

УДК 669.017:669.715

Л.В. Морозова¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА ИЗ СПЛАВА АК4-1**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-71-76

Проведено комплексное исследование нескольких случаев эксплуатационных разрушений деталей воздухозаборника из сплава АК4-1. Методами оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и химического анализа оценена микроструктура, изучены химический состав и характер разрушения деталей. Установлено, что разрушение деталей произошло при действии циклической нагрузки. В большинстве случаев разрушению деталей способствовало наличие микроповреждений (рисок), возникших в процессе механической обработки поверхности.

Ключевые слова: разрушение, излом, алюминиевый сплав, усталость, фраттография.

L.V. Morozova¹**RESEARCH OF CAUSES AND FRACTURE PATTERN
OF AIR INTAKE PARTS FROM AK4-1 ALLOY**

Complex research of several cases of operational destructions of air intake parts from AK4-1 alloy is conducted. Microstructure, chemical composition and destruction mechanism of the air intake parts are studied with the methods of optical and electron microscopy, X-ray diffraction and chemical analysis. It is established that air intake parts destruction has occurred because of cyclic load. In most cases air intake parts destruction was promoted by microdamages availability which arisen during surface machining.

Keywords: destruction, fracture, aluminum alloy, fatigue, 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

На современном этапе развития дозвуковой и сверхзвуковой авиации жаропрочные деформируемые алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом, применяемым в авиационном строительстве для изготовления планера сверхзвуковых летательных аппаратов, подвергаемых аэродинамическому нагреву в области температур до 175°C, а также деталей двигателей, кратковременно работающих при более высокой температуре. Данный класс сплавов нашел широкое применение благодаря своей легкости и удачному комплексу необходимых эксплуатационных характеристик (прочности при растяжении и сжатии, длительной прочности, трещиностойкости, коррозионной стойкости). Современная авиационная техника предусматривает длительную эксплуатацию (3000–6000 летных часов), ее изделия находятся под воздействием циклических нагрузок, температуры и атмосферной среды [1–3].

Сплав АК4-1 предназначен для изготовления силовых деталей сверхзвуковых самолетов (обшивка, силовой набор фюзеляжа и крыла, оперение), деталей реактивных двигателей (крыльчатки, воздухозаборники, диски, лопатки ком-

прессора спрямляющего аппарата и рабочие лопатки). Сплав обладает низкой плотностью, в неплакированном виде имеет пониженную коррозионную стойкость, поэтому применяется после нанесения анодно-оксидных, химических и лакокрасочных покрытий, в сочетании с которыми коррозионная стойкость значительно возрастает [4–6].

Чувствительность к концентрации напряжений – одна из важных характеристик прочности. Сплав АК4-1 проявляет определенную чувствительность к концентраторам напряжений, т. е. склонность материала к разрушению увеличивается в присутствии концентратора напряжений типа надреза, резкого изменения поперечного сечения без радиуса перехода, трещины или царапины. Такие концентраторы вызывают эффект концентрации напряжений I рода. Однако в сложных многофазных сплавах в качестве концентраторов напряжений могут выступать дефекты микроструктуры – например, микропоры, внедренные включения либо частицы (выделения) вторых фаз, которые вызывают концентрацию напряжений II и III рода. Поэтому концентрацию напряжений следует определить как явление локального повышения

напряжений, обусловленное резким изменением поперечного сечения образца (детали), наличием макродефектов поверхности либо структуры и различием физико-механических свойств фазовых составляющих [7].

Одной из причин, влияющей на износ деталей, является качество механической обработки поверхности. В зависимости от условий работы деталей (нагрузки, скорости, температуры и т. п.) к качеству и чистоте поверхности детали предъявляются определенные требования. Износостойкость и усталостная прочность деталей напрямую зависят от микрогеометрии и чистоты ее поверхности и в значительной степени характеризуются физическим состоянием поверхностных слоев. При любой механической обработке на поверхности деталей всегда имеются некоторые неровности – шероховатость, которая по своим размерам и происхождению бывает трех видов: макронеровность, волнистость и микро-неровность. Чем более ответственной является деталь, тем меньшая шероховатость допустима на ее поверхности. По ГОСТ 2789–59 предусматривается 14 классов чистоты поверхности, соответствующих определенным значениям шероховатости. Чем ниже численное значение шероховатости (R_a или R_z), тем выше класс чистоты поверхности. Повышенного качества или чистоты поверхности при механической обработке деталей достигают применением наиболее совершенных способов ее обработки, к которым относятся тонкое растачивание, обтачивание твердосплавными резцами, тонкое шлифование и полирование [8–11].

