

Научная статья

УДК 620.184.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-261-275

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФРАКТОГРАФИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ И УСТАНОВЛЕНИИ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ*Л.В. Морозова¹, С.А. Наприенко¹, В.Б. Григоренко²*

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. Рассмотрены области применения фрактографического анализа, его возможности при разработке новых материалов, выборе химического состава, отработке технологии производства. Показаны возможности модификации фрактографических методов для разработки новых материалов и преимущества перед другими методами при установлении причин разрушения деталей и механизмов. Представлены фрактографические методы, используемые для оценки металлургического качества сплава, изучения закономерностей и механизмов процесса разрушения, уровня разрушающего усилия, а также выявления факторов, вызывающих ослабление материала на пути распространения магистральной трещины.

Ключевые слова: фрактография, фрактографический анализ, растровая электронная микроскопия, разрушение, усталостное разрушение, усталостная трещина, излом

Для цитирования: Морозова Л.В., Наприенко С.А., Григоренко В.Б. Применение методов фрактографии при разработке материалов и установлении причин разрушения // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 261–275. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-261-275.

Scientific article

APPLICATION OF FRACTOGRAPHY METHODS IN THE DEVELOPMENT OF MATERIALS AND FAILURE ANALYSIS*L.V. Morozova¹, S.A. Naprienko¹, V.B. Grigorenko²*

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 study examines application areas of fractographic analysis, its capabilities in the development of new materials, the selection of chemical composition, and the development of production technology. It shows possibilities for modifying fractographic methods for new materials development and the advantages compared with other methods for assessing failure causes of parts and mechanisms. The study presents fractographic methods, applied for assessing quality of a metallurgical alloy, studying patterns and mechanisms of failure process, level of destructive force, and identifying factors that cause material weakening on the path of the main crack propagation.

Keywords: fractography, fractographic analysis, scanning electron microscopy, damage, fatigue fracture, fatigue crack, the surface of destruction

For citation: Morozova L.V., Naprienko S.A., Grigorenko V.B. Application of fractography methods in the development of materials and failure analysis. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 261–275. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-261-275.

Введение

В результате упругой и пластической деформации, которая сопровождается образованием и развитием трещин, а затем полным разрушением, нагружаемые детали и образцы разделяются на отдельные части с образованием поверхностей раздела, которые называются изломами. Исследование строения изломов называется фрактографией, а методы исследования – фрактографическими [1–3].

Фрактография является давно известным, актуальным и широко применяемым методом анализа, который может быть полезен как при разработке новых материалов, так и при установлении причин разрушения деталей и механизмов. Фрактография находит применение в самых разных областях и отраслях: авиастроение, машиностроение, строительство и любая отрасль, в которой может произойти разрушение и требуется установить его причины [4–6].

Задачи, решаемые методами фрактографии:

- анализ поверхностей разрушения (изломов) для выявления причин разрушения конструкционных материалов;
- исследование морфологии поверхностей изделий, в том числе для идентификации поверхностных дефектов и причин их появления;
- выявление и анализ внутренних дефектов материала;
- изучение структурных и фазовых составляющих конструкционных материалов для выявления влияния структурных особенностей на эксплуатационные и технологические свойства материалов.

Анализ строения изломов применяется как для оценки качества материала, так и для изучения закономерностей процесса разрушения, его механизма, кинетики, влияния структурных факторов и др., установления характера и причин эксплуатационных разрушений.

В строении излома находят четкое отражение стадии процесса разрушения, поэтому анализ строения изломов является практически единственным методом, с помощью которого можно получить сведения о процессе разрушения после его завершения.

Излом выявляет участки повышенного напряжения, зоны, где есть внутренние дефекты, наиболее неблагоприятно сочетаются условия нагружения и свойства материала, его способность к локальному разрушению. Вид излома определяется условиями нагружения (напряженным состоянием, скоростью и амплитудой нагружения, температурными условиями и средой, в которых работает конструкция) и микроструктурой металла (кристаллографическим строением, формируемым технологией его выплавки, обработки давлением и термообработки, наличием текстуры и анизотропии механических свойств) [7–9].

При изучении поверхности излома можно получить следующую информацию, относящуюся к процессу разрушения:

- оценка металлургического качества и структуры металла;
- закономерности и механизм процесса разрушения;
- уровень разрушающего усилия;
- степень деформации при разрушении;
- причины, вызывающие ослабление материала на пути распространения разрушения;
- характер и причины разрушения.

Материалы и методы

При фрактографическом анализе применяется как визуальный осмотр, позволяющий оценить картину разрушения в целом, так и исследования с помощью оптического стерео- и растрового электронного микроскопа, применяемые для более детального изучения излома.

Существует разделение на макро- и микрофрактографию. Макрофрактография – изучение изломов невооруженным глазом или при небольших увеличениях (до $\times(30–100)$), которое позволяет оценить общее строение излома, определить характер и направление развития разрушения, выявить признаки усталости и коррозионного воздействия. Кроме того, можно обнаружить отличающиеся по строению зоны, крупные дефекты, наличие окисления или загрязнения как на поверхности разрушения, так и в прилегающих областях. Микрофрактография – изучение изломов при больших увеличениях, преимущественно с применением растрового электронного микроскопа. Этот метод позволяет исследовать микростроение излома более детально, изучить очаг разрушения, выявить микродефекты, оценить степень вязкости или хрупкости разрушения в микромасштабе, зафиксировать микропризнаки усталостного разрушения, воздействия коррозионно-активной среды, повышенной температуры и др. [10].

Растровые электронные микроскопы оснащаются детекторами, позволяющими выделить и проанализировать необходимый тип излучения, возникшего в процессе взаимодействия электронного зонда с образцом (рис. 1).

