

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-12-43-50>**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА И ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ
КАРДАННОГО ВАЛА ВИНТОВОГО ДВИГАТЕЛЯ**© **Дмитрий Александрович Мовенко, Лариса Владимировна Морозова,
Сергей Викторович Шуртаков**

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Россия, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; e-mail: damovenko@gmail.com

*Статья поступила 25 декабря 2018 г. Поступила после доработки 26 июля 2019 г.
Принята к публикации 23 августа 2019 г.*

Приведены результаты исследований эксплуатационного разрушения высоконагруженно-го карданного вала винтового двигателя из стали 38ХНЗМФА. Они позволили установить причину возникновения разрушений и разработать комплекс рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов. Исследование проводили с применением методов растровой электронной и оптической микроскопии, а также рентгеноспектрально-го микроанализа. Определяли механические свойства, химический состав, микроструктуру и характер разрушения фрагментов карданного вала винтового двигателя. Установлено, что механические свойства и химический состав материала соответствуют требованиям нормативной документации, дефекты металлургического происхождения как в металле вала, так и в изломах отсутствуют. Микроструктура исследованных фрагментов вала представляет собой мартенсит отпуска. Методами фрактографического анализа установлено, что разрушение карданного вала винтового двигателя произошло по статическому механизму. Поверхность изломов покрыта продуктами коррозии. Выявленные трещины развились по механизму коррозионного растрескивания, развитие которого стало возможным вследствие нарушения защитного покрытия на поверхности вала. Проведенные исследования позволили заключить, что разрушение карданного вала винтового двигателя из стали 38ХНЗМФА произошло вследствие образования и развития спиралевидных трещин по механизму коррозионного растрескивания под напряжением при нагрузках ниже предела текучести стали. Причиной разрушения фрагмента вала с образованием «шейки» является достижение предела текучести стали в процессе эксплуатации. В целях исключения образования и развития коррозионных трещин рекомендовано проведение регулярных профилактических осмотров для оценки сохранности защитного покрытия на поверхности валов.

Ключевые слова: эксплуатация; деталь; разрушение; сталь; трещины; фрактография; вал.**STUDY OF THE CHARACTER AND CAUSES OF DESTRUCTION
OF THE CARDAN SHAFT OF THE PROPELLER ENGINE**© **Dmitry A. Movenko, Larisa V. Morozova, Sergey V. Shurtakov**

Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" (FSUE "VIAM"), 17 Radio str., Moscow, 105005, Russia; e-mail: damovenko@gmail.com

Received December 25, 2018. Revised July 26, 2019. Accepted August 23, 2019.

The results of studying operational destruction of a high-loaded cardan shaft of the propeller engine made of steel 38KhN3MFA are presented to elucidate the cause of damage and develop a set of recommendations and measures aimed at elimination of adverse factors. Methods of scanning electron and optical microscopy, as well as X-ray spectral microanalysis are used to determine the mechanical properties, chemical composition, microstructure, and fracture pattern of cardan shaft fragments. It is shown that the mechanical properties and chemical composition of the material correspond to the requirements of the regulatory documentation, defects of metallurgical origin both in the shaft metal and in the fractures are absent. The microstructure of the studied shaft fragments is tempered martensite. Fractographic analysis

revealed that the destruction of cardan shaft occurred by a static mechanism. The fracture surface is coated with corrosion products. The revealed cracks developed by the mechanism of corrosion cracking due to violation of the protective coating on the shaft. The results of the study showed that the destruction of the cardan shaft of a propeller engine made of steel 38Kh3MFA occurred due to formation and development of spiral cracks by the mechanism of stress corrosion cracking under loads below the yield point of steel. The reason for “neck” formation upon destruction of the shaft fragment is attributed to the yield point of steel attained during operation. Regular preventive inspections are recommended to assess the safety of the protective coating on the shaft surface to exclude formation and development of corrosion cracks.

Keywords: operation; destruction; fracture; steel; cracks; fractography; shaft.

