

УДК 669.055:669.715

Л.В. Морозова¹, В.Б. Григоренко¹, И.П. Жегина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ЩИТОВ ГЕНЕРАТОРОВ ИЗ СПЛАВОВ АЛ9 И ВАЛ8

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-9-9

Проведено комплексное исследование причин эксплуатационного разрушения щитов генераторов из алюминиевых сплавов АЛ9 и ВАЛ8. Методами оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и химического анализа оценена микроструктура, изучен химический состав и характер разрушения деталей. Установлено, что разрушение деталей произошло при действии однократной статической нагрузки (гидравлический удар). Разрушению способствовало отсутствие радиуса перехода в месте изменения толщин и повышенный уровень пористости в щите генератора из сплава АЛ9.

Ключевые слова: разрушение, излом, алюминиевый сплав, пористость, фрактография.

Complex research of the reasons of operational destruction of boards of generators from AL9 and VAL8 aluminum alloys is conducted. Methods of optical and electron microscopy, x-ray microanalysis and chemical analysis is evaluated microstructure, chemical composition and nature of destruction of details is studied. It is established that destruction of details has occurred at action of single static load (hydraulic shock). Destruction was promoted by lack of radius of transition in place of change of thickness and the raised level of porosity in generator board from AL9 alloy.

Keywords: destruction, destruction surface, aluminum alloy, porosity, fractography.

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, предназначенные для изготовления литых деталей, обладают низкой плотностью (2500–2800 кг/мм³), высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, что позволяет в ряде случаев применять отливки взамен поковок и штамповок, при этом значительно повышается коэффициент использования металла и снижается стоимость и трудоемкость изготовления деталей [1–3].

В отраслях, где предъявляются особые требования к надежности узлов и деталей, находят применение высококачественные, надежные в эксплуатации детали, отлитые из алюминиевых сплавов. Литейные алюминиевые сплавы широко используются в автомобильной промышленности и других транспортных отраслях машиностроения: судостроении, железнодорожном транспорте, авиации и аэрокосмическом комплексе [4–7].

Основные требования к литейным алюминиевым сплавам – это высокий уровень эксплуатационных характеристик (т. е. механических и коррозионных свойств) в сочетании с хорошей технологичностью при литье, которая для используемых в промышленности технологий означает низкую склонность к образованию горячих (кристаллизационных) трещин, хорошую жидкотекучесть, минимальную усадочную пористость, т. е. хорошие литейные свойства.

В сплавах, кристаллизующихся в интервале температур, всегда имеется переходная область, в которой к концу кристаллизации расплав оказывается в изолированных непитаемых микрообъемах между дендритными ветвями. Из-за меньшего удельного объема твердой фазы по сравнению с жидкой, в таких микрообъемах после затвердевания неизбежно образуются усадочные поры (рыхлоты).

При кристаллизации растущие ветви дендритов оттесняют обогащенную легирующими элементами жидкость в места контакта нескольких ветвей. Там из жидкости, например, эвтектического состава, кристаллизуется эвтектика, включения которой наблюдаются металлографически по границам дендритных ячеек. Там же в результате затвердевания последних изолированных объемов расплава образуются микропоры. Возникновение рассеянной усадочной пористости приводит к снижению герметичности отливки. Герметичность – это способность отливки выдерживать давление жидкости или газа без течи. Эту характеристику тоже часто относят к литейным свойствам. Герметичность зависит от суммарного объема пор, их размера, распределения и от того, изолированы они или связаны междендритными каналами [8, 9].

Междендритная или внутريدендритная рассеянная пористость всегда присутствует в отливках. Относительная объемная доля этих пор максимальна в сплавах с широким интервалом жидко-твердого состояния. Количество рассеянных пор в отливках из алюминиевых сплавов также зависит от газовой выделенности (в основном водорода) при кристаллизации. Кроме того, газ может образовывать собственные поры, случайно распределенные по сечению отливки [10, 11].

Сплав АЛ9 относится к группе герметичных сплавов с хорошими литейными свойствами, предназначенных для изготовления деталей всеми видами литья. Сплав ВАЛ8 относится к высокопрочным литейным сплавам. Механические свойства сплавов зависят не только от их химического состава, но и от плотности литья. С увеличением пористости прочность отливок снижается, они значительно хуже сопротивляются нагрузкам и воздействию коррозионно-активной среды.

