

УДК 620.193:669.175

П.Ф. Киричок¹

КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ: КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-106-116

Агрессивные среды, приводящие к возникновению коррозионных поражений конструкций, являются причиной значительного изменения физико-механических характеристик металлов и конструкций из них и, следовательно, уменьшения возможного срока их эксплуатации из-за снижения несущей способности и долговечности. Опасность подобного влияния среды на высоконагруженный материал связана еще и с тем, что в ряде случаев конструктивные элементы приходят в негодность за незначительные сроки эксплуатации, в том числе с возникновением аварийных ситуаций. В статье проведен анализ научно-технических литературных данных, нормативной документации и методик проведения испытаний на коррозионное растрескивание и методам нагружения испытываемых образцов. Особое внимание уделено испытаниям при постоянной деформации как наиболее распространенным и наименее затратным и испытаниям образцов при постоянной нагрузке. Указаны предпочтительные сроки проведения испытаний на коррозионное растрескивание различных металлов и сплавов.

Ключевые слова: коррозионное растрескивание, коррозия, алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, методы испытаний, водородное охрупчивание.

P.F. Kirichok¹

CORROSION CRACKING OF ALUMINUM ALLOYS AND STAINLESS STEELS: KEY FEATURES AND TEST METHODS (review)

Aggressive environments that lead to the occurrence of corrosion lesions of structures lead to significant changes in their mechanical characteristics and lead to a significant reduction in their bearing capacity and a decrease in durability. The danger of aggressive media exposure to highly loaded material is also due to the fact that in some cases the structural elements fail in a very short time, including with an emergency outcome. In the present work, the literature data, normative documentation and studies on the stress-corrosion cracking and loading methods of the test samples during the tests are analyzed. Particular attention is paid to tests with constant deformation, as the most common and least expensive test group and testing of samples under constant load. Recommendations are given on the timing of testing for stress-corrosion cracking of various metals and alloys.

Keywords: corrosion cracking, corrosion, aluminum alloys, stainless steels, test methods, hydrogen embrittlement.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Несмотря на активное развитие, неметаллические полимерные материалы не могут полностью компенсировать использование различных металлов и сплавов, подверженных коррозии в условиях агрессивности окружающей среды, во всех отраслях промышленности и машиностроения. Поэтому проведение исследований закономерностей

процессов коррозионного разрушения и разработка способов борьбы с коррозионной агрессивностью окружающей среды относятся к важным направлениям развития материалов и технологии [1–6].

Несмотря на множество работ, связанных с изучением термина «коррозионное растрескивание» (КР), противодействия возникновению коррозионных поражений и способов увеличения коррозионной стойкости металлических материалов, поиск ответов на данные вопросы по-прежнему остается востребованным. Это связано в первую очередь с тем, что большая часть элементов конструкций при эксплуатации подвергается продолжительным совместным воздействиям нагрузок и агрессивных рабочих сред. Использование металлических изделий и конструкций в подобных условиях связано с появлением коррозионных поражений и, соответственно, негативно сказывается на их кратковременных и длительных физико-механических характеристиках, является причиной изменения напряженно-деформированного состояния и существенно снижает их несущую способность и долговечность – в результате чего могут возникнуть аварийные ситуации и выход из строя механизмов раньше заявленных в ТТХ сроков [7–10].

Прежде чем перейти к методикам, направленным на изучение сопротивления металлов коррозионному воздействию при испытаниях на КР, следует разобраться в сути термина КР. Согласно информации, опубликованной в Corrosion Handbook, коррозионное растрескивание – это разрушение различных металлов и сплавов в ходе продолжительного одновременного воздействия на него коррозионных поражений и статических растягивающих напряжений. Воздействие циклических напряжений влияет на возникновение усталостного состояния материала, а сжатие не вызывает разрушения [11]. Процессу коррозионного растрескивания присущи следующие свойства:

- наличие хрупкого характера трещин;
- зарождение и рост трещин направлены перпендикулярно растягивающим напряжениям;
- образование межкристаллитных, транскристаллитных или смешанных трещин с разветвлениями;
- зависимость времени до растрескивания от уровня внешних приложенных растягивающих напряжений.

