

Научная статья

УДК 621.833: 621.852

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ И НАВОДОРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ (обзор)

### Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей

А.Б. Лаптев<sup>1</sup>, Л.И. Закирова<sup>1</sup>, О.А. Загорских<sup>1</sup>, М.Р. Павлов<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.** Рассмотрены основные стадии процесса разрушения металлических материалов при одновременном воздействии коррозионной среды и механических нагрузок. Приведены основные теории и практические результаты определения изменения механических и ресурсных характеристик материалов при воздействии коррозионной среды. Оценена применимость известных методик определения наводороживания и характеристик коррозионно-механического разрушения металлических материалов на примере сталей и алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** коррозионно-механическое разрушение, сероводородное растрескивание, наводороживание металла, водородная хрупкость, медленное растяжение, развитие трещины, коррозионная среда

**Для цитирования:** Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.

Scientific article

## METHODS OF INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF CORROSION-MECHANICAL DESTRUCTION AND HYDROGENATION OF METALS (review)

### Part 1. Investigation of corrosion-mechanical destruction of steels

A.B. Laptev<sup>1</sup>, L.I. Zakirova<sup>1</sup>, O.A. Zagorskikh<sup>1</sup>, M.R. Pavlov<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.** Considers the main stages of the process of formation of protective passive films on steel in a hydrogen sulfide-containing environment and the destruction of metal materials under the simultaneous influence of a corrosive environment and mechanical loads. The main theories and practical results of determining changes in the mechanical characteristics of steel under the influence of a corrosive environment and mechanical loads are presented. The values of relative constriction, elongation, and tensile strength at slow stretching are accepted as the main criteria for the corrosion destruction of materials.

**Keywords:** corrosion-mechanical destruction, hydrogen sulfide cracking, metal hydrogenation, hydrogen brittleness, slow stretching, crack development, corrosive environment

**For citation:** Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (Review). Part 1. Investigation of corrosion-mechanical destruction of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.

## Введение

В соответствии с п. 609 Авиационных правил АП-25, все агрегаты, узлы, детали и материалы воздушного судна должны быть проверены в условиях увлажнения. Под увлажнением поверхности понимается адсорбция атмосферной влаги и аэрозолей атмосферы. Атмосферная влага – в зависимости от региона, климата и развития промышленного и сельскохозяйственного производства – различается по составу примесей, например таких как углекислый газ, сероводород, диоксид серы, аммиак, ионы в частицах аэрозолей (сульфат-, хлорид-, карбонат-анионы и др.). Наличие примесей в атмосферном воздухе отличает степень воздействия увлажнения на материалы. На металлических материалы разрушающее действие оказывают кислотообразующие газы и анионы – возникает коррозия [1–4].

Достиженные в настоящее время успехи в области определения параметров атмосферы и ее коррозионной агрессивности позволяют с достаточной степенью точности определять состав атмосферы, уровень климатических факторов (температуру, влажность, атмосферное давление, количество осадков, скорость и направление ветра) и концентрацию примесей в атмосферном воздухе. Разработаны основные принципы прогнозирования стойкости как металлических, так и неметаллических материалов в атмосферных условиях [5, 6].

Тем не менее воздействие атмосферы и климатических факторов на материалы, изделия и сложные технические системы с одновременным механическим воздействием не позволяют судить о возможном синергизме климатических факторов и эксплуатационных нагрузок. Для того чтобы учитывать одновременное воздействие, необходимо проведение комплексных испытаний с учетом варьирования значений климатических факторов и прикладываемых нагрузок.

Влияние внешней среды на прочность материалов является наиболее важной, но мало изученной проблемой механики разрушения твердых тел. Например, многообразны и сложны явления локального разрушения в вершине трещины, вызывающие докритическое развитие начальных трещин и замедленное разрушение конструкции. Основная задача теории заключается в обособлении отдельных механизмов локального разрушения и создании достаточно простых и надежных математических моделей.

Замечено, что прочность и деформируемость твердых тел зависят от той среды, в которой находится тело. Под влиянием внешней среды тело может становиться более пластичным или более хрупким, прочность его может уменьшаться или возрастать. Иногда достаточно микроскопических добавок некоторых веществ (например, поверхностно-активных) во внешнюю среду, чтобы существенно изменить прочность тела.

Изменение внешних условий наиболее существенно сказывается на процессах локального разрушения в вершине трещины. Поэтому зависимость скорости роста трещин от внешних параметров является наиболее чувствительной и точной характеристикой свойств системы «материал–среда».

Под воздействием коррозионной среды изменяется вязкость разрушения образца металла, значения которой в большинстве случаев повышаются при достаточно длительной продолжительности выдержки образца с уже имеющейся трещиной.

Однако коррозионная среда влияет не только на вязкость разрушения, но и на скорость роста трещины усталости. Это связано с рядом эффектов, происходящих только при воздействии на металл коррозионной среды, таких как рост трещин в металлах под действием водорода, адсорбционный эффект, а также развитие коррозионных трещин под действием двух основных механизмов – электрохимического растворения металла в вершине трещины вследствие изменения электродного потенциала поверхности и локального разрушения тонких хрупких пленок за счет деформации в процессе роста трещины.

При действии циклической нагрузки коррозионная среда зачастую не изменяет скорость роста усталостных трещин, в то время как при стационарном нагружении в аналогичных условиях воздействие среды оказывается существенным. Это объясняется тем, что механизм конечной пластической деформаций вблизи вершины трещины в таких случаях превалирует над специфическим механизмом локального разрушения при воздействии среды.

Процесс докритического разрушения под напряжением следует разбивать на два периода: инкубационный период (промежуток времени, в течение которого зарождается трещина или не растет начальная трещина) и период докритического роста трещины. В дальнейшем, как правило, рассматривается лишь последний период [7, 8].