Исследование случаев эксплуатационных разрушений позволяет не только установить причину их возникновения, но и разработать комплекс рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов и предотвращению возникновения аварийных ситуаций [12–14].

В данной работе приведены результаты исследования причин и характера разрушения щитов генераторов, изготовленных из литейных алюминиевых сплавов АЛ9 и ВАЛ8.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Материалом для щитов электрогенераторов являются литейные алюминиевые сплавы АЛ9 и ВАЛ8, относящиеся к группе силуминов. Согласно требованиям нормативной документации, при производстве проводили процесс отливки в песчаную форму. Сплав ВАЛ8 термообработан по режиму Т5, сплав АЛ9 – по режиму Т7 (ОСТ1 90088–80).

Состояние Т5 подразумевает охлаждение с температуры горячей деформации и последующее искусственное старение; состояние Т7 – закалку и перестаривание с целью получения свойств больше максимального значения прочности на кривой старения

при некоторых специально контролируемых характеристиках – для достижения стабильности размеров, более низкого уровня остаточных напряжений или повышения коррозионной стойкости.

Требования к химическому составу сплавов приведены в таблице.

Химический состав сплавов АЛ9 и ВАЛ8 по ГОСТ 1583–93

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Sn	Ti	Cu	Zn	Cd
АЛ9	Основа	6,0–8,0	≤0,5	≤0,5	0,20–0,40	≤0,01	–	≤0,2	≤0,3	–
ВАЛ8	Основа	7,0–8,5	≤0,4	–	0,20–0,45	–	0,10–0,25	2,50–3,50	0,50–1,00	≤0,15

Исследование причин и характера разрушения щитов генераторов, изготовленных из литейных алюминиевых сплавов АЛ9 и ВАЛ8, включало проведение следующих работ:

- визуальный осмотр, фотосъемка фрагментов щитов генераторов;
- проведение химического анализа на соответствие марке сплавов;
- проведение рентгенографического анализа для оценки пористости материала;
- проведение фрактографического анализа;
- проведение рентгеноспектрального микроанализа;
- измерение твердости.
- исследование микроструктуры.

Анализ химического состава алюминиевых образцов проводили спектральным оптико-эмиссионным методом на спектрометре Q8Magellan фирмы Bruker Quantron в соответствии с требованиями ГОСТ 7727–81 «Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа».

Рентгенографические исследования проводили на рентгеновском аппарате РУМ-7 при анодном напряжении 24 (для сплава АЛ9) и 30 кВ (для сплава ВАЛ8), анодном токе 10 мА и экспозиции в течение 2 мин.

Исследование изломов образцов из сплавов АЛ9 и ВАЛ8 проводили с применением электронного микроскопа JSM-6490LV.

Исследование микроструктуры образцов из сплавов АЛ9 и ВАЛ8 проводили с применением оптического микроскопа Olympus.

Измерение твердости образцов из сплавов АЛ9 и ВАЛ8 проводили на приборе ТК-2М по методу Роквелла.

Результаты

Визуальный осмотр фрагментов

На рис. 1, а приведены фотографии полученных для исследования фрагментов из сплава ВАЛ8. Разрушение прошло с отделением проушин с отверстиями для крепления щитов, в месте перепада толщин в стенке. В щите из сплава АЛ9 разрушение прошло аналогичным образом (рис. 1, б). Анализ поверхности в местах разрушения щитов показал, что в местах перепада толщин стенок с наружной стороны практически отсутствует радиус перехода. На рис. 1, в, г стрелками показаны эти места в сечении стенок вблизи места разрушения. Во всех случаях разрушение прошло от наружной стороны в местах отсутствия радиуса перехода.

