

УДК 669.017:669.715

В.Б. Григоренко¹, Л.В. Морозова¹**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ДЕГРАДАЦИЮ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА АМg4,5 И АМц**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-10-10

Проведено комплексное исследование изделий из алюминиевых сплавов марок АМg4,5 и АМц после многолетней эксплуатации с целью выявления признаков деградации материала. Проведены механические испытания для оценки прочностных свойств основного материала и сварных швов. Методами неразрушающего контроля, рентгеноспектрального микроанализа, оптической и растровой электронной микроскопии исследована структура материала, проведен фрактографический анализ разрушенных образцов. Установлено, что признаки деградации при соблюдении условий эксплуатации не выявляются.

Ключевые слова: конструкционный алюминиевый сплав, фрактография, растровая электронная микроскопия, прочность, неразрушающий контроль, деградация свойств.

Complex research of products from АМg4,5 aluminum alloys and АМn after long-term operation for the purpose of identification of signs of degradation of material is conducted. Mechanical tests for assessment of strength properties of base material and welded seams, are carried out by methods of non-destructive testing, optical and scanning microscopy the material structure is investigated, the fractographic analysis of the destroyed samples is carried out. It is established that degradation signs at observance of operating conditions do not come to light.

Keywords: constructional aluminum alloys, fractographic, scanning electronic microscopy, strength, non-destructive testing, degradation of properties.

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

Алюминиевые сплавы являются доминирующим конструкционным материалом в авиа- и судостроении, без алюминия трудно представить электротехническую промышленность, сплавы на основе алюминия широко применяются в строительстве и транспортном машиностроении, а также алюминиевые изделия широко используются в быту. Алюминиевые сплавы, благодаря своим особым свойствам, незаменимы в химической, атомной и нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Одним из важных направлений применения алюминиевых сплавов является использование их в качестве конструкционных материалов для конденсаторов, холодильников и теплообменников. При эксплуатации в условиях охлаждения и конденсации неагрессивных по отношению к алюминиевым сплавам нефтепродуктов выявлено, что трубки из алюминиевых сплавов не забиваются продуктами коррозии, накипи и др. [1–3]. Сероводород, образующийся при переработке нефти, в отличие от сталей, не разъедает алюминий даже в присутствии воды, а в некоторых случаях сероводород является ингибитором коррозии алюминия [4–7].

Эксплуатация теплообменных аппаратов может длиться десятилетиями, и в связи с этим возникает вопрос о безопасности использования оборудования с точки зрения

возможных деградационных процессов, протекающих в структуре материалов и сварных соединений [8–11].

Процесс накопления дефектов и особенности коррозионных повреждений в алюминиевых сплавах при совместном воздействии нагрузки и коррозионной среды во время испытаний рассматривались ранее в работах [12–15], поэтому особый интерес представляют исследования по выявлению изменений структуры материалов и сварных соединений после длительной наработки в реальных условиях эксплуатации.

Для сравнения структуры и свойств исследовали фрагменты листов из сплавов марок АМг4,5 и АМц (ГОСТ 4784–97) производства 1977 г. после эксплуатации в среде пропан-пропилена и пропилена-этилена при рабочей температуре в интервале от 40 до 60°C в составе теплообменных аппаратов; после эксплуатации и высокотемпературного нагрева во время аварийной ситуации, а также современного производства в состоянии поставки.

Работа выполнена в рамках развития критической технологии №21 «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» из перечня Критических технологий РФ, утвержденного указом Президента РФ от 07.06.2011 г. №899, а также реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы исследований

Исследовали фрагменты листов из сплавов марок АМг4,5 и АМц (ГОСТ 4784–97) толщиной >20 мм, находившихся в эксплуатации в составе теплообменных аппаратов около 30 лет.

Анализ химического состава листов из алюминиевых сплавов АМг4,5 и АМц проводили в соответствии с ГОСТ 7727–81 «Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа» на оптико-эмиссионном спектрометре Q8 Magellan по градуировочным кривым с использованием комплектов ОСО (отраслевых стандартных образцов) для сплава АМц. Определяли содержание основных химических элементов в анализируемых образцах.

Неразрушающий контроль проводили на рентгеновском аппарате РУМ-7 (РУП-6020) с режимами: $U_a=45–52$ кВ; $I_a=15$ мА; продолжительность 2 мин; радиографическая пленка D5; фокусное расстояние 750 мм.

