

УДК 669.018.29:539.42

*В.Б. Григоренко<sup>1</sup>, Л.В. Морозова<sup>1</sup>, С.С. Виноградов<sup>1</sup>*

## **ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КРЕПЕЖА ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-66-74

*Рассмотрены различные виды разрушений образцов из стали 30ХГСА с покрытиями на основе цинка, а также проанализированы эксплуатационные разрушения крепежа из стали 30ХГСА, установлены причины потери работоспособности разрушенных деталей. Методами растровой электронной микроскопии исследованы механизмы усталостного и зернограничного хрупкого разрушения образцов, а также изломы деталей из стали 30ХГСА с покрытиями. На основании проведенных работ даны рекомендации для устранения факторов, способствующих разрушению.*

**Ключевые слова:** конструкционная сталь, фрактография, растровая электронная микроскопия, зернограничное хрупкое и усталостное разрушение.

*V.B. Grigorenko<sup>1</sup>, L.V. Morozova<sup>1</sup>, S.S. Vinogradov<sup>1</sup>*

## **FEATURES OF DESTRUCTION OF DETAILS OF FIXTURE FROM THE CONSTRUCTIONAL STEEL**

*Different types of destructions of samples from steel 30ХГСА with zinc based coverings are considered, and also operational destructions of fixture from steel 30ХГСА are analyzed, the reasons of loss of their working capacity are established. Mechanisms of fatigue and intercrystalline brittleness of samples, and also details from steel 30ХГСА with coverings are investigated by means of a scanning electronic microscope. On the basis of the carried-out works recommendations for elimination of the factors promoting destruction are made.*

**Keywords:** constructional steel, fractography, scanning electronic microscopy, fatigue failure and intercrystalline brittleness.

---

<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**

Металлические крепежные изделия входят в состав практически всех сложных механизмов или конструкций. Надежность крепежных соединений при эксплуатации зависит как от качества материалов, из которых они изготовлены, так и от качества их установки, соответствия выбранного типа крепежа действующим нагрузкам. Разрушение небольшой детали в случае применения в авиационной технике может привести к серьезным последствиям. Анализ причин преждевременного выхода из строя крепежа показывает, что разрушения могут быть вызваны развитием статического или усталостного разрушения, а также формированием и ростом коррозионных повреждений.

Не менее важным фактором работоспособности сложных транспортных систем (СТС) является структурная стабильность материалов элементов конструкции в процессе всего срока эксплуатации. Различные виды термической обработки среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей предназначены для обеспечения их структурной стабильности в высокопрочном состоянии. Наиболее распространенными видами термической обработки конструкционных сталей является закалка на бейнит или мартенсит с последующим отпуском. Структура бейнита обеспечивает работоспособность

тяжелонагруженных деталей, однако присутствие в структуре бейнита значительного количества остаточного аустенита предопределяет проявление эффекта «бейнитной» хрупкости [1–3], требующего учета при расчетах запасов статической прочности элементов конструкции СТС.

Конструкционная высокопрочная сталь 30ХГСА (хромансиль), разработанная в ВИАМ, до настоящего времени находит широкое применение как в авиационной промышленности, так и во множестве других отраслей. Сталь обладает высокой прочностью, достаточной вязкостью, хорошей свариваемостью [4], поэтому чаще всего применяется для изготовления ответственных сварных конструкций, крепежных изделий и деталей, работающих при знакопеременных нагрузках (валов, осей, зубчатых колес, фланцев, корпусов обшивки, лопаток компрессорных машин).

Химический состав стали в соответствии с ГОСТ 4543–71 следующий, % (по массе):

C	Mn	Cr	Si	Ni	S	P
0,28–0,34	0,8–0,11	0,8–0,11	0,9–1,2	≤0,3	≤0,025	≤0,025

В горячем состоянии сталь хорошо деформируется, а в отожженном – обладает удовлетворительной штампуемостью. Окончательной термической обработкой стали 30ХГСА является улучшение – закалка с температуры 880–890°С в масле с последующим высоким отпуском на заданную прочность. После улучшения сталь приобретает структуру сорбита отпуска. Иногда данную сталь подвергают изотермической закалке в расплавах солей на нижний бейнит, что позволяет увеличить прочность и снизить чувствительность к надрезам.

Защите различных материалов и конструкций от коррозии уделяется много внимания [5], что напрямую связано с необходимостью разработки новых материалов и средств их защиты [6–8].

Сталь 30ХГСА обладает невысокой коррозионной стойкостью, для увеличения которой применяют защитные покрытия различных типов [9, 10]. Для обеспечения коррозионной стойкости деталей из стали 30ХГСА применяют как гальванические, так и диффузионные покрытия различных типов и их комбинации. При использовании гальванических методов нанесения покрытий возможно наводороживание основного материала [5], что может значительно изменить структуру и свойства стали.