Если на металл не оказывается воздействие внешних напряжений, обычно происходит очень незначительное коррозионное разрушение, а при отсутствии коррозионной среды под воздействием напряжений отсутствуют и изменения механических характеристик металла. При одновременном воздействии внешних механических сил и химических реакций, напрямую связанных с коррозионной агрессивностью окружающей среды, наблюдается существенное снижение физико-механических свойств металлов, что может вызвать их структурное разрушение. Как правило, такое разрушение появляется в некоторых металлах с высокой пластичностью, медных и никелевых сплавах, коррозионностойких сталях при определенных условиях эксплуатационной среды и носит хрупкий характер. При исследовании механизма хрупкого разрушения из-за КР неоценимый вклад вносит исследование различий между отдельным воздействием факторов, вызывающих КР, и их одновременным воздействием.

Из вышеизложенного можно сделать выводы, что КР возникает только при одновременном продолжительном воздействии ряда внешних и внутренних факторов, таких как состав коррозионной среды, химический и фазовый состав сплава, характер и величина внутренних напряжений, неравномерность распределения растягивающих напряжений и т. п. При этом изменение этих факторов может привести к увеличению или уменьшению времени до полного разрушения. Так, при росте агрессивности окружающей среды и/или увеличении нагрузки уменьшается время до полного разрушения металла. Например, время до разрушения алюминиевого сплава 1441 в условиях постоянного

погружения в морскую воду составило в среднем 52 дня, при этом при той же величине приложенных напряжений в условиях открытой площадки разрушения данного сплава на протяжении последнего года обнаружено не было. На рис. 1 представлена микрофотография образца из алюминиевого сплава 1441, испытанного на четырехточечный изгиб, после разрушения в условиях постоянного погружения в морскую воду.



Рис. 1. Межкристаллитная коррозия ($\times 100$) в образце при четырехточечном изгибе алюминиевого сплава 1441 после 53 сут экспозиции при постоянном погружении в морскую воду (зона разлома)

Процесс коррозионного растрескивания условно можно разделить на три временных отрезка [12]:

I – постепенное образование первичных коррозионно-механических трещин (для большинства сплавов составляет 85% и более от общего времени до разрушения);

II – рост коррозионной трещины (переход к данной стадии сопровождается существенным увеличением скорости развития трещины);

III – разрушение металла.

Формула позволяет провести расчет зависимости времени до растрескивания τ от величины внешних приложенных растягивающих напряжений σ [13]:

$$(\sigma - \sigma_{кр})\tau = K, \quad (1)$$

где K – константа; $\sigma_{кр}$ – критическое или пороговое напряжение, ниже которого сплав в данной коррозионной среде не обнаруживает коррозионного растрескивания.

В большинстве случаев к КР может привести лишь наличие напряжений, приближающихся к пределу текучести, но процесс растрескивания может возникнуть при напряжениях, значительно меньших предела текучести. Зафиксировано наличие у некоторых систем сплавов так называемой «пороговой» величины напряжений, при пересечении границы которой в сторону уменьшения снижается риск КР. Можно также утверждать, что именно величина напряжения в процессе разрушения металлов имеет основное влияние в тот отрезок времени, который наиболее приближен к моменту полного разрушения металла. Сроки экспозиции образцов до полного разрушения не связаны со временем приложения напряжения (начало испытания или последующие стадии).

Водородное охрупчивание сплавов и сталей и его влияние на процесс коррозионного растрескивания

Коррозионное растрескивание часто рассматривают как явление, связанное с водородом (водородная хрупкость), поступающим в металл из окружающей среды – в том числе в результате коррозионной реакции, связанной с влагой из гидратированных солей. При этом для зарождения трещины не всегда требуется наличие поверхностных дефектов.