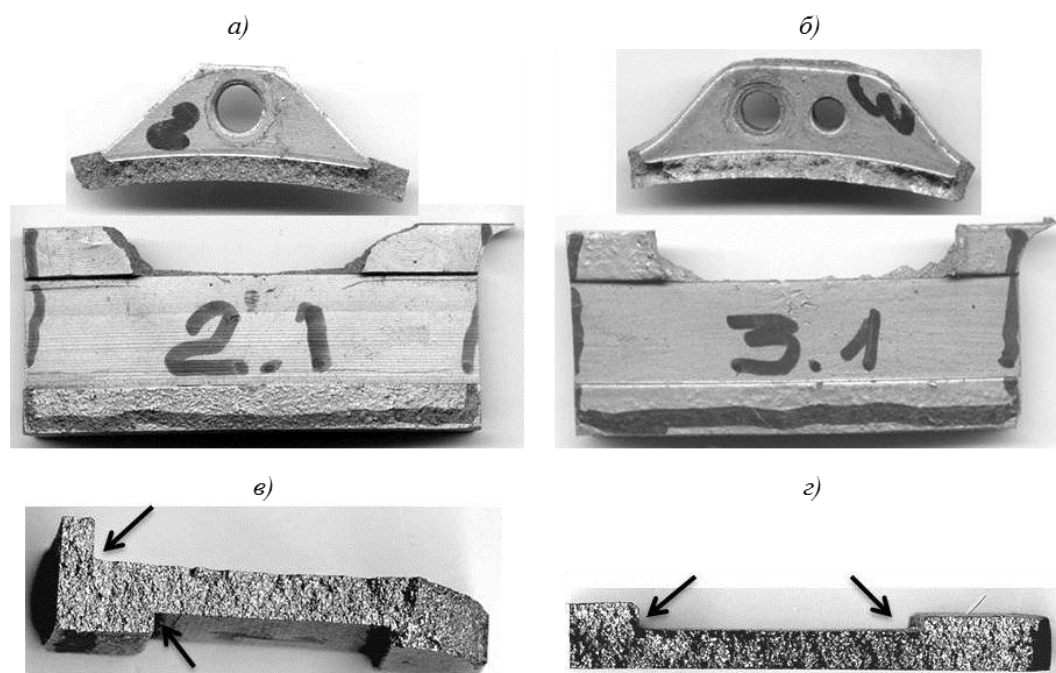


Рис. 1. Фрагменты щита из сплава ВАЛ8 (а) и АЛ9 (б). Стрелками показано отсутствие радиусов перехода (в, г)

Следует отметить, что радиус перехода (или радиус скругления) используется для сопряжения поверхностей под прямым углом, так как прямой угол является концентратором напряжений и провоцирует образование трещин. Наличие радиуса перехода способствует снижению концентрации напряжений и уменьшает вероятность появления трещин вблизи места перепада толщин.

Анализ химического состава

Для анализа использовали монолитные образцы из литейных алюминиевых сплавов ВАЛ8 и АЛ9. Работы проводили согласно ГОСТ 7727–81 «Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа». Для построения градуировочных графиков использовали комплекты Отраслевых стандартных образцов (ОСО) сплавов ВАЛ8 и АЛ9. При определении легирующих элементов и макропримесей рассчитано относительное значение погрешностей определения массовой доли элементов. Для кремния, меди и цинка оно составляет 2,5%, для остальных элементов 10%.

По результатам проведенного химического анализа получено, что состав фрагментов соответствует требованиям нормативной документации к химическому составу литейных алюминиевых сплавов ВАЛ8 и АЛ9.

Фрактографический и рентгеноспектральный микроанализ

Макростроение фрагмента излома из сплава ВАЛ8 показано на рис. 2, а. Разрушение развивалось с наружной поверхности от места перепада толщин без радиусов перехода. Излом типичен для статического (однократного) разрушения сплава. На поверхности излома наблюдаются крупные включения различной формы (рис. 2, б), литейные дефекты в виде рыхлоты и усадочной пористости (рис. 2, в).

Макростроение фрагмента излома сплава АЛ9 показано на рис. 3, а. Разрушение также развивалось с наружной поверхности от места перепада толщин без радиусов перехода. Излом характерен для статического (однократного) разрушения сплава. В целом, по результатам сравнительного анализа, излом сплава АЛ9 более пластичный, чем излом сплава ВАЛ8. В изломе сплава АЛ9 крупные включения встречаются в меньшем количестве, рельеф преимущественно мелкоячеистый (рис. 3, б). Однако в сравнении с

изломом сплава ВАЛ8, в изломе сплава АЛ9 наблюдается значительно большее количество пор и литейной рыхлоты (рис. 3, в), что снижает механические характеристики как самого сплава, так и изготовленных из него деталей.

