

УДК 669.017

Л.В. Морозова¹, В.Б. Григоренко², Д.В. Конышев³, А.И. Власов³

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ СЕПАРАТОРОВ ОДНОРЯДНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-84-94

Данная работа посвящена актуальным вопросам установления причин выхода из строя однорядных радиальных подшипников качения. Рассмотрены случаи разрушения сепараторов различных конструкций, приведших к потере работоспособности подшипников. Методами металлографии и фрактографии высокого разрешения исследованы структура и характер разрушения материалов деталей подшипников. Установлены основные причины разрушения сепараторов: некачественные сборка и монтаж детали в узел изделия и абразивный износ в процессе эксплуатации, обусловленный недостатком смазочного материала.

Ключевые слова: подшипник, разрушение, сталь, растровая электронная микроскопия, фрактография, усталостное разрушение, микроструктура, сепаратор.

L.V. Morozova¹, V.B. Grigorenko², D.V. Konyshev³, A.I. Vlasov³

REASONS FOR THE DESTRUCTION OF SEPARATORS SINGLE-ROW RADIAL ROLLING BEARING STUDY

This study focuses on topical issues of identifying the causes of failure of single row radial rolling bearings. Considered the cases of destruction of separators of various designs, which led to loss of bearings performance. Methods of metallography and high resolution fractography investigated the structure and nature of destruction of materials of bearing parts. The main causes of the destruction separators are established: poor-quality assembly and installation of the part in the product assembly and abrasive wear during operation, caused by a lack of lubricant.

Keywords: bearing, destruction, steel, scanning electron microscopy, fractography, fatigue failure, microstructure, separator.

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

²Производственный Комплекс «Салют» Акционерное общество «Объединенная двигателестроительная корпорация» [Industrial Complex «Salut» Joint-Stock Company «United Engine Corporation»]; e-mail: info@uecrus.com

³Акционерное общество «Электропривод» [Joint-Stock Company «Electroprivod»]; e-mail: mail@epv.ru

Введение

В конструкцию подавляющего числа сложных технических систем (СТС) входят подшипники качения. Для их изготовления применяются наиболее качественные материалы как отечественного, так и зарубежного производства [1–3]. Стабильная работа подшипников на протяжении всего срока службы изделия по большей части зависит как от качества самого материала, уровня технологии производства деталей, качества сборки, установки, так и от соответствия эксплуатационных параметров типоразмеру выбранного конструктором подшипника. Множество факторов, влияющих на рабочий ресурс, обуславливает сложность реализации потенциальных возможностей деталей.

Лишь малая часть отказов подшипников происходит из-за низкого металлургического качества материалов, около трети отказов – вследствие образования усталостных повреждений дорожек качения, а большая часть – результат повреждений при монтаже, отсутствие смазывания, наличие посторонних загрязнений или несоответствие имеющихся в конструкции нагрузок выбранному типоразмеру подшипников [4, 5]. Наиболее часто нарушение режимов эксплуатации подшипников приводит к перегрузке отдельных деталей и, как следствие, к нештатной работе отдельных узлов в составе СТС. Необходимо учитывать, что эксплуатационные разрушения СТС, к которым относятся и газотурбинные двигатели, могут привести к масштабным разрушениям или катастрофам.

Исследованию основных материалов для изготовления подшипников (таких как стали ШХ15, ЭИ347(8Х4В9Ф), 95Х18 и других) посвящено множество работ [6–8], однако, очень мало внимания уделяется разрушению сепараторов, хотя и при их разрушении подшипник в целом выходит из строя.

Сепаратор – вспомогательный элемент конструкции, который при нормальных условиях эксплуатации и наличии достаточного количества смазки является самой ненагруженной деталью подшипника. Сепараторы подшипников могут быть массивными и разборными (составными) с различными способами фиксации частей сепаратора.

Сепараторы подшипников должны обеспечивать длительную равномерную работу тел качения, удерживая их на заданном расстоянии с целью минимизации сил трения и тепловыделения, равномерного распределения нагрузки, снижения шума, предотвращения проскальзывания, а также удержания тел качения в разборных конструкциях подшипников при монтаже [9, 10].

Сепараторы могут быть изготовлены из латуни, бронзы, текстолита и других материалов. Для ответственных изделий в конструкциях подшипников часто применяют массивные сепараторы, изготовленные из латуни или бронзы (БрАЖМц10-3-1,5). В высокоскоростных приборных подшипниках применяются сепараторы с высокой износостойкостью, упругостью и малой массой. Таким характеристикам соответствуют сепараторы из текстолита, изготавливаемого по специальным техническим условиям.