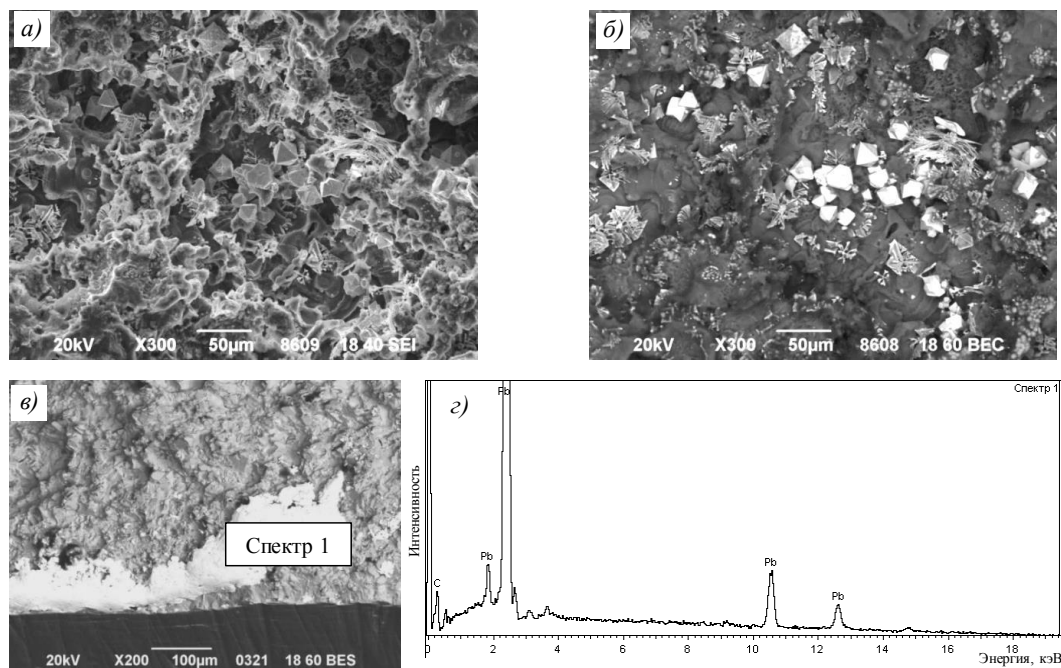


Рис. 1. Изображения поверхности излома, полученные с применением электронного микроскопа в режиме вторичных электронов (а), обратно отраженных электронов (б, в), и спектр характеристического рентгеновского излучения с выбранного участка (г)

Наиболее широко используемые при фрактографическом анализе типы сигналов, которые генерируются и детектируются в процессе работы растрового электронного микроскопа:

- вторичные электроны, генерируемые приповерхностными слоями. Обеспечивают максимальную в сравнении с другими сигналами разрешающую способность $\sim(5–10)$ нм (режим рельефа);
- отраженные электроны (режим контраста по среднему атомному номеру, а также режим рельефа);
- характеристическое рентгеновское излучение. Позволяет идентифицировать состав и качественно оценить наличие химических элементов и их соединений в изломе (электронно-зондовый микроанализ) [11].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Применение фрактографического анализа при разработке сплавов и отработке технологических процессов

Оценка различий в строении изломов может дать необходимую информацию о состоянии материала и помочь определиться с выбором режимов деформации, скоростей и режимов сварки или процессов лазерного сплавления.

Фрактографический анализ может быть полезен при выборе химического состава сплава, ведь даже незначительное изменение концентрации одного из элементов может оказывать заметное влияние на сопротивление разрушению и итоговое строение излома [12]. Так, при разработке нового алюминий-литиевого сплава методами фрактографии установлено, что добавки редкоземельных элементов по-разному влияют на вязкость разрушения. Например, добавки Sc привели к формированию более однородного излома с вязким ямочным рельефом, а добавление Се положительного эффекта не оказывает. При этом повышение содержания Li, Cu и Zn снижает общую пластичность сплава и приводит к формированию мелких, малопластичных ямок в изломе и появлению участков с разрушением по границам зерен (рис. 2).

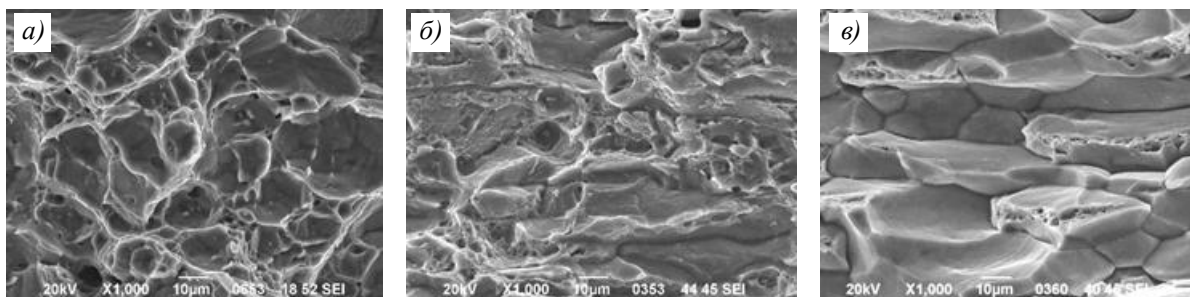


Рис. 2. Изменение строения излома алюминий-литиевого сплава в зависимости от изменения химического состава: а – вязкий ямочный рельеф при добавлении Sc; б – мелоямочный рельеф при добавлении Се; в – границы зерен при увеличении содержания Li, Cu и Zn

Фрактографический анализ можно использовать при выборе режима термической обработки [13, 14]. Например, в жаропрочных никелевых сплавах отличие между разными ступенями режима термообработки может составлять всего 50–100 °С. При этом механические свойства с изменением температуры могут измениться незначительно, а в строении излома видно, что пластичность уже снизилась. Например, увеличилась доля мелоямочного рельефа, появились участки с хрупкими фасетками или даже с разрушением по границам зерен (рис. 3).

Существует необходимость выявления дефектов, возникающих в процессе отработки параметров синтеза при лазерном сплавлении порошковых материалов, например при внедрении новых материалов или технологий [15, 16].

В материалах, полученных лазерным сплавлением, методами фрактографии легко выявляются типичные дефекты, такие как поры, участки с отсутствием сплавления, трещины, скопления скоагулировавших частиц и др. Например, применение оборотных порошков часто приводит к загрязнениям, внедрению в сплав гранул, отличных по составу от основного порошка (рис. 4).

Для оценки работоспособности, ресурса и несущей способности материала проводят проверку его механических свойств [17]. Испытания на растяжение, ударный

изгиб, длительную прочность и усталость информативны для оценки состояния материала, но фрактографический анализ позволяет сделать окончательный вывод о состоянии сплава и показать изменения, не выявляемые иными методами.