### **Материалы и методы**

Основными материалами воздушного судна являются алюминиевые, титановые, никелевые сплавы и коррозионностойкие стали. В последние годы прослеживается тенденция замены металлических материалов полимерными композиционными материалами на основе эпоксидных матриц и углеродных и стеклянных волокон, а также органопластиками. Тем не менее алюминиевые сплавы в течение многих лет использовались и еще достаточно долго будут использоваться в авиации. С учетом большого металлофонда алюминиевых сплавов в уже эксплуатируемой на протяжении многих лет технике все более актуальным становится вопрос стабильности механических характеристик алюминиевых сплавов при совместном действии нагрузок и коррозионных сред в виде атмосферных аэрозолей.

### **Анализ методов исследования коррозионного растрескивания металлов**

Оценка работоспособности оборудования в условиях воздействия коррозионной среды осложняется широким разнообразием характера коррозионных поражений конструкций и скоростью их разрушения. Для контроля агрессивности сред и механизма коррозии конструкций, определения эффективности защиты, установления сроков осмотров и ремонтов, прогнозирования ресурса необходим постоянный мониторинг коррозии и характера коррозионного растрескивания [9].

Скорость коррозии металлов в составе изделия определяют по образцам-свидетелям гравиметрическим методом или методом поляризационного сопротивления с помощью коррозиметров. Уменьшение толщины стенок и появление расслаивающей коррозии оценивают ультразвуковым методом.

Процесс окклюзии водорода фиксируют специальными зондами [10].

Состояние конструкций оценивают акустико-эмиссионным методом во время периодических испытаний конструкций на прочность. Регулярно проводят техническое освидетельствование конструкций во время планово-предупредительных ремонтов. Состояние конструкций и их характеристики определяют механическими и металлографическими методами, а также с помощью измерения содержания водорода в поверхностных слоях металла, на вырезанных из данных конструкций натуральных фрагментах.

Следует отметить, что некоторые из перечисленных методов контроля являются косвенными, не позволяющими установить зависимость между воздействующими факторами, скоростью коррозии и коррозионным растрескиванием. Так, на практике показания коррозиметров имеют большие погрешности. Контроль с помощью образцов под нагрузкой также имеет большие погрешности, так как при росте трещины происходит релаксация напряжений.

Наиболее полную информацию о состоянии металлических конструкций получают во время технического освидетельствования оборудования, а также при исследовании натуральных элементов и образцов, вырезанных при ремонте.

Большинством исследователей разработаны методы определения стойкости металлов к коррозионному растрескиванию, которые адаптированы для специфического применения металла по типу детали, особенностям механической нагрузки и виду коррозионной среды. Используются также экспрессные методы испытаний, в которых увеличиваются как нагрузки, так и состав наиболее коррозионно-активных частиц. Однако значительное ужесточение режимов испытаний не допускается, так как это приводит к отбраковке металла. Часто при определении параметров коррозионного растрескивания используются нагрузки с постоянными значениями или деформации с достаточно низкой скоростью – менее  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , так называемое медленное растяжение [11–22].

Научно-технический литературный поиск [23–28] позволил ранжировать различные методы испытаний на коррозионное растрескивание (см. таблицу) [29].

**Методы испытаний на коррозионное растрескивание**

Параметры сравнения	Модификация параметра	Процент использования
Образцы	Цилиндрический	48,3
	Плоский	35,5
	Натурный	9,7
	U-образный	6,5
Коррозионные среды	3 %-ный NaCl + H <sub>2</sub> S	45,1
	Среда NACE	19,4
	Реальная среда + H <sub>2</sub> S	19,4
	H <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> S	16,1
Способы нагружения	Стационарная нагрузка	48,3
	Стационарная деформация	35,9
	Динамический изгиб	9,7
	Динамическое растяжение	6,1
Критерий оценки	Среднее время до разрушения	51,6
	Величина пороговых напряжений	16,1
	Изменение механических характеристик	16,1
	Время до разрушения 50 % образцов	9,7
	Время до появления первой трещины	6,5

Показано, что коррозионное растрескивание свойственно многим техническим материалам. Например, приморская атмосфера и морская вода являются агрессивными и вызывают коррозионное растрескивание таких важных материалов, как нержавеющая сталь, сплавы на основе алюминия и магния.

База проведения испытаний варьируется от 30 мин до 3000 ч, но наибольшее количество исследований проводится на базе 720 ч (16,1 %) при стационарной нагрузке с условием доведения образца до разрушения.

Наиболее распространены методики определения сопротивления коррозионному растрескиванию: МСКР-01-85 и NACE TM-01-77 [30, 31].

Для определения склонности материалов к коррозионному растрескиванию всегда желательно проводить экспресс-испытания. Ускорение процесса достигается повышением агрессивности коррозионной среды и применением образцов с надрезом или заранее наведенной трещиной [32]. Необходимо отметить, что в этом случае исключается время зарождения микротрещин и образования магистральной трещины – это 80 % всей базы испытаний [33].

Протекающее во времени коррозионное разрушение (случай межкристаллитного разрушения) наступает тогда, когда уровень хрупкой межкристаллитной прочности снижается до уровня действующего растягивающего напряжения. В этом виде разрушения можно выделить две стадии: стадия зарождения трещин в микроскопической области и стадия дальнейшего ее «прорастания» до такой глубины, при которой наступает мгновенное разрушение образца. Для определения коэффициента интенсивности

напряжений специально изготовленные образцы в виде консольной балки из стали 30ХГСН12А испытывали в 3,5 %-ном растворе хлорида натрия (NaCl) при скорости прогиба балки 2,3 мкм/с и стационарной нагрузке. Полученные значения при стандартных ( $11,96 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ) и ускоренных ( $11,69 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ) [34] испытаниях близки, что свидетельствует о перспективности применения коррозионных испытаний при медленном растяжении для экспресс-оценки величины коэффициента интенсивности напряжений.

