

УДК 620.187

*М.Р. Орлов<sup>1</sup>, В.Б. Григоренко<sup>1</sup>, Л.В. Морозова<sup>1</sup>, С.А. Наприенко<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ, РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО МИКРОАНАЛИЗА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79

*Рассмотрены различные виды разрушений подшипников сложных технических систем, являющиеся как причиной отказа, так и следствием нарушения условий их эксплуатации. На примере разрушившихся в период эксплуатации или при испытаниях подшипников установлены причины потери их работоспособности. Методами растровой электронной микроскопии исследованы механизмы усталостного и статического разрушения деталей из подшипниковых сталей. Методом рентгеноспектрального микроанализа исследованы дефекты металлургического происхождения в очаговых зонах разрушения подшипников. Методами оптической микроскопии исследована микроструктура разрушенных деталей подшипников и установлен характер ее изменения в случае термического влияния.*

**Ключевые слова:** *подшипниковые стали, фрактография, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, статическое и усталостное разрушение.*

*Different types of operational damages of bearings of the complex technical systems, being both a cause of failure and consequence of violation of operation conditions are considered. On example of bearings damaged under operation or at tests the reasons of loss of their working capacity are established. Methods of Scanning Electron Microscopy have been used for investigation of mechanisms of fatigue and static failure of parts from bearing steels. Defects of metallurgical origin in the central zones of damages of bearings have been investigated by method of X-ray Microanalysis. Microstructure of the damaged parts of bearings has been studied by method of optical microscopy and a nature of its change in case of thermal influence has been determined*

**Keywords:** *bearing steels, fractography, Scanning Electron Microscopy, X-ray Microanalysis, static and fatigue failure.*

---

<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**

Основой успешной реализации стратегических направлений развития материалов и технологий при создании материалов и сложных технических систем (СТС) является соблюдение одного из важнейших принципов – реализации полного жизненного цикла: от создания материала до его эксплуатации в конструкции, диагностики, ремонта, продления ресурса и утилизации [1–4]. Применение данного подхода целесообразно как при создании СТС, так и при разработке каждого узла.

Работу подавляющего числа машин и механизмов невозможно представить без подшипников качения. Стабильная работа подшипников на протяжении всего срока

эксплуатации зависит как от качества материалов, из которых изготовлен данный подшипник, так и от качества его сборки, установки, соответствия выбранного типа подшипника действующим нагрузкам. Анализ причин преждевременного выхода из строя подшипников показывает, что примерно треть отказов происходит вследствие образования усталостных повреждений, а две трети – результат повреждений подшипников при монтаже, из-за плохого смазывания или загрязнения [5]. Эксплуатационные разрушения подшипников сложных технических систем, включая авиационные газотурбинные двигатели (ГТД), приводят к масштабным разрушениям конструкций, завершающихся в случаях авиационной техники катастрофами.

Ранее проведенные исследования эксплуатационных разрушений показывают, что их причиной могут быть как дефекты самого материала (металлургические или вызванные нарушениями режимов термической и химико-термической обработки) [6–8], так и нарушения технологии сборки отдельных узлов и условий эксплуатации СТС [9–12]. Дефекты материалов и нарушения режимов эксплуатации могут приводить к перегрузке отдельных деталей, нарушению температурно-силовых условий работы и в результате – к нештатной работе отдельных узлов в составе СТС.

Подобные исследования конструкционных материалов требуют особого подхода [13–15], который был реализован в данной работе, к определению причин эксплуатационных разрушений подшипников различной конструкции из отечественных сталей ШХ15, 95Х18, 8Х4В9Ф2 (ЭИ347) и зарубежной инструментальной стали М50 (США).

### **Материалы и методы**

Металлографические и фрактографические исследования фрагментов подшипников выполнены методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на оптическом микроскопе DM IRM и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV, оснащенный системой энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Микротвердость определяли на микротвердомере DuraScan 80. Химический состав материала определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S4 EXPLORER и оптико-эмиссионном спектрометре APL 4460.

#### ***Исследование эксплуатационного разрушения роликового подшипника из стали М50 прокатного стана***

Для исследования причины выхода из строя подшипника из стали М50 листопркатного стана были отобраны ролики, имеющие необычное для роликоподшипников разрушение, развивающееся от поверхности качения роликов до внутреннего диаметра отверстия под ось сепаратора.

Вскрытый излом одного из роликов со сквозной трещиной позволил установить, что разрушение ролика имеет усталостный механизм с линейным очагом развития, ориентированным вдоль оси ролика и расположенным на одной трети расстояния от внутреннего диаметра до поверхности качения (рис. 1). Исследование усталостного излома с помощью оптического стереомикроскопа выявило наличие структурной аномалии в зоне зарождения усталостной трещины, которая развивалась от внутреннего линейного очага одновременно как в сторону поверхности качения, так и в сторону внутреннего отверстия под шпильку сепаратора.

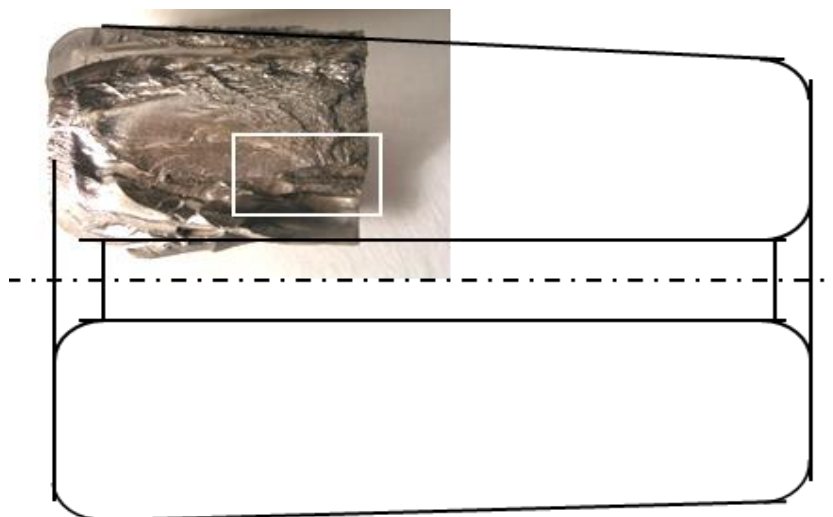


Рис. 1. Схема расположения фрагмента излома в сечении конического ролика (прямоугольником отмечен участок излома, вырезанный для электронно-фрактографических исследований)

Для проведения фрактографического анализа методом РЭМ, из роликоподшипника вырезан фрагмент излома с очаговой зоной усталостного разрушения (рис. 2). При анализе излома в очаговой зоне выявлено повреждение исходной поверхности излома в результате фреттинга при смыкании поверхностей трещины в процессе эксплуатации подшипника. Для анализа структурной аномалии в очаговой зоне выполнены подрез и разрушение материала ролика в тангенциальном направлении, что позволило получить свежий излом в зоне структурной аномалии, пригодный для исследований.

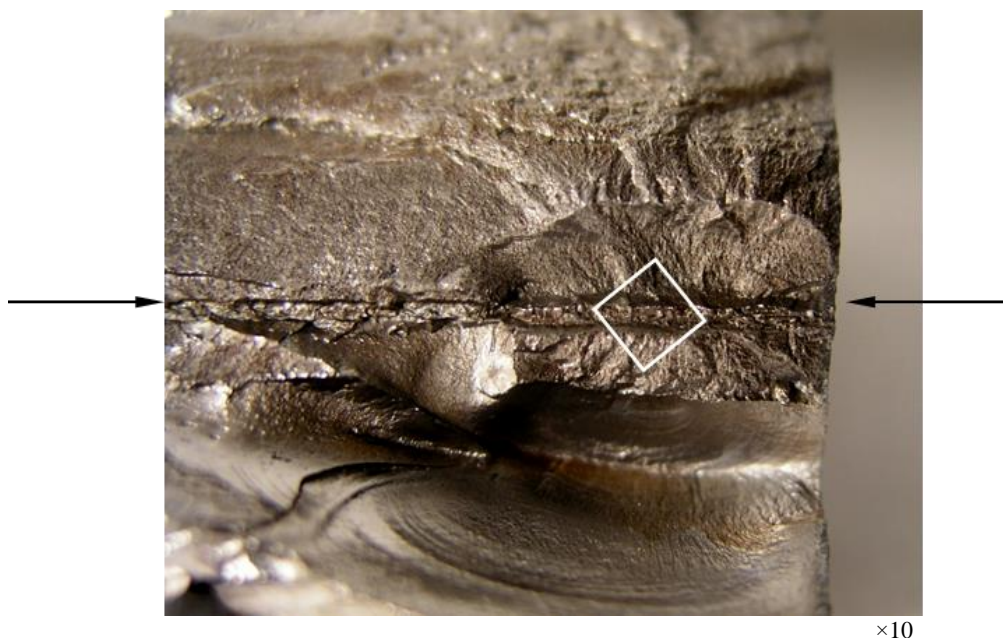


Рис. 2. Расположение структурного дефекта, являющегося очагом усталостного разрушения (белым квадратом отмечена зона анализа металлургического дефекта)

Исследование излома в зоне структурного дефекта показало наличие большого количества вытянутых вдоль направления деформации неметаллических включений

(рис. 3, *a*). Структурный дефект расположен вдоль всего исследованного фрагмента излома ролика и в поперечном направлении имеет значительный размер  $\sim 2$  мм.

