



УДК 537.533.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-11-11

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНФОКАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

И.В. Исходжанова

М.Р. Орлов

доктор технических наук

В.Б. Григоренко

кандидат технических наук

М.А. Лаптева

Апрель 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 537.533.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-11-11

И.В. Исходжанова¹, М.Р. Орлов¹, В.Б. Григоренко¹, М.А. Лаптева¹

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНФОКАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

На примерах исследований коррозионных повреждений агрегатов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) после пяти лет экспозиции на открытой площадке Геленджикского центра климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» им. Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ) представлены возможности конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ).

Построены 3D-модели и проведена количественная оценка рельефа поверхности путем статистической обработки данных шероховатости с использованием стандартного программного обеспечения.

Ключевые слова: *конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, шероховатость поверхности, коррозия, коррозионные питтинги, агрегаты ГТД.*

I.V. Iskhodzhanova, M.R. Orlov, V.B. Grigorenko, M.A. Lapteva

APPLICATION OF THE CONFOCAL LASER IMAGING MICROSCOPY METHOD FOR CORROSIVE DAMAGES STUDY

On the investigations examples of aircraft gas turbine engines corrosive damages after 5 years exposure on the open experimental ground of the FSUE «VIAM» G.V. Akimov Gelendzhik climatic test center (VIAM GCTC) the possibilities of confocal laser imaging microscopy are represented.

The 3D-models were built and quantitative assessment of surface topography by statistical data processing of the roughness using standard software was undertaken.

Keywords: *confocal laser scanning microscopy, surface roughness, corrosion, pitting corrosion, agregate of GTE.*

¹Федеральное 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

Диагностика состояния деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является важным фактором в решении проблемы обеспечения безопасной эксплуатации и повышения ресурса авиационной техники [1–4].

Изучение процесса накопления повреждений [5–7] делает возможным прогнозирование времени до разрушения детали и ее остаточного ресурса. Большое количество исследований посвящено решению этой проблемы и изучению изменений, протекающих в поверхностных слоях, которые наиболее нагружены и подвержены воздействию климатических факторов, таких как влага и температура, а также соли, содержащиеся в воздушной атмосфере [8–11].

С появлением конфокальных лазерных сканирующих микроскопов (КЛСМ) у материаловедов появился прибор, при помощи которого можно построить 3D-модель рельефа поверхности исследуемого материала в широком диапазоне увеличений. Микроскоп позволяет получать полностью сфокусированное изображение объемных объектов с реалистичной цветопередачей при большом увеличении с высоким разрешением, недостижимым с помощью оптических микроскопов.

Материалы и методы

Методом КЛСМ проводили исследования коррозионных поражений, образующихся на поверхности агрегатов двигателя АЛ-31Ф после пяти лет натурной экспозиции в условиях мягкого морского климата на открытой площадке Геленджикского центра климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» им. Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ).

Исследовали корпус маслонасоса из сплава АК7ч., обоймы из стали типа 30Х3МФ и втулки из бронзы БрАЖН-10. Коррозионные повреждения изучали с помощью КЛСМ Olympus Lext OLS3100. 3D-модели рельефа поверхности участков с коррозионными поражениями получали путем статистической обработки данных шероховатости с использованием стандартного программного обеспечения для КЛСМ Olympus Lext OLS3100.

Шероховатость, усредненную по всей площади кадра (S_k), измеряли в соответствии с ГОСТ 2789–73 и ISO 4287:1997/ISO 1302:2002, определяя параметр шероховатости R_{a_i} как среднее арифметическое отклонение профиля (S_i) (по ГОСТ 2789–73).

Принцип работы конфокального лазерного сканирующего микроскопа

В КЛСМ используются два источника света – источник белого света при работе в обычном оптическом режиме и лазер при работе в режиме лазерного сканирующего микроскопа.

В обычном оптическом режиме работы КЛСМ происходит многократная съемка поверхности излома при разных фокусных расстояниях оптической системы при полихромном освещении (светодиод белого свечения). Затем производится программная обработка полученных изображений с целью получения интегрального 2D-изображения плоскости поверхности излома в натуральных цветах, состоящего из участков с максимальной резкостью.

В конфокальном режиме работы КЛСМ используется монохромное лазерное излучение, а матрица ПЗС (прибора с зарядовой связью) датчика находится в фокусе. Благодаря конфокальной плоскости отсекаются световые лучи, проходящие не из точки фокуса, что позволяет более точно определить профиль рельефа поверхности излома.

Свет, излучаемый лазерным источником сканирующего микроскопа, фокусируется при помощи оптической системы, сканирующей по координатам x и y . В границах поля зрения сфокусированный луч сканирует по координатам x и y поверхность образца, и свет, отраженный от каждой точки, регистрируется записывающим устройством. Затем объектив смещается по координате z и сканирование поверхности повторяется. Это позволяет регистрировать информацию об интенсивности отраженного света для каждой точки области сканирования при всех возможных положениях объектива по оси z , принимая наиболее яркое отражение для каждой точки за положение фокуса. Таким образом, становится возможным синтезировать 3D-изображение по критерию яркости, отображающее профиль объекта.

В дальнейшем осуществляется программная обработка, в процессе которой полученные результаты пересчитываются в z -координаты каждой точки поверхности, что позволяет получить 3D-модель поверхности и черно-белое 2D-изображение поверхности более высокого разрешения, чем в режиме оптического микроскопа.

Данные, полученные по лазерному каналу, объединяются затем с изображением, полученным от источника белого света. Итоговое изображение, помимо информации о яркости, включает в себя данные о цвете и профиле поверхности объекта [12].

В результате пользователь получает картинку, соперничающую по разрешению с растровым электронным микроскопом (РЭМ) [13] при увеличении до $\times 5000$ и являющуюся при этом полноцветным изображением [14, 15].

Метод КЛСМ позволяет проводить измерения профилей рельефа поверхности и шероховатости без повреждения объекта, бесконтактный метод позволяет работать даже с мягкими объектами. Тонкий лазерный луч меньше диаметра иглы обычного профилометра, поэтому дает возможность проводить более точные измерения объектов сложной формы [16].