Для определения влияния температуры отпуска на сопротивление коррозионному растрескиванию стали марки API C-90 проводили испытания согласно методике NACE TM 01-77 при скорости деформирования образцов  $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  [35]. Установлена линейная зависимость величины пороговых напряжений, полученных при постоянной нагрузке, от приведенных значений относительного сужения образцов после медленного растяжения. Данная зависимость используется при определении стойкости материалов к коррозионному растрескиванию [36, 37], тестировании лакокрасочных и металлических покрытий [38, 39], а также ингибиторов [40, 41].

### **Скорость деформации при экспресс-испытании материалов на медленное растяжение**

При медленном растяжении основными характеристиками являются: относительные сужение [42–44] и удлинение образца [45, 46], предел прочности и работа коррозионно-механического разрушения [47–49].

При медленном растяжении подвижный захват растягивает образец длиной  $l_0$  при скорости деформации  $\varepsilon' = V/l_0$ . В работе [50] принято, что скорость перемещения активного захвата разрывной машины должна меняться во время испытаний ( $\tau$ ):

$$V = (\varepsilon' \cdot l_0) / (1 - \tau \cdot \varepsilon'), \quad (1)$$

где постоянная величина  $\varepsilon'$  не соответствует действительной деформации образца при испытаниях на коррозионное растрескивание.

Исследованиями [51] установлено, что при коррозионном растрескивании в стадии упругой деформации скорость деформации постоянна, а при стадии пластического разрушения скорость неравномерна. Начальная пластическая деформация затрагивает локальный отрезок длины образца, где уменьшается сечение образца. Показано, что металл локального участка упрочняется и деформация перемещается на другие локальные отрезки. Данный процесс непрерывен, поэтому деформацию принимают равномерной по всему образцу [52]. Кроме того, скорость пластической деформации металла с трещиной определить невозможно из-за локализации деформаций в месте разрушения – трещины. Поэтому в работе [52] при описании результатов экспериментальных исследований не указано на необходимость разделения испытаний с постоянной скоростью удлинения и при постоянной скорости деформации образца.

При испытаниях на медленное растяжение достигается равновесие между скоростями механических процессов, способствующих вязкому разрушению, и коррозионных процессов, вызывающих хрупкое коррозионное растрескивание. В случае высоких скоростей деформирования вязкое разрушение образца произойдет прежде, чем коррозионные процессы окажут необходимое воздействие; при избыточно медленной скорости деформирования скорость возобновления защитных пленок превалирует и замедляет процесс коррозионного растрескивания [53]. Поэтому одним из основных параметров испытаний является величина оптимальной скорости деформирования, обеспечивающая соответствие типа разрушения испытываемого материала типу разрушения его в условиях эксплуатации. В большинстве работ при испытаниях на коррозионное растрескивание оптимальной скоростью деформирования считается  $10^{-5} - 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ .

Исследование процесса коррозионного растрескивания и влияния на него скорости деформирования сталей проводится в сероводородсодержащей среде NACE, содержащей 5 %-ный раствор хлористого натрия с добавлением 0,5 %-ной уксусной кислоты, насыщенный сероводородом до концентрации 3 г/л с рН = 3,1 при температуре  $293 \pm 3$  К [54]. Свойства материалов оценивали приведенной величиной относительного сужения образцов:  $K_Y = \psi_c / \psi$ , где  $\psi_c$ ,  $\psi$  – соответственно относительные сужения образцов после испытаний в коррозионной среде и на воздухе по ГОСТ 1497–84.

Испытания при скорости деформирования  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , рекомендуемой ГОСТ 1497–84 при механических испытаниях, проводили на стандартной испытательной машине Р-5. Продолжительность испытаний образцов до их разрушения при такой скорости деформирования сокращается до 5 мин. Пластические свойства сталей сохраняются на достаточно высоком уровне – при разрушении образцов в месте разрушения образуется шейка с вязким ямочным изломом. Это свидетельствует о том, что при скоростях деформирования  $\varepsilon' > 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  коррозионная среда не успевает оказать существенного влияния на свойства металла и охрупчивания не происходит, что и отмечено в ряде работ [55–59]. Следовательно, испытания при стандартных скоростях деформирования непригодны для экспресс-оценки коррозионно-механических свойств сталей и сварных соединений.

Существенное изменение пластических свойств сталей наблюдается в диапазоне скоростей деформирования от  $2,5 \cdot 10^{-3}$  до  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . При снижении скорости деформирования до  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  разрушение сталей имеет более хрупкий характер, доля вязкой составляющей уменьшается.

При скоростях деформирования  $< 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  образцы имеют квазихрупкий кристаллический излом ( $\psi < 15\%$ ) с наличием вторичных трещин, характерных для коррозионного растрескивания. Механизм разрушения, определяющий коррозионное растрескивание, основан на охрупчивании водородом стали, поэтому характерной особенностью разрушения при коррозионном растрескивании является квазихрупкий интерскол. Аналогичный характер разрушения имеет место после испытаний в  $\text{H}_2\text{S}$  при постоянной нагрузке, что свидетельствует об идентичности двух методов.

