

УДК 620.1:669.715

*Л.В. Морозова<sup>1</sup>, В.Б. Григоренко<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ  
КРЫЛЬЧАТКИ И КОЛЕСА ВЕНТИЛЯТОРА  
ИЗ СПЛАВА АК4-1**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-119-127

*Проведено комплексное исследование двух случаев эксплуатационных разрушений деталей сложной конфигурации из сплава АК4-1 – крыльчатки и колеса вентилятора. Методами оптической и электронной микроскопии, химического анализа и механических испытаний оценена макро- и микроструктура, изучен химический состав и характер разрушения деталей. Установлено, что разрушение крыльчатки и колеса вентилятора произошло при действии циклической нагрузки. Разрушению деталей способствовало наличие шероховатой поверхности и микроповреждений (рисок от механической обработки) в зоне повышенных напряжений.*

**Ключевые слова:** разрушение, излом, алюминиевый сплав, усталость, фрактография.

*L. V. Morozova<sup>1</sup>, V. B. Grigorenko<sup>1</sup>***RESEARCH OF CAUSES OF DESTRUCTION  
OF THE IMPELLER AND FAN WHEEL  
FROM ALLOY AK4-1**

*Complex research of two cases of operational destructions of details of difficult configuration from alloy AK4-1 (impellers and fan wheels) is conducted. By methods of optical and electron microscopy, chemical analysis and mechanical tests it is evaluated macro- and microstructure, chemical composition and nature of destruction of details is studied. It is established that destruction of the impeller and wheel of the fan has occurred at action of cyclic load. Destruction of details was promoted by availability of rough surface and micro damages (scratches from machining) in zone of the increased tension.*

**Keywords:** destruction, destruction surface, aluminum alloy, fatigue, fractography.

---

<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**

В условиях развития новых классов материалов одними из самых широко применяемых в авиастроении по-прежнему остаются алюминиевые сплавы. Жаропрочные деформируемые алюминиевые сплавы применяются в авиастроении благодаря своей легкости и комплексу необходимых эксплуатационных характеристик, таких как высокая прочность, сопротивление усталостному разрушению и коррозионным воздействиям. Для современной авиационной техники предусмотрена длительная эксплуатация (3000–6000 летных часов), при которой детали должны выдерживать циклические нагрузки, перепады температуры и атмосферное воздействие [1–3].

Сплав марки АК4-1ч.-Т1 – основной жаропрочный сплав средней прочности ( $\sigma_B^{20^\circ} = 430$  МПа,  $\sigma_B^{150^\circ} = 370$  МПа), широко используемый в виде плит, листов, штамповок и применяемый в грейущихся авиационных конструкциях, в том числе для изготовления

деталей двигателей. Благодаря высоким значениям жаропрочности, длительной прочности и сопротивления ползучести, из сплава АК4-1 изготавливают лопатки компрессоров, крыльчатки, диски и кольца турбореактивных и турбовинтовых двигателей, поршни двигателей и другие кованные детали, работающие при повышенных температурах. Кроме того, сплав очень технологичен, что важно при изготовлении таких сложных штамповок, как крыльчатки [4–6].

В качестве малорастворимых и практически нерастворимых легирующих элементов в сплаве АК4-1 содержится железо, никель и кремний. Сочетание относительно малолегированного твердого раствора в качестве мягкой основы и большого количества твердых частиц вторых фаз определяет хорошую сопротивляемость сплава износу. Вследствие этого сплав обладает низким коэффициентом трения и отвечает требованиям, предъявляемым к деталям двигателей, подвергаемым трению. Одним из преимуществ сплава также является низкая склонность к образованию первично кристаллизующихся фаз типа  $FeNiAl_9$ , представляющих собой грубые иглы или пластинки. Для слитков, предназначенных для штамповки деталей, разработана технология литья при температуре 720–730°C, исключающая образование грубых включений вторых фаз [7].