Рентгеноспектральный микроанализ, выполненный в режиме точечного зондирования, позволил определить состав неметаллических включений. Включениями, образующими структурный дефект, являются сульфиды марганца. Результаты РСМА, полученные в режиме картирования, иллюстрируют плотность и объем залегания сульфидов (рис. 3, *б–д*). С учетом того что половина сульфидов осталась на ответной части излома, можно оценить уровень загрязненности металла в исследуемой зоне.

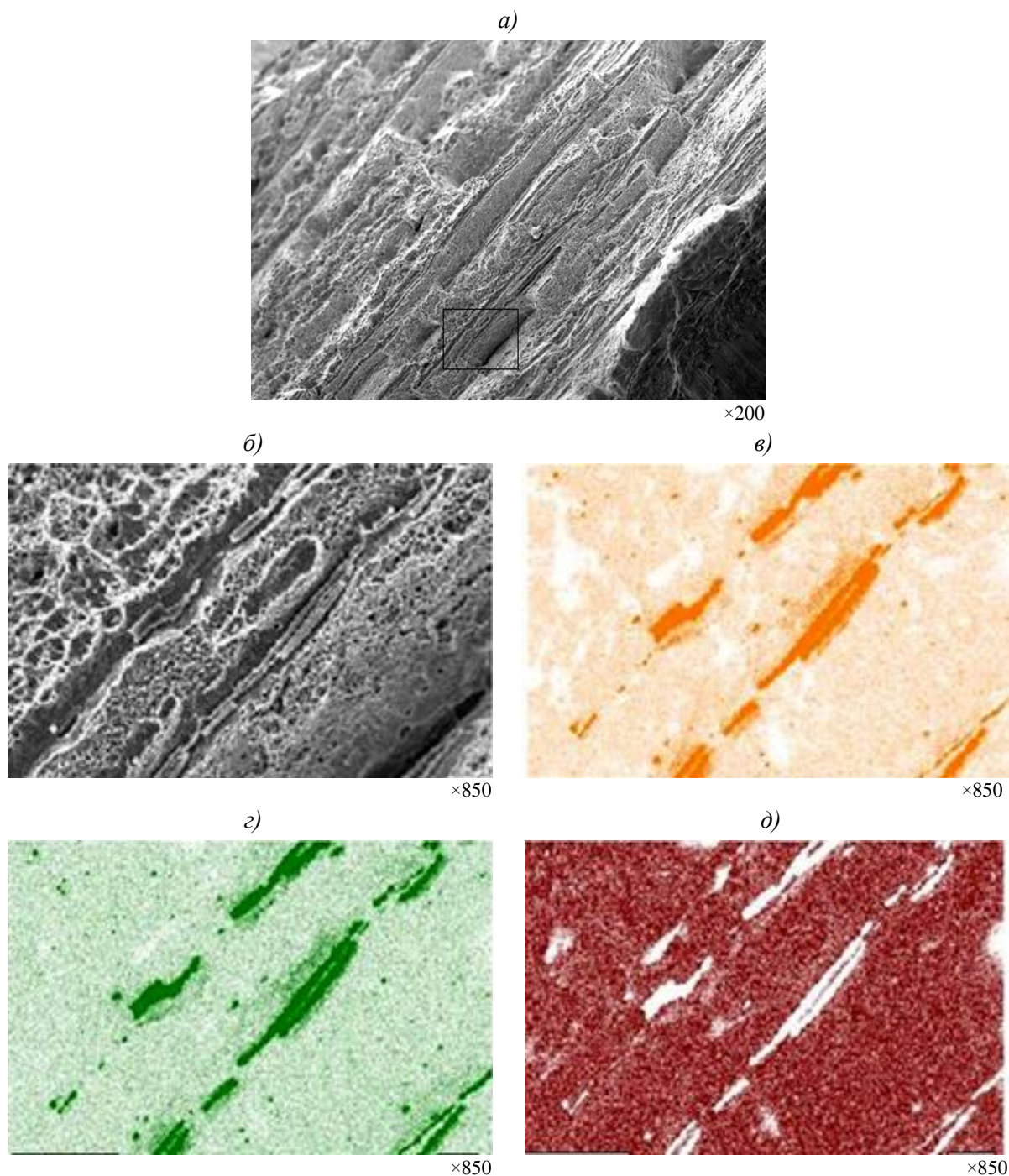


Рис. 3. Микроструктура роликотоподшипника: изображение металлургического дефекта (*a*); то же во вторичных электронах (*б*); то же в S  $K_{\alpha}$ -излучении (*в*); то же в Mn  $K_{\alpha}$ -излучении (*г*); то же в Fe  $K_{\alpha}$ -излучении (*д*)

На основании выполненных исследований можно утверждать, что причиной выхода из строя роликоподшипника из стали М50 является неудовлетворительное качество металла по неметаллическим включениям (сульфидам), которые не были выявлены у поставщика подшипников методами неразрушающего контроля.

***Исследование эксплуатационного разрушения шарикоподшипника, изготовленного из стали 95X18***

В результате испытаний при повышении рабочей температуры до 230°C, определенной при помощи термопары на наружном кольце, шарикоподшипник был остановлен. После испытаний поверхность дорожек качения и шариков была повреждена (рис. 4). При визуальном осмотре фрагмента наружного кольца шарикоподшипника на внешней стороне установлено наличие светлых полос скольжения, на внутренней стороне внутреннего кольца также видны следы скольжения. На дорожке качения присутствуют следы наволакивания и раскатывания металла, отмечается повышенная шероховатость.

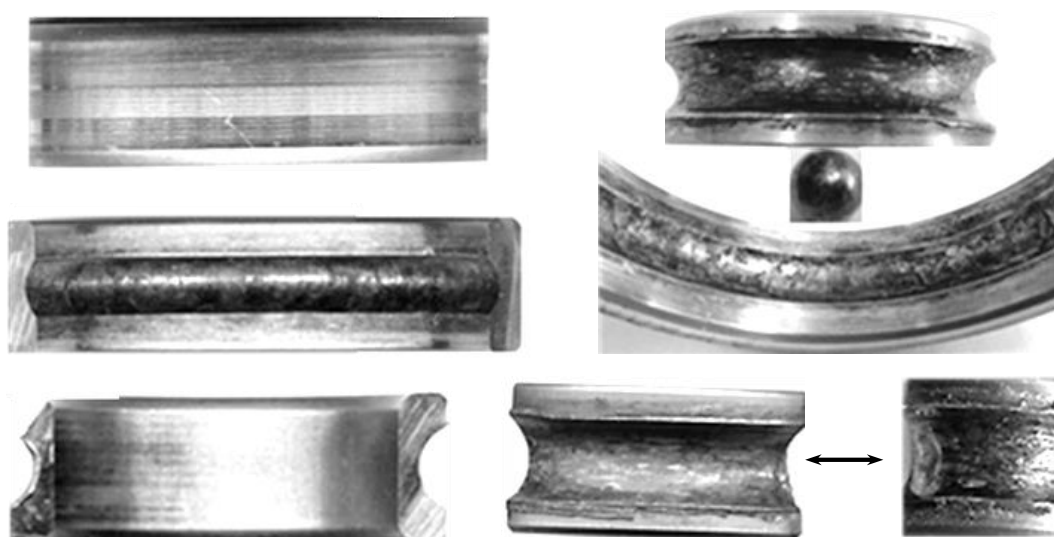


Рис. 4. Внешний вид фрагментов, нерабочих поверхностей и дорожек качения вышедшего из строя шарикоподшипника

При осмотре фрагмента внутреннего кольца на поверхности качения также обнаружены следы наволакивания металла, выноса металла с дорожки качения на поверхность кольца, задиры и чешуйки металла. На дорожке качения обнаружена вмятина, возможно, от шарика. На поверхности шарика обнаружены пятна черного цвета и выкрашивания поверхностного слоя площадью  $\sim 1 \text{ мм}^2$  и глубиной 0,05 мм.

По результатам определения химического состава материала фрагментов шарикоподшипника установлено, что материал исследуемых деталей соответствует заявленной марке стали 95X18 по ГОСТ 5632–72 и имеет пониженное содержание серы.

Анализ нетравленных шлифов фрагментов шарикоподшипника показал, что загрязненность неметаллическими включениями не превышает 0,5 балла по

ГОСТ Р ИСО 4967–2009. Первичные карбиды частично разрушены в результате пластической деформации.

При исследовании шлифов после травления выявлено, что структура материала шарикоподшипника представляет собой мартенсит отпуска с крупными первичными и мелкими карбидами, выделившимися в процессе отпуска (рис. 5). В сердцевине как наружного, так и внутреннего кольца наблюдается карбидная неоднородность, соответствующая баллу 4Б шкалы 6 (по ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры»). В микроструктуре сердцевины шарика карбидная неоднородность менее выражена (балл 2Б).