Таким образом, можно утверждать, что воздействие внешнего водорода сильно сказывается на механизме и кинетике КР в условиях коррозии под напряжением и связано со снижением прочности и пластичности металлических конструкций. В результате происходит возникновение и накопление в металле внешних дефектов и, как следствие, разрушение (в том числе аварийное) конструкции при даже слабо меняющейся нагрузке. Особенно сильно от водородного охрупчивания страдают коррозионностойкие стали, применяемые в трубопрокате.

Частным случаем водородной хрупкости, присущей в основном коррозионно-стойким сталям, является сульфидное коррозионное растрескивание (СКР) – результат сложного и многофакторного взаимодействия сероводородной среды с металлом. Скорость наводороживания при сульфидной коррозии определяется фазовым и химическим составом продуктов коррозии, их кристаллическим и электронным строением, механическими характеристиками и толщиной коррозионного слоя, режимом термообработки, размером зерна, формой неметаллических включений и расположением легирующих добавок [14, 15].

Растрескивание по механизму водородного охрупчивания требует выполнения зависимости

$$\sigma = A + K\tau^{-1/2}, \quad (2)$$

где A и K – коэффициенты, меняющиеся в зависимости от содержания H_2S в растворе; σ – разрушающее напряжение; τ – время до разрушения.

Экспериментально показана прямолинейность зависимости $\sigma = f(\tau^{-1/2})$, что свидетельствует об определяющем значении водородного охрупчивания при СКР.

Применительно к СКР сопоставлено три возможных механизма разрушения.

1. Рост трещины с поверхности вследствие повышения скорости коррозии на концентраторах механического напряжения:

$$(\sigma - A)/\tau = M, \quad (3)$$

где A и M – постоянные.

2. Адсорбционное воздействие атомарного водорода по формуле:

$$(\sigma - A)\tau = M, \quad (4)$$

где A и M – постоянные.

3. Проникновение водорода в структуру металла, концентрирование его на внутренних дефектах, охрупчивание и в заключение – разрушение металла в зависимости от значений σ и τ :

$$\sigma^2 C_H \tau = B, \quad (5)$$

где C_H – содержание водорода в стали; B – константа [11].

Методы испытаний на коррозионное растрескивание

Основной целью проведения испытаний на КР является фиксирование экспериментальных данных по коррозионной стойкости материалов в наиболее сжатые сроки. Чаще всего это достигается путем значительного увеличения нагрузки (по сравнению с эксплуатационной) на металл, добавления дополнительных реагентов в испытательной среде, нанесение регламентированных дефектов (трещин) и электрохимической активации. При этом изменение данных параметров не должно влиять на процессы, связанные с разрушением материала.

Для испытаний на КР образцы изготавливают из тонколистовых заготовок, поковок, отливок и других видов полуфабрикатов с учетом формы и габаритов образцов, направления прокатки, ориентации опытных образцов по отношению к форме и ориентации зерен, в том числе с учетом уже имеющихся в металле напряжений, равно как и наличия «посторонних» включений. Эти критерии являются основными и требуют

должного контроля над ними, так как сказываются на погрешности полученных результатов, ходе проведения испытания, а также на стоимости его проведения. Например, испытания крупногабаритных образцов и небольших конструкций, обладая повышенной точностью получения требуемых характеристик и возможностью исключения общей и точечной коррозии, имеют ряд ограничений: большие затраты на производство и приобретение исходных материалов; наличие поставки в требуемом металлургическом состоянии; технические возможности испытательного оборудования.

