Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-6-44-50

УДК (UDC) 620.192.7:621.438.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ВАЛОВ ВИНТА ИЗ СТАЛИ 40ХН2МА

© Михаил Романович Орлов, Лариса Владимировна Морозова

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия;
e-mail: morozovalv@viam.ru*Статья поступила 24 мая 2017 г.*

Исследованы характер и причины разрушения высоконагруженного вала винта газотурбинного двигателя из стали 40ХН2МА с применением методов растровой электронной и оптической микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Определяли химический состав, микроструктуру и характер разрушения фланцевой части валов винта из стали 40ХН2МА. Установлено, что химический состав материала вала винта соответствует требованиям нормативной документации, дефекты металлургического происхождения как в металле валов, так и в усталостных изломах отсутствуют. Все выявленные трещины образовались в процессе эксплуатации и развивались по усталостному механизму. Очаги зарождения усталостных трещин в валах винта — зоны фреттинг-износа и фреттинг-коррозионного повреждения поверхности в отверстия под шпильки. Причиной образования и развития усталостных трещин на фланце вала винта является высокий уровень контактных напряжений в теле фланца, связанный с неудовлетворительным сопряжением поверхностей шлицевого стыка вследствие значительного фреттинг-коррозионного повреждения шлицев и вибрационных повреждений. На основании проведенных исследований разработан комплекс рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов. Для предотвращения образования и развития усталостных трещин в шлицевом фланце вала винта в процессе эксплуатации рекомендовано: оптимизировать усилие затяжки шлицевого стыка; ввести контроль качества сопряжения контактных поверхностей шлицевого стыка при замене воздушных винтов; проработать вопрос динамической балансировки воздушных винтов в процессе производства и при их ремонте.

Ключевые слова: усталостное разрушение; фреттинг-коррозия; сталь; трещины; фрактография; вал; газотурбинный двигатель; фреттинг.

STUDY OF THE NATURE AND CAUSES OF DAMAGE OF 40KhN2MA STEEL PROPSHAFTS

© Mihail R. Orlov, Larisa V. Morozova

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russia; e-mail: morozovalv@viam.ru

Submitted May 24, 2017.

The nature and character of the destruction of the high-loaded airscrew shaft of the gas turbine engine made of steel 40KhN2MA are studied using the methods of scanning electron and optical microscopy and X-ray spectral microanalysis. We determined the chemical composition, microstructure and character of destruction of the flange part of the shaft. It is shown that chemical composition of the shaft material meets the requirements of the regulatory documents and defects of metallurgical origin are absent both in the metal of the shaft and in the fatigue fractures. All the identified cracks have been formed during operation, and developed according to the fatigue mechanism. Zones of fretting-wear and fretting-corrosion damage to the surface in the stud holes are the foci of the fatigue crack birth in the airscrew shaft. The cause of formation and development of the fatigue cracks in the shaft flange is a high level of contact stresses in the flange body, attribute to a poor quality of the interface of the splined joint due to significant fretting corrosion damage to the splines and vibration damages. A set of recommendations and measures aimed at elimination of the adverse factors is elaborated. To exclude the formation and development of fatigue cracks in the splined flange upon operation, we recommend to: optimize the tightening torque of the splined joint; introduce quality control of the interface between

contact surfaces of the splined joint when replacing the airscrews; address the issue of dynamic balancing of the airscrews upon their production and repair.

Keywords: fatigue failure; fretting-corrosion; steel; cracks; fractography; shaft; gas turbine engine; fretting.

В ответственных тяжело нагруженных конструкциях авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) используют термически обрабатываемые среднеуглеродистые и легированные стали, не чувствительные к отпускной хрупкости [1]. К таким конструкциям относятся валы, предназначенные для передачи крутящего момента на воздушный винт. Они подвержены действию крутящих моментов, изгибающих нагрузок, вибраций; образование трещин в области фланца и шлицев может приводить к возникновению аварийных ситуаций в процессе эксплуатации [2 – 4].