Одной из основных причин выхода из строя высокоскоростных подшипников качения является разрушение сепаратора. Из-за ошибок при монтаже происходит изнашивание гнезд (окон) сепаратора, перекося при установке колец может вызвать образование трещин как в сепараторе, так и в самих кольцах. Работа подшипника с трещиной в сепараторе приводит к разрыву перемычки, образованию трещины на второй перемычке этого же гнезда и разрушению сепаратора. При недостатке смазки сепаратор изнашивается в местах контакта с кольцами и элементами качения. Абразивный износ также вызывают попавшие в подшипник сторонние частицы, которые вклиниваются между сепаратором и элементами качения [11–13].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Целью данной работы являются установление причин и характера разрушения сепараторов однорядных радиальных подшипников качения и оценка качества материала деталей для снижения факторов риска, влияющих на инициацию процесса разрушения подшипника [15, 16].

Материалы и методы

Химический состав деталей подшипников определяли на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 EXPLORER по ГОСТ 28033–89. Определение содержания углерода и серы выполнили на анализаторе LECO CS 600.

Исследования поверхности и микроструктуры деталей подшипников выполнили методами растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа и оптической микроскопии с применением комплекса Leica. Материал подшипников проверяли на соответствие ГОСТ 1778–70 «Сталь. Методы определения неметаллических включений», ГОСТ 801–78 «Сталь подшипниковая. Технические условия» и ГОСТ 56299–2014 «Прокат из подшипниковой стали». Подготовку металлографических образцов осуществляли с использованием оригинальных материалов для полирования DP-Suspension M с размером частиц 3 и 1 мкм, а также OP-U Suspension на основе коллоидного кремния.

Измерения твердости проводили на приборе DuraVision 300 в соответствии с ГОСТ 9013–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу» и ГОСТ 2999–75 «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу».

Измерения микротвердости проводили на твердомере DuroScan 20 при нагрузке 100 г в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Инфракрасную спектроскопию образцов, вырезанных из текстолита сепаратора, проводили на ИК-Фурье спектрометре Tensor 27 фирмы Bruker (Германия) в режиме нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Анализ проводили в диапазоне волновых чисел от 650 до 4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Результаты

Исследование эксплуатационного разрушения шарикоподшипников из стали ШХ15 с текстолитовым сепаратором

Проведено комплексное исследование деталей трех подшипников марки 34-100E1: один новый (условный номер 1), не подвергавшийся эксплуатации, и два разрушенных в процессе эксплуатации подшипника (условные номера 2 и 3). При выходе из строя подшипников 2 и 3 наружное и внутреннее кольца, а также шарики не имели видимых повреждений, в то время как сепараторы были разрушены на мелкие фрагменты. Общий вид разрушенных подшипников показан на рис. 1.

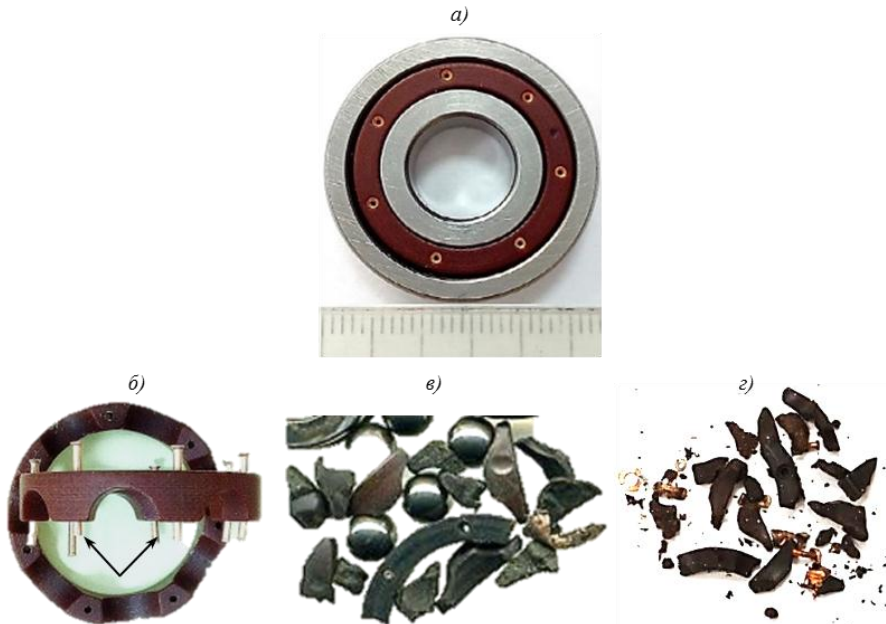


Рис. 1. Детали подшипника марки 34-100E1:

a – вид нового подшипника в сборе; *б* – составной сепаратор нового подшипника (стрелками показаны заклепки); *в*, *г* – фрагменты разрушенных сепараторов подшипников 2 и 3

Визуальный осмотр стальных деталей подшипников 2 и 3 показал, что на торцах и поверхностях качения колец наблюдаются незначительные механические повреждения поверхности, цвета побежалости и загрязнения, которые могли быть получены после разрушения сепаратора. Следов эксплуатационного неравномерного абразивного износа и притертостей на поверхностях дорожек качения обоих подшипников не обнаружено.

Определение химического состава металлических деталей трех подшипников подтвердило, что они соответствуют стали марки ШХ15, согласно ГОСТ 801–78.

