

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-45-54

УДК (UDC) 620.178.3:624.078.2

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТИЗОВ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА¹© **Валентина Борисовна Григоренко, Лариса Владимировна Морозова**Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия;
e-mail: grigorenkovb@viam.ru*Статья поступила 4 августа 2017 г.*

Исследованы причины разрушения крепежных изделий из стали 30ХГСА. Установлено, что в случае разрушения болтов в пакете, соединяющем элементы шпангоута, повреждение болтов является следствием фреттинг-коррозии вследствие взаимного трения болтов и элементов обшивки, пояса и ленты. Фреттинг-коррозия развивается в местах повреждения кадмиевого покрытия болтов в процессе трения. Возникновению разрушения в поясе, обшивке и ленте способствует приработка поверхности отверстий, наличие на ней коррозионных повреждений (фреттинг-коррозия), от которых развивается межзеренное разрушение, наибольшее в обшивке и ленте. Причина разрушения — конструктивно-технологические факторы: наличие повышенных напряжений в исследуемом пакете, микроперемещения сопрягаемых деталей, нарушение кадмиевого покрытия, недостаточная противокоррозионная защита и воздействие внешней среды. Разрушение самоконтрящихся гаек из стали 30ХГСА с антикоррозионным кадмиевым покрытием, использованных при сборке вспомогательного газотурбинного двигателя, вызвано их значительным перегревом — воздействием расплавленного покрытия на поверхность нагруженных гаек и проникновением жидкого металла в основной материал по границам зерен. Применение кадмиевого покрытия для работы стальных деталей при температуре, превышающей (даже кратковременно) температуру плавления Cd ($T_{пл} = 320,9^\circ\text{C}$), в условиях контакта с напряженным металлом вследствие эффекта Ребиндера приводит к резкой потере прочности и преждевременному разрушению детали. Исследовали разрушение оцинкованных болтов из стали 30ХГСА в процессе проведения повторно-статических испытаний. Установлено, что зарождению усталостного многоочагового разрушения способствовало несколько факторов: наличие грубых рисок; пескоструйная обработка, проводимая перед цинкованием с применением крупных фракций песка, вмятины от которых способствовали преждевременному зарождению трещин; участки с наплывами, полученными при нанесении покрытия, с неплотным соединением слоя. Наличие в одном из болтов наряду с усталостными бороздками большого количества ямок свидетельствует о работе материала при высокой нагрузке. Исследования проводили методом оптической и растровой электронной микроскопии с применением рентгеноспектрального микроанализа.

Ключевые слова: конструкционная сталь; фрактография; сканирующая электронная микроскопия; рентгеноспектральный микроанализ; статическое и усталостное разрушение.

**FEATURES OF FRACTURE OF METAL ITEMS (HARDWARE) MADE
OF STEEL 30KhGSA**© **Valentina B. Grigorenko, Larisa V. Morozova**

All-Russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, Russia; e-mail: grigorenkovb@viam.ru

Submitted August 4, 2017.

The reasons for destruction of fasteners made of steel 30KhGSA are analyzed. It is shown that in case of destruction of bolts in the package connecting frame elements, damage of bolts results from fretting corrosion, attributed to mutual friction between bolts and elements of skin, belt and tape. Fretting cor-

¹ 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.

rosion develops in the sites where cadmium coating of bolts is damaged upon friction. The occurrence of fracture in the belt, skin and tape is promoted by break-in scuffing of the openings and corrosion damages (fretting corrosion) triggering the intergranular fracture, most severe in the skin and tape. The reason for damage arises from structural and technological factors: increased stresses present in the package, micro-displacements of the mating parts, violation of the cadmium coating, insufficient corrosion protection and environmental impact. Destruction of self-locking nuts made of 30KhGSA steel with anti-corrosion cadmium coating used in the assembly of the auxiliary gas turbine engine is attributed to their significant overheating, i.e., the impact of molten coating on the surface of loaded nuts and the penetration of the liquid metal into the base material along the grain boundaries. The use of cadmium coatings in operation of steel parts at a temperature exceeding (even briefly) the melting temperature of Cd ($T_{\text{melt}} = 320.9^{\circ}\text{C}$), under conditions of contact with stressed metal due to the Rebinder effect, leads to a sharp loss of strength and premature failure of the part. Study of the destruction of galvanized bolts made of 30KhGGSA steel during the repeated-static testing revealed that several factors contribute to the onset of fatigue multiple site damage: presence of the rough risks; sandblasting, performed before galvanizing using large sand fractions, which contribute to the premature origin of cracks; areas with deposits formed upon coating with a loose adhesion of the layer. The presence of a large number of pits along with the fatigue grooves indicates to high load of the bolt material upon operation. The study was carried out using optical and scanning electron microscopy and X-ray microanalysis.

Keywords: structural steel; fractography; scanning electronic microscopy; X-ray spectroscopic microanalysis; static and fatigue fracture.

Металлические крепежные изделия (метизы) входят в состав практически всех сложных механизмов или конструкций. Надежность крепежных соединений при эксплуатации зависит от качества как материалов, из которых изготовлены метизы, так и их установки, соответствия выбранного типа крепежа действующим нагрузкам. Анализ причин преждевременного выхода из строя крепежа показывает, что часть разрушений вызвана усталостными повреждениями, однако наблюдаются и случаи разрушения в результате статического разрушения или развития фреттинг-коррозии [1 – 2]. Эксплуатационные разрушения, казалось бы, простой детали, применяемой в авиационной технике, могут приводить к масштабным разрушениям или катастрофам.

