

---

Научная статья

УДК 669.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-15-22

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОТЕРИ УПРУГИХ СВОЙСТВ МЕМБРАНЫ ИЗ СТАЛИ 30X13

Л.В. Морозова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование мембраны из коррозионностойкой жаропрочной стали 30X13 с целью выявления причин потери упругих свойств. Методами оптической и электронной микроскопии, химического анализа и неразрушающего контроля оценена структура, изучены химический состав, строение поверхности и излома детали. Установлено, что в процессе производства мембрана подвергалась высокотемпературному нагреву, вызывающему рост зерна (нормализации), а также длительной электрополировке, приводящей к выявлению границ зерен и развитию коррозионных процессов.

**Ключевые слова:** фрактография, трещина, сталь, коррозия, мембрана, разрушение

**Для цитирования:** Морозова Л.В. Исследование причин потери упругих свойств мембраны из стали 30X13 // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-15-22.

Scientific article

## INVESTIGATION OF THE CAUSES OF LOSS OF ELASTIC PROPERTIES OF a 30H13 STEEL MEMBRANE

L.V. Morozova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** A comprehensive study of a membrane made of corrosion-resistant heat-resistant steel 30H13 was carried out in order to identify the causes of loss of elastic properties. The structure was evaluated, the chemical composition, the structure of the surface and the fracture of the part were studied using optical and electron microscopy, chemical analysis and non-destructive testing. It was found that during the production process, the membrane was subjected to high-temperature heating, causing grain growth (normalization), as well as prolonged electropolishing, leading to the identification of grain boundaries and the development of corrosion processes.

**Keywords:** fractography, crack, steel, corrosion, membrane, damage

**For citation:** Morozova L.V. Investigation of the causes of loss of elastic properties of a 30H13 steel membrane. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-15-22.

### Введение

Коррозионностойкая жаропрочная сталь мартенситного класса 30X13 (хроми-стая) является среднеуглеродистой и высоколегированной, широко применяется при изготовлении изделий, рассчитанных на эксплуатацию в слабоагрессивных средах в

течение длительного времени при повышенной температуре (до 450 °С). Из нее изготавливают режущий инструмент, мембраны, пружины, штоки, детали компрессоров и различных аппаратов. Изделия, изготовленные из стали 30X13, характеризуются высоким уровнем сопротивления к образованию коррозионных отложений, повышенной жаропрочностью, жаростойкостью и твердостью. Жаропрочность выражена в том, что поверхность конструкций и деталей из этой стали не теряет первоначальных характеристик при повышении температуры и не подвержена образованию окалины. Изделия из нее переносят нагрев до 600–650 °С, а также выдержку в течение ~2 ч в морской воде при температуре 100 °С без выраженного снижения свойств, не деформируются, проявляют устойчивость к приложенным ударным нагрузкам, после закалки приобретают повышенное сопротивление к воздействию агрессивных сред. От режимов термообработки данной стали зависят и ее прочностные характеристики. Закалка позволяет повысить предел прочности стали и ее твердость, но приводит к снижению вязкости материала. При работе в условиях знакопеременных нагрузок это может привести к формированию усталостного разрушения, когда на поверхности изделия образуются трещины, развивающиеся вглубь материала. Как правило, заготовки из стали 30X13 подвергают горячему пластическому деформированию при температурах 850–1100 °С. В связи со склонностью стали к растрескиванию при высоких скоростях нагрева и охлаждения, рекомендуется при нагреве стали в процессе горячего деформирования до температуры 830 °С проводить операцию с низкой скоростью, а после проведения деформации применять медленное охлаждение вместе с печью либо охлаждение в песке. После горячего деформирования проводят смягчающую термообработку, которая включает в себя промежуточный отжиг при температурах 740–800 °С либо полный отжиг при 810–880 °С, а также медленное охлаждение до температуры 600 °С. Завершающая термообработка включает в себя закалку при температурах 950–1050 °С с охлаждением в масле или на воздухе и отпуск до получения необходимой коррозионной стойкости и твердости [1]. Для повышения упругости и снижения вероятности коробления стали 30X13, из которой будут изготовлены пружины, мембраны, мерительные и хирургические инструменты, закалку проводят при температурах не более 1020–1040 °С с последующим охлаждением в щелочи при 350 °С. Данную сталь целесообразно использовать в производстве после проведения закалки и отпуска, а также шлифовки и полировки поверхности деталей [2, 3].