С применением метода КЛСМ стало возможным измерение геометрических характеристик профиля поперечного сечения, объема объектов на поверхности, площади поверхности и отношения заданной площади к общей площади объекта в любом месте на экране. Доступны такие функции, как высокоскоростное и высокоточное сшивание изображения с применением функции широкоформатного сканирования, что устраняет ограничения поля зрения при большом увеличении.

Метод КЛСМ позволяет получать три типа изображений исследуемой поверхности:

- полностью сфокусированные цветные 2D- и 3D-изображения рельефа поверхности, которые нельзя получить с помощью РЭМ и оптического микроскопа;
- изображение интенсивности отраженного света лазера, подобное изображению, полученному методом РЭМ;
- топографический режим (цветовая карта высот) – цветовая кодировка уровня высоты точки на исследуемой поверхности. Возможно получение изображения изучаемой поверхности в виде сетки с задаваемым шагом [5, 12].

Большим преимуществом метода КЛСМ является то, что программный пакет для Olympus Lext OLS3100 позволяет детально исследовать полученную 3D-модель поверхности:

- путем вращения вокруг любой оси с изменением масштаба увеличения;
- с помощью изменения интенсивности и угла освещения проводить анализ поверхности;
- измерять размеры фрагментов поверхности и определять шероховатость поверхности вдоль заданной линии, а также по площади как в пределах всего кадра, так и любого его участка [12].

Описанные возможности метода КЛСМ позволяют применять его при анализе изломов конструкционных материалов, в том числе для идентификации механизмов усталостного разрушения по параметру шероховатости [17], а также для анализа качества поверхности деталей ГТД в технологическом цикле производства при нанесении защитных диффузионных покрытий [18] и неразрушающем контроле методом капиллярной дефектоскопии [19].

Результаты и обсуждение

Целью работы являлась оценка влияния климатических факторов в условиях ГЦКИ ВИАМ на коррозионные повреждения различных материалов в составе корпуса маслонасоса двигателя АЛ-31Ф.

Поверхность деталей корпуса маслонасоса исследована при различных увеличениях, измерены шероховатость поверхности деталей вблизи выраженных коррозионных повреждений и толщина соляных отложений. На рис. 1 приведен внешний вид исследованного сегмента корпуса маслонасоса, где отмечены зоны исследования:

- проточка на обойме из стали типа 30Х3МФ (1);
- обойма из стали типа 30Х3МФ (2);
- посадочное место (3) в корпусе из сплава АК7ч. под втулку из бронзы;
- верхняя поверхность втулки из бронзы БрАЖН-10 (4);
- нижняя поверхность втулки из бронзы БрАЖН-10 (5 – поверхность контакта с корпусом маслонасоса из сплава АК7ч.).

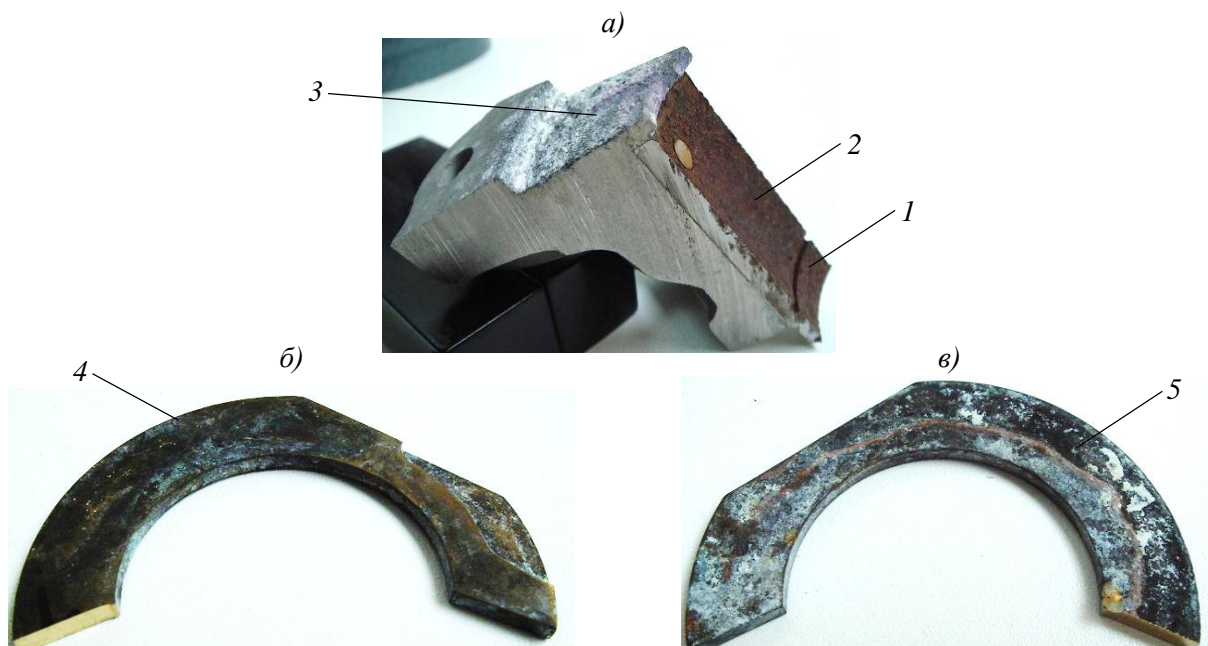


Рис. 1. Внешний вид сегмента корпуса маслонасоса (а), верхняя (б) и нижняя (в) поверхности втулки из бронзы БрАЖН-10 с областями проточки (1) на обойме из стали типа 30Х3МФ (2) и посадочным местом (3) в корпусе из сплава АК7ч. под втулку из бронзы БрАЖН-10, а также верхняя (4) и нижняя (контактная с корпусом маслонасоса) поверхности (5)

На рис. 2–6 приведены 3D-изображения поверхностей рассматриваемых зон (указанных на рис. 1) при увеличениях от $\times 50$ до $\times 500$, полученные методом КЛСМ.

Для съемки выбирали места с видимыми следами коррозионных повреждений и солевыми отложениями.