Исследования материала подшипника 1 показали, что твердость шариков, наружного и внутреннего колец соответствует требованиям ГОСТ 801–78 «Сталь подшипниковая. Технические условия» и составляет 62–63 HRC, микроструктура – мартенсит отпуска и карбиды, металлургических дефектов, структурной неоднородности и неметаллических включений не выявлено, т. е. материал соответствует требованиям указанного стандарта.

Металлографическое исследование подшипников 2 и 3 с разрушенными сепараторами показало, что исходное качество стальных деталей соответствовало требованиям ГОСТ 801–78, однако в приповерхностных слоях наблюдались признаки перегрева. Установлено, что твердость поверхности колец разрушенных подшипников находится на уровне 58–59 HRC, что ниже требуемого значения (не менее 61 HRC) по ГОСТ 801–78. Микроструктура колец и шариков подшипников – троостомартенсит и карбиды (рис. 2).

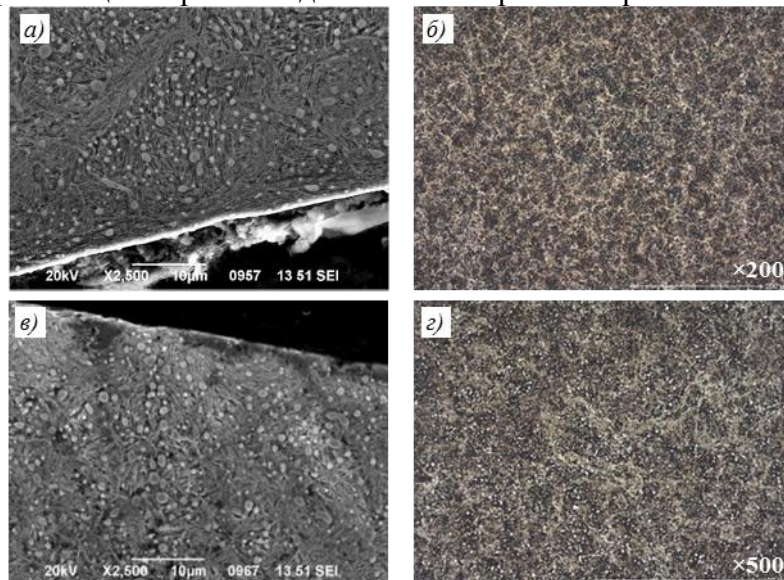


Рис. 2. Характерная микроструктура стальных фрагментов деталей подшипников 2 (а, б) и 3 (в, г) с разрушенными сепараторами: электронная (а, в) и оптическая микроскопия (б, г)

Металлургических дефектов (по ГОСТ 10243–75) в материале деталей подшипников не обнаружено, содержание неметаллических включений – менее 1 балла (по ГОСТ 1778–70), дефектов в микроструктуре в виде полосчатости, карбидной сетки и карбидной ликвации (по ГОСТ 801–78) не наблюдается.

Снижение твердости поверхностных слоев подшипников 2 и 3 вызвано разогревом, который наблюдался в процессе работы подшипников с разрушающимися сепараторами – собранные после остановки узла и разборки подшипников фрагменты сепаратора имели своеобразный запах гари и были частично обуглены.

Поскольку материалом для изготовления сепараторов подшипников данной марки служит текстолитовая трубка (ТУ6-19-317–86), то был проведен ИК-анализ исходного сепаратора с подшипника 1 и фрагментов сепараторов подшипников 2 и 3 после повреждения.

Исследованы твердые образцы коричневого (исходный образец) и черного (образец после повреждения) цветов. На ИК-спектрах зафиксировано гало с максимумом при 3337 см^{-1} , характерное для ОН-групп, что может указывать на присутствие в качестве наполнителя органических волокон на основе полисахаридов – например, хлопковых волокон. По литературным научно-техническим данным, колебания при волновых числах 1054 и 1031 см^{-1} могут указывать на использование в качестве наполнителя хлопка. После повреждения материала сепаратора в ИК-спектрах сохраняются основные колебания армирующего наполнителя (хлопка), однако при этом появляются колебания в области волновых чисел от 1610 до 1500 см^{-1} , что может быть связано с уменьшением содержания наполнителя за счет его выгорания и появлением колебаний матрицы. Следует отметить, что на исходном спектре в данной области колебаний не наблюдается, что также может указывать на образование продуктов окисления или разложения.

Исследования микрошлифов, изготовленных из фрагментов разрушенных сепараторов, показали, что в материале фрагментов сепараторов наблюдается значительное количество пор и трещин (рис. 3, а, б). В сепараторе подшипника 2 обнаружены включения из сплава на основе меди (рис. 3, в).