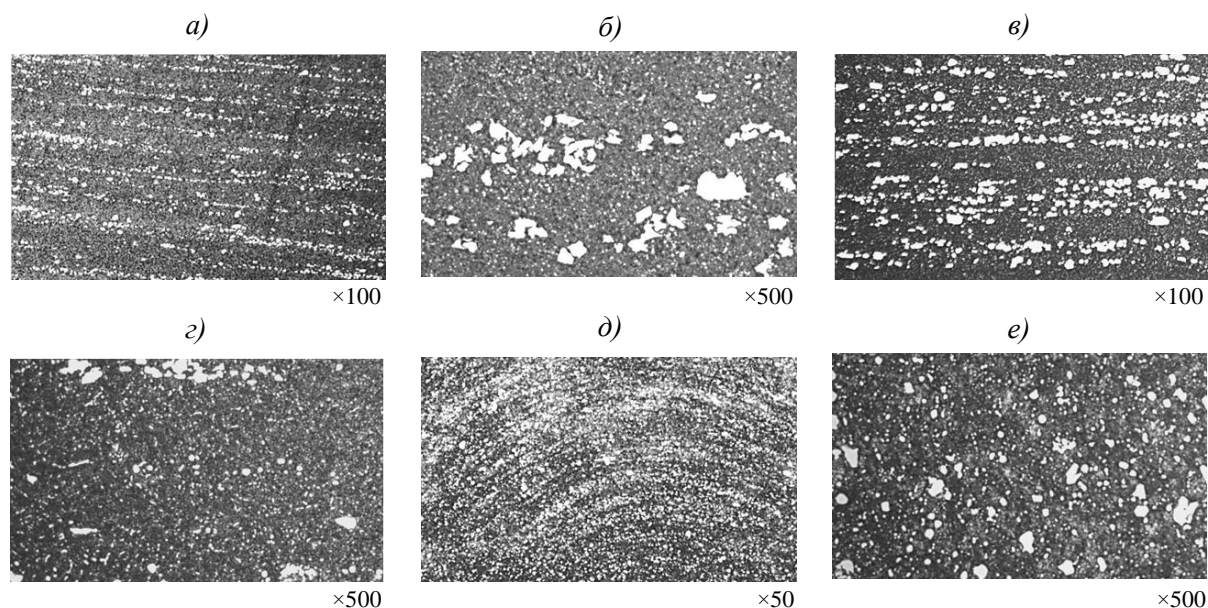


Рис. 5. Микроструктура сердцевины фрагментов шарикоподшипника из стали 95X18:  
*a, б* – наружное кольцо; *в, з* – внутреннее кольцо; *д, е* – шарик

В поверхностных слоях наружного кольца наблюдаются отслоения раскатанного по дорожке качения металла (рис. 6) с трещинами, переходящими в основной материал в пределах приповерхностного слабо травящегося слоя. Аналогичная картина наблюдается и в структуре внутреннего кольца. Слабо травящийся слой на кольцах подшипника имеет толщину до 0,7–0,8 мм.

При исследовании микроструктуры шарика установлено, что на поверхности наблюдаются забоины, отслоения и раскатанные слои металла, а также присутствуют слабо травящиеся зоны, которые диаметрально противоположны по отношению друг к другу. Глубина слабо травящихся областей составляет 0,3–0,4 мм.

Измерения микротвердости показали, что твердость сердцевины исследованных фрагментов составляет  $547 \pm 10$  HV (50 HRC), а микротвердость слабо травящихся зон  $792 \pm 65$  HV (62–64 HRC).

Присутствие в структуре слабо травящихся поверхностных зон с повышенной твердостью и растрескивание первичных карбидов свидетельствуют о пластической деформации металла в процессе работы шарикоподшипника.

Исследование структуры тела качения (шарика) и фрагментов наружного и внутреннего колец шарикоподшипника на растровом электронном микроскопе подтвердило данные, полученные методом оптической микроскопии. На поверхности дорожки качения наружного кольца шарикоподшипника наблюдаются отслоения раскатанного металла (рис. 7, *а*), задиры, выкрашивания.

При анализе повреждений внутреннего кольца шарикоподшипника на поверхности дорожки качения также обнаружены многочисленные повреждения: задиры, выкрашивания, трещины, налипание металла (рис. 7, *б*), раскатка дорожки качения и выдавливание металла на поверхность наружного диаметра кольца.

Тело качения (шарик, рис. 7, *в*) также имеет многочисленные повреждения поверхности, такие как задиры и выкрашивания.

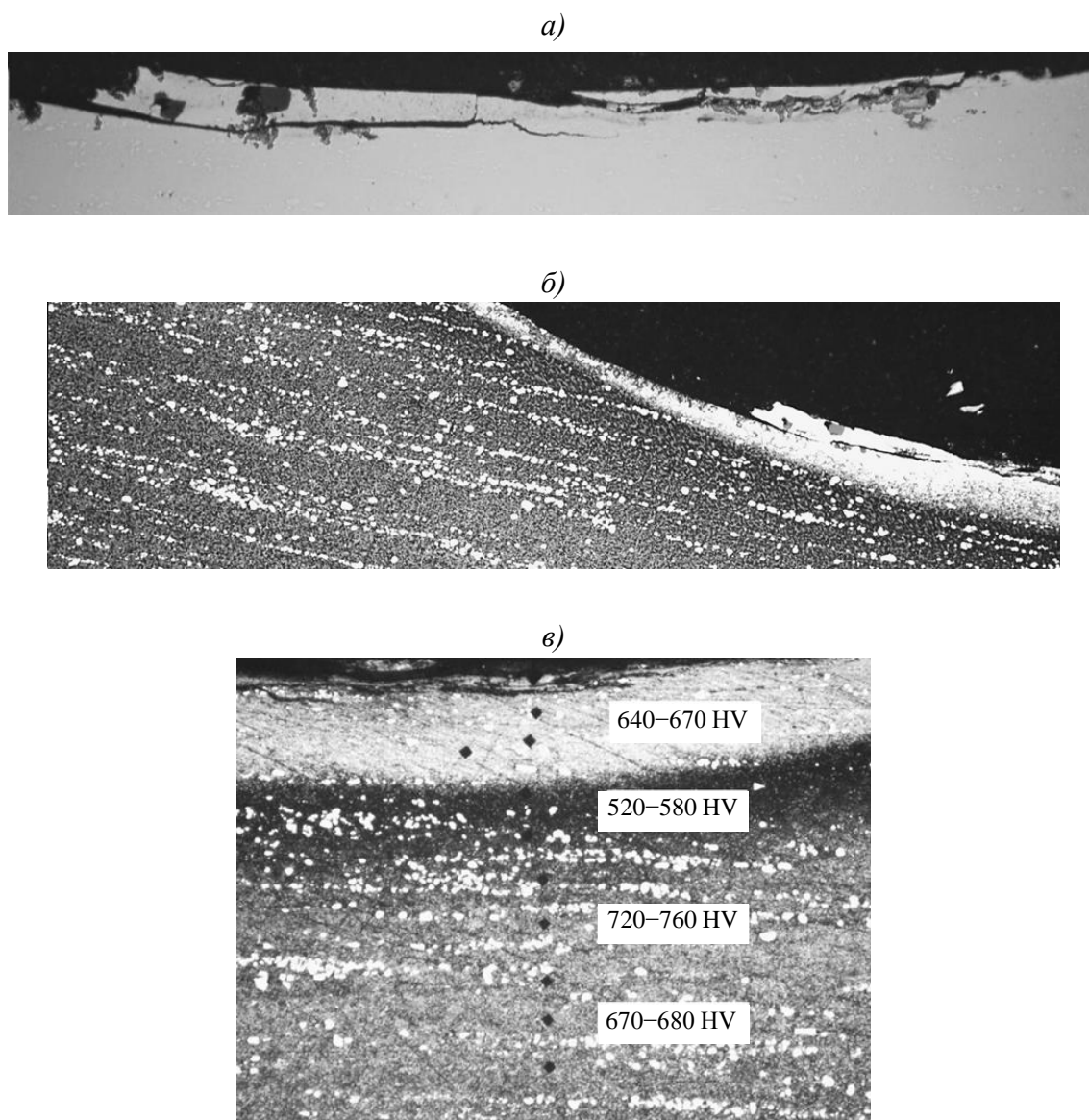


Рис. 6. Микроструктура поверхностных слоев наружного кольца шарикоподшипника из стали 95X18:

*а* – отслоения раскатанного металла по дорожке качения; *б*, *в* – слабо травящийся слой и значения микротвердости в различных зонах