Неверный выбор направления прокатки при изготовлении опытных образцов может привести к получению недостоверных результатов, в связи с этим ОСТ 1 90212–76 рекомендует, чтобы направление вырезки образцов было идентичным направлению деформации полуфабриката и действующим усилиям в детали, а испытания алюминиевых сплавов позволяют сделать выводы, что:

- вдоль направления прессования при напряжении изгибом КР не оказывает влияния на образцы;
- и вдоль, и поперек направления прокатки при одноосном растяжении образцов скорость КР возрастает (скорость КР при растяжении образцов поперек направления прокатки значительно больше, чем при продольном направлении);
- при поперечном напряжении образцов при одноосном растяжении в случае изготовления образцов прессованием скорость КР значительно увеличивается;
- заметное влияние толщины образца на КР отсутствует.

Согласно мнению Хоккера и Вайсмана, алюминиевые сплавы имеют максимальную устойчивость в продольном направлении деформации (l_1), меньшую – в направлении l_2 и самую малую – в направлении l_3 (рис. 2) [16].

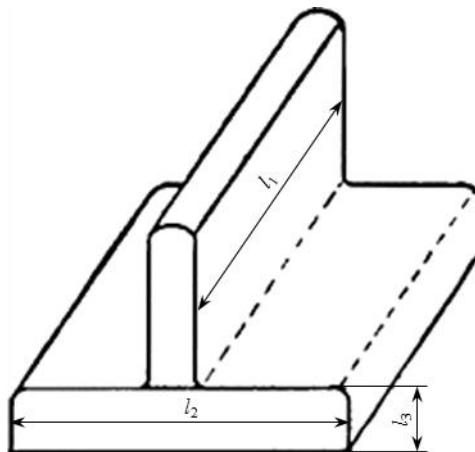


Рис. 2. Направления деформации образцов:
 l_1 – продольное; l_2 – большое поперечное; l_3 – малое поперечное

В случае использования разрушенных деталей в качестве опытного материала образцы для экспозиции отбирают только из зон, свободных от трещин.

Различают три основные группы способов нагружения образцов при испытаниях на КР:

- постоянная деформация;
- постоянная нагрузка;
- деформация с малой скоростью.

При этом следует отметить, что методы нагружения испытываемых образцов, указанные в отечественных нормативных документах, не имеют существенных отличий от методов, рекомендованных зарубежными стандартами.

В данной работе проведен обзор в основном гладких плоских образцов и методик испытаний при постоянной деформации как максимально распространенной в мировой практике, что напрямую связано с наличием большого количества видов испытаний на изгиб, использованием более простых, а следовательно, и максимально бюджетных образцов и нагружающих приспособлений. Кроме того, данные испытания имитируют нагрузки, связанные с производством изделий и использованием материалов в эксплуатационных условиях, а также испытания образцов при постоянной нагрузке, позволяющие фиксировать результаты коррозионной стойкости большого количества образцов, что имеет колоссальное значение при разработке новых сплавов. Наиболее часто используемыми методами являются:

- испытания на изгиб (в частности испытания U-образных образцов);
- испытания C-образных образцов;
- испытания при растяжении.

Методы испытаний при изгибе U-образных образцов и различного рода дуг позволяют проводить исследования чувствительности к КР материалов, из которых можно изготовить плоский образец прямоугольного поперечного сечения (листов, пластин, плит, плоских штампованных материалов и т. д.), а также литого материала, проволоки, прутков с механически обработанным круглым поперечным сечением, сварных соединений.

Получение U-образных образцов достигается путем изгиба полосы на 180 градусов вокруг оправки с заданным радиусом. При изготовлении образцов следует учитывать физико-механические характеристики материала и наличие дефектов. Например, образцы, изготовленные из высокопрочного материала, могут быть восприимчивы к высоким скоростям роста трещины, а образец, содержащий более одной трещины, может расколоться.