В настоящее время широко применяются различные типы чувствительных элементов. Наиболее часто встречаются мембранные, поршневые, сильфонные, пьезорезистивные и тонкопленочные элементы. Свои недостатки и достоинства имеются у каждого типа, в связи с чем подбирают тип чувствительного элемента датчика в зависимости от конкретной технологической задачи. Чувствительные элементы датчиков давления, как правило, представляют собой жестко закрепленные по периметру диски или пластины различной конфигурации. Чаще всего из соображений экономии в технологических системах применяются датчики мембранного типа. Мембранные разделители сред защищают датчики давления, манометры и другие приборы от контакта со средами, в которых присутствуют взвешенные частицы, либо от контакта с агрессивными измеряемыми средами. Передача давления к измерительному прибору осуществляется через нейтральную жидкость и разделительную мембрану. Мембрана представляет собой тонколистовую деталь, обладающую упругими свойствами, и является чувствительным элементом. С помощью мембран измеряют изменяющееся давление, фиксируют его пороговые значения. Упругая характеристика, т. е. зависимость между величиной давления и перемещением измерительной точки упругого элемента, является одной из основных характеристик мембраны, так как воздействующее на мембрану давление определяется перемещением упругого элемента. Форма деформации и метод

закрепления мембраны в датчике также определяются упругой характеристикой. Гофрированные мембраны применяются в случае, когда малые перемещения плоских мембран недостаточны, поскольку в среднем в гофрированной мембране допускается перемещение, не превышающее 2 % от ее диаметра. Такие материалы также более эластичны по сравнению с плоскими мембранами, что делает их более восприимчивыми к ускорениям и вибрациям, а это, в свою очередь, определяет их преимущественную работоспособность в стационарных приборах. Податливость гофрированной мембраны в общем случае уменьшается с увеличением глубины гофров и увеличивается с ростом их числа. Уменьшение толщины мембраны не только приводит к повышению точности и чувствительности датчика, но и требует разработки методик изготовления и приваривания тонкостенных мембран к корпусам датчиков. К тому же более тонкие мембраны в большей степени подвержены воздействию химически активных сред и механических нагрузок. Гофрированные мембраны обычно изготавливают из бронзы, нейзильбера и нержавеющей стали. Однако при производстве стальных мембран следует уделять особое внимание их коррозионной стойкости. Комбинации металлов и сплавов, используемых при конструировании датчиков, должны тщательно подбираться, с тем чтобы исключить электролитическую коррозию, особенно если датчик не может быть хорошо защищен от окружающей среды. Нарушение герметичности разделительной полости между полупроводниковым чувствительным элементом и мембраной может привести к утечке жидкости и дальнейшему выходу датчика из строя [4–6].

Для улучшения гладкости поверхности и ее отражающей способности некоторые производители мембран применяют электрохимическую полировку деталей. Электрохимическое полирование – это процесс обработки поверхности, приводящий к снижению шероховатости и появлению глянцевого блеска. Для осуществления процесса деталь, подвергаемую электрополировке, помещают в ванну с электролитом. Деталь используют в качестве анода, т. е. одного из электродов, соединенного с положительным полюсом источника тока. Вторым электродом – это медный катод. При протекании тока через сформированную цепь, металл на поверхности детали растворяется. Особенностью процесса является его неравномерное протекание: в первую очередь растворяются наиболее выступающие участки поверхности, благодаря чему достигается снижение шероховатости. В зависимости от размеров убираемых неровностей электрополирование условно делится на макро- и микрополирование. Процесс контролируется путем изменения химического состава раствора, плотности тока, продолжительности и температуры, при которой протекает электрополировка. Чем меньше размер детали, тем меньше время отводится на ее обработку. Поскольку в качестве электролита применяют агрессивные кислоты (ортофосфорная, серная, фторводородная и др.), то после обработки детали должны быть тщательно промыты для удаления раствора электролита с поверхности [7, 8].