Фреттинг представляет собой процесс износа, сопровождающийся повреждением и удалением поверхностных слоев металла. Замкнутость контактного пространства исключает возможность удаления продуктов износа, что приводит к увеличению слоя окисленного металла, имеющего большие объем и твердость, росту напряжений в зоне контакта и возникновению усталостных микротрещин. Механизм фреттинга включает в себя как физико-химические процессы, протекающие на молекулярном уровне, вследствие чего в зоне контакта образуются окислы металлов сопряженных деталей (фреттинг-коррозия), так и механические процессы разрушения и абразивного износа в зоне контакта в субмикроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя деталей. Эти процессы тесно связаны между собой и по-разному влияют на сопротивление усталости (фреттинг-усталость) [5 – 7].

Исследование случаев эксплуатационных разрушений позволяет не только установить причину их возникновения, но и разработать комплекс рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов [8 – 12].

Цель работы — исследование причин образования трещин на фланцевой части валов винта авиационного ГТД. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.3.: «Высокопрочные наноструктурированные конструкционные стали и диффузионные покрытия («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Вал винта изготавливают из конструкционной легированной стали 40XH2MA следующего химического состава, % масс. (согласно ГОСТ 8479–70 и ТУ 108.13.32–88): 0,37 – 0,44 C; 0,17 – 0,37 Si; 0,50 – 0,80 Mn; 0,60 – 0,90 Cr; 1,25 – 1,65

Ni; 0,15 – 0,25 Mo; <0,025 S; <0,025 P (основа — Fe).

Исследование включало в себя:

визуальный осмотр, фотосъемку валов винта и его фрагментов;

анализ поверхности и впадин шлицев, фланцевой части валов с использованием оптического анализа;

химический анализ на соответствие марке стали;

рентгеноспектральный микроанализ;

фрактографический анализ;

определение микроструктуры;

измерение твердости.

Исследование микроструктуры и изломов стали 40XH2MA проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JSM-6360LA, оснащенном системой энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) [14, 15]. Поверхность и впадины шлицев, фланцевую часть валов исследовали с применением оптического микроскопа Olympus. Химический состав материала определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S4 EXPLORER и оптикоэмиссионном спектрометре APL 4460.

Для проведения исследований валам были присвоены условные номера. Выявленные усталостные разрушения валов винта можно разделить на три основные группы:

1) усталостные трещины от фреттинг-коррозионного повреждения шлицев с последующим их развитием в кольцевом направлении по отверстиям под шпильки без выхода на цилиндрическую часть вала и без отделения фланца вала;

2) усталостные трещины от фреттинг-коррозионного повреждения укороченных шлицев или зоны выхода межшлицевой впадины со стороны малого модуля на образующую поверхность отверстия под шпильку с последующим их развитием в радиальном направлении и выходом на цилиндрическую часть вала;

3) усталостные трещины в зоне фреттинг-износа по упорному буртику с последующим их развитием в сторону наружной образующей цилиндрической части, не приводящим к макроразрушению вала винта.

Первая группа разрушений характерна для валов № 1 и 2 (рис. 1). Зарождение усталостных трещин в этих валах начинается на шлицах в

Рис. 1. Усталостное разрушение валов винта № 1 (а, б) и № 2 (в, г): а, в — двустороннее фреттинг-коррозионное повреждение шлицев в зоне зарождения усталостных трещин; б, г — вскрытые усталостные трещины на шлицах

зоне фреттинг-коррозионного повреждения с последующим их развитием в тело фланца в направлении против вращения вала. Для валов, отнесенных по характеру разрушения к первой группе, характерно развитие усталостных трещин в окружном направлении с последующим выходом на отверстия под шпильки. После выхода в отверстия под шпильки движение усталостных трещин прекращается. Как правило, эти трещины не выходят на противоположную поверхность фланца. Развитие усталостных трещин в окружном направлении не приводит к обрыву фланца вала винта в эксплуатации.