Для оценки механических свойств проводили испытания на растяжение и ударный изгиб. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 на машине МТС с усилием 5 тс и на маятниковом копре W+B PH-300-CHV (ГОСТ 9454–78).

Исследования поверхности и изломов образцов сплавов АМг4,5 и АМц выполняли методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе JSM-6490LV.

Анализ микроструктуры проводили с использованием оптического комплекса Leica в соответствии с ГОСТ 5639–82. Исследование зеренной структуры проведено после анодного окрашивания в 1,8%-ном растворе борофтороводородной кислоты на световом микроскопе Neophot-32 в поляризованном свете.

Исследования микроструктур сварных соединений выполняли с использованием оптического микроскопа Olympus GX51, измерения твердости проводили в соответствии с ГОСТ 9450–76 с использованием микротвердомера Durascan.

Исследование на склонность к коррозионному растрескиванию проводили по ГОСТ 9.019 методом постоянной осевой растягивающей нагрузки на установке «Сигнал» на образцах, вырезанных в поперечном направлении. Испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) проводили по ГОСТ 9.021 в рабочих емкостях при полном

погружении образцов в раствор 2 в течение 6 ч при 30°C. Испытания на расслаивающую коррозию (РСК) проводили по ГОСТ 9.904 в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 4 в течение 7 сут.

Результаты

Анализ химического состава фрагментов листов показал, что состав всех проанализированных фрагментов соответствует требованиям сертификатов и ГОСТ 4784–97 для сплавов АМг4,5 и АМц.

Проведенный *неразрушающий контроль* образцов сварных соединений не обнаружил дефектов в сварных швах фрагментов, во время всего срока эксплуатации не подвергавшихся значительному нагреву или воздействию коррозионно-активных соединений. В тех фрагментах, которые подвергались тепловому воздействию, выявлены многочисленные внутренние дефекты, не выходящие на поверхность, и трещины, наблюдаемые невооруженным глазом.

Для *оценки механических свойств* проводили испытания на растяжение и ударный изгиб образцов, вырезанных из фрагментов листов из сплавов АМг4,5 и АМц.

Установлено, что в образцах из сплавов АМг4,5 и АМц, вырезанных из зоны термического и коррозионного влияния, наблюдается снижение механических свойств по сравнению с требованиями ГОСТ; механические свойства образцов, вырезанных из фрагментов вне зоны термического и коррозионного влияния, соответствуют требованиям ГОСТ 21631–76. Необходимо отметить, что в случае сплава АМц в результате термического воздействия отмечено возрастание пластичности при снижении прочности. Результаты механических испытаний на растяжение и ударную вязкость приведены в таблице.

Результаты механических испытаний листов из сплавов АМг4,5 и АМц

Сплав	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Ударная вязкость КСУ		Примечание
	МПа		%		Дж/см ²	(кгс·м)/см ²	
АМг4,5	310	172	27	44,7	61	6,2	Новый материал
	312	162	22	31	50	5,1	Эксплуатация в штатных условиях
	265	115	16,5	25	18,5	1,89	Тепловое воздействие
	275–350	125	>15	–	–	–	ГОСТ 21631–76 (для полуфабрикатов толщиной от 12,5 до 50 мм)
АМц	110	40	27	75	–	–	Эксплуатация в штатных условиях
	93	67	38	87	–	–	Тепловое воздействие
	95–135	>35	≥25	–	–	–	ГОСТ 21631–76

Наблюдается снижение механических свойств в образцах, изготовленных из фрагментов, подвергавшихся термическому воздействию. Значения условного предела текучести, предела прочности и показателей пластичности образцов, эксплуатировавшихся в штатных условиях, соответствуют требованиям нормативной документации. Значения ударной вязкости также соответствуют значениям, указанным в сопроводительных сертификатах: 3,5–4,3 (кгс·м)/см².

Исследование микроструктуры фрагментов новых листов и фрагментов листов из сплавов АМг4,5 и АМц после эксплуатации в штатных условиях проводили методами оптической металлографии. Микроструктура материалов представлена на рис. 1. На основании проведенных исследований установлено, что структура изученных фрагментов практически одинакова и состоит из полигонизованных и рекристаллизованных зерен твердого раствора алюминия. Средний размер зерна алюминия в высотном направлении находится в пределах 20–40 мкм. В микроструктуре наблюдаются частицы интерметаллидных фаз, образовавшихся в процессе кристаллизации слитка, отжига плиты и горячей деформации материала, которые присущи данному сплаву. Подобная структура является характерной для катаных полуфабрикатов (плит) и полученных из них изделий из сплавов марок АМг4,5 и АМц.