Следует учитывать, что нарушения процесса электрополирования, такие как превышение длительности выдержки, увеличение температуры и плотности тока, приводят к развитию электрохимических коррозионных процессов на поверхности детали. Неполное удаление электролита с поверхности детали ведет к образованию питтинговой и межкристаллитной коррозии (МКК). Коррозия является процессом электрохимического взаимодействия между металлом и средой, в результате которого изменяются свойства металла, что может привести к серьезному ухудшению функциональных характеристик металла, среды или включающей их технической системы. Опасность подобного влияния среды на материал связана также с тем, что конструктивные элементы могут прийти в негодность за короткий срок, т. е. до достижения запланированных сроков эксплуатации, зачастую с возникновением аварийных ситуаций [9–12].

Надежность и длительность эксплуатации сложных технических систем напрямую определяется свойствами материалов, используемых в узлах и деталях, а также качеством их изготовления [13, 14].

Реализация потенциальных возможностей деталей обусловлена множеством факторов, влияющих на рабочий ресурс. Применение того или иного материала в сложных технических системах возможно только после многосторонней детальной оценки его свойств и физико-механических характеристик, так как это позволяет оценить несущую способность, ресурс и степень безопасной повреждаемости изделия [15, 16].

Диагностирование причин разрушения также позволяет повысить эксплуатационную надежность и долговечность конструкций и деталей машин, так как исследование случаев эксплуатационных разрушений приводит не только к установлению причин их возникновения, но и к разработке комплекса рекомендаций и мероприятий по устранению неблагоприятных факторов и предотвращению дальнейшего возникновения аварийных ситуаций [17, 18].

В данной работе приведены результаты комплексного исследования причин потери упругих свойств мембраны из стали 30X13.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### **Материалы и методы**

При исследовании причин потери упругих свойств мембраны из стали 30X13 проведен анализ технической документации и люминесцентный контроль поверхности детали. Методами оптической и электронной микроскопии, а также металлографии высокого разрешения с применением оптического микроскопа фирмы Leica и растрового электронного микроскопа EVO MA10 выполнен осмотр поверхности мембраны, а также шлифов и искусственно полученных изломов.

Неразрушающий контроль проведен в лабораторных условиях с применением люминесцентного набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ с особо высоким уровнем чувствительности – I по ГОСТ 18442–80, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 1 мкм и менее.

Определение твердости и микротвердости выполнено на нетравленном шлифе с применением прибора ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г.

Анализ химического состава мембраны проведен спектральным атомно-абсорбционным методом на спектрометре AA Varian 240 FS по ГОСТ 22536–88. Для анализа использован предварительно промытый в смеси ацетона и спирта и высушенный образец в виде стружки. Градуировочные кривые построены по калибровочным растворам, приготовленным из растворов государственных стандартных образцов (ГСО) ионов металлов.

Определение содержания серы и углерода проведено на газоанализаторе фирмы Лесо по ГОСТ 24018–91. Метод измерений массовой доли углерода и серы в сплавах заключается в плавлении анализируемой пробы с добавлением специального плавня в потоке кислорода при температурах 2500–3000 °С. Углерод и сера, содержащиеся в пробе, при плавлении окисляются до газообразных диоксидов (CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> соответственно) и транспортируются потоком кислорода в инфракрасный анализатор, в котором производится измерение величины поглощения инфракрасного излучения. Массовые доли углерода и серы в пробе рассчитывают с учетом массы образца по предварительно установленным градуировочным зависимостям, построенным по ГСО.

Подготовка металлографических шлифов осуществлена на оборудовании фирмы Struers. Для выявления микроструктуры поперечный шлиф, изготовленный из мембраны, подвергался химическому травлению в водном растворе смеси азотной и соляной кислот.

