

УДК 669.018.24

Н.О. Яковлев<sup>1</sup>, О.В. Седов<sup>1</sup>, И.В. Гулина<sup>1</sup>, А.В. Гриневиц<sup>1</sup>**ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
РАЗРУШЕНИЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-91-100

*Статья посвящена фрактографическому исследованию двойных поверхностей разрушения при стандартных испытаниях на растяжение образцов шарикоподшипниковой стали разработки ФГУП «ВИАМ». Двойное разрушение происходило одновременно или в двух галтелях, или в рабочей части образца с образованием тонкой пластинки. Столь неожиданное разрушение никогда не реализовывалось при испытании конструкционных сплавов с предельными характеристиками прочности. Была выдвинута гипотеза о возможном разрушении по механизму откола, но не отвергалась и версия множественного разрушения. Фрактографический анализ поверхности изломов с высокой достоверностью подтверждает гипотезу откольного разрушения.*

**Ключевые слова:** откол, фрактография, двойное разрушение, поверхность разрушения, растяжение, напряженно-деформированное состояние.

N.O. Yakovlev<sup>1</sup>, O.V. Sedov<sup>1</sup>, I.V. Gulina<sup>1</sup>, A.V. Grinevich<sup>1</sup>**FRACTOGRAPHIC STUDY  
OF BEARING STEEL FRACTURE**

*The article is devoted to the fractographic study of double fracture surfaces during standard tensile tests of samples of ball-bearing steel developed by FSUE VIAM. Double destruction occurred simultaneously either in two fillets, or in the working part of the sample with the formation of a thin plate. Such an unexpected failure was never realized when testing structural alloys with ultimate strength characteristics. A hypothesis was put forward about possible destruction by the spallation mechanism, but the version of multiple destruction was not rejected either. The fractographic analysis of the surface of fractures with high reliability confirms the hypothesis of spall fracture.*

**Keywords:** spallation, fractography, double fracture, fracture surface, tension, stress-strain state.

<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**

Подшипники являются наиболее ответственными элементами в конструкциях современного транспортного машиностроения. Составные элементы подшипника (кольца, шарики и ролики) работают в крайне сложных условиях нагружения, которые характеризуются высокими локальными статическими и переменными нагрузками при одновременном проскальзывании сопрягающихся поверхностей [1–3]. В зависимости от условий работы элементов подшипника предъявляются соответствующие требования к материалу составных элементов подшипника. Материал для элементов подшипника должен обладать комплексом свойств, сочетающим высокую контактную прочность при статических и переменных нагрузках с высокими сопротивлениями смятию и истиранию. Определяющим направлением реализации вышеприведенных требований является достижение предельно высокой твердости и прочности. Для конструкционных

сталей мартенситного класса, применяемых в деталях, которые, как правило, имеют концентраторы напряжений и работают в условиях переменных растягивающих нагрузок, предельная прочность при растяжении ограничена уровнем  $\sigma_b \approx 2000$  МПа, а содержание углерода 0,4% (по массе) [4].

Поскольку материал в элементах подшипника работает в условиях локального сжатия и проскальзывания, то критичными параметрами являются прочность при сжатии и твердость. Единственным направлением повышения твердости и прочности углеродистых сталей является увеличение содержания углерода. Наиболее распространенной сталью для подшипников является углеродистая сталь ШХ15. Химический состав стали, % (по массе): 0,95–1,10 углерода; 1,30–1,65 хрома; 0,20–0,40 марганца; 0,15–0,35 кремния [5]. Данный химический состав стали после закалки и низкого отпуска обеспечивает предел прочности  $\sigma_b = 2160–2550$  МПа и твердость по Роквеллу 60–66 HRC. Требования повышения температуры эксплуатации подшипников в авиационных двигателях до 300 °С, а в экстремальных вариантах – до 500 °С, привели к необходимости изысканий в области дисперсионно-твердеющих сталей. Для работы при повышенных температурах применяются стали с дисперсионно-карбидным упрочнением – отечественная ЭИ347 и американская М50. Повышенное содержание в стали ЭИ347 вольфрама (8,5–9,5% (по массе)), обеспечивая высокий уровень твердости, приводит к снижению контактной усталости деталей подшипника. Снижение контактной усталости происходит из-за выкрашивания поверхностей контакта деталей подшипника, обусловленного наличием объемных сегрегаций на основе карбида вольфрама. Во ФГУП «ВИАМ» в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [6, 7] проведены изыскания по созданию новой стали для подшипников, не уступающей сталям ЭИ347 и М50 по характеристикам работоспособности. Направленность работ ФГУП «ВИАМ» по формированию системы легирования, обеспечивающей однородность структуры по карбидным включениям, использованию методов вакуумной выплавки для получения металла с низкой газонасыщенностью и с пониженным содержанием неметаллических включений, отработке оптимального процесса передела слитков отражена в работах [8–10]. Проведенные во ФГУП «ВИАМ» изыскания привели к созданию новой стали для шарикоподшипников, предназначенных для работы при повышенных температурах [11].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований принята новая теплостойкая сталь для шарикоподшипников, обладающая предельными прочностными характеристиками и практически нулевой пластичностью. Определение механических характеристик проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84. Растяжение осуществляли на электромеханической испытательной машине, обеспечивающей измерение усилия с погрешностью 0,5%.

