

Научная статья

УДК 620.187

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ И РАСТРОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Л.В. Морозова¹, В.Б. Григоренко², А.М. Терехин²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Производственный Комплекс «Салют» Акционерного Общества «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия; info@uecrus.com

Аннотация. Установлены причины выхода из строя деталей газотурбинных двигателей. Методами оптической металлографии, фрактографии высокого разрешения и электронно-зондового анализа исследованы структура и особенности разрушения. Показано, что материалы деталей по структуре, твердости и химическому составу соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Наиболее вероятными причинами разрушения подшипника качения являются нарушения в системе подачи масла. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных в межзубной впадине.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия, фрактографический анализ, оптическая микроскопия, микроструктура, легированная сталь, хрупкое разрушение, усталостное разрушение, подшипник, шестерня

Для цитирования: Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Анализ причин разрушения деталей редукторов методами оптической и растровой микроскопии // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43.

Scientific article

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DESTRUCTION OF GEARBOX PARTS BY METHODS OF OPTICAL AND SCANNING MICROSCOPY

L.V. Morozova¹, V.B. Grigorenko², A.M. Terekhin²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Production Complex «Salut» of Joint Stock Company «United Engine Corporation», Moscow, Russia; info@uecrus.com

Abstract. The causes of failure of gas turbine engine parts have been identified. The structure and features of destruction have been studied using optical metallography, high-resolution fractography and electron probe analysis. It has been shown that the materials of the parts comply with the requirements of regulatory documentation in terms of structure, hardness and chemical composition. The most probable causes of rolling bearing failure are faults in the oil supply system. The destruction of the gear developed according to the fatigue mechanism from scratches located in the gullet.

Keywords: scanning electron microscopy, fractographic analysis, optical microscopy, microstructure, alloy steel, brittle fracture, fatigue fracture, bearing, gear

For citation: Morozova L.V., Grigorenko V.B., Terekhin A.M. Analysis of the causes of destruction of gearbox parts by methods of optical and scanning microscopy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43.

Введение

В основе исследований, проводимых с целью выявления причин разрушения всевозможных деталей, лежит металлографический анализ, позволяющий получать информацию об основных элементах структуры металлических материалов. В современных условиях существуют различные способы получения изображения структуры – например, оптическая, лазерная и электронная микроскопия. *Оптическая микроскопия* имеет ряд ограничений при получении изображений – разрешающая способность ограничена длиной волны, формирование контраста связано с качеством подготовки поверхности образца и геометрическими параметрами отражения пучка света от его поверхности. *Растровая электронная микроскопия* (РЭМ) позволяет выводить на новый уровень возможности структурных исследований благодаря использованию иных физических принципов формирования изображения. Детектирование различного типа электронов, образующихся в результате взаимодействия испускаемого катодом пучка электронов с материалом образца, позволяет получать изображения с различным контрастом и большой глубиной фокуса при кратности увеличений от единиц до десятков тысяч. Использование РЭМ позволяет изучать как плоские микрошлифы с целью исследования микроструктуры и фазового анализа, так и шероховатые поверхности изломов. Оснащенность растровых микроскопов приставками для кристаллографического (EBSD) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) еще больше расширяет возможности исследований. Таким образом, сочетание оптического исследования микроструктуры с возможностями исследований, проводимых с помощью РЭМ, позволяет провести комплексный анализ разрушенных деталей с определением химического состава изделия и его конкретных фаз, структурных составляющих, их ориентации и строения поверхности разрушения.

В настоящее время для обеспечения качественного быстрого перехода к производству машин и агрегатов на высоком технологическом уровне, оснащенность заводских лабораторий новым высокоточным исследовательским оборудованием должна приближаться к оснащенности лабораторий в передовых научно-исследовательских институтах. С помощью расширения программ обучения можно обеспечить потребности предприятий в инженерах-исследователях высокой квалификации. Правильность выводов, полученных при анализе разрушений, зависит от способности исследователя не только применять современное оборудование, но и от понимания им процессов, происходящих в материале на макро-, мезо- и микроуровнях, с учетом всех факторов, непосредственно влияющих на комплекс свойств материалов и изделий из них, а также от способности правильно интерпретировать полученные данные [1].

Устройство большинства сложных технических систем невозможно представить без применения в их конструкции редукторов. Для изготовления деталей редукторов, таких как валы, шестерни и подшипники, используются наиболее качественные легированные стали [2–8]. Стабильная работа узлов в период эксплуатации обусловлена множеством факторов, таких как марка выбранного материала, уровень его механических свойств, технология производства деталей, качество сборки и установки. Она также зависит от грамотной разработки чертежа с учетом соответствия эксплуатационных параметров детали или узла типоразмеру выбранного конструктором подшипника.

Множество исследований разрушенных деталей редукторов показывает, что наибольшее число отказов происходит в результате повреждений при монтаже узлов, отсутствия смазывания, наличия посторонних загрязнений или недостаточно

квалифицированного проектирования. Следующая по распространенности причина отказов – образование усталостных повреждений как на дорожках качения подшипников, так и на поверхности зубьев шестерен [9–11]. Выявляются лишь единичные случаи выхода из строя узлов редукторов, спровоцированные низким металлургическим качеством материалов.

В области промышленности, к которой относится авиационное двигателестроение, ошибки в конструировании (как и нарушение эксплуатационных режимов) ведут к нештатной работе отдельных узлов изделий и, как следствие, могут приводить к масштабным разрушениям или катастрофам.