Большинство деталей из деформируемых алюминиевых сплавов производят путем горячей деформации –ковки и штамповки. Крыльчатки изготавливают из прессованных заготовок со степенью деформации 75–80%. Применение сложной схемыковки, производимой в двух штампах –предварительном и окончательном после нагрева при 470–420°C, – позволяет достичь существенного улучшения структуры и механических свойств.

Термическую обработку штамповок крыльчаток вентилятора и воздухозаборников проводят по режиму: закалка после нагрева при  $535\pm 5^\circ C$  и искусственное старение при  $190\pm 5^\circ C$  в течение 10 ч. Данный режим обеспечивает высокие механические свойства штамповок из сплава АК4-1 при комнатной и повышенных температурах [8, 9].

Структура сплава АК4-1 существенно отличается от структуры сплавов типа дюралюмин. Из-за отсутствия марганца сплав легко рекристаллизуется при горячей деформации и последующей термической обработке, что позволяет формироваться однородной волокнистой макроструктуре. Образование разнородности возможно только в условиях применения малых степеней деформации и связано с малой областью критических степеней деформации  $\sim(2-3)\%$ . Наличие однородной структуры также обеспечивает сопоставимые механические свойства как в продольном, так и в поперечном направлении (разница  $\sim 20$  МПа). Существенное отличие наблюдается лишь для относительного удлинения: в поперечном направлении его величина на 30–40% меньше, чем в продольном [10].

Важным требованием является высокий класс чистоты при механической обработке поверхности, так как риски могут оказаться концентраторами напряжений, привести к снижению эксплуатационной прочности или послужить в качестве очага разрушения. 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. 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 [11–13].

Диагностика причин разрушения является важным процессом, позволяющим решить задачи повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций и деталей машин. Плановая диагностика повреждаемости материала конструкций позволяет предотвратить возникновение аварийной ситуации и сэкономить значительные

средства, так как затраты на восстановление работоспособности машин или агрегатов могут быть сопоставимы с их стоимостью [14].

В данной работе приведены результаты комплексного исследования причин и характера разрушения деталей из сплава АК4-1 – крыльчатки и лопатки колеса вентилятора.

Эксплуатация колеса вентилятора проходила в воздушной среде с давлением воздуха на входе до 0,5 МПа, при температуре воздуха 30–70°C и частоте вращения не более 40 000 об/мин. Разрушение произошло после наработки 7200 запусков.

Эксплуатация крыльчатки проходила в воздушной среде при температуре воздуха 20–60°C. Разрушение крыльчатки произошло в процессе эксплуатации после наработки 5600 запусков, в том числе 3000 запусков после проведения ремонта агрегата.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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 крыльчатки и колеса вентилятора является жаропрочный деформируемый алюминиевый сплав АК4-1 в закаленном и искусственно состаренном состоянии Т1. При закалке твердый раствор фиксируется в пересыщенном состоянии, а в процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, благодаря чему сплав упрочняется.

Исследование причин и характера разрушения крыльчатки и колеса вентилятора включало следующие работы:

- проведение визуального осмотра и фотосъемки фрагментов деталей;
- проведение химического анализа на соответствие марке сплава;
- исследование макро- и микроструктуры;
- проведение механических испытаний;
- проведение фрактографического анализа;
- измерение твердости.

Анализ химического состава фрагментов крыльчатки и колеса вентилятора проводили 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 выполнено методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе JSM-6490LV.

Подготовку металлографических шлифов осуществляли на оборудовании фирмы Struers.

Металлографические исследования проводили с применением оптического комплекса Leica, измерения твердости – на твердомере, согласно ГОСТ 9012–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю».

### Результаты

Разрушение крыльчатки прошло с разделением на две части по ступице (рис. 1). В ходе осмотра установлена значительная изгибная деформация лопастей, возникшая вследствие изменения конфигурации крыльчатки в процессе разрушения.

При разрушении колеса вентилятора произошел обрыв лопатки ближе к ступице (рис. 2). Сохранившиеся лопатки были деформированы в процессе разрушения.