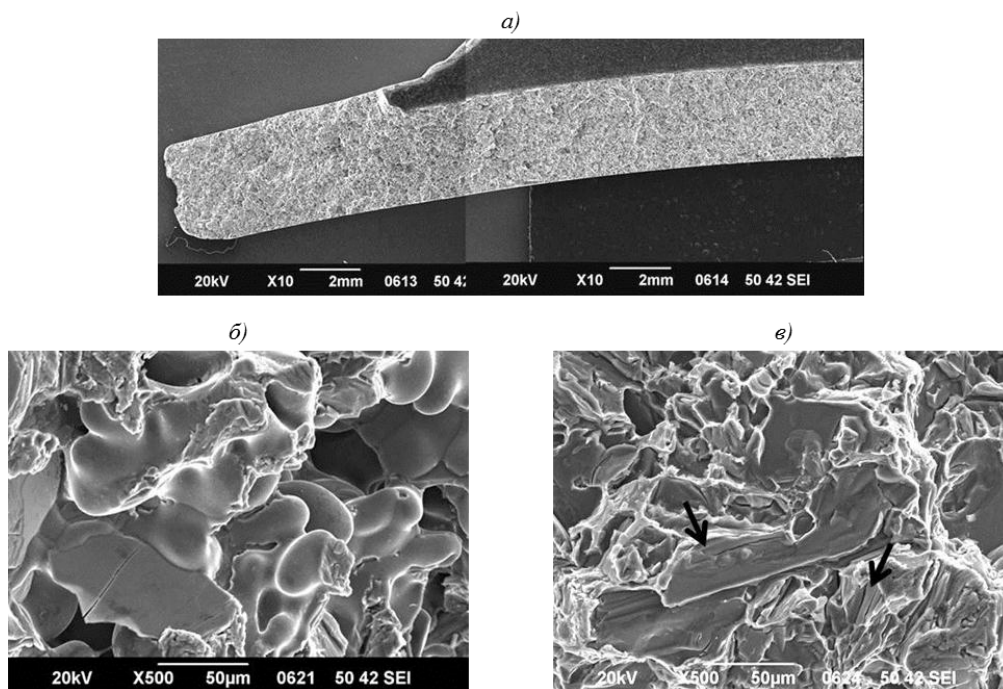


Рис. 2. Строение фрагмента излома из сплава ВАЛ8:

a – общий вид излома; *б* – крупные включения в изломе (показаны стрелками); *в* – участок с литейной рыхлотой в изломе

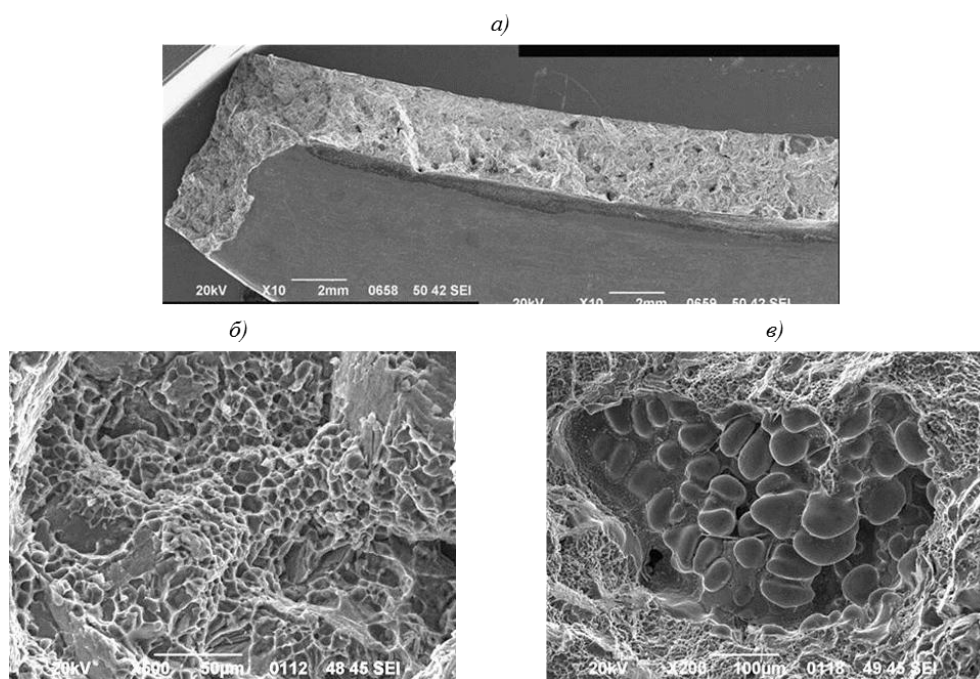


Рис. 3. Строение фрагмента излома из сплава АЛ9:

a – общий вид излома; *б* – внутризеренное разрушение, мелкоямочный рельеф; *в* – участок с литейной рыхлотой в изломе

Строение изломов обоих сплавов соответствует разрушению при действии однократной нагрузки – гидравлического удара, возникшего внутри генератора.

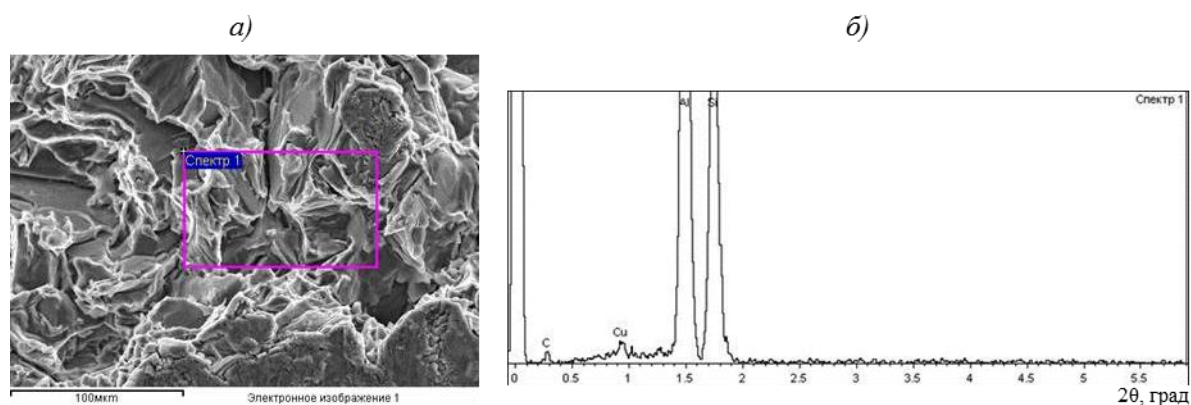


Рис. 4. Результаты рентгеноспектрального микроанализа:

a – участок излома с хрупкой частицей и выделенной областью для анализа; *б* – спектрограмма частицы

Методом рентгеноспектрального микроанализа установлено, что хрупкие частицы в изломах обоих сплавов представляют собой фазу на основе кремния (рис. 4).

Рентгенографические исследования

Расшифровку рентгенограмм и определение балла пористости в образцах из литейных алюминиевых сплавов ВАЛ8 и АЛ9 проводили по «Шкале рентгеновских эталонов пористости отливок из сплавов типа «силумин». В результате расшифровки установлено, что фрагмент щита генератора из сплава АЛ9 имеет пористость, интенсивность которой лежит в пределах 4–5 балла, что превышает допустимый 2–3 балл пористости согласно «Шкале рентгеновских эталонов пористости отливок из сплавов типа «силумин».

Фрагмент щита генератора из сплава ВАЛ8 имеет допустимую пористость, интенсивность которой лежит в пределах 2–3 балла.

Оценка твердости и микроструктуры

В результате замера твердости вдавливанием стального шарика с нагрузкой 100 кг установлено, что среднее значение твердости для сплава ВАЛ8 составляет 129 НВ, а для сплава АЛ9: 76 НВ. Сплав марки ВАЛ8 (АК8МЗч.) в состоянии Т5 (неполная закалка на прессе) по ГОСТ 1583–93 должен иметь $HV \geq 90$.

Сплав марки АЛ9 (АК7ч.) в состоянии Т7 по ГОСТ 1583–93 должен иметь $HV \geq 60$, т. е. значения твердости соответствуют требованиям данного ГОСТ.