Введение

Винтовые двигатели представляют собой сложное техническое оборудование и предназначены для бурения нефтяных и газовых скважин с использованием воды или бурового раствора в качестве промывочной жидкости. Промывочная жидкость, нагнетаемая насосами буровой установки, является коррозионно-активной средой, содержащей хлорид-ионы и нефтепродукты, в связи с чем возникает необходимость в применении коррозионно-стойких сталей и защитных покрытий [1 – 6].

Винтовые двигатели относятся к машинам гидростатического действия и предназначены для работы под землей в неводной среде, в районах с умеренным и холодным климатом. Бурение осуществляют при высоком моменте силы и низкой частоте вращения на выходном валу. Карданный вал — нагруженный элемент шпиндельной секции, предназначенной для восприятия осевых и радиальных нагрузок, действующих на двигатель, он также подвержен влиянию изгибающих нагрузок, вибраций и климатических условий. Для обеспечения работоспособности на поверхность валов наносят защитное покрытие на основе никеля и хрома. Однако в процессе эксплуатации защитное покрытие на валах истирается и не может полностью предотвратить локальную коррозию металла вследствие контакта с промывочной жидкостью. Таким образом, существует множество факторов, которые могут привести к разрушению карданного вала в условиях эксплуатации. Для изготовления ответственных, тяжело нагруженных деталей чаще всего применяют конструкционные легированные стали, способные работать при температурах до 400 °С, такие как высококачественная сталь 38ХНЗМФА [7, 8].

Цель работы — установление причин эксплуатационного разрушения карданного вала винтового двигателя. Исследование случаев эксплуатационных разрушений позволяет не только установить причину их возникновения, но и разработать комплекс рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов, при-

водящих к возникновению аварийных ситуаций [9 – 12].

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].

Материалы и методы

Объект исследования — фрагменты карданного вала винтового двигателя, находившегося в работе 270 ч до разрушения. Вал изготовлен из стали 38ХНЗМФА.

Исследование включало в себя проведение следующих работ:

- визуальный осмотр, фотосъемку фрагментов карданного вала;
- анализ фрагментов карданного вала с использованием оптического анализа;
- определение механических характеристик для оценки их соответствия требованиям конструкторской документации (КД);
- определение химического состава для проверки соответствия марке стали;
- проведение рентгеноспектрального микроанализа;
- проведение фактографического анализа;
- исследование микроструктуры;
- измерение твердости.

Поверхность и изломы вала исследовали с применением оптического микроскопа Olympus.

Образцы для испытаний на растяжение изготавливали в соответствии с ГОСТ 1497–84. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Zwick/Roel Z100 при комнатной температуре. Все образцы разрушены в ходе испытаний.

Ударную вязкость KCU материала валов измеряли на копре маятниковом РН-300-СНУ при комнатной температуре. Все образцы разрушены в ходе испытаний.

Массовые доли углерода и серы определяли с помощью газоанализатора CS-600 в соответ-



Рис. 1. Фрагменты карданного вала

Fig. 1. Cardan shaft fragments

вии с ГОСТ 12344 и ГОСТ 12345, содержания фосфора, молибдена, ванадия, никеля, кремния, марганца, хрома, меди — атомно-эмиссионным методом по ГОСТ Р ИСО 13898-2-2006, ГОСТ Р ИСО 13898-3-2007, ГОСТ Р 51056-97 на спектрометре Varian 730 ES с аксиальным обзором плазмы.

Изломы и локальный элементный состав содержимого трещин исследовали на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA10 с использованием энергодисперсионного спектрометра X-Max.

Исследование микроструктуры, определение размера зерна, оценку неметаллических включений в материале валов выполняли на оптическом микроскопе Leica DM IRM.

Твердость по Бринеллю измеряли на образцах в соответствии с ГОСТ 9012-59 на универсальном твердомере Dura Vision 300.

Результаты и их обсуждение

Разрушение карданного вала произошло с образованием двух фрагментов, локально покрытых продуктами коррозии железа. На поверхности вала наблюдалось отслоение защитного покрытия, разрушение имело смешанный характер. Разрушение фрагмента № 1 произошло с образованием шейки. Излом фрагмента № 2 имел деформированную поверхность с большим содержанием отложений продуктов коррозии (рис. 1).