Исследованиям разрушения сталей, в том числе с покрытиями, посвящены работы [11–18], на основании которых установлены причины образования и механизм развития трещин. Причиной эксплуатационных разрушений могут быть как дефекты самого материала (металлургические или вызванные нарушениями режимов термической обработки), так и нарушения условий эксплуатации и технологии сборки механизмов и конструкций [19, 20]. Подобные исследования конструкционных материалов требуют особого подхода [21], реализованного в работе по определению причин эксплуатационных разрушений крепежных изделий из стали 30ХГСА.

Работа выполнена в рамках развития критической технологии №21 «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» из перечня критических технологий РФ, утвержденного указом Президента РФ от 07.06.2011 г. №899.

### Методы испытаний и исследований

Испытания на замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) проводили в соответствии с ГОСТ Р 52643–2006, на малоцикловую усталость (МЦУ) – в соответствии с ГОСТ 25.502–79. Фрактографические и металлографические исследования разрушившихся образцов и изделий выполнены на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6490LV с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа INCA x-sight и на оптическом микроскопе Leica DMIRM.

Результаты исследований

*Особенности разрушения образцов при испытаниях*

Исследовали особенности разрушения образцов из стали 30ХГСА с нанесенными гальванотермическими покрытиями [1, 2, 17] после испытаний на МЦУ (ГОСТ 25.502–79) и ЗХР (ГОСТ Р 52643–2006).

Установлено, что особенностью разрушения образцов с гальванотермическими покрытиями, испытанных на ЗХР, является образование излома с тремя отличающимися по строению областями. В начальной зоне излома наблюдается область сглаженного рельефа с разрушением по механизму вязкого среза, которая непосредственно прилегает к защитному покрытию (рис. 1, показана стрелками). Далее формируется область с шероховатым рельефом, в которой можно выделить зону замедленного разрушения с хрупкими фасетками (рис. 1) и зону вязкого ямочного долома.