Разработанная И. И. Сидориным и Г. В. Акимовым, трудившимися во Всесоюзном научно-исследовательском институте авиационных материалов, высокопрочная конструкционная сталь 30ХГСА, получившая название «хромансиль», до настоящего времени находит широкое применение как в авиационной промышленности, так и во множестве других отраслей [3 – 5]. Сталь обладает высокой прочностью, достаточной вязкостью, хорошей свариваемостью [6]. Ее применяют для ответственных сварных конструкций, различных улучшаемых деталей — валов, осей, зубчатых колес, фланцев, корпусов обшивки, лопаток компрессорных машин и крепежных деталей, работающих при знакопеременных нагрузках [7 – 9].

Проведенные ранее исследования эксплуатационных разрушений изделий из данной стали показывают, что их причиной могут быть как

дефекты самого материала (металлургические или вызванные нарушениями режимов термической обработки), так и нарушения технологии сборки и условий эксплуатации конструкций и механизмов.

Цель данной работы — комплексное исследование наиболее часто встречающихся причин эксплуатационных разрушений метизов из легированной улучшаемой стали 30ХГСА [10 – 16].

Химический состав стали 30ХГСА (ГОСТ 4543–71) следующий, % масс.: 0,28 – 0,34 C; 0,8 – 0,11 Mn; 0,8 – 0,11 Cr; 0,9 – 1,2 Si; $\leq 0,3$ Ni; $\leq 0,25$ S; $\leq 0,025$ P.

В горячем состоянии сталь хорошо деформируется, а в отожженном — обладает удовлетворительной штампуемостью. Окончательной термической обработкой стали 30ХГСА является улучшение — закалка с температуры 880 – 890 °C в масло и высокий отпуск на заданную прочность, сталь при этом приобретает структуру сорбита отпуска. Иногда сталь подвергают изотермической закалке на нижний бейнит в расплавах солей, что позволяет увеличить прочность и снизить чувствительность к надразам.

Металлографические и фрактографические исследования разрушившихся изделий выполняли методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на оптическом микроскопе Leica DMIRM и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV, оснащенном системой энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Микротвердость определяли на микротвердомере DuraScan 80.

Причины, стимулирующие разрушение в пакете, соединяющем элементы шпангоута воздушного судна

Во время плановых ремонтов на ряде машин были выявлены трещины в поясе, обшивке и ленте, а также значительные повреждения поверхности болтов в пакете, соединяющем элементы шпангоута. Для установления причин, стимулирующих возникновение указанных дефектов, исследовали фрагменты, составляющие пакет:

1) изделие (№ 1) после 2000 полетов — 1 болт из стали 30ХГСА;

2) изделие (№ 2) после 3100 полетов — 18 болтов из этой же стали с левого и правого бортов;

3) изделие (№ 3) после 6100 полетов — болт из стали 30ХГСА от элемента пояса с правого борта — 1 шт.; пояс из прессованного профиля сплава Д16чТ с левого борта — 1 шт.; обшивка из листа сплава 1163АТВ с левого и правого бортов — 2 шт.; лента из листа сплава 1163АТВ с левого и правого бортов — 2 шт.

При проведении анализа изломов пояса установлено, что разрушение в отверстиях (рис. 1, стрелки 1) многоочаговое, носит усталостный характер. Очаги разрушения расположены как по кромке (рис. 1, стрелки 2, 3), так и по поверхности отверстий, ближе к наружной стороне пояса. На поверхности отверстий отмечены притертости и следы коррозионных поражений. Разрушение в отверстиях начинается преимущественно по кромкам, в очагах наблюдается межзеренное разрушение, от которого развивается усталостная трещина (рис. 2, а, стрелка).

Установлено, что разрушение в поясе связано с коррозионными повреждениями поверхности, образованием межзеренного излома в очагах, от которых трещина развивается по усталостному механизму.

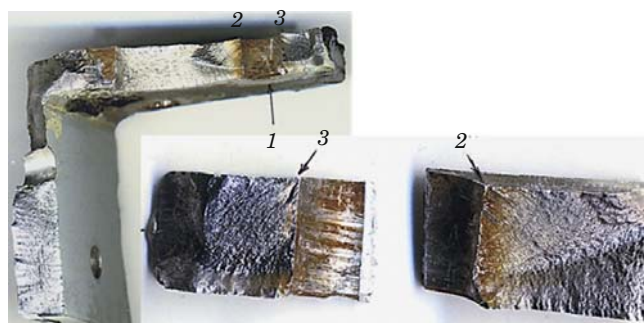


Рис. 1. Вид излома фрагмента разрушенного пояса: а — общий вид; б — разрушение от отверстия по стрелке 2

Анализировали также изломы обшивки с левого и правого бортов. Повреждения во фрагментах аналогичны; наблюдаются значительный растрав как поверхности, так и излома, коррозионные язвы. Очаги разрушения обнаружены на стенке отверстия в местах коррозионных повреждений.

В очаговых зонах с обеих сторон от отверстия отмечены участки межзеренного разрушения глубиной 0,04 – 0,14 мм, от которых развивается усталостная трещина. В начальной зоне усталостной трещины разрушение смешанное — по границам и телу зерен. Поверхность излома окислена, присутствуют продукты коррозии. Четкие усталостные бороздки выявлены лишь на расстоянии около 6 мм от очага.