Эффективная система диагностики причин разрушения позволяет решить задачи повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций и деталей машин. Зачастую затраты на восстановление работоспособности машин или агрегатов сопоставимы с их стоимостью, а плановая диагностика повреждаемости материала конструкций позволяет предотвратить возникновение нештатной ситуации и сэкономить значительные средства. 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 комплексного исследования причин и характера разрушения деталей воздухозаборника из сплава АК4-1 – электрообогревного носка и лопастей.

В полете после наработки 520 ч произошло разрушение носка воздухозаборника с отделением фрагмента детали. Электрообогревный носок воздухозаборника состоит из обшивки, с внутренней стороны которой на герметике установлены нагревательные элементы. Обшивка имеет пере-

менную толщину: в зоне радиуса $R=2,5$ м толщина 0,6 мм, в зоне балки крепления 4 мм. С внешней стороны обшивка полируется. Внутренняя сторона обшивки имеет фрезерованную анодированную поверхность. Нагревательные элементы устанавливаются таким образом, чтобы после формования носка посредством изгиба расстояние между ними и кромкой носка составляло ~2 мм. При изгибе материал в области кромки носка претерпевает значительную деформацию. Гибка материала проводится в естественно состаренном состоянии. Рабочая температура носка составляет 150°C.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» [15].

Материалы и методы

Материалом для деталей воздухозаборника является жаропрочный деформируемый алюминиевый сплав АК4-1 в закаленном и состаренном состоянии. При закалке твердый раствор фиксируется в пересыщенном состоянии, а в процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, что сопровождается упрочнением сплава.

Исследование причин и характера разрушения деталей воздухозаборника включало проведение следующих работ:

- визуальный осмотр, фотосъемка фрагментов деталей воздухозаборника;
- проведение химического анализа на соответствие марке сплава;
- проведение механических испытаний;
- проведение фрактографического анализа;
- измерение твердости;
- исследование микроструктуры.

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

Механические испытания образцов проводили на сервогидравлической машине Walter+Bai LFV-100 согласно требованиям ГОСТ 6996–66.

Исследование поверхности и изломов деталей воздухозаборника выполнили методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе.

Измерения твердости проводили на твердомере согласно ГОСТ 9012–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю».

Подготовку металлографических шлифов осуществляли на оборудовании фирмы Struers.

Металлографические исследования проведены с применением оптического комплекса Leica.

Результаты

При осмотре фрагмента воздухозаборника, отделившегося в полете, установлено, что разрушение произошло преимущественно по месту границы прикрепленного нагревательного элемента вблизи кромки носка и лишь на небольшом участке разрушение прошло по кромке носка. Отделение фрагмента произошло по ряду заклепок. На поверхности присутствуют трещины как в долевом, так и в поперечном направлении.

Во фрагменте, вырезанном из оставшейся части носка воздухозаборника, присутствуют долевые трещины по кромке носка и поперечные, расположенные перпендикулярно основной трещине.

При осмотре лопастей с условными номерами 5 и 6 установлено, что очаги разрушения располагаются со стороны спинки вблизи входной кромки в зоне перехода к внутреннему диаметру воздухозаборника.

Для проведения химического анализа использовали монолитные образцы из сплава АК4-1 с предварительно отшлифованной поверхностью.

По результатам проведения химического анализа получено, что состав образцов соответствует требованиям нормативной документации (ОСТ 90073–85) к химическому составу сплава АК4-1 (табл. 1).

Из отделившегося в процессе эксплуатации фрагмента для проведения микрофрактографического исследования отобраны следующие образцы:

- 1 – с трещинами на границе соединения с нагревательными элементами;
- 2 – с трещинами по кромке носка;
- 3 – с поперечными трещинами;
- 4 – с изломом по ряду заклепок.

Исследованы также два излома лопастей воздухозаборника с условными номерами 5 и 6.

