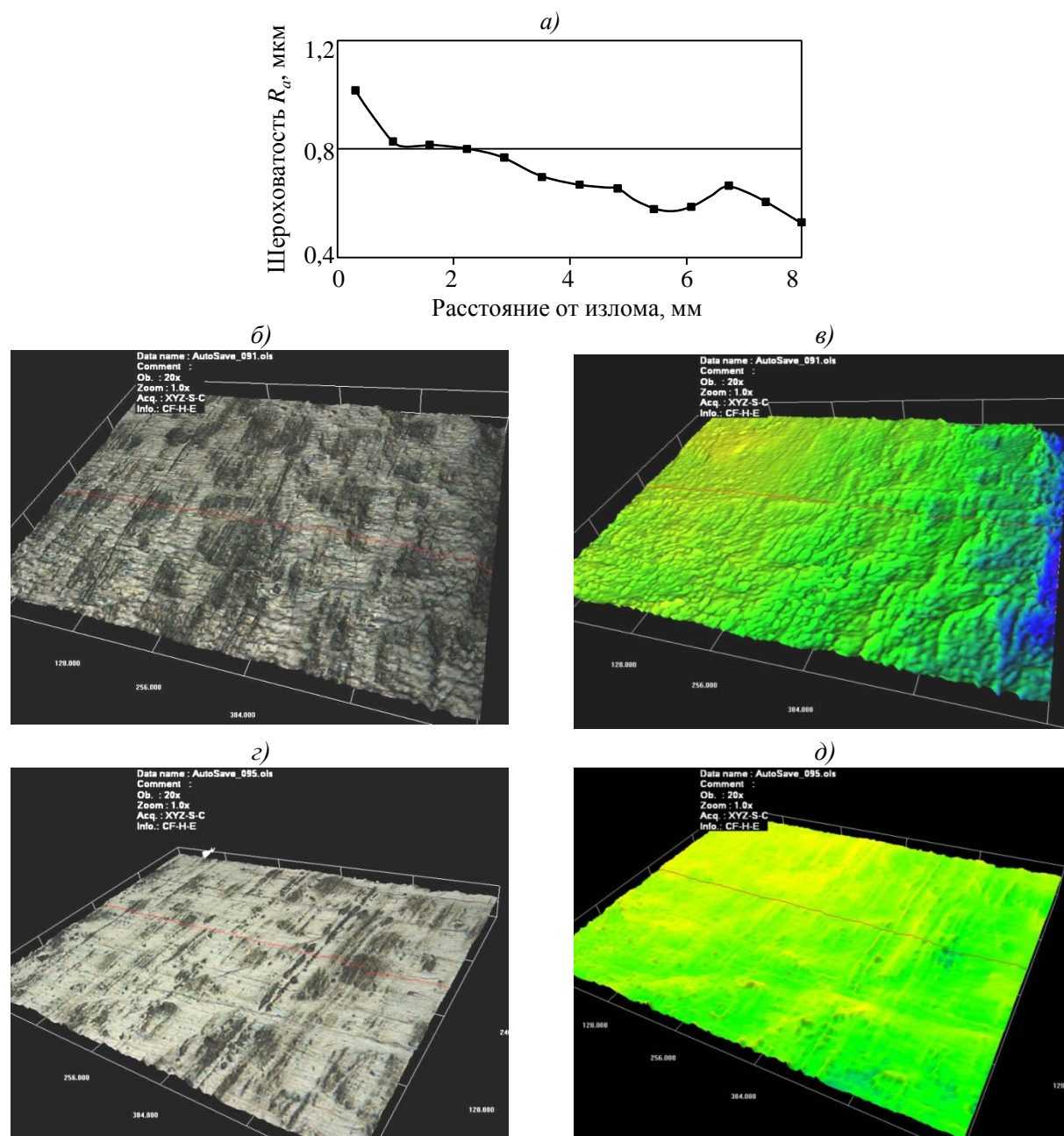


Рисунок 1. Результаты измерения шероховатости поверхности образцов из сплава 1441:

a – изменение шероховатости в зависимости от расстояния до излома; *б* – трехмерная модель поверхности у излома; *в* – трехмерная топографическая модель поверхности у излома; *г* – трехмерная модель поверхности на расстоянии 20 мм от излома; *д* – трехмерная топографическая модель поверхности на расстоянии 20 мм от излома

При исследовании закономерностей изменения рельефа образцов из сплава В-1469 выявлено, что шероховатость поверхности (R_a) образцов возрастает по мере приближения к излому – от 0,4 до 1,5 мкм (рис. 2), т. е. в сплаве В-1469 возрастание шероховатости поверхности выражено более интенсивно, чем в сплаве 1441 (рис. 3).

