

УДК 620.193

**С.Ю. Некрасова, Т.В. Ольшанская**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ  
ДЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ (ОБЗОР)**

Рассмотрены методы исследования процесса коррозионного растрескивания для сварных соединений. Проведено теоретическое сравнение способов испытаний и их применения.

**Ключевые слова:** коррозионное растрескивание, сварные соединения, напряжения, коррозионная среда, трещиностойкость.

**S.Ju. Nekrasova, T.V. Olshanskaya**

Perm National Research Polytechnic University

**APPLICATION METHODS OF CORROSION CRACKING  
FOR WELDED (OVERVIEW)**

The methods of the research process for stress corrosion cracking of welded joints. A theoretical comparison of the test methods and their applications.

**Keywords:** corrosion cracking, welded joints, stress, corrosive environment, crackid resistance.

Сварные соединения являются наиболее важными местами металлоконструкций. Процесс сварки неизбежно приводит к изменениям в микроструктуре металла, что впоследствии влияет на его коррозионные свойства. Кроме того, в сварном соединении после сварки присутствуют остаточные напряжения, которые могут приводить к появлению дефектов. Учитывая эти факторы и считая, что на сварную конструкцию одновременно действуют механическая нагрузка и агрессивная среда, можно прогнозировать возникновение коррозионного растрескивания сварного соединения во время эксплуатации изделия (рис. 1). Основным риском является то, что данный вид разрушения может привести к неожиданной поломке конструкции без каких-либо видимых наружных изменений.

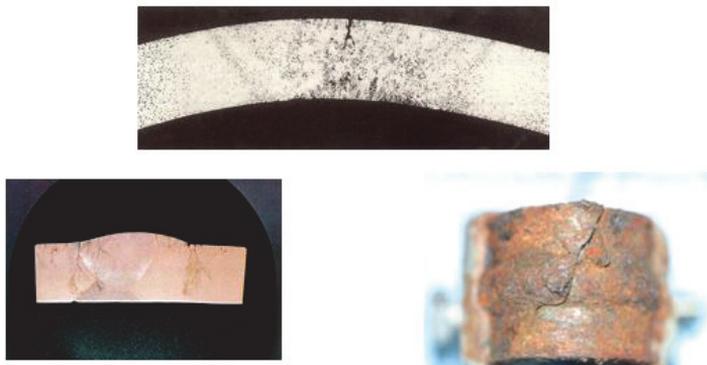


Рис. 1. Коррозионное растрескивание на сварных швах

Склонность металлических конструкций к разрушению в активных рабочих средах при одновременном воздействии механических нагрузок определяется тремя основными условиями: 1) свойствами металла (как перед изготовлением конструкции, так и после технологической обработки, в данном случае сварки); 2) напряженным состоянием (упругопластические деформации и напряжения I и II рода); 3) воздействием среды<sup>1</sup>.

Наиболее часто коррозионное растрескивание происходит: в системах из конструкционных сталей – в растворах кислот, щелочей, нитратов, сероводорода; нержавеющей сталей – в горячих растворах хлоридов; высокопрочных алюминиевых сплавов – в растворах хлоридов.

При оценке показателей коррозионного растрескивания сварных соединений используются такие характеристики, как время или число циклов нагружения до растрескивания, пороговые напряжения, коэффициенты интенсивности напряжений и т.д.

Методы испытаний сварных соединений на коррозионное растрескивание можно объединить в три группы: 1) испытания для оценки сопротивления зарождению разрушения; 2) испытания на коррозионную трещиностойкость; 3) испытания макетов и узлов в условиях, приближенных к реальным [1].

**1. Испытания для оценки сопротивления зарождению разрушения.** Для проведения опытов с первой группой разработан ГОСТ 26294–84 «Соединения сварные. Методы испытаний на коррозионное

---

<sup>1</sup> Cottis R.A. Guides to Good Practice in Corrosion Control. Corrosion and Protection Centre, 2000. – P. 2–9.

растрескивание», который устанавливает 4 метода испытаний: 1) при постоянной нагрузке, 2) при постоянной деформации, 3) с остаточными напряжениями, 4) при сложноподвижном состоянии.

Сущностью первого способа является установка постоянной растягивающей нагрузки и выдержка сварного соединения в коррозионной среде. Второй метод предполагает задание фиксированной деформации и так же, как в предыдущем способе, нахождение образца в агрессивной среде. Третий способ основан на задании остаточных сварочных напряжений, вызванных наложением сварных швов на испытываемые образцы, и выдержке в коррозионной среде. В последнем происходит передача сварному узлу или макету напряжений, соответствующих напряженному состоянию конструкции, при одновременном подведении к ним коррозионной среды, условия контакта с которой соответствуют условиям эксплуатации.

Наиболее широкое распространение получили испытания с постоянной скоростью деформации, они позволяют давать экспресс-оценку прочностных свойств материалов. При данном методе достигается равновесие между скоростями механических (способствующих вязкому разрушению) и коррозионных процессов, вызывающих хрупкое коррозионное растрескивание. Недостатками данных испытаний можно считать изменение напряженного состояния в образце в процессе коррозии и несоответствие, в большинстве случаев, схемы напряженного состояния реальным условиям нагружения.