### **Результаты и обсуждение** *Люминесцентный контроль*

При проведении капиллярного контроля на поверхности мембраны выявлено интенсивное свечение множества индикаторных следов, представляющих собой

несплошности типа трещины, критичные уровню чувствительности I по ГОСТ 18442–80 (ширина раскрытия трещины – менее 1 мкм).

**Определение химического состава материала мембраны**

По данным химического анализа получено, что материал мембраны соответствует требованиям ГОСТ 5632–72. Результаты химического анализа материала мембраны приведены в таблице.

**Химический состав материала мембраны из стали 30X13**

| Образец      | Содержание элементов, % (по массе) |      |      |       |      |      |      |      |       |       |        |
|--------------|------------------------------------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
|              | C                                  | Mo   | V    | W     | Cu   | Ni   | Si   | Mn   | Cr    | P     | S      |
| Мембрана     | 0,30                               | 0,04 | 0,03 | 0,015 | 0,09 | 0,27 | 0,38 | 0,45 | 12,5  | 0,025 | 0,011  |
| ГОСТ 5632–72 | 0,26–0,35                          | ≤0,3 | ≤0,2 | ≤0,2  | ≤0,3 | ≤0,6 | ≤0,8 | ≤0,8 | 12–14 | ≤0,03 | ≤0,025 |

**Фрактографический анализ**

Анализ поверхности мембраны с применением оптического и электронного микроскопов выявил на ее поверхности наличие коррозионных питтингов и микротрещин по границам зерен (рис. 1).

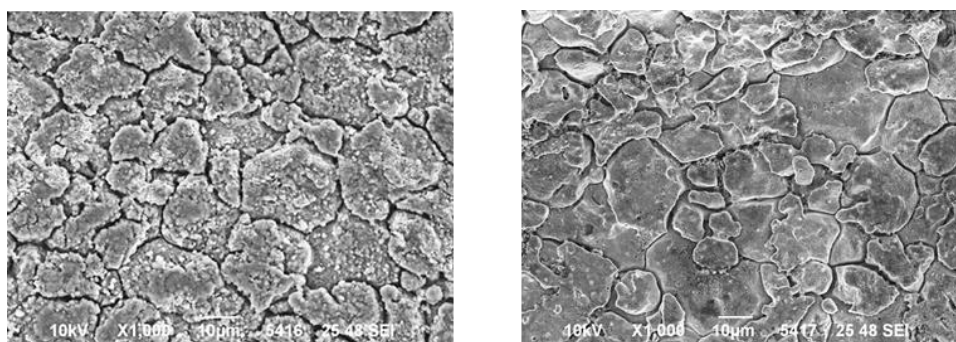


Рис. 1. Трещины по границам зерен на поверхности мембраны

Для проведения фрактографического исследования вскрыты выявленные трещины и проанализирована поверхность полученных изломов. В изломах, образовавшихся по трещинам, развивавшимся с обеих сторон мембраны, наблюдается разрушение по границам зерен, что свидетельствует о развитии коррозионных процессов и проникновении коррозионно-активной среды вглубь материала (МКК). Доля внутризеренного разрушения с типичным для данной стали мелкоямочным рельефом занимает незначительную площадь в центральной части излома (рис. 2). Одна из вскрытых трещин имеет сквозное развитие по границам зерен, при этом на все сечение мембраны приходится всего пять крупных зерен.

**Металлографическое исследование** материала мембраны выполнено на ее поперечном срезе. На микрошлифе без травления со стороны поверхности наблюдаются как многочисленные клиновидные углубления (питтинговая коррозия), так и трещины, развивающиеся по границам зерен на различную глубину (МКК). Присутствуют трещины, глубина развития которых составляет 20–50 % от толщины мембраны, а также сквозные трещины, распространяющиеся с обеих поверхностей по механизму межкристаллитной коррозии (рис. 3).

Микроструктура мембраны представляет собой мартенсит, выявляются границы крупных равноосных зерен. В сечении детали располагаются 4–6 зерен, в которых равномерно распределены мелкодисперсные шаровидные карбиды (рис. 4). Преимущественного залегания карбидов по границам зерен не обнаружено.