Для проведения механических испытаний из фрагментов карданного вала по ГОСТ 9454-78 (тип 1) были изготовлены образцы для определения ударной вязкости *KCU*.

Результаты испытаний материала вала на растяжение и ударную вязкость *KCU*, а также измерения твердости по Бринеллю приведены в табл. 1. Из нее следует, что полученные механические свойства материала вала отвечают требованиям конструкторской документации (КД).

Для проведения химического анализа использовали как монолитные образцы с предварительно отшлифованной поверхностью (определение элементного состава), так и металлическую стружку (определение примесей). Полученный химический состав материала вала соответствовал заявленной марке стали согласно ГОСТ 4543-71 (табл. 2).

На механически шлифованных нетравленных образцах оценивали загрязненность стали неметаллическими включениями — сульфидами, силикатами, оксидами точечными и строчечными, нитридами точечными и строчечными. Оценку неметаллических включений проводили методом сравнения с эталонными шкалами при просмотре всей площади нетравленных шлифов, выполненных в продольном направлении, в соответствии с ГОСТ 1778-70, вариант Ш4 (поле зрения при увеличении 100, продольное направление). Исследование нетравленных шлифов показало отсутствие в металле каких-либо металлургических дефектов. Содержание неметаллических включе-

Таблица 1. Механические свойства материала карданного вала

Table 1. Mechanical properties of the cardan shaft material

Сравниваемые данные	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	<i>KCU</i>	<i>HB</i>
Результат испытаний	835	990	18,5	59,5	128,5	305
Требования КД	≥ 780	≥ 930	≥ 13	≥ 45	≥ 70	277 – 341

Таблица 2. Химический состав материала вала

Table 2. Chemical composition of shaft material

Сравниваемые данные	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Cu
Результат анализа	0,33	0,27	0,35	1,32	3,0	0,36	0,12	0,017	0,004	0,14
ГОСТ 4543-71	0,33 – 0,40	0,17 – 0,37	0,25 – 0,50	1,20 – 1,50	3,0 – 3,5	0,35 – 0,45	0,10 – 0,18	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	$\leq 0,3$

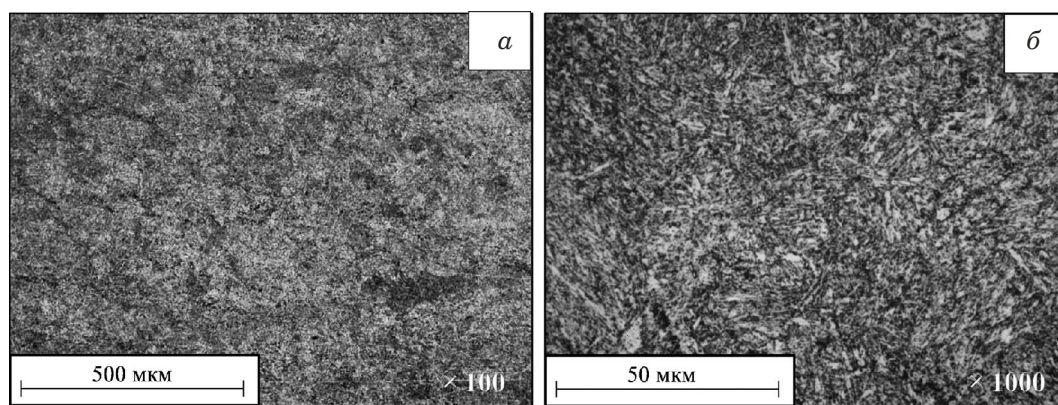


Рис. 2. Микроструктура вала после травления в 3 %-ном спиртовом HNO_3 растворе

Fig. 2. Microstructure of the shaft after etching in an alcohol solution of 3% HNO_3