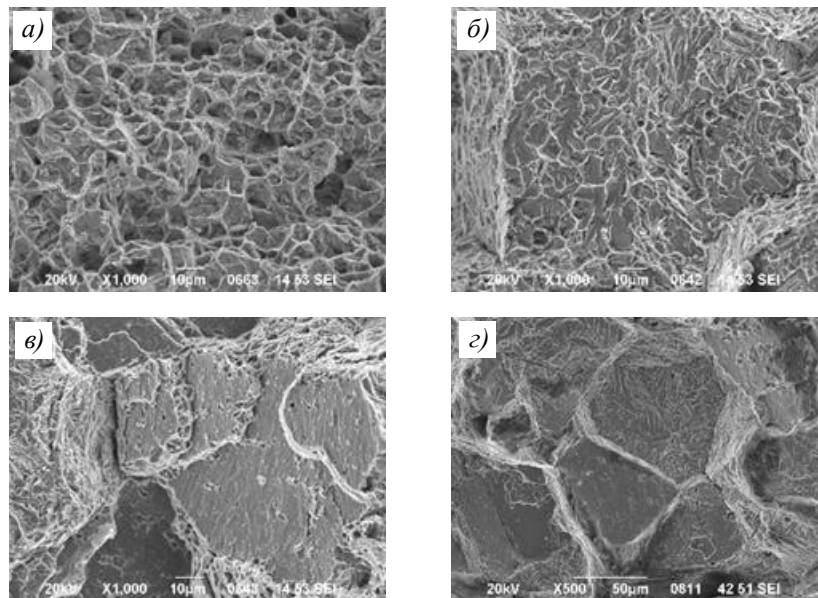


Рис. 3. Изменение строения излома при изменении режимов термообработки: *а* – вязкий ямочный рельеф; *б* – мелкоямочный рельеф; *в* – фасетки скола; *з* – границы зерен

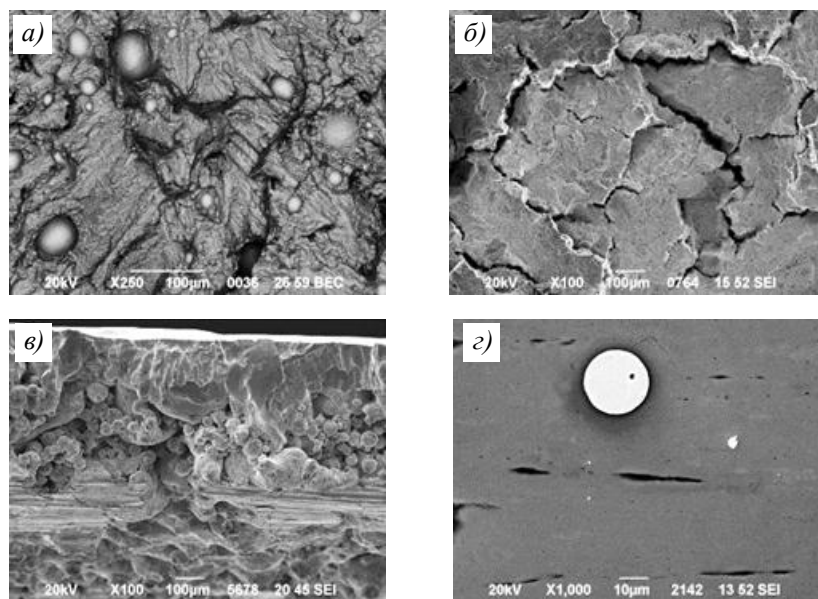


Рис. 4. Дефекты в сплавах, полученных методами селективного лазерного сплавления: *а* – поры; *б* – трещины; *в* – несплавление порошка; *з* – внедрение гранулы с другим составом

Например, фрактографический метод можно применить для оценки толщины альфированного слоя на титановых сплавах. При этом данный метод исследований может быть более чувствительным к наличию хрупкого поверхностного слоя с повышенным содержанием кислорода, чем микроструктурный анализ. Титановые сплавы при статическом нагружении разрушаются пластично с формированием мелкоямочного рельефа, а приповерхностные слои с повышенным содержанием кислорода – с формированием хрупких фасеток (рис. 5) [18].

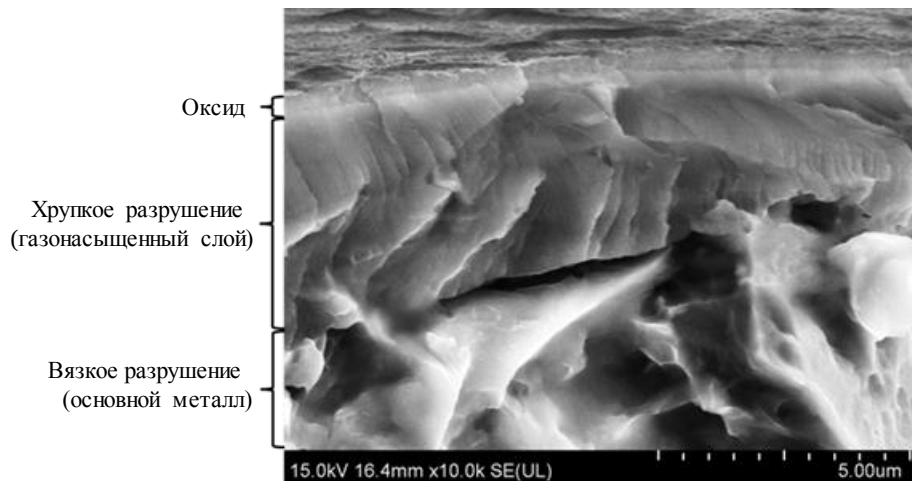


Рис. 5. Хрупкое разрушение газонасыщенного слоя вблизи поверхности титанового сплава BT20

Следует отметить, что, хотя фрактография изначально разрабатывалась как метод исследования изломов металлических материалов, основные подходы анализа модифицируются для неметаллических материалов. Напыление токопроводящего слоя позволяет исследовать полимерные композиционные материалы [19]. Например, вместо анализа границ зерен проводится анализ границ волокон, оцениваются прочность сцепления волокон с матрицей (адгезионная прочность), вязкость формирующегося ямочного рельефа, наличие дефектов как в изломе, так и на поверхности.

В полимерных композиционных материалах методами фрактографии можно оценить изменение характера разрушения при повышении температуры испытания. Ведь повышение температуры обычно приводит к уменьшению адгезионной прочности на границе «волокно–матрица» и увеличению пластичности полимерной матрицы, что вызывает характерные изменения морфологии поверхности излома (рис. 6). Можно также оценить влияние климатического воздействия, повышенных или циклических нагрузок.