В многочисленных работах отражены исследования по определению характера и причин разрушений подшипников и шестерен, изготовленных из легированных сталей типа ШХ15, ЭИ347(8Х4В9Ф), 95Х18 и других [12–14], однако лишь ограниченное число работ посвящено комплексному анализу разрушения редукторов.

В данной статье рассмотрены причины разрушения вала, подшипника и шестерни для экспериментального малого газотурбинного двигателя как пример комплексного подхода с применением различных методов металлофизических исследований.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Полученные результаты исследований являются продуктом деятельности АО «ОДК».

Материалы и методы

При исследовании причин разрушения узлов двигателей проводили анализ нормативно-технической документации, внешний осмотр, фрактографический анализ мест разрушения, анализ микроструктуры и химического состава.

Анализ химического состава деталей проводили спектральным атомно-абсорбционным методом в соответствии с требованиями ГОСТ 22536–88.

Подготовку шлифов осуществляли с применением металлографического комплекса. В зависимости от химического состава материала микроструктуру образцов выявляли электролитическим методом либо травлением в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

При помощи оптических микроскопов высокого разрешения изучали микроструктуру деталей. С применением растрового электронного микроскопа с приставкой для энергодисперсионного анализа, проводимого в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015, изучали тонкую структуру, осуществляли фрактографический и рентгеноспектральный микроанализ.

Результаты и обсуждение

Во время испытаний малого опытного газотурбинного двигателя с условным номером *1* произошло разрушение таких деталей, как гайка, однорядный подшипник качения и вал.

При осмотре *гайки* установлено, что она значительно повреждена с обеих сторон: с одной стороны поверхность окислена до темно-серого цвета, с противоположной – наблюдается намазывание материала сопряженной детали.

Визуальный осмотр *вала* показал наличие деформации и разрушения в месте посадки подшипника. На поверхности вала обнаружены глубокие кольцевые риски от приработки и намазывание постороннего материала, наблюдается также значительное повреждение излома.

Внешний осмотр наружного и внутреннего *колец подшипника* выявил повреждения дорожек качения в виде вмятин и налипания постороннего материала. Наружное кольцо – серое, блестящее; внутреннее кольцо с посадочной поверхности окислено до синего цвета, на торцах – до темно-синего цвета, на дорожке качения – до черного. На дорожке качения внутреннего кольца имеются глубокие вмятины неправильной формы, образовавшиеся под воздействием заклинивших шариков (рис. 1).

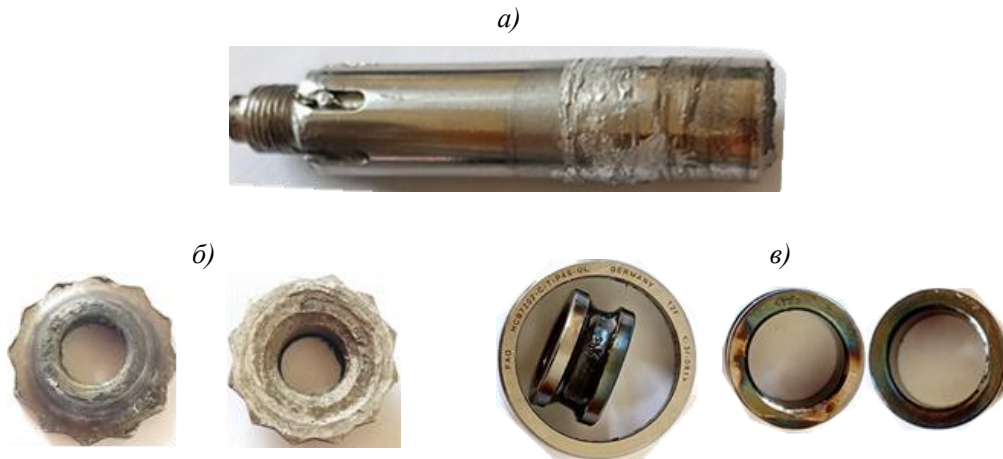


Рис. 1. Общий вид исследованных деталей: *а* – фрагмент вала; *б* – гайка; *в* – наружное и внутреннее кольца подшипника

Для определения детали, разрушение которой вызвало выход из строя остальных узлов, необходимо было провести как металлографический анализ структуры и анализ изломов, так и определение химического состава посторонних материалов, оставивших «следы» на исследуемых деталях.

Исследование микроструктуры вала выявило присутствие крупных и мелких зерен – разнотерности, наличие и величина которой не оговаривается в нормативно-технической документации на материал. В микроструктуре наблюдается двойникование зерна γ -фазы со строчечными выделениями карбидных фаз. При исследовании микроструктуры в зоне разреза не выявлено дефектов металлургического характера и термической обработки (рис. 2).

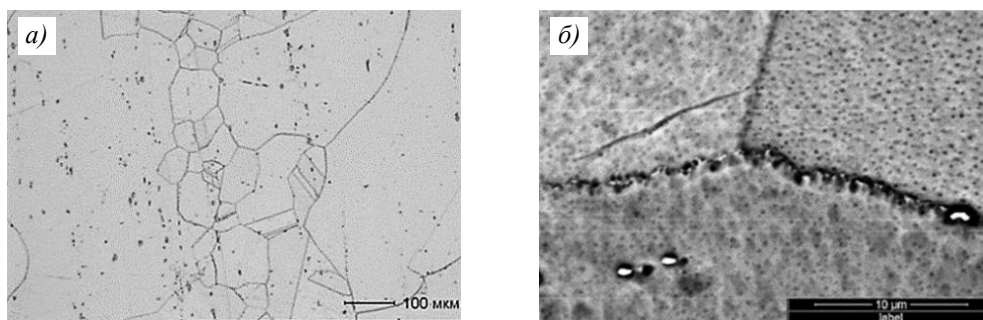


Рис. 2. Микроструктура вала, полученная на оптическом (*а*) и электронном растровом микроскопах (*б*)

Фрактографическому анализу подвергли и исходный поврежденный излом вала, и «свежий» излом, полученный после надреза и вскрытия трещины на сохранившейся его части. Полученный в результате надреза излом заведомо не имеет усталостной

составляющей и характерен для статического однократного разрушения. Установлено, что поверхность излома вала перпендикулярна его оси, т. е. геометрическая форма излома совпадает с общеизвестной схемой. Фрагмент разрушенного при испытаниях вала показан на рис. 3 в сравнении со схемой строения излома, характерного для вязкого разрушения при кручении.