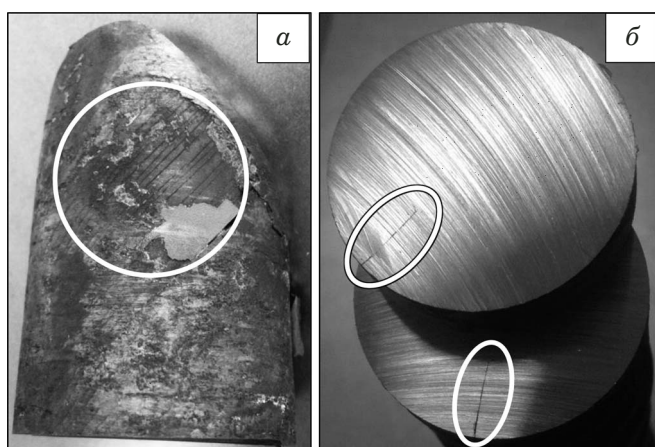


Рис. 3. Трещины в материале карданного вала

Fig. 3. Cracks in the cardan shaft material

ний в них невысокое: оксидов и сульфидов — 1 балл, нитридов — 0,5 балла.

Оценку микроструктуры проводили при увеличениях 100 и 1000 после травления в 3 %-ном спиртовом растворе HNO_3 . Микроструктура стали исследованных фрагментов вала представляла собой мартенсит отпуска (рис. 2). Количе-

ственную характеристику основного элемента микроструктуры (мартенсита) получали сопоставлением с эталонами шкалы № 3 ГОСТ 8233–56 (Сталь. Эталоны микроструктуры) при увеличении 1000. Образцы соответствовали 8-му баллу шкалы (крупноигльчатый мартенсит, наибольшая длина игл — 16 мкм).

При визуальном осмотре на внешней поверхности фрагмента вала № 2 обнаружены многочисленные спиралевидные трещины, ориентированные под углом 45° к оси симметрии вала (рис. 3, а). Рассмотрение поперечного разреза (рис. 3, б) позволило установить, что глубина распространения трещин в направлении оси вала достигает 1,5 см.

Для определения природы возникновения трещин и выявления макроструктуры проведено травление продольных шлифов вала в водном растворе азотной кислоты. В результате травления выявлены линии горячей деформации, демонстрирующие направление прокатки и ориентированные вдоль оси симметрии вала (рис. 4). Установлено, что направление линий горячей деформации и обнаруженных трещин не совпадает.

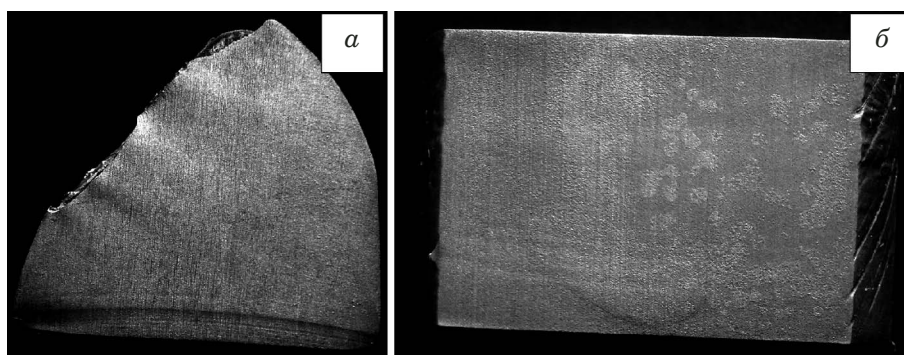


Рис. 4. Макроструктура фрагментов вала после травления в водном растворе азотной кислоты

Fig. 4. Macrostructure of shaft fragments after etching in an aqueous solution of nitric acid

