

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.178.2

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ В КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ¹

© А. В. Гриневич, А. Н. Луценко, В. С. Ерасов, Г. А. Нужный²

Статья поступила 22 февраля 2017 г.

Приведен анализ методов испытаний на вязкость разрушения в условиях длительного действия статической нагрузки и коррозионно-активной среды. С учетом недостатков известных методов предложена методика оценки вязкости разрушения конструкционных материалов в коррозионно-активной среде при действии длительной статической нагрузки, устанавливаемой с высокой точностью на испытательной машине, с последующей ее фиксацией распорным болтом. Методика позволяет определять нагрузку в образце в любой момент времени, а также исследовать кинетику коррозионного воздействия и изменения вязкости разрушения в условиях длительной статической нагрузки.

Ключевые слова: вязкость разрушения; коррозионное воздействие; статическая нагрузка.

Несущую способность конструкции при наличии трещины оценивают критериями механики разрушения [1]: силовыми (коэффициентами интенсивности напряжений K_c , K_{Ic}), деформационным (раскрытием δ в вершине трещины) и энергетическим (J -интегралом) [2]. Наиболее применяемым является силовой критерий разрушения, поскольку известны нагрузки, действующие на изделие. При эксплуатации конструкции одним из доминирующих факторов, определяющих ее долговечность, является воздействие влаги, приводящее к коррозионным повреждениям. Если для защиты от коррозионной среды сплошного твердого тела применяют антикоррозионные покрытия, то для тела с трещиной коррозионная среда действует непосредственно на ювенильную поверхность образовавшейся трещины. Можно утверждать, что коррозионная среда в условиях длительно действующей нагрузки приведет к изменению характеристик механики разрушения. Поэтому целесообразно рассмотреть существующие методики оценки влияния коррозионной среды на вязкость разрушения и, выявив их недостатки, разработать более совершенные, обеспечивающие получение более полной информации при испытаниях.

Методики оценки вязкости разрушения в коррозионной среде при длительной статической нагрузке

Влияние коррозионной среды на вязкость разрушения при длительном статическом нагружении оце-

нивают согласно стандарту [3]. Он включает оценку вязкости разрушения в условиях действия коррозионной среды как при плоской деформации ($K_{I\text{EAC}}$), так и при плосконапряженном состоянии (K_{EAC}) (EAC — environment-assisted cracking). Пороговый коэффициент $K_{I\text{EAC}}$ определяется как максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, при котором не наблюдается рост трещины, а габариты образца отвечают требованиям развития трещины в условиях плоской деформации согласно стандарту E399 [4], а K_{EAC} — как максимальное значение коэффициента интенсивности, при котором не наблюдается рост коррозионной трещины в условиях плосконапряженного состояния.

Стандарт предусматривает два варианта испытаний: первый предполагает испытание образцов с трещиной, нагружение которых обеспечивается «мертвым грузом», и второй вариант — нагружение в условиях заданной деформации, определяемой величиной раскрытия трещины, поддерживаемой с использованием распорного болта. Эти методики по испытанию материала в условиях длительно приложенной нагрузки и коррозионной среды [3] имеют положительные и отрицательные стороны.

Схема испытаний по стандарту [3] при постоянной нагрузке для разного типа образцов представлена на рис. 1.

Наиболее простой является схема испытания призматического образца изгибающим моментом

¹ Работа выполнена в рамках реализации комплексной проблемы 18.2 «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

² Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия; e-mail: viam660@yandex.ru

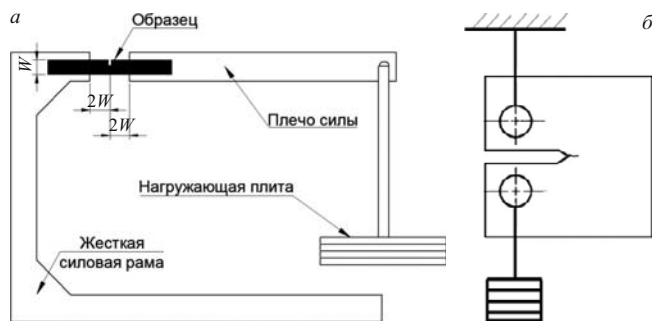


Рис. 1. Схемы коррозионных испытаний при постоянной нагрузке «мертвым грузом» призматического (а) и компактного (б) образцов

(рис. 1, а), поскольку увеличение длины рычага существенно снижает массу «мертвого» груза. Коррозионную среду в вершину трещины подают по каплям либо заполняют ею трещину полностью.