Несмотря на преимущества использования U-образных образцов вследствие простоты и экономической выгоды в производстве, эта методика имеет несколько недостатков: отсутствие информации об условиях, при которых произойдет КР; широкий диапазон напряжений, существующий в нагруженном образце. Эти недостатки не позволяют проводить изучение эффектов от различных прикладываемых к образцам напряжений при КР и переменных факторов окружающей среды, оказывающих минимальное влияние на растрескивание. Методика направлена на обнаружение кардинальных отличий по стойкости к коррозионному растрескиванию: *a* – различных металлов в одной и той же среде; *b* – одного металла в различных металлургических условиях в той же среде; *v* – одного металла в нескольких средах.

Аппроксимация деформации (ε) снаружи изгиба образца осуществляется по следующей формуле:

$$\varepsilon = t/2R, \text{ при } t \ll R, \quad (6)$$

где t – толщина образца, мм; R – радиус изгиба, мм.

Более подробно с методом испытаний на U-образный изгиб можно ознакомиться в ГОСТ 9.901.3–2007 и ASTM G30.

Опыт проведения испытаний показывает необходимость задания нескольких величин нагружения на опытные образцы при испытаниях на изгиб. При этом нагружение проводится в специальном нагружающем устройстве. В мировой практике существует четыре вида изгиба образцов для проведения испытаний:

- двухточечный изгиб;
- трехточечный изгиб;
- четырехточечный изгиб;
- сварной образец с двойным лучом изгиба.

Максимально простым способом нагрузки является двухточечный изгиб, который позволяет проводить испытания только относительно тонкого листового или волоочного материала. Расчет величины упругого напряжения в середине образца осуществляется по следующей формуле:

$$\sigma = (ktE)/(L/\sin^{-1}(H/ktE)), \quad (7)$$

где σ – максимальное напряжение; E – модуль упругости; L – длина образца; H – длина держателя; t – толщина образца; k – эмпирическая константа ($k=1,280$).

В зарубежной научно-технической литературе как наиболее часто используемый из-за простоты применения нагрузки описывается метод испытаний на трехточечный изгиб. Нагрузка образца при данном способе нагружения задается путем поворота болта в буровой установке. Расчет упругого напряжения в середине образца проводят по следующей формуле:

$$\sigma = 6Ety/H^2, \quad (8)$$

где σ – максимальное растягивающее напряжение; E – модуль упругости; t – толщина образца; y – максимальное отклонение; H – длина держателя.

Тем не менее этот метод обладает рядом недостатков:

- большой риск образования и развития разнородной, в том числе щелевой, коррозии в зоне болта;
- изменение условий напряжения (внешний слой образца подвергается сложному сочетанию растягивающих и изгибающих напряжений, что приводит к отклонению распространяющейся трещины от осевой линии).

В связи с этим можно сделать вывод, что, несмотря на явные преимущества, трехточечный изгиб имеет смысл рассматривать только из соображений методики определения восприимчивости к КР под напряжением [17].

В отечественной практике наиболее часто применяется метод испытаний на четырехточечный изгиб, который при наличии всех преимуществ, характерных для методов испытаний при изгибе, перечисленных выше, не обладает их недостатками. Методика является единственной указанной в отечественной нормативной документации и позволяет обеспечить равномерное растягивающее напряжение на относительно большой площади образца с возможностью его поддержания во время роста трещины.

Стрела прогиба для алюминиевых, магниевых сплавов (f_i) и стальных образцов (f) определяется согласно ГОСТ 9.019–74 и ОСТ1 90212–76 по формулам (9) и (10) соответственно. Погрешность вычисления стрелы прогиба для алюминиевых и магниевых сплавов не должна выходить за рамки $\pm 0,02$ мм:

$$f_i = 5,75\sigma l^2 / 27E\delta, \quad (9)$$

где σ – расчетное напряжение, МПа; l – расстояние между опорами в скобе, мм; E – модуль упругости, МПа; δ – толщина плоского образца или внешний диаметр цилиндрического образца, мм;

$$f = \sigma_3(3l^2 - 4a^2) / 12Eh, \quad (10)$$

где E – модуль упругости, МПа; h – толщина образца, мм; σ_3 – заданное напряжение, МПа; l, a – расстояние между опорами, мм;