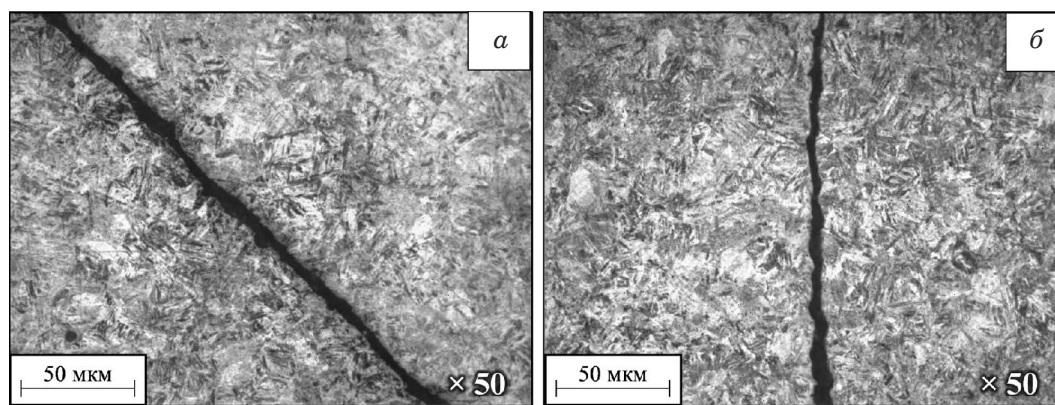


Рис. 5. Вид трещин в продольном (а) и поперечном (б) сечениях вала после травления в 3 %-ном спиртовом растворе HNO_3

Fig. 5. Cracks in the longitudinal (a) and cross (b) sections of the shaft after etching in an alcohol solution of 3% HNO_3

Далее исследовали микроструктуру материала вала в зоне поверхности с трещинами (рис. 5). В результате травления следы пластической деформации не обнаружены. Это свидетельствует об отсутствии пластической зоны в вершине трещины при ее развитии по механизмам статического (нормальный отрыв или пластический сдвиг) и усталостного разрушения. Таким образом, пластическая деформация не могла быть причиной образования трещин в карданном

вале. Трещины имели строение, характерное для замедленного разрушения стали в коррозионно-активной среде (механизм коррозионного растрескивания). Коррозионное растрескивание стали под напряжением сопровождается развитием межкристаллитных и транскристаллитных трещин. На рис. 6, а, б приведены изображения трещин в поперечном сечении вала, полученные на растровом электронном микроскопе в режиме вторичных электронов. Вид трещин характерен