Для испытания компактного образца (рис. 1, б) необходима испытательная машина на длительную прочность, в которой вес «мертвого» груза увеличивается в несколько раз за счет системы рычагов. При вертикальном исполнении испытательной машины возникают проблемы подачи коррозионной среды в вершину трещины, а также долговечности самой испытательной техники, подвергающейся коррозии.

Принципиальным недостатком испытаний с постоянной нагрузкой является невозможность воспроизведения условий ускоренных испытаний, когда необходимо создавать мелкодисперсное распыление коррозионной среды (тумана с заданной концентрацией коррозионного агента) при повышенных температурах. Очевидно, что невозможно создание коррозионной камеры и испытательной установки для каждого образца, тем более с учетом длительности коррозионных испытаний (месяцы и годы) и необходимости исследования большого объема образцов.

Учитывая сложность реализации коррозионных воздействий при испытаниях образцов на вязкость разрушения для варианта постоянной нагрузки, стандарт [3] регламентирует испытания в условиях заданной постоянной деформации, характеризуемой заданным раскрытием трещины. Такие испытания позволяют обеспечить воздействие различных коррозионных сред в широком диапазоне температур благодаря использованию тропических камер и камер соляного тумана (КСТ). В одной камере можно разместить свыше сотни компактных образцов, что дает возможность проводить масштабные исследования материала.

Общий вид образца для испытания по стандарту ASTM [3] при фиксированном раскрытии трещины представлен на рис. 2. Отсутствие внешней нагружающей системы позволяет поместить данный образец в любую коррозионную среду как натурную, так и искусственно создаваемую в лабораторных условиях.

Коэффициент интенсивности напряжений для испытания в условиях постоянной деформации устанавли-

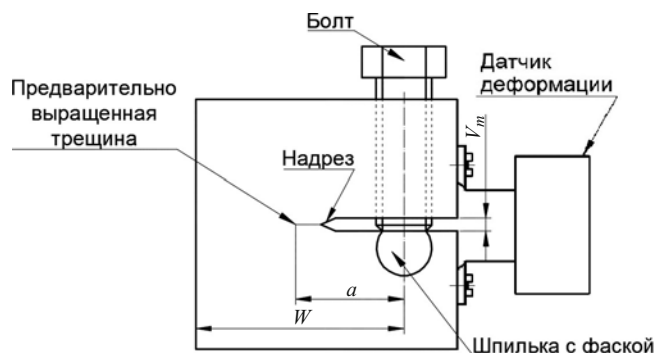


Рис. 2. Образец с фиксированным раскрытием трещины для испытания в коррозионной среде

ливают по датчику раскрытия трещины, а его значение определяют по формуле [3]

$$K = \frac{V_m E}{\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{1 - \frac{a}{W}} \times \left[0,654 - 1,88\left(\frac{a}{W}\right) + 2,66\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1,233\left(\frac{a}{W}\right)^3 \right], \quad (2)$$

где V_m — раскрытие трещины образца (см. рис. 2); E — модуль упругости; a — длина трещины [3, п. 8.8.2]; W — ширина образца [3, п. 8.8.3].