Для валов № 3, 4 и 5 характерна вторая группа разрушений. Фрагмент фланца вала № 3 до и после вскрытия усталостной трещины представлен на рис. 2.

Результаты фрактографических исследований показали, что трещина зародилась по впадине укороченных шлицев со стороны малого модуля. В процессе эксплуатации усталостная тре-

Рис. 3. Усталостное разрушение вала № 4: а — зоны развития усталостных трещин в теле шлица (стрелка 1) и в теле фланца в радиальном направлении (стрелка 2); ответвление усталостной трещины в зону соседнего отверстия под шпильку (стрелка 3); б — встречная усталостная трещина от межшлицевой впадины укороченных шлиц соседнего отверстия под шпильку

щина развивалась в осевом направлении вала с разворотом фронта в сторону отверстия под шпильку и в сторону внутренней поверхности вала. В зоне выхода межшлицевой впадины на гладкую поверхность фланца со стороны малого модуля усталостная трещина раздвоилась (рис. 2, б). Следует предполагать, что в случае невыявления этой трещины при ремонте она должна была развиваться в радиальном направлении с последующим выходом на галтельный радиус перехода фланца к цилиндрической части вала.

Фрагмент фланца вала № 4 со вскрытой усталостной трещиной представлен на рис. 3. Зарождение усталостной трещины началось от зоны фреттинг-коррозионного повреждения укороченного шлица. После развития трещины в тело шлица и выхода на его противоположную поверхность объемные напряжения перераспределились, что привело к развороту направления ее движения вглубь фланца. Когда усталостная трещина вышла на гладкую поверхность фланца со стороны малого модуля, произошло ее раз-

Рис. 2. Усталостное разрушение фланца вала № 3: а — фреттинг-коррозионное повреждение шлицев; б — усталостная трещина по межшлицевой впадине со стороны малого модуля с выходом на внутреннюю коническую поверхность вала; в — фрагмент вскрытой усталостной трещины

Рис. 4. Фрагмент усталостного разрушения фланца вала винта № 5: *а* — первичная усталостная трещина в теле шлица, развившаяся от участка фреттинг-коррозионного повреждения рабочей поверхности укороченного шлица со стороны малого модуля (зона 1); *б* — схема первого этапа усталостного разрушения фланца вала; *в* — поверхность вторичной усталостной трещины с отмеченными зонами; *г* — схема распространения трещины с отмеченными зонами развития

двоение. Одна усталостная трещина двинулась в сторону соседнего отверстия под шпильку, а вторая — по спирали в сторону галтельного перехода фланца к цилиндрической части вала.

Одновременно с движением усталостной трещины в сторону соседнего отверстия под шпильку от этого отверстия навстречу ей стартовала еще одна усталостная трещина с линейным очагом по межшлицевой впадине со стороны малого модуля. Развитие второй трещины было остановлено разгрузкой фланца в результате движения первичной усталостной трещины. Встречное движение усталостных трещин привело к образованию тонкого «козырька» (рис. 3, б).

С точки зрения интерпретации причины зарождения и развития усталостных трещин в шлицевой части фланца вала винта особый интерес представляет вал № 5. Фрагменты усталостного разрушения фланца вала № 5 и схемы развития трещины представлены на рис. 4, где видно, что первоначальная трещина стартовала от рабочей поверхности укороченного шлица от

места фреттинг-коррозионного повреждения и развивалась в плоскости фланца (зона 1). Вторым этапом усталостного разрушения фланца было зарождение усталостной трещины от поверхности излома шлица (зона 2). Причиной зарождения и развития вторичной усталостной трещины в тело фланца явилась разгрузка укороченного шлица при его усталостном разрушении и возникновение вследствие этого растягивающих напряжений в плоскости основания шлица от усилий затяжки гайки. Зона 2 развития усталостной трещины расположена под углом $\pm 45^\circ$ к плоскости фланца в направлении его вращения. Развитие усталостной трещины в зоне 2 остановилось в момент ее выхода на гладкую внутреннюю поверхность фланца. После этого этапа усталостная трещина разделилась на две (аналогично разрушению вала № 3). Однако преимущественное развитие получила трещина (зона 3), движущаяся в теле фланца в направлении против его вращения под углом $\pm 45^\circ$ к его плоскости.