Испытания образцов новой подшипниковой стали при растяжении выявили сложный характер разрушения. Впервые зафиксировано разрушение по двум плоскостям при квазистатическом растяжении цилиндрических образцов. Высказано предположение, что разрушение по двум независимым плоскостям происходит не одновременно и обусловлено импульсом напряжений, возникающим в результате первоначального статического разрушения. Для подтверждения или отказа от данного предположения целесообразно провести фрактографическое исследование поверхностей разрушения испытанных образцов.

Оценку прочностных характеристик проводили на образцах с различной геометрической формой как захватной части, так и рабочей части образца [12]. Диаметр рабочей части образцов для всех вариантов захватной части равнялся 5 мм. Для анализа поверхностей разрушения приняты образцы, изготовленные по эскизу, представленному на рис. 1.

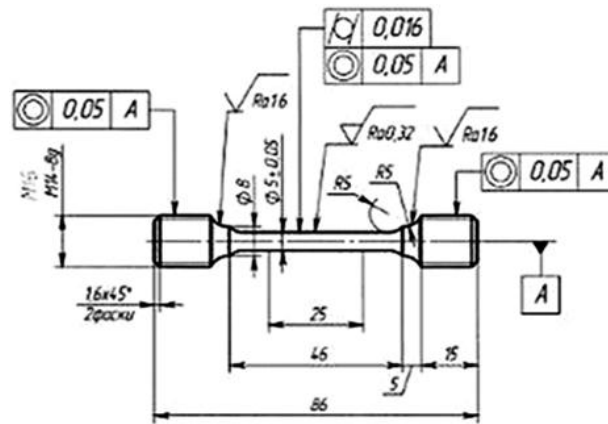


Рис. 1. Эскиз образца, на котором исследовались поверхности разрушения

Конфокальный лазерный сканирующий микроскоп, обеспечивающий получение трехмерного изображения, использовали для фрактографического анализа поверхностей разрушения.

Предположение о характере разрушения по механизму откола представляется достаточно спорным, поскольку для реализации такого разрушения необходим мощный импульс, создающий в материале волну возмущения большой амплитуды [13, 14]. Явления по механизму откола фиксируются при испытании брони, когда при воздействии снаряда на лицевую поверхность плиты на тыльной поверхности возникает откол. Образование откола возможно и при других вариантах воздействия – например, при взрыве на поверхности плиты взрывчатого вещества или при ударе высокоскоростного осколка, но при этом возмущение должно иметь импульсный характер с высоким уровнем амплитуды [15–17]. Разрушение образцов в условиях растяжения не является таким источником создания ударной волны, что ставит под сомнение версию откольного разрушения образца с образованием двух поверхностей разрушения.

При этом классическое представление о разрушении не противоречит множественному разрушению твердого тела. Классическое разрушение определяется как разделение твердого тела на отдельные части с образованием новых поверхностей. Согласно основному постулату разрушения оно происходит в области, в которой напряженно-деформированное состояние достигает предельного уровня. Если исходить из этого постулата, разрушение однородного твердого тела в однородном поле напряжений должно иметь множественный характер. Следовательно, рабочая область абсолютно однородного образца, находящаяся при растяжении в абсолютно однородном напряженно-деформированном поле, должна разрушиться на множество фрагментов.