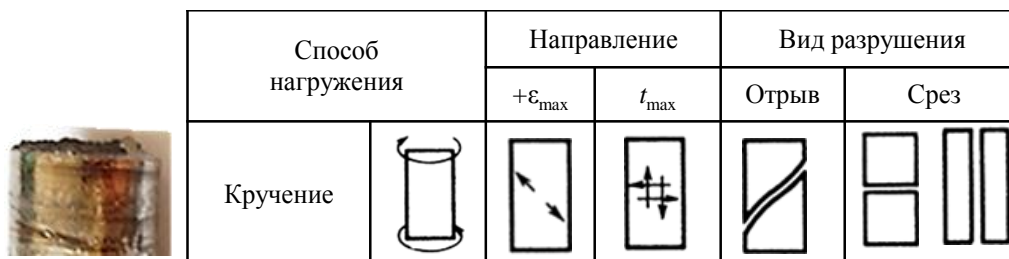


Рис. 3. Излом вала и направления максимальных упругих удлинений и касательных напряжений с траекториями макрохрупкого и вязкого разрушения при кручении [15]

Фрактографический анализ обоих образцов выявил одинаковый характер разрушения. Установлено, что разрушение статическое, смешанное внутри- и межзеренное, с образованием малопластичных ямок на поверхности крупных зерен и вязких ямок в области мелких зерен (рис. 4).

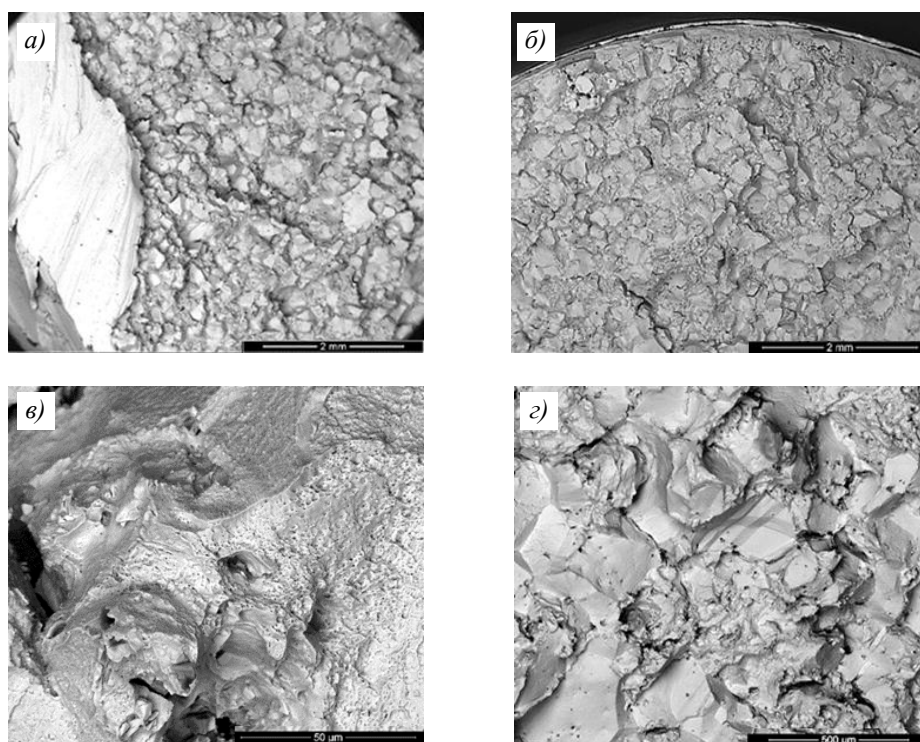


Рис. 4. Строение излома вала

Необходимо обратить внимание на выявленную различными методами (при металлографическом и фрактографическом анализах) разноразмерность, что подтверждает объективность получаемых при исследованиях данных.

Исследование поперечного шлифа, изготовленного из фрагмента наружного кольца подшипника, выявило наличие стесывания и образование заусенцев со стороны более толстого борта кольца (рис. 5, а, б и в, г).

Микроструктура наружного кольца представлена мартенситом отпуска и мелкими равномерно распределенными карбидами сферической формы, что соответствует структуре нормально термообработанной стали типа ШХ15 (рис. 6, а, б).

Анализ микрошлифа из фрагмента внутреннего кольца подшипника выявил не только смятие и налипание материала на дорожку качения, но и выдавливание посадочной поверхности на величину ~0,4 мм (рис. 6, в).