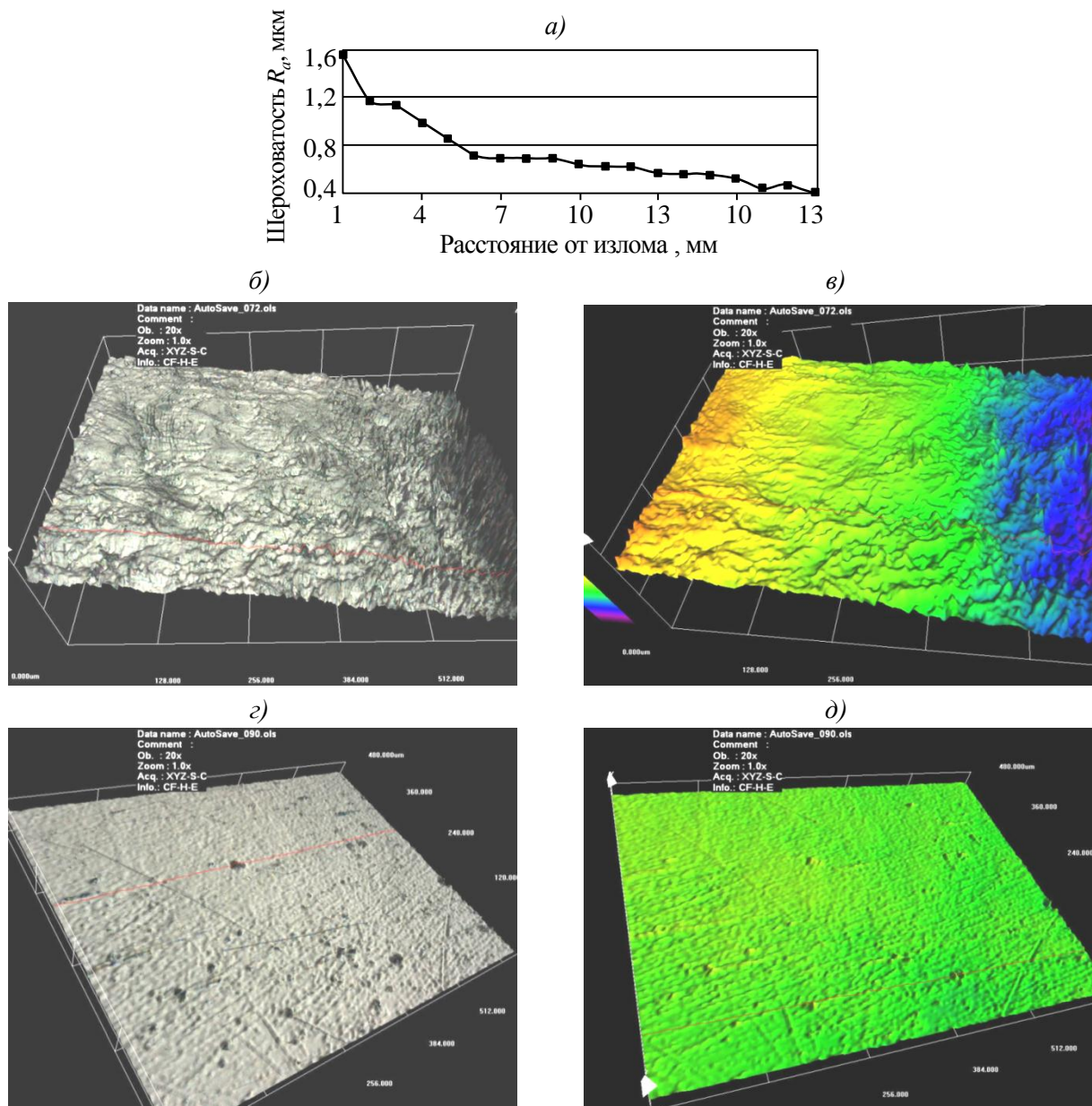


Рисунок 2. Результаты измерения шероховатости поверхности образцов из сплава В-1469:

a – изменение шероховатости в зависимости от расстояния до излома; *б* – трехмерная модель поверхности у излома; *в* – трехмерная топографическая модель поверхности у излома; *г* – трехмерная модель поверхности на расстоянии 20 мм от излома; *д* – трехмерная топографическая модель поверхности на расстоянии 20 мм от излома