По результатам фрактографического анализа установлено, что в носке воздухозаборника трещины на границе соединения с нагревательными элементами связаны с протяженными рисками от механической обработки на внутренней, анодированной поверхности. Глубина рисков достигает 60 мкм. На рис. 1 представлены фрагменты деталей воздухозаборника с рисками на внутренней поверхности, от которых развилось многоочаговое усталостное разрушение.

Фрагмент 1. Усталостные трещины развились на всю глубину сечения детали. На рис. 2 пред-

ставлен вид усталостного рельефа в очаге и вблизи наружной поверхности. Усталостные бороздки в начальной зоне практически не выявляются, что типично при высокочастотном нагружении (рис. 2, б). Трещина распространяется на глубину до 60 мкм.

Фрагмент 2. Трещины по кромке носка также имеют многоочаговый усталостный характер. В этом фрагменте разрушение развивается от микровмятин поверхности, по-видимому, образовавшихся при оксидировании. Трещина развивается на глубину до 60 мкм. В изломе хорошо выявляются усталостные бороздки, что свидетельствует о действии более высоких напряжений, чем во фрагменте 1 (рис. 3). Остальная часть сечения излома представляет собой однократный долом, имеющий вязкое ямочное строение, типичное для данного сплава.

Фрагмент 3. Поперечные трещины вблизи закругления носка имеют небольшие зоны с усталостным рельефом (рис. 4, а). Основная часть излома представляет собой область однократного разрушения и имеет вязкое ямочное строение (рис. 4, б).

Фрагмент 4. Излом по ряду заклепок имеет вязкое ямочное строение, характерное для однократного разрушения сплава АК4-1.

Следует отметить, что трещины по кромке носка, поперечные трещины и трещины по заклепкам имеют аналогичное строение излома. Отличие лишь в том, что трещины по кромке носка более развиты вглубь сечения.

Разрушение лопастей воздухозаборника (изломы 5 и 6) также имеет усталостный характер. На поверхности в очаговой зоне наблюдаются глубокие риски – следы грубой механической зачистки. Очаги разрушения в обоих случаях также связаны с рисками от механической обработки. На поверхности излома в непосредственной близости к очагам разрушения наряду с усталостными плато наблюдаются ямки, что свидетельствует о действии высоких нагрузок в ходе развития трещины (рис. 5).

Для проведения механических испытаний из фрагмента, отделившегося в полете, изготовлены образцы для испытаний при растяжении.

По результатам проведенных испытаний при растяжении при комнатной температуре установлено, что механические свойства удовлетворяют требованиям нормативной документации

Таблица 1

Химический состав сплава АК4-1 по результатам измерений*

Место проведения анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Zn	Cr	Ni
Фрагмент электрообогревного носка	2,26	1,57	0,23	1,05	0,063	0,10	0,10	0,03	1,16
Лопасть воздухозаборника	2,10	1,75	0,20	1,10	0,050	0,04	0,07	0,02	0,94
ОСТ 90073–85	1,9–2,5	1,4–1,8	≤0,35	0,8–1,3	≤0,2	0,02–0,1	≤0,3	≤0,1	0,8–1,3

* Al – основа.