Рис. 5. Морфология усталостного разрушения фланца вала № 5 в зоне 2 на участках сохранившегося микрорельефа: а — общий вид фрагмента; б – в — поверхность усталостной трещины

По мере развития магистральной трещины (зона 3) в направлении соседнего отверстия под шпильку и радиуса галтельного перехода к цилиндрической части вала, зона 2 усталостного разрушения получила незначительный прирост в направлении вращения вала (зона 4). При вскрытии излома зона 4 усталостного разрушения не была вскрыта, и по внутренней поверхности фланца (в месте ее выхода) изготовлен металлографический шлиф для исследований.

Фрактографические исследования фрагментов усталостных изломов и исследования металлографического шлифа фланца вала винта № 5 показали, что все зоны развития усталостного разрушения имеют значительное повреждение поверхности в результате фреттинга, обусловленного смыканием образующихся поверхностей и их микроперемещением в процессе работы вала. В зонах сохранившегося микрорельефа поверхность усталостных трещин имеет специфическую морфологию, типичную для усталостного разрушения отпущенного мартенсита.

В процессе исследования фрагментов вала № 5 особое внимание было уделено зоне 2 усталостного разрушения (рис. 5). При фрактографиче-

ском исследовании зоны 2 в местах с сохранившимся микрорельефом разрушения поверхность излома имеет вид, типичный для усталостного разрушения стали 40ХН2МА со структурой отпущенного мартенсита (рис. 5, б – в). На основании этих результатов можно утверждать, что зона 2 в изломе фланца вала № 5 имеет также усталостный характер и является отражением одного из этапов разрушения фланца.

Анализ металлографического шлифа, изготовленного в месте выхода усталостной трещины (зона 4 на рис. 4) на внутреннюю поверхность фланца вала № 5, показал, что трещина заполнена конгломератом спрессованных окислов металлов, входящих в состав стали 40ХН2МА, пропитанным углеродсодержащим материалом. Значительное содержание в материале, заполняющем трещину, углерода и отсутствие в нем таких химических элементов, как сера, фосфор, азот, кальций, магний, кремний и др., позволяют утверждать, что этот материал не может представлять собой ни один из таких металлургических дефектов, как сульфиды, фосфиды, нитриды, а также шлаковые пленочные включения.

Рис. 6. Усталостные трещины от фреттинг-износа по упорному буртику в зоне галтельного перехода вала винта № 6: *а* — общий вид фрагмента (стрелками отмечены усталостные трещины по упорному буртику); *б* — вскрытая усталостная трещина

Значительное (в сравнении со сталью 40ХН2МА) содержание в материале, заполняющем трещину, углерода исключает возможность образования окислов металла в процессе горячей деформации заготовки вала. Исследование структуры стали в зоне трещины и вдали от нее подтверждает неизменность морфологии высокоотпущенного мартенсита, что свидетельствует об отсутствии каких-либо нагревов (например, связанных с термообработкой вала) в процессе или после образования трещины.

На основании выполненных исследований можно заключить, что материал, заполняющий усталостную трещину, представляет собой промасленные продукты фреттинг-коррозионного износа.