Для реализации методики испытаний при постоянной деформации требуется высокоточный датчик раскрытия трещины, в противном случае возможна существенная ошибка в установке заданного коэффициента интенсивности напряжений. Основным недостатком таких испытаний является неопределенность оценки действующей на образец нагрузки, задаваемой распорным болтом. Усилие закрытия трещины может существенно меняться как за счет ее продвижения, так и из-за релаксационных процессов в вершине трещины. Необходимость учета релаксации напряжений в образце предусмотрена в стандарте [3, п. 5.1.7]: «при релаксации, превышающей 5 % за 24 часа, метод испытаний при заданной деформации не пригоден для этих условий и должен быть рассмотрен метод испытаний с постоянной нагрузкой». Возникает проблема замера действующего усилия в образце, характеризующего усилие закрытия трещины. Стандарт не дает конкретного ответа на данный вопрос, предлагая оценить релаксацию на некотором модельном образце. Оценку изменения нагрузки согласно [3, п. 5.1.7] проводят на модельном образце с использованием электронного датчика силы, вмонтированного в болт. Предполагается, что болты с электронным датчиком силы доступны и могут быть легко приобретены. Тем не менее стандарт не снимает вопросов переноса дан-

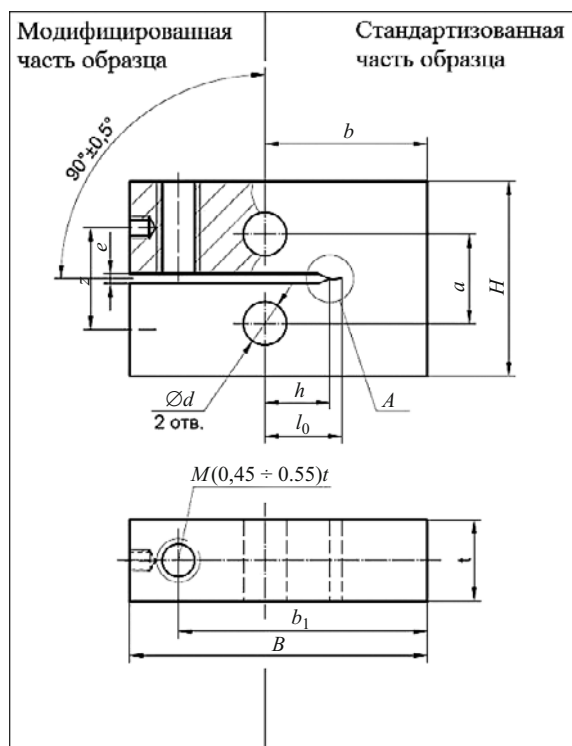


Рис. 3. Образец для испытания в коррозионной среде в условиях заданной деформации: $b = 2t$; $d = 0,5t$; $B \geq 3,6t$; $H \geq 2,4t$; $h = 0,35b - 0,50b$; $e \leq 0,06b$; $h_0 = 0,45b - 0,55b$; $a \leq 0,55b$; $b_1 = 3t$

ных по релаксации напряжений с модельного образца на исследуемый.

Отечественный стандарт [5] во многом аналогичен вышерассмотренному в части испытаний при заданной деформации — в нем предложено оригинальное решение для нагружения компактных образцов в устройстве, которое может быть помещено в любую коррозионную среду. Пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{\text{кр}}$ при испытании в условиях заданной деформации оценивается усилием на распорном болте, которое, в свою очередь, требует измерения раскрытия трещины. Стандарт [5] в меньшей степени, чем [3], детализирует методику испытаний, не уделяет внимания релаксационным процессам.

Однако основным недостатком обоих стандартов является определение силовых характеристик через деформационную оценку, что усложняет методики и снижает точность испытаний.

Новая методика оценки вязкости разрушения в условиях воздействия коррозионной среды

При разработке методики оценки воздействия коррозионной среды на вязкость разрушения при действии длительной статической нагрузки предпочтение отдали испытанию образцов в условиях заданной деформации. Данное решение позволяет выдерживать образцы с заданным раскрытием трещины в любых коррозионных условиях — натурных, лабораторных,