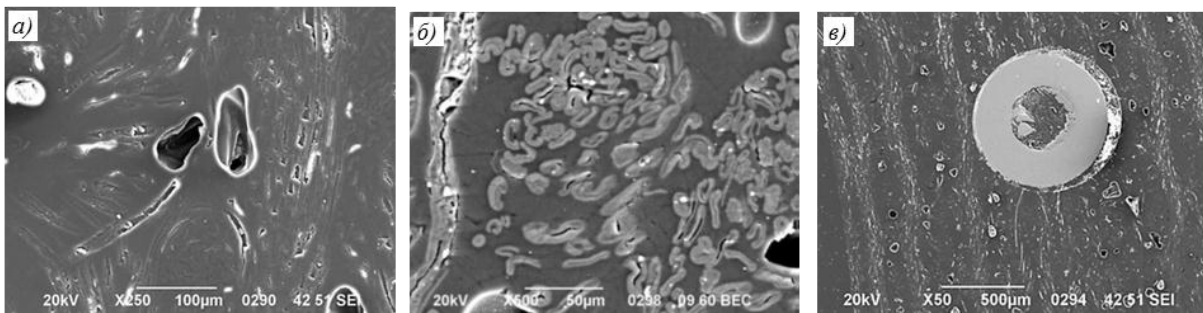


Рис. 3. Микроструктура фрагментов разрушенных сепараторов:

а, б – поры и трещины в материале сепараторов; в – включение из сплава на основе меди

При рентгеноспектральном микроанализе (РСМА) установлено, что основными элементами материала сепаратора являются углерод, кислород и кремний, а металлические заклепки, соединяющие части сепаратора, изготовлены из сплава на основе меди и цинка. Содержание цинка в сплаве составляет $\sim 3\%$ (по массе). Заклепки, снятые с нового сепаратора, представляют собой тонкостенные трубки из сплава на основе меди, содержащего цинк в количестве 4% (по массе), что соответствует сплаву латуни марки Л96 (ГОСТ 15527–70).

Строение изломов фрагментов разрушенных сепараторов с подшипников 2 и 3 показано на рис. 4. Исследование материала нового текстолитового сепаратора показало, что в изломе присутствуют волокна, аналогичные волокнам разрушенных сепараторов. Установлено, что структура разрушенных и нового сепараторов идентична.

При осмотре фрагментов заклепок с разрушенных сепараторов подшипников 2 и 3 установлено, что во всех случаях разрушение произошло на расстоянии ~ 2 мм от развальцованного торца. Общий вид разрушенных заклепок показан на рис. 5.

Видно изменение диаметра заклепки от места развальцовки до излома. Установлено, что относительное сужение при разрушении заклепок составляет приблизительно от 5 до 30% , что свидетельствует о наличии растягивающих напряжений, действующих вдоль оси заклепки в процессе эксплуатации подшипника.

При исследовании изломов фрагментов разрушенных заклепок с сепаратора подшипника 2 обнаружены области с усталостным рельефом (рис. 6).

На изломе фрагмента заклепки, показанного на рис. 6, б, з, усталостное разрушение отмечено с наружной и внутренней поверхности. На изломах других фрагментов усталостное разрушение зафиксировано только со стороны отверстия, а с наружной стороны наблюдается рельеф, характерный для растяжения пластичного материала.

Комплексное исследование подшипников после эксплуатации позволило предположить следующую последовательность развития их разрушения. В результате воздействия циклических нагрузок в процессе эксплуатации элемента конструкции, содержащего подшипниковый узел, образовались усталостные трещины в заклепках сепаратора, развивающиеся от повреждений поверхности. Окончательное разрушение заклепок проходило с формированием вязкого среза, характерного для разрушения пластичных материалов и латуни в частности.

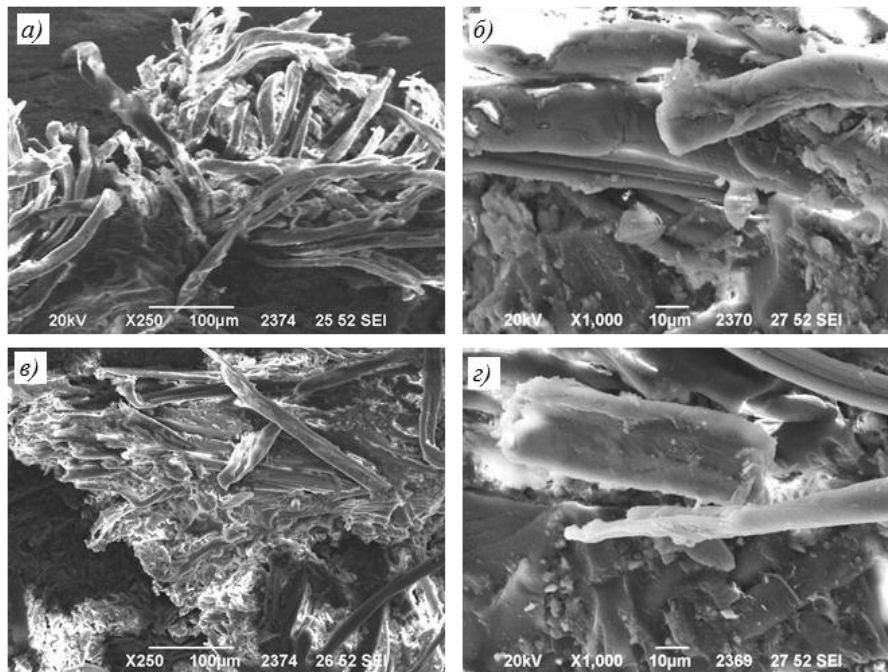


Рис. 4. Строение изломов фрагментов разрушенных сепараторов подшипников 2 (а, б) и 3 (в, г)