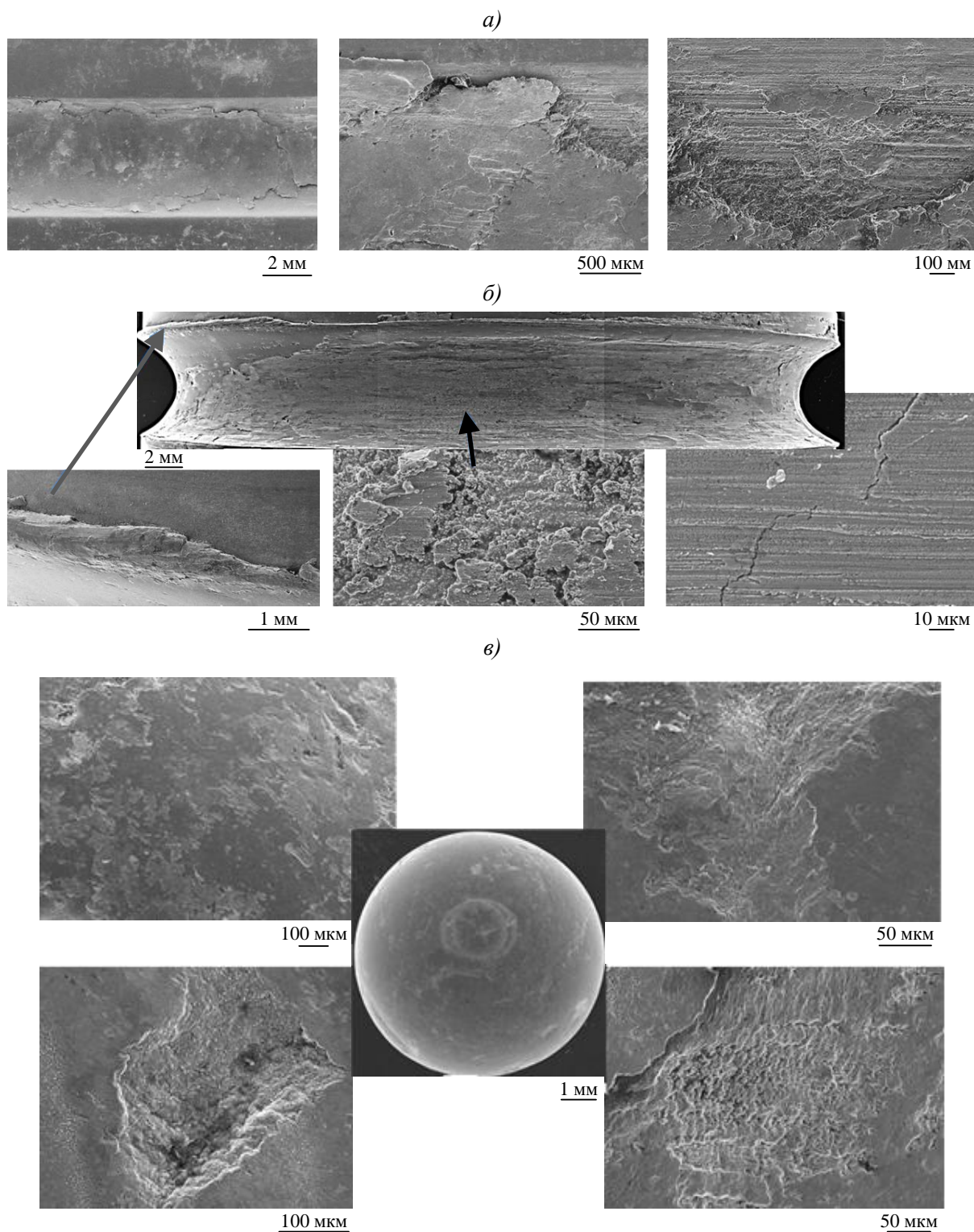


Рис. 7. Макро- и микроструктуры поверхности колец шарикоподшипника при исследовании на растровом электронном микроскопе:

*a* – поверхность наружного кольца шарикоподшипника; *б* – поверхность внутреннего кольца шарикоподшипника; *в* – поверхность шарика из стали 95X18

Причиной снижения твердости внутренних объемов деталей шарикоподшипника до  $547 \pm 10$  HV (50 HRC) является их разогрев до температуры, превышающей температуру отпуска стали 95X18 ( $370^\circ\text{C}$ ). Причиной повышенной твердости до  $792 \pm 65$  HV (62–64 HRC) и пониженной травимости поверхностных слоев дорожек качения колец и шарика является деформационный наклеп металла с переходом в аустенитную область температур стали 95X18 и последующим ускоренным охлаждением.

#### ***Исследование разрушения подшипника из стали 8X4B9Ф2-Ш (ЭИ347-Ш)***

Общий вид элементов подшипника представлен на рис. 8. На наружном кольце в углу перехода дорожки качения к нерабочей поверхности, параллельной оси подшипника, и внутренних полукольцах в углах перехода дорожек качения к нерабочим поверхностям, перпендикулярным оси подшипника, наблюдаются следы выкрашивания материала. Особенно поврежденным является внутреннее заднее (базовое) полукольцо. На внутреннем заднем (базовом) полукольце образовалась «новая» дорожка качения в секторе  $\sim 120$  град (рис. 9). «Новая» дорожка качения имеет гладкую поверхность, сопоставимую по своему рельефу поверхности с целыми участками дорожки качения. Это свидетельствует о длительности процесса ее образования.

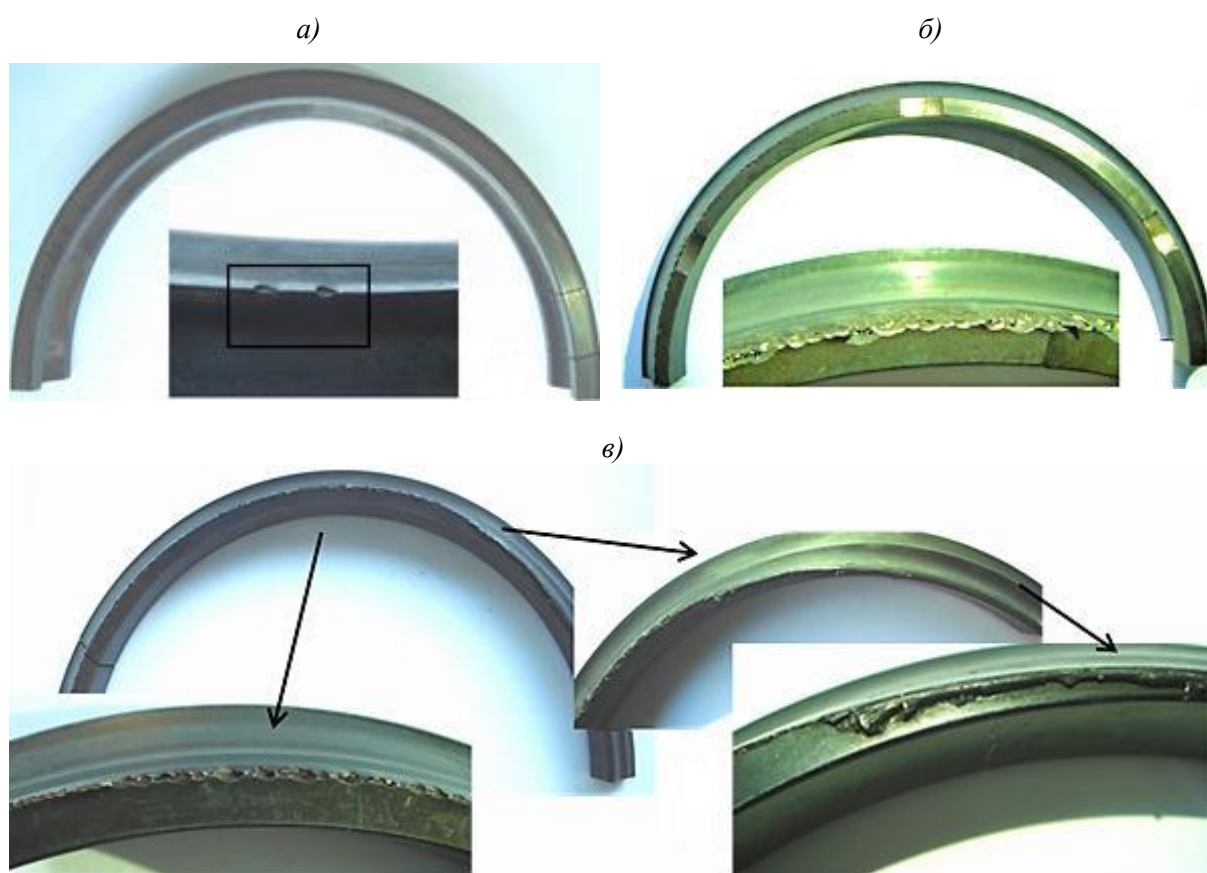


Рис. 8. Внешний вид разрушенных фрагментов подшипника:

*a* – дефекты на наружном кольце; *б* – дефекты внутреннего переднего (противобазового) кольца; *в* – дефекты внутреннего заднего (базового) кольца и «новая» раскатанная дорожка качения на внутреннем заднем (базовом) кольце