3D-модели поверхности представлены в натуральных цветах, когда модель поверхности, полученная в режиме 3D-лазерной съемки по высоте, совмещена с изображением, полученным в режиме оптической микроскопии (рис. 2, а; 3, а; 4, а; 5, а; 6, а). По полученным 3D-моделям проводится измерение геометрических характеристик особенностей поверхности деталей, а именно:

– на рис. 2, б и 3, б приведены профили поверхности деталей с измерениями глубины коррозионных повреждений. На рис. 2, б максимальная глубина коррозионного поражения составляет 40 мкм с \varnothing 90 мкм, а на рис. 3, б соответственно 50 мкм с \varnothing 170 мкм;

– на рис. 4, б, в; 5, б, в; 6, б, в показаны профили поверхности деталей с измерениями толщины солевых отложений, которые достигают 180 мкм.

3D-модели поверхности представлены и в топографическом режиме (рис. 2, в; 3, в; 4, г; 5, г; 6, г). Для визуализации топографии модели применяется цветовая кодировка оптического диапазона: красный цвет соответствует наиболее высоким точкам, фиолетовый – наиболее низким. По изображениям можно определить места с наибольшими отклонениями по высоте – самое низкое и самое высокое место на поверхности. Морфологию поверхности можно анализировать на интегральном 3D-профиле поверхности, представленном на рис. 2, д; 3, д; 4, ж; 5, е; 6, е.

2D-изображения поверхности представлены в лазерном режиме съемки (рис. 2, з; 3, з; 4, д; 5, д; 6, д). На изображениях хорошо видны очень мелкие детали в отличие от изображений, полученных в режиме оптического микроскопа. На этих же изображениях измеряли шероховатость при максимально возможном увеличении.

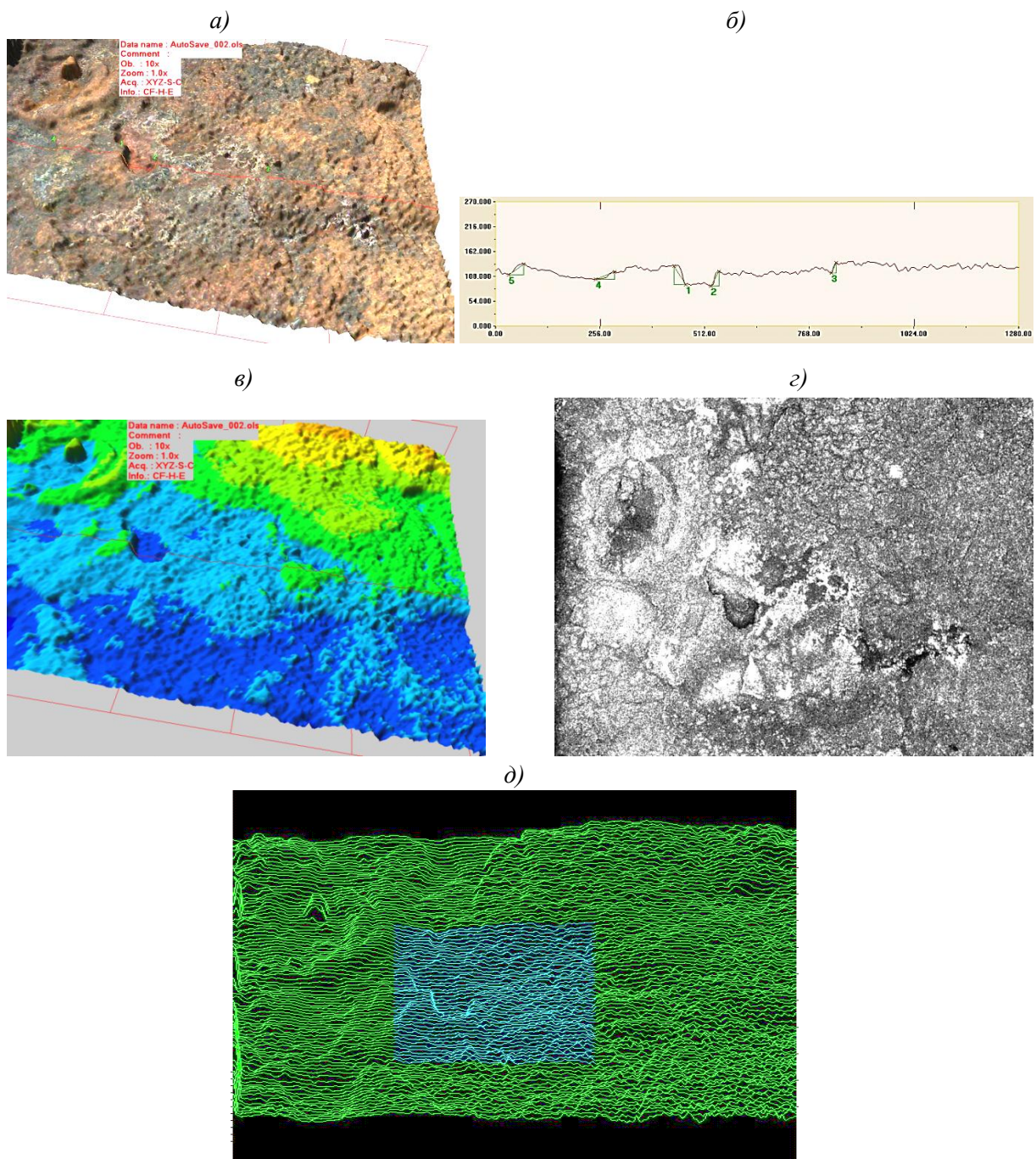


Рис. 2. Поверхность проточки на обойме из стали типа 30X3MФ ($\times 100$):
 а – 3D-изображение в натуральных цветах; б – профиль поверхности с измеренной глубиной коррозионного поражения; в – 3D-изображение поверхности в топографическом режиме; г – 2D-изображение поверхности в режиме лазерного сканирования; д – изображение профиля поверхности с отмеченным голубым цветом участком поверхности, на котором измеряли шероховатость