Однако практика испытаний показывает, что подобного разрушения не происходит при растяжении образцов даже предельно высокопрочных конструкционных металлических материалов. Разрушение с образованием одной поверхности объясняется фактором неоднородности материала образца. Неоднородность структуры материала приводит к неоднородности напряженно-деформированного состояния на уровне структурных составляющих материала, а неоднородность напряженно-деформированного состояния – к единственности зоны разрушения. Следовательно, при неоднородности структуры материала отвергается возможность множественного разрушения материала в рабочей части образца при растяжении. Однако множественность разрушения

не отвергается для случая однородного материала. Можно предположить, что для исключительно однородной стали, при обеспечении однородного напряженного состояния, найдутся несколько абсолютно идентичных областей, по которым одновременно произойдет разрушение. Поскольку вся идеология создания шарикоподшипниковой стали и все усилия при ее разработке направлены на реализацию максимально однородной структуры, то возможность множественного разрушения образцов не исключается. Следовательно, если будет показано, что разрушение произошло одновременно в двух поверхностях по одному механизму, то имеет место классическое разрушение однородного материала.

Для подтверждения или отказа от гипотезы откольного характера разрушения образцов подшипниковых сталей предложено проведение фрактографического анализа поверхностей разрушения. В случае идентичности рельефа поверхностей разрушения следует принять версию одномоментного разрушения зон образца, имеющих одинаковую прочность. Для варианта, когда рельеф поверхностей разрушения различен, придется рассматривать гипотезу откольного разрушения. В последнем случае разрушение разнесено по времени – изначально происходит статическое разрушение, за которым следует разрушение отколом за счет внутренней энергии, накопленной в образце при нагружении. В случае откольного варианта разрушения характер изломов поверхностей разрушения должен быть различен.

### Результаты

Первоначально для исследований отобрали три образца с различными вариантами разрушения: 1 – с разрушением у галтели, 2 – с двойным разрушением в центре образца и 3 – с двойным разрушением в галтелях.

Характер единичного разрушения в галтели является отправной точкой для последующего анализа изломов, поскольку получен при классическом единичном разрушении.

На рис. 2 представлены: внешний вид образца 1 (рис. 2, а) с зоной разрушения в галтели (рис. 2, б) и плоскость излома образца (рис. 2, в).

На рис. 3 представлен рельеф образца 1 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Анализировали поверхность части образца со стороны захватной резьбовой части. Форма излома указывает на его углубление в сторону захвата, что обусловлено, по-видимому, напряженно-деформированным состоянием в галтели.

Отсутствие плоскостности излома не позволяет использовать его рельеф в качестве эталона для сравнения изломов в рабочей части образца.

Поскольку поверхность разрушения в галтели не может служить эталоном разрушения в рабочей части образца, для анализа отобрали образец 4, разрушение которого имело место в рабочей части. На рис. 4 представлены: общий вид образца 4 (рис. 4, а), область разрушения (рис. 4, б) и поверхность разрушения (рис. 4, в).

Характер излома образца 4 с фиксацией рельефа в двух взаимно перпендикулярных плоскостях представлен на рис. 5.

На образце 4 с разрушением в рабочей части образца, равно как и в образце 1, разрушенного в галтели, имеет место выкрашивание поверхности разрушения, что может быть объяснено ветвлением трещины или возможной множественностью разрушения, рассматриваемого ранее. Разрушение образца 2 с образованием центральной пластины также можно рассматривать как множественное разрушение, а не формирование откола.

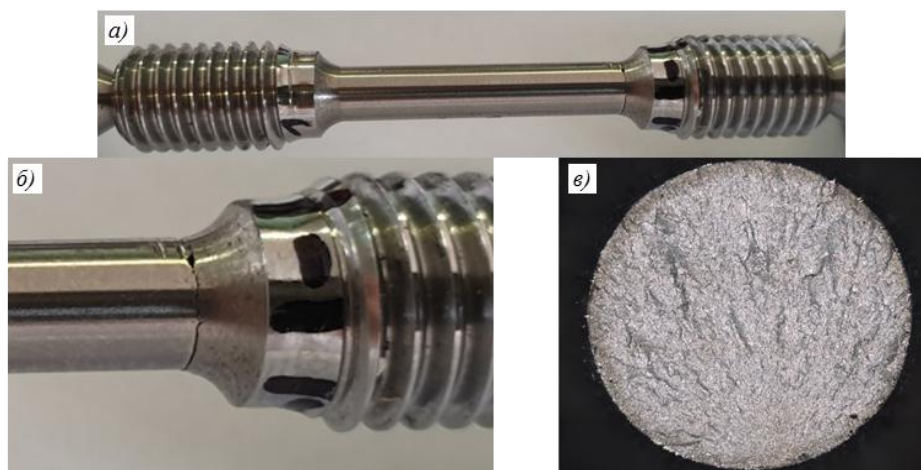


Рис. 2. Общий вид образца 1 (а) с зоной разрушения в галтели (б) и поверхность разрушения (в)