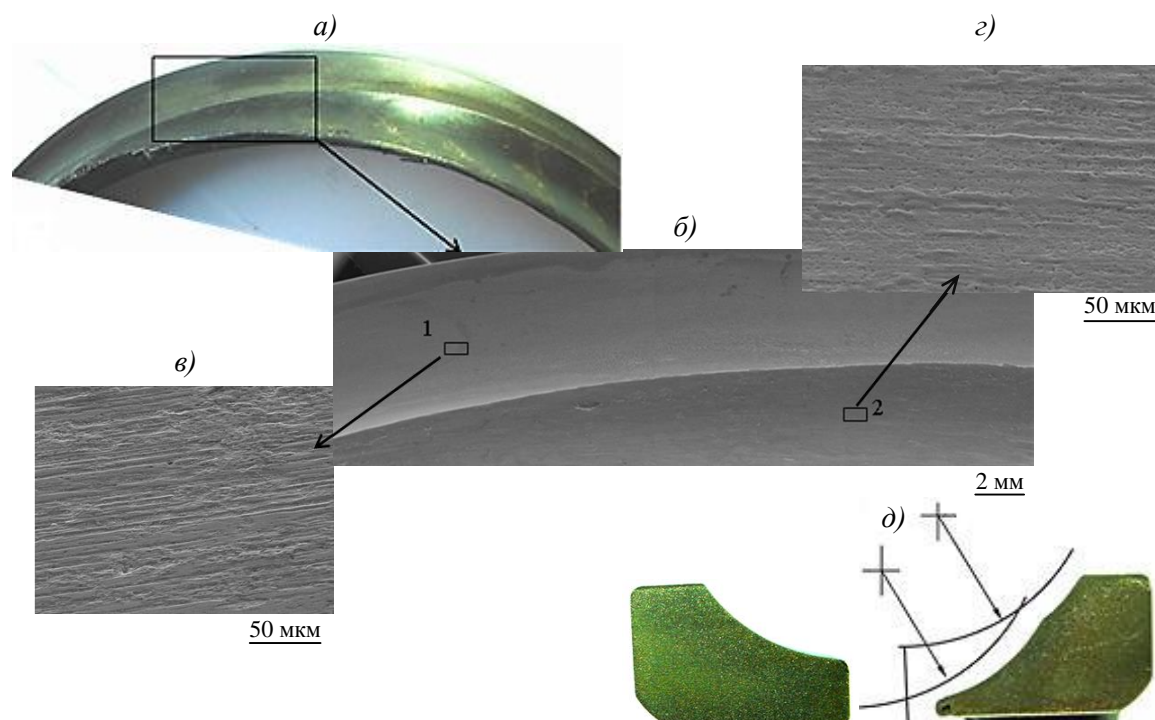


Рис. 9. Дорожка качения внутреннего заднего (базового) полукольца подшипника:  
*a* – внешний вид; *б–г* – рельеф поверхности «новой» раскатанной дорожки качения;  
*д* – сечения неповрежденной и поврежденной части полукольца

Стоит отметить, что радиус образовавшейся при испытаниях дорожки качения соответствует радиусу целых дорожек качения, а смещение радиуса «новой» дорожки качения в радиальном и осевом направлении подшипника составляет не менее 3,5 и 3 мм соответственно.

Фрактографический анализ сколов на элементах подшипника показал, что разрушение осуществлялось по вязкому ямочному механизму.

Исследование микроструктуры проводили на шлифах, отобранных из наружного кольца и внутренних полуколец подшипника. Микроструктура наружного кольца и внутреннего переднего (противобазового) полукольца соответствует микроструктуре стали 8Х4В9Ф2-Ш (ЭИ347-Ш) после термообработки, а карбидная неоднородность соответствует 4 баллу шкалы карбидной неоднородности по ТУ14-1-2244-77.

Исследование микроструктуры шлифа из внутреннего заднего (базового) полукольца подшипника, изготовленного в сечении, образовавшегося в процессе испытаний дорожкой качения, показало наличие измененного слоя структуры глубиной ~1 мм (рис. 10). На глубину 300–500 мкм от поверхности «новой» дорожки качения распространяется деформированная структура с направлением волокна в окружном направлении «новой» дорожки качения.

Проведенные исследования свидетельствуют о незначительном нагреве подшипника в этом месте и значительной пластической деформации в процессе образования «новой» дорожки качения.

На всех исследуемых образцах из элементов подшипника твердость и микротвердость определяли в центральной части шлифов. Твердость колец находится в пределах 59,2–60 HRC, а микротвердость – от 740 до 790 HV, что соответствует требованиям, предъявляемым к стали ЭИ347-Ш.

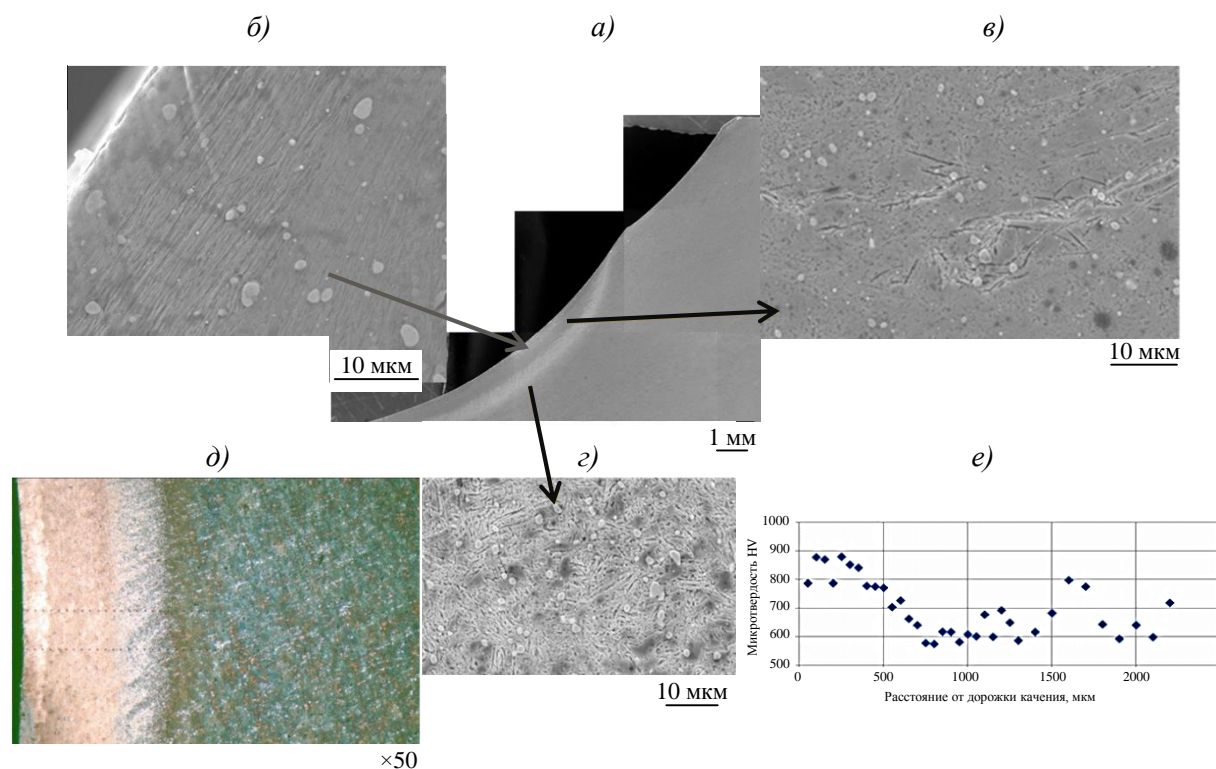


Рис. 10. Микроструктура внутреннего заднего (базового) полукольца подшипника (а–д) и значения микротвердости (е), измеренные на расстоянии от 0 до 2000 мкм от поверхности дорожки качения

Для подтверждения данных, полученных при проведении исследований микроструктуры, построен график изменения микротвердости в зависимости от расстояния от поверхности в области образовавшейся дорожки качения с измененной микроструктурой (рис. 10, е). Полученная зависимость свидетельствует о значительном наклепе поверхностного слоя глубиной до 500 мкм. Далее на глубину до 1,5 мм наблюдается зона пониженной твердости, свидетельствующая о термическом разупрочнении.

На основании проведенных исследований данного подшипника можно заключить, что образование «новой» дорожки качения происходило в течение длительного времени при невысоких температурах, о чем свидетельствует малая глубина измененной микроструктуры и повышенная микротвердость зоны, расположенной под «новой» дорожкой, а также состояние ее поверхности, сравнимое с поверхностью неповрежденной дорожки.

#### ***Исследование причин разрушения шарико- и роликоподшипника из стали ШХ15***

Особо важным является определение причин разрушения сложных агрегатов в период эксплуатации, так как они приводят к значительным потерям.

В качестве такого примера рассмотрим следующее разрушение шарико- и роликоподшипника. По результатам химического анализа установлено, что материалом наружного кольца, внутренних колец и тел качения подшипников является сталь ШХ15, что соответствует данным чертежа. Материал сепаратора соответствует марке бронзы БрАЖН10-4-4.

Внешний вид деталей первого (шарикового) подшипника представлен на рис. 11. Макроанализ выявленных повреждений позволил установить, что разрушение шарикового подшипника происходило в результате интенсивного разогрева и пластической деформации шариков и внутренних полуколец.