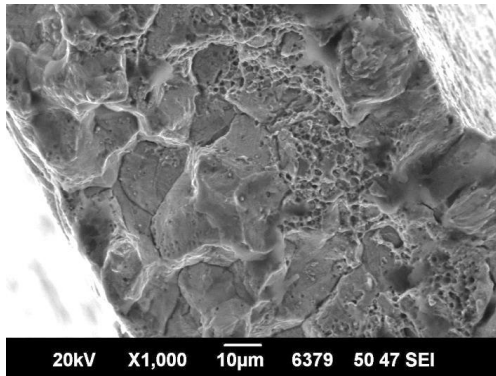


Рис. 2. Границы зерен в изломе мембраны



Рис. 3. Сквозная трещина на шлифе без травления,  $\times 500$

В прокатном металле зерна обычно вытянуты по направлению прокатки. Равноосная структура зерен свидетельствует о том, что мембрана (либо лист, из которого она сделана) подвергалась высокотемпературному нагреву.

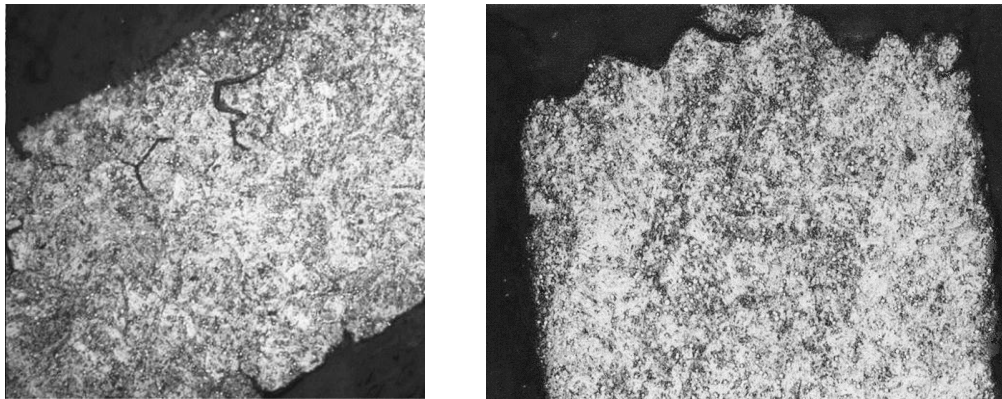


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 1000$ ) мембраны – трещины по границам зерен

Твердость мембраны составляет 495 НВ, что соответствует пределу прочности  $\sigma_b = 1800\text{--}1860$  МПа и значительно превышает требования нормативной документации. Согласно требованиям ГОСТ 5949–2018, твердость НВ по Бринеллю горячекатаной, ковальной и калиброванной металлопродукции и металлопродукции со специальной отделкой поверхности в термически обработанном (отожженном или отпущенном) состоянии не должна превышать значений 131–217 НВ при  $\sigma_b = 1180$  МПа.

### Заключения

На основании проведенного комплексного исследования установлено, что химический состав материала мембраны соответствует требованиям нормативной документации, при этом твердость детали (495 НВ) значительно превышает требования, отображенные на чертеже ( $\leq 131\text{--}217$  НВ).

В ходе структурных исследований выявлены границы крупных равноосных зерен, в которых равномерно распределены мелкодисперсные шаровидные карбиды. На сечение детали приходится не более 4–6 зерен. Обнаружены коррозионные питтинги и трещины, глубина развития которых составляет 20–50 % от толщины мембраны, а также сквозные трещины, распространяющиеся с обеих поверхностей по механизму межкристаллитной коррозии.

В изломах вскрытых трещин разрушение прошло по границам зерен, что свидетельствует о развитии процессов межкристаллитной коррозии и проникновении коррозионно-активной среды вглубь материала. Доля внутризеренного разрушения

с типичным для данной стали мелкоячеистым рельефом занимает незначительную площадь в центральной части излома.