Исследование состояния поверхности образцов после испытаний по *схеме 2* показало, что наибольший вклад в изменение степени общей шероховатости вносят коррозионные повреждения поверхности, а именно, при попадании глубоких коррозионных питтингов в область секущей, проведенной по поверхности образца, на кривой отображаются значительные «пики» (рис. 4). Однако если в область секущей питтинги не попадают, то вышеприведенная закономерность в возрастании шероховатости по мере приближения к излому сохраняется для обоих сплавов, но в сплаве В-1469 шероховатость возрастает более интенсивно.

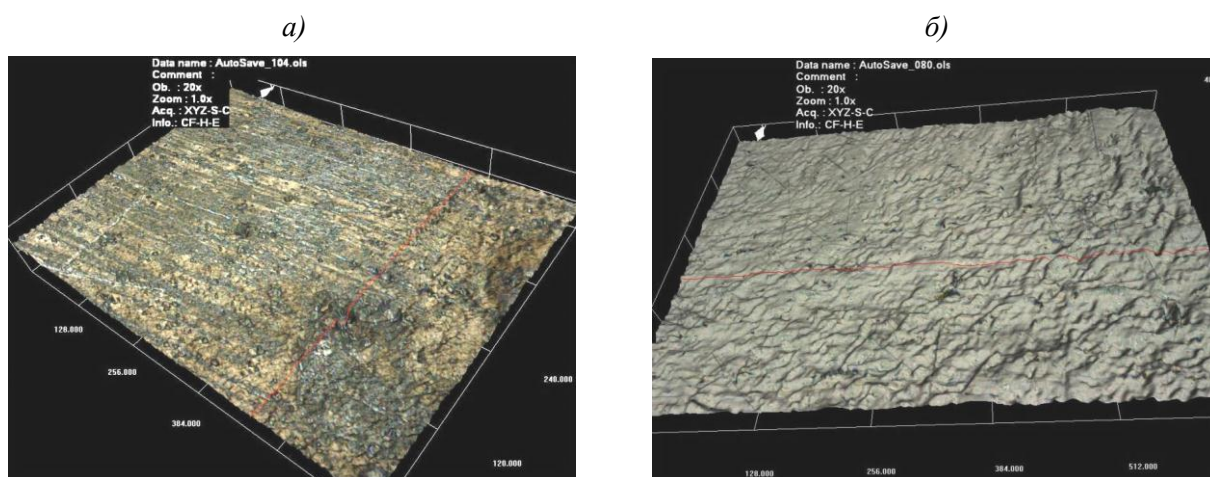


Рисунок 3. Трехмерная модель поверхности вблизи излома образцов из сплавов 1441 (а) и В-1469 (б)



Рисунок 4. Изменение степени шероховатости поверхности при попадании глубоких коррозионных питтингов в область секущей, проведенной по поверхности образца

При сравнении состояния поверхности образцов, выдержанных в КСТ в течение 10 и 45 сут, выявлено, что размер и глубина коррозионных поражений напрямую коррелируют с продолжительностью выдержки в агрессивной среде. Так, на поверхности образцов из сплава 1441 после выдержки в КСТ размер коррозионных питтингов изменяется от 10 мкм (при выдержке 10 сут) до 1 мм (при выдержке 45 сут). Глубина питтингов при этом достигает 200 мкм (рис. 5).

На поверхности образцов из сплава В-1469 размер коррозионных питтингов изменяется от 10 мкм (при выдержке 10 сут) до 2 мм (при выдержке 45 сут). Глубина питтингов при этом достигает 300 мкм (рис. б).