При исследовании фрагментов ленты с обоих бортов установлено, что очаги разрушения связаны с коррозионными повреждениями. Поверхность изломов в очагах в основном забита, но имеются отдельные участки с межзеренным разрушением глубиной до 0,09 мм (рис. 3). В зоне развития трещины разрушение преимущественно межзеренное, на поверхности излома присутствуют продукты коррозии.

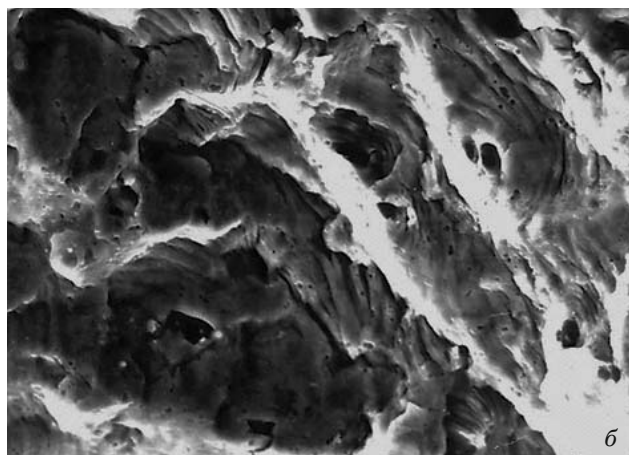
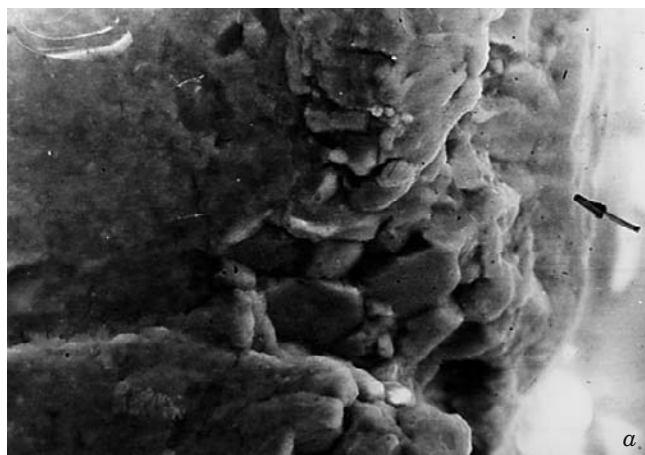


Рис. 2. Межзеренное разрушение в очаге излома разрушенного пояса, $\times 1500$ (а) и усталостные бороздки, $\times 1500$ (б)

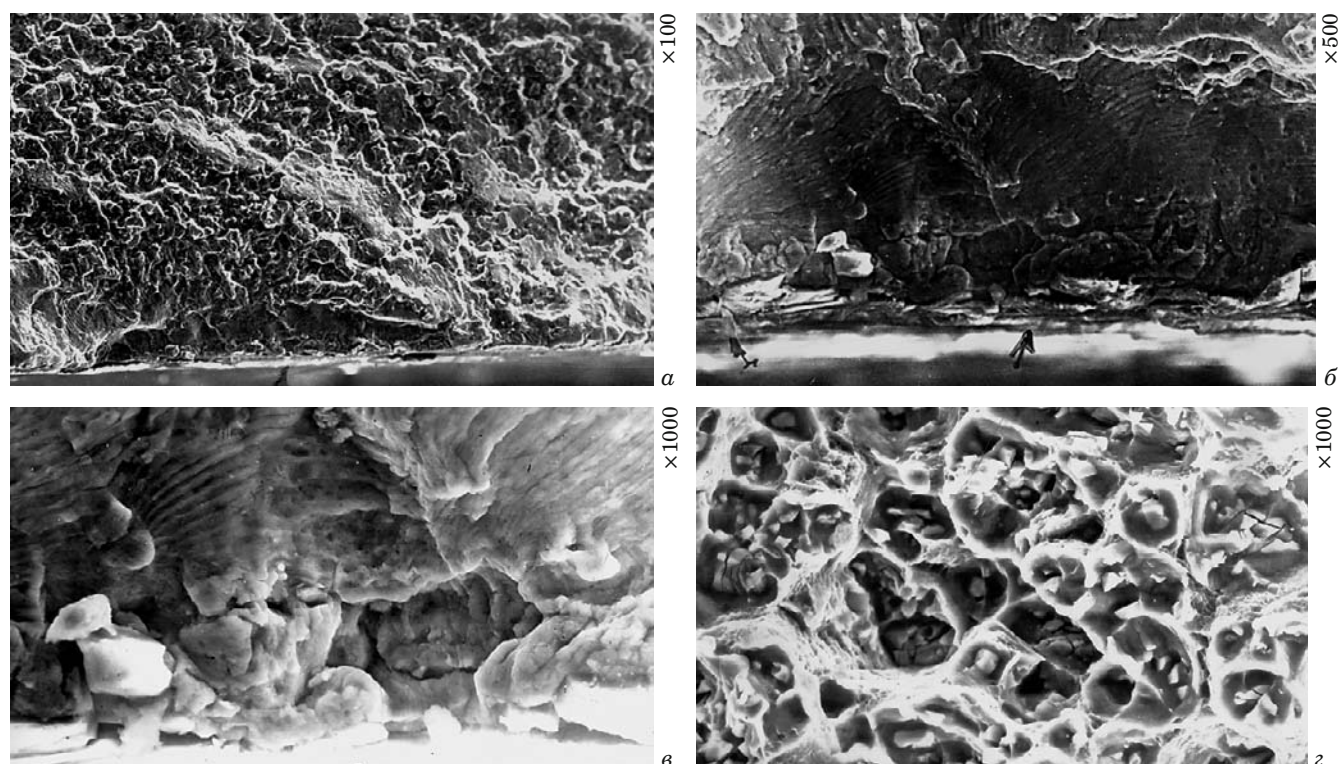


Рис. 3. Строение излома ленты с правого борта: очаговая зона (а, б) и мелкие усталостные бороздки (в), ямочный рельеф в доломе (з)