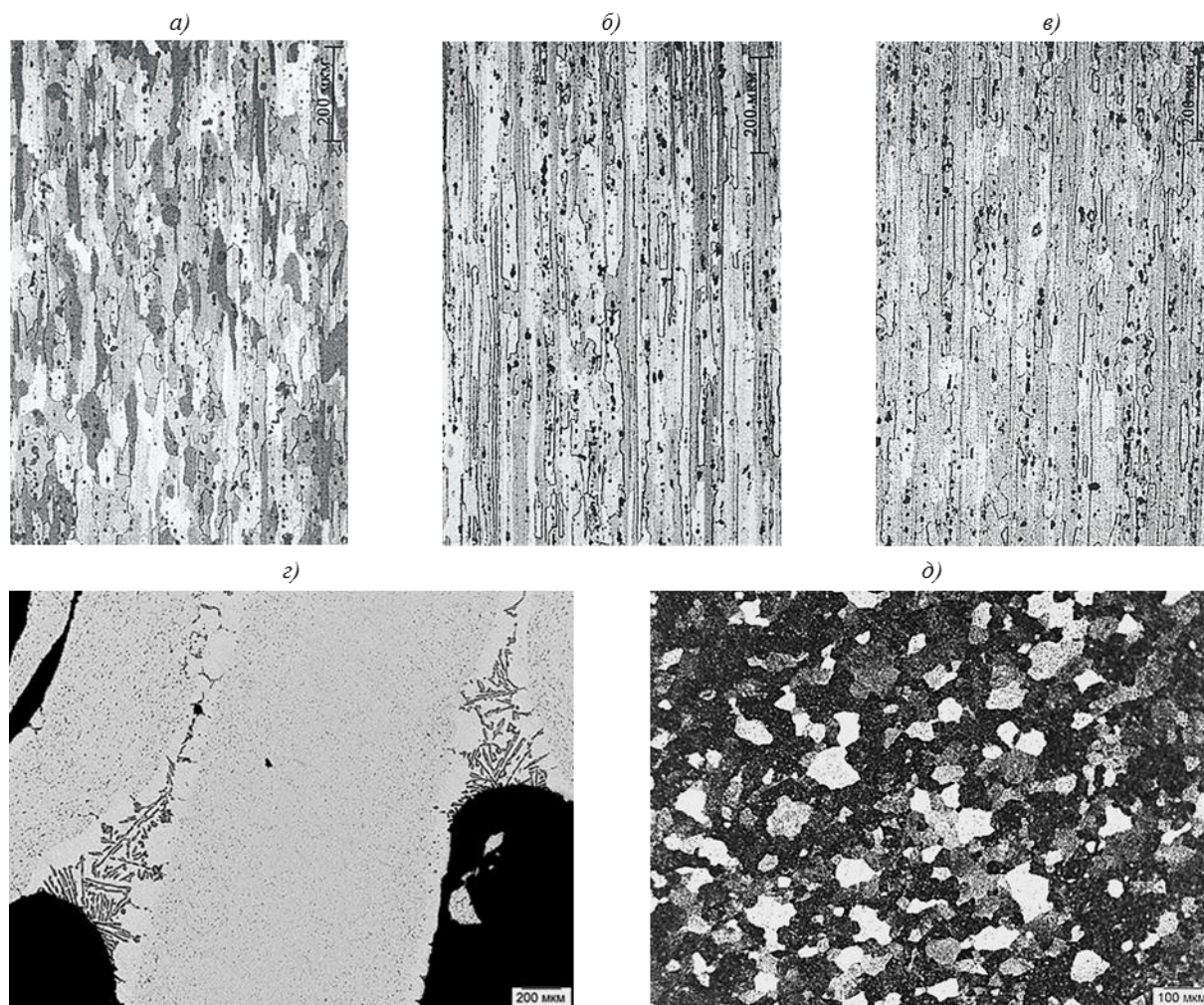


Рис. 1. Микроструктура исследованных фрагментов:

a–в – сплав АМг4,5 до эксплуатации, после эксплуатации в штатных условиях и после эксплуатации при повышенных температурах соответственно; *г, д* – сплав АМц после эксплуатации в штатных условиях