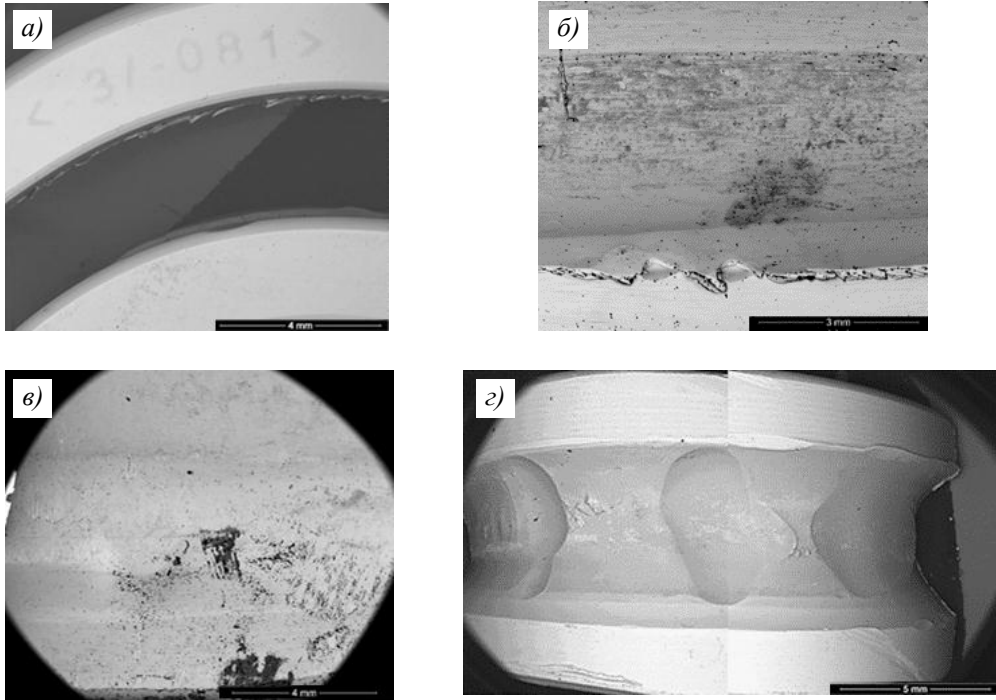


Рис. 5. Поверхность деталей подшипника: а – торцевая поверхность колец; б – дорожка качения наружного кольца; в – посадочная поверхность внутреннего кольца; г – дорожка качения внутреннего кольца

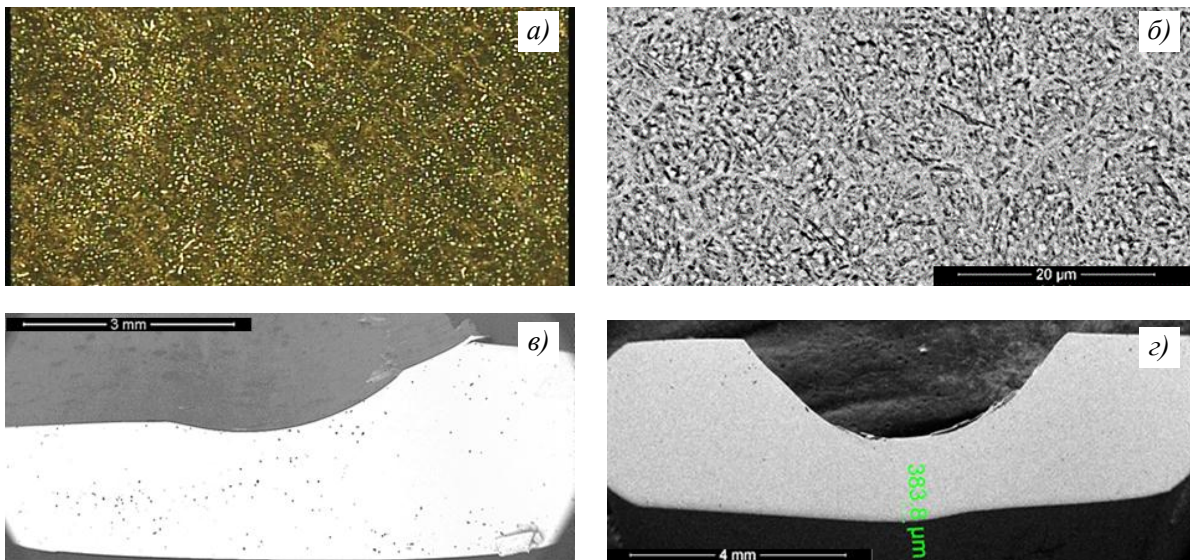


Рис. 6. Характерная микроструктура под дорожкой качения (а, б – $\times 500$) и сечения (в, г) наружного и внутреннего колец подшипника соответственно

Под дорожкой качения внутреннего кольца подшипника выявлена зона воздействия высокой температуры (рис. 7), на отдельных участках которой произошло фазовое превращение мартенсита отпуска в крупноигольчатый мартенсит с большим количеством остаточного аустенита (рис. 7, *г, е*). Можно предположить, что температура в материале кольца достигала ~ 800 °С. Непосредственно под дорожкой качения имеется зона деформированного материала (рис. 7, *ж, и*).

Форма отпечатков шариков на дорожке качения внутреннего кольца указывает на то, что шарики также разогрелись до температуры, значительно превышающей рабочую, и существенно деформированы.

В результате проведенного анализа установлено, что материалы исследованных деталей соответствуют требованиям чертежей и нормативной документации, т. е. их разрушение не может быть вызвано качеством металла – в структуре не выявлены металлургические дефекты, отклонения от заявленного химического состава или нарушения в процессах термической обработки.