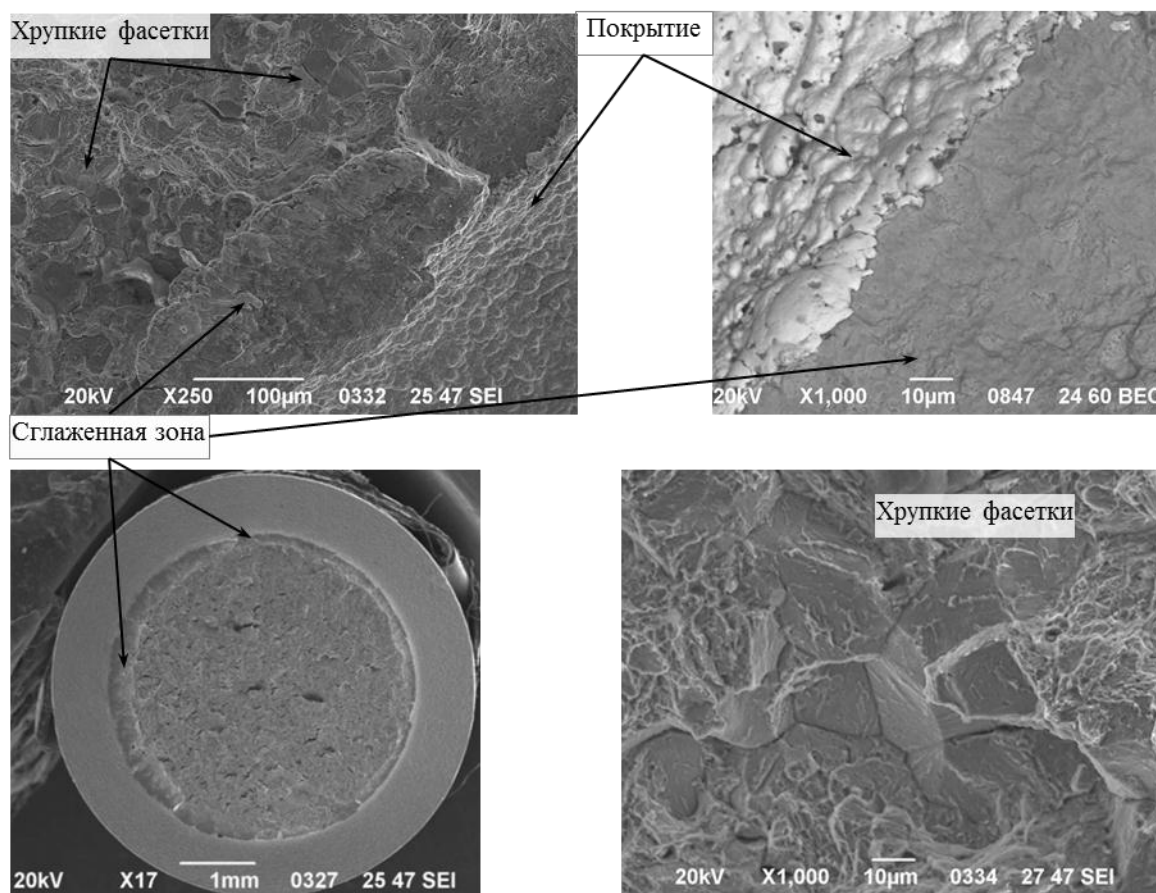


Рис. 1. Характерный вид излома образца из стали 30ХГСА после испытания на замедленное хрупкое разрушение

Особенностью изломов, полученных при испытании на МЦУ на образцах из стали 30ХГСА с гальванотермическими покрытиями, является образование очагов от рисок или иных дефектов на поверхности стали под покрытием. В большинстве испытанных образцов разрушение развивалось от одного очага, расположенного на поверхности металла под слоем покрытия. В очаговой зоне формировался веерообразный рельеф, при этом наблюдали единичные безрельфные участки (рис. 2, б). По мере удаления от

очага разрушения отмечено формирование усталостных плато, бороздок и вторичного растрескивания по ним (рис. 2, *в*). В ходе разрушения при испытании в центральной части изломов образовались макролинии остановки роста трещины. В долоте разрушение развивалось с образованием ямочного рельефа (рис. 2, *г*).