На механически шлифованных нетравленых образцах визуально определяют наличие грубых дефектов типа крупных пор, раковин, трещин и отдельных скоплений интерметаллидов, кристаллов кремния и др., различающихся по цвету и форме. Последующее травление позволяет определить особенности кристаллического макростроения, характер и расположение дефектов.

Исследование микроструктуры проводили после травления в 0,5%-ном водном растворе плавиковой кислоты на шлифах (один из краев шлифа выходил на трещину) из сплавов ВАЛ8 и АЛ9.

В специальных силуминах (таких как сплав АЛ9) при введении в них магния образуется интерметаллид Mg_2Si , который является упрочняющей фазой. В литом состоянии крупные выделения Mg_2Si располагаются по границам зерен, придавая сплаву хрупкость. В сплавы типа ВАЛ8 дополнительно с магнием вводится медь в количестве от 1 до 7% (по массе). При этом в сплаве формируются новые упрочняющие фазы – в частности интерметаллид $CuAl_2$. Для измельчения структуры и увеличения пластических свойств, отливки из специальных силуминов подвергают закалке и искусственному строению [9].

Структура сплава ВАЛ8-Т5 (рис. 5, а) по всему полю шлифа (в том числе рядом с трещиной) соответствует микроструктуре сплава ВАЛ8 при литье в песчаную форму в состоянии Т5 по РТМ 1.2.148–91 «Алюминиевые литейные сплавы, отлитые в песчаные формы. Определение микроструктуры». При увеличении $\times 500$ (рис. 5, б) наблюдаются частицы фазы CuAl_2 , недорастворившиеся при нагреве под закалку, и небольшая пористость.