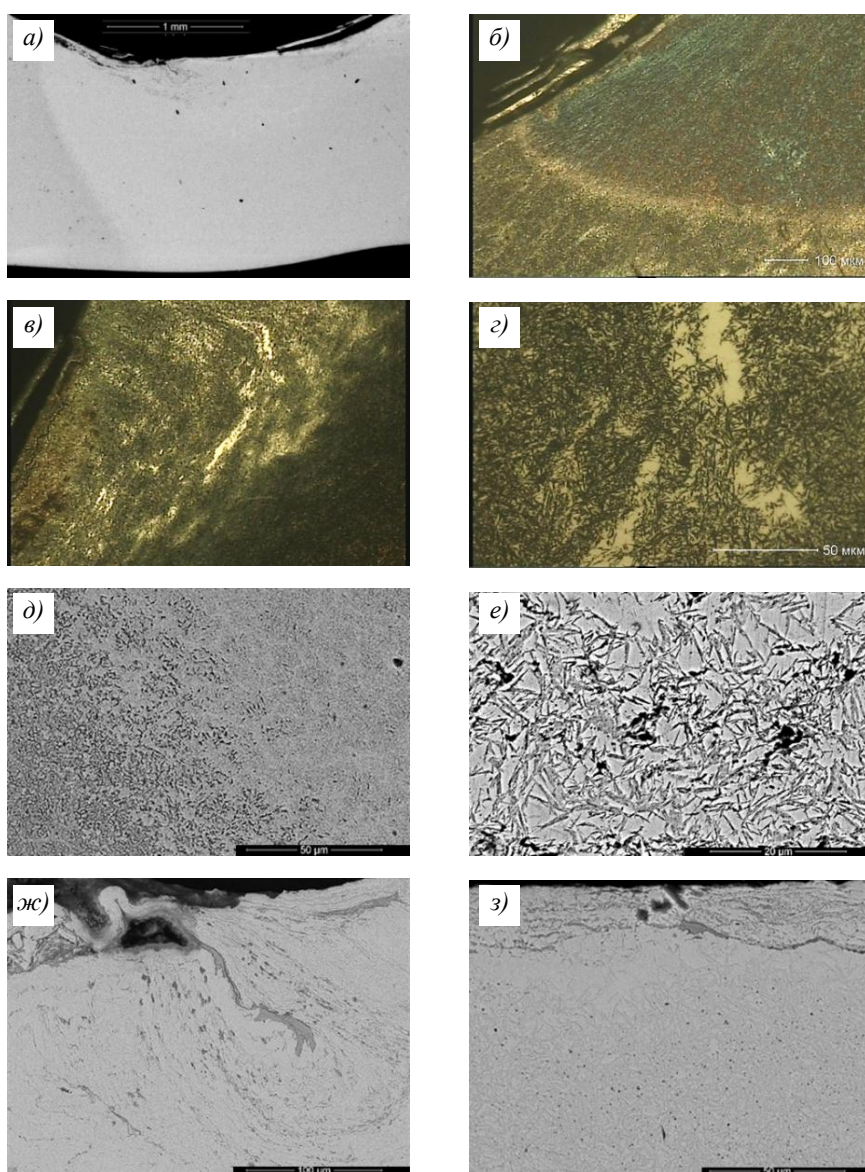


Рис. 7. Микроструктура внутреннего кольца подшипника под дорожкой качения

Наличие цветов побежалости на внутреннем кольце, обнаруженные структурные изменения материала кольца и, вероятно, не предоставленных на исследование шариков свидетельствуют о недостаточном смазывании подшипника во время эксплуатации. Для определения причин и последовательности выхода из строя вала и подшипника двигателя использован анализ материалов, выявленных в виде «намазываний» на той или иной детали. Наиболее широко применяемым в данном случае является метод РСМА.

Предварительно определен элементный состав сплавов, из которых изготовлены исследуемые детали, и подтверждено соответствие этих материалов требованиям чертежей. Далее методом РСМА определяли состав материалов, обнаруженных на поврежденных поверхностях.

Проведенный анализ поверхности гайки (рис. 8, а, б) подтвердил, что она изготовлена из легированной стали, указанной в чертеже. На поверхности гайки с обеих сторон обнаружены налипания материала подшипника из стали типа ШХ15; с нижней стороны обнаружены намазывания материала сопряженной детали из алюминиевого сплава.