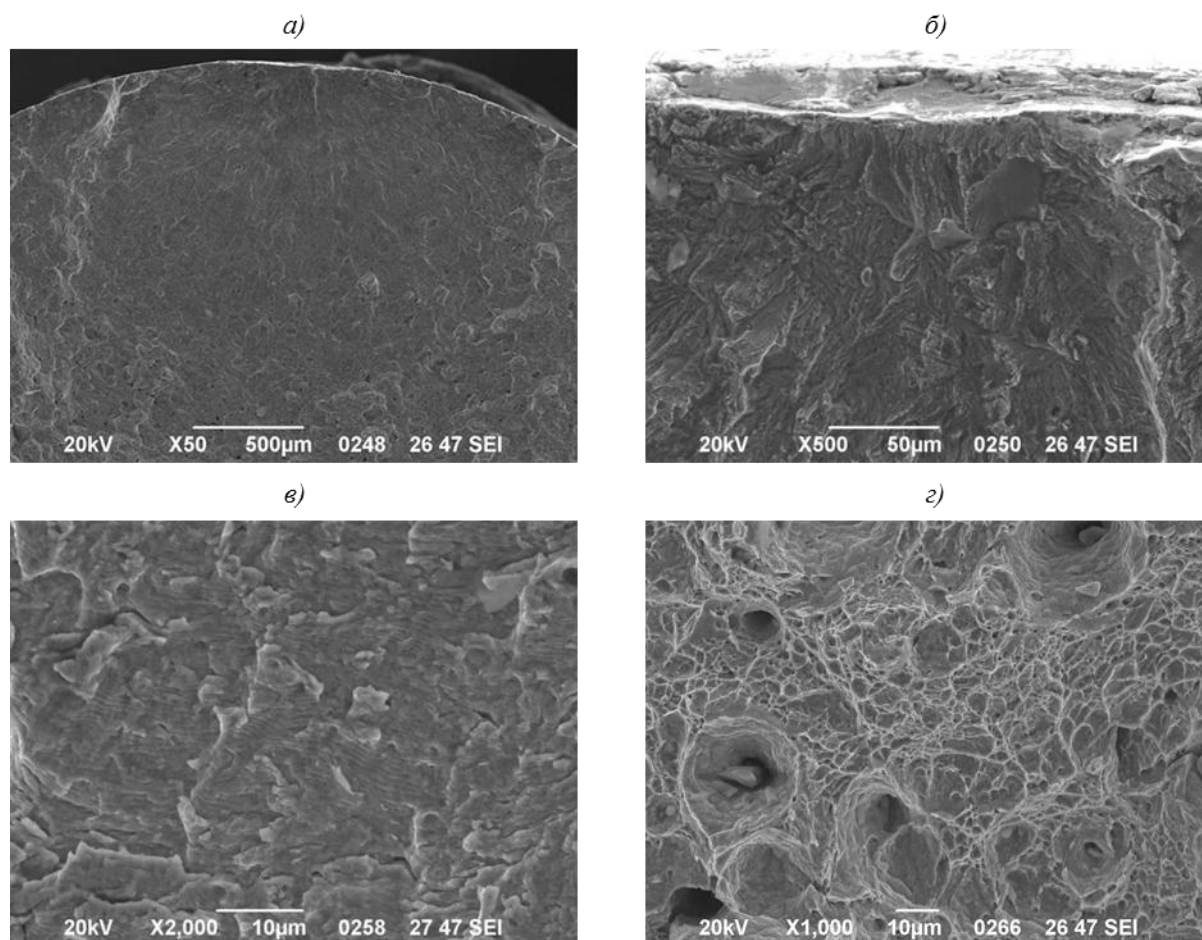


Рис. 2. Характерный вид излома образца из стали 30ХГСА после испытания на малоцикловую усталость:

*а* – очаговая зона; *б* – хрупкие фасетки у очага; *в* – усталостные бороздки; *г* – вязкие ямки в долоте

Выявленные в результате лабораторных исследований закономерности формирования изломов помогают устанавливать причины эксплуатационных разрушений, что показано на примере анализа разрушения вильчатых болтов и оси из стали 30ХГСА-СШ с кадмиевым покрытием.

#### *Установление причин разрушения оси из стали 30ХГСА-СШ*

Разрушение оси, изготовленной из стали 30ХГСА-СШ с кадмиевым покрытием, произошло при испытаниях системы «уборки–выпуска» шасси воздушного судна при выполнении более 7,5 тыс. циклов нагружения.

При визуальном осмотре установлено, что разрушение прошло в галтельном переходе к проушине оси. На поверхности оси видны следы притертостей, полученных в процессе эксплуатации, вблизи очагов разрушения наблюдается большое количество трещин (рис. 3).

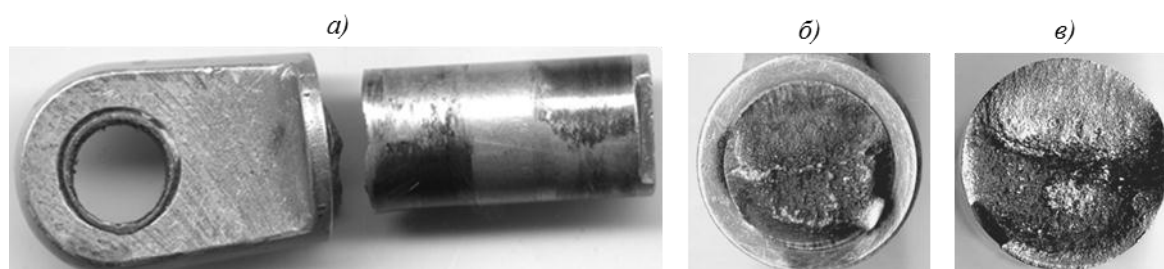


Рис. 3. Общий вид разрушенной оси (а) и излом со стороны проушины (б) и со стороны оси (в)

Микростроение излома показано на рис. 4. Разрушение многоочаговое, усталостные очаги разрушения расположены на границе раздела «покрытие–основной металл» и связаны в основном с рисками от механической обработки и дефектами в покрытии в виде грубых «гранул». Зона замедленного развития трещины распространяется на глубину до 20 мкм, затем наблюдается увеличение шага усталостных бороздок. Долгом имеет пластичное ямочное строение.