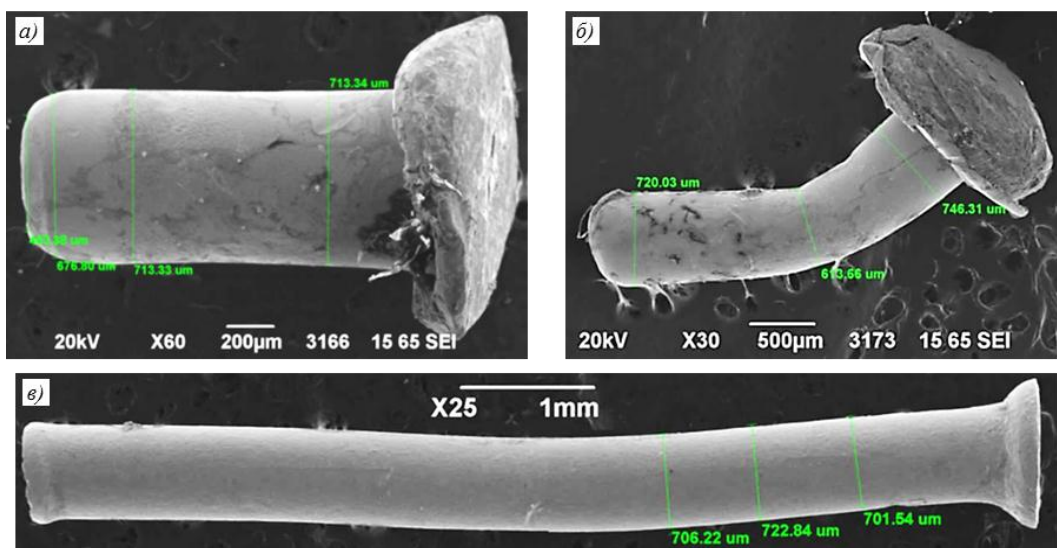


Рис. 5. Общий вид фрагментов заклепок разрушенных сепараторов подшипников 2 (а) и 3 (б) и заклепка с сепаратора подшипника 1 (в)

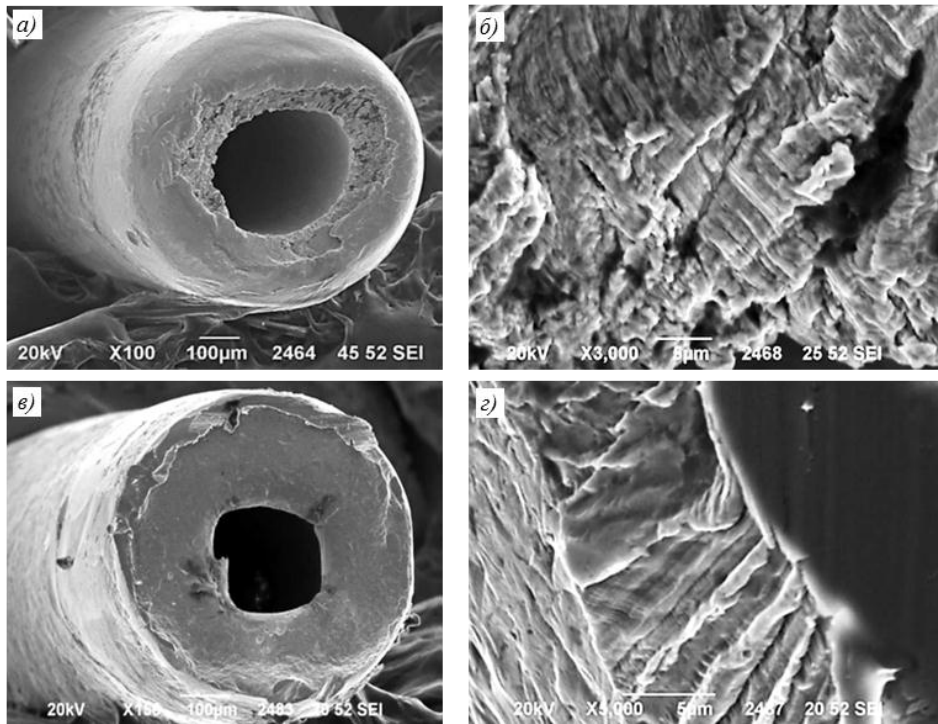


Рис. 6. Общий вид изломов фрагментов заклепок разрушенных сепараторов (а, в) и вид изломов со следами усталостного разрушения (б, г)

Утонение сечения заклепок в области излома свидетельствует о действии растягивающих напряжений и удлинении заклепки в процессе эксплуатации.