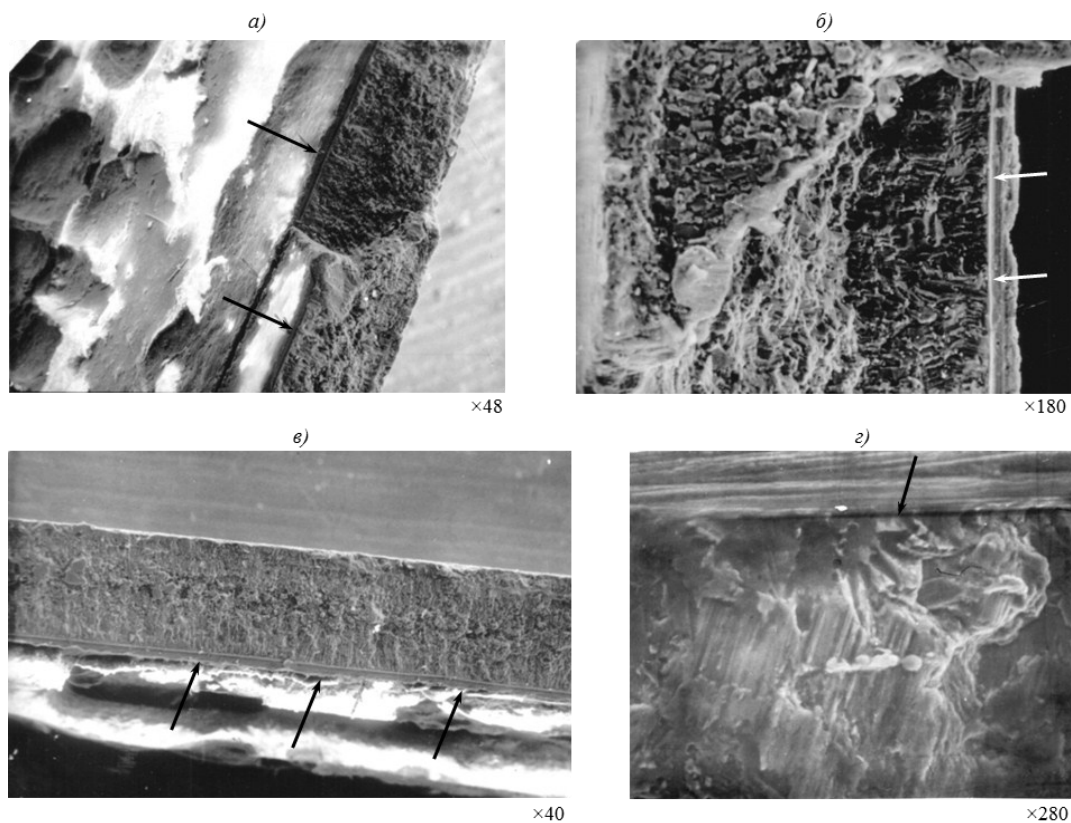


Рис. 1. Риски, показанные стрелками, на поверхности деталей в очаговой зоне:
а, б, в – фрагменты носка воздухозаборника; з – лопасть воздухозаборника

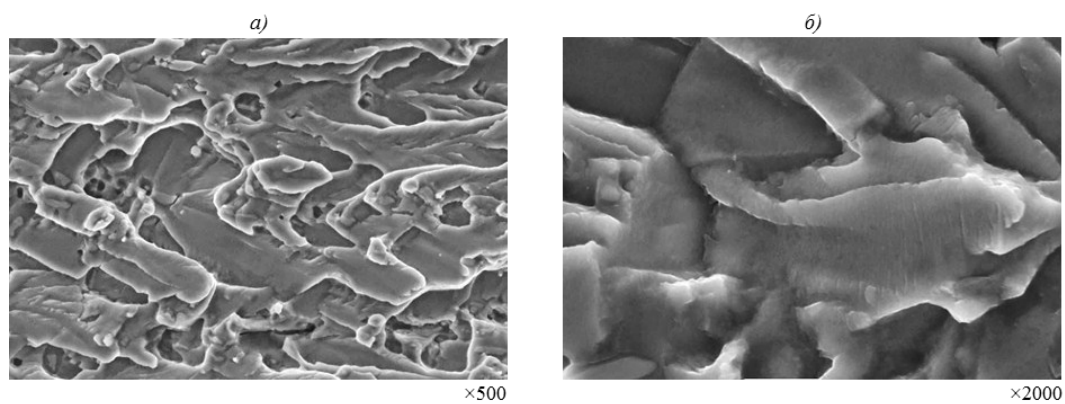


Рис. 2. Строение излома усталостной трещины во фрагменте 1:
а – усталостные плато; б – слабо различимые усталостные бороздки