Разница влияния коррозионно-активной среды объясняется тем, что сплав 1441 в большей степени склонен к коррозионному растрескиванию, а сплав В-1469 склонен к общей коррозии.

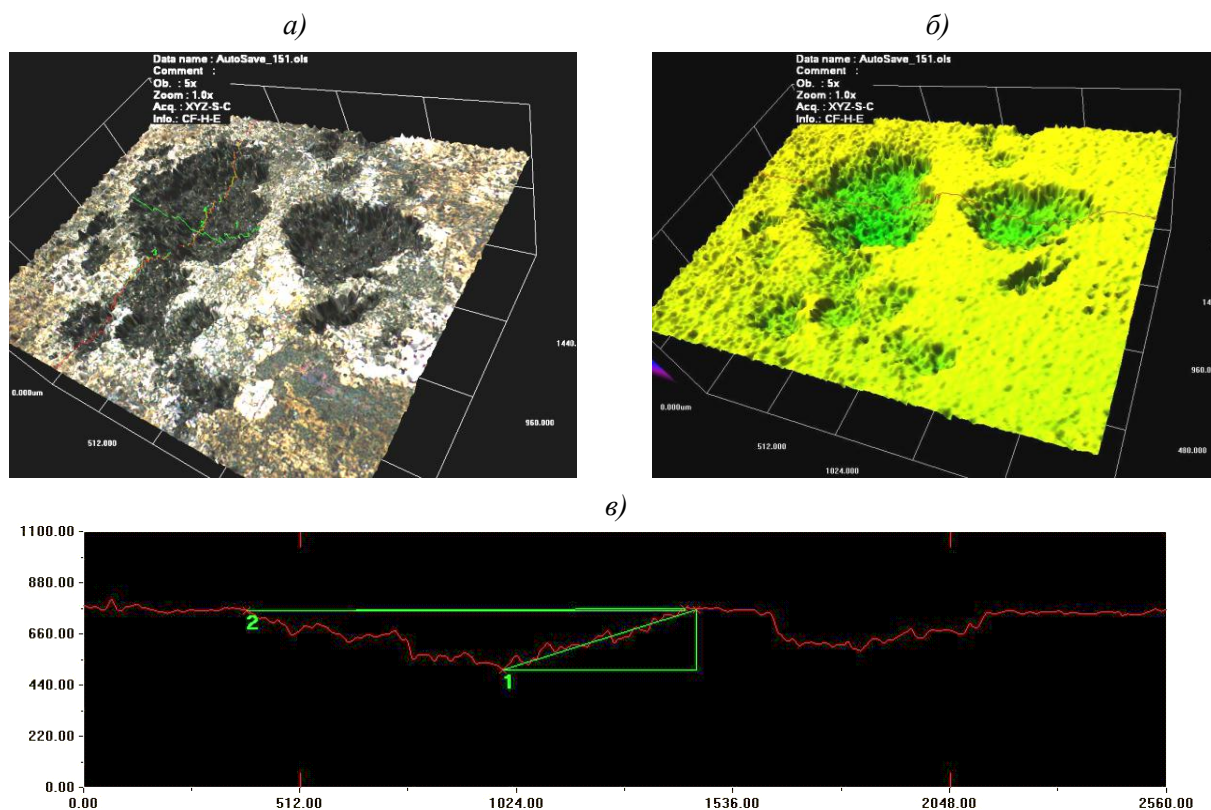


Рисунок 5. Коррозионные повреждения на поверхности в сплаве 1441 после выдержки в КСТ:

a – трехмерная модель поверхности; *б* – топографическая трехмерная модель поверхности; *в* – отображение изменения шероховатости поверхности в местах коррозионных поражений