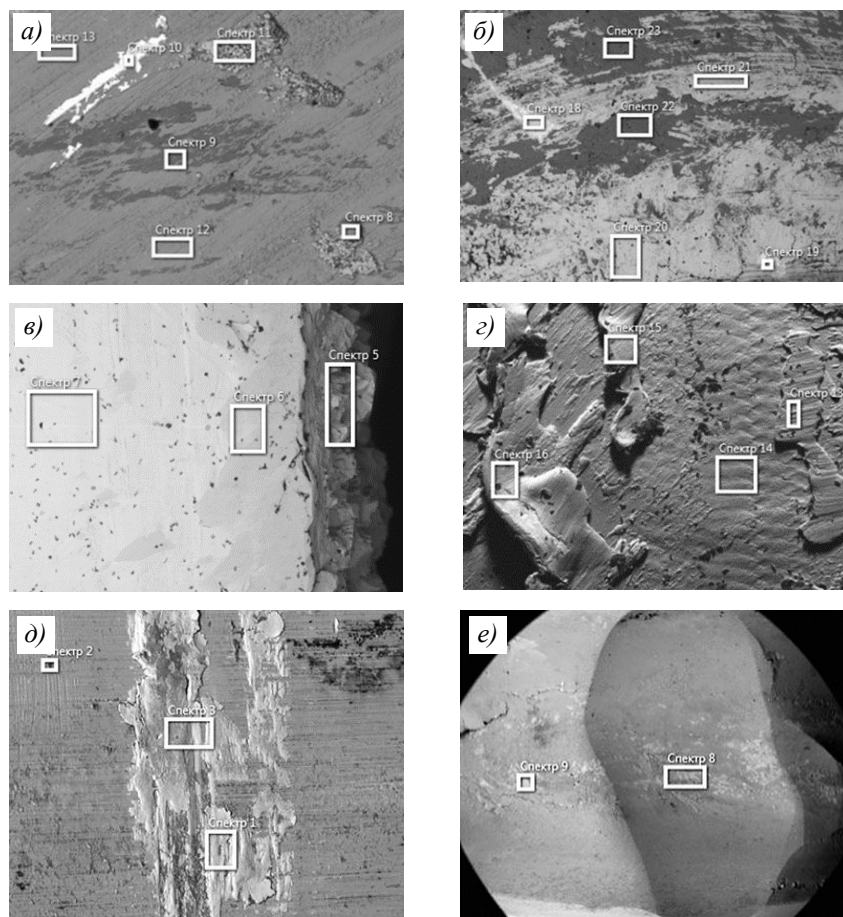


Рис. 8. Рентгеноструктурный микроанализ деталей исследованного узла на поверхности гайки (а, б), вала (в, г) и подшипника (д, е)

На поверхности вала, изготовленного из никелевого сплава, вблизи излома выявлены следы посторонних материалов на основе железа: обнаружены участки налипания материалов, по спектру совпадающих с характерным для марки стали типа ШХ15 спектром и спектром материала гайки (рис. 8, в, г).

На посадочной поверхности внутреннего кольца подшипника обнаружены налипания никелевого сплава (материала вала) и алюминиевого сплава – фрагментов материала, обнаруженного ранее на одной из сторон гайки (рис. 8, *д*, *е*).

Проведенные исследования показали, что на поверхностях деталей присутствуют налипания материалов сопряженных деталей. Судя по степени повреждения и разогрева, первым вышел из строя подшипник вследствие недостатка смазочного материала. В свою очередь разрушение подшипника привело к разрушению вала и гайки.

Таким образом, наиболее вероятными причинами разрушения деталей двигателя *I* являются нарушения в системе подачи масла.

Рассмотрим разрушение шестерни из стали 16ХЗНВФМБ-Ш, произошедшее при испытаниях двигателя с условным номером 2, которое выявлено при последующей разборке и дефектации двигателя.

На рис. 9 показан общий вид фрагментов разрушенной *шестерни*. При визуальном осмотре установлено наличие повреждений излома и расположенных вблизи излома восьми зубьев шестерни: отмечаются глубокие вмятины, врезания, стесывания вершин и сколы на зубьях. На поверхности полотна шестерни со стороны «входа» отмечены точечные врезания.

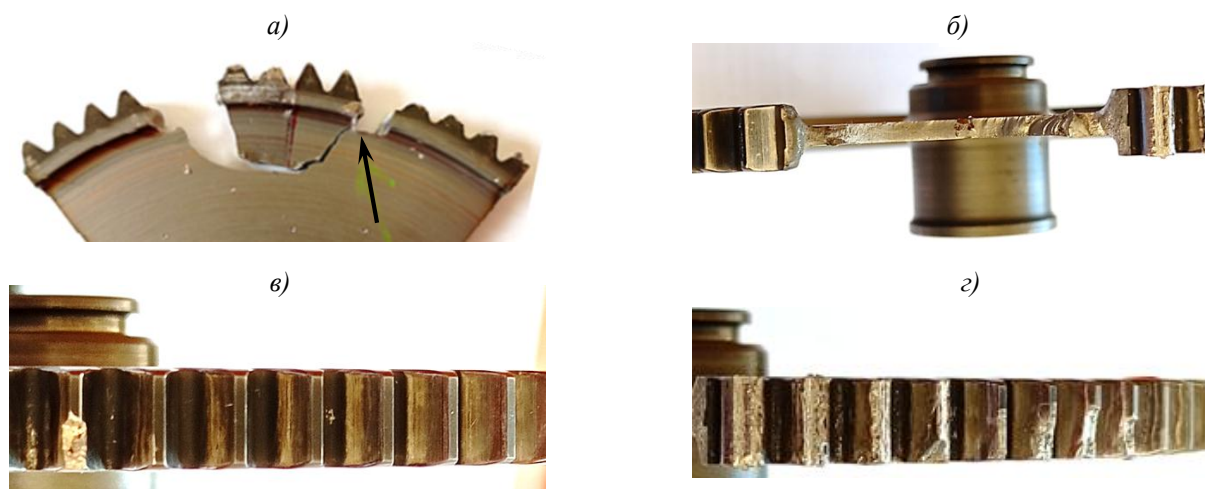


Рис. 9. Общий вид фрагментов шестерни (*а*, *б*) и поврежденных зубьев (*в*, *г*)

Исследование микроструктуры шестерни (рис. 10) показало, что глубина и твердость цементованного слоя соответствуют требованиям нормативно-технической документации. В макро- и микроструктуре металлургических дефектов или дефектов термической обработки и цементации не обнаружено.

Установлено отсутствие одного зуба в месте очага разрушения (стрелка на рис. 9, *а*). Осмотр излома выявил участок на полотне шестерни, от которого в обе стороны распространялась усталостная трещина (рис. 9, *б* и 11, *а*), однако данный участок не является очагом разрушения, а наблюдаемая поверхность разрушения – результат развития (разветвления) первичной трещины.

Осмотр отделившихся фрагментов на растровом микроскопе выявил очаг разрушения, находящийся на фаске межзубной впадины одного из отделившихся фрагментов (рис. 11), от которого распространялась первичная усталостная трещина. Вблизи очага обнаружены риски от механической обработки (рис. 12, *б*), поверхность излома в очаге повреждена.