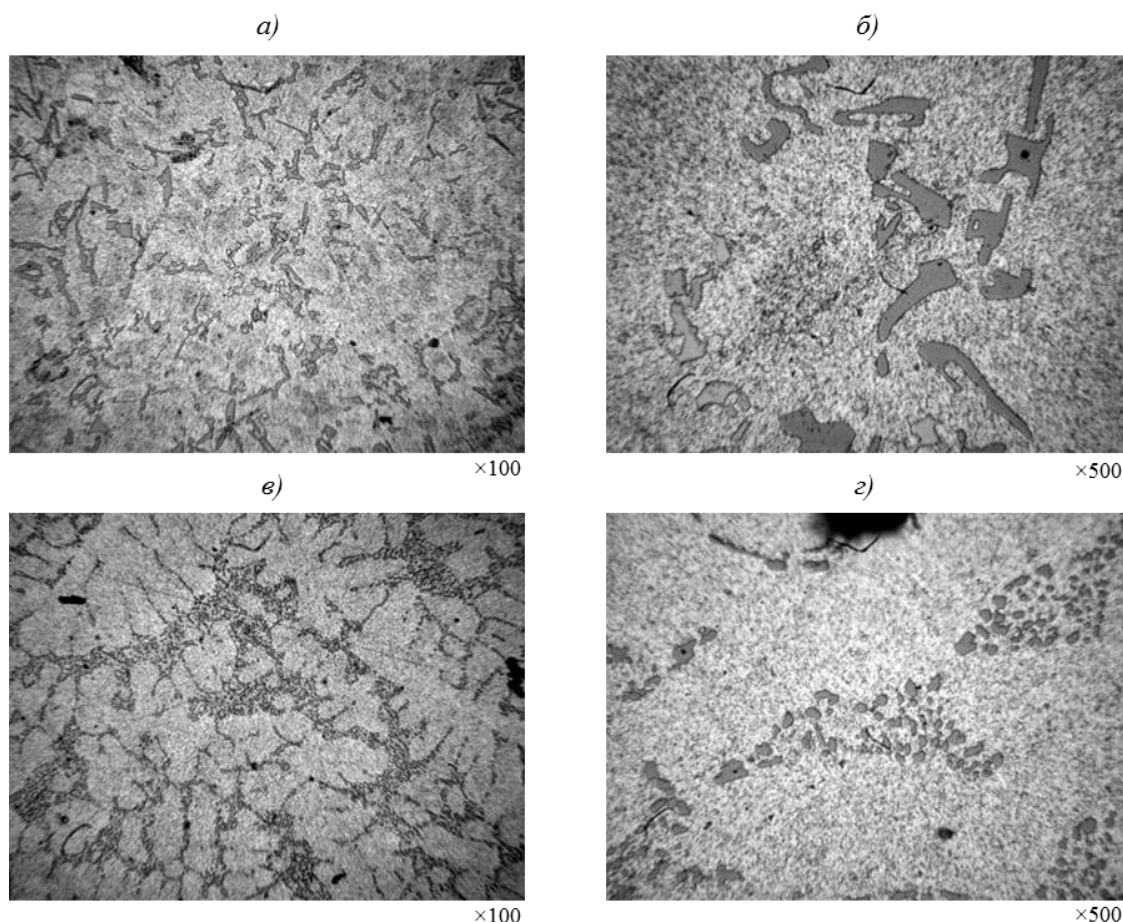


Рис. 5. Структуры сплавов ВАЛ8-Т5 (а, б) и АЛ9-Т7 (в, г)

Структура сплава АЛ9-Т7 (рис. 5, в) по всему полю шлифа (в том числе рядом с трещиной) соответствует микроструктуре сплава АЛ9 при литье в песчаную форму в термообработанном состоянии Т7. Следует отметить большое количество пор, в том числе и крупных, по всему полю шлифа.

При увеличении $\times 500$ (рис. 5, г) зерна α -твердого раствора окружены довольно крупными частицами кремния, так как при старении по режиму Т7 начинается коагуляция частиц кремния.

Обсуждение и заключения

На основании проведенного исследования можно отметить, что по химическому составу сплавы соответствуют маркам ВАЛ8 (АК8МЗч.) и АЛ9 (АК7ч.).

По уровню значений твердости (129 НВ – для сплава ВАЛ8, 76 НВ – для сплава АЛ9) сплавы соответствуют требованиям ГОСТ 1583–93.

Детали из сплава ВАЛ8 имеют микроструктуру, соответствующую микроструктуре сплава при литье в песчаную форму в состоянии Т5 по РТМ 1.2.148–91 «Алюминиевые литейные сплавы, отлитые в песчаные формы. Определение микроструктуры».

Детали из сплава АЛ9 имеют микроструктуру, соответствующую микроструктуре сплава при литье в песчаную форму в состоянии Т7.

Методами микроструктурного, фрактографического и рентгеноструктурного анализов в деталях из сплава АЛ9 обнаружена пористость, соответствующая 4–5 баллу по «Шкале рентгеновских эталонов пористости отливок из сплавов типа «силумин», что превышает допустимый 2–3 балл пористости. В образцах из сплава ВАЛ8 пористость находится на допустимом уровне – в пределах 2–3 балла.

Строение изломов обоих сплавов свидетельствует о том, что разрушение деталей произошло при действии однократной статической нагрузки (гидравлический удар, возникший внутри генератора) и развивалось с наружной стороны щита. Разрушению при повышении нагрузки способствовало отсутствие радиуса перехода в месте изменения толщин. Кроме того, повышенный уровень пористости в сплаве АЛ9 привел к уменьшению площади рабочего сечения детали.

Для повышения надежности литых деталей в процессе эксплуатации рекомендовано предусмотреть наличие радиуса перехода в месте изменения толщин, которое способствует снижению концентрации напряжений и уменьшает вероятность появления трещин вблизи места перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н., Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Магние-вые и литейные алюминиевые сплавы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 180–188.
2. Промышленные алюминиевые сплавы / по ред. С.Г. Алиева, М.Б. Альтмана, С.М. Амбар-цумяна и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
3. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение: справочник. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
4. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 157–167.
5. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
6. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Все мате-риалы. Энциклопедический справочник. 2007. №1. С. 2–10.
7. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
8. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 212–222.
9. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.
10. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с англ. М.: Металлур-гия, 1979. 640 с.
11. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов: справочное руководство. М.: Металлургия, 1971. 352 с.
12. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитиче-ской микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.06.2016).
13. Бронфин М.Б., Алексеев А.А., Чабина Е.Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 353–365.
14. Турченков В.А., Баранов Д.Е., Гагарин М.В., Шишкин М.Д. Методический подход к прове-дению экспертизы материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 47–53.
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратеги-ческих направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 го-да» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.