Уменьшение сечения и увеличение длины заклепок привело к увеличению зазоров между частями сепаратора и выпадению шариков из ячеек сепаратора. Смещение шариков относительно посадочных мест в сепараторе могло вызвать заклинивание подшипника, нагрев деталей и окончательное разрушение как заклепок, так и текстолитовых деталей составного сепаратора.

В ходе проведенного комплексного исследования фрагментов подшипников установлено, что:

- материал стальных деталей подшипников марки 34-100E1 (1–3) соответствует стали ШХ15 по ГОСТ 801–78. Металлургических дефектов (по ГОСТ 10243–75), а также дефектов в микроструктуре в виде полосчатости, карбидной сетки и карбидной ликвации (по ГОСТ 801–78) в материале деталей подшипников не обнаружено. Содержание неметаллических включений во всех исследованных деталях подшипников – менее 1 балла по ГОСТ 1778–70;

- следов неравномерного износа на поверхностях качения обоих разрушенных подшипников (2 и 3) не обнаружено;

- вследствие перегрева подшипников при эксплуатации (до разрушения) твердость деталей (колец) обоих подшипников (2 и 3) по всему объему составляет 57–58 HRC, что не соответствует требуемой по нормативной документации твердости (не менее 61 HRC по ГОСТ 801–78). Микроструктура материала подшипников (колец и шариков из стали ШХ15) представляет собой троостомартенсит;

- разрушение сепараторов в подшипниках 2 и 3 связано с образованием и развитием усталостных трещин в заклепках из сплава латуни марки Л96 и их последующим разрушением, что привело к выходу подшипников из строя;

- выход подшипников 2 и 3 из строя связан с недостатками монтажа детали в узел изделия и конструктивными особенностями сепаратора.

*Исследование эксплуатационного разрушения шарикоподшипника
из стали ЭИ347 с бронзовым сепаратором*

Разрушение сепаратора подшипника 6-46205Р обнаружено после наработки менее 400 ч. Подшипник изготовлен из стали марки ЭИ347, сепаратор – из бронзы БрАЖМц10-3-1,5.

На наружной поверхности фрагментов сепаратора обнаружен участок абразивного износа материала глубиной ~1 мм и шириной ~3 мм (рис. 7, а, стрелки). Наблюдается также незначительный по глубине неравномерный абразивный износ поверхности, достигающий максимальной ширины под окнами сепаратора. В некоторых фрагментах именно в этих областях имеются сквозные трещины (стрелки на рис. 7, б, в).

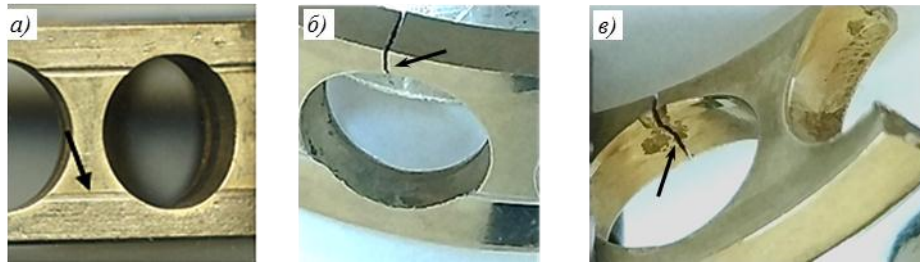


Рис. 7. Общий вид фрагментов бронзового сепаратора:

а – наружная поверхность, абразивный износ; б – трещина от наружной поверхности; в – трещина от внутренней поверхности окна

Исследование фрагментов сепаратора при увеличении показало, что с внутренней стороны вокруг окон наблюдается неравномерное истирание поверхности. Во всех сохранившихся фрагментах со стороны менее выраженного истирания обнаружены сквозные и развивающиеся к торцу сепаратора трещины. В месте разрушения с внутренней поверхности окон сепаратора имеются выкрашивания. Наблюдаются также притертости и забоины в окнах со стороны внутренней поверхности сепаратора.

Изломы фрагментов сепаратора, образовавшиеся при разрушении подшипника, затерты до металлического блеска. На некоторых изломах в сохранившихся участках виден характерный для усталостного разрушения рельеф (рис. 8, а–в). Для проведения фрактографического анализа вскрыта трещина в одном из фрагментов.