Таким образом, после анализа характера разрушений пояса, обшивки и ленты можно отметить следующее:

1) во всех случаях разрушение развивается от отверстий под болты;

2) на поверхности отверстий наблюдаются притертость, коррозионные язвы, оксиды железа и алюминия (по результатам РСМА);

3) наиболее повреждены фрагменты из обшивки и ленты; в исследованных фрагментах пояса очаги с межзерненным изломом имеют наименьшую глубину;

4) на поверхности изломов в области усталостного развития трещины наблюдаются сильное окисление и продукты коррозии, что может свидетельствовать о коррозионно-усталостном разрушении.

Проведен комплексный анализ состояния поверхности и изломов всех предоставленных на исследования болтов (рис. 4). Осмотр с помощью оптического микроскопа при увеличении $\times 40$ стальных болтов с кадмиевым покрытием позволил получить следующие результаты:

на головках болтов обнаружены продукты коррозии стали в местах нарушения лакокрасочного покрытия;

под головками болтов имеются остатки грунта, продукты коррозии стали; на участках с грунтом коррозия стали не обнаружена;

на цилиндрической части болтов выявлены повреждения покрытия в виде кольцевых линий, выработка покрытия и основного металла, что является следствием фреттинг-коррозии; местами покрытие отсутствует, имеются продукты коррозии стали, а также светлые металлические участки — предположительно алюминий, перенесенный с обшивки;

на резьбовой части болтов наблюдаются коррозионные повреждения материала разной степени интенсивности (от единичных поражений до глубоких поверхностных растратов).

При помощи растрового электронного микроскопа исследовали поверхность болтов с различной степенью повреждения. Можно отметить, что независимо от принадлежности к правому или левому борту поражение болтов имеет одинаковый характер (см. рис. 4). Наименее поврежден болт с изделия № 1, где на поверхности цилиндрической части сначала образуются притертости от контакта с обшивкой, поясом или лентой, в местах притертостей — коррозионные повреждения в виде язв.

По мере увеличения числа полетов (изделие № 2) увеличиваются площадь, занятая притертостью, и площадь коррозионных повреждений.

Наибольшая степень повреждения поверхности наблюдалась в болте от элемента пояса (изделие № 3), где видны кольцевые канавки в облас-



Рис. 4. Общий вид (а) и характерные повреждения (б – ж) поверхности болтов: б, в — трещина у резьбы; г, д — продукты коррозии в трещине; е — притертость; ж — растрав

ти притертости, представляющие собой зону коррозионного поражения.

По данным рентгеноспектрального микроанализа в зоне коррозионных повреждений кадмий отсутствует, иногда отмечается наличие алюминия. В процессе приработки кадмиевое покрытие удаляется, а в этих местах начинается развитие коррозионных язв.

Для металлографического исследования состояния поверхности вдоль оси болтов были изготовлены шлифы. Установлено, что глубина коррозионных поражений в болтах колеблется от 40 до 820 мкм. Ни от одной из коррозионных язв не было отмечено развития усталостной трещины.

Проведенный анализ характера разрушения обшивки, ленты и пояса, входящих в состав пакета, соединяющего элементы шпангоута, и повреждений соединительных болтов позволил сделать следующие выводы.

1. Повреждение болтов — следствие фреттинг-коррозии, возникающей из-за взаимного

трения болтов и элементов обшивки, пояса и ленты. Фреттинг-коррозия развивается в местах повреждения кадмиевого покрытия болтов в процессе трения. Глубина коррозионных поражений достигает в некоторых болтах 0,82 мм.

2. Развития трещин усталости от коррозионных повреждений болтов не наблюдается.

3. Разрушение в поясе, обшивке и ленте — коррозионно-усталостное. Возникновению разрушения способствует приработка поверхности отверстий, наличие на ней коррозионных повреждений (фреттинг-коррозия), от которых развивается межзеренное разрушение, наиболее развитое в обшивке и ленте (глубина до 0,14 мм). В поясе, более удаленном от внешней среды, глубина межзеренной зоны 0,03 мм. Усталостная трещина в обшивке и ленте также развивается при большем влиянии внешней среды.

4. Фактографический анализ изломов обшивки, ленты и пояса показал коррозионно-усталост-