Зависимости между параметрами определяли методом наименьших квадратов [60–63]. Получена функция  $K$  второго порядка, которая обеспечила точность приближения  $\delta$ , равную 5 %:

$$K = \frac{\ln \varepsilon' \cdot 10^6 + B}{-A \cdot (\ln \varepsilon' \cdot 10^6)^2} + C, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – постоянные величины, зависящие от испытываемого материала, численные значения которых соответственно: 0,130; 5,315; 22,91 – для стали 20; 0,420; 8,161; 44,35 – для стали 25 и 0,768; 4,553; 66,96 – для стали 40Х.

Анализ вида зависимости (2) в интервале значений  $\varepsilon'$  от  $10^{-1}$  до  $10^{-6} \text{ с}^{-1}$  показал, что при  $\varepsilon' < 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  кривая асимптотически приближается к горизонтали. Полученные результаты испытаний с учетом анализа научно-технических литературных данных позволили рекомендовать при экспрессных испытаниях трубных сталей в сероводородсодержащей среде скорость относительной деформации образцов  $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  [64–68]. При этом необходимо учитывать, что в процессе испытаний образец деформируется не только на расчетной длине  $l_0$ , а на всей длине  $l$  с сечением, тогда скорость относительной деформации составит

$$\varepsilon' = \left( \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot \left( \frac{1}{t} \right) [\text{с}^{-1}], \quad (3)$$

где  $t$  – время испытания, с.

Скорость деформирования образца, т. е. скорость движения подвижного захвата разрывной машины,  $V$  определяется из соотношения

$$V = \frac{\Delta l}{t} = \varepsilon' \cdot l, \text{ так как } t = \Delta l / (l \cdot \varepsilon), \quad (4)$$

тогда:

– для цилиндрического образца (тип IV по ГОСТ 1497–84) при  $l = 3,6 \cdot 10^{-2}$  м:

$$V = 3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 7,2 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}; \quad (5)$$

– для плоского образца (тип I по ГОСТ 1497–84) при  $l = 6,3 \cdot 10^{-2}$  м:

$$V = 6,8 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1,36 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}. \quad (6)$$

### Заключения

Анализ научно-технических публикаций подтверждает все более широкое внедрение метода ускоренных испытаний с медленным растяжением образцов. Преимущество метода – сокращение инкубационного периода роста трещины и возможность быстрого получения однозначных сведений о склонности материалов к коррозионному растрескиванию и об эффективности мероприятий по защите от коррозии в условиях, когда традиционные методы испытаний не дают необходимой информации либо требуют много времени.

При испытаниях с медленным растяжением достигается равновероятное влияние механических процессов, вызывающих вязкое разрушение, и коррозионных процессов, ведущих к хрупкому коррозионному растрескиванию.

При высоких скоростях растяжения (в условиях воздействия агрессивных коррозионных сред) вязкое разрушение образцов наступает прежде, чем коррозионные процессы окажут необходимое воздействие. При слишком малых скоростях растяжения на поверхности испытываемого материала образуются защитные пленки (происходит процесс пассивации), замедляющие процесс коррозионного растрескивания и существенно увеличивающие время до разрушения образцов. Значения скорости растяжения должны соответствовать реальным условиям и обеспечивать соответствие типа разрушения испытываемого материала в эксперименте на образцах типу разрушения реальных конструкций в условиях эксплуатации.

В большинстве систем коррозионное растрескивание происходит при скоростях деформации порядка  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  с<sup>-1</sup>. С учетом этого исследовано влияние скорости растяжения на коррозионное поведение сталей в сероводородсодержащей среде.

В качестве основных критериев коррозионного растрескивания материалов можно принять значения относительных сужения и удлинения, предела прочности или работы коррозионного разрушения при испытании образцов. Влияние наводороживания на пластические свойства сталей отражается обобщенным показателем сопротивления материалов коррозионному растрескиванию.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Структура и свойства синтезированных методом селективного лазерного сплавления сплавов ЭП648 и ВЖ159 после имитационных отжигов // *Материаловедение*. 2020. № 6. С. 3–10.
2. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. P. 012029.
4. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Куршев Е.В., Горяшник Ю.С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфиров в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.