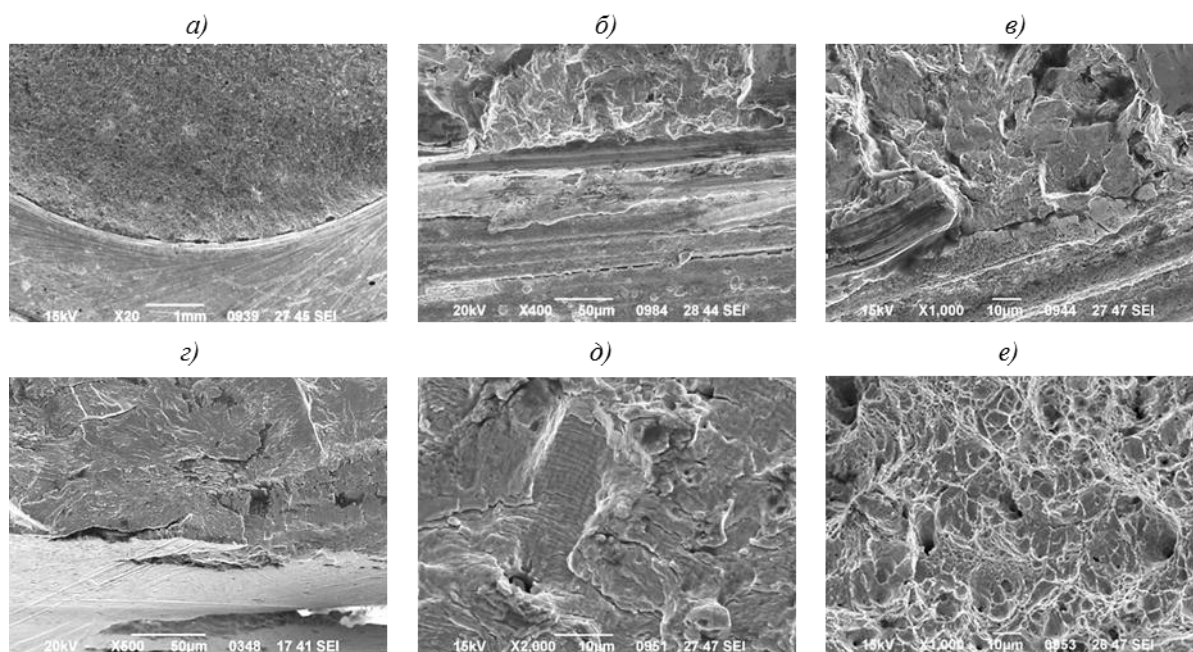


Рис. 4. Строение изломов разрушенной оси:

а – общий вид очаговой зоны; б–г – риски, растрескивание и отслоения покрытия на поверхности и очаги разрушения; д – усталостные бороздки; е – ямочное разрушение в долоте

На ответной половине излома наблюдается аналогичная картина, однако в конце усталостной зоны обнаружены вторичные трещины, образовавшиеся на окончательной стадии разрушения.

Рентгеноспектральный микроанализ подтвердил наличие сохранившегося кадмиевого покрытия со стороны проушины. Исследование поверхности оси показало неравномерность покрытия, а также наличие мест со значительным истиранием покрытия, особенно у излома.

На основании фрактографического анализа установлено, что разрушение прошло преимущественно по границе поверхности оси с приработкой (со стороны оси) и без приработки (со стороны проушины). Обнаружены очаги разрушения от рисков, образовавшихся при механической обработке, в местах с неплотным прилеганием покрытия.

Одностороннее развитие трещины свидетельствует о работе оси с изгибом. Относительно узкая зона замедленного развития трещины (~20 мкм) указывает на действие напряжений высокого уровня.

Образовавшийся в зоне долома пластичный ямочный рельеф подтверждает соответствие структуры материала оси структуре стали 30ХГСА после закалки и отпуска.

Анализ микроструктуры и твердости стали 30ХГСА-СШ проводился на микрошлифах, изготовленных как из тела оси, так и из головки. Исследование нетравленных шлифов показало, что загрязненность стали 30ХГСА-СШ по оксидам точечным и нитридам соответствует 3–4 баллу шкалы ГОСТ 1778–70. Микроструктура стали – высокоотпущенный мартенсит с твердостью 37,5–38 HRC, что соответствует уровню прочности 1150–1200 МПа. Перегрева, пережога, присутствия в структуре свободного δ-феррита не обнаружено. Следует отметить недостаточно плотное прилегание покрытия к основному материалу.

На основании проведенного анализа сделаны следующие выводы:

- разрушение усталостное, многоочаговое, одностороннее, что свидетельствует о работе оси с изгибом;
- небольшая зона медленного развития микротрещин и быстрый переход к долому свидетельствуют о действии высоких напряжений;
- возникновению разрушения способствовала некачественная механическая обработка поверхности (риски).

#### *Анализ разрушения вильчатых болтов*

Проведены исследования четырех болтов из стали 30ХГСА с кадмиевым покрытием после 8 лет эксплуатации и ресурсных испытаний. Болт 1 разрушился после наработки более 8000 ч во время испытаний; болт 2 разрушился после наработки менее 1000 ч; болт 3 разрушился после наработки ~1500 ч; болт 4 испытаниям не подвергался. Для выявления причин преждевременного разрушения болтов проведен внешний осмотр, анализ изломов и микроструктуры, измерение твердости. Наружным осмотром выявлено, что разрушение во всех случаях прошло у начала галтельного перехода от стержня болта к полке (рис. 5).

