

УДК 669:620.191/193

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S4-65-69

*И.П. Жегина<sup>1</sup>, В.Б. Григоренко<sup>1</sup>, Л.В. Морозова<sup>1</sup>, М.А. Фомина<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ 1441 И В-1469 ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАПРЯЖЕНИЙ И КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЫ**

*Изучено совместное влияние растягивающих напряжений и водно-солевого раствора на состояние поверхности конструкционных алюминийлитиевых сплавов. Несмотря на то что сплавы 1441 и В-1469 склонны к преобладанию различных типов питтинговой коррозии, при одновременном воздействии напряжений и коррозионной среды для обоих сплавов разрушение носит хрупкий межзеренный характер.*

**Ключевые слова:** *растяжение, коррозионное растрескивание, излом, легкие сплавы, предразрушение.*

*A combined influence of tensile stresses and water-salt solution on the surface state of structural aluminum-lithium alloys has been studied. It was found that 1441 and В-1469 alloys are susceptible to different types of pitting corrosion, but in case of simultaneous exposure to stresses and corrosive environment a brittle intercrystalline fracture was observed.*

**Keywords:** *tensile, stress-corrosion cracking, fracture, light alloys, pre-failure.*

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Исследования коррозионной стойкости различных материалов в условиях эксплуатации представляют большой интерес, так как ежегодные потери от коррозии в развитых странах достигают 3% ВВП [1]. Разработка и применение новых методов защиты материалов от коррозии могли бы снизить величину потерь приблизительно на 25%.

Эффективная диагностика состояния работающего изделия является важным фактором в решении проблемы повышения надежности изделий в процессе эксплуатации. Изучение процесса накопления повреждений различного рода ведет к возможности прогнозирования будущего разрушения детали и ее остаточного ресурса [2–4]. Решению этой проблемы, особенно исследованию изменений, протекающих в поверхностных слоях [5], посвящено большое количество научных работ.

Поверхностные слои являются наиболее нагруженными и подверженными воздействию различных внешних факторов, таких как температура и среда. На внутренних границах раздела зарождаются и развиваются все виды локализованного пластического течения. В ходе пластической деформации вследствие энергетического состояния поверхности и воздействия внешних факторов накопление дислокаций в поверхностном слое оказывается более интенсивным, чем во всем объеме материала.

Во многих зарубежных работах, посвященных исследованиям по данной теме, рассмотрен процесс накопления деформационных повреждений на различных структурных уровнях во множестве

материалов [6–13]. В статьях отечественных научных коллективов [14–17] представлены разные точки зрения на протекание процессов деформации в материалах. Однако в указанных трудах отсутствует комплексный подход к изучению признаков предразрушения, в частности алюминийлитиевых сплавов, в то время как особенный интерес представляет процесс накопления поверхностных дефектов при действии не только нагрузок, но и коррозионной среды.

**Материалы и методы**

Исследование одновременного влияния растягивающих напряжений и коррозионной среды на состояние поверхностных слоев алюминийлитиевых сплавов проводили в соответствии с областью аккредитации Испытательного центра ВИАМ [18–20].

Для проведения испытаний в камере солевого тумана (КСТ) из листов литийсодержащих алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 в поперечном направлении изготовлены образцы. Перед проведением испытаний поверхность образцов отполирована пастой из синтетических алмазов АСМ НОМГ [21].

Оценку совместного влияния нагружения и коррозионной среды на процесс накопления повреждений в приповерхностных слоях проводили с использованием установки КР «Сигнал» по ГОСТ 9.019–74. На образцы действовала постоянная осевая растягивающая нагрузка и коррозионная среда (3%-ный раствор NaCl). Согласно ГОСТ 9.019–74, образцы из сплавов 1441 и

В-1469 испытывали при напряжении  $0,75\sigma_{0,2}$ . С учетом ранее полученных данных о склонности исследуемых сплавов к коррозионному растрескиванию, дополнительно проводили нагружение листов из сплава В-1469 при  $0,65\sigma_{0,2}$  и  $0,85\sigma_{0,2}$ , листов из сплава 1441 – при  $0,5\sigma_{0,2}$  и  $0,65\sigma_{0,2}$  с выдержкой 10, 20, 30 и 45 сут.