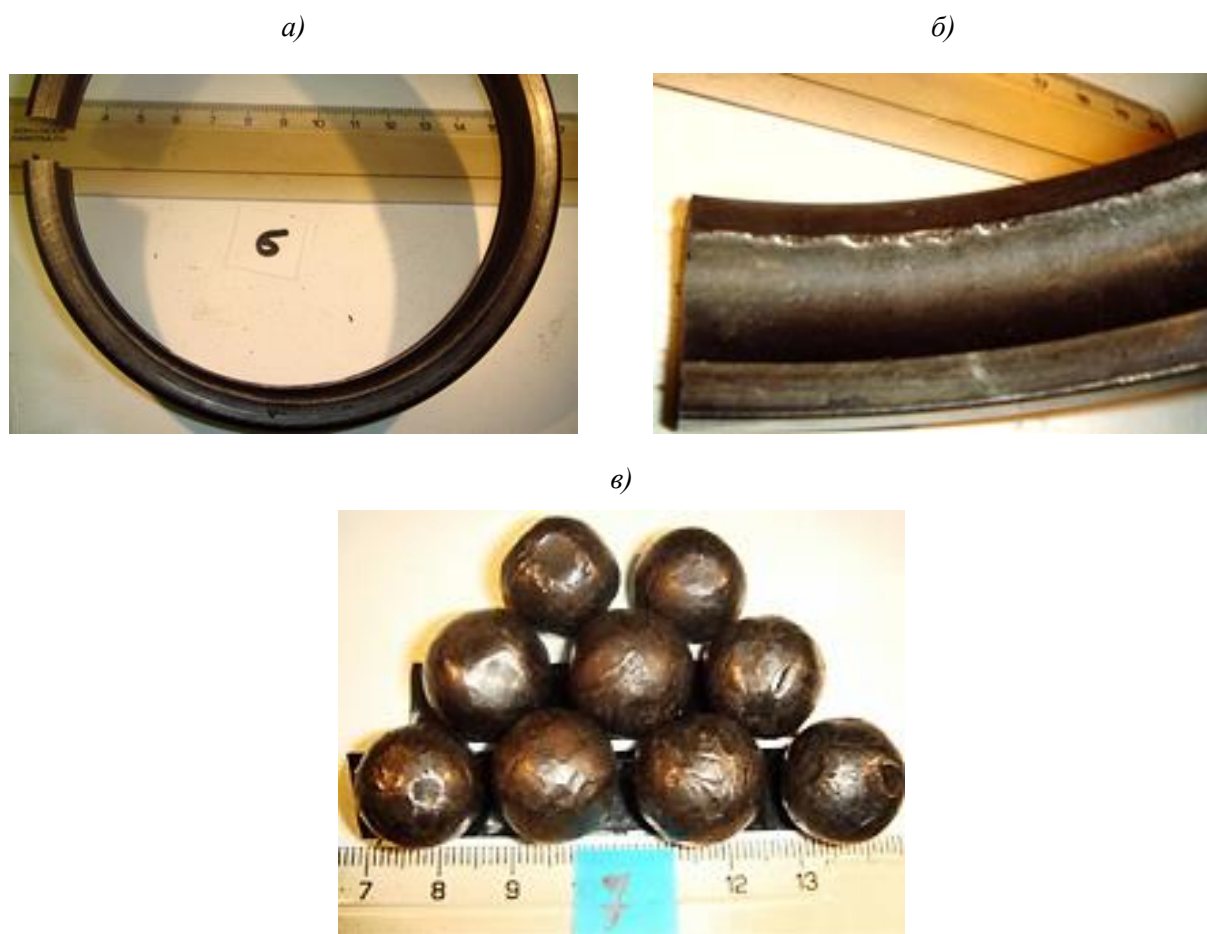


Рис. 11. Внешний вид разрушенного шарикоподшипника из стали ШХ15:  
*а* – наружное кольцо; *б* – пластическая деформация дорожки качения в сторону торца с маркировкой; *в* – шарики со следами пластической деформации

Пластическая деформация наружного кольца подшипника заключается в образовании наплывов металла со стороны дорожки качения в сторону внутренней цилиндрической поверхности кольца со стороны торца. С противоположного торца наружного кольца отмечается наплыв металла на внутреннюю цилиндрическую поверхность. Признаков контактного усталостного разрушения наружного кольца шарикового подшипника не обнаружено.

Внутренние полукольца шарикового подшипника имеют более интенсивную пластическую деформацию. Одно полукольцо полностью смято и разорвано (рис. 12, *а, б*), со стороны базовой торцевой поверхности имеются отпечатки зубчатого венца гайки крепления внутренних полуколец. Второе полукольцо имеет следы существенной пластической деформации только в зоне дорожки качения, поверхности по посадочному диаметру и торцевой базовой плоскости (рис. 12, *в, г*). Признаков контактного усталостного разрушения внутренних полуколец шарикового подшипника также не обнаружено. Шарики имеют следы значительной пластической деформации с наволакиванием металла (рис. 12, *з*).

На основании результатов анализа фрагментов подшипника установлено, что:

- признаки контактного усталостного разрушения наружного кольца, внутренних полуколец и шариков шарикового подшипника отсутствуют;
- разрушение деталей шарикового подшипника происходило по механизму пластической деформации, преимущественно сдвигом, и сопровождалось значительным разогревом.

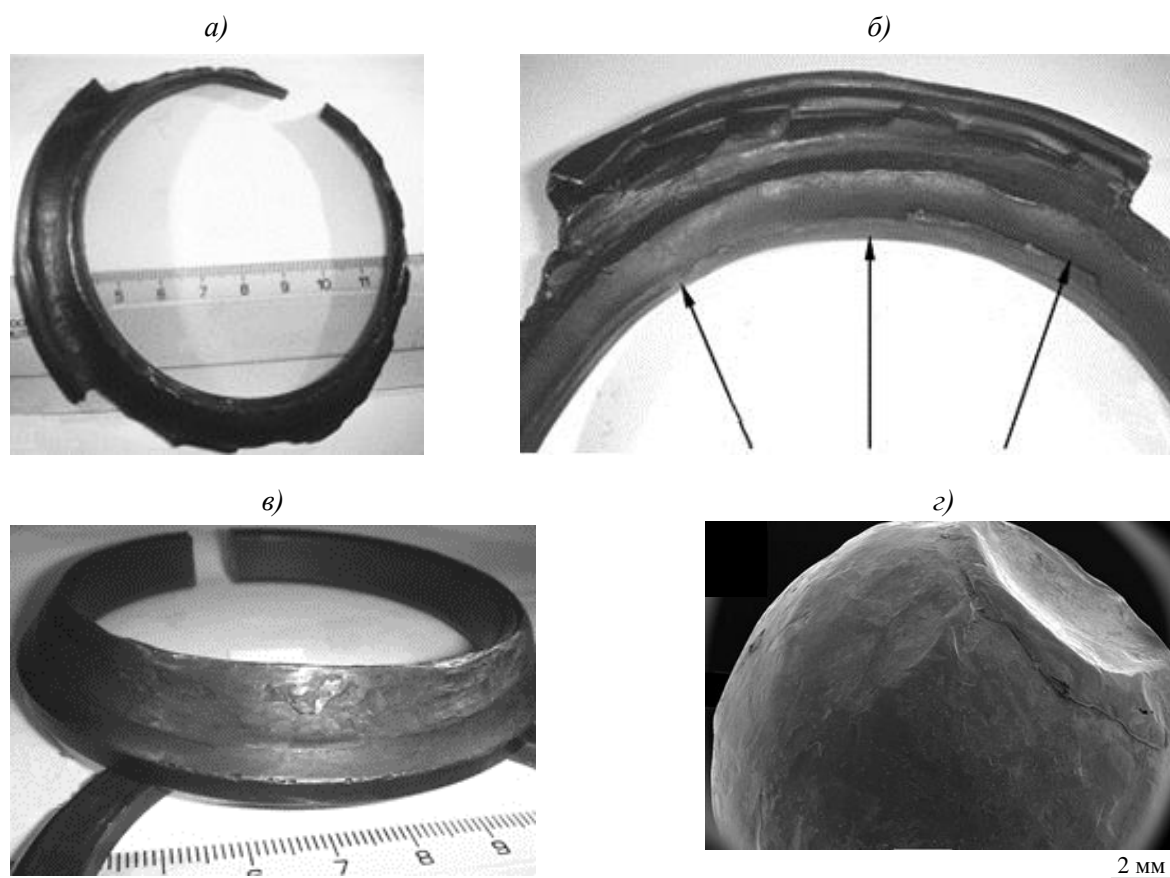


Рис. 12. Внутренние полукольца шарикового подшипника из стали ШХ15:

*a, б* – внутреннее полукольцо со значительной пластической деформацией и отпечатками зубчатого венца гайки крепления (отмечены стрелками) со стороны торца; *в* – внутреннее полукольцо с частичной пластической деформацией дорожки качения; *г* – шарик со следами сильной пластической деформации

Для оценки температуры разогрева деталей шарикоподшипника в процессе его разрушения проведены исследования по разупрочнению стали ШХ15 в термически обработанном состоянии в течение времени его разрушения. Построена кривая разупрочнения стали ШХ15 в диапазоне температур 200–600°C (рис. 13).

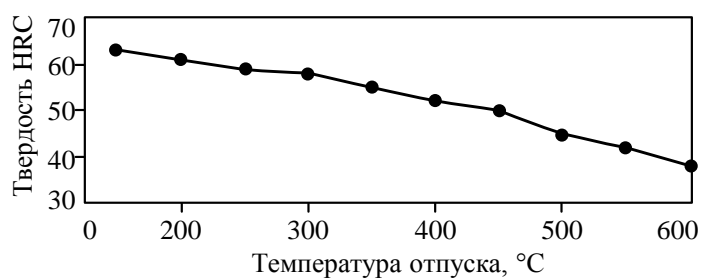


Рис. 13. Зависимость твердости образцов из стали ШХ15 от температуры отпуска

Микроструктура стали ШХ15 в исходном состоянии (в составе подшипников) представляет собой низкоотпущенный мартенсит и карбиды, что соответствует значению твердости 62–63 HRC (800–840 HV). Видимые изменения в микроструктуре, связанные с дальнейшим отпуском мартенсита, выявляются при температуре от 350 до 600°C. Микроструктура образца, соответствующая твердости 37–40 HRC (350–400 HV), представляет сорбит отпуска.