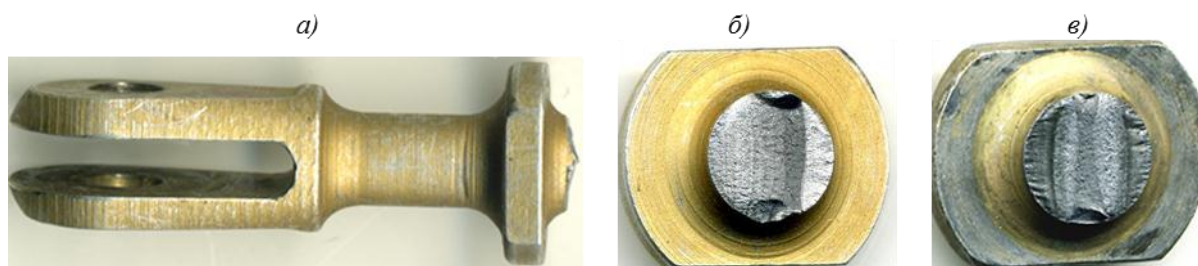


Рис. 5. Общий вид разрушенного вильчатого болта (а) и изломы в области галтельного перехода болтов 1 (б) и 3 (в)

Анализ изломов показал, что разрушение носит усталостный характер, очаги разрушения расположены с двух сторон (со стороны округлой части полки). В очагах разрушения наблюдаются глубокие риски, трещины, параллельные излому, следы приработки по поверхности кадмиевого покрытия (рис. 6). Поверхность изломов частично затерта, но по шероховатости вблизи начальной зоны разрушения можно предположить действие высоких нагрузок. Доллом имеет ямочное строение, что характерно для разрушения стали 30ХГСА при действии однократной нагрузки.

Микроструктуру оценивали на шлифах, изготовленных параллельно излому. Микроструктура представляет собой высокоотпущенный мартенсит, что соответствует

структуре стали 30ХГСА после термической обработки (рис. 7, *а*). В поверхностном слое болтов 1 и 2 наблюдается обезуглероженный слой глубиной 0,05–0,1 мм (рис. 7, *б*), что свидетельствует о нагреве под закалку без защитной атмосферы. Твердость болта 4 (без испытаний) составляет 39–40 HRC. Твердость болтов 1 и 2: 38,5–39 HRC.