Именно к этой категории испытаний относятся многочисленные варианты испытаний с изгибом, в которых используются простые нагружающие устройства (рис. 2). Схемы рис. 2, б, в являются наиболее подходящими для измерения напряжений, так как этот параметр зависит от стрелы прогиба, которая задается с помощью регулировочного винта, расположенного по центру приспособления [2, 3].

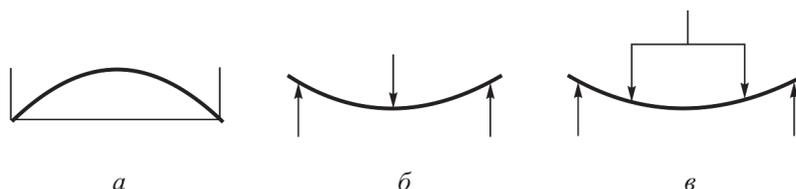


Рис. 2. Схемы изгиба при постоянной общей деформации:  
а – двухточечная система; б – трехточечная система;  
в – четырехточечная система

Схему с трехточечной системой используют с целью определения стойкости зоны, к которой приложена нагрузка, обеспечивая в ней максимальные напряжения. При работе с четырехточечной схемой создается более равномерное напряженное состояние, что дает возможность обнаружить «слабую» зону. Именно эта система широко используется для оценки коррозионного растрескивания магистральных труб. Стоит отметить, что для данного метода необходимы машины и приспособления, позволяющие осуществлять плавное нагружение образцов, их надежное центрирование и способность обеспечивать заданную деформацию образца в процессе испытаний.

В зависимости от коррозионной среды, применяемой для испытаний, приспособления выполняются из различных материалов. Например, с использованием солевого тумана их рекомендуется изготавливать из сплава OT4, стали 12X18H9T, также допускается оргстекло, при условии достаточной прочности<sup>2</sup>.

Испытания с постоянной нагрузкой позволяют устранить недостатки испытаний с постоянной деформацией, но требуют применения более сложного оборудования. Постоянное нагружение создают растяжением (возможно использование стандартных установок квазистатического растяжения) или изгибом с помощью рычажных и пружинных конструкций.

В таких условиях происходит повышение напряжения по мере развития трещин, следовательно, зародившиеся трещины не перестанут распространяться, как это может быть при испытаниях при постоянной деформации при напряжениях ниже пороговых. Таким образом, пороговое напряжение, определенное при постоянной нагрузке, может быть ниже, чем при постоянной деформации.

В качестве критерия оценки сопротивляемости сварных соединений коррозионному растрескиванию выбраны: наличие или отсутствие коррозионного растрескивания за определенный срок испытания, время до появления коррозионных трещин, уровень безопасных напряжений, не вызывающих растрескивания.

В качестве объекта испытания при постоянной нагрузке и деформации приняты сварные образцы, типоразмеры которых указаны в ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механи-

---

<sup>2</sup> ОСТ 1.90212-76. Коррозионно-стойкие стали. Методика испытания на склонность к коррозионному растрескиванию.

ческих свойств». Испытания проводят на образцах, толщина и диаметр которых равен толщине или диаметру основного металла. При испытании сварного соединения не допускается разнотолщинность, путем механической обработки образец изделия большей толщины должен быть доведен до более тонкой толщины части образца. Для проведения испытаний допускаются как плоские, так и цилиндрические образцы, выбор которых определяется видом полуфабриката, сварки и способом нагружения. При использовании метода с постоянной нагрузкой требуются образцы со стыковым или нахлесточным соединениями (рис. 3). Для испытаний при постоянной деформации (на статический изгиб) используют образцы со стыковым соединением (рис. 4).

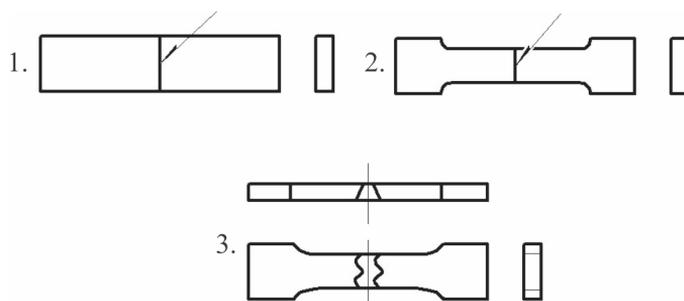


Рис. 3. Формы плоских образцов для испытаний при постоянной нагрузке

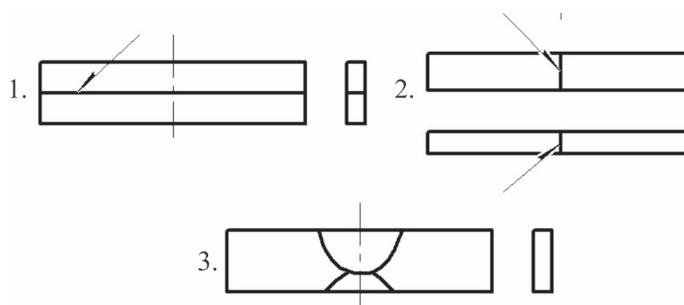


Рис. 4. Формы плоских образцов для испытаний при постоянной деформации

Для удобства моделирования напряженного состояния, возникающего в сварных конструкциях, ГОСТ 26294–84 рекомендует три типа образцов с остаточными сварочными напряжениями: дисковые образцы, пластины и образцы с патрубком (рис. 5).