При анализе технической документации установлено, что в процессе производства мембраны подвергали высокотемпературному нагреву, вызывающему рост зерен. Нормализацию проводили с температуры 1200 °С, что превышает требования ГОСТ 5949–2018 в части рекомендуемых режимов термообработки для сталей мартенситного класса (1000–1020 °С). Мембраны также подвергали длительной электрополировке, представляющей собой процесс электрохимического травления, приводящий к развитию питтинговой и межкристаллитной коррозии на поверхности тонкостенной детали.

Сочетание этих двух факторов привело к потере упругих свойств мембраны вследствие развития коррозионных процессов и распространения трещин вглубь материала по границам сформировавшихся крупных зерен.

С целью предотвращения потери упругих свойств и выхода деталей из строя рекомендованы корректировка режима термообработки деталей и усиление контроля за параметрами процесса электрополировки мембран. В качестве альтернативного решения проблемы может быть рассмотрен переход к использованию мембран на основе бронзы либо никелевых сплавов.

#### Список источников

1. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 232 с.
2. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко М.: Машиностроение, 2014. 491 с.
3. ГОСТ 5949–2018.Metalloпродукция из сталей нержавеющей и сплавов на железоникелевой основе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 32 с.
4. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машгиз, 1962. 456 с.
5. Раннев Г.Г. Интеллектуальные средства измерений. М.: Академия, 2010. 272 с.
6. Фрайден Дж. Современные датчики. М.: Техносфера, 2006. 592 с.
7. Красноярский В.В., Френкель Г.В., Носов Р.П. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 299 с.
8. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник в 2 т. / под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. Т. 1. 688 с.
9. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Госстандарт СССР, 1985. 79 с.
10. ГОСТ 9.106–2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения. М.: РСТ, 2021. 12 с.
11. ISO 8044:2020. Corrosion of metals and alloys. ISO copyright office, 2020. 29 p.
12. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9040-2015-0-2-76-87.
13. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
14. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2017-9140-2020-0-1-3-11.
15. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
16. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Многоуровневое масштабное комплексное исследование деформирования металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.

17. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
18. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСИС, 2007. 259 с.

### References

1. *Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys*. Moscow: Internet Engineering, 2000, 232 p.
2. *Grader of steels and alloys*. 4th ed., rev. and add. Ed. Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko Moscow: Mashinostroenie, 2014, 491 p.
3. State Standard 5949–2018. *Metal products from stainless steels and iron-nickel alloys, corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Specifications*. Moscow: Standartinform, 2018, 32 p.
4. Andreeva L.E. *Elastic elements of devices*. Moscow: Mashgiz, 1962, 456 p.
5. Rannev G.G. *Intelligent measuring instruments*. Moscow: Academy, 2010, 272 p.
6. Friden J. *Modern sensors*. Moscow: Technosfera, 2006, 592 p.
7. Krasnoyarsky V.V., Frenkel G.V., Nosov R.P. *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 299 p.
8. *Protection against corrosion, aging and biodamage of machines, equipment and structures: a reference book in 2 vols*. Ed. A.A. Gerasimenko. Moscow: Mashinostroenie, 1987, vol. 1, 688 p.
9. State Standard 9.908–85. *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Methods for determining the indicators of corrosion and corrosion resistance*. Moscow: Gosstandart SSSR, 1985, 79 p.
10. State Standard 9.106–2021. *Unified system of protection against corrosion and aging. Corrosion of metals. Terms and Definitions*. Moscow: RST, 2021, 12 p.
11. ISO 8044:2020. *Corrosion of metals and alloys*. ISO copyright office, 2020, 29 p.
12. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
13. Kablov E.N. The key problem is materials // *Trends and guidelines for Russia's innovative development*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
14. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Авиационные материалы и технологии*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
15. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
16. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Multilevel large-scale complex research of deformation of metal materials. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 28, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
17. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
18. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractodiagnosics of destruction of metallic materials and structures*. Moscow: MISIS, 2007, 259 p.

### Информация об авторах

**Морозова Лариса Владимировна**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### Information about the authors

**Larisa V. Morozova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.05.2023.  
The article was submitted 18.04.2023; approved and accepted for publication after reviewing 29.05.2023.