Исследованы фрагменты внутренних полуколец подшипника:

- внутреннее полукольцо (базовое) с частичной деформацией дорожки качения;
- внутреннее полукольцо (противобазовое) со значительной деформацией.

Микроструктура внутреннего базового полукольца в недеформированной части представляет собой сорбит отпуска (высокоотпущенный мартенсит)+карбиды. Микротвердость составляет 480 HV, что соответствует нагреву до 500°C. Микроструктура деформированной части представляет собой сорбит отпуска (высокоотпущенный мартенсит)+карбиды. Микротвердость составляет 380 HV, что соответствует нагреву до 600°C.

Микроструктура внутреннего противобазового полукольца подшипника представляет собой сорбит отпуска (высокоотпущенный мартенсит)+карбиды, в зоне интенсивной пластической деформации наблюдается вторичная закалка с нагревом тонких поверхностных слоев металла до температуры аустенитного состояния стали ШХ15 (850–900°C).

Микроструктура и результаты замеров микротвердости наружного кольца шарикового подшипника представлены на рис. 14.

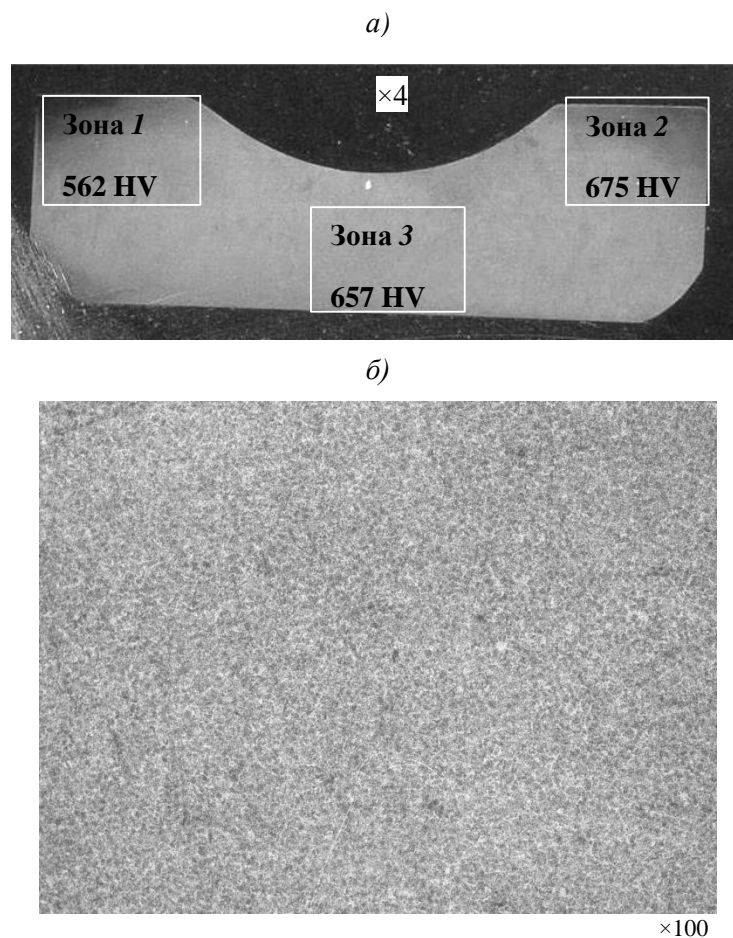


Рис. 14. Зоны измерения микротвердости (а) и микроструктура наружного кольца шарикового подшипника из стали ШХ15 в зоне 3 (б)

Твердость, измеренная непосредственно на дорожке качения наружного кольца, составляет 47 HRC (490 HV), что соответствует температуре нагрева 500°C (рис. 13).

Снижение микротвердости наружного кольца шарикового подшипника в зоне *I* до значений 550–570 HV (рис. 14) соответствует нагреву стали ШХ15 до температуры 450°C. В остальном сечении наружного кольца температура нагрева соответствовала 350°C. Полученные результаты согласуются с последовательностью разрушения шарикового подшипника с раскаткой дорожек качения с их смещением в сторону турбины.

Исследование микроструктуры шарика проводили на шлифе, вырезанном в среднем сечении шарика. При травлении шлифа в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты наблюдалась разнотонность травления. Микроструктура представляет собой сорбит отпуска (высокоотпущенный мартенсит)+карбиды. Твердость сердцевины составляет 370–400 HV, что соответствует нагреву до 600°C. В приповерхностной области исследуемого шарика наблюдаются зоны вторичной закалки с нагревом до температуры аустенитного превращения (850–900°C) стали ШХ15 (рис. 15).

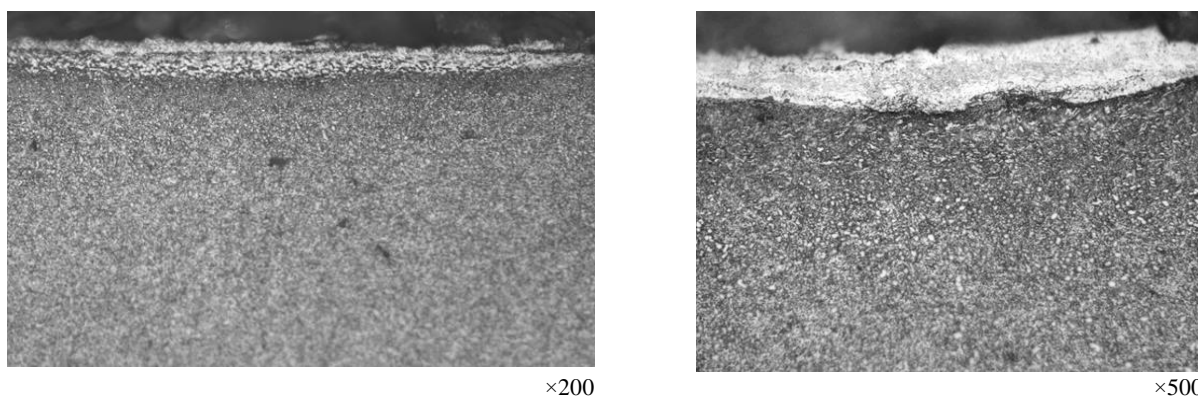


Рис. 15. Микроструктура шарика из стали ШХ15 с зонами вторичной закалки

На основании микроструктурных исследований деталей данного подшипника и определения микротвердости можно заключить, что в зонах интенсивной пластической деформации происходил разогрев металла на поверхности шариков и внутреннего полукольца до температуры аустенитного превращения (850–900°C) стали ШХ15 с последующими закалкой на мартенсит и отпуском. Вне зоны интенсивной пластической деформации температура металла внутренних полуколец и шариков достигала 500–600°C, а наружного кольца шарикового подшипника: 350–500°C, что сопровождалось отпуском мартенсита и снижением его микротвердости.

Внешний вид деталей роликового подшипника представлен на рис. 16. Анализ повреждений деталей роликового подшипника показывает, что в процессе работы произошло заклинивание роликов, их разогрев, сопровождающийся пластической деформацией материала роликов, наружного и внутреннего колец из стали ШХ15. Разогрев и снижение прочностных свойств стали ШХ15 привело к образованию граней на рабочих поверхностях роликов, деформации дорожек качения наружного и внутреннего колец, образованию наплывов металла в зоне сопряжения наружного диаметра внутреннего кольца с поверхностями, ограничивающими осевое перемещение роликов. В результате разогрева произошло оплавление материала сепаратора (бронза БрАЖМц10-3-1,5) с последующим его нанесением на поверхность дорожки качения наружного кольца и заклинивание роликов в сепараторе.