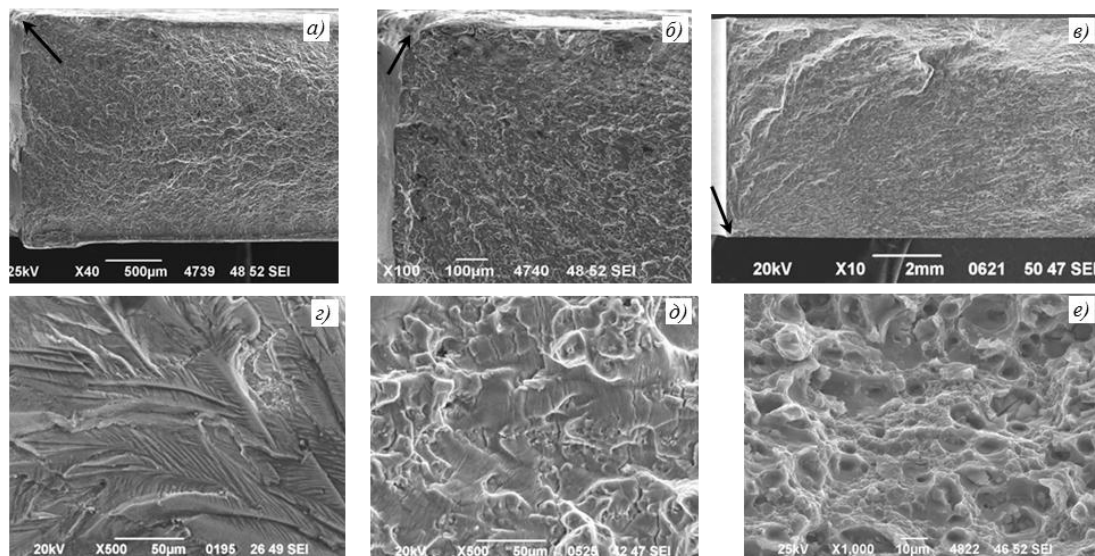


Рис. 8. Вид изломов фрагментов сепаратора:

а–в – усталостное разрушение, развивающееся от повреждений поверхности сепаратора; з, д – строение усталостной зоны вскрытой трещины; е – строение в зоне однократного разрушения

Анализ строения излома показал, что он имеет усталостный характер, очаг трещины расположен на внутренней поверхности сепаратора. Разрушение развивалось от абразивного повреждения поверхности вблизи окна сепаратора. Усталостная трещина развилась на глубину порядка 0,6 мм. В доломе разрушение вязкое, ямочное, характерное для статического разрушения бронзы БрАЖМц10-3-1,5.

При исследовании поверхности окон сепаратора методом РСМА посторонних включений, не характерных для материала, не обнаружено.

Исследованы кольца и шарики данного подшипника. На поверхности деталей из стали ЭИ347 при визуальном осмотре обнаружены незначительные повреждения. Так, на наружном кольце с внешней и внутренней стороны имеются незначительные риски от наработки. Дорожка качения преимущественно гладкая, блестящая, с единичными рисками, расположенными перпендикулярно оси кольца. Со стороны, прилегающей к бортику с меньшим диаметром, отмечено большее количество рисок, расположенных в направлении вращения подшипника.

На внутреннем кольце оба бортика блестящие, гладкие. На дорожке качения отмечены риски, расположенные перпендикулярно оси кольца (рис. 9), а со стороны маркированного буквой Р торца обнаружено наволакивание материала сепаратора на поверхность дорожки (рис. 10).

При визуальном осмотре шариков установлено, что поверхность большинства шариков гладкая, блестящая, без забоин. Поверхность одного из шариков (с условным номером 1) матовая, темно-серого цвета.

При рентгеноспектральном микроанализе шариков установлено, что на поверхности шарика 1 присутствует наволакивание материала сепаратора. На поверхности остальных шариков следы наволакивания материала сепаратора отсутствуют.

Исследование структуры фрагментов подшипника из стали ЭИ347 (8Х4В9Ф2Ш) показало, что карбидная неоднородность не превышает допустимую; микроструктура шариков, наружного и внутреннего кольца представляет собой мартенсит отпуска с распределенными карбидами, что соответствует требованиям нормативной документации. Количество неметаллических включений не превышает 1 балла по ГОСТ 1778–70. Твердость шариков и наружного кольца подшипника 63 HRC, внутреннего кольца 61 HRC, что также соответствует нормативной документации.

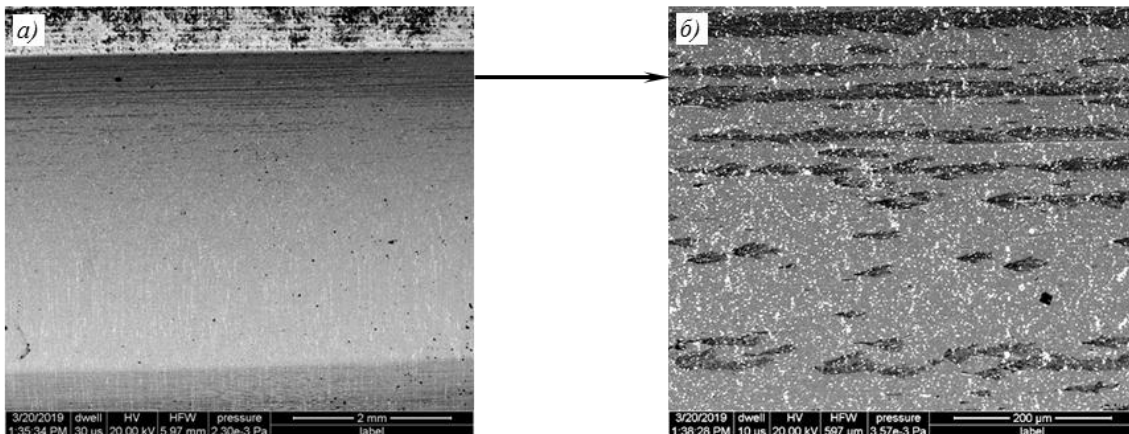


Рис. 9. Вид поверхности колец подшипника:
а – дорожка качения; б – риски на дорожке качения