Постоянный уровень приложенных напряжений обеспечивали на весь период испытаний. На каждый уровень напряжений выставляли по 12 образцов, через заданное время производился частичный сьем образцов (по 3 шт. с каждого уровня напряжений). Подачу коррозионной среды осуществляли периодически по следующему циклу: 50 мин на воздухе, 10 мин в растворе 3%-ного NaCl. После окончания срока экспозиции образцы промывали проточной водой, ополаскивали дистиллированной водой и сушили в термощкафу при температуре  $40^{\circ}\text{C}$ .

Исследования состояния поверхности и изломов образцов проводили с помощью электронного растрового микроскопа JSM-6490 LV фирмы Jeol.

### Результаты

В КСТ в течение 10, 20, 30 и 45 сут испытаны образцы из алюминийлитиевых сплавов 1441 и

В-1469. Визуальный анализ образцов после сушки показал, что на поверхности (рис. 1) после заданной продолжительности выдержки наблюдаются коррозионные поражения разного характера: более глубокие питтинговые поражения на сплаве 1441 и более широкие в диаметре питтинги на сплаве В-1469.

При исследовании поверхности на электронном микроскопе образцов обоих сплавов, испытанных на установке КР «Сигнал» с одновременным действием растягивающих напряжений и коррозионной среды, установлено, что из-за малой величины действующих напряжений образования линий скольжения на поверхности не происходит, однако активно развиваются коррозионные процессы.

Влияние среды существенно сокращает время до разрушения образцов. В ходе испытаний часть образцов разрушилась до истечения заданной продолжительности выдержки. При изучении поверхности таких образцов обнаружено, что начало разрушения связано с развитием и слиянием коррозионных поражений поверхности с обеих сторон. Строение поверхности образцов обоих сплавов после выдержки в течение 10 сут показано на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид образцов из сплавов 1441 (а) и В-1469 (б) после 10 сут выдержки