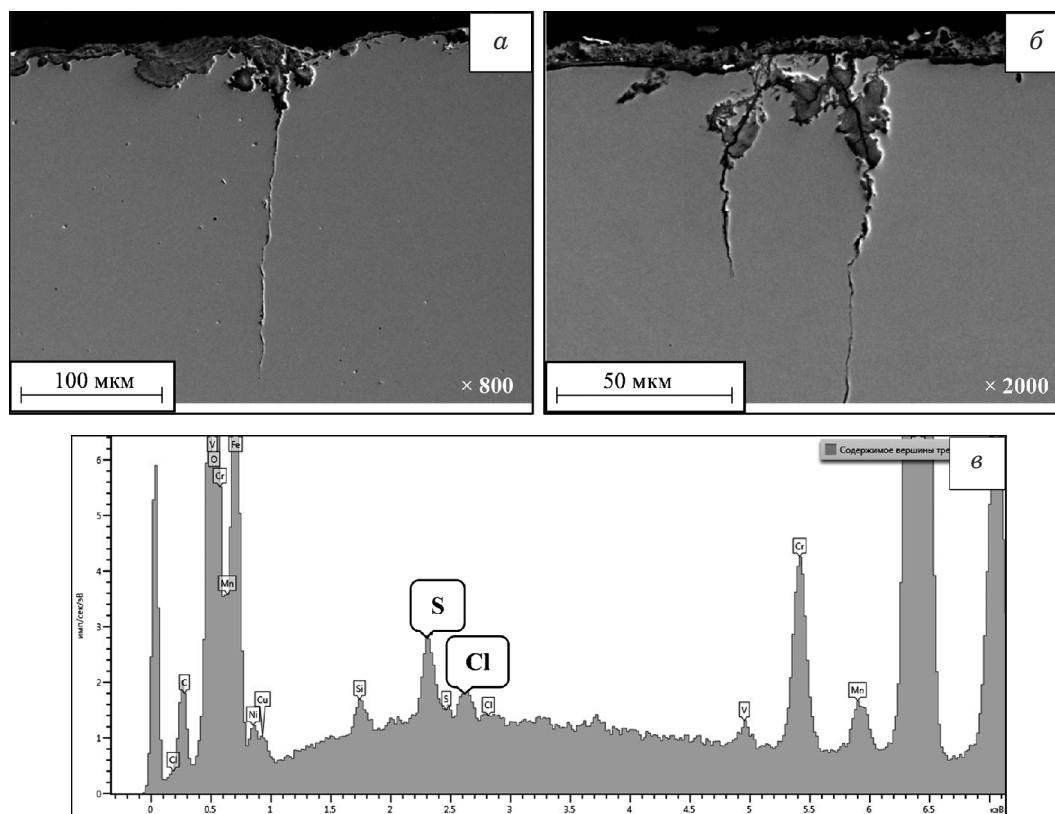


Рис. 6. Вид коррозионных трещин в поперечном сечении карданного вала (а, б) и спектр характеристического рентгеновского излучения, снятый в вершине трещины (в)

Fig. 6. Corrosion cracks in the cross section of the cardan shaft (a, b); characteristic x-ray spectrum taken at the crack tip (c)