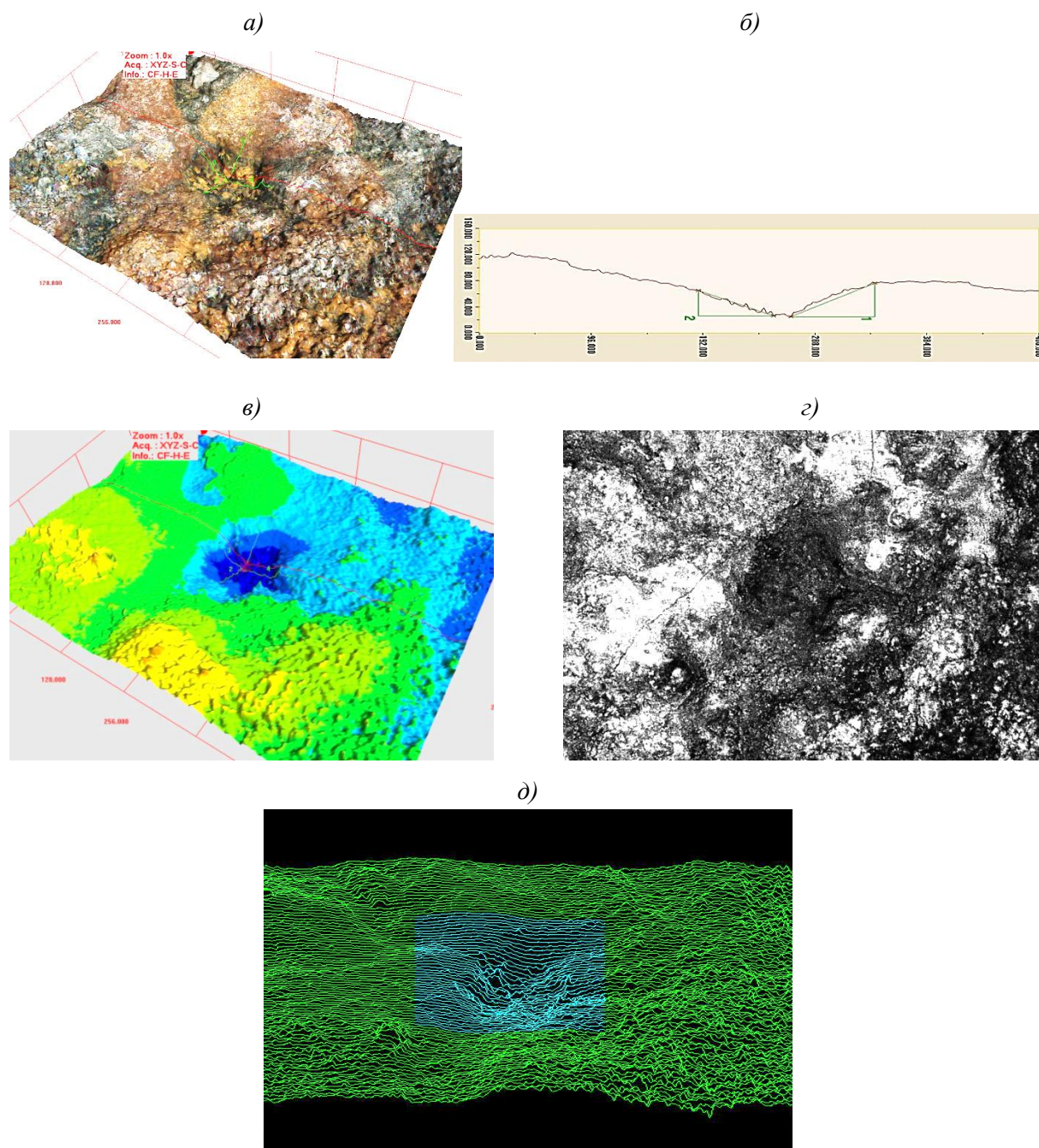


Рис. 3. Поверхность обоймы из стали типа 30X3MФ ($\times 200$):

a – 3D-изображение в натуральных цветах; *б* – профиль поверхности с измеренной глубиной коррозионного поражения; *в* – 3D-изображение поверхности в топографическом режиме; *г* – 2D-снимок поверхности в режиме лазерного сканирования; *д* – изображение профиля поверхности с отмеченным голубым цветом участком поверхности, на котором измеряли шероховатость