$$\sigma_3 = K\sigma_{0,2} \quad (K \text{ – заданная доля } \sigma'_{0,2});$$

$\sigma'_{0,2}$ – предел текучести при изгибе, МПа;

$$\sigma'_{0,2} = 1,5\sigma_{0,2} \left(1 - \frac{A^2}{3} \right), \quad A = \sigma_{0,2} / (\sigma_{0,2} + \delta_{0,2}E),$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при растяжении, МПа; $\delta_{0,2}$ – коэффициент, равный 0,002.

Для определения восприимчивости к КР сплавов для различных конструктивных форм (в частности, различного рода труб, стержней, полуфабрикатов в высотном – наиболее слабом направлении и т. п.) оптимально подходит и рекомендуется практика проведения испытаний С-образных образцов (колец) – рис. 3. Нагружение образцов при данном методе испытаний производится за счет сжатия кольца по диаметру в струбцине или с помощью стяжной шпильки согласно ГОСТ 9.019–74. Величину деформации в миллиметрах (f) при заданной нагрузке можно вычислить по следующей формуле:

$$f = (\sigma D^2 \pi) / 4 \delta E, \quad (11)$$

где D – внешний диаметр кольца, мм; δ – толщина стенки кольца, мм; E – модуль упругости, МПа.

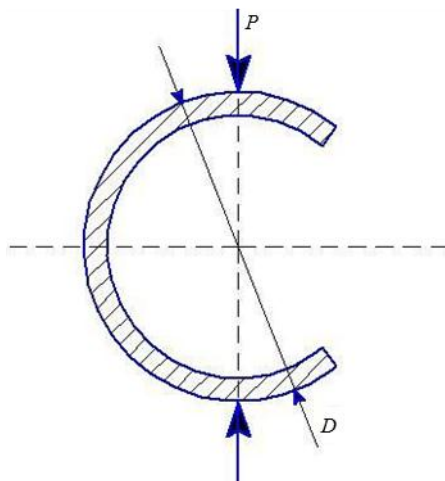


Рис. 3. Схема С-образного образца (кольца):
 D – внешний диаметр; P – подаваемая нагрузка

Круговые упругие напряжения (σ_c) и поперечные упругие напряжения (σ_t) в С-образных образцах рассчитываются по формулам (12) и (13) и более точно могут быть определены путем закрепления на поверхности нагруженных опытных образцов периферических и поперечных тензодатчиков:

$$\sigma_c = E(1 - \mu^2)(\varepsilon_c + \mu\varepsilon_t); \quad (12)$$

$$\sigma_t = E(1 - \mu^2)(\varepsilon_t + \mu\varepsilon_c), \quad (13)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ε_c – окружная деформация; ε_t – поперечная деформация [17].

Разработка и изготовление новых сплавов требуют фиксирования всех физико-механических параметров с целью глубокого понимания преимуществ разработанного материала перед ранее используемым, а также составления паспорта материала. Для этого требуется провести в том числе и оценку огромного количества образцов, изготовленных из новых металлов и сплавов, на коррозионную стойкость. Для этой цели пригодны образцы, используемые для испытаний при растяжении, если измерения характеристик при растяжении на воздухе адаптировать к испытаниям на КР, как описано в ASTM G49–85 и ГОСТ 9.901.1–89, ГОСТ 9.901.4–89. При одноосном нагружении на растяжение способ задания напряжения является простым и однородным, а величина приложенного напряжения может быть точно измерена. Сущность метода испытаний при постоянной нагрузке заключается в создании модели разрушения при КР от приложенных или рабочих постоянных нагрузок (имитация условий эксплуатации). Поскольку эффективное поперечное сечение образца уменьшается по мере развития трещин, то

напряжения увеличиваются, что, скорее всего, приводит к более быстрому разрушению или к полному разрушению образца, чем при испытаниях при постоянной деформации. Помимо этого возможность одновременного проведения испытаний нескольких образцов на одной испытательной установке позволяет снизить стоимость проведения данного рода испытаний. Кроме того, соединение одноосных образцов на разрыв в испытательной камере проводится с помощью простых нагружающих соединений.