Существенное различие структуры наблюдается в образце из фрагмента, подвергнувшегося воздействию высоких температур вблизи зоны разрушения. Очевидно, воздействие высокотемпературного нагрева в этой зоне привело не только к полной рекристаллизации алюминия и укрупнению зерна, но также к появлению областей пережога, сопровождающегося порами, несплошностями, огрублением частиц

интерметаллидов. Однако на расстоянии 50–70 мм от зоны разрушения структура близка к структуре материала фрагментов, не подвергнутых нагреву.

На рис. 2 представлена микроструктура сплава в зоне сварного соединения, по которому произошло разрушение. В результате металлографического исследования обнаружены вызванный термическим влиянием пережог и оплавление фаз по границам зерен – как на границе сварного шва, так и на удалении от него. Наблюдаемая зеренная структура типична для сварного шва и деформированного полуфабриката.

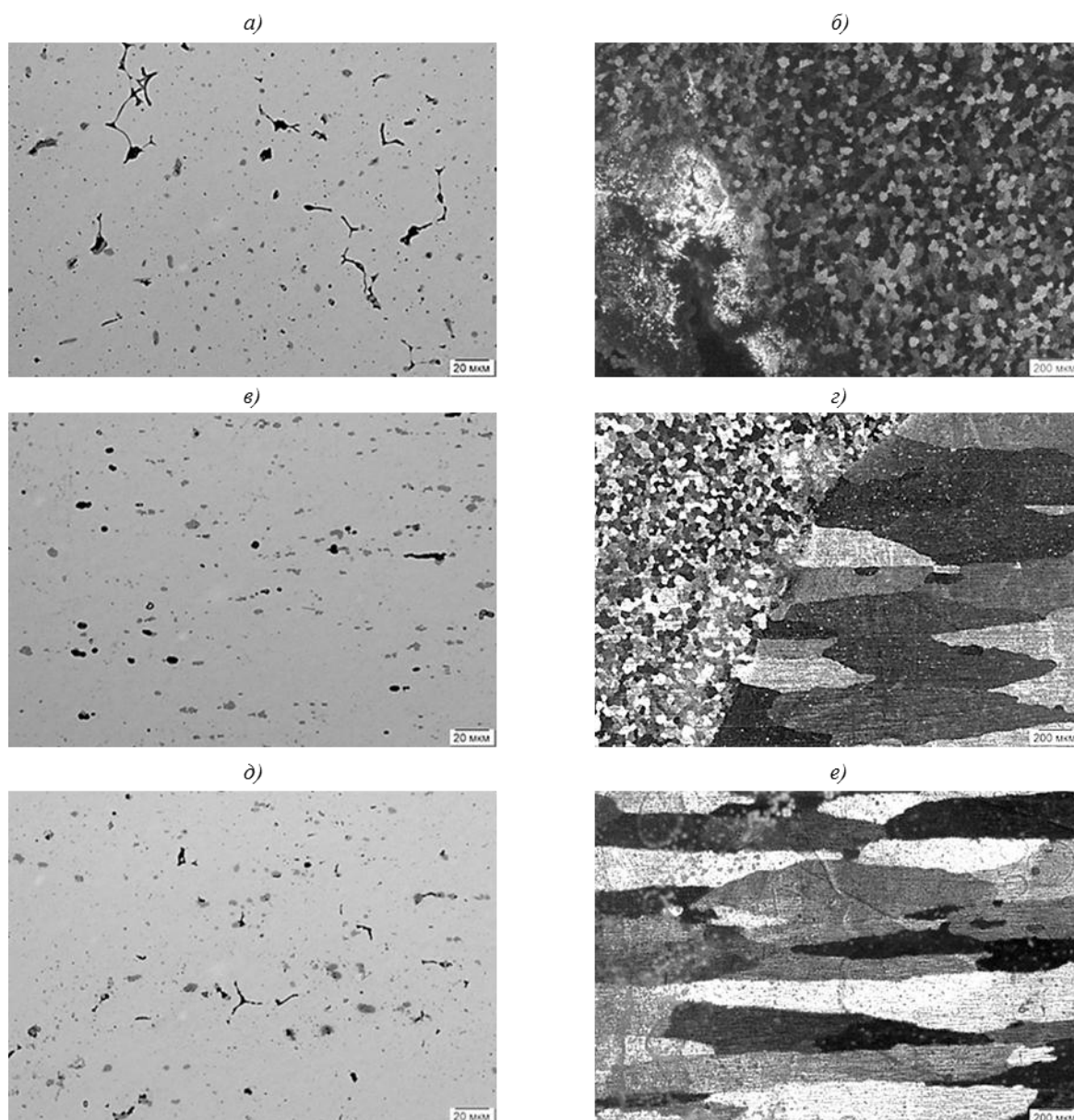


Рис. 2. Микроструктура сварных соединений исследованных фрагментов из сплава АМг4,5: а, б – в зоне разрушения; в, г – на границе сварного шва и основного материала; д, е – на удалении от сварного шва

На основании проведенных исследований можно заключить, что структура материала из алюминиевых сплавов марок АМг4,5 и АМц фрагментов теплообменников после 30 лет эксплуатации не претерпела существенных изменений и близка к структуре исходного материала.

Фрактографическому анализу подвергали изломы образцов, испытанных на растяжение и ударный изгиб, а также искусственно полученные изломы по выявленным при рентгеновском контроле и вскрытым трещинам, расположенным в области, подвергавшейся воздействию высоких температур (рис. 3). Для проведения фрактографического анализа также отобрали фрагменты с изломами, возникшими при аварии, и фрагменты с явно выраженными коррозионными повреждениями поверхности.

Фрактографический анализ показал, что разрушение образцов из новых (контрольных) листов и образцов, вырезанных из эксплуатировавшихся в штатных условиях материалов, проходит внутризеренно, изломы имеют пластичное ямочное строение. Излом образца, вырезанного из листа в зоне термического влияния, характеризуется хрупким межзеренным разрушением, в нем присутствуют области оплавления зерен и отмечено наличие рыхлоты (рис. 3, д, е).