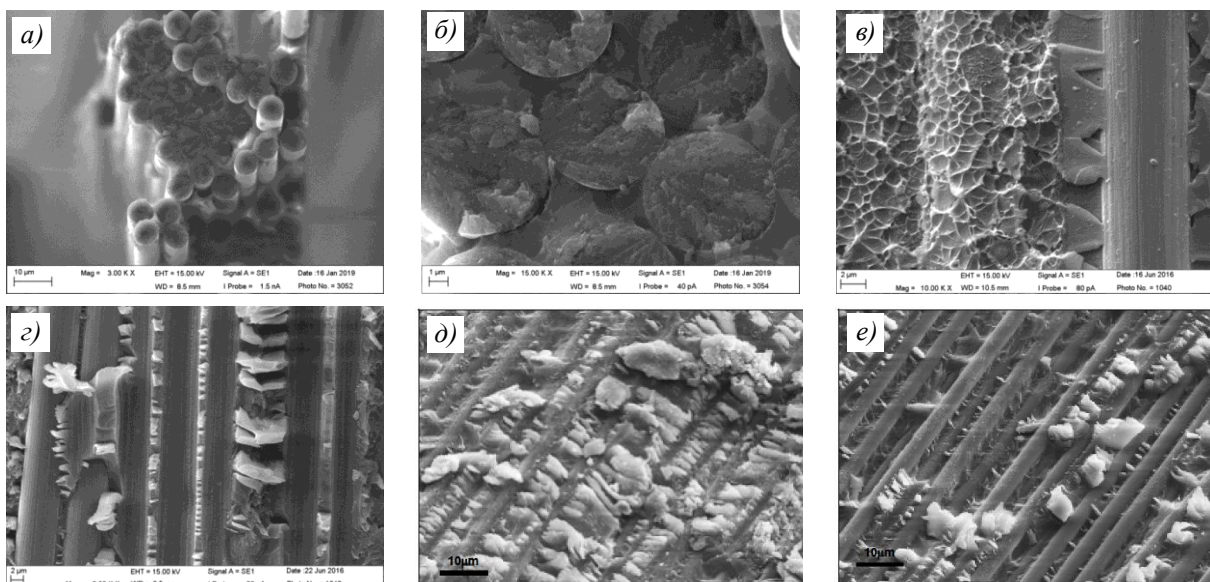


Рис. 6. Строение излома полимерного композиционного материала: а, б – излом полимерных волокон; в – ямочный рельеф; г – отделение полимерных волокон от матрицы; д – разрушение при комнатной температуре; е – разрушение при 100 °С

Методами микрофрактографии можно оценить общую степень хрупкости при разрушении керамических материалов, размер и количество формирующихся фasetок. В случае композиционных материалов, помимо оценки характера разрушения металлической матрицы, можно определить характер разрушения внедренных неметаллических элементов, прочность адгезионного соединения с матрицей и др. (рис. 7) [20, 21].

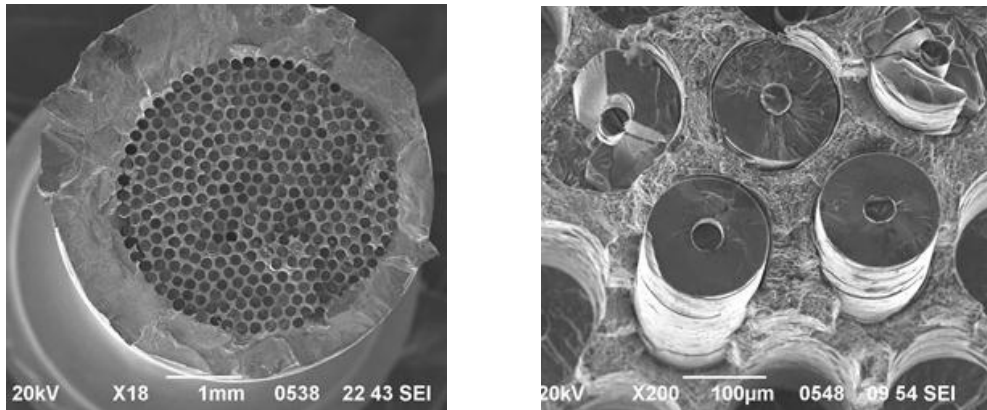


Рис. 7. Излом композиционного материала

При анализе порошковых материалов можно оценить сферичность гранул порошка либо, наоборот, их огранку, размер фракции, равномерность, наличие дефектов типа сателлитов, а также спекаемость гранул, характер разрушения соединения, сформировавшегося при спекании, и др. (рис. 8).

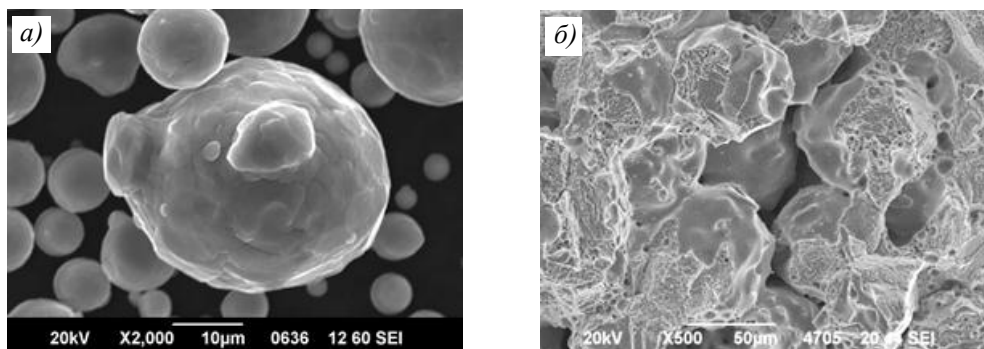


Рис. 8. Отдельные гранулы (а) и излом гранульного сплава (б)

Применение фрактографического анализа при установлении причин разрушения в процессе эксплуатации и ресурсных испытаний

Обеспечение стабильной работы сложных механизмов, их узлов и отдельных деталей начинается уже на этапе выбора материала [22]. Нужно не только учитывать свойства выбранного для их производства сплава, но и контролировать качество изготовления, сборки и установки. На всех этапах, начиная с выбора марки материала, продолжая выбором режимов деформации, термической и механической обработки и заканчивая монтажом готовых изделий, нужно избегать нарушений технологии и учитывать условия дальнейшей эксплуатации. Так, например, при выборе сплава для деталей, работающих при переменной нагрузке, учитывают не только предел прочности и пластичности, но и способность сопротивляться усталостному разрушению [23].

Наиболее часто при эксплуатации материалов встречается разрушение по усталостному механизму. Инициировать такое разрушение могут самые разнообразные дефекты: риски от механической обработки и прочие механические повреждения, коррозионные питтинги, внутренние дефекты, являющиеся концентраторами напряжения. В литых материалах это могут быть разнообразная пористость, фрагменты шлака, в деформированных – исходные зерна, не подвергшиеся деформации, горячие трещины, закаты и даже хрупкие карбиды, расположенные в приповерхностном слое. Макропризнаки усталостного разрушения, такие как линии останковки трещины, могут быть обнаружены методами макрофрактографии, но усталостные бороздки лучше выявляются с помощью электронного микроскопа. Оценивая их расположение, равномерность и количество, можно сделать вывод о действующих нагрузках и примерно оценить количество циклов, предшествующих разрушению [24, 25].

В случае возникновения эксплуатационных разрушений основной целью исследований являются определение их причины и разработка профилактических мероприятий. Причины разрушения можно разделить на четыре группы:

- конструкторские (например, конструктор не учел все условия нагружения);
- металлургические (несоответствие требованиям нормативной документации);
- технологические (некачественное изготовление или сборка детали);
- эксплуатационные (работа в условиях, на которые деталь не рассчитана).