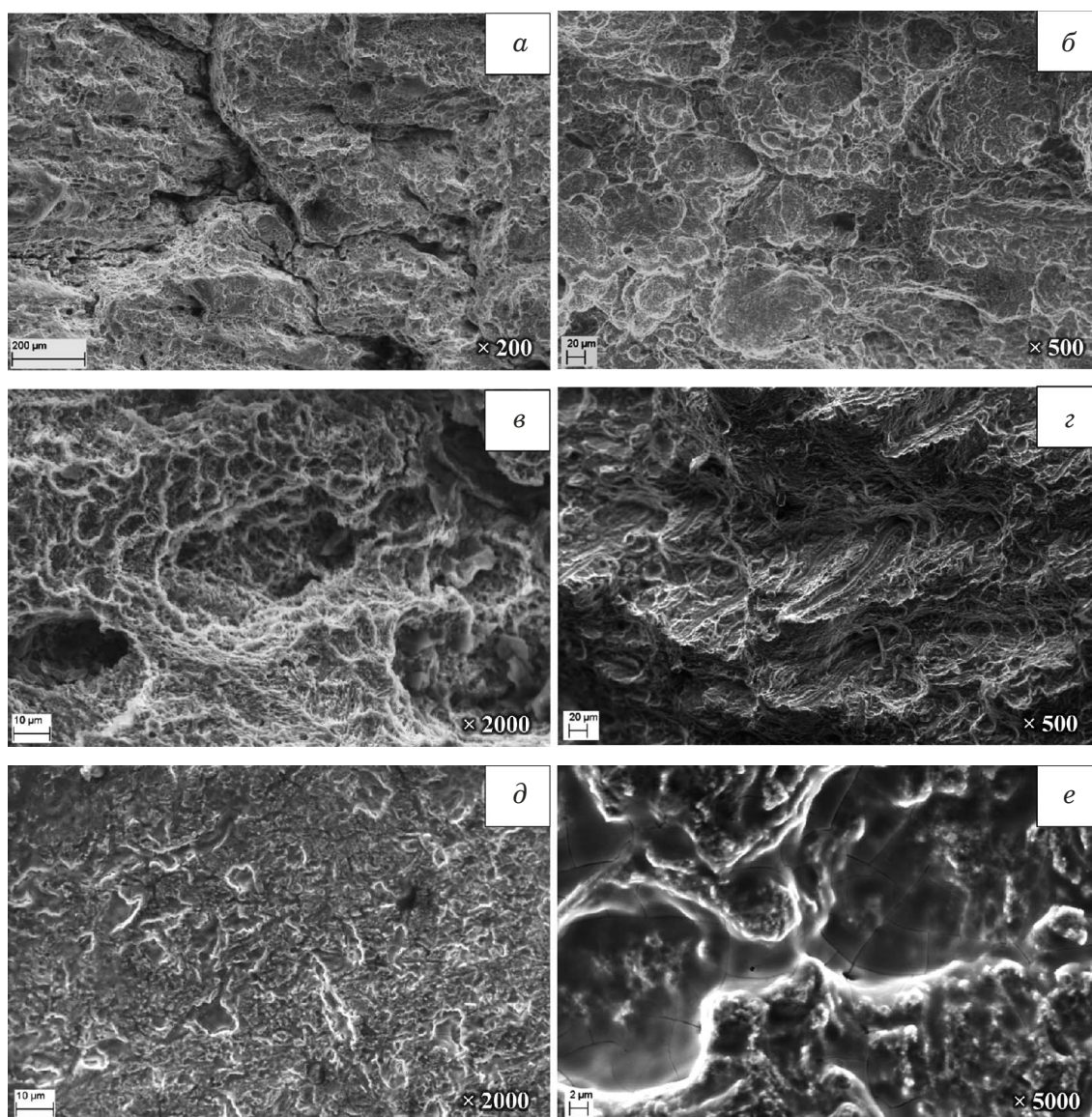


Рис. 7. Поверхность излома фрагмента № 2 (а – в) и поверхность вскрытой трещины (г – е)

Fig. 7. Fracture surface of fragment N 2 (a – c) and the surface of an open crack (d – f)

для механизма коррозионного разрушения вала при нагрузках ниже предела текучести стали.

На рис. 6, в представлен один из спектров характеристического рентгеновского излучения, полученных на участках в вершинах трещин. Видно, что содержимое трещины представляет собой продукты коррозии металла вала. На это указывают пики серы и хлора — коррозионно-активных химических элементов.

Механизм образования таких трещин можно объяснить следующим образом. В результате действия крутящего момента на вал возникает главное нормальное напряжение, ориентированное под углом 45° к образующей цилиндрической поверхности вала. В этих условиях образуются и раскрываются трещины, направленные перпендикулярно нормальным действующим нагруз-

кам, т.е. под углом 45° к образующей цилиндрической поверхности вала.

По результатам фрактографического анализа установлено, что отслоение защитного вольфрамового и никель-хромового покрытия карданного вала привело к образованию локальной коррозии на его поверхности и развитию коррозионных трещин.

Разрушение носит статический характер. Наиболее вероятной причиной образования «шейки» на фрагменте № 1 вала является достижение предела текучести стали 38ХНЗМФА, соответствующего 835 МПа (см. табл. 1).

На рис. 7 приведены изображения поверхности излома фрагмента № 2 карданного вала и поверхности вскрытой трещины. Видно, что ме-

талл вала был подвержен активному воздействию агрессивной коррозионной среды.

Заключение

В ходе проведенных комплексных исследований разрушенных валов из стали 38ХНЗМФА получены следующие результаты.

1. Химический состав материала вала, а также механические свойства и уровень твердости карданного вала винтового двигателя соответствовали требованиям нормативной документации к стали 38ХНЗМФА.

2. Дефекты металлургического происхождения в материале вала и на поверхности изломов отсутствовали.

3. Микроструктура исследованных фрагментов вала представляла собой мартенсит отпуска.

4. Разрушение карданного вала винтового двигателя происходило по статическому механизму. Поверхности изломов были покрыты продуктами коррозии. Выявленные трещины развивались по механизму коррозионного растрескивания.

5. Методами фрактографического анализа и рентгеноспектрального микроанализа установлено, что разрушение карданного вала винтового двигателя из стали 38ХНЗМФА произошло вследствие образования и развития спиралевидных трещин по механизму коррозионного растрескивания под напряжением при нагрузках ниже предела текучести стали. Причиной разрушения фрагмента вала с образованием «шейки» явилось достижение предела текучести стали в процессе эксплуатации.

В целях исключения образования и развития коррозионных трещин рекомендовано проведение регулярных профилактических осмотров для оценки сохранности защитного покрытия на поверхности валов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стеклов О. И. Стойкость материалов и конструкций с коррозией под напряжением. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
2. Миронов А. В., Лисин И. В. Коррозионное растрескивание под напряжением / Технология металлов. 2007. № 6. С. 53 – 54.
3. Белоус В. Я., Варламова В. Е., Жиликов В. П. Стойкость к коррозионному растрескиванию мартенситных сталей ЭИ692-Ш и ЭП609-Ш в различных климатических условиях / Коррозия: материалы, защита. 2014. № 7. С. 13 – 19.
4. Белоус В. Я., Гурвич Л. Я., Жирнов А. Д., Кафельников В. В., Лащевский В. Б., Речменская А. Г., Усанкова Л. А., Шубадеева Л. И. Коррозионное растрескивание высокопрочных нержавеющей сталей и его диагностирование / Защита металлов. 1997. Т. 33. № 1. С. 43 – 51.
5. Гневко А., Лазарев Д., Сидоров И., Соловов С. Способ экспресс-оценки склонности к замедленному разрушению и коррозионному растрескиванию металлических конструктивных материалов / ТехНадзор. 2016. № 2(111). С. 104 – 105.