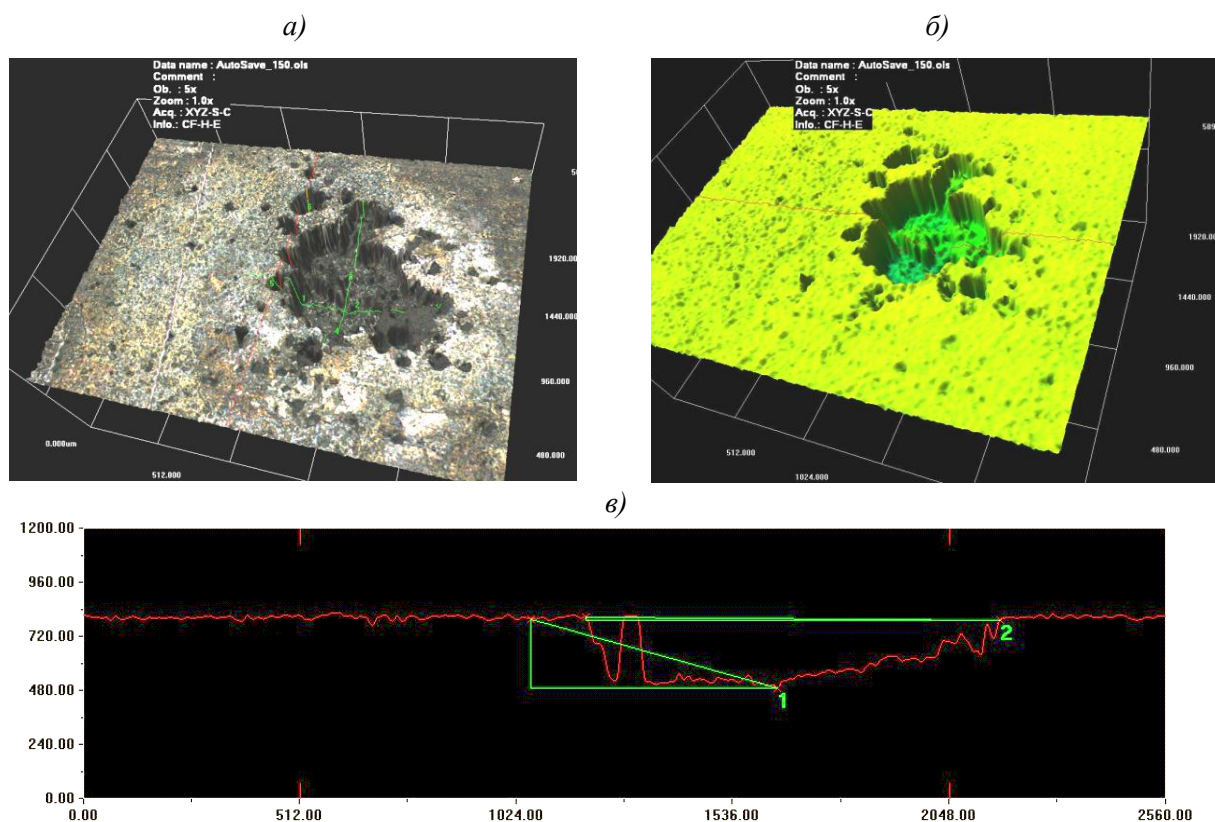


Рисунок 6. Коррозионные повреждения поверхности в сплаве В-1469 после выдержки в КСТ:

a – трехмерная модель поверхности; *б* – топографическая трехмерная модель поверхности; *в* – отображение изменения шероховатости поверхности в местах коррозионных поражений

Выводы

Методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, компьютерного анализа и обработки изображений построены 3D-модели поверхности образцов из алюминийлитиевых сплавов 1441 и В-1469 после испытаний при растяжении и на коррозионное воздействие. Проведено исследование закономерностей изменения рельефа образцов – шероховатости поверхности (R_a), размера и глубины коррозионных питтингов.

Обнаружено, что изменение шероховатости поверхности в сплаве В-1469 выражено более интенсивно, чем в сплаве 1441. Шероховатость поверхности образцов из сплава 1441 возрастает по мере приближения к излому. На расстоянии 8 мм – $R_a=0,5$ мкм, а в непосредственной близости к излому – $R_a=0,8$ мкм. В образцах из сплава В-1469 шероховатость поверхности образцов возрастает по мере приближения к излому – от 0,4 до 1,5 мкм. Локализация деформации в большей степени выражена в сплаве 1441.

Показано, что после коррозионного воздействия наибольший вклад в изменение степени общей шероховатости вносят коррозионные повреждения поверхности. Размер

и глубина коррозионных поражений напрямую коррелируют с продолжительностью выдержки в агрессивной среде. На поверхности образцов из сплава 1441 размер коррозионных питтингов изменяется от 10 мкм (при выдержке 10 сут в КСТ) до 1 мм (при выдержке 45 сут). Глубина питтингов при этом достигает 200 мкм. При воздействии коррозионно-активной среды сплав более склонен к коррозионному растрескиванию.