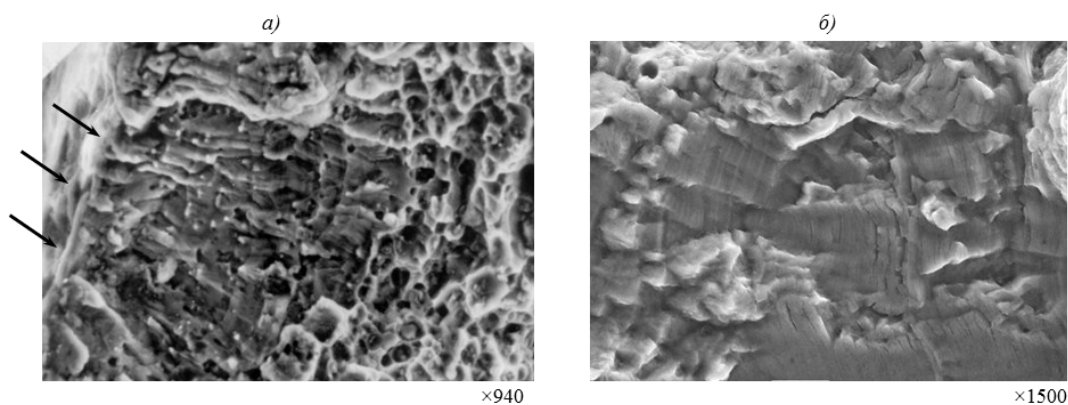


Рис. 3. Строение излома по кромке носка:
а – развитие усталостной трещины от внутренней поверхности (показано стрелками); б – усталостный рельеф в очаге

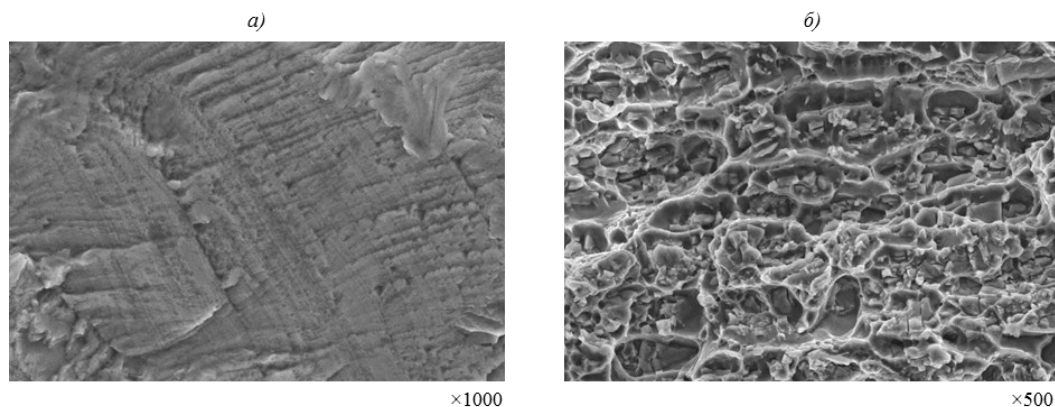


Рис. 4. Строение излома поперечной (вертикальной) трещины в зоне закругления:
а – усталостный рельеф; б – ямочный рельеф в доломе

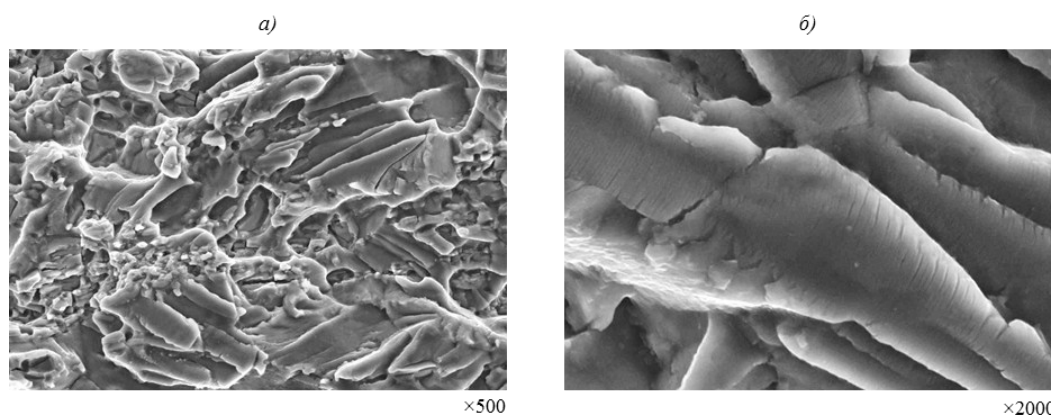


Рис. 5. Строение излома лопасти 5 в очаговой зоне:
а – ямки и усталостный рельеф; б – усталостные бороздки

(ТУ802-059-079). Механические свойства образцов из сплава АК4-1 приведены в табл. 2.

На механически отшлифованных нетравленных 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. В ходе анализа нетравленных шлифов, изготовленных из фрагментов деталей воздухозаборника, грубых дефектов не выявлено.