5. Гецов Л.Б., Лаптев А.Б., Пузанов А.И., Баландина М.Ю., Добина Н.И. Прочность порошкового материала для дисков ГТД в условиях агрессивного действия смеси хлоридов и сульфатов натрия // *Авиационная техника*. 2019. № 12. С. 14–25.
6. Гутман Э.М. *Механохимия металлов и защита от коррозии*. М.: *Металлургия*, 1974. 232 с.
7. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
8. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Образование новых поверхностей в твердом теле на стадиях упругой и пластической деформаций, начала и развития разрушений // *Труды ВИАМ*. 2018. № 2 (62). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
9. Кушнарченко В.М., Гринцов А.С., Оболенцев Н.В. *Контроль взаимодействия металла с рабочей средой ОГКМ*. М.: *ВНИИЭгазпром*, 1989. 49 с.
10. Способ определения концентрации диффузионно-подвижного водорода в металле конструкции: а.с. 1193562 СССР; заявл. 26.03.83; опубл. 21.11.85.
11. Способ оценки коррозионной стойкости материалов: а.с. 1027585 СССР; заявл. 14.06.82; опубл. 07.07.83.
12. Коваль В.П. Влияние сероводорода и низких температур на склонность к коррозионно-механическому разрушению углеродистых сталей // *Защита металлов*. 1979. № 1. С. 87–89.
13. Копей Б.В. Влияние сероводородсодержащих нефти на коррозионно-механическое разрушение конструкционных сталей // *Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности*. 1983. № 10. С. 2–3.
14. *Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на склонность к коррозионному растрескиванию сталей и сплавов в жидких средах: методические рекомендации 185–86*. М.: *ВНИИНМАШ*, 1986. 51 с.
15. Стефанова С., Рачев Х. *Справочник по коррозии* / под ред. Н.И. Исаева. М.: *Мир*, 1982. 519 с.
16. Фот А.П. *Разработка комплекса экспериментального оборудования и методик коррозионно-механических испытаний: дис. ... д-ра техн. наук*. Курган: *Курганск. гос. ун-т*, 1998. 460 с.
17. Poperling R., Schwenk W. Wasserstoff – induzierte spannungs Korrosion von Stahlen durch dynamisch plastische Beanspruchung in Promotor freien Electrolytlosungen // *Werkstoffe und Korrosion*. 1985. No. 9. P. 389–400.
18. Riecke E., Johnen B. Wasserstoffinduzierende Spannungs-Korrosion in unverzinkten und verringerten Baustahlen // *Werkstoffe und Korrosion*. 1986. Bd. 37. No. 6. S. 310–317.
19. Roogen D., Bulischek T.S. Stress corrosion cracking of alloy 600 using the constant strain rate test // *Corrosion*. 1981. Vol. 37. No. 10. P. 597–607.
20. Scully J.C. Mechanism of dissolution controlled cracking // *Corrosion Science*. 1978. Vol. 12. No. 6. P. 290–300.
21. Shreir L.L. Vebersicht der. electrochemischen Methoden zur Unersuchung von Wasser Stevsvpepruedung und Spannungsrissskorrosion // *Werstoffe und Korrosion*. 1970. Bd. 21. No. 5, 8. S. 613–629.
22. Weeks I.R., Vyas B., Isaacs H.S. Environmental factors influencing stress corrosion cracing in boiling water reactor // *Corrosion Science*. 1985. Vol. 5. No. 8. P. 757–768.
23. Икеда А. *Разработка высокопрочных трубных изделий для нефтегазового промысла, обладающих высокой стойкостью к сульфидно-коррозионному растрескиванию под напряжением*. Токио: *Сумитомо металл индастриз ЛТД*, 1978. 57 с.
24. *Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением*. М.: *Машиностроение*, 1990. 384 с.
25. Bohni H. Wasserstoffversprodnung bei Spannstaehlen // *Wersoffe und Korrosion*. 1975. No. 3. S. 199–207.
26. Nakasaws K., Fukutomi M., Kawabe Y. Effect of ion – plated aluminium coating on hydrogen embrettlement of ultrahigh strenght maraging stell // *Tetsu to hagane*. 1982. Vol. 46. No. 112. P. 1163–1167.
27. Nenck F., de Long. Evaluation of the Constant Strain Rate Test Method for Testing Stress Corrosion Cracking in Aluminium Alloys // *Corrosion*. 1978. Vol. 34. No. 1. P. 32–36.
28. Page R.A. Stress corrosion of 1–182 weld meld metal in high temperature water – the effect of a carbon steel couple // *Corrosion*. 1985. Vol. 41. No. 6. P. 338–341.

29. Ракова Т.М., Козлова А.А., Нефедов Н.И., Лаптев А.Б. Исследование влияния неорганических ингибиторов коррозии на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-12-12.
30. Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 6. С. 1–12.
31. Дьяков В.Г., Медведева М.Л., Степанов И.А., Филиновский В.Ю. Методика испытания сталей на стойкость против сероводородного коррозионного растрескивания // Химическое и нефтяное машиностроение. 1986. № 12. С. 19–20.
32. NACE Standards TM-01-77. Test Method. Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperature Approved. Houston: NACE Standards, 1977. P. 1–8.
33. Parkins R.N. Methods de ensayo de la corrosion bajo tension // Revista de Metalurgia. 1972. Vol. 8. No. 1. P. 117–132.
34. Перунов Б.В., Кушнарченко В.М., Пауль А.И. Качество и надежность сварных соединений трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие продукты // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. 1980. № 6. С. 19–21.
35. Difon W., Huiying P. Slow loading rate fracture mechanics method for stress corrosion test // International Congress Metals Corrosion (Toronto, June 3, 1984). Ottawa, 1984. Vol. 3. P. 573–577.
36. Hoey G.R., Revie R.W., Pamsingh R.R. Comparison of the slow strain rate technique and the NACE TM 01-77 tensile test for determining sulfide stress cracking resistance // Materials Performance. 1987. Vol. 26. No. 10. P. 42–45.
37. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Площадь свободной поверхности как критерий хрупкого разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
38. Alcantar-Modragón N., García-García V., Reyes-Calderón F., Villalobos-Brito J.C., Vergara-Hernández H.J. Study of cracking susceptibility in similar and dissimilar welds between carbon steel and austenitic stainless steel through finger test and FE numerical model // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 116. No. 7–8. P. 2661–2686.
39. Bulischek T.S., Van Rooyen D. Stress corrosion cracking of alloy 600 using the constant strain rate test // Corrosion. 1981. No. 10 (37). P. 597–607.
40. Кушнарченко В.М., Ильичев П.Л., Письменюк С.П., Уханов В.С. Защитные свойства покрытия из нитрида титана в сероводородсодержащих средах // Защита металлов. 1986. № 5. С. 811–813.
41. Moneuron K., Seferien D. Contribution à l'étude de l'influence de l'hydrogène sur la résilience du métal déposé soudage électrique à l'arc avec électrodes entrebees // Soudage et Techniques Commerces. 1959. No. 11. P. 183–189.
42. Шейн А.Б., Петухов И.В. Водородное охрупчивание деформируемой высокоуглеродистой стали и эффективность ингибиторной защиты // Защита металлов. 1985. № 4. С. 628–631.
43. Frignani A., Trabanelli G., Zucci F. The use of slow Strain Rate technique for studying stress corrosion cracking inhibitions // Corrosion Science. 1984. No. 11. P. 917–927.
44. ГОСТ 9.901-1.1–89. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание. М.: Изд-во стандартов, 1989. 11 с.
45. Hinton B.R., Procton R.M. The effect of Strain – rate and cathodic potential on the tensile ductility of X-65 pipeline steel // Corrosion Science. 1983. No. 2. P. 101–123.
46. Lawley D.N. The estimation of factor loadings by the method of maximum likelihood // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section AA. 1940. P. 64–82. URL: <http://acronymsandslang.com/definition/5917093/PROC+R+SOC+EDINB+A-meaning.html> (дата обращения: 12.03.2022).
47. Rajasekaran R., Lakshminarayanan A.K. Probing the stress corrosion cracking resistance of laser beam welded AISI 316LN austenitic stainless steel // Journal of Mechanical Engineering Science. Part C. 2021. Vol. 235 (17). P. 3299–3317.
48. Turn I.E., Wilde B.E., Troiano C.A. On the Sulfide Stress Cracking of line pipe steels // Corrosion. 1983. Vol. 39. No. 9. P. 364–370.
49. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств: метод. указания. М.: МАДИ, 2015. 64 с.
50. ГОСТ 6032–2017. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. М.: Изд-во стандартов, 2018. 75 с.