При проведении испытаний при постоянной нагрузке следует учитывать, что по мере развития трещин происходит повышение напряжения, следовательно, в отличие от испытаний при постоянной деформации при напряжениях ниже пороговых, зародившиеся трещины продолжают распространяться. Таким образом, пороговое напряжение, определенное при постоянной нагрузке, может быть ниже, чем при постоянной деформации.

Отдельного внимания заслуживают испытания на КР в лабораторных условиях с заданными характеристиками агрессивности окружающей среды (температура, наличие распыления солевых растворов/морской воды, испытания при постоянном/переменном погружении), позволяющие провести имитацию среды, в которой эксплуатируется материал или конструкция. Данные испытания могут быть полезны в условиях, когда невозможно задать требуемые условия эксплуатационной среды в условиях исследовательского центра из-за определенных причин.

Примером подобного рода испытаний могут быть испытания образцов на КР при переменном погружении и лабораторные испытания при одновременном воздействии высоких температур и растворов солей.

Испытания на восприимчивость к КР в горячей среде предназначены для определения относительной восприимчивости к водородному охрупчиванию и растрескиванию металлов, а также пороговых уровней температуры, приводящих к этим процессам. Суть данных испытаний состоит в поочередном циклическом воздействии на опытные образцы распыления растворов солей (рекомендован раствор 3,5%-ного NaCl) и нагрева в лабораторных печах до температуры от 230 до 540°C (температура нагрева (сушки) зависит от типа используемой соли). Плотность соли на образцах должна варьироваться от 0,155 до 155 г/м² (при стандарте в 15,5 г/м²). Следует избегать возникновения сухого и непрерывного солевого покрытия, перекрывающего доступ атмосферного воздуха к образцу, так как это может привести к торможению роста микротрещин и зарождению новых трещин. Нагружение образцов при этих лабораторных испытаниях производится в зависимости от их типа (кольца, дуги, образцы для испытаний при постоянной нагрузке) согласно соответствующей им нормативной документации. Испытание с помощью горячей соли применительно к металлам используется в качестве вторичного индикатора при рассмотрении конструкции, поскольку растрескивание происходит при лабораторных испытаниях, имитирующих возможные, а не фактические условия эксплуатации [18, 19]. Более подробно с данным методом испытаний на КР можно ознакомиться в ASTM G41–99.

Испытания при постоянном/переменном погружении в солевой раствор/морскую воду предназначены для имитации условий эксплуатации некоторых алюминиевых, магниевых сплавов и сталей, используемых в гидроавиации и судостроении, они могут проводиться как при комнатной температуре, так и в реальных условиях окружающей среды. Достоверность результатов возрастает по мере достижения условий, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Испытания при переменном погружении проводятся по следующему циклу: 10 мин в воде+50 мин сушки до образования КР. Более подробно об испытаниях при постоянном и переменном погружении можно узнать в ASTM G44–99 и ГОСТ 9.913–90.

Для всех методов испытаний на КР отечественная и зарубежная нормативная документация рекомендует использовать от пяти до десяти образцов при неограниченном сроке экспонирования, что может привести к нерациональному использованию рабочего пространства и людских ресурсов с учетом того, что подобные испытания могут продолжаться десять и более лет без возможности получения каких-либо дополнительных научных данных при большом диапазоне временных рамок от начала экспонирования до разрушения для каждого отдельно взятого образца. Например, при испытании образцов из сплава ВНС-57 на КР при четырехточечном изгибе в условиях умеренно теплого прибрежного климата ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова из 50 образцов на протяжении более 10 лет произошло разрушение только пяти. При этом четыре образца разрушились в среднем после 1900 сут экспозиции, разрушение еще одного образца произошло только спустя 5340 сут от начала испытаний. Аналогичная ситуация отмечена и при других методах испытаний и условиях экспозиции. В связи с этим в 2015 г. сотрудниками ФГУП «ВИАМ» был разработан СТО 1-595-591-499–2015, регламентирующий в том числе и продолжительность коррозионных испытаний. Рекомендованные сроки экспозиции для испытаний на КР различных металлов и сплавов указаны в таблице.