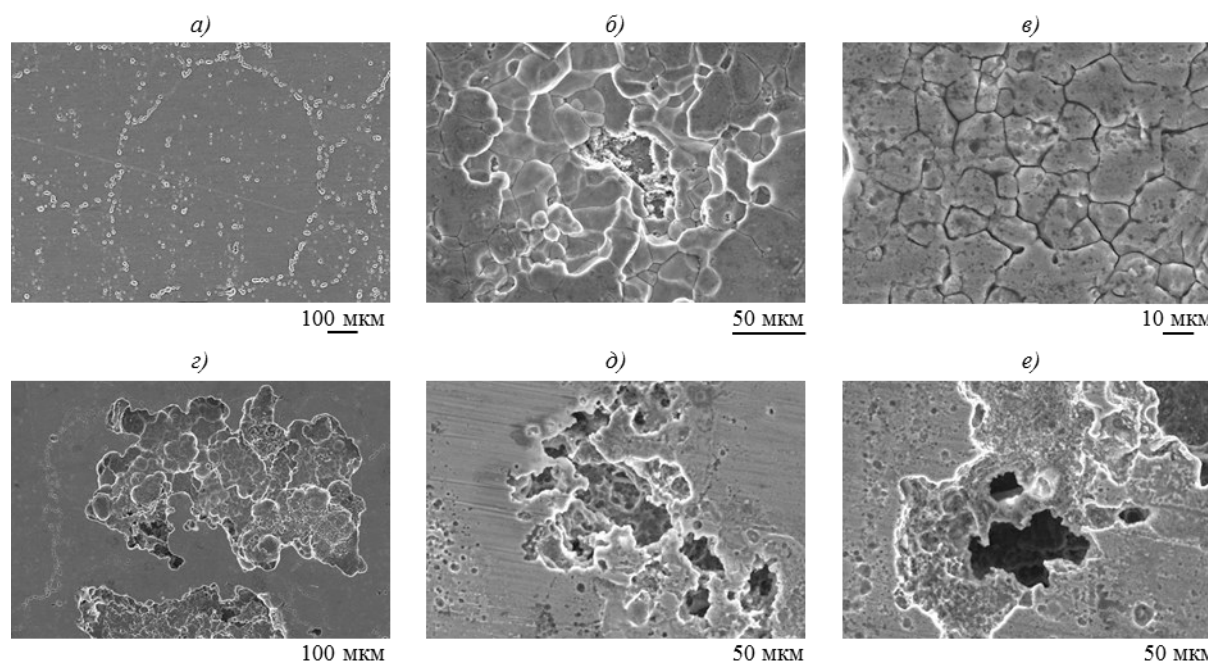


Рис. 2. Коррозионные повреждения поверхности (а, з –  $\times 100$ ; б, д, е –  $\times 500$ ; е –  $\times 1000$ ) сплавов 1441 (а–е) и В-1469 (з–е) после 10 сут выдержки

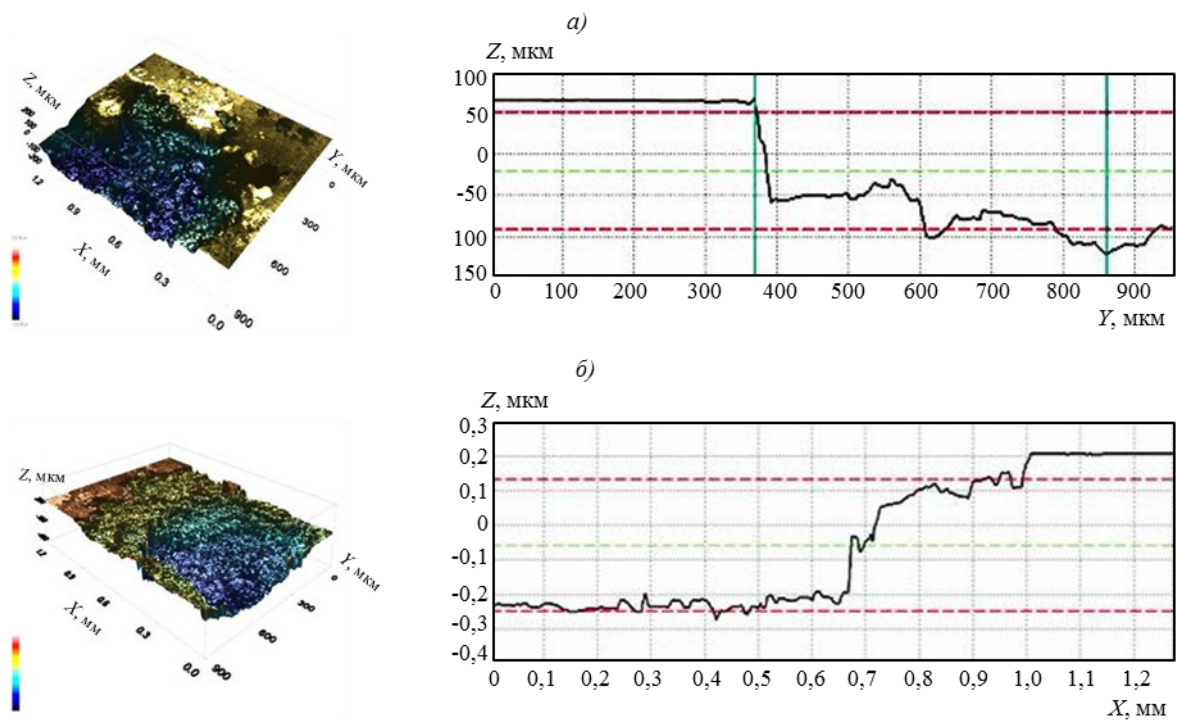


Рис. 3. Трехмерные изображения и профиль поверхности с коррозионными повреждениями после 45 сут испытаний в КСТ сплавов В-1469 (а) и 1441 (б)