51. Малкин В.И. Экспрессный метод оценки склонности стали к водородному охрупчиванию // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1984. Т. 50. № 3. С. 26–29.
52. Kasahara K., Haruhiko A. Effect of Cathodic Protection Conditions on the Stress Corrosion Cracking of Line Pipe Steels // Teysu to hagane, Iron and Steel Inst. 1983. Vol. 69. No. 14. P. 1630–1637.
53. Кадырбеков Б.А. Методы оценки склонности сталей к коррозионному растрескиванию // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1986. Т. 52. № 8. С. 65–68.
54. Андрейкин А.Е., Панасюк В.В. Механика водородного охрупчивания металлов и расчет элементов конструкций на прочность. Львов: АН УССР; Физ.-мех. ин-т, 1987. 50 с.
55. Гриневиц А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // Вопросы материаловедения. 2013. № 1 (73). С. 220–229.
56. NACE TM0177 – Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H<sub>2</sub>S Environments. Houston: NACE Standards, 2006. P. 1–38.
57. Лаптев А.Б. Ингибиторы на основе ацеталей и их производных для защиты сталей от коррозионно-механического разрушения: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т, 1995. 125 с.
58. Кришталл М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. М.: Metallurgy, 1972. 400 с.
59. Левина И.Н. Влияние водорода и скорости деформации на характер разрушения стали 12Х18Н10Т. М.: ВИНТИ, 1983. 5 с.
60. Ebtehai K., Hardie D., Parkins R.N. The Stress Corrosion and preexposure embrittlement of Titanium in Metanolic Solutions of hydrochloric acid // Corrosion Science. 1985. No. 6. P. 415–429.
61. Адлер Ю.П., Грановский М.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 357 с.
62. ГОСТ 8.207–76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Изд-во стандартов, 1976. 34 с.
63. Катковнин В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных. М.: Наука, 1985. 335 с.
64. Поллард Д. Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.
65. Кушнаренко В.М., Стеклов О.И., Гутман Э.М. и др. Метод испытаний на коррозионное растрескивание с постоянной скоростью деформирования: Р 50-54-37-88. М.: ВНИИНМАШ, 1988. 20 с.
66. Кушнаренко В.М., Фот А.П., Уханов В.С. Ускоренные испытания материалов на коррозионное растрескивание // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Конструктивно-технологические методы повышения надежности и их стандартизация». Тула: ТПИ, 1988. С. 100.
67. Кушнаренко В.М., Климов М.И., Уханов В.С. К методам оценки сопротивления материалов коррозионному растрескиванию // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1989. № 10. С. 59–62.
68. Драйпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 260 с.

#### References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Mazalov I.S., Shurtakov S.V., Zaitsev D.V., Prager S.M. Structure and properties of EP648 and VZh159 alloys synthesized by selective laser melting after simulation annealing. *Materialovedenie*, 2020, no. 6, pp. 3–10.
2. Kablov E.N. Present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, pp. 012029.
4. Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kurshev E.V., Goryashnik Yu.S. Features of biodegradation of thermoplastics based on polyesters in different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
5. Getsov L.B., Laptev A.B., Puzanov A.I., Balandina M.Yu., Dobina N.I. Strength of powder material for GTE disks under the aggressive action of a mixture of sodium chlorides and sulfates. *Aviatsionnaya tekhnika*, 2019, no. 12, pp. 14–25.
6. Gutman E.M. *Mechanochemistry of metals and corrosion protection*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 232 p.