Исследование микроструктуры деталей проводили на поперечных шлифах при увеличении $\times 200$ после травления в 0,5%-ном водном растворе плавиковой кислоты. Микроструктура сплава АК4-1 соответствует нормально термообработан-

ному состоянию без пережогов и скоплений неметаллических включений (рис. 6).

Для измерения твердости изготовлены микрошлифы из фрагментов деталей воздухозаборника. В результате замера твердости при вдавлении стального шарика с нагрузкой 1000 Н установлено, что среднее значение твердости фрагментов составляет 115 НВ, что соответствует требованиям ОСТ 90073–85 для сплава АК4-1 (110–117 НВ).

Обсуждение и заключения

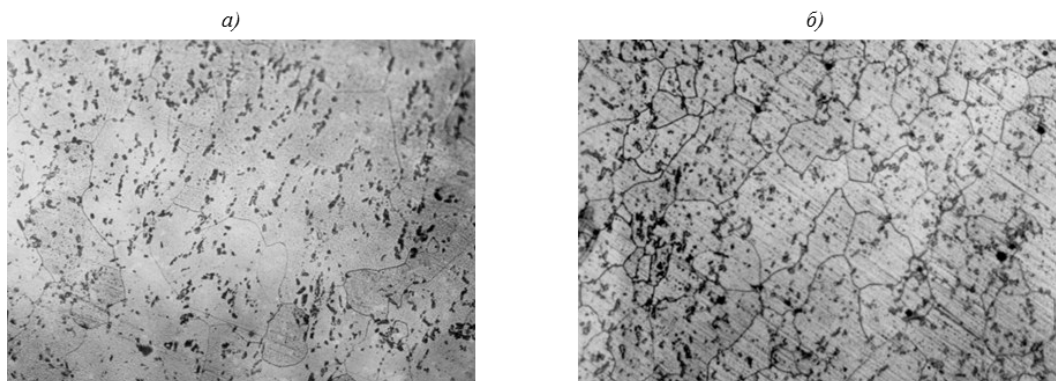
На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

– по химическому составу и уровню твердости (115 НВ) материал исследованных деталей воздухозаборника соответствует требованиям нормативной документации на сплав АК4-1;

Таблица 2

Механические свойства образцов из сплава АК4-1

Условный номер образца	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1	430	380	8,0
2	434	390	7,2
3	430	393	6,8
По ТУ802-059-079	≥ 397	≥ 323	$\geq 6,0$

Рис. 6. Микроструктура ($\times 200$) сплава АК4-1

– микроструктура деталей воздухозаборника соответствует микроструктуре сплава АК4-1 в закаленном и состаренном состоянии;

– механические свойства деталей воздухозаборника соответствуют требованиям нормативной документации на сплав АК4-1;

– разрушение всех деталей воздухозаборника имеет многоочаговый усталостный характер;

– строение излома лопастей воздухозаборника указывает на действие напряжений высокого уровня;

– возникновению разрушения способствовало наличие на поверхности деталей грубых рисок от механической обработки.

Поскольку по химическому составу, механическим свойствам и микроструктуре материал соответствует требованиям нормативной документации, то с целью предотвращения выхода деталей из строя рекомендовано повышение качества обработки поверхности и проведение в ходе эксплуатации периодического контроля носков воздухозаборника в зоне кромки.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему наставнику в области фратографического анализа – ведущему научному сотруднику, кандидату технических наук Ие Петровне Жегиной, чьи рабочие материалы были использованы при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Белецкий В.М., Кривов Г.А. Аллюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение: справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
- Аллюминиевые сплавы. Металловедение аллюминия и его сплавов: справочное руководство. М.: Металлургия, 1971. 352 с.
- Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Аллюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
- Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Молостова И.И. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu для авиакосмической техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 155–163.
- Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства аллюминиевых сплавов. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
- Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные аллюминиевые сплавы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
- Беляев М.С., Жуков Н.Д. Влияние концентрации напряжений на сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов // Проблемы прочности. 1984. №5. С. 2–15.
- Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №1. С. 2–10.
- Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
- Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и аллюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
- Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
- 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: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2017).
- Бронфин М.Б., Алексеев А.А., Чабина Е.Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 353–365.
- 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.
- 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.