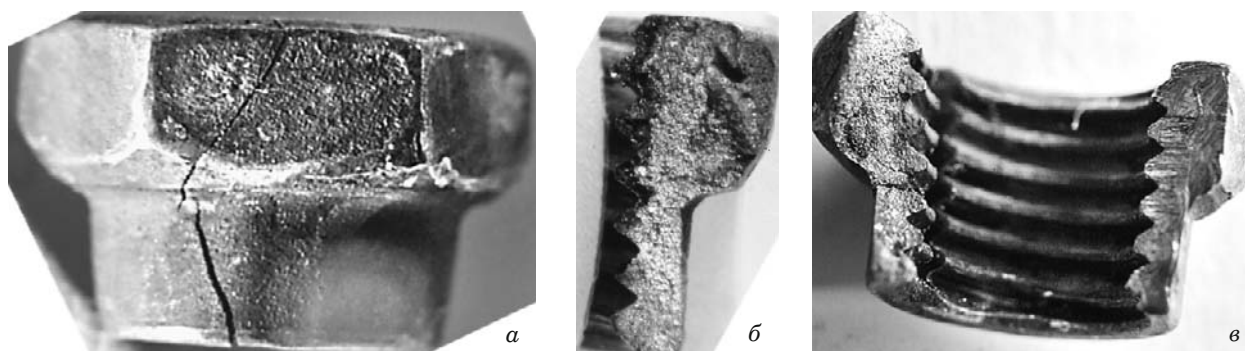


Рис. 5. Вид гайки с трещиной (а) и изломы разрушенных гаек (б, в) из стали 30ХГСА

ный характер разрушений при воздействии повышенных напряжений в данном узле.

5. Для поднятия работоспособности изделия в процессе эксплуатации необходимы более надежная защита от воздействия внешней среды и снижение риска возникновения фреттинг-коррозии.

На основании изложенного можно констатировать, что причиной разрушения явились конструктивно-технологические факторы: наличие повышенных напряжений в исследуемом пакете, микроперемещения сопрягаемых деталей, нарушение кадмиевого покрытия, недостаточная противокоррозионная защита и воздействие внешней среды.

Причины разрушения самоконтрающихся гаек из стали 30ХГСА

После сдаточных испытаний вспомогательного газотурбинного двигателя были обнаружены разрушенные самоконтращиеся шестигранные гайки диаметром ~ 5 мм в количестве 20 % от партии. Гайки изготовлены механической обработкой из стали 30ХГСА с термообработкой на прочность 100 ± 10 кг/мм². Резьбу выполняли до термической обработки. В качестве антикоррозионного покрытия применяли кадмий. При установке на изделие использовали герметик КЛТ-30 (в состав которого входит оксид цинка), головки гаек окрашивали эмалью КО-88 (в составе которой имеется алюминий). Исследовали три гайки: разрушенную гайку № 1 — два фрагмента с изломами, гайку № 2 с трещиной и гайку № 3 без дефектов.

При визуальном осмотре гаек выявлены: на поверхности головок и цилиндрической части — следы грубой механической обработки; на внутренней поверхности (на резьбе) — остатки установочного герметика; на гайке № 2 — две близко расположенные трещины, развившиеся по всей ее высоте, и скол эмали КО-88 на головке; на поверхности изломов — зоны с различными цвета-

ми побежалости от светлого до сине-фиолетового (рис. 5).

Фрактографическое исследование показало, что разрушение хрупкое, проходит по границам зерен (рис. 6). Спектрограммы, снятые с наружной поверхности гаек и с поверхности излома, подтвердили присутствие кадмия, причем его пики имеют большую интенсивность, чем в спектрограммах, полученных с внутренней поверхности и примыкающего к ней излома. В спектрограммах, снятых с эксплуатационных изломов, помимо кадмия наблюдается наличие цинка и алюминия. Разрушение развивалось в основном от наружной поверхности, иногда — от внутренней поверхности возле торцевой части, где наблюдалось натекание расплавленного кадмия.

При металлографическом исследовании микрошлифов, изготовленных по плоскости головки гайки, обнаружены трещины, выходящие на внутреннюю поверхность и распространяющиеся по границам зерен (рис. 7).

Обезуглероженного слоя на внутренней и наружной поверхности гаек не выявлено. Микроструктура стали — сорбит. Твердость составляет 285 – 330 HV, что соответствует прочности 1020 – 1100 МПа.

Для выяснения условий, при которых возможно появление кадмия на поверхности излома, проведен следующий опыт: кадмированные пластины из стали 30ХГСА нагревали в течение 15 мин до температур 280, 350 и 400 °С. Установлено, что при нагреве до 280 °С покрытие сохраняет целостность. После нагрева до 350 °С начинается глобулизация покрытия, а при 400 °С — полный его переход в каплевидное состояние. Кроме того, для выяснения связи между возникшими на поверхности разрушения гаек цветами побежалости и условиями их образования был проведен нагрев разрушенных образцов из стали 30ХГСА при указанных выше температурах. Последняя серия опытов позволила установить, что при температуре 400 °С излом окрашивается в