7. Erasov V.S., Oreshko E.I. Reasons for dependence of mechanical characteristics of material fracture resistance on sample sizes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
8. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Formation of new surfaces in a firm body at stages of elastic and plastic deformations, the beginning and destruction development. *Trudy VIAM*, 2018, no. 2, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
9. Kushnarenko V.M., Grintsov A.S., Obolentsev N.V. *Control of the interaction of metal with the working environment of the OGCF*. Moscow: VNIIEgazprom, 1989. 49 p.
10. *Method for determining the concentration of diffusion-mobile hydrogen in the metal of the structure*: certificate of authorship 1193562 USSR; filed 26.03.83; publ. 21.11.85.
11. *Method for assessing the corrosion resistance of materials*: certificate of authorship 1027585 USSR; filed 14.06.82; publ. 07.07.83.
12. Koval V.P. Influence of hydrogen sulfide and low temperatures on the tendency to corrosion-mechanical destruction of carbon steels. *Zashchita metallov*, 1979, no. 1, pp. 87–89.
13. Kopey B.V. Influence of hydrogen sulfide-containing oils on corrosion-mechanical destruction of structural steels. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti*, 1983, no. 10, pp. 2–3.
14. *Calculations and strength tests. Test methods for the tendency to corrosion cracking of steels and alloys in liquid media*: guidelines 185–86. Moscow: VNIINMASH, 1986, 51 p.
15. Stefanova S., Rachev X. *Handbook of corrosion*. Ed. N.I. Isaev. Moscow: Mir, 1982, 519 p.
16. Fot A.P. *Development of a complex of experimental equipment and methods of corrosion-mechanical testing*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Kurgan: Kurgan State University, 1998, 460 p.
17. Poperling R., Schwenk W. Wasserstoff – induzierte spannungs Korrosion von Stählen durch dynamisch plastische Beanspruchung in Promotor freien Electrolytlosungen. *Werkstoffe und Korrosion*, 1985, no. 9, pp. 389–400.
18. Riecke E., Johnen B. Wasserstoffinduzierende Spannungs-Korrosion in unverzinkten und verringerten Baustählen. *Werkstoffe und Korrosion*, 1986, bd. 37, no. 6, pp. 310–317.
19. Roogen D., Bulischek T.S. Stress corrosion cracking of alloy 600 using the constant strain rate test. *Corrosion*, 1981, vol. 37, no. 10, pp. 597–607.
20. Scully J.C. Mechanism of dissolution controlled cracking. *Corrosion Science*, 1978, vol. 12, no. 6, pp. 290–300.
21. Shreir L.L. Vebersicht der. electrochemischen Methoden zur Unersuchung von Wasser Stevsvveprue-ung und Spannungsrissskorrosion. *Werstoffe und Korrosion*, 1970, bd. 21, no. 5, 8, pp. 613–629.
22. Weeks I.R., Vyas B., Isaacs H.S. Environmental factors influencing stress corrosion cracing in boiling water reactor. *Corrosion Science*, 1985, vol. 5, no. 8, pp. 757–768.
23. Ikeda A. *Development of high-strength tubular products for the oil and gas industry with high resistance to sulfide stress corrosion cracking*. Tokyo: Sumitomo Metal Industries Ltd, 1978, 57 p.
24. Steklov O.I. *Stress corrosion resistance of materials and structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 384 p.
25. Bohni H. Wasserstoffversprodung bei Spannstaehlen. *Wersoffe und Korrosion*, 1975, no. 3, pp. 199–207.
26. Nakasaws K., Fukutomi M., Kawabe Y. Effect of ion – plated aluminium coating on hydrogen embrettlement of ultrahigh strenght maraging stell. *Tetsu to hagane*, 1982, vol. 46, no. 112, pp. 1163–1167.
27. Nenck F., de Long. Evaluation of the Constant Strain Rate Test Method for Testing Stress Corrosion Cracking in Aluminium Alloys. *Corrosion*, 1978, vol. 34, no. 1, pp. 32–36.
28. Page R.A. Stress corrosion of 1–182 weld meld metal in high temperature water – the effect of a carbon steel couple. *Corrosion*, 1985, vol. 41, no. 6, pp. 338–341.
29. Rakova T.M., Kozlova A.A., Nefedov N.I., Laptsev A.B. The study of influence organic and inorganic corrosion inhibitors on the stress-corrosion cracking high-strength steels. *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-12-12.
30. Shtremel M.A. On unity in diverse fatigue processes. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2011, no. 6, pp. 1–12.