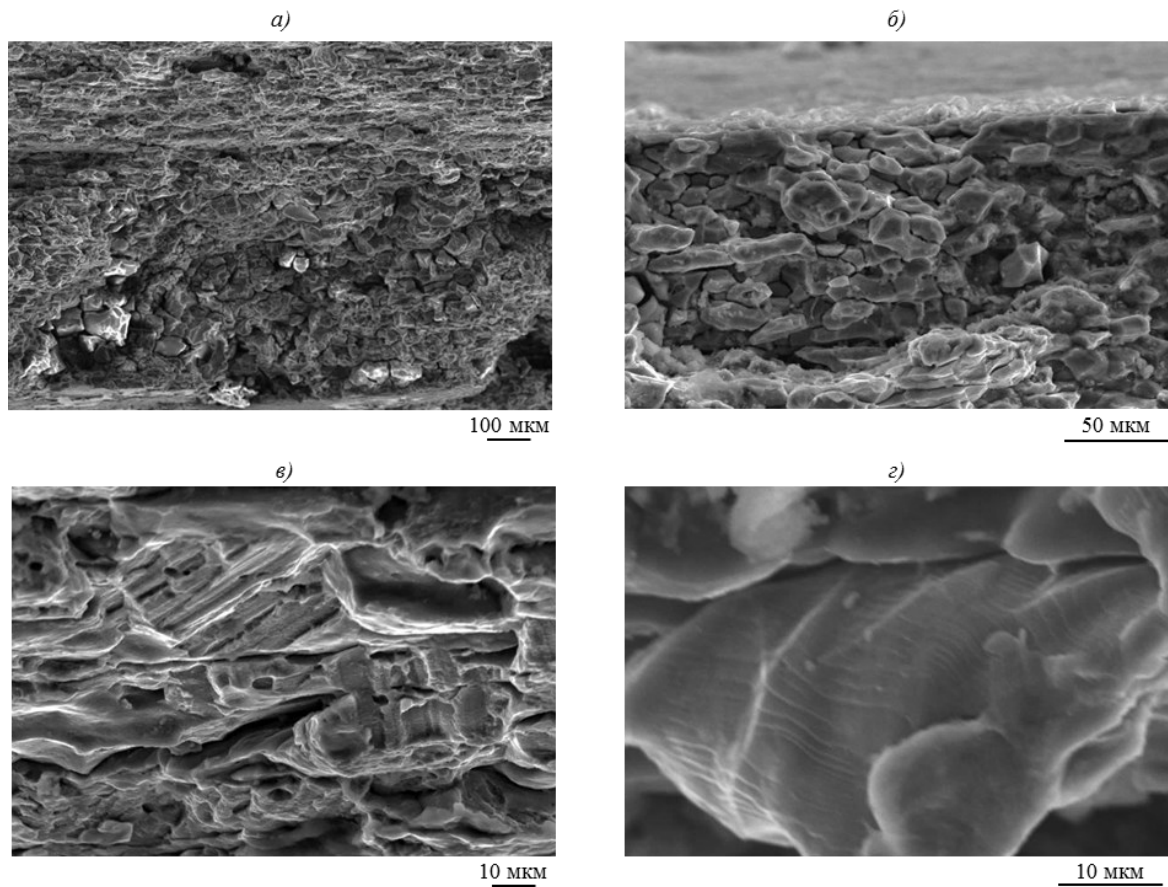


Рис. 4. Излом образца (а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$ ; в –  $\times 1000$ ; г –  $\times 2500$ ) из сплава 1441, испытанного на установке КР «Сигнал» и разрушившегося в течение 7 сут при нагрузке  $0,75\sigma_{0,2}$