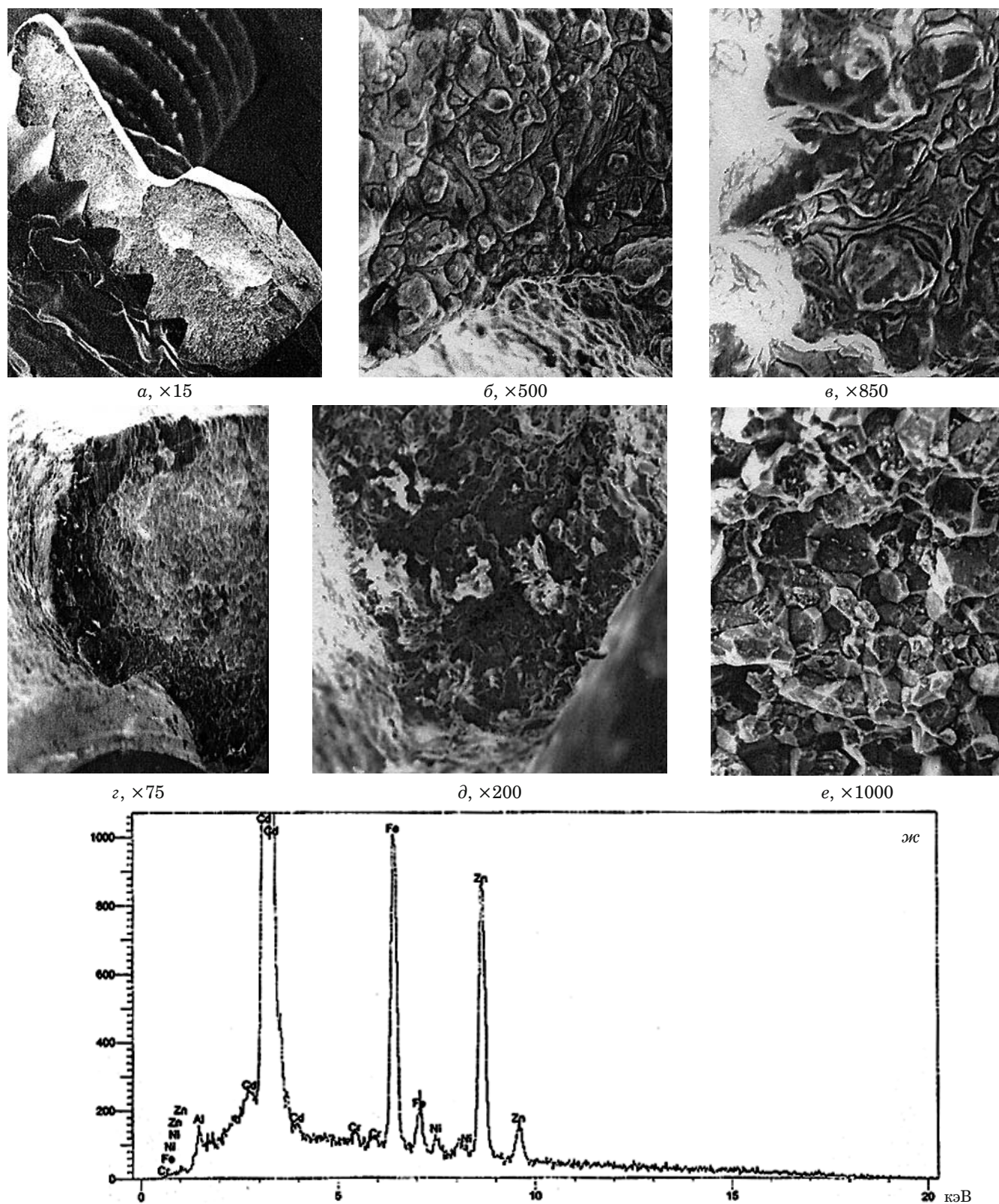


Рис. 6. Строение излома разрушенной гайки из стали 30ХГСА (*а – е*) и характерный вид спектра, полученного в области межзеренного разрушения в изломе гайки из стали 30ХГСА (*жс*): *а* — общий вид излома; *б – д* — следы окисления и намокания защитного покрытия в изломе; *е* — межзеренное хрупкое разрушение

синий цвет, наблюдаемый на поверхности излома гаек.

Проведение исследований и связанных с ними экспериментов позволило установить при-

чины разрушения кадмированных гаек из стали 30ХГСА. Разрушение произошло в режиме воздействия расплавленного покрытия на поверхность нагруженных гаек и проникновения жид-



Рис. 7. Микроструктура гайки из стали 30XGSA, $\times 200$

кого металла в основной материал по границам зерен (эффект Ребиндера). Это свидетельствует о том, что температура, при которой произошло разрушение, превышала температуру плавления кадмия.

Применение кадмиевого покрытия для работы стальных деталей при температуре, превышающей (даже кратковременно) температуру плавления Cd ($T_{\text{пл}} = 320,9^\circ\text{C}$), в условиях контакта с напряженным металлом вследствие эффекта Ребиндера приводит к резкой потере прочности и преждевременному разрушению детали.

Характер разрушения болтов крепления верхней панели крыла с лонжероном воздушного судна

Исследовали болты диам. 6 мм из стали 30XGSA. Разрушение произошло при наработке 4430 программных полётов в процессе проведения повторно-статических испытаний (рис. 8).

При проведении фрактографического анализа установлено, что разрушение многоочаговое, усталостное. Двухстороннее развитие усталостных трещин свидетельствует о работе детали в условиях растяжения с изгибом (рис. 9).