6. Доан Ван Тинь, Мамонтов В. А. Оценка работоспособности судовых валов с трещинами / Вестник АГТУ. 2008. № 2(43). С. 145 – 148.
7. Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520 – 530.
8. Каблов Е. Н. Материалы для авиакосмической техники / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7 – 27.
9. Каблов Е. Н. Авиакосмическое материаловедение / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2 – 14.
10. Фрактография: средство диагностики разрушенных деталей / Под ред. М. А. Балтер. — М.: Машиностроение, 1987. — 160 с.
11. 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.
12. 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).
13. Бронфин М. Б., Алексеев А. А., Чабина Е. Б. Металлофизические исследования. Возможности и перспективы / 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды. Юбилейный научно-технический сборник. — Москва: ВИАМ, 2007. С. 353 – 365.
14. Быщенко 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. № 5. С. 498 – 515.
15. 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.

REFERENCES

1. Steklov O. I. Firmness of materials and designs with corrosion energized. — Moscow: Mashinostroenie. 1990. — 384 p. [in Russian].
2. Mironov A. V., Lisin I. V. Stress corrosion cracking / Tekhnol. Metal. 2007. N 6. P. 53 – 54 [in Russian].
3. Belous V. Ya., Varlamova V. E., Zhilikov V. P. Resistance to corrosion cracking of martensitic staly EI692-Sh and EP609-Sh in different weather conditions / Korroz. Mater. Zashch. 2014. N 7. P. 13 – 19 [in Russian].
4. Belous V. Ya., Gurvich L. Y., Zhirnov A. D., Kafelnikov V. V., Lashevskiy V. B., Rechmenskaya A. G., Usankova L. A., Shubadeeva L. I. Corrosion cracking of high-strength stainless steels and its diagnosing / Zashch. Metal. 1997. Vol. 33. N 1. P. 43 – 51 [in Russian].
5. Gnevko A., Lazarev D., Sidorov I., Solovov S. Way of express assessment of tendency to delayed fracture and corrosion cracking of metal constructional materials / TehNadzor. 2016. N 2(111). P. 104 – 105 [in Russian].
6. Doan Van Tin, Mamontov V. A. Assessment of operability of ship shaft with cracks / Vestn. AGTU. 2008. N 2(43). P. 145 – 148 [in Russian].
7. Kablov E. N. Materials and chemical technologies for aviation engineering / Vestn. RAN. 2012. Vol. 82. N 6. P. 520 – 530 [in Russian].
8. Kablov E. N. Materials for aerospace equipment / All materials. Encyclopedic directory. 2007. N 5. P. 7 – 27 [in Russian].
9. Kablov E. N. Aerospace materials science / All materials. Encyclopedic directory. 2008. N 3. P. 2 – 14 [in Russian].

10. Fraktography: means of diagnostics of the destroyed details / M. A. Balter (ed.). — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 160 p. [in Russian].
11. **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].
12. **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 / *Tr. VIAM.* 2013. N 5. P. 6. <http://www.viam-works.ru>. Accessed June 6, 2016 [in Russian].
13. **Bronfin M. B., Alekseev A. A., Chabina E. B.** Metalphysical researches. Opportunities and perspectives / *Aviation materials. 75 years. Selected Works. Anniversary scientific and technical collection.* — Moscow: VIAM, 2007. P. 353 – 365 [in Russian].
14. **Byitsenko O. A., Grigorenko V. B., Lukina E. A., Morozova L. V.** Development of methods of metalphysical researches: methodological questions and practical importance / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2017. N S. P. 498 – 515 [in Russian].
15. **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].