В некоторых случаях причинами разрушения может являться совокупность факторов, которые по отдельности не влекут за собой отрицательного влияния на эксплуатацию детали, а совместное их влияние дает «синергетический» эффект.

Таким образом, при определении эксплуатационных разрушений, как правило, проводится комплекс исследований для выявления причин аварии. В рамках таких исследований применяют методы оптической и электронной микроскопии. Комплексное исследование деталей, разрушившихся в процессе эксплуатации, включает проведение неразрушающего контроля, определение соответствия химического состава сплава заявленному в документации, металлографические и фрактографические исследования, а также проверку механических свойств. Проведение комплексного исследования позволяет не только установить причины разрушения деталей, но и разработать и принять меры, направленные на предотвращение похожих ситуаций в будущем.

Даже если излом еще не сформировался, анализ поверхности детали помогает выявить следы «предразрушения» в виде линий скольжения, появляющихся в металлах и сплавах с гранецентрированной кубической решеткой, и оценить степень истощения внутреннего запаса прочности и готовности к разрушению [26]. Формирование первых линий скольжения происходит при степени нагружения, равной $\sim(0,8-0,9)\sigma_B$, а наличие микротрещин сигнализирует о начале процесса (рис. 9).

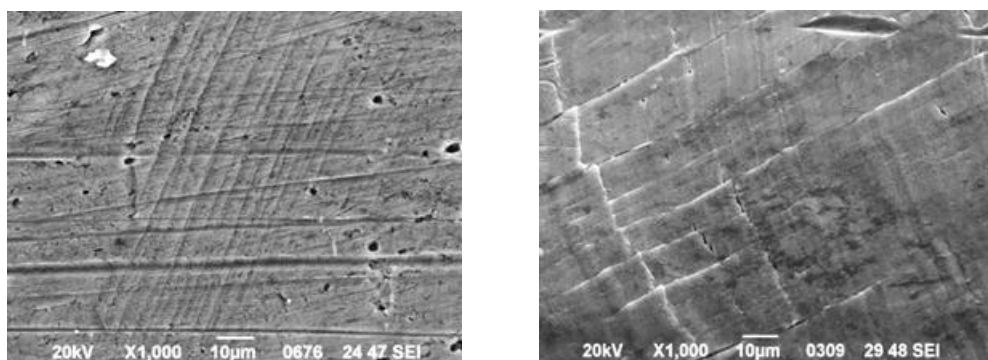


Рис. 9. Линии скольжения на поверхности детали

Надежность деталей и агрегатов изделия зависит не только от свойств материалов, но и от наличия в них несплошностей и скрытых структурных неоднородностей, приводящих к отклонениям физико-механических характеристик от номинальных значений, поэтому их контроль является актуальной задачей.

Методами фрактографии легко выявить наличие внутренних дефектов, возникших на этапе производства, например остатков шлака, горячих трещин, литейных и сварных рыхлот и пор, дефектов деформации и др. (рис. 10), т. е. тех дефектов, для обнаружения которых чувствительность методов неразрушающего контроля недостаточна.

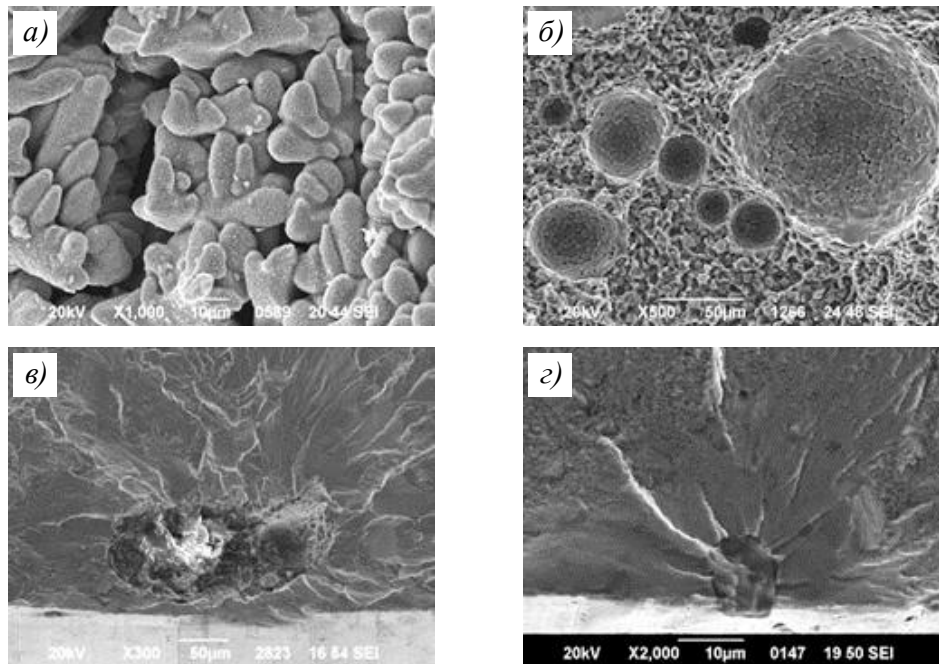


Рис. 10. Дефекты в изломах: *а* – литейная рыхлота; *б* – сварная пористость; *в* – шлак в сплаве; *д* – хрупкая частица в приповерхностной зоне

На рис. 11 показан пример развития усталостной трещины от внутреннего дефекта, представляющего собой скопление оксидов основного материала лопатки из титанового сплава, которые могут образоваться в результате заката черновой поверхности в процессе горячей пластической деформации.

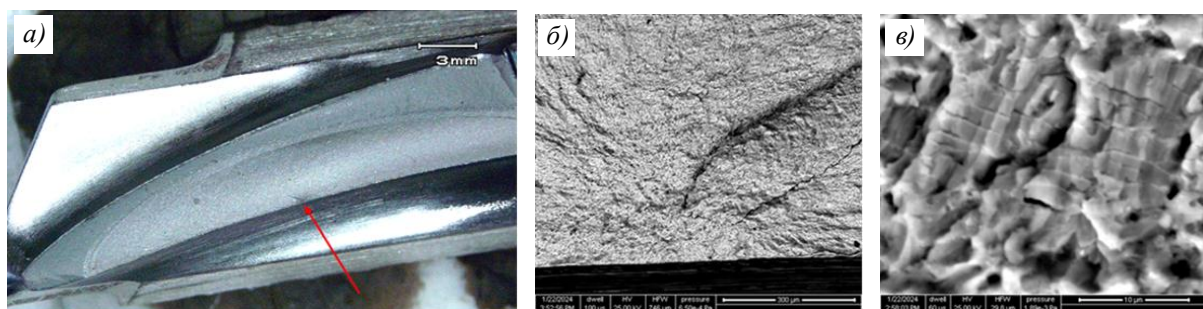


Рис. 11. Развитие усталостной трещины от заката черновой поверхности: *а* – общий вид излома с дефектом; *б* – очаговая зона; *в* – усталостные бороздки

Интерес представляет и фрактографический анализ разрушений сварных соединений. Так, после усталостных испытаний сварных трубок из стали 12Х18Н10Т

и сплава ЭП678 (03X11H10M2T) обнаружены усталостные трещины, развивавшиеся от границ разориентированных зерен, находящихся в зоне термического влияния (рис. 12, результаты исследований являются продуктом деятельности АО «ОДК»). Образование таких зерен связано с недостаточной защитой поверхности узла от окисления в процессе сварки.