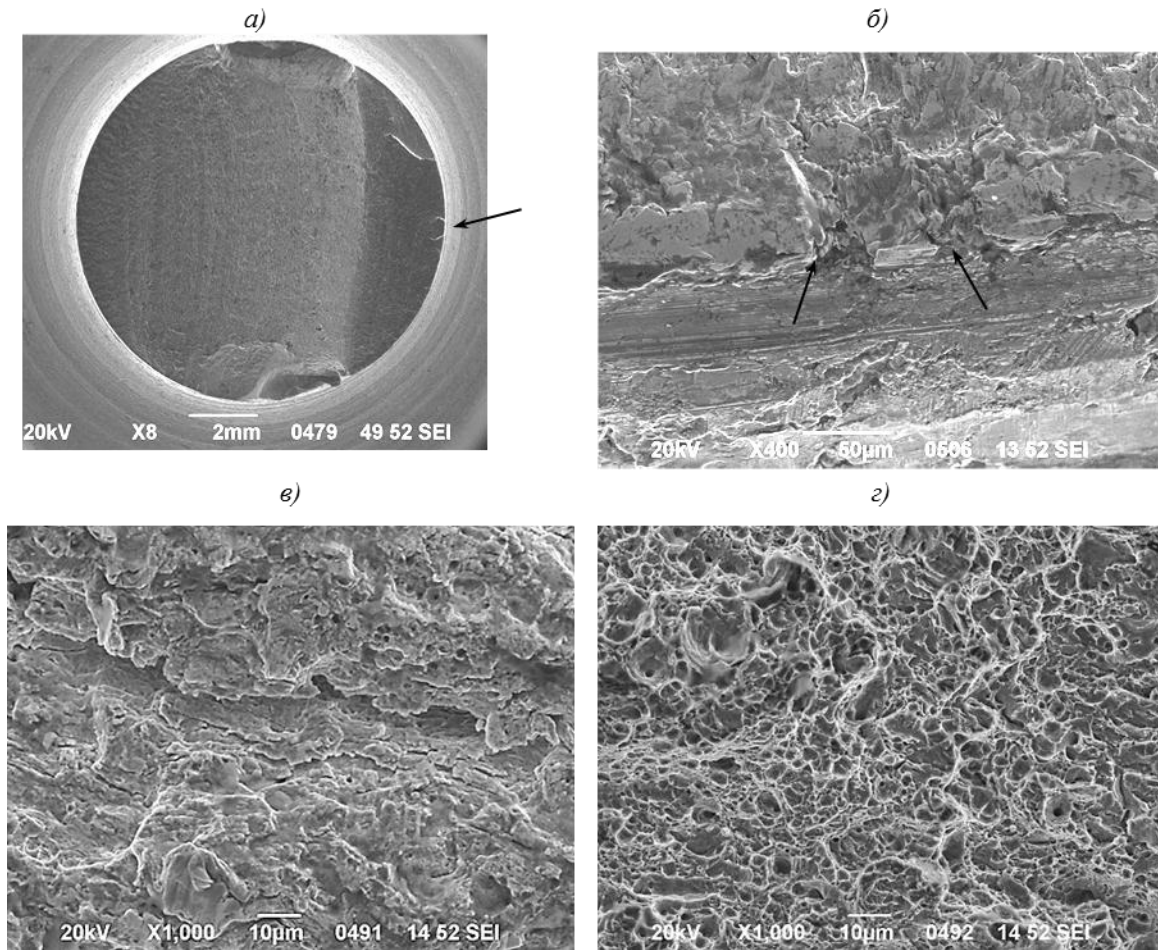


Рис. 6. Характерное строение изломов разрушенных вильчатых болтов:  
*а* – общий вид; *б* – очаговая зона (по стрелке на рис. 6, *а*); *в* – зона развития трещины с усталостными бороздками и вторичным растрескиванием; *г* – ямочное разрушение в долоте

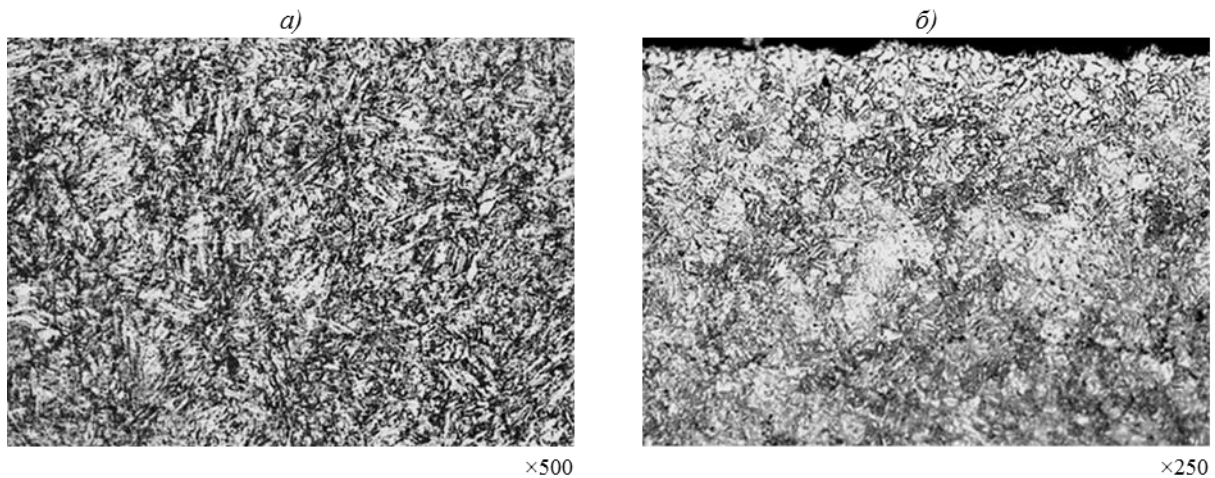


Рис. 7. Микроструктура вильчатого болта:  
*а* – высокоотпущенный мартенсит; *б* – зерна феррита в обедненном слое

На основании проведенного исследования установлено:

- разрушение болтов прошло по усталостному механизму – очаги расположены с двух противоположных сторон, что свидетельствует о работе болтов при двухстороннем изгибе;
- очаги разрушения во всех случаях располагаются у начала галтельного перехода от стержня болта к полке, где наблюдаются значительные притертости, что способствует многоочаговому образованию трещин – множественное растрескивание поверхности болтов под изломом и наличие шероховатого излома в усталостной зоне свидетельствуют о действии высокой нагрузки;
- микроструктура – высокоотпущенный мартенсит, в поверхностном слое болтов наблюдается обезуглероженный слой глубиной 0,05–0,15 мм;
- твердость болтов составляет 38,5–39 HRC, что соответствует требованию нормативной документации (36–45 HRC).

После анализа полученных результатов для увеличения срока службы болтов изготовителю даны следующие рекомендации:

- снизить шероховатость поверхности болтов от механической обработки в зоне галтельного перехода;
- учитывая, что разрушение болтов зарождается в одном и том же месте, где наблюдается значительная приработка, обратить внимание на установку болтов при монтаже, исключить возможность их перекоса;
- провести анализ технологии изготовления болтов, в том числе условий проведения термической обработки. С целью исключения возможности образования обезуглероженного слоя, способствующего снижению усталостной прочности, рассмотреть возможность проведения нагрева под закалку в вакууме или аргоне.

### Заключения

Установлены основные закономерности формирования изломов образцов из стали 30ХГСА с нанесенными гальванотермическими покрытиями при испытаниях на ЗХР и МЦУ.