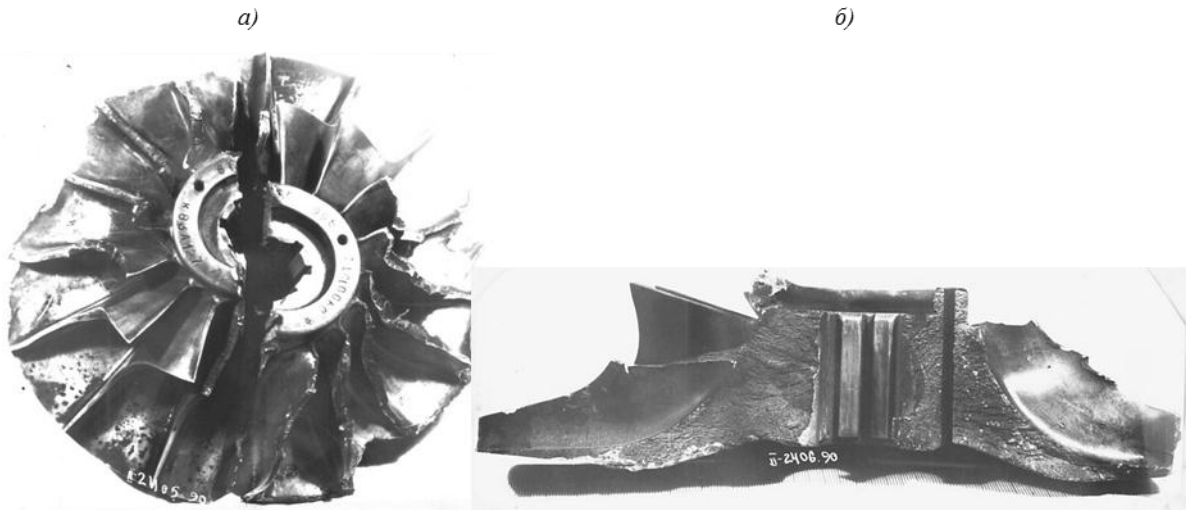


Рис. 1. Общий вид разрушенной крыльчатки:  
а – разрушение на две части; б – излом по ступице

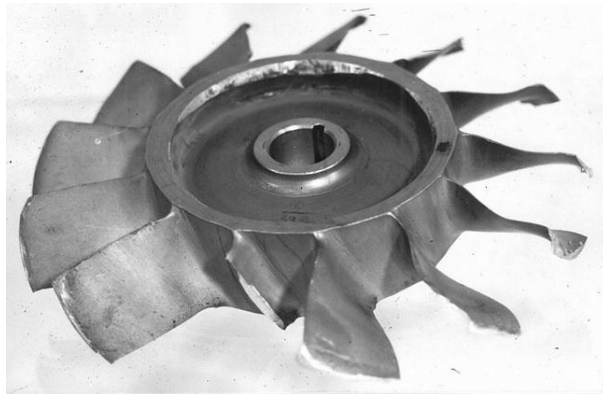


Рис. 2. Общий вид разрушенного колеса вентилятора

Для проведения химического анализа от деталей из сплава АК4-1 отбирали монолитные образцы, поверхность которых подвергали предварительному шлифованию. По результатам проведения химического анализа получено, что состав образцов соответствует требованиям нормативной документации (ГОСТ 4784–97) по химическому составу сплава АК4-1 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплава АК4-1 по результатам измерений

Деталь из сплава АК4-1	Содержание элементов, % (по массе)								
	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Zn	Cr	Ni
Крыльчатка	2,30	1,62	0,20	1,15	0,05	0,95	0,15	0,02	1,10
Колесо вентилятора	2,08	1,69	0,30	0,95	0,057	0,05	0,08	0,03	0,95
По ГОСТ 4784–97	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

Примечание. Al – основа.