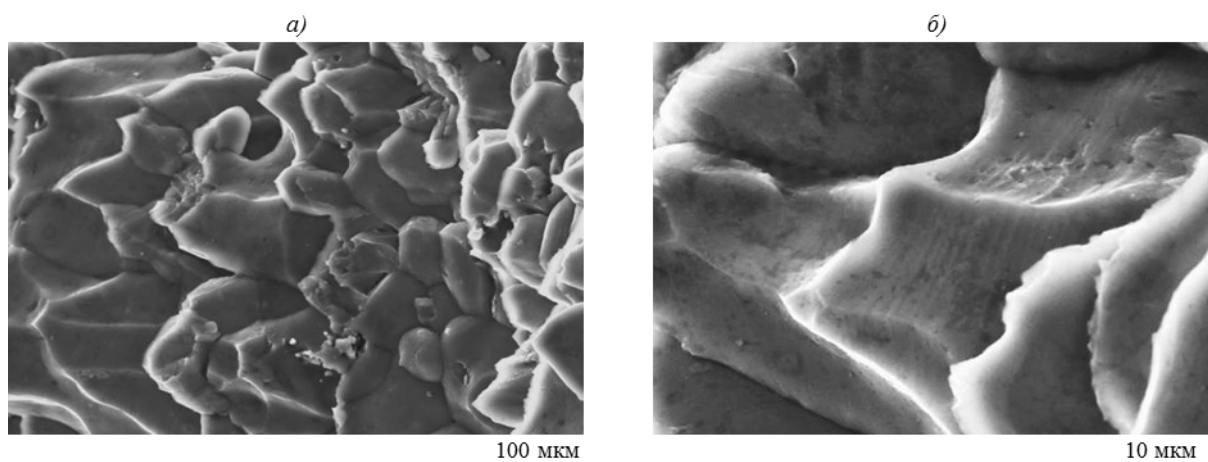


Рис. 5. Излом образца (*а* –  $\times 1000$ ; *б* –  $\times 2000$ ) из сплава В-1469, испытанного на установке КР «Сигнал» и разрушившегося в течение 7 сут при нагрузке  $0,75\sigma_{0,2}$

Анализ состояния поверхности образцов из сплавов 1441 и В-1469 показал, что после выдержки в коррозионно-активной среде на поверхности образцов наблюдаются множественные следы воздействия коррозии: от растратов по границам зерен до глубоких коррозионных язв (см. рис. 2). Глубина и количество коррозионных язв на поверхности образцов напрямую зависят от продолжительности выдержки образцов в коррозионно-активной среде (рис. 3).

В сплаве В-1469 на поверхности образцов наблюдаются более глубокие и локализованные коррозионные язвы, что связано со склонностью сплава к общей коррозии. Так, после выдержки в КСТ в течение 10 сут на поверхности наблюдаются коррозионные язвы, размер которых колеблется от 10 мкм до 1 мм. С увеличением продолжительности выдержки не только возникают новые язвы, но и увеличиваются размер и глубина уже существующих коррозионных язв. Так, на поверхности образцов, выдержанных в КСТ в течение 45 сут, наблюдается множество локализованных язв приблизительно одинакового размера (2 мм).

После выдержки в течение 10 сут на поверхности образцов из сплава 1441 наблюдаются поражения поверхности размером от 10 мкм до 0,5 мм. С увеличением продолжительности выдержки количество и размер коррозионных поражений возрастают. Так, на поверхности образцов, выдержанных в КСТ в течение 45 сут, коррозионные язвы увеличиваются в размерах до 1 мм. При больших сроках выдержки (30 и 45 дней) на поверхности образцов наблюдаются поражения, занимающие площадь до  $10 \text{ мм}^2$ . В коррозионных язвах развивается разрушение по границам зерен, что связано с низкой стойкостью сплава к коррозионному растрескиванию.