**Рекомендованные сроки экспозиции различных металлов и сплавов
при проведении испытаний на коррозионное растрескивание**

Класс материалов	Условия экспозиции	Срок испытаний
Алюминиевые сплавы	Открытая площадка и навес с ежедневным обливом 3%-ным раствором NaCl/морской водой/раствором морской соли	До разрушения, но не более 2 лет
Стали коррозионностойкие (основной металл, сварные образцы, образцы с покрытиями (ЛКП, гальванические, ИПП и др.), без покрытий)	Открытая площадка, навес, жалюзийная будка, склад	До появления трещин или разрушения образца, но не более 10 лет
Магниеые сплавы	Открытая площадка, навес	До появления трещин или разрушения образца, но не более 10 лет

Заключения

Проведенный научно-технический литературный обзор показывает, что термин «коррозионное растрескивание» как разрушение металла за счет совместного воздействия на него коррозии и статических растягивающих напряжений – с выработанными и устоявшимися в мировом сообществе методиками проведения испытаний – является в настоящее время достаточно известным в научных кругах. В последнее время получено достаточное количество экспериментальных данных по кинетике коррозионного растрескивания с возможностью их использования для построения моделей коррозионного растрескивания и водородного охрупчивания материалов. Тем не менее говорить о достаточно полном знании всех процессов и способов защиты материалов от коррозионного поражения преждевременно, проблема коррозии и коррозионного растрескивания остается актуальной и требует дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 157–167.
4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
5. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002*. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
7. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
8. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // *Вопросы материаловедения*. 2016. №1 (85). С. 116–127. URL: <http://www.crismprometey.ru> (дата обращения: 03.05.2018).
9. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.05.2018). DOI:10.18577/2307-6046-2014-0-7-10-10.
10. Синявский С.В. Соппротивление титановых сплавов различным видам коррозионного растрескивания // *Технология легких сплавов*. 2010. №4. С. 80–85.
11. Овчинников И.И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание // *Науковедение: интернет-журнал*. 2012. №4 (13). С. 1–11. URL: <http://www.naukovedenie.ru> (дата обращения: 03.05.2018).
12. Герасимов В.В., Герасимова В.В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сталей. М.: *Металлургия*, 1976. 176 с.
13. Корчагин А.П. О влиянии водорода на предел текучести стали // *Известия АН СССР. Сер.: Металлы*. 1973. №5. С. 202–203.
14. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Роль границ зерен в охрупчивании высокопрочных коррозионностойких сталей // *Металлы*. 2002. №1. С. 35–41.
15. Kablov E.N., Krivonogov G.S. Effect of hydrogen on reliability of high-strength corrosion-resistant steels // *Russian metallurgy (Metally)*. 2002. No. 1. P. 42–51.
16. Романов В.В. Коррозионное растрескивание металлов. М.: *Машгиз*, 1960. С. 166–169.
17. Koch G.H. Tests for Stress-Corrosion Cracking // *Advanced Materials & Processes*. August, 2001. URL: <http://www.asminternational.org> (дата обращения: 03.05.2018).
18. Захарова Л.В. Влияние химического состава, термической обработки и структуры на стойкость титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №9 (45). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-11-11.
19. Захарова Л.В. Влияние кислорода воздуха и толщины солевых отложений на коррозионное растрескивание титановых сплавов при высоких температурах в контакте с NaCl // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №10. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-12-12.