Для исследования макроструктуры из крыльчатки и колеса вентилятора вырезали темплеты в радиальном направлении. В ходе анализа установлено, что в колесе вентилятора макроструктура относительно однородная, размер зерен существенных

отличий не имеет. В то время как в крыльчатке присутствует структурная неоднородность: в зоне ступицы наблюдается крупное зерно, а по сечению диска макроструктура – мелкозернистая и однородная (рис. 3). Крупнокристаллическая структура в зоне ступицы, вероятно, образовалась при несоблюдении технологических режимов нагрева в процессе горячей деформации, а также при возможном попадании в область критических степеней деформации для сплава АК4-1.



Рис. 3. Макроструктура темплета крыльчатки – разнoзернистость

Для исследования микроструктуры из лопатки колеса вентилятора образец вырезали в поперечном сечении. Микроструктуру крыльчатки исследовали на шлифах, изготовленных из зоны ступицы и из разрушившейся лопасти, при увеличении  $\times 200$ . Шлифы подвергали травлению в 0,5%-ном водном растворе плавиковой кислоты. Помимо наличия разнoзернистости, каких-либо дефектов микроструктуры не выявлено. Частицы второй фазы распределены равномерно и присутствуют как по границам, так и в теле зерен (рис. 4). Следов пережога не обнаружено.

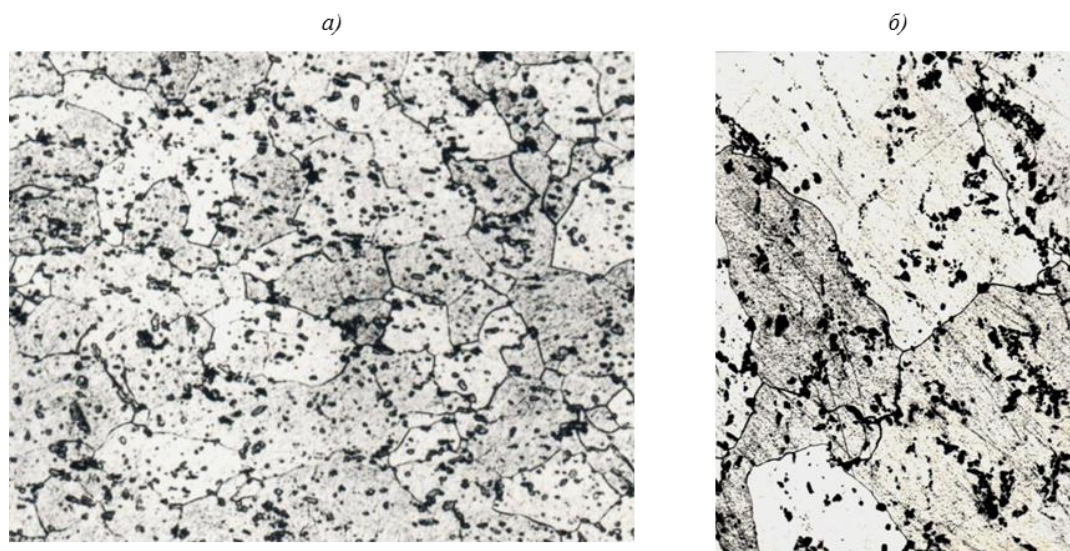


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) деталей из сплава АК4-1:

*a* – типичная микроструктура с мелкими зернами; *б* – крупные зерна в ступице

Механические свойства обеих деталей определяли на образцах, вырезанных из зоны ступицы. По результатам проведенных испытаний на растяжение при комнатной температуре получено, что механические свойства образцов, изготовленных из колеса вентилятора, удовлетворяют требованиям нормативной документации (ОСТ1 90073–85). В образцах, вырезанных из крупнозернистой области крыльчатки, наблюдается снижение

механических свойств и их значения соответствуют требованиям ОСТ по нижнему пределу. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства образцов из сплава АК4-1