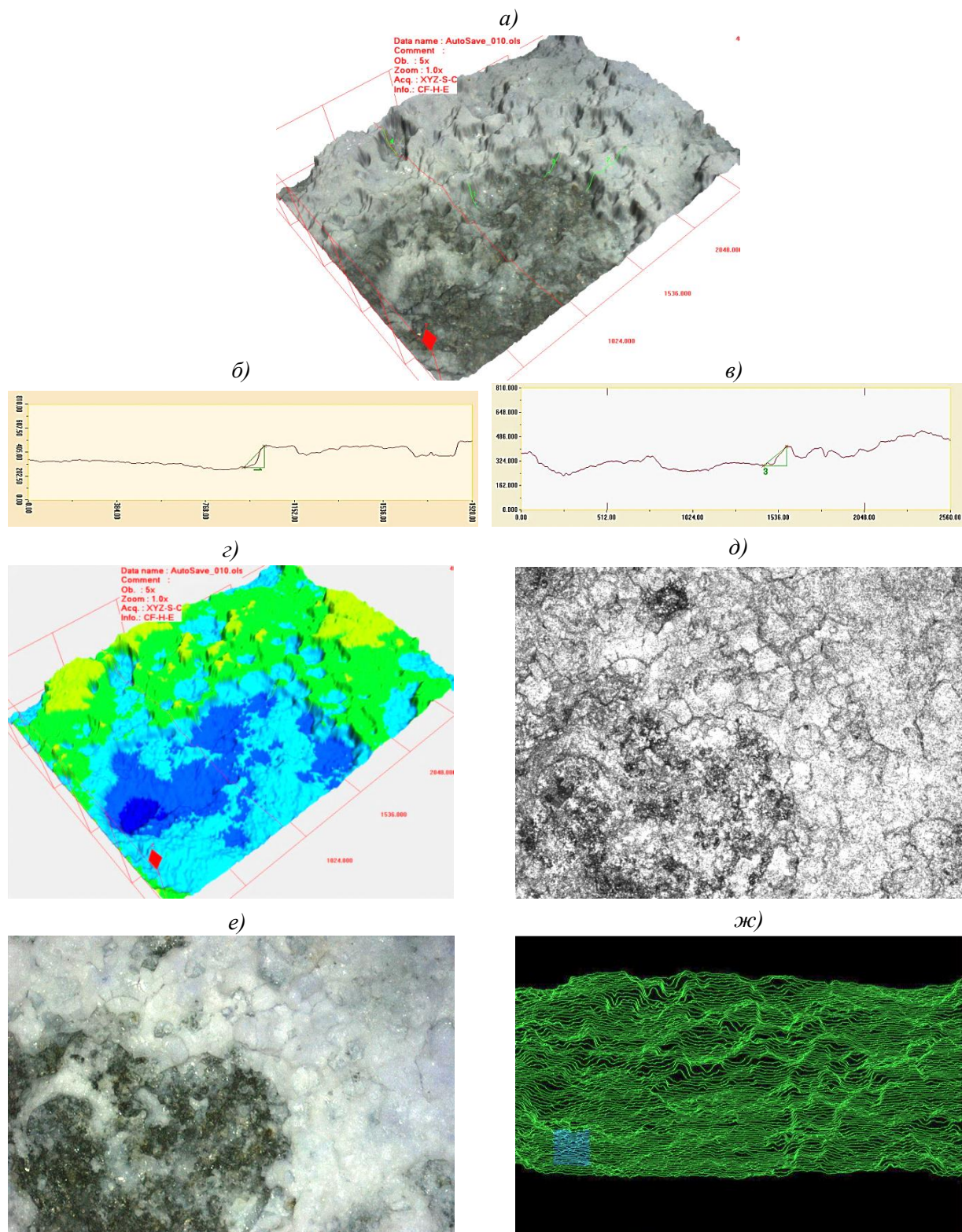


Рис. 4. Поверхность посадочного места из сплава АК7ч. под втулку из бронзы ($\times 50$):
 а – 3D-изображение в натуральных цветах; б, в – профили поверхности с измеренной толщиной солевых отложений; г – 3D-изображение поверхности в топографическом режиме; д – 2D-снимок поверхности в режиме лазерного сканирования; е – 2D-снимок поверхности в ре-

жиме оптического микроскопа с переменным фокусом; *жс* – изображение профиля поверхности с отмеченным голубым цветом участком поверхности, на котором измеряли шероховатость

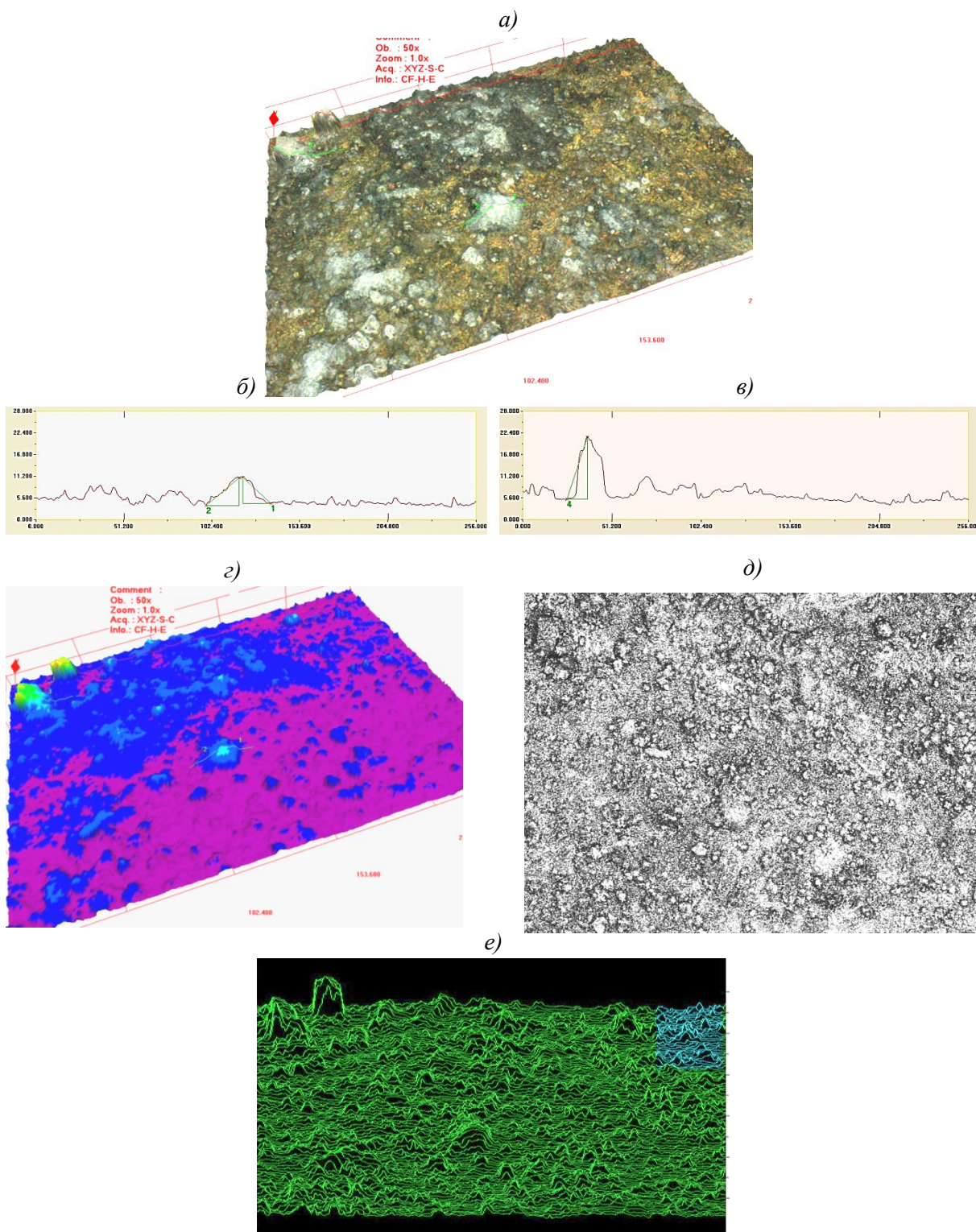


Рис. 5. Наружная поверхность втулки из бронзы БрАЖН-10 ($\times 500$):
a – 3D-изображение в натуральных цветах; *б*, *в* – профили поверхности с измеренной толщиной солевых отложений; *г* – 3D-изображение поверхности в топографическом режиме; *д* – 2D-снимок поверхности в режиме лазерного сканирования; *е* – изображение профиля поверх-