Рис. 8. Общий вид разрушенных болтов

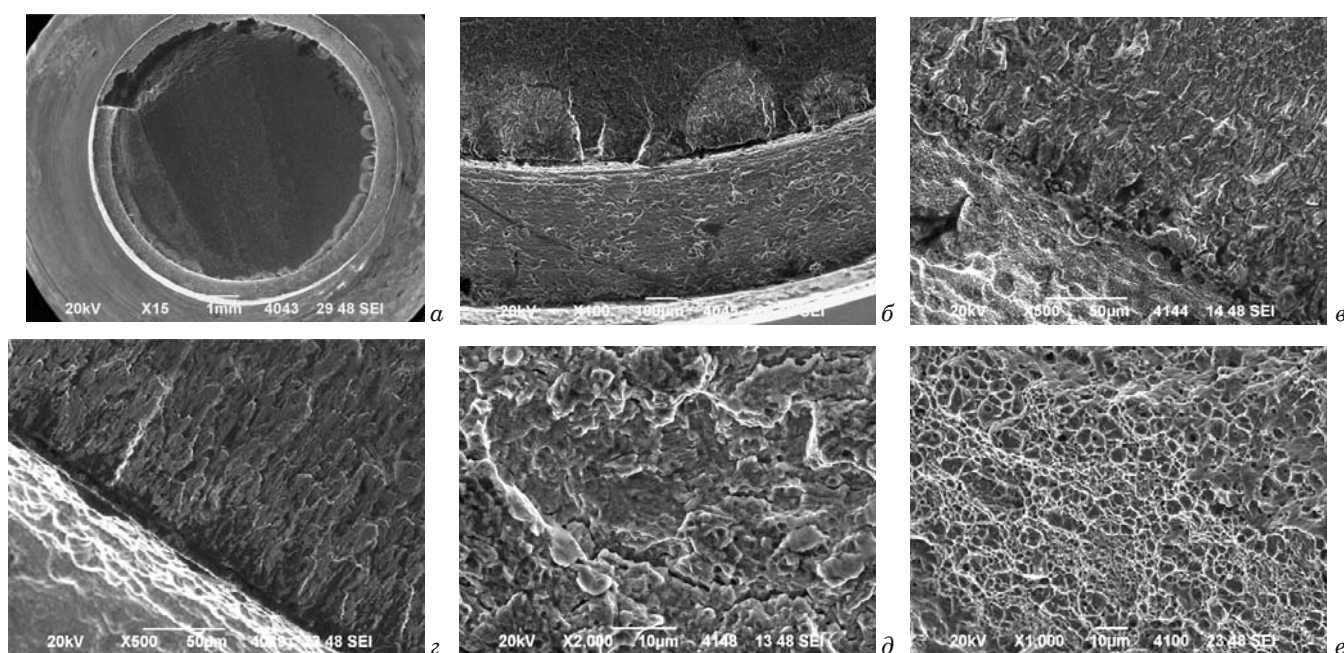


Рис. 9. Строение излома разрушенных болтов: а — общий вид излома; б — в — виды очаговых зон; д — усталостные бороздки; е — ямочный рельеф в доломе

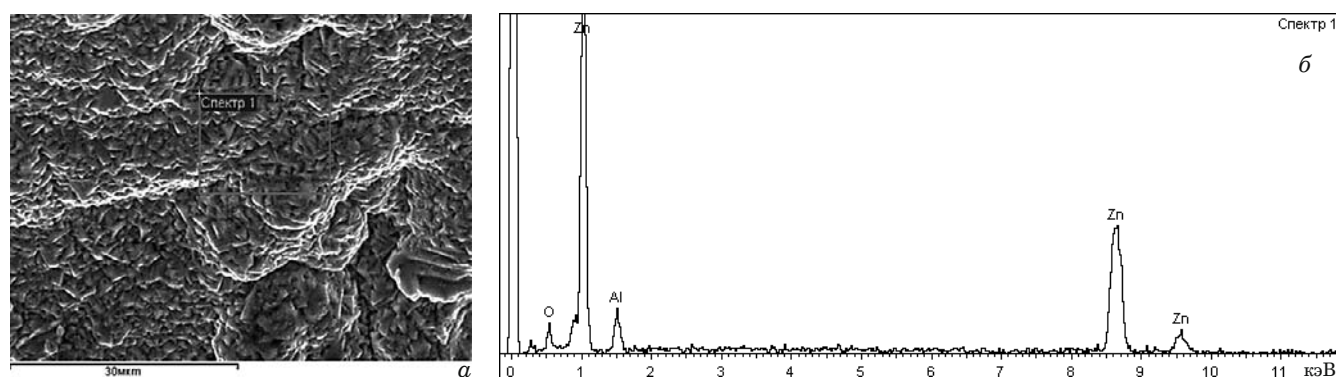


Рис. 10. Поверхность разрушенных болтов (а) и полученный в ее области РСМА спектр с пиками цинка (б)

Рентгеноспектральный микроанализ показал, что на поверхность болтов было нанесено цинковое покрытие (рис. 10). Микроструктуру болтов исследовали на поперечных шлифах. Микроструктура стали — сорбит. Следов пережога, перегрева не наблюдали. Болты из стали 30ХГСА термически обрабатывали на твердость (38 – 41) HRC, что соответствует уровню прочности 1200 – 1300 МПа.

Зарождению разрушения способствовал ряд факторов.

Поверхность болтов обрабатывали с образованием грубых рисок. Поскольку усталостное разрушение болтов с покрытием начинается, как правило, на границе раздела «покрытие – металл», качество обработки поверхности играет значительную роль для обеспечения надежности изделий при эксплуатации. При подготовке поверхности перед нанесением покрытия использовали фракцию песка с наличием крупных песчинок, вмятины от которых способствовали преждевременному зарождению трещин. При нанесении покрытия получены участки с наплывами, с неплотным соединением слоя. Многоочаговость, наличие в одном из болтов наряду с усталостными бороздками большого количества ямок свидетельствуют о работе материала при высокой нагрузке.

Проведенные исследования позволили выделить основные причины разрушения крепежных изделий из стали 30ХГСА во время эксплуатации. Большинство случаев разрушения связано с развитием усталостных трещин, образование которых может быть вызвано наличием на поверхности: риск от механической обработки; коррозионных язв; фреттинг-коррозии; ямок или внедренных частиц от пескоструйной обработки и т.д.

Статическое разрушение обусловлено превышением расчетной нагрузки или (как в случае разрушения гаек) температуры эксплуатации,

вызавшей охрупчивание в паре сталь — кадмий (эффект Ребиндера).