Деталь из сплава АК4-1	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Колесо вентилятора	420	360	8,0
Крыльчатка	400	325	6,1
По ОСТ1 90073–85	$\geq 385$	$\geq 295$	$\geq 6,0$

В ходе проведения фрактографического анализа установлено, что излом лопасти крыльчатки имеет волокнистое строение, характерное для действия статической нагрузки. Разрушение развивалось от корыта (рис. 5, а), прошло по смешанному механизму: преимущественно внутризеренно (рис. 5, б) и по границам отдельных зерен (рис. 5, в). На поверхности зерен присутствуют мелкие ямки, свидетельствующие о сопротивлении отрыву (рис. 5, з).

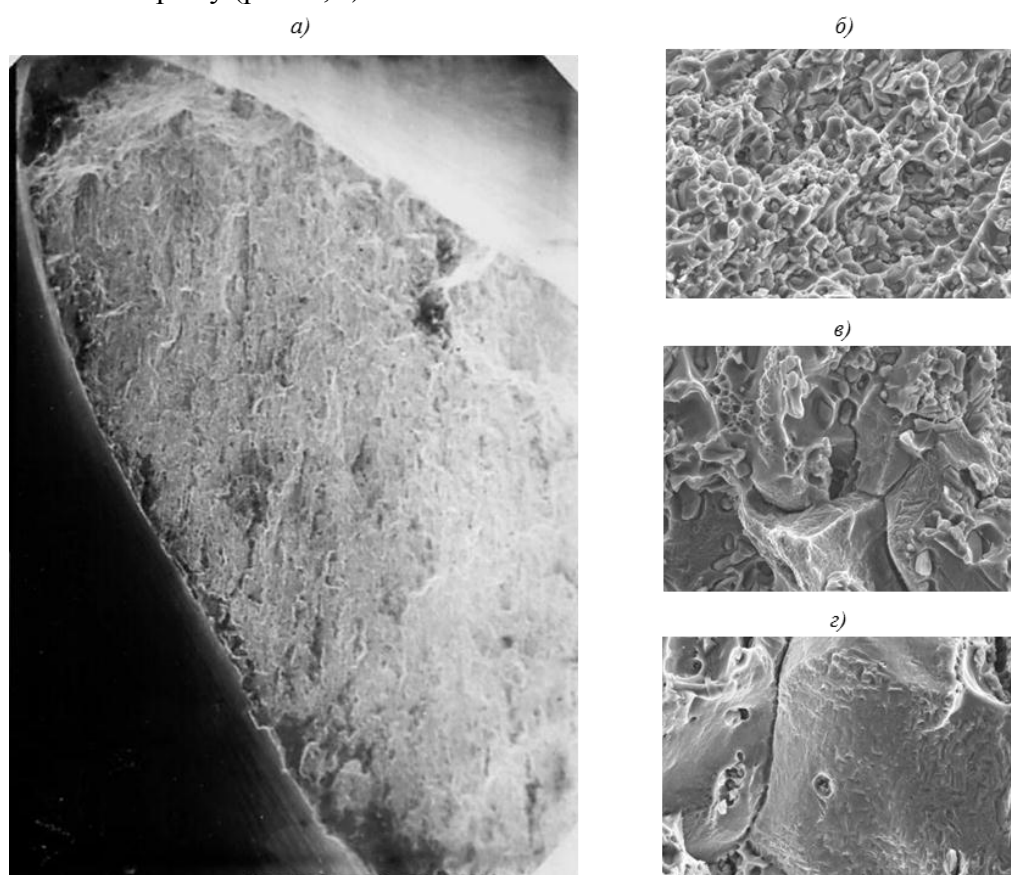


Рис. 5. Строение излома лопасти крыльчатки:

а – общий вид излома пера; б – внутризеренное разрушение, ямочный рельеф ( $\times 1000$ ); в – смешанный излом ( $\times 1000$ ); з – поверхность крупного зерна ( $\times 1000$ )