На поверхности образцов из сплава В-1469 размер коррозионных питтингов изменяется от 10 мкм (при выдержке 10 сут) до 2 мм (при выдержке 45 сут). Глубина питтингов при этом достигает 300 мкм. При воздействии коррозионно-активной среды сплав более склонен к общей коррозии.

Таким образом, число коррозионных питтингов и их диаметр с увеличением продолжительности выдержки от 10 до 45 сут возрастает на три порядка.

Показано, что вследствие склонности алюминийлитиевых сплавов к локализации деформации такие параметры, как фрагментация поверхности, возрастание шероховатости и образование линий скольжения в комплексе могут использоваться для диагностики состояния материала в процессе эксплуатации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы //Вестник РАН. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
4. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. Киев. 1992.
5. 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.
6. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
7. Fridlyander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. Т. 44. №9–10. С. 365–370.

8. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
9. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
10. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 16–20.
11. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминийлитиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
12. Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А. Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала //Журнал технической физики. 2013. Т. 83. №2. С. 153–155.
13. Seong-Woong Kim, Huck Beng Chew, K. Sharvan Kumar. In situ TEM study of crack–grain boundary interactions in thin copper foils //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 154–157.
14. Vignal V., Kempf D. Influence of heterogeneous plastic strain fields on the corrosion susceptibility of duplex stainless steels at the microscale //Advances in materials science. 2007. V. 7. №1 (11) P. 77–82.
15. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Денисов А.А. Динамика деформационных полос и разрушение алюминиймагниевого сплава АМг6 //Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №10. С. 1873–1878.
16. Jain V., Mishra R.S., Verma R., Essadiqi E. Superplasticity and microstructural stability in a Mg alloy processed by hot rolling and friction stir processing //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 447–450.
17. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А. Деформационный хаос и самоорганизация на стадии предразрушения сплава АМг6 //Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №10. С. 1879–1884.

18. Чуистов К.В. Локализация деформации и возможности ее устранения в сплавах с когерентной фазой выделения на Al–Li-основе //Металлофизика. 1991. Т. 3. №7. С. 23–40.
19. Давыдов В.Г., Бер Л.Б., Самарина М.В., Барабаненков Ю.А., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Возможность улучшения технологической пластичности при холодной деформации отожженных алюминиевых сплавов, содержащих литий //Технология легких сплавов. 1996. №5. С. 26–32.
20. Bois-Brochu A., Blais C. et al. Effects of deformation texture intensities and precipitates on the anisotropy of mechanical properties of Al–Li alloy 2099 T83 extrusions /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminium Alloys. Pittsburgh. 2012. P. 1831–1836.
21. 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.
22. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Тренингов И.А. Влияние условий нагружения на процесс накопления повреждений перед разрушением в сплаве ЭК151-ИД /В сб. материалов Международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 2009. С. 332.
23. Novis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science //Journal of Microscopy. 2010. V. 240. №3. P. 173–180.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Aviacionnoe materialovedenie: itogi i perspektivy [Aeronautical materials: results and prospects] //Vestnik RAN. 2002. Т. 72. №1. S. 3–12.
2. 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.
3. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
4. Fridljander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I., Koval' Ju.N. Aljuminijlitievye splavy. Struktura i svojstva [Aluminum-lithium alloys. Structure and Properties]. Kiev: Naukova dumka. 1992.
5. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitievyh spлавov i mnogostupenchatyh rezhimov termicheskoj obrabotki [Development alyuminiylitievyh