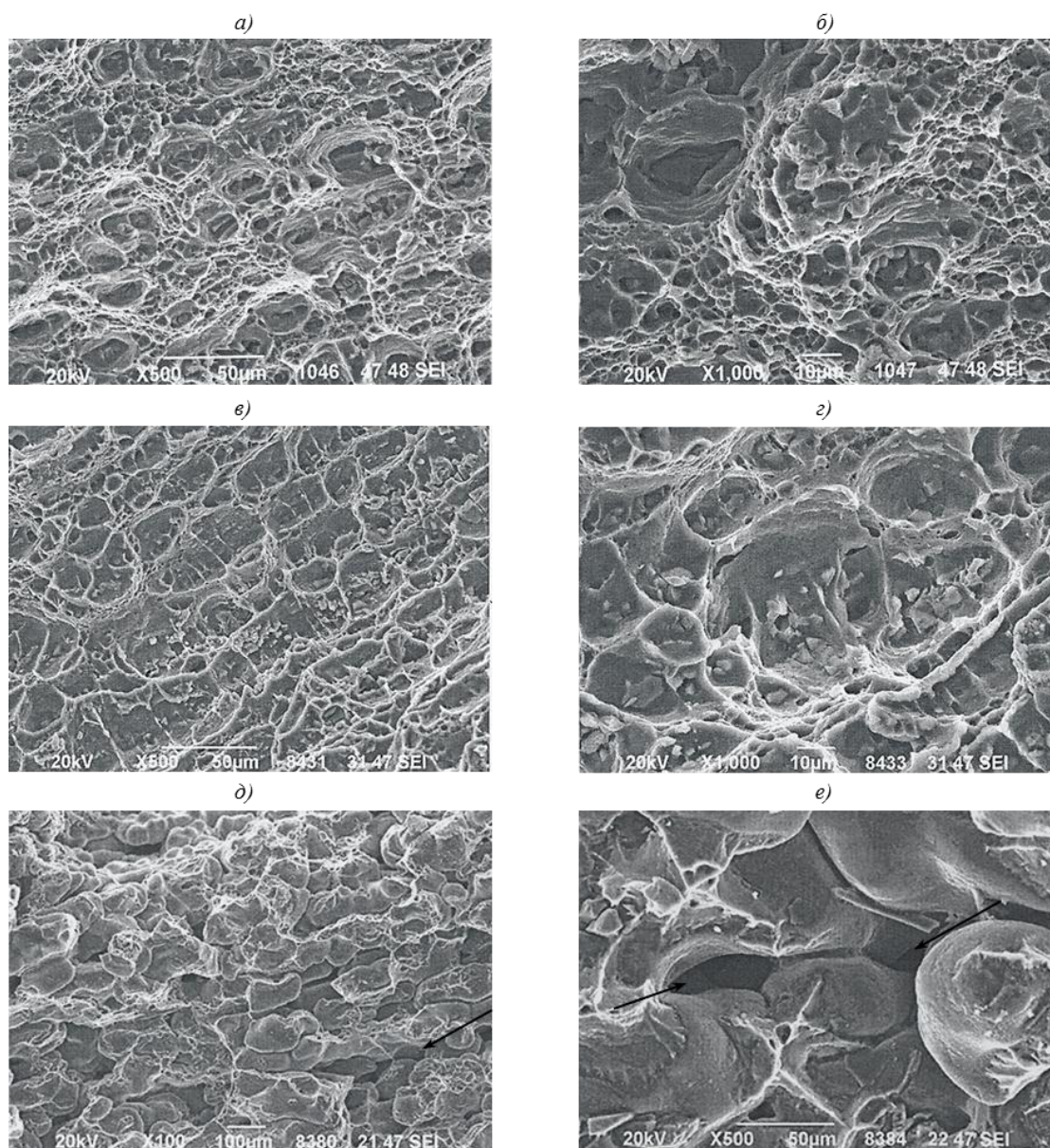


Рис. 3. Строение изломов исследованных фрагментов:

а, б – сплав АМг4,5 до эксплуатации – ямочное разрушение; в, г – сплав АМг4,5 после эксплуатации в штатных условиях – ямочное разрушение; д, е – сплав АМг4,5 после эксплуатации при повышенных температурах – межзеренное разрушение, рыхлоты (показаны стрелками)

Строение разрушенного фрагмента в области сварного шва, в процессе эксплуатации подвергавшегося высокотемпературному нагреву, показано на рис. 4. В изломе также наблюдается вторичное растрескивание, рыхлоты и смешанное вязкохрупкое разрушение по границам зерен.