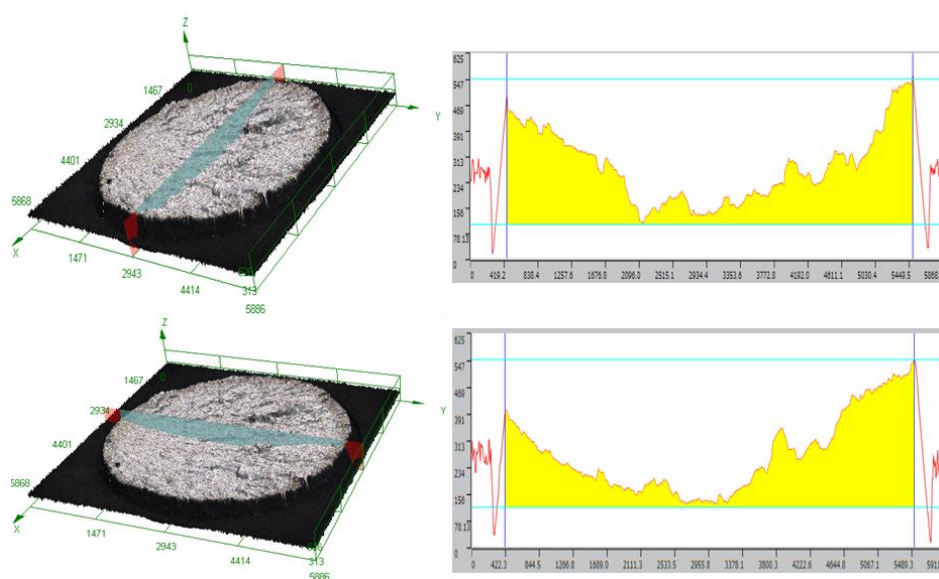


Рис. 3. Характер излома образца 1 и рельеф поверхности разрушения в двух взаимно перпендикулярных направлениях



Рис. 4. Общий вид образца 4 (а), область разрушения (б) и поверхность разрушения (в)

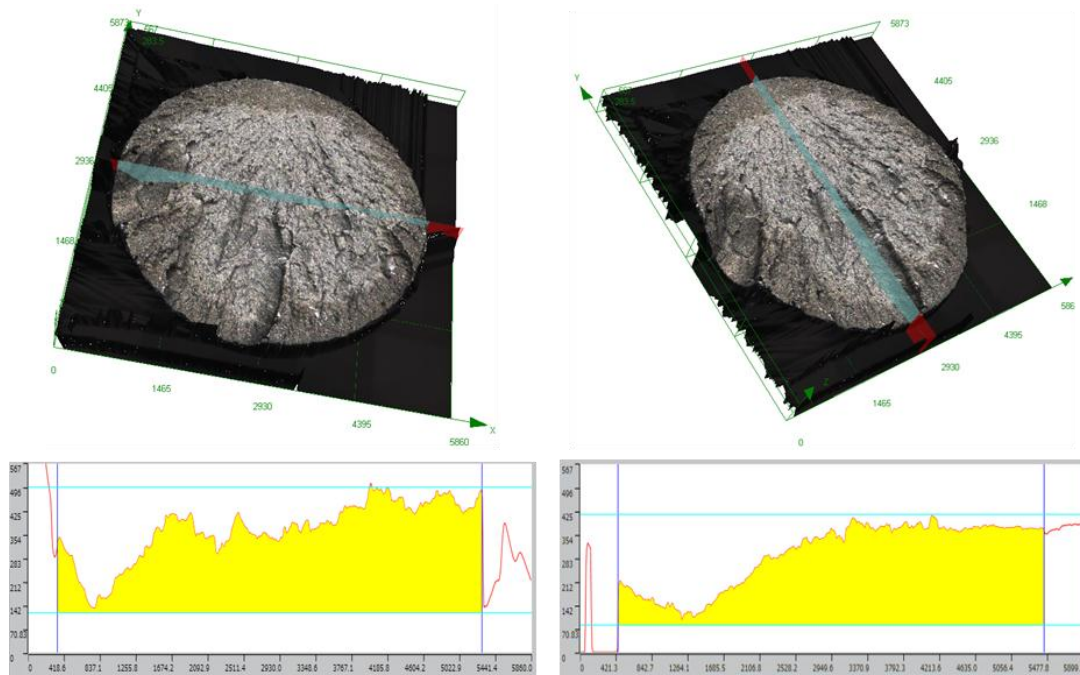


Рис. 5. Рельеф поверхности разрушения образца 4 в двух взаимно перпендикулярных направлениях