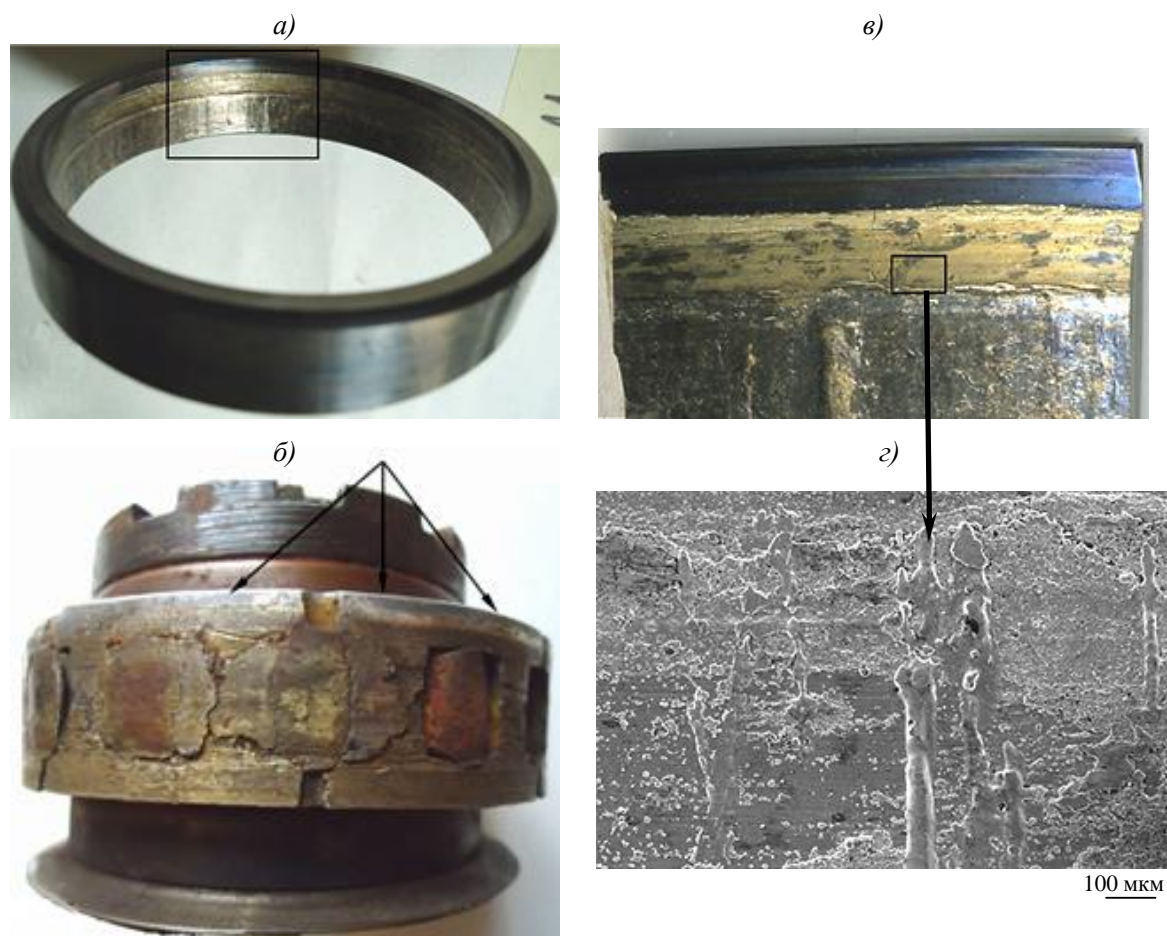


Рис. 16. Внешний вид поврежденных деталей роликового подшипника:

*а* – поверхность качения наружного кольца (отмечена зона анализа морфологии и состава поверхности); *б* – повреждение сепаратора и роликов (стрелками указан участок сепаратора с сохранившейся поверхностью и свинцово-оловянистым покрытием); *в*, *г* – оплавленный материал сепаратора на поверхности наружного кольца

Анализ поверхности дорожки качения наружного кольца роликового подшипника выявил два режима работы подшипника в процессе развития аварийной ситуации. Первый режим соответствует нормальному положению роликов относительно наружного кольца и характеризуется матовым блеском материала сепаратора, переносимого роликами на дорожку качения наружного кольца при их заклинивании. Второй режим соответствует смещению ротора в осевом направлении и интенсивному вдавливанию ограниченных роликов в поверхность дорожки качения наружного кольца.

Микроструктурный анализ шлифа, изготовленного из наружного кольца роликового подшипника в области кратковременного разогрева, выявил наличие нескольких областей, различных по строению. Твердость, измеренная в различных зонах колеблется от 470 до 1100 HV. В зоне 1 микроструктура представляет собой мартенсит+остаточный аустенит+карбиды. Микроструктура зоны 2 представляет собой отпущенный мартенсит+карбиды. Микроструктура зоны 3 представляет собой троостит отпуска+феррит+карбиды. Микроструктура зоны 4 представляет собой сорбит отпуска (высокоотпущенный мартенсит)+карбиды.

Микроструктурный анализ шлифа, изготовленного из внутреннего кольца роликового подшипника в области кратковременного разогрева, также выявил наличие нескольких зон, различных по строению (рис. 17). Твердость, измеренная в различных зонах, колеблется от 670 до 903 НВ. В зоне 1 микроструктура представляет собой мартенсит+остаточный аустенит+карбиды. Микроструктура зон 2 и 3 представляет собой отпущенный мартенсит+карбиды.

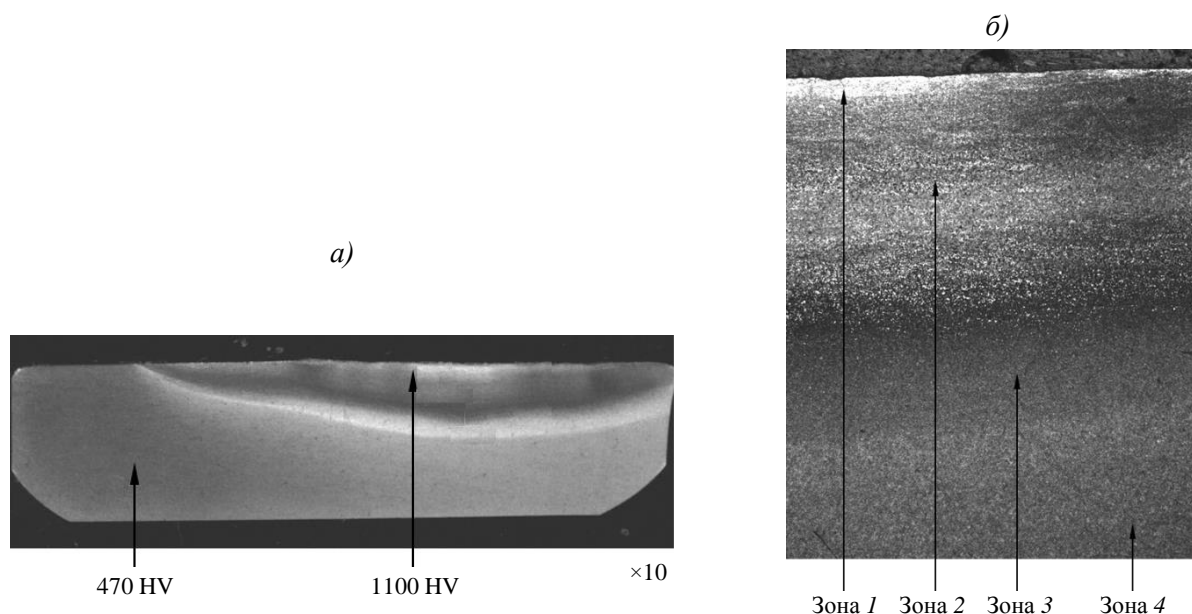


Рис. 17. Микроструктура фрагментов роликового подшипника из стали ШХ15:

*a* – внутреннее кольцо роликового подшипника в области кратковременного разогрева с зонами различной травимости и значениями микротвердости; *б* – цилиндрическая образующая ролика с интенсивной пластической деформацией с характерными микроструктурными зонами

По цилиндрической образующей ролика наблюдается интенсивная пластическая деформация, сопровождающаяся разогревом. На шлифе выделено несколько характерных зон (1–4), микроструктура которых представляет собой мартенсит+остаточный аустенит+карбиды, что определяет ее как зону разогрева до температур вторичной закалки 850–900°C (760 НВ). Микроструктура зоны 5 представляет собой отпущенный мартенсит+карбиды.

На основании выполненных исследований установлено, что детали роликового подшипника, как и шарикоподшипника, подвергались интенсивному разогреву (в результате заклинивания и пластического деформирования) до температуры аустенитного состояния стали ШХ15, который сопровождался подплавлением материала сепаратора.

### Обсуждение и заключения

В процессе исследований причин аварийных разрушений подшипников выделено три группы:

- металлургические дефекты, невыявленные (пропущенные) методами неразрушающего контроля и являющиеся очагами разрушения;
- нарушения технологии сборки, приводящие к нештатной работе подшипникового узла в составе сложных технических систем;
- нарушения условий эксплуатации сложных технических систем, приводящие к перегрузке подшипников, нарушению температурно-силовых условий работы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП «ВИАМ».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
3. Теплостойкая подшипниковая сталь: пат. 2447183 Рос. Федерация; опубл. 05.04.11.
4. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
5. Спектор А.Г., Зельберт Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия. 1980, 264 с.
6. Орлов М.Р., Терехин А.М., Морозова Л.В., Журавлева П.Л., Наприенко С.А. Исследование влияния пластической деформации стали 20Х3МВФ со структурой феррита на механические свойства и характер разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 118–124.
7. Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Орлов М.Р. Исследование причин появления участков с различной морфологией излома в кованных заготовках из стали 38ХН3МФА // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №8. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.05.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-11-11.
8. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.05.2015).
9. Спришевский А.М. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 632 с.
10. 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: 06.05.2015).
11. Штремель М.А. Разрушение. М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. Кн. 1: Разрушение материала. 670 с.
12. Фрактография: средство диагностики разрушенных деталей / под ред. М.А. Балтер. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.
13. 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.
14. Кузьмин В.Р., Прохоров В.А., Борисов А.З. Усталостная прочность металлов и долговечность конструкций при нерегулярном нагружении высокого уровня. М.: Машиностроение, 1998. 256 с.
15. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.