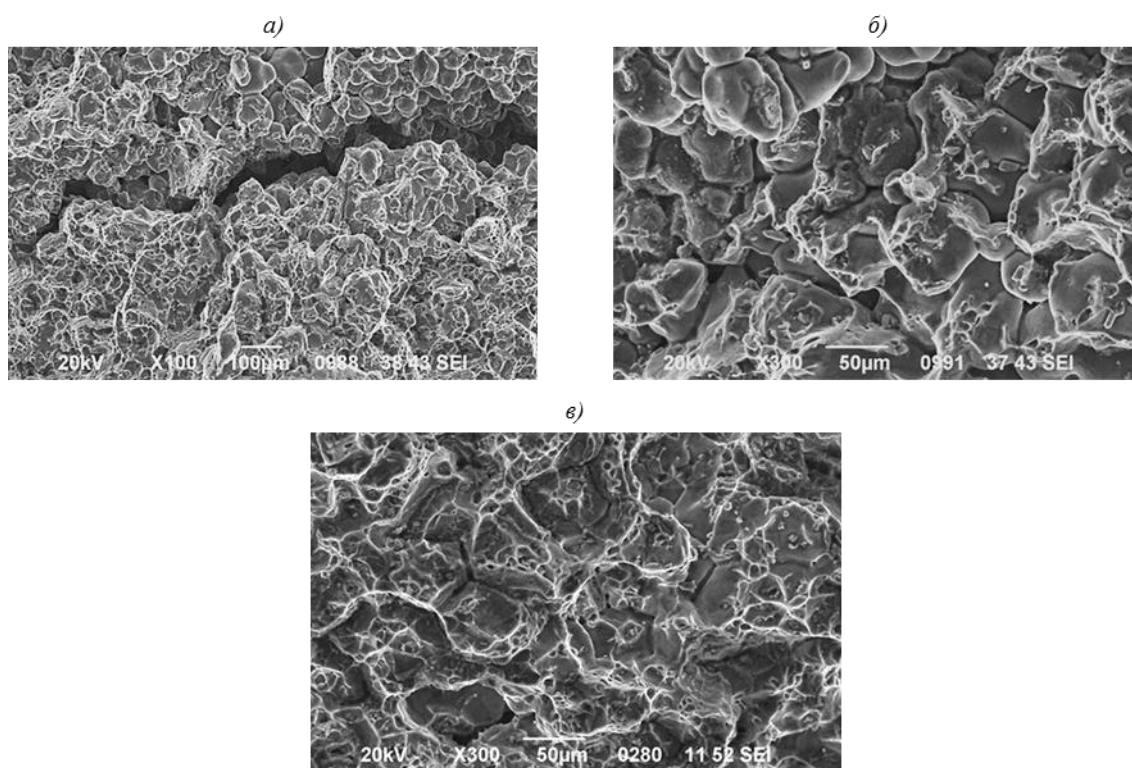


Рис. 4. Строение излома разрушенного фрагмента из сплава АМг4,5 после эксплуатации и воздействия повышенной температуры – вторичное растрескивание (а), рыхлоты (б) и смешанное вязкохрупкое разрушение по границам зерен (в)

Проведено исследование *коррозионной стойкости* бывших в эксплуатации листов из сплава АМг4,5. Склонность к коррозионному растрескиванию определяли при постоянной осевой растягивающей нагрузке, равной $0,9\sigma_{0,2}$, а также проводили испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) и расслаивающую коррозию (РСК).

Установлено, что характер коррозионных повреждений образцов после эксплуатации и эксплуатации с высокотемпературным нагревом одинаков – воздействие коррозионных сред при испытаниях вызывает появление единичных коррозионных очагов приблизительно равного размера. По результатам испытаний можно сделать вывод, что фрагменты листов из сплава марки АМг4,5, подвергавшиеся эксплуатации без температурного воздействия, не склонны к коррозионному растрескиванию, расслаивающей и межкристаллитной коррозии.

Заключения

Химический анализ показал, что, с учетом погрешности измерений, состав проанализированных фрагментов соответствует требованиям ГОСТ для сплавов АМг4,5 и АМц.

Проведение механических испытаний продемонстрировало, что механические свойства исходного материала и материала, эксплуатировавшегося при штатных условиях, не ниже требований ГОСТ для сплавов АМг4,5 и АМц.

Фрактографический анализ показал, что разрушение образцов из исходного материала и материала, эксплуатировавшегося при штатных условиях, проходит внутризеренно, изломы имеют пластичное ямочное строение.

Исследования структуры показали, что структура материала из алюминиевых сплавов АМг4,5 и АМц после многолетней эксплуатации не претерпела существенных изменений.

Исследование коррозионной стойкости показало, что фрагменты листов из сплава АМг4,5, подвергавшиеся многолетней эксплуатации без температурного воздействия, не склонны к коррозионному растрескиванию, расслаивающей и межкристаллитной коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
2. Применение алюминиевых сплавов: справочник / М.Б. Альтман, Г.Н. Андреев, Ю.П. Арбузов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1985. 344 с.