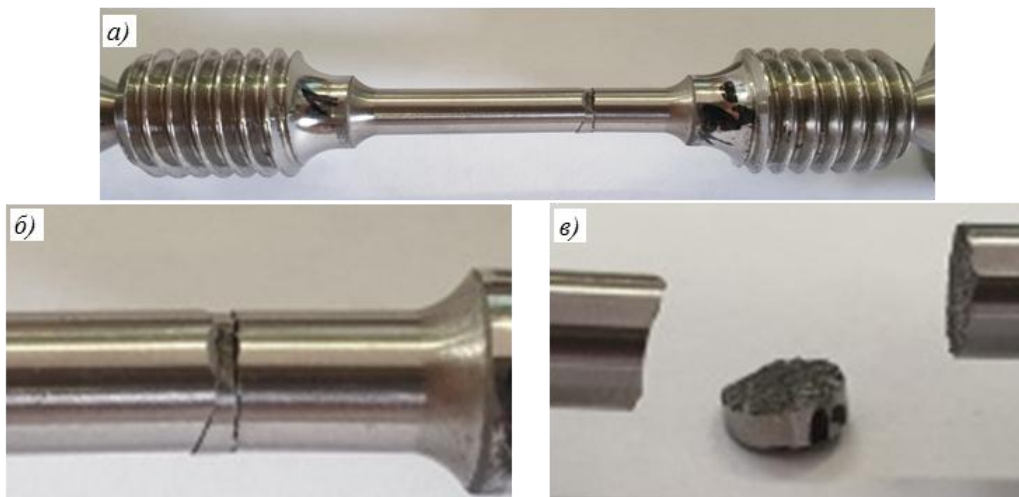


Рис. 6. Общий вид образца 2 (а), область разрушения (б) и центральная пластина разрушения (в)

На рис. 6 представлено двойное разрушение образца 2 в его рабочей части. Плоскости разрушения образуют небольшой угол. Поскольку произошло выкрашивание области начала развития разрушения, возникает предположение о едином очаге начала разрушения с последующим ветвлением по независимым направлениям с образованием двух плоскостей разрушения. Рельеф поверхностей разрушения центральной пластинки (условно левой и правой стороны) представлен на рис. 7.

Если разрушение образца 2 возможно рассматривать как развивающееся из одного центра, то разрушение, которое произошло в галтелях образца 3, указывает на независимость зон разрушения. Однако и в этом случае не отвергается вариант одновременного разрушения в галтелях. Общий вид образца 3, разрушенного в двух галтелях, иллюстрируется на рис. 8.