Излом по ступице прошел в основном по впадинам шлицев. На поверхности детали вблизи излома присутствуют трещины и грубые риски от механической обработки. В изломе помимо участков, имеющих строение, типичное для однократного разрушения, имеются зоны усталостного развития трещины (рис. 6). На поверхности разрушения присутствуют участки как с медленным развитием усталости: с формированием гладких плато, тонких усталостных бороздок с шагом  $\leq 0,38-0,5$  мкм, так и участки с более быстрым развитием трещины, где усталостные бороздки перемежаются с ямками,

а их шаг составляет  $\sim 1,9$  мкм. Данные признаки указывают на развитие трещины при действии высоких циклических нагрузок. В зоне долома разрушение прошло с формированием типичного ямочного рельефа.

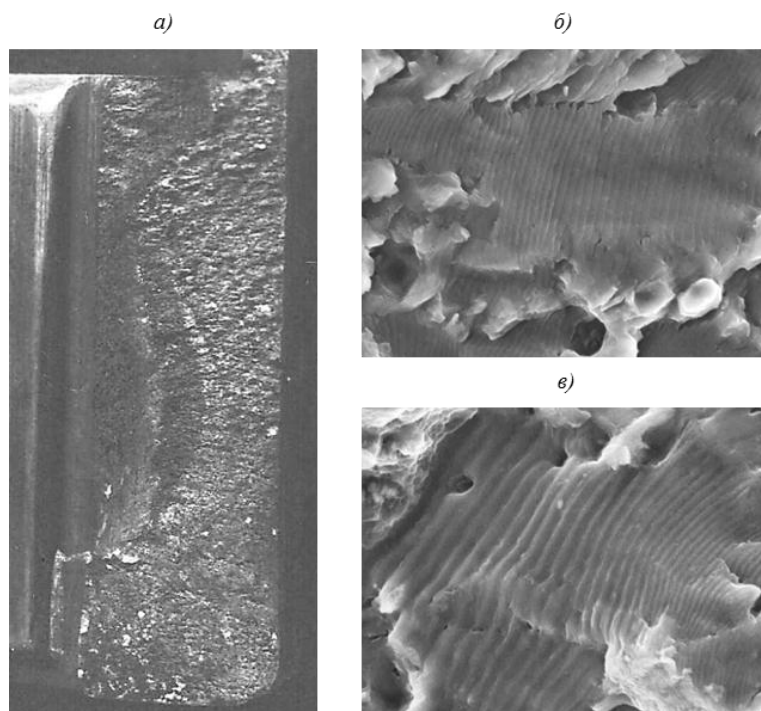


Рис. 6. Строение излома ступицы крыльчатки:

*а* – очаговая зона усталостной трещины; *б* – усталостный рельеф в зоне медленного развития трещины ( $\times 2000$ ); *в* – усталостный рельеф в зоне быстрого развития трещины ( $\times 2000$ )

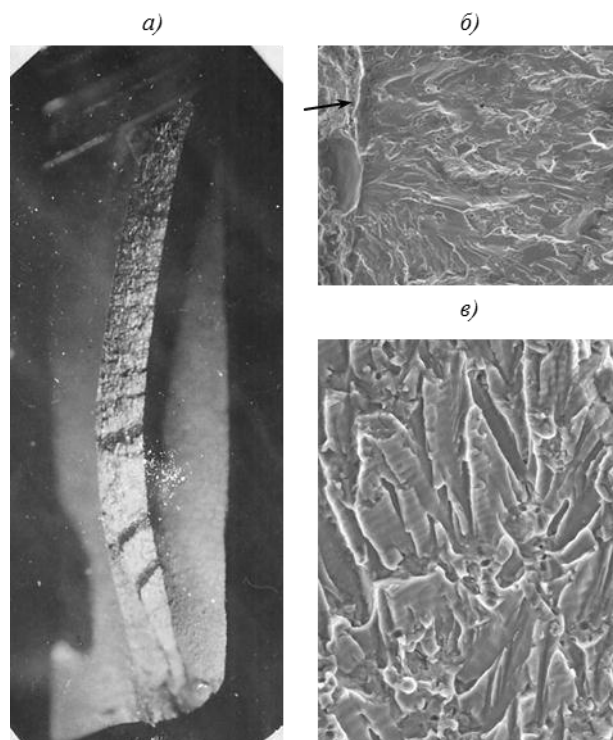


Рис. 7. Строение излома лопатки колеса вентилятора:

*а* – общий вид излома; *б* – очаг разрушения (стрелка указывает на анодированное покрытие на поверхности лопатки) ( $\times 200$ ); *в* – усталостные бороздки ( $\times 500$ )

Разрушение лопатки колеса вентилятора произошло в месте перехода к ступице, со стороны корыта. Разрушение имеет многоочаговый, усталостный характер. Очаги разрушения связаны с неровностями поверхности. После штамповки изделие не подвергалось какой-либо механической обработке, и анодное покрытие было нанесено на шероховатую поверхность. Неровности в месте галтельного перехода послужили концентраторами напряжений, от которых развивалось разрушение. Усталостная трещина распространилась практически на все сечение детали, на поверхности усталостных плато присутствуют тонкие бороздки, что свидетельствует об отсутствии повышенных нагрузок в процессе развития разрушения (рис. 7).

Для измерения твердости изготавливали микрошлифы из фрагментов деталей (крыльчатки и колеса вентилятора). В результате замера твердости вдавливанием стального шарика с нагрузкой 1000 Н установлено, что среднее значение твердости фрагментов составляет 114 НВ, что соответствует требованиям ОСТ1 90073–85 для сплава АК4-1 (110–117 НВ).

### Обсуждение и заключения

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

- по химическому составу материал исследованных деталей (крыльчатки и колеса вентилятора) соответствует требованиям нормативной документации на сплав АК4-1;
- макроструктурным анализом выявлена разнотернистость крыльчатки в зоне ступицы;
- микроструктура деталей соответствует сплаву АК4-1 в закаленном и состаренном состоянии;
- механические свойства крыльчатки и колеса вентилятора соответствуют требованиям нормативной документации на сплав АК4-1;
- разрушение лопатки колеса вентилятора имеет многоочаговый усталостный характер – дефекты поверхности в месте галтельного перехода послужили концентраторами напряжений, от которых развивалось усталостное разрушение;
- разрушение крыльчатки развивалось от рисок на поверхности ступицы и проходило по усталостному механизму;
- по уровню твердости (115 НВ) материал исследованных деталей соответствует требованиям нормативной документации на сплав АК4-1.

Поскольку по химическому составу, механическим свойствам и микроструктуре материал соответствует требованиям нормативной документации, для предотвращения выхода механизмов из строя рекомендовано повышать качество обработки поверхности и проводить в ходе эксплуатации периодические осмотры деталей. Для того чтобы избежать формирования крупнозернистой структуры в зоне ступицы крыльчатки, рекомендовано усиление контроля за соблюдением технологических режимов нагрева в процессе горячей деформации.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ФГУП «ВИАМ» И.П. Жегиной, чьи рабочие материалы использованы при подготовке статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №1. С. 2–10.

3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
5. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
6. Фридляндер И.Н., Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Магниевые и литейные алюминиевые сплавы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1982–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 180–188.
7. Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
8. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов: справочное руководство. М.: Металлургия, 1971. 352 с.
9. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение: справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: Коминтех, 2005. 365 с.
10. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСИС, 2005. 376 с.
11. Быщенко О.А., Григоренко В.Б., Лукина Е.А., Морозова Л.В. Развитие методов металлофизических исследований: методологические вопросы и практическая значимость // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 498–515. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-498-515.
12. 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. журнал. 2013. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2018).
13. Бронфин М.Б., Алексеев А.А., Чабина Е.Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1982–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 353–365.
14. 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.
15. 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.