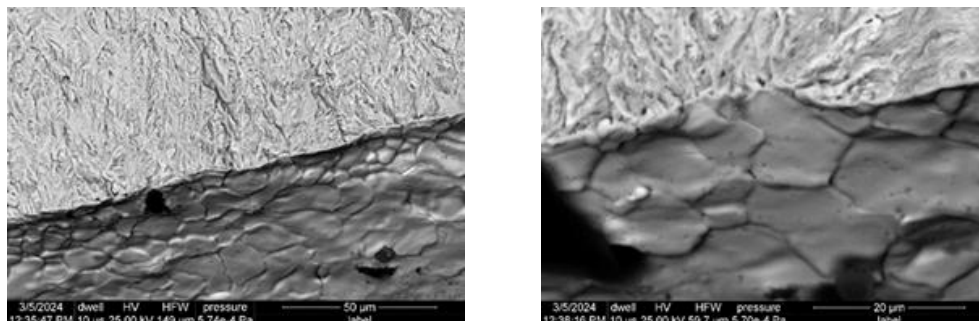


Рис. 12. Внутренняя поверхность и излом трубки из стали 12X18H10T с развитием усталостного разрушения от стыков зерен

Дополнительное применение качественного электронно-зондового микроанализа позволяет более точно идентифицировать выявленные дефекты, включения и скопления частиц (рис. 13).

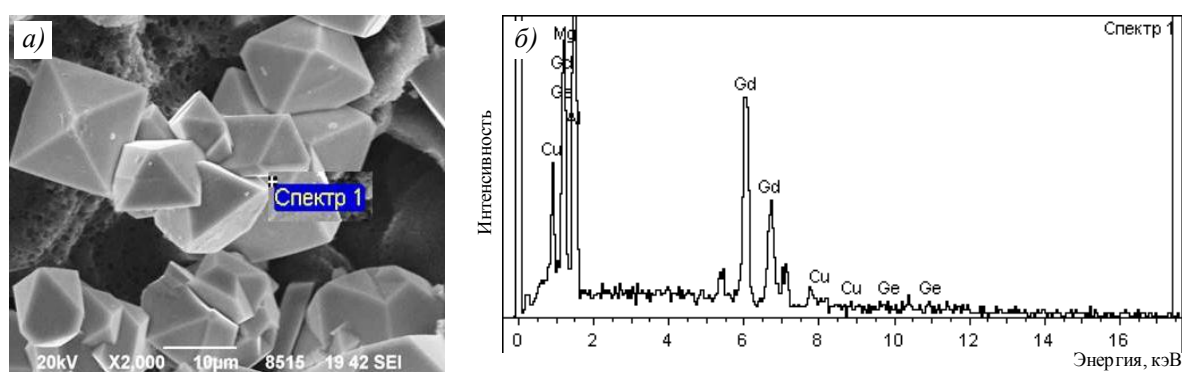


Рис. 13. Результаты электронно-зондового микроанализа поверхности излома: а – частицы в изломе; б – спектр характеристического рентгеновского излучения

При анализе излома можно выявить наличие разнотерности в сплаве без изготовления металлографических шлифов (рис. 14).

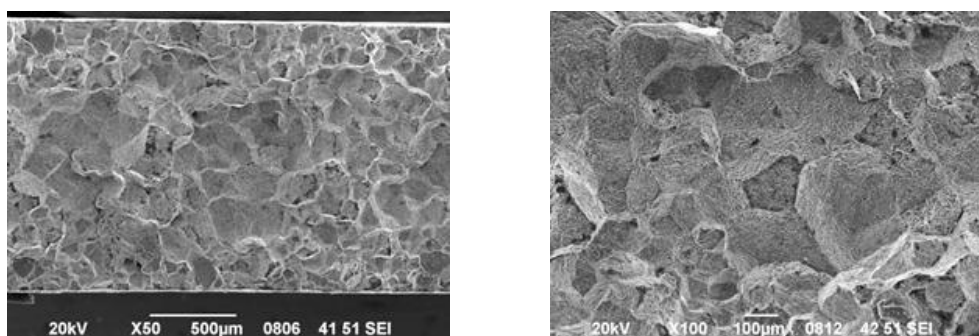


Рис. 14. Зерна разного размера в изломе

Оценить повреждения, возникшие в процессе эксплуатации, можно методами макро- и микрофрактографии. Это могут быть как механические, температурные, так и коррозионные повреждения [27].

Основными фрактографическими признаками разрушения стальных изделий при коррозионном воздействии являются разрушение по границам зерен, часто сопровождаемое формированием фасеток скола, наличие вторичных трещин и общая их разветвленность, а также наличие отложений продуктов коррозии на поверхности излома [28].

На рис. 15 приведен пример развития межзеренного разрушения от коррозионных питтингов на поверхности детали.

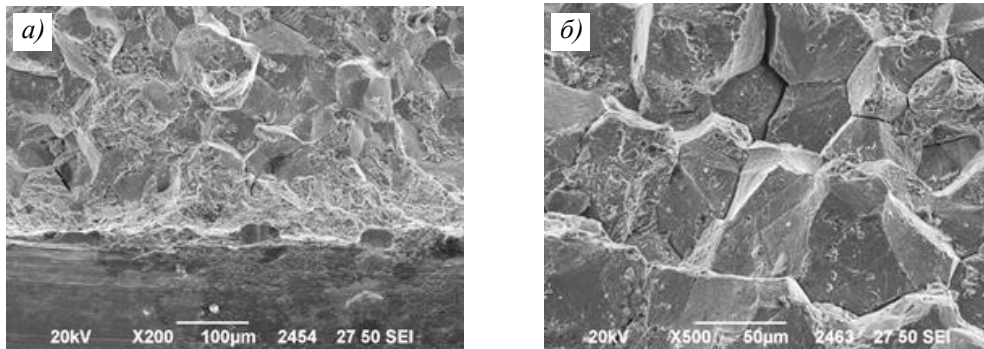


Рис. 15. Развитие разрушения от коррозионных питтингов на поверхности детали (а) и границы зерен (б)

Немаловажными факторами, влияющими на надежность деталей, являются обработка их поверхностей и особенности сборки. При усталостном разрушении, обусловленном высоким уровнем действующих напряжений, трещины в большинстве случаев будут развиваться от поверхностных дефектов, вызванных обработкой детали (рис. 16). В качестве таких дефектов зачастую выступают риски от механической обработки, являющиеся дополнительными концентраторами напряжений.