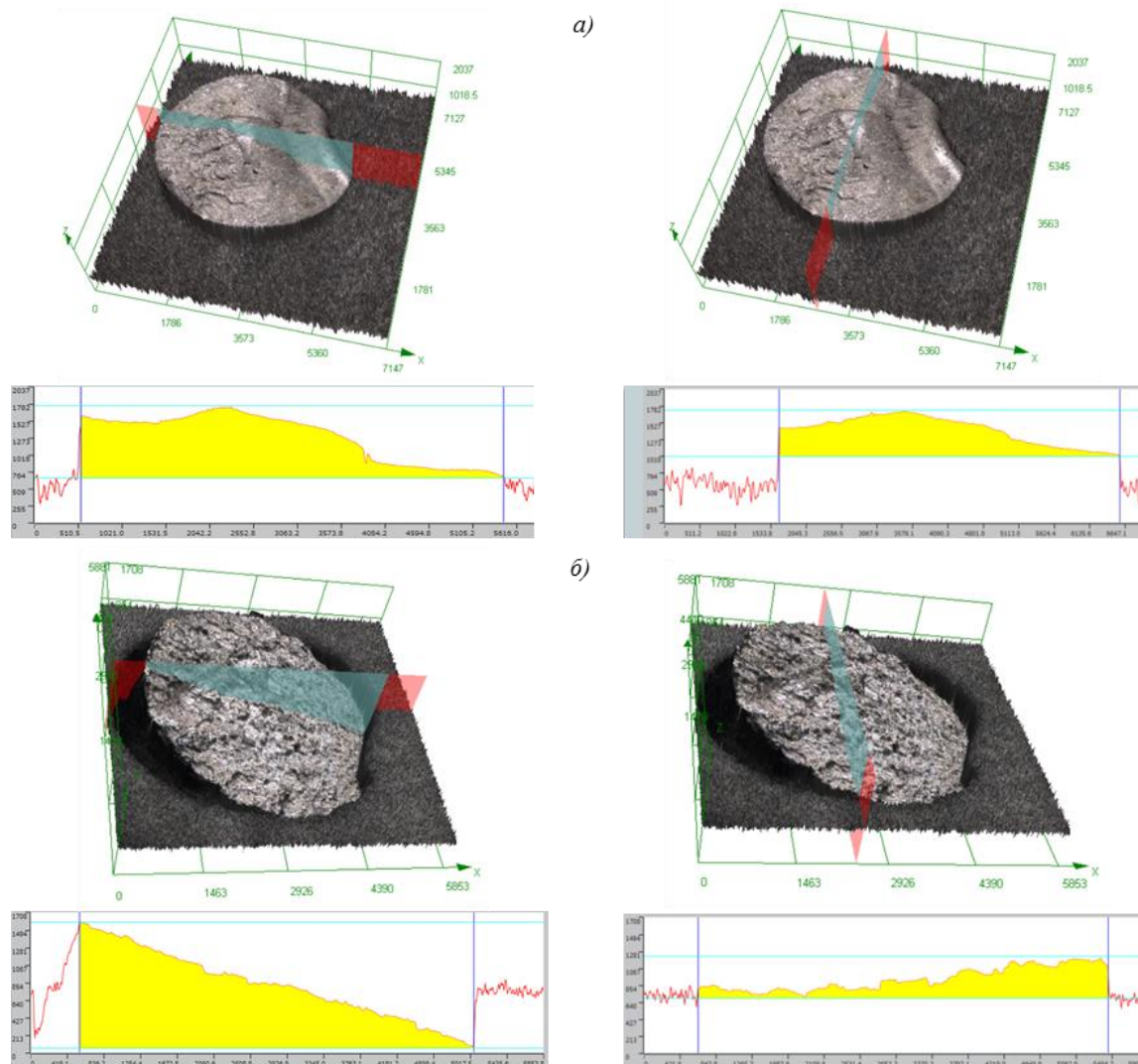


Рис. 7. Поверхности разрушения образца 2 – левая (а) и правая (б) сторона пластины с рельефом излома в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

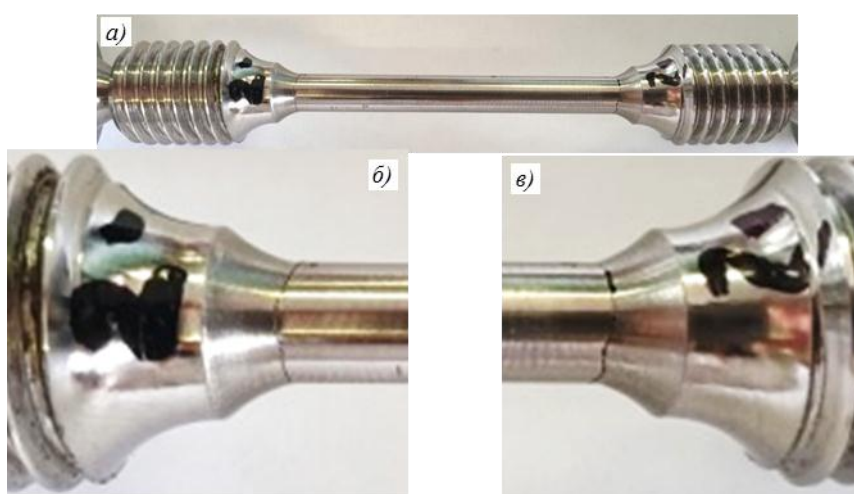


Рис. 8. Общий вид образца 3 (а) с двойным разрушением в галтелях (б, в)