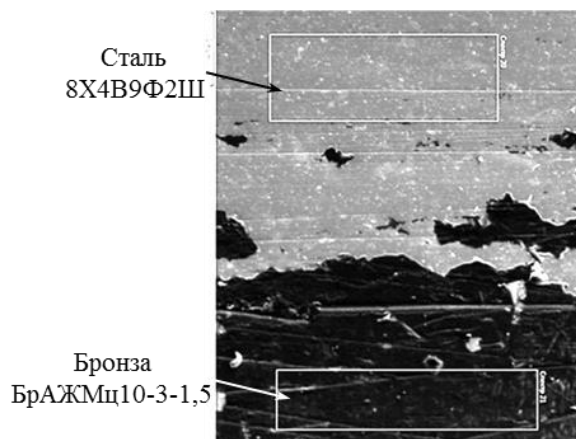


Рис. 10. Наволакивание материала сепаратора на дорожке качения внутреннего кольца

В ходе проведенного комплексного исследования фрагментов разрушенного подшипника марки 6-46205P установлено, что:

- материал шариков, наружного и внутреннего колец соответствует стали марки ЭИ347 (согласно ТУ14-1-1968–77), сепаратор – бронзе БрАЖМц10-3-1,5 (согласно ГОСТ 18175–78);

- микроструктура шариков, наружного и внутреннего колец является типичной для стали ЭИ347 после упрочняющей термообработки и представляет собой мартенсит отпуска с распределенными карбидами, что соответствует требованиям нормативной документации;

- количество неметаллических включений не превышает 1 балла по ГОСТ 1778–70;

- твердость шариков и наружного кольца подшипника составляет 63 HRC, внутреннего кольца 61 HRC, что соответствует требованиям чертежа и нормативной документации (60–65 HRC);

- на поверхностях качения одного из шариков и внутреннего кольца обнаружено наволакивание материала сепаратора;

- на наружной поверхности сепаратора обнаружены следы неравномерного абразивного истирания, что указывает на воздействие осевой нагрузки, возникшей вследствие незначительного перекоса при монтаже;

- на поверхностях окон сепаратора имеются притертости и выкрашивания; в окнах сепаратора обнаружены трещины, имеющие усталостный характер;

- на поверхности окон сепаратора посторонних материалов не обнаружено.

Разрушение сепаратора произошло в результате неравномерного абразивного изнашивания в процессе эксплуатации.

Обсуждение и заключения

В результате комплексного исследования установлено, что по химическому составу, механическим свойствам и микроструктуре детали соответствуют требованиям нормативной документации и разрушение в процессе эксплуатации не связано с качеством материала подшипников.

Разрушение текстолитовых сепараторов в подшипниках марки 34-100E1 связано с образованием и развитием усталостных трещин в заклепках из сплава латуни марки Л96 и их последующим разрушением, что привело к выходу подшипников из строя. Образованию усталостного разрушения способствовало наличие вибрации, обусловленной недостатками монтажа детали в узел изделия.

Разрушение бронзового сепаратора подшипника марки 6-46205P произошло в результате неравномерного абразивного изнашивания в процессе эксплуатации.

Неравномерное истирание поверхности сепаратора указывает на недостаток смазочного материала и воздействие осевой нагрузки, возникшей вследствие незначительного перекаса при монтаже.

Таким образом, решающим фактором, обеспечивающим длительность эксплуатации, является качество сборки и установки подшипников. Усиление контроля качества сборки и монтажа детали в узел изделия, а также контроль и проверка качества смазочного материала позволят предотвратить досрочный выход из строя авиационных подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
4. Спришевский А.М. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 632 с.
5. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
6. Спектор А.Г., Зельберт Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
7. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
8. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1 (37). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
9. Беркович М.С. Долговечность подшипников качения в условиях несоосности их колец // Вестник машиностроения. 1983. №10. С. 9–12.
10. Кунина П.С., Величко Е.И., Нижник А.Е., Музыкантова А.В., Абессоло М. Анализ дефектов опорных элементов газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов // Территория Нефтегаз. 2016. №4. С. 68–75.
11. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше И.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
12. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
13. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тоньшева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионноустойчивые 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.
14. 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.
15. 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: 12.08.2019).
16. Бронфин М.Б., Алексеев А.А., Чабина Е.Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 353–365.