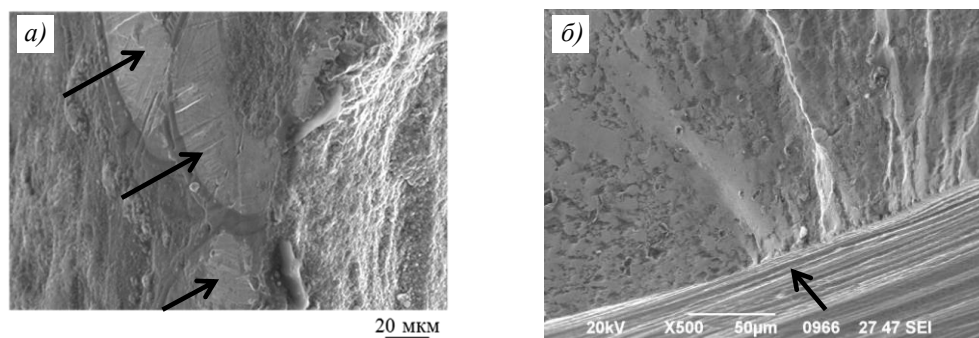
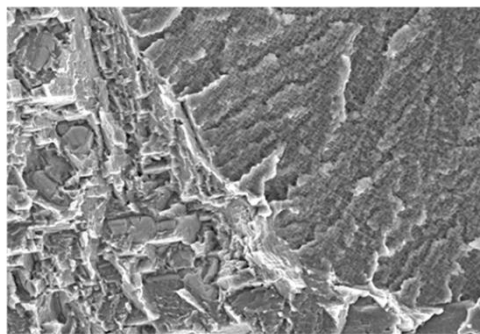


Рис. 16. Разрушение от дефектов поверхности: а – следы от маркировочного карандаша (указаны стрелками) на торце лопатки из жаропрочного никелевого сплава, от которых развилось разрушение; б – усталостное разрушение от рисков на поверхности

В некоторых случаях результаты фрактографических исследований требуют экспериментального подтверждения гипотез о причинах разрушения. Это в большинстве случаев связано с аномальным строением излома, нетипичным для разрушения исследуемого материала в условиях, определенных для эксплуатации детали. Подобные случаи нередко связаны с влиянием среды на изменение механизма разрушения (рис. 17) [29].



10 мкм

Рис. 17. Нетипичное разрушение лопатки из монокристалла жаропрочного никелевого сплава по плоскостям куба {001}

При разрушении детали по усталостному механизму в процессе эксплуатации при переходе в закритическую стадию (долом) коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины достигает критического значения K_{1c} [28–32]. В соответствии с уравнением Ирвина коэффициент интенсивности напряжений связан с уровнем номинальных напряжений:

$$\sigma_{\max} = \frac{YK_{1c}}{\sqrt{\pi l}},$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальные действующие номинальные напряжения; l – длина усталостной трещины; Y – поправка, учитывающая геометрические параметры нагруженного тела с трещиной.

Критический коэффициент интенсивности напряжений является характеристикой материала и, следовательно, с использованием уравнения Ирвина можно определить уровень номинальных напряжений, действующих на деталь при разрушении.

Заключения

Фрактография является известным и актуальным методом анализа, который получает все более широкое распространение, обусловленное появлением новых материалов и технических возможностей для их исследования.

Фрактографический анализ полезен как при разработке новых материалов, выборе химического состава, отработке технологии производства, так и при установлении причин разрушения деталей и механизмов.

Список источников

1. Феллоуз Д. Фрактография и атлас фрактограмм: справочник. Пер. с англ. под ред. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия, 1982. 489 с.
2. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. 230 с.
3. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
4. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
5. Фридман Я.Б., Гордеева Т.А., Зайцев А.М. Строение и анализ изломов металлов. М.: Машгиз, 1960. 128 с.
6. Энгель Л., Клингел Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: справочник. М.: Металлургия, 1986. 232 с.
7. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСИС, 2007. 259 с.

8. Клевцов Г.В. Закономерности образования пластических зон у вершины трещины при различных видах нагружения и рентгеновская фрактодиагностика разрушения // Вестник ОГУ. 2006. № 1. Т. 2. С. 81–88.
9. Броек Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
10. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сталей: справочник. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
11. Криштал М.М., Ясников И.С., Полуниин В.И. и др. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
12. Ключкова Ю.Ю., Оглодков М.С., Антипов К.В., Селиванов А.А. Поковки из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1480 // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 26–36. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-26-36.
13. Штремель М.А. Разрушение. М., 2014. 1646 с.
14. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
15. Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П. Свойства и структура легированной оксидом алюминия и углеродом порошковой меди // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 4 (81). С. 48–56. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-48-56.
16. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Медведев П.Н., Крупнина О.А., Рогалев А.М. Особенности структуры сплава Ti–6Al–4V, полученного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 14–24. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-14-24.
17. Машиностроение: энциклопедия / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. 852 с.
18. Кашапов О.С., Решетило Л.П., Наприенко С.А., Медведев П.Н. Влияние окисления на механические свойства и состояние поверхности жаропрочного титанового сплава BT41 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. № 89. С. 63–75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-1-63-75.
19. Хохлов А.В., Наконечный Е.И., Галышев С.Н., Атанов Б.И., Орлов В.И., Жидков М.В., Гулин В.В. Анализ распределения длин выдернутых волокон на поверхностях разрушения композитов с алюминиевой матрицей, непрерывно армированной углеродными волокнами, по данным СЭМ и КЛСМ // Авиационные материалы и технологии. 2026. № 1 (82). С. 158–194. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-158-194.
20. Блинков И.В., Сорокин О.Ю., Кузнецов Б.Ю., Власов И.И., Евдокимов С.А., Ткаленко Д.М., Прокофьев В.А. Оптимизация состава и структуры многослойного металлокерамического композиционного материала // Авиационные материалы и технологии. 2026. № 1 (82). С. 89–102. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-89-102.
21. Щеголева Н.Е., Прокофьев В.А., Ваганова М.Л., Чайникова А.С., Моисеева Н.С. Получение плотной керамики на основе оксида алюминия // Авиационные материалы и технологии. 2026. № 1 (82). С. 103–112. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-103-112.
22. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.П. и др. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
23. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
24. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.
25. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН – ЦИАМ, 2013. 515 с.
26. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.