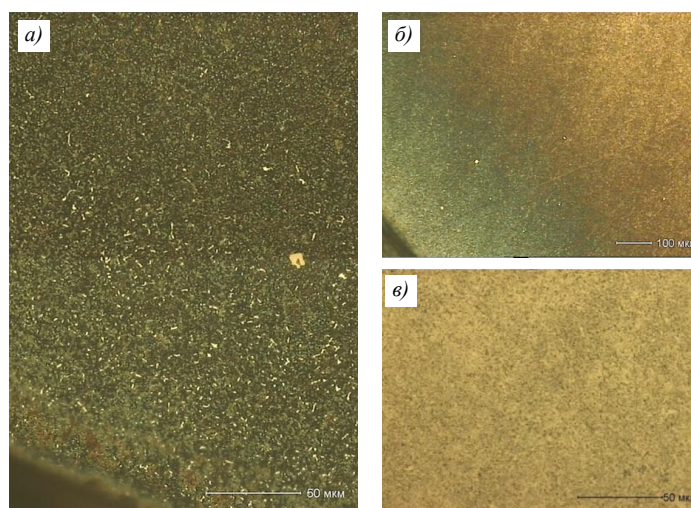


Рис. 10. Микроструктура шестерни: *а, б* – цементованный слой; *в* – сердцевина

Осмотр соседних межзубных впадин также показал наличие глубоких рисок на поверхности фасок, что указывает на проведение механической зачистки. Область межзубных фасок вследствие цементации приобретает высокую твердость, что, в свою очередь, ведет к снижению пластичности. Глубокие риски, наведенные в этой области, становятся концентраторами напряжений и способны стать очагами разрушения.

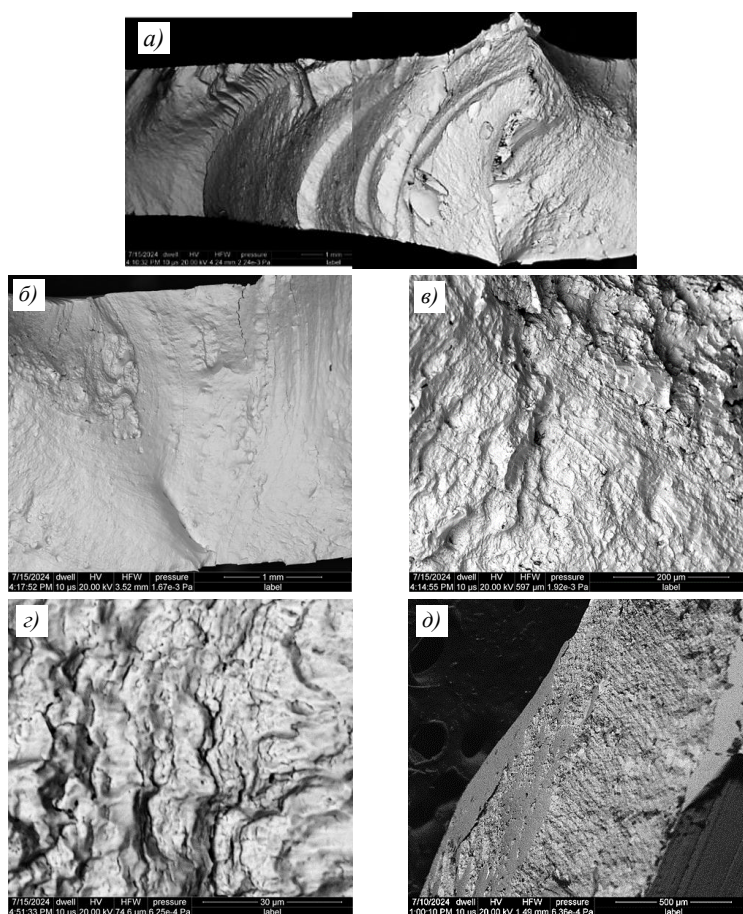


Рис. 11. Вид излома шестерни: *а* – выступ, показанный стрелкой на рис. 9, *а; б-г* – характерный усталостный рельеф по обе стороны от выступа; *д* – участок в центральной части излома с повторно-статическим разрушением