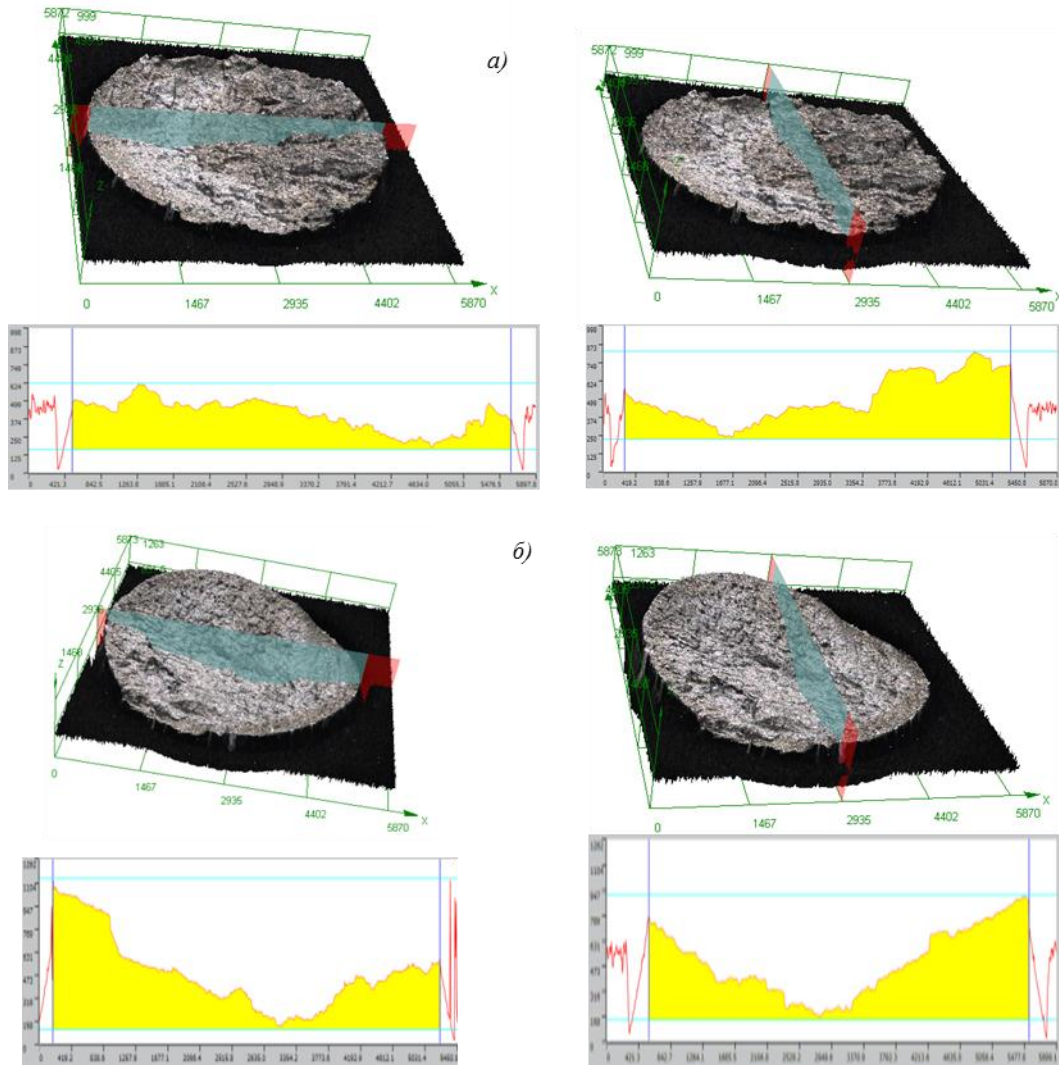


Рис. 9. Поверхности и рельефы разрушения двух галтелей образца 3 – левой (а) и правой (б)

На рис. 9 представлены поверхности разрушения образца 3 в галтелях и рельеф поверхностей разрушения, полученный в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

### Обсуждение результатов

Исследование поверхностей излома центральной пластины образца 2 выявило различный характер их рельефа разрушения. Левый излом, плоскость которого наклонена под небольшим углом к оси образца, имеет значительный перепад рельефа поверхности разрушения. В изломе наблюдается развитие фронта трещины, очаг которой находился в зоне выкрашивания. Правый излом, поверхность которого почти перпендикулярна оси образца, имеет относительно гладкий излом и не имеет ярко выраженного фронта разрушения. Отсутствие очага разрушения и явно выраженного фронта развития трещины позволяет предположить возможность множественного зарождения трещины с последующим формированием плоскости разрушения. Подобный характер разрушения в большей степени отвечает откольному типу разрушения. Анализ поверхностей разрушения позволяет сделать вывод о различном механизме разрушения и образования поверхностей разрушения. С большой уверенностью можно считать, что имеет место различная природа разрушения. Для подтверждения данного тезиса проведем сравнение изломов левой поверхности центральной пластинки образца 2