ности с отмеченным голубым цветом участком поверхности, на котором измеряли шероховатость

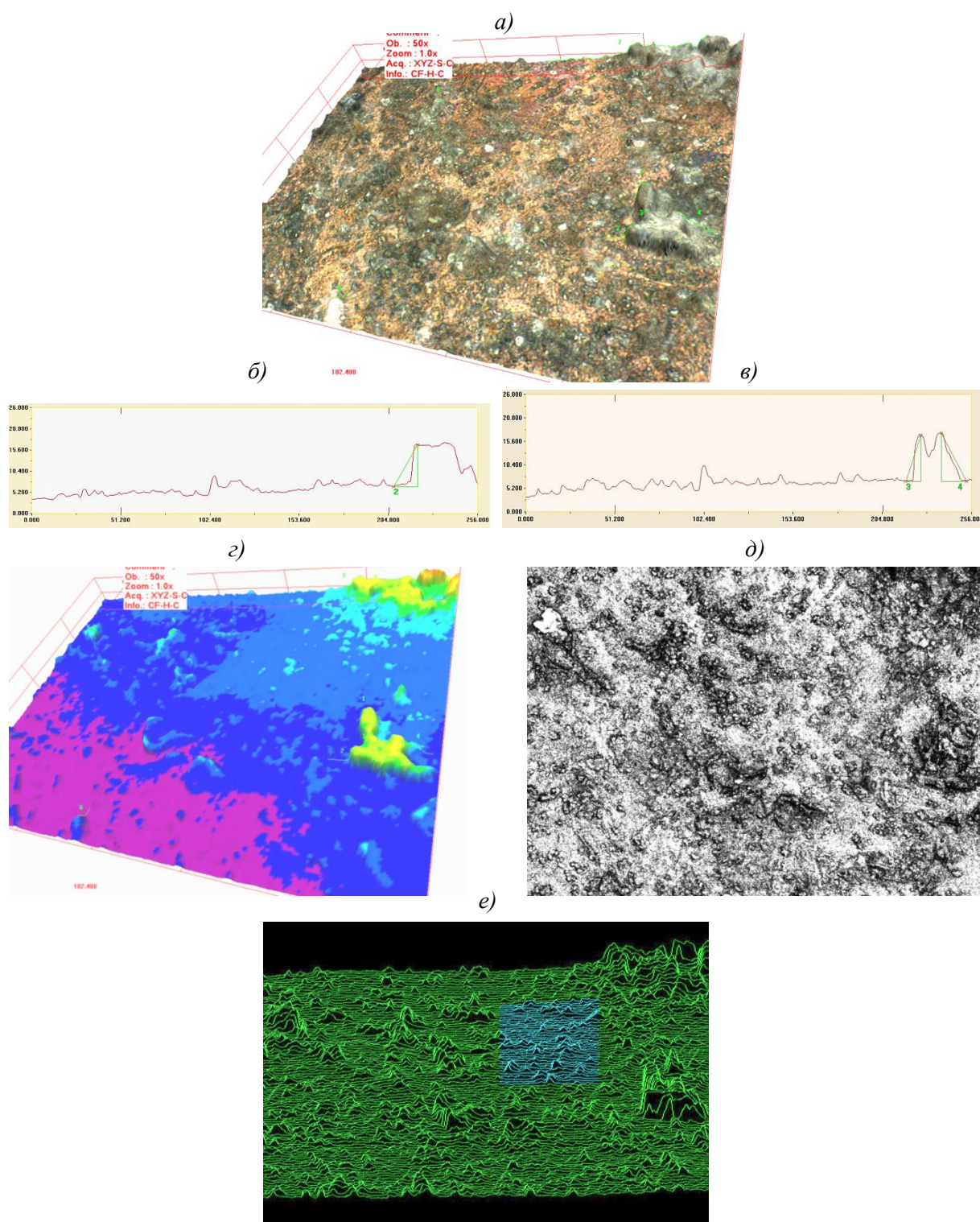


Рис. 6. Поверхность контакта нижней поверхности втулки из бронзы БрАЖН-10 с корпусом маслонасоса из сплава АК7ч. ($\times 500$):

a – 3D-изображение в натуральных цветах; *b*, *в* – профили поверхности с измеренной толщиной солевых отложений; *г* – 3D-изображение поверхности в топографическом режиме; *д* – 2D-снимок поверхности в режиме лазерного сканирования; *e* – изображение профиля поверхности с отмеченным голубым цветом участком поверхности, на котором измеряли шероховатость

В таблице приведены параметры шероховатости, измеренные на фиксированной площади поверхности изучаемой зоны.

Шероховатость поверхностей деталей по ГОСТ 2789–73

Материал	Условный номер зоны (см. рис. 1)	Увеличение	Площадь кадра, на которой измеряли шероховатость, мм ²	Шероховатость R_a , мкм
Сталь типа 30Х3МФ	1	×100	1,3	6,94
	2	×200	0,31	10,77
Сплав АК7ч. Бронза БрАЖН-10	3	×50	0,5	8,60
	4	×500	0,05	0,62
	5	×500	0,05	0,50

Поскольку измерение шероховатости возможно как на всей площади кадра, так и на отдельном, выбранном исследователем участке поверхности, результаты измерения шероховатости зависят от места измерения и площади, на которой ее измеряли. Чем больше площадь поверхности кадра, тем больше вероятности попадания в кадр объектов большой глубины или высоты, поэтому при малых увеличениях шероховатость, как правило, имеет бóльшие значения, чем при больших увеличениях.

Для съемки при больших увеличениях, как правило, выбирают места с более ровной поверхностью, поэтому шероховатость имеет значительно меньшие значения.