После металлографических исследований шлифа фрагмента вала № 5 усталостная трещина (зона 4) была вскрыта для фрактографических исследований. На поверхности вскрытой трещины обнаружены спрессованные продукты фреттинг-износа, которые были удалены с поверхностей излома с помощью ультразвуковой очистки с использованием органического растворителя. Анализ вскрытой трещины с выходом на поверхность металлографического шлифа показал, что в зоне 4 усталостная трещина имеет характерные линии остановки фронта ее движения, соответствующие полетным циклам. На поверхности излома, смежной с поверхностью металлографического шлифа, отчетливо проявляется микроструктура мартенсита, вытравленная в

процессе препарирования металлографического шлифа для электронно-микроскопических исследований. Микроструктура мартенсита на поверхности усталостного излома очередной раз подтверждает отсутствие каких-либо нагревов металла после возникновения трещины в зоне 4.

Таким образом, исследования фланца вала винта № 5 полностью подтверждают усталостный механизм развития трещины от ее зарождения до выхода за пределы фланца, а также отсутствие в изломе каких-либо металлургических дефектов.

Третья группа разрушения присуща валу № 6, фрагмент которого представлен на рис. 6. Особенностью этого вида усталостного разрушения является появление фреттинг-износа опорного буртика $\varnothing 120$ мм вследствие ослабления затяжки деталей пакета на валу винта. Зарождение усталостных трещин на всех валах этой группы происходит практически в одном и том же месте с последующим развитием трещин в сторону наружного диаметра в направлении фланца вала. Эти усталостные трещины не приводят к образованию кольцевой усталостной трещины с последующим обрывом фланца.

Исследование методом растровой электронной микроскопии поверхности усталостной трещины на фрагменте вала № 6, представленном на рис. 6, б, после удаления продуктов фреттинг-коррозионного износа позволило обнаружить множество участков сохранившегося рельефа усталостного разрушения, имеющих харак-

Рис. 7. Микроструктура отпускаемого мартенсита в стали 40XH2MA после травления шлифа в 5 %-ном растворе HNO_3 в этиловом спирте

терную для мартенситной стали морфологию, идентичную представленной на рис. 5.

Спектральный анализ фрагментов исследованных валов подтвердил соответствие их состава химическому составу стали 40XH2MA согласно требованиям нормативной документации.

Твердость образцов, вырезанных из исследуемых фрагментов валов, также отвечает требованиям нормативной документации (290 – 331 *HV*).

В микроструктуре металла валов отсутствовали какие-либо металлургические дефекты; она представляла собой отпускаемый мартенсит (рис. 7).

В результате исследований разрушенных валов винта из стали 40XH2MA получены следующие результаты:

1) химический состав материала вала винта соответствует требованиям нормативной документации к стали 40XH2MA;

2) дефекты металлургического происхождения как в металле валов, так и в усталостных изломах отсутствуют;

3) фрактографический анализ фрагментов валов винта с трещинами (№ 1 – 6) показал, что несмотря на условное разделение разрушений на три группы, все трещины образовались в процессе эксплуатации и имеют усталостный характер;

4) очагами зарождения усталостных трещин в валах винта являются зоны фреттинг-износа опорного буртика, фреттинг-коррозионного повреждения поверхности шлицев и мест перехода межшлицевых впадин укороченных шлицев (со стороны малого модуля) в отверстия под шпильки;

5) причиной образования и развития усталостных трещин на фланце вала винта является высокий уровень контактных напряжений в теле фланца, связанный с неудовлетворительным сопряжением поверхностей шлицевого стыка вследствие значительного фреттинг-коррозион-

ного повреждения шлицев и вибрационных повреждений.