27. Мушникова С.Ю., Парменова О.Н., Чайникова Д.Н. и др. Исследование стойкости к межкристаллитной коррозии образцов из нержавеющей аустенитных сталей, полученных методом селективного лазерного сплавления, после различных режимов термической обработки // Вопросы материаловедения. 2025. № 4 (124). С. 188–206.
28. Крупин Ю.А., Филиппова В.Б. Материаловедение спецсплавов. Коррозионностойкие материалы. М.: МИСИС, 2008. 154 с.
29. Орлов М.Р., Якимов М.С. Замедленное разрушение монокристаллических лопаток из жаропрочного сплава ЖС26-ВИ в процессе эксплуатации ГТУ // Газотурбинные технологии. 2011. № 8 (101). С. 10–15.
30. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Metallurgiya, 1988. 400 с.
31. 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.
32. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.

References

1. Fellows J.A. *Fractography and Atlas of Fractographs: A Handbook*. Trans. from Engl. Ed. by M.L. Bernshtein. Moscow: Metallurgiya, 1982, 489 p.
2. Botvina L.R. *Fracture Kinetics of Structural Materials*. Moscow: Nauka, 1989, 230 p.
3. Botvina L.R. *Fracture: Kinetics, Mechanisms, and General Patterns*. Moscow: Nauka, 2008, 334 p.
4. Gordeeva T.A., Zhegina I.P. *Fracture Surface Analysis in Material Reliability Assessment*. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 200 p.
5. Fridman Ya.B., Gordeeva T.A., Zaitsev A.M. *Structure and Analysis of Metal Fracture Surfaces*. Moscow: Mashgiz, 1960, 128 p.
6. Engel L., Klingele H. *Scanning Electron Microscopy. Fracture: A Handbook*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 232 p.
7. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractodiagnostics of the Failure of Metallic Materials and Structures*. Moscow: MISiS, 2007, 259 p.
8. Klevtsov G.V. Patterns of plastic zone formation at the crack tip under various loading modes and X-ray fractodiagnostics of failure. *Vestnik OGU*, 2006, no. 1, vol. 2, pp. 81–88.
9. Broek D. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Trans. from Engl. Moscow: Vysshaya Shkola, 1980, 368 p.
10. Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Fracture Surfaces of Structural Steels: A Handbook*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p.
11. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I. et al. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Spectral Microanalysis: Practical Applications*. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 208 p.
12. Klochkova Yu.Yu., Oglodkov M.S., Antipov K.V., Selivanov A.A. Forgings from high-strength aluminium-lithium alloy V-1480. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 26–36. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-26-36.
13. Shtremel M.A. *Fracture*. Moscow, 2014, 1646 p.
14. Goritskiy V.M. *Diagnostics of Metals*. Moscow: Metallurgizdat, 2004, 408 p.
15. Vladimirova Yu.O., Shalunov E.P. Properties and structure of powdered copper alloyed by aluminum oxide and carbon. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 4 (81), pp. 48–56. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-4-48-56.
16. Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Medvedev P.N., Krupnina O.A., Rogalev A.M. Features of the structure of Ti–6Al–4V alloy obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10 (82), pp. 14–24. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-14-24.
17. *Mechanical Engineering: Encyclopedia*. Ed. K.V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, vol. II-1: Physicomechanical Properties. Testing of Metallic Materials, 852 p.

18. Kashapov O.S., Reshetilo L.P., Naprienko S.A., Medvedev P.N. Effect of oxidation on the mechanical properties and surface condition of the heat-resistant titanium alloy VT41. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2023, no. 89, pp. 63–75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-I-63-75.
19. Khokhlov A.V., Nakonechnyi E.I., Galyshev S.N., Atanov B.I., Orlov V.I., Zhidkov M.V., Gulin V.V. Analysis of the pull-out length distributions on fracture surfaces of the aluminum matrix composites reinforced with continuous carbon fibers based on SEM and CLSM data. *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 158–194. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-158-194.
20. Blinkov I.V., Sorokin O.Yu., Kuznetsov B.Yu., Vlasov I.I., Evdokimov S.A., Tkalenko D.M., Prokofiev V.A. Optimization of the composition and structure of multilayer metal-ceramic compositional material. *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 113–125. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-89-102.
21. Shchegoleva N.E., Prokofyev V.A., Vaganova M.L., Chainikova A.S., Moiseeva N.S. Production of dense aluminum oxide-based ceramics. *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 113–125. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-103-112.
22. Balter M.A., Lyubchenko A.P., Aksenova S.P. et al. *Fractography: A Diagnostic Tool for Failed Components*. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 184 p.
23. Terentiev V.F., Korableva S.A. *Metal Fatigue*. Moscow: Nauka, 2015, 484 p.
24. Terentiev V.F. *Fatigue of Metallic Materials*. Moscow: Nauka, 2003, 254 p.
25. Terentiev V.F., Petukhov A.N. *Fatigue of High-Strength Metallic Materials*. Moscow: IMET RAS – CIAM, 2013, 515 p.
26. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
27. Mushnikova S.Yu., Parmenova O.N., Chainikova D.N. et al. Investigation of intergranular corrosion resistance of austenitic stainless steel specimens produced by selective laser melting after various heat treatment regimes. *Voprosy Materialovedeniya*, 2025, no. 4 (124), pp. 188–206.
28. Krupin Yu.A., Filippova V.B. *Materials Science of Special Alloys: Corrosion-Resistant Materials*. Moscow: MISIS, 2008, 154 p.
29. Orlov M.R., Yakimova M.S. Delayed fracture of single-crystal blades made of heat-resistant alloy ZhS26-VI during gas turbine unit operation. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2011, no. 8 (101), pp. 10–15.
30. Ivanova V.S., Shanyavsky A.A. *Quantitative Fractography: Fatigue Fracture*. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1988, 400 p.
31. Kuzmin V.R., Prokhorov V.A., Borisov A.Z. *Fatigue Strength of Metals and Structural Durability under High-Level Irregular Loading*. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 256 p.
32. Matvienko Yu.G. *Fracture Mechanics Models and Criteria*. Moscow: Fizmatlit, 2006, 328 p.

Информация об авторах

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

Наприенко Сергей Александрович, заместитель начальника лаборатории по науке, 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

Information about the authors

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

Sergey A. Naprienko, Deputy Head of Laboratory of Science, 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

Статья поступила в редакцию 23.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.07.2026.

The article was submitted 23.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 03.07.2026.