Исследования корпуса маслососа, сегмент которого представлен на рис.1, показали, что на боковой поверхности корпуса продукты коррозии практически отсутствуют. Коррозионные повреждения и продукты коррозии сконцентрированы на фланце корпуса в местах контакта с бронзовыми втулками. Обнаруженные продукты коррозии, по данным рентгеноспектрального микроанализа, представляют собой в основном оксиды алюминия, соли меди с солями кальция, натрия и калия [20–25].

После демонтажа агрегата и удаления стальной обоймы на поверхности корпуса маслососа, контактировавшей со стальной обоймой, обнаружены продукты коррозии алюминия в виде белого налета и бурые продукты коррозии от стальной обоймы.

На внешней поверхности обоймы из стали типа 30Х3МФ отмечено наличие общей коррозии. Продукты коррозии на поверхности обоймы содержат соединения железа, никеля, натрия, кальция и калия [26–29].

Наименьшие коррозионные повреждения в результате экспонирования в условиях ГЦКИ ВИАМ получила втулка из бронзы БрАЖН-10 (см. таблицу, рис. 5 и 6).

Заключение

Применение метода КЛСМ позволяет:

- проводить комплексное исследование коррозионных повреждений широкого спектра конструкционных материалов с помощью данных о глубине питтинговой коррозии, величине локальной и интегральной шероховатости пораженных поверхностей;
- получать 3D-модели поврежденной поверхности материалов с распределением цветовой гаммы продуктов коррозии, видимой в оптическом диапазоне света.

В результате исследований агрегатов ГТД после пяти лет экспозиции на открытой площадке в условиях ГЦКИ ВИАМ методом КЛСМ установлено:

- на поверхности корпусов агрегатов, изготовленных из литейного алюминиевого сплава АК7ч., имеются продукты коррозии в виде белых рыхлых отложений и очаги локальной коррозии;
- наибольшему воздействию коррозии подвержены обоймы из стали типа 30Х3МФ;
- наименьшее повреждение получила втулка из бронзы БрАЖН-10.

Исследована структура и определена шероховатость поверхности различных деталей исследуемых агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
4. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 387–393.
5. Морозова Л.В., Исходжанова И.В. Исследование закономерностей изменения рельефа поверхности образцов из алюминийлитиевых сплавов методом лазерной микроскопии //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 08 (viam-works.ru).
6. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминийлитиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
7. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 183–195.
8. Orlov M.R. High-Temperature Corrosive Damage to Superalloys during Operation of Blades of Gas-Turbines and Power Plans //Polymer science. D. 2013. V. 6. №3. P. 250–255.

9. Абраимов Н.В., Орлов М.Р., Шкретов Ю.П. Некоторые аспекты высокотемпературного окисления сплава на основе γ' -Ni₃Al //Коррозия: материалы, защита. 2010. №8. С. 1–11.
10. 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. №SP2. С. 5–12.
11. Орлов М.Р., Якимова М.С. Замедленное разрушение монокристаллических лопаток из жаропрочного сплава ЖС26-ВИ в процессе эксплуатации ГТУ //Газотурбинные технологии. 2011. №8. С. 10–15.
12. Исходжанова И.В. Применение конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для решения материаловедческих задач /В сб. материалов VII Евразийской науч.-практич. конф. «Прочность неоднородных структур». М.: МИСиС. 2014. С. 138.
13. 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. Ст. 06 (viam-works.ru).
14. Клевцов Г.В., Мерсон Е.Д. О возможности использования конфокального лазерного сканирующего микроскопа для исследования микрорельефа поверхности разрушения металлических материалов //Фундаментальные исследования. 2012. №11. С. 1185–1189.
15. Novis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science //Journal of Microscopy. 2010. V. 240. №3. P. 173–180.
16. Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов. М.: Техносфера. 2007. 376 с.
17. 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.
18. Эванс Ю.Р. Коррозия, пассивность и защита металлов. М.: Государственное науч.-технич. изд-во лит. по черной и цветной металлургии. 1941. 886 с.
19. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Карачевцев Ф.Н. Обеспечение качества поверхности рабочих лопаток турбины при нанесении защитных диффузионных покрытий //Металлург. 2013. №2. С. 77–84.
20. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И. Подготовка поверхности лопаток турбины для неразрушающего контроля методом капиллярной дефектоскопии //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. №8. С. 52–60.
21. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия. 1976. 472 с.
22. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия. 1981. 216 с.

23. Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас: Справ. изд. М.: Металлургия. 1989. 400 с.
24. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит. 2002. 336 с.
25. Environmental and Industrial Corrosion – Practical and Theoretical Aspects /Ed. B.V. Salas, M. Schorr. In Tech. 2012. 168 p.
26. Реформатская И.И., Родионова И.Г., Бейлин Ю.А. и др. Роль неметаллических включений и микроструктуры в процессе локальной коррозии углеродистых и низколегированных сталей //Защита металлов. 2004. Т. 40. №5. С. 498–503.
27. Филиппов Г.А., Родионова И.Г., Бакланова О.Н. Коррозионная стойкость стальных трубопроводов //Технология металлов. 2004. №2. С. 24–27.
28. Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Филиппов Г.А. и др. Роль неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов и других видов металлопродукции и оборудования из углеродистых и низколегированных сталей. М.: Metallurgizdat. 2005. С. 7–14.
29. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 11 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
4. Orlov M.R. Strategicheskie napravlenija razvitija Ispytatel'nogo centra FGUP «VIAM» [Strategic directions of development of the Test center VIAM Federal State Unitary Enterprise] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 387–393.
5. Morozova L.V., Ishodzhanova I.V. Issledovanie zakonomernostej izmenenija rel'efa poverhnosti obrazcov iz aljuminijlitievyh splavov metodom lazernoj mikroskopii [Research of patterns of change of relief of surface of samples from alyuminiylitievyy alloys method of laser microscopy] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 08 (viam-works.ru).
6. Fridljander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I., Koval' Ju.N. Aljuminij-litievye splavy. Struktura i svojstva [Aluminum - lithium alloys. Structure and properties]. K.: Naukova dumka. 1992.
7. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitievyh splavov i mnogostupenchatyh rezhimov termicheskoj obrabotki [Development of alyuminiylitievyy alloys and multistage modes of thermal processing] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.