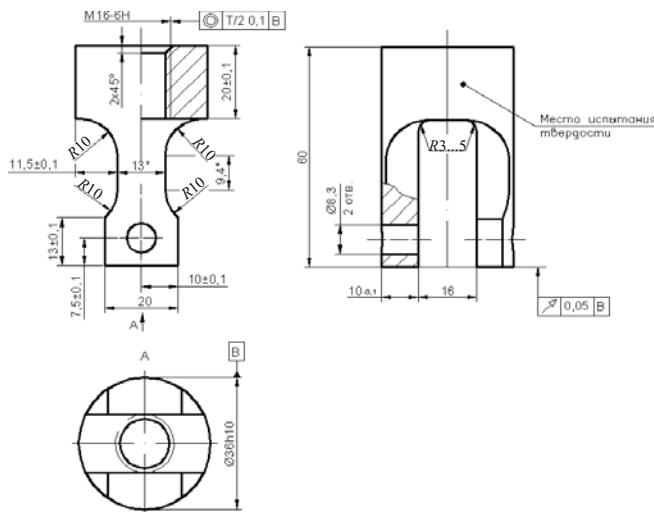


Рис. 4. Захваты для нагружения образцов с фиксацией нагрузки на испытательной машине

акваториях и пр. При этом возможно установление корреляционной связи между натурными и ускоренными испытаниями.

Конечная цель — определение нагрузки, действующей на образец в процессе испытаний.

Принято решение модернизировать компактный образец в соответствии со стандартом [2] (тип 3) или [4]. Сохранены все требования по изготовлению образца, условиям выращивания трещины и базовым геометрическим размерам, что позволило использовать расчетные формулы стандартов [2] или [4] при оценке коэффициентов интенсивности напряжений. Модернизация заключалась в удлинении образца для установления в него распорного болта. Схема образца представлена на рис. 3 [6]. Она позволяет точно задать коэффициент интенсивности напряжений для последующих испытаний в коррозионной среде, поскольку погрешность установки определяется высокой точностью датчиков нагрузки испытательной машины на растяжение. Заданная испытательной машиной нагрузка на образец фиксируется распорным болтом. Для фиксации нагрузки были модернизированы захваты (рис. 4), поскольку стандартные не обеспечивали подход к распорному болту.

Заневоленные образцы выдерживали в различных коррозионных средах. Затем в испытательной лаборатории оценивали действующую нагрузку на образец и определяли коэффициент интенсивности напряжений.

При этом образец устанавливали на испытательную машину, а датчик раскрытия трещины — на образец, который нагружали с регистрацией нагрузки и раскрытия трещины. Диаграмма нагрузка — раскрытие трещины на начальном участке нагружения представляет собой вертикальную прямую линию, поскольку усилие закрытия трещины превышает прикладываемую растягивающую нагрузку. Если диаграмма отклоняется от этой прямой, то это означает, что растягивающее усилие $P_{\text{раст}}$ испытательной маши-

ны полностью уравнило усилие закрытия трещины и распорный болт полностью разгружен. Схема определения усилия закрытия трещины, действующего в образце, представлена на рис. 5.

Разработанную методику опробовали на двух алюминиевых сплавах — 1163Т и В95пчТ2, широко применяющихся в авиационной промышленности. Толщины образцов — 15 мм.

Образцы нагружали на испытательной машине до уровня $0,8P_Q$, определенного при стандартных испытаниях на вязкость разрушения. Выдержку их в коррозионной среде проводили в Московском центре климатических испытаний (МЦКИ), Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ), а также в камере соляного тумана (КСТ). Образцы после шести и 12 месяцев выдержки подвергали статическому растяжению с определением вязкости разрушения и действующего в образце усилия закрытия усталостной трещины. Испытания по каждому пункту проводили на трех образцах. Попытка оценки вязкости разрушения непосредственно на заневоленном образце оказалась непродуктивной из-за невозможности точного определения нагрузки раскрытия трещины, соответствующей P_Q . Поэтому вязкость разрушения оценивали после среза болта, поскольку из-за коррозии вывернуть его не представлялось возможным.

Полученные значения усилия закрытия трещины в образцах сплавов 1163Т и В95пчТ2 представлены в табл. 1.