и поверхности разрушения образца 4, излом которого получен при статическом растяжении. В изломе образца 4 явно выражен очаг разрушения и последующее его развитие. Данные факты указывают на идентичность механизмов разрушения изломов образца 4 и левой поверхности центральной пластинки. Следовательно, можно сделать вывод, что левый излом пластинки, по-видимому, соответствует начальному разрушению от статической нагрузки. Правая поверхность разрушения, по-видимому, может рассматриваться как поверхность, образовавшаяся по откольному механизму разрушения. Итак, для центрального разрушения с образованием тонкой пластинки, фрактография двух поверхностей разрушения наглядно демонстрирует различную природу их образования, что также подтверждается видом поверхности разрушения, полученной при статическом растяжении.

Аналогичная картина наблюдается и при разрушении образца 3 по двум галтелям. Сравнение поверхностей разрушения выявило различный характер изломов. Левый излом характеризуется относительно гладким рельефом с плоской площадкой, которую, однако, нельзя квалифицировать как зону образования трещины. В большей степени эта площадка определяется как плоскость отрыва, присущая разрушению отколом. В изломе не наблюдается единственный очаг разрушения. По-видимому, множественность очагов разрушения формирует плоскостность поверхности разрушения и указывает на механизм разрушения отколом. Рельеф правого излома в галтели образца 3 достаточно хорошо совпадает с рельефом образца 1. В изломах образца 1 и правой галтели образца 3 наблюдаются очаги трещин и дальнейшее их (трещин) развитие. Исходя из анализа двойного разрушения образца шарикоподшипниковой стали в галтелях, можно констатировать различный механизм разрушения, причем одна поверхность разрушения в большей степени соответствует поверхности разрушения, образовавшейся при статическом растяжении. Анализ поверхностей разрушения позволяет с большой уверенностью утверждать, что вторичное разрушение осуществляется по механизму откола.

### Заключения

Проведено исследование поверхностей разрушения образцов новой шарикоподшипниковой стали, разработанной во ФГУП «ВИАМ», с единичным и двойным разрушением в галтелях образца, а также с единичным и двойным разрушением в рабочей части образца.

Фрактографические исследования поверхностей образца выявили различный рельеф поверхностей разрушения при двойном разрушении образца. Рельеф одной поверхности во многом воспроизводит рельеф, имевший место при статическом разрушении образца. Рельеф другой поверхности более однородный по структуре и более плоский.

Анализ поверхностей изломов позволяет с большой вероятностью утверждать, что механизм разрушения образца при двойном образовании поверхностей разрушения различен.

Фрактографический анализ двойных разрушений, имевших место при испытании на растяжение образцов шарикоподшипниковой стали, позволяет с большой уверенностью утверждать, что второе разрушение осуществляется по механизму откола.

### Библиографический список

1. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
2. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963. 340 с.

3. Контер Л.Я. Стали для теплостойких подшипников (обзор). М.: НИИНАвтопром, 1978. Сер.: XII. 78 с.
4. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тонышева 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.
5. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник / под ред. Н.Т. Гудцова. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цвет. металлургии, 1956. С. 821–828.
6. 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.
7. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
8. Крылов С.А., Маркова Е.С., Щербаков А.И., Якушева Н.А. Металлургические особенности выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 14–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-14-20.
9. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
10. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Металлург. 2013. №12. С. 4–8.
11. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
12. Гулина И.В., Седов О.В., Яковлев Н.О., Гриневич А.В. Особенности испытания подшипниковой стали // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №10 (82). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
13. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение // Разрушение. М.: Мир, 1973. Т. 1. С. 570–608.
14. Николас Т. Упругопластические волны напряжений // Динамика удара. М.: Мир, 1985. 296 с.
15. Новиков С.А. Разрушение материалов при воздействии интенсивных ударных нагрузок // Соровский образовательный журнал. 1999. №8. С. 116–121.
16. Смирнов И.В., Уткин А.А. Эффекты откольного разрушения в наносекундном диапазоне длительностей воздействия // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. С. 1776–1777.
17. Уткин А.А., Петров Ю.В., Смирнов И.В. Структурно-временная теория откольного разрушения. СПб.: Политехника, 2016. С. 86.