8. Orlov M.R. High-Temperature Corrosive Damage to Superalloys during Operation of Blades of Gas-Turbines and Power Plans //Polymer science. D. 2013. V. 6. №3. P. 250–255.
9. Abraimov N.V., Orlov M.R., Shkretov Ju.P. Nekotorye aspekty vysokotemperaturnogo okis-lenija splava na osnove γ' -Ni₃Al [Some aspects of high-temperature oxidation of alloy on basis γ' -Ni₃Al] //Korrozija: materialy, zashhita. 2010. №8. S. 1–11.
10. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Gromov V.I. Zamedlennoe razrushenie stali 38HN3MA v processe dlitel'noj jekspluatacii [Steel 38XH3MA delayed fracture in the course of long operation] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 5–12.
11. Orlov M.R., Jakimova M.S. Zamedlennoe razrushenie monokristallicheskih lopatok iz zharo-prochnogo splava ZhS26-VI v processe jekspluatacii GTU [Delayed fracture of single-crystal blades from ZhS26-VI hot strength alloy in use GTU] //Gazoturbinnye tehnologii. 2011. №8. S. 10–15.
12. Ishodzhanova I.V. Primenenie konfokal'noj lazernoj skanirujushhej mikroskopii dlja reshenija materialovedcheskih zadach [Application of konfokalny laser scanning microscopy for the solution of materialovedchesky tasks] /V sb. materialov VII Evrazijskoj nauch.-praktich. konf. «Prochnost' neodnorodnyh struktur». M.: MISiS. 2014. S. 138.
13. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovanija strukturno-fazovogo sostojanija materialov [Application of methods of analytical microscopy and the rentgenostrukturny analysis for research of structural and phase condition of materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06 (viam-works.ru).
14. Klevcov G.V., Merson E.D. O vozmozhnosti ispol'zovanija konfokal'nogo lazernogo skanirujushhego mikroskopa dlja issledovanija mikrorel'efa poverhnosti razrushenija metallicheskih materialov [About possibility of use of konfokalny laser scanning microscope for research of microrelief of surface of destruction of metal materials] //Fundamental'nye issledovanija. 2012. №11. S. 1185–1189.
15. Hovis D.B., Heuer A.H. The use of laser scanning confocal microscopy (LSCM) in materials science //Journal of Microscopy. 2010. V. 240. №3. P. 173–180.
16. Klark Je.R., Jeberhardt K.N. Mikroskopicheskie metody issledovanija materialov [Microscopic methods of research of materials]. M.: Tehnosfera. 2007. 376 s.
17. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Morozova L.V. Issledovanie ustalostnogo razrushenija konicheskikh shesteren reduktora central'nogo privoda gazoturbinnogo dvigatelja, izgotovlennyh iz stali 20H3MVF [Research of fatigue failure of conic gear wheels of reducer of the central drive of the gas turbine engine, made of steel 20X3MBΦ] //Deformacija i razrushenie materialov. 2014. №7. S. 18–26.
18. Jevans Ju.R. Korrozija, passivnost' i zashhita metallov [Corrosion, passivity and protection of metals]. M.: Gosudarstvennoe nauch.-tehnič. izd-vo lit. po chernoj i cvetnoj metallurgii. 1941. 886 s.

19. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Karachevcev F.N. Obespechenie kachestva poverhnosti rabochih lopatok turbiny pri nanesenii zashhitnyh diffuzionnyh pokrytij [Providing surface quality of working turbine blades when drawing protective diffusion coatings] //Metallurg. 2013. №2. S. 77–84.
20. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Rassohina L.I. Podgotovka poverhnosti lopatok turbiny dlja ne-razrushajushhego kontrolja metodom kapilljarnoj defektoskopii [Surface preparation of turbine blades for non-destructive testing by method of capillary defektoskopiya] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2013. №8. S. 52–60.
21. Zhuk N.P. Kurs teorii korrozii i zashhity metallov [Course of the theory of corrosion and protection of metals]. M.: Metallurgija. 1976. 472 s.
22. Shluger M.A., Azhogin F.F., Efimov E.A. Korrozija i zashhita metallov [Corrosion and protection of metals]. M.: Metallurgija. 1981. 216 s.
23. Sokol I.Ja., Ul'janin E.A., Fel'dgandler Je.G. i dr. Struktura i korrozija metallov i splavov. Atlas [Structure and corrosion of metals and alloys. Atlas]: Sprav. izd. M.: Metallurgija. 1989. 400 s.
24. Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V. Korrozija i zashhita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection]. M.: Fizmatlit. 2002. 336 s.
25. Environmental and Industrial Corrosion – Practical and Theoretical Aspects /Ed. B.V. Salas, M. Schorr. In Tech. 2012. 168 p.
26. Reformatskaja I.I., Rodionova I.G., Bejlin Ju.A. i dr. Rol' nemetallicheskih vkljuchenij i mikrostruktury v processe lokal'noj korrozii uglerodistyh i nizkolegirovannyh stalej [Role of non-metallic inclusions and microstructure in the course of local corrosion carbonaceous and low-alloy steels] //Zashhita metallov. 2004. T. 40. №5. S. 498–503.
27. Filippov G.A., Rodionova I.G., Baklanova O.N. Korroziionnaja stojkost' stal'nyh truboprovodov [Corrosion resistance of steel pipelines] //Tehnologija metallov. 2004. №2. S. 24–27.
28. Rodionova I.G., Baklanova O.N., Filippov G.A. i dr. Rol' nemetallicheskih vkljuchenij v uskorenii processov lokal'noj korrozii neftepromyslovyh truboprovodov i drugih vidov metalloprodukcii i oborudovanija iz uglerodistyh i nizkolegirovannyh stalej [Role of non-metallic inclusions in acceleration of processes of local corrosion of oil-field pipelines and other types of steel products and the equipment from carbonaceous and low-alloy steels]. M.: Metallurgizdat. 2005. S. 7–14.
29. Semenychev V.V. Korroziionnaja stojkost' listov splava D16ch.-T v morskikh subtropikah [Corrosion resistance of sheets of alloy Д16ч.-Т in sea subtropics] //Trudy VIAM. 2014. №7. St. 11 (viam-works.ru).