Установлено существенное снижение усилия закрытия трещины после экспозиции в КСТ как для сплава 1163Т (70 %), так и для сплава В95пчТ2 (49 %), что указывает на значительное коррозионное поражение в вершине трещины.

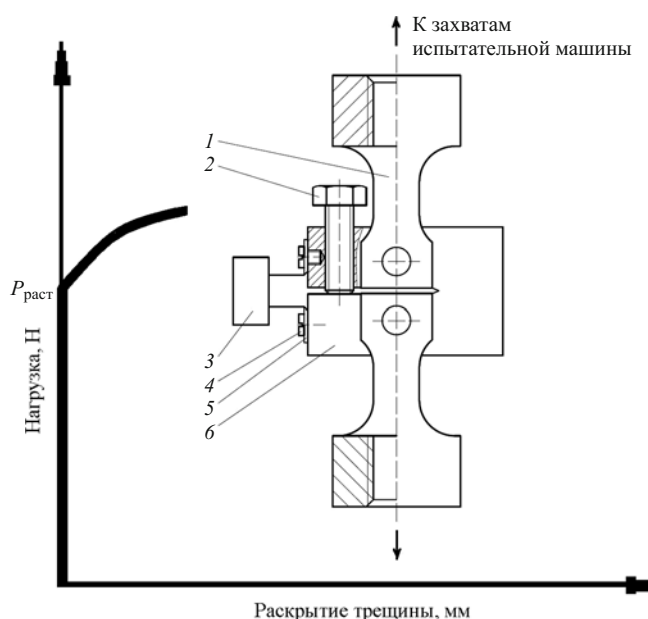


Рис. 5. Схема определения усилия закрытия трещины: 1 — захват; 2 — распорный болт; 3 — датчик раскрытия трещины; 4 — прижимной винт; 5 — ножи крепления датчика; 6 — образец

Результаты определения условной вязкости разрушения представлены в табл. 2. Условность вязкости разрушения обусловлена ее оценкой по начальной длине трещины. Если для сплава 1163Т имеет место ожидаемое снижение вязкости разрушения, то для сплава В95пчТ2 отмечено даже некоторое ее повышение. Результаты испытаний исследуемых сплавов при других уровнях нагружения и фрактография поверхностей разрушения представлены в работе [7].

Подобный эффект роста вязкости разрушения для сплава В95пчТ2 при очевидном коррозионном поражении в вершине трещины, на которое указывает сни-

Таблица 1. Усилия (H) закрытия усталостной трещины на образцах сплавов 1163Т и В95пчТ2 после экспозиций в различных коррозионных средах (уровень нагружения $0,8P_Q$)

Исходная нагрузка	МЦКИ		ГЦКИ		КСТ	
	6 мес.	12 мес.	6 мес.	12 мес.	6 мес.	12 мес.
Сплав 1163Т						
7060	6710 – 6810	6850 – 7100	6390 – 6460	5960 – 6240	2990 – 3510	2040 – 4290
Сплав В95пчТ2						
6650	6520 – 6620	6590 – 6870	6490 – 6550	6330 – 6400	4080 – 6050	3400 – 3660

Таблица 2. Условная вязкость разрушения (K_Q^y , МПа · м^{1/2}) образцов сплавов 1163Т и В95пчТ2 до и после экспозиций (уровень нагружения $0,8P_Q$)

Исходная вязкость разрушения	МЦКИ		ГЦКИ		КСТ	
	6 мес.	12 мес.	6 мес.	12 мес.	6 мес.	12 мес.
Сплав 1163Т						
33,5 – 37,5	37,6	38,8; 39,7	34,4	29,4; 30,1	24,2; 26,5	13,1; 16,7
Сплав В95пчТ2						
29,5 – 32,2	32,8	32,9; 33,9	31,5	30,3; 32,2	38,4; 39,6	29,1; 39,1

жение усилия ее закрытия, можно объяснить «затуплением» вершины трещины в процессе коррозионного поражения.

Таким образом, разработана методика испытания материала с трещиной в условиях постоянной деформации для оценки совместного воздействия на него коррозионно-активной среды и постоянной нагрузки.