При исследовании образцов, испытанных на установке КР «Сигнал», методом фрактографического анализа показано, что разрушение образцов обоих сплавов развивается от коррозионных по-

вреждений поверхности, изломы имеют межзеренное строение (рис. 4 и 5), при большом увеличении на поверхности отдельных зерен видны линии скольжения.

В сплаве В-1469 на поверхности образцов наблюдаются более глубокие и локализованные коррозионные язвы, что связано со склонностью сплава к общей коррозии (см. рис. 2, *з*, *д*). В изломе также наблюдается межзеренное разрушение, а на поверхности зерен при большом увеличении заметны полосы скольжения.

Показано, что при постоянной нагрузке, не достигающей предела текучести, и выдержке в коррозионной среде в материале реализуется механизм коррозии под напряжением. Пластическая деформация материала не достигает того уровня, при котором на поверхности начинается образование линий скольжения. Коррозионная среда вызывает образование язв на поверхности и распространяется в глубь материала по границам зерен, провоцируя хрупкое разрушение. Наиболее заметно это проявляется в сплаве 1441, в большей степени склонном к коррозионному растрескиванию. В этом случае влияние коррозионной среды на материал преобладает над влиянием приложенной нагрузки.

Установлено, что приложение более высокой нагрузки вызывает ускоренное протекание процессов пластической деформации и разрушение образца до того, как коррозионная среда успеет оказать на него заметное воздействие. Очаги разрушения связаны с поверхностными дефектами и концентраторами напряжений. В этом случае механизмы пластической деформации преобладают над коррозионными процессами в материале.

Разрушение конструкционных алюминийлитиевых сплавов В-1469 и 1441 при одноосном растяжении и совместном воздействии нагрузки и коррозионно-активной среды носит хрупкий межзеренный характер.



### Заключение

При увеличении продолжительности выдержки под нагрузкой в камере солевого тумана площадь коррозионных поражений обоих сплавов возрастает, причем в сплаве В-1469 общая площадь коррозионных поражений больше.

В обоих сплавах коррозионное поражение начинает развиваться по границам первичных нерекристаллизованных зерен, в сплаве 1441 развиваются глубокие питтинги, приводя к образова-

нию трещин по границам зерен, тогда как в сплаве В-1469 образующиеся коррозионные язвы увеличиваются в диаметре, не способствуя образованию множественных очагов развития трещин.

Совместное воздействие растягивающих напряжений и коррозионно-активной среды приводит к образованию хрупкого межкристаллитного излома.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-12081).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
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. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
5. 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.
6. Hazeli K., Cuadra J., Vanniamparambil P.A., Kotsos A.K. In situ identification of twin-related bands near yielding in a magnesium alloy //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 83–86.
7. Shokoufeh Malekjani, Hodgson P.D., Stanford N.E., Hilditch T.B. The role of shear banding on the fatigue ductility of ultrafine-grained aluminium //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 269–272.
8. Chen G., Zhang X.L., Liu C.T. High strength and plastic strain of Mg-based bulk metallic glass composite containing in situ formed intermetallic phases //Scripta Materialia. 2013. V. 68. P. 150–153.
9. 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.
10. Дун Ю., Александров И.В., Ванг Д. Высокоскоростное деформационное поведение ультрамелкозернистой меди //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. №1(46). С. 98–105.
11. 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.
12. Forest S. Modeling slip, kink and shear banding in classical and generalized single crystal plasticity //Acta mater. 1998. V. 46. №9. P. 3265–3281.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Денисов А.А. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6 //Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №10. С. 1873–1878.
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. Турченков В.А., Баранов Д.Е., Гагарин М.В., Шишкин М.Д. Методический подход к проведению экспертизы материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 47–53.
19. Курс М.Г., Каримова С.А. Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 51–57.
20. 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).
21. 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.