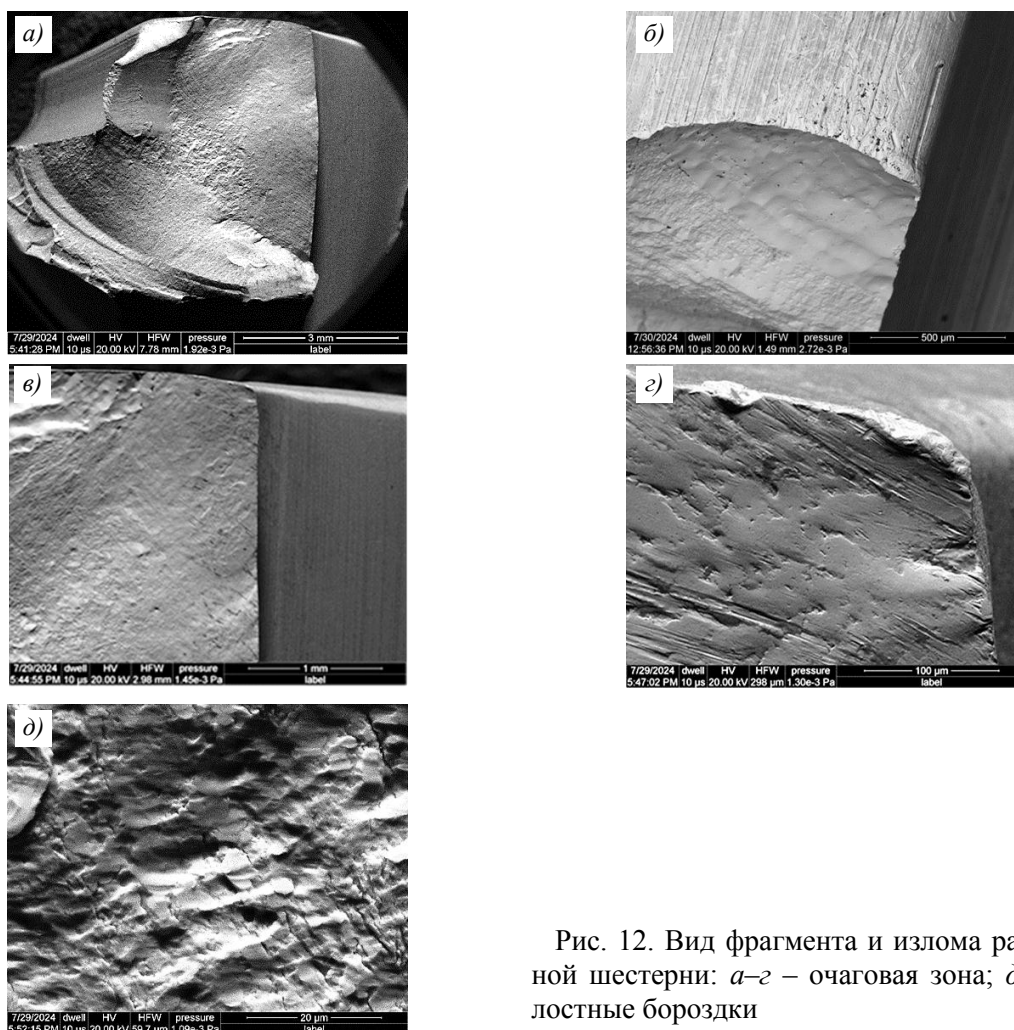


Рис. 12. Вид фрагмента и излома разрушенной шестерни: *a–c* – очаговая зона; *д* – усталостные бороздки

Согласно результатам исследования, материал шестерни по химическому составу, твердости, микроструктуре сердцевины и цементованного слоя соответствует требованиям нормативно-технической документации. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных на поверхности межзубной впадины.

Заключения

В результате проведенного анализа установлено, что материалы исследованных деталей двигателя *1* соответствуют требованиям чертежей и нормативно-технической документации – в структуре отсутствуют металлургические дефекты. Отклонения от заявленного химического состава или нарушения в процессах термической обработки не выявлены.

Обнаруженные структурные изменения материала кольца подшипника, наличие цветов побежалости на его внутренней поверхности и вмятин неправильной формы от шариков указывают на разогрев до температуры, значительно превышающей рабочую, и свидетельствуют о недостаточном смазывании подшипника в процессе эксплуатации.

По результатам проведенного исследования установлено: первым вследствие недостатка смазочного материала вышел из строя подшипник, что, в свою очередь, привело к разрушениям вала и гайки. Наиболее вероятными причинами разрушения деталей двигателя *1* являются нарушения в системе подачи масла.

Анализ шестерни двигателя *2* показал, что по химическому составу, твердости, микроструктуре сердцевины и цементованного слоя материал детали соответствует

требованиям нормативно-технической документации. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных на поверхности межзубной впадины.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Metallurgy, 1966. Т. 1. 741 с.
4. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Metallurgy, 1966. Т. 2. 532 с.
5. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тоньшева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-159-174.
6. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 180–191.
7. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
8. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Наприенко С.А. Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
10. Морозова Л.В., Орлов М.Р. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S1 (38). С. 37–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48.
11. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
12. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г. и др. Влияние фазового состава аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш на характеристики сухого трения скольжения в трибоконтакте со сталью ШХ15 // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 10. С. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
13. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Metallurgy, 1980. 264 с.
14. Гулина И.В., Седов О.В., Яковлев Н.О., Гриневич А.В. Особенности испытания подшипниковой стали // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
15. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Metallurgy, 1983. 352 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.

2. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., abrid. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 1, 741 p.
4. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., abrid. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 532 p.
5. Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Pokrovskaya N.G., Tonysheva O.A. High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-159-174.
6. Petrakov A.F., Shalkevich A.B. High-strength steels in aircraft construction. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS–VIAM, 2002, pp.180–191.
7. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
8. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Orlov M.R., Grigorenko V.B., Morozova L.V., Naprienko S.A. Research of operational damages of bearings by methods of optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 9. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
10. Morozova L.V., Orlov M.R. Research of failure causes of cogwheels in operational process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S1, pp. 37–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48.
11. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
12. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G. et al. Influence of the phase composition of austenitic-martensitic TRIP steel VNS9-Sh on the characteristics of dry sliding friction in tribocontact with steel ShKh15. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2021, no. 10. pp. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
13. Spektor A.G., Zelbet B.M., Kiseleva S.A. *Structure and properties of bearing steels*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p.
14. Gulina I.V., Sedov O.V., Yakovlev N.O., Grinevich A.V. Features of the tested bearing steel. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10 (82), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
15. Zolotarevsky V.S. *Mechanical properties of metals*: textbook for universities. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p.

Информация об авторах

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Григоренко Валентина Борисовна, ведущий инженер, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Терехин Андрей Михайлович, начальник центральной заводской лаборатории, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Information about the authors

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina B. Grigorenko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Andrey M. Terekhin, Head of the central factory laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.11.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.11.2024.