3. Алюминий: свойства и физическое металловедение: справочник / под ред. Дж. Е. Хэтча. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
4. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986. 368 с.
5. Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Ингибиторы коррозии (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75.
6. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность: справочное руководство / под ред. А.М. Сухотина, Ю.И. Арчакова. Л.: Химия, 1990. 400 с.
7. Кравченко Н.Г., Петрова В.А. Определение коррозионной агрессивности авиационных бензинов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №11 (47). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-10-10.
8. Кутырев А.Е., Каримова С.А., Павловская Т.Г., Кузин Я.С. Исследование деградации свойств защитных комбинированных покрытий на алюминиевых сплавах с целью разработки методов прогнозирования их сроков службы // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 69–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-69-78.
9. 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.
10. Курс М.Г. Атмосферная коррозионная стойкость перспективных Al–Li сплавов при проведении натурно-ускоренных испытаний в условиях умеренно теплого климата // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-88-94.
11. Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е. Металловедение сварки алюминия и его сплавов. Киев: Наукова думка, 1992. 160 с.
12. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // Материаловедение. 2017. №1. С. 41–48.
13. Морозова Л.В., Жегина И.П., Григоренко В.Б. Особенности деформационного поведения сплава В-1469 в условиях совместного воздействия приложенной нагрузки и коррозионно-активной среды // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9 (45). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-10-10.
14. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.

-
15. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В., Хохлатова Л.Б., Зайцев Д.В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2016. №3. С. 7–17.
 16. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.