Особенностью разрушения образцов с гальванотермическими покрытиями, испытанных на ЗХР, является образование излома с тремя отличающимися по строению областями:

- сглаженного рельефа с разрушением по механизму вязкого среза, которая непосредственно прилегает к защитному покрытию;
- с шероховатым рельефом, в которой можно выделить зону замедленного разрушения с хрупкими фасетками;
- вязкого ямочного долома.

Особенностью изломов, полученных при испытании на МЦУ на образцах из стали 30ХГСА с гальванотермическими покрытиями, является образование очагов от риска или иных дефектов на поверхности стали под покрытием. Далее развитие усталостной трещины протекает по характерному для образцов без покрытий механизму.

Проведенные исследования деталей из стали 30ХГСА позволили выделить основные причины разрушения крепежных изделий во время эксплуатации. Большинство случаев разрушения деталей связано с развитием усталостных трещин, образовавшихся из-за наличия на поверхности риска от механической обработки, вмятин или внедренных частиц от пескоструйной обработки, трения в процессе эксплуатации и т. д.

Для увеличения срока службы крепежных изделий рекомендовано тщательно следить за качеством поверхности деталей перед нанесением покрытий.

### Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность за консультации и предоставленные материалы И.П. Жегиной и Н.Г. Покровской.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерова Е.В., Золоторевский Н.Ю., Титовец Ю.Ф., Хлусова Е.И. Наследование разориентаций и модель формирования структуры бейнита в низкоуглеродистых сталях под влиянием деформации аустенита // Вопросы материаловедения. 2011. №4 (68). С. 17–26.
2. Kobayashi J., Ina D., Yoshikawa N., Sugimoto K. Effects of the addition of Cr, Mo and Ni on the microstructure and retained austenite characteristics of 0,2% C–Si–Mn–Nb ultrahighstrength TRIP-aided bainitic ferrite steels // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No. 10. P. 1894–1901.
3. Самойлович Ю.А. Повышение прочности железнодорожных рельсов путем изотермической закалки на нижний бейнит // Металлург. 2012. №10. С. 70–76.
4. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.
5. Каримова С.А., Чесноков Д.В. Металлические и неметаллические неорганические покрытия для защиты изделий, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №11. С. 36–41.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
7. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №S. С. 43–47.
8. Каблов Е.Н., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В., Виноградов С.С. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей // Сталь. 2016. №6. С. 70–81.
9. Никифоров А.А., Закирова Л.И., Виноградов С.С. Термоиммерсионное покрытие цинк + олово контактное // Коррозия: материалы, защита. 2016. №8. С. 34–41.
10. Таранцева К.Р., Николотов А.Д. Электроосаждение сплава олово-цинк из стабилизированного пирофосфатного электролита как альтернатива кадмиевому покрытию // Коррозия: материалы, защита. 2014. №3. С. 27–30.
11. Гриневич А.В., Ерасов В.С., Якушева Н.А., Терехин А.Л. Усталостная долговечность стали ВКС-9 в условиях симметричного нагружения «растяжение–сжатие» и «изгиб с вращением» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №9. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2018.). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-11-11.
12. Громов В.И., Кротов В.Н., Курпякова Н.А., Седов О.В., Дорошенко А.В. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства диффузионного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-3-8.
13. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
14. Фонштейн Н.М., Бронфин Б.М., Ширман А.З. и др. Количественное микрофрактографическое исследования вязкого разрушения в низколегированных сталях // Физика металлов и материаловедение. 1982. Т. 53. №1. С. 174–179.
15. Бадиков К.А., Савкин А.Н., Андроник А.В. Оценка трещиностойкости низколегированной стали при нерегулярном циклическом нагружении // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1 (38). С. 20–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-20-26.
16. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. 2015. №3. С. 42–47.
17. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Ле Хай Нинь, Траченко В.А., Скородумов С.В. и др. Оценка строения изломов и структур в конструкционных сталях с использованием компьютеризированных процедур // Вектор науки ТГУ. 2015. №4. С. 44–52.
18. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
19. Гриневич А.В., Нужный Г.А., Баканов А.В., Улькин М.Ю., Одинцев И.Н. Оценка несущей способности элементов крепежа из полимерных композиционных материалов // Деформация и разрушение материалов. 2015. №12. С. 38–42.
20. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Замедленное разрушение стали 38ХНЗМА в процессе длительной эксплуатации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. Специальный выпуск: Перспективные конструкционные материалы и технологии. С. 5–10.
21. Быценко О.А., Григоренко В.Б., Лукина Е.А., Морозова Л.В. Развитие методов металлофизических исследований: методологические вопросы и практическая значимость // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 498–515. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-498-515.