Необходимо отметить и возможность разрушения сопряженных с крепежными изделиями деталей, обладающих более низкими прочностными свойствами, например, деталей пакета, соединяющего элементы шпангоута воздушного судна.

Для однозначного установления причин разрушения деталей необходимо проведение комплексного исследования различными методами самой детали и сопряженных с ней деталей.

Выражаем благодарность И. П. Жегиной и Н. Г. Покровской за большой вклад в проведенные исследования и опыт, переданный авторам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мубояджян С. А., Коннова В. И., Горлов Д. С., Александров Д. А. Исследование фреттингостойкости стали ЭП866Ш / Труды ВИАМ: Электрон. науч.-технич. журн. 2015. № 7. Ст.01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1.
2. Григоренко В. Б., Орлов М. Р., Морозова Л. В., Журавлева П. Л. Исследование статического разрушения болтов из стали 30ХГСА в условиях эксплуатации / Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 125 – 135. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-125-135.
3. История авиационного материаловедения. ВИАМ — 80 лет: годы и люди / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. — М.: ВИАМ, 2012. — 520 с.
4. Каблов Е. Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» / ИБ «Пермские авиационные двигатели». 2014. № S. С. 43 – 47.
5. 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. С. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В. Г. Сорокин и др. / Научн. ред. В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев. — М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. — 608 с.
7. 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. N 10. P. 1894 – 1901.

8. **Самойлович Ю. А.** Повышение прочности железнодорожных рельсов путем изотермической закалки на нижний бейнит / *Металлург*. 2012. № 10. С. 70 – 76.
9. **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.
10. **Орлов М. Р., Оспенникова О. Г., Громов В. И.** Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 88 – 93.
11. **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.-техн. журн.* 2013. № 5. Ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.11.2016 г.).
12. **Орлов М. Р., Григоренко В. Б., Морозова Л. В., Наприенко С. А.** Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа / *Труды ВИАМ. Электрон. науч.-техн. журн.* 2016. № 1. Ст.09 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-0-1-62-79.
13. **Жегина И. П., Котельникова Л. В., Григоренко В. Б., Зими́на З. Н.** Особенности разрушения деформируемых никелевых сплавов и сталей / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 455 – 465.
14. **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.
15. **Орлов М. Р.** Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов. Неразрушающий контроль / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 387 – 393.
16. **Турченков В. А., Баранов Д. Е., Гагарин М. В., Шishкин М. Д.** Методический подход к проведению экспертизы материалов / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 1. С. 47 – 53.
3. History of aviation materials science. VIAM — 80 years: years and people / Ed. E. N. Kablov. — Moscow: VIAM, 2012. — 520 p. [in Russian].
4. **Kablov E. N.** Materials and VIAM technologies for “Aircraft engine” / IB “Permskie aviatsionnye dvigately”. 2014. N S. P. 43 – 47 [in Russian].
5. **Kablov E. N.** Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on realization “The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030” / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 1. P. 3 – 33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33 [in Russian].
6. Steel and alloys / V. G. Sorokin, etc.; Ed. V. G. Sorokin, M. A. Gervasyev. — Moscow: Intermet Engineering, 2001. — 608 p. [in Russian].
7. **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 ultrahigh-strength TRIP-aided bainitic ferrite steels / *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. N 10. P. 1894 – 1901.
8. **Samoylovich Yu. A.** Increase of durability of railway rails by isothermal training on bottom bainite / *Metallurg*, 2012. N 10. P. 70 – 76 [in Russian].
9. **Nesterova E. V., Zolotarevsky N. Yu., Titovets Yu. F., Khlusova E. I.** Inheritance of razoriyentatsiya and model of formation of structure bainite in low-carbonaceous steels under the influence of austenite deformation / *Vopr. Materialoved.* 2011. N 4(68). P. 17 – 26 [in Russian].
10. **Orlov M. R., Ospennikova O. G., Gromov V. I.** Thunders of mechanisms of hydrogen and beyinitny fragility of constructional steel in use large-size designs / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N S. P. 88 – 93 [in Russian].
11. **Chabina E. B., Alekseev A. A., Filonova E. V., Lukina E. A.** Application of methods of analytical microscopy and the rentgenostrukturny analysis for research of a structural and phase condition of materials / *Trudy VIAM* 2013. N 5. Art. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed 24.11.2016) [in Russian].
12. **Orlov M. R., Grigorenko V. B., Morozova L. V., Naprienko S. A.** Research of operational destructions of bearings by methods of optical, raster electronic microscopy and X-ray microanalysis / *Trudy VIAM*. 2016. N 1. Art. 09 URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed 24.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-0-1-62-79 [in Russian].
13. **Zhegina I. P., Kotelnikova L. V., Grigorenko V. B., Zimina Z. N.** Features of destruction of deformable nickel alloys and staly / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N S. P. 455 – 465 [in Russian].
14. **Orlov M. R., Ospennikova O. G., Gromov V. I.** The slowed-down destruction of steel 38KhN3MA in the course of long operation / *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Mashinost.* 2011. Special Issue. P. 5 – 10 [in Russian].
15. **Orlov M. R.** The Fundamental’s focused researches, qualification of materials. Nondestructive control / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. No. S. P. 387 – 393 [in Russian].
16. **Turchenkov V. A., Baranov D. E., Gagarin M. V., Shishkin M. D.** Methodical approach to carrying out examination of materials / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 1. P. 47 – 53 [in Russian].

REFERENCES