- alloys and multi-heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
6. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye de-formiruemye splavy [Aluminum wrought alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
 7. Fridlyander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. T. 44. №9–10. C. 365–370.
 8. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovanija strukturno-fazovogo sostojanija materialov [Application of the methods of analytical microscopy and X-ray analysis for the study of structural-phase state materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).
 9. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytaniya i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
 10. Hohlatova L.B., Kolobnev N.I., Antipov V.V., Karimova S.A., Rudakov A.G., Oglodkov M.S. Vlijanie korrozionnoj sredy na skorost' rosta treshhiny ustalosti v aljuminievych splavah [The influence of the corrosive environment on the rate of growth of fatigue cracks in the aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 16–20.
 11. Panin V.E., Kablov E.N., Pochivalov Ju.I., Panin S.V., Kolobnev N.I. Vlijanie nanos-strukturirovanija poverhnostnogo sloja aljuminijlitievogo splava 1424 na mehanizmy de-formacii, tehnologicheskie harakteristiki i ustalostnuju dolgovechnost'. Povyshenie plas-tichnosti i tehnologicheskikh harakteristik [Influence of nanostructuring of the surface layer of the alloy alyuminiylitievogo 1424 on deformation mechanisms, technological characteristics and fatigue life. Increase in ductility and processability] //Fizicheskaja me-zomehanika. 2012. T. 15. №6. S. 107–111.
 12. Belikova A.F., Buravova C.N., Gordopolov Ju.A. Lokalizacija deformacii i svjaz' ee s deformirovannym sostojaniem materiala [Strain localization and its connection with the deformed state of the material] //Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2013. T. 83. №2. S. 153–155.
 13. Seong-Woong Kim, Huck Beng Chew, K. Sharvan Kumar. In situ TEM study of crack–grain boundary interactions in thin copper foils //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 154–157.

14. Vignal V., Kempf D. Influence of heterogeneous plastic strain fields on the corrosion susceptibility of duplex stainless steels at the microscale //Advances in materials science. 2007. V. 7. №1 (11) P. 77–82.
15. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Shuklinov A.V., Denisov A.A. Dinamika deformacionnyh polos i razrushenie aljuminijmagnievogo splava AMg6 [Dynamics of deformation bands and destruction alyuminiymagnievogo alloy AMg6] //Fizika tverdogo tela. 2011. T. 53. №10. S. 1873–1878.
16. Jain V., Mishra R.S., Verma R., Essadiqi E. Superplasticity and microstructural stability in a Mg alloy processed by hot rolling and friction stir processing //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 447–450.
17. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Denisov A.A. Deformacionnyj haos i samoorganizacija na stadii predrazrushenija splava AMg6 [Deformation chaos and self-organization at the stage predestruction alloy AMg6] //Fizika tverdogo tela. 2011. T. 53. №10. S. 1879–1884.
18. Chuistov K.V. Lokalizacija deformacii i vozmozhnosti ee ustraneniya v splavah s kogerentnoj fazoj vydelenija na Al–Li-osnove [Strain localization and the possibility of its removal in alloys with coherent phase separation on the Al–Li-based] //Metallofizika. 1991. T. 3. №7. S. 23–40.
19. Davydov V.G., Ber L.B., Samarina M.V., Barabanenkov Ju.A., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Vozmozhnost' uluchsheniya tehnologicheskoy plastichnosti pri holodnoj deformacii otozhzhennyh aljuminievyyh splavov, sodержashhih litij [Ability to improve the technological plasticity during cold deformation of the annealed aluminum alloy containing lithium] //Tehnologija legkih splavov. 1996. №5. S. 26–32.
20. Bois-Brochu A., Blais C. et al. Effects of deformation texture intensities and precipitates on the anisotropy of mechanical properties of Al–Li alloy 2099 T83 extrusions /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminium Alloys. Pittsburgh. 2012. P. 1831–1836.
21. Glezer A.M., Shurygina N.A., Zajchenko S.G., Permjakova I.E. Vzaimodejstvie polos deformacionnogo sdviga i nanochastic v amorfno-nanokristallicheskih splavah [The interaction of shear deformation bands and nanoparticles in amorphous-nanocrystalline alloys] //Deformacija i razrushenie materialov. 2012. №4. S. 2–12.
22. Zhegina I.P., Kotel'nikova L.V., Treninkov I.A. Vlijanie uslovij nagruzhenija na process nakoplenija povrezhdenij pred razrusheniem v splave JeK151-ID [Influence of loading conditions on the accumulation of damage before the destruction of the alloy

EK151-ID] /V sb. materialov Mezhdunarodnoj konf. «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov». 2009. S. 332.

23. Hovis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science //Journal of Microscopy. 2010. V. 240. №3. P. 173–180.