Методика обеспечивает высокую точность испытаний и большую информативность, чем аналогичные стандартные (ASTM E1681 и ГОСТ 9.903–81), поскольку устранен основной недостаток этих стандартов — определение нагрузки через деформационную оценку.

Методика позволяет оценить коррозионное поражение материала в вершине трещины по величине изменения усилия закрытия трещины.

Установлено, что для сплава В95пчТ2 при коррозионном поражении материала в вершине трещины вязкость разрушения повышается за счет «затупления» вершины трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — Ижевск: ИКИ, 2012. — 872 с.
2. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 62 с.
3. ASTM E1681–99e1. Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials. Volume 03 01. July 2001.
4. ASTM E399–90 (1997). Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Volume 03 01. July 2001.
5. ГОСТ 9.903–81. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 21 с.
6. Пат. 148072 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00. Устройство для оценки вязкости разрушения конструкционных материалов / Каблов Е. Н., Луценко А. Н., Ерасов В. С., Гриневиц А. В., Нужный Г. А., Лавров А. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». — № 2014127989/28; заявл. 09.07.14; опубл. 27.11.14. Бюл. № 33.
7. Каблов Е. Н., Гриневиц А. В., Луценко А. Н., Ерасов В. С., Нужный Г. А., Гулина И. В. Исследование кинетики разрушения конструкционных алюминиевых сплавов при длительном действии постоянной нагрузки и коррозионной среды / Деформация и разрушение материалов. 2016. № 10. С. 22 – 34.

Materials mechanics: strength, durability, safety

UDC 620.178.2

METHOD OF FRACTURE TOUGHNESS ESTIMATION IN CORROSIVE MEDIA IN CONDITIONS OF LONG-TERM STATIC LOADING

© A. V. Grinevich, A. N. Lutsenko, V. S. Erasov, and G. A. Nuzhnyi

Submitted February 22, 2017.

Critical analysis of the methods of testing for fracture toughness in corrosive media under long-term load is presented. Bearing in mind the shortcomings of the known methods, we develop a technique for estimating the fracture toughness of structural materials in corrosive media under the impact of a long-term static load which is set with a high accuracy on testing machine and then fixed with a spacer bolt. The method provides determination of the effective load in the sample at any time of the exposure, which predetermines the possibility of studying the kinetics of corrosion attack and change in the fracture toughness in conditions of prolonged static loading and corrosive media.

Keywords: fracture toughness; corrosion attack; static loading

REFERENCES

1. Cherepanov G. P. Mechanics of fracture failure. — Izhevsk: IKI, 2012. — 872 p. [in Russian].
2. GOST 25.506–85. Calculation and testing strength. Methods mechanical testings of metals. Estimation of crack resistance (fracture toughness) characteristics at static loading. — Moscow: Izd. standartov, 1985. — 62 p. [in Russian].
3. ASTM E1681–99e1. Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials. Volume 03 01. July 2001.
4. ASTM E399–90 (1997). Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Volume 03 01. July 2001.
5. RF State Standard GOST 9.903–81. Methods of accelerated tests on stress-corrosion cracking. — Moscow: Izd. standartov, 1981. — 21 p. [in Russian].
6. RF Pat. 148072, MPK G 01 N 3/00. Device for estimation fracture toughness of constructional materials / Kablov E. N., Lutsenko A. N., Erasov V. S., Grinevich A. V., Nuzhnyi G. A., Lavrov A. V.; applicant and owner Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials». — N 2014127989/28; appl. 09.07.14; publ. 27.11.14. Byull. Otkryt. Izobret. N 33 [in Russian].
7. Kablov E. N., Grinevich A. V., Lutsenko A. N., Erasov V. S., Nuzhnyi G. A., Gulina I. V. Research of Kinetics of Destruction Constructional Aluminum Alloys by Long-term Action of Permanent Load and Corrosion Environment / Deformatsiya i razrushenie materialov. 2016. N 10. P. 22 – 34 [in Russian].