Для исключения образования и развития усталостных трещин в шлицевом фланце вала винта в процессе эксплуатации рекомендовано:

оптимизировать усилие затяжки шлицевого стыка;

ввести контроль качества сопряжения контактных поверхностей шлицевого стыка при замене воздушных винтов в эксплуатации;

проработать вопрос динамической балансировки воздушных винтов в производстве и при их ремонте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. России нужны материалы нового поколения / Редкие земли. 2014. № 3. С. 8 – 13.
2. Каблов Е. Н. Материалы для авиакосмической техники / Все материалы: Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7 – 27.
3. Каблов Е. Н. Авиакосмическое материаловедение / Все материалы: Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2 – 14.
4. Петухов А. Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость в малоподвижных соединениях / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2006. № 2 – 1(10). С. 115 – 120.
5. Микла С. Влияние фреттинг-коррозии на усталостную прочность валов горных машин / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 1999. № 6. С. 87.
6. Хаинг Мин, Петухов А. Н., Павлов Ю. И. Фреттинг-коррозия в деталях ГТД / Научные труды (Вестник МАТИ). 2009. № 15(87). С. 102 – 105.
7. Мубояджян С. А., Коннова В. И., Горлов Д. С., Александров Д. А. Исследование фреттингостойкости стали ЭП866Ш / Труды ВИАМ. 2015. № 7. С. 1. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 31.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1.
8. Турченков В. А., Баранов Д. Е., Гагарин М. В., Шишкин М. Д. Методический подход к проведению экспертизы материалов / Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 47 – 53.
9. Орлов М. Р., Оспенникова О. Г., Наприенко С. А., Морозова Л. В. Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20ХЗМВФ / Деформация и разрушение материалов. 2014. № 7. С. 18 – 26.

10. 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. 2016. № 1. С. 9. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 31.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
11. Фрактография: средство диагностики разрушенных деталей / Под ред. М. А. Балтер. — М.: Машиностроение, 1987. — 160 с.
12. 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-s4-65-69.
13. 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.
14. 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. 2013. № 5. С. 6. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 31.06.2016).
15. Бронфин М. Б., Алексеев А. А., Чабина Е. Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы / Авиационные материалы 75 лет. Избранные труды. Юбилейный научно-технический сборник. — М.: ВИАМ, 2007. С. 353 – 365.
6. Khaing Min, Petukhov A. N., Pavlov Yu. I. Fretting corrosion in details of gas turbine engines / Nauchn. Tr. (Vestn. MATI). 2009. N 15(87). P. 102 – 105 [in Russian].
7. Muboyadzhyan S. A., Konnova V. I., Gorlov D. S., Aleksandrov D. A. Research of resistance to EP866Sh steel fretting / Trudy VIAM. 2015. N 7. P. 1. <http://www.viam-works.ru> (accessed 31.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1 [in Russian].
8. 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].
9. Orlov M. R., Ospennikova O. G., Naprienko S. A., Morozova L. V. Research of fatigue failure of conic gear wheels of reducer of the central drive of the gas turbine engine, made of steel 20Kh3MVF / Deform. Razrush. Mater. 2014. N 7. P. 18 – 26 [in Russian].
10. Orlov M. R., Grigorenko V. B., Morozova L. V., Naprienko S. A. Research of operational destructions of bearings by methods of optical, raster electron microscopy and x-ray spectral microanalysis / Trudy VIAM. 2016. N 1. P. 9. <http://www.viam-works.ru> (accessed 31.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
11. Fraktografy: means of diagnostics of the destroyed details / M. A. Balter (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 160 p. [in Russian].
12. Grigorenko V. B., Orlov M. R., Morozova L. V., Zhuravleva P. L. Research of static destruction of bolts from steel 30KhGSA in use / Aviats. Mater. Tekhnol. 2014. N S4. P. 125 – 135. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-65-69 [in Russian].
13. Kablov E. N. Innovative development FSUE “VIAM” on implementation “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].
14. 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 structural and phase condition of materials / Trudy VIAM. 2013. N 5. P. 6. <http://www.viam-works.ru> (accessed 31.06.2016) [in Russian].
15. Bronfin M. B., Alekseev A. A., Chabina E. B. Metalphysical researches. Opportunities and perspectives / Aviation materials are 75 years old. Selected works. Jubilee scientific and technical collection. — Moscow: VIAM, 2007. P. 353 – 365. [in Russian].

REFERENCES