31. Dyakov V.G., Medvedeva M.L., Stepanov I.A., Filinovskiy V.Yu. Method of testing steels for resistance to hydrogen sulfide corrosion cracking. *Khimicheskoye i neftyanoye mashinostroyeniye*, 1986, no. 12, pp. 19–20.
32. NACE Standards TM-01-77. *Test Method. Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperature Approved*. Houston: NACE Standards, 1977, pp. 1–8.
33. Parkins R.N. Methods de ensayo de la corrosion baio tension. *Revista de Metalurgia*, 1972, vol. 8, no. 1, pp. 117–132.
34. Perunov B.V., Kushnarenko V.M., Paul A.I. Quality and reliability of welded joints in pipelines transporting hydrogen sulfide-containing products. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti*, 1980, no. 6, pp. 19–21.
35. Difon W., Huiying P. Slow loading rate fracture mechanics mrthod for stress corrosion test. *International Congress Metals Corrosion* (Toronto, June 3, 1984). Ottawa, 1984, vol. 3, pp. 573–577.
36. Hoey G.R., Revie R.W., Pamsingh R.R. Comparison of the slow stroin rate technigue and the NACE TM 01-77 tensile test for determining sulfide stress cracking resistance. *Materials Performance*, 1987, vol. 26, no. 10, pp. 42–45.
37. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lucenko A.N. Area of a free surface as criterion of brittle fracture. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
38. Alcantar-Modragón N., García-García V., Reyes-Calderón F., Villalobos-Brito J.C., Vergara-Hernández H.J. Study of cracking susceptibility in similar and dissimilar welds between carbon steel and austenitic stainless steel through finger test and FE numerical model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 116, no. 7–8, pp. 2661–2686.
39. Bulischek T.S., Van Rooyen D. Stress corrosion cracking of alloy 600 using the constant strain rate test. *Corrosion*, 1981, no. 10 (37), pp. 597–607.
40. Kushnarenko V.M., Ilyichev P.L., Pismenyuk S.P., Ukhanov B.C. Protective properties of titanium nitride coating in hydrogen sulfide-containing environments. *Zashchita metallov*, 1986, no. 5, pp. 811–813.
41. Moneuron K., Seferien D. Contribution al'etude de L'Infaence de L'hydrogene sur la resilience du metal deponseen soudage electrique a l'arc avec electrodes entrebees. *Soudage et Techiques Commerces*, 1959, no. 11, pp. 183–189.
42. Shein A.B., Petukhov I.V. Hydrogen embrittlement of deformable high-carbon steel and the effectiveness of inhibitor protection. *Zashchita metallov*, 1985, no. 4, pp. 628–631.
43. Frignani A., Trabanelli G., Zucci F. The use of slow Strain Rate technique for studying stress corrosion cracking inhibitions. *Corrosion Science*, 1984, no. 11, pp. 917–927.
44. State Standard 9.90-1.1–89. *Metals and alloys. General requirements for test methods for corrosion cracking*. Moscow: Publishing house of standards, 1989, 11 p.
45. Hinton B.R., Procten R.M. The effect of Strain – rate and cathodic potential on the tensile dictility of X-65 pipeline steel. *Corrosion Science*, 1983, no. 2, pp. 101–123.
46. Lawley D.N. The estimation of factor loadings by the method of maximum likelihood. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section AA*. 1940, pp. 64–82. Available at: <http://acronymsandslang.com/definition/5917093/PROC+R+SOC+EDINB+A-meaning.html> (accessed: March 12, 2022).
47. Rajasekaran R., Lakshminarayanan A.K. Probing the stress corrosion cracking resistance of laser beam welded AISI 316LN austenitic stainless steel. *Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*. 2021, vol. 235 (17), pp. 3299–3317.
48. Turn I.E., Wilde B.E., Troiano C.A. On the Sulfide Stress Cracking of line pipe steels. *Corrosion*, 1983, vol. 39, no. 9, pp. 364–370.
49. Vakhromeev A.M. *Determination of the cyclic durability of materials and structures of vehicles: instructions*. Moscow: MADI, 2015. 64 p.
50. State Standard 6032–2017. *Steels and alloys are corrosion resistant. Test methods for resistance to intergranular corrosion*. Moscow: Publishing house of standards, 2018, 75 p.
51. Malkin V.I. Express method for assessing the propensity of steel to hydrogen embrittlement. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1984, vol. 50, no. 3, pp. 26–29.
52. Xasahara K., Haruhiko A. Effect of Catodic Protection Conditions on the Stress Corrosion Cracking of Line Pipe Steels. *Teysu to hagane, Iron and Steel Inst.*, 1983, vol. 69, no. 14, pp. 1630–1637.

53. Kadyrbekov B.A. Methods for assessing the tendency of steels to stress corrosion cracking. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1986, vol. 52, no. 8, pp. 65–68.
54. Andreikin A.E., Panasyuk V.V. *Mechanics of hydrogen embrittlement of metals and calculation of structural elements for strength*. Lvov: AN UkrSSR, Physical and mechanical university, 1987. 50 p.
55. Grinevich A.V., Lutsenko A.N., Karimova S.A. Durability of products and corrosion fatigue of structural materials. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 1 (73). pp. 220–229.
56. *NACE TM0177 – Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H<sub>2</sub>S Environments*. Houston: NACE Standards, 2006, pp. 1–38.
57. Laptev A.B. *Inhibitors based on acetals and their derivatives for the protection of steels from corrosion-mechanical destruction*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Ufa: Ufa State University Oil Tech. University, 1995. 125 c.
58. Krishtal M.A. *Mechanism of diffusion in iron alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1972. 400 p.
59. Levina I.N. *Influence of hydrogen and strain rate on the nature of fracture of steel 12Kh18N10T*. Moscow: VINITI, 1983, 5 p.
60. Ebtehai K., Hardie D., Parkins R.N. The Stress Corrosion and preexposure embrittlement of Titanium in Metanolic Solutions of hydrochloric acid. *Corrosion Science*, 1985, no. 6, pp. 415–429.
61. Adler Yu.P., Granovsky M.V. *Planning an experiment in the search for optimal conditions*. Moscow: Nauka, 1971. 357 p.
62. State Standard 8.207–76. *Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of observations*. Moscow: Publishing house of standards, 1976, 34 p.
63. Katkovnin V.Ya. *Nonparametric identification and data smoothing*. Moscow: Nauka, 1985. 335 p.
64. Pollard D. *Handbook of Computational Methods of Statistics*. Moscow: Finance and statistics, 1982. 344 p.
65. Kushnarenko V.M., Steklov O.I., Gutman E.M. et al. *Test method for corrosion cracking with a constant strain rate*: R 50-54-37-88. Moscow: VNIINMASH, 1988, 20 p.
66. Kushnarenko V.M., Fot A.P., Ukhanov B.C. Accelerated testing of materials for corrosion cracking. *Report All-Union. Sci.-Tech. Conf. "Constructive-technological methods for improving reliability and their standardization"*. Tula: TPI, 1988, p. 100.
67. Kushnarenko V.M., Klimov M.I., Ukhanov B.C. To methods for assessing the resistance of materials to corrosion cracking. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1989, no. 10, pp. 59–62.
68. Draper N., Smith G. *Applied regression analysis*. Moscow: Statistics, 1973. 260 p.

**Информация об авторах**

**Лаптев Анатолий Борисович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Закирова Лилия Ильдусовна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Загорских Ольга Анатольевна**, аспирант, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Павлов Михаил Рашитович**, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Anatoly B. Laptev**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Lilia I. Zakirova**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Olga A. Zagorskikh**, Postgraduate Student, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Mikhail R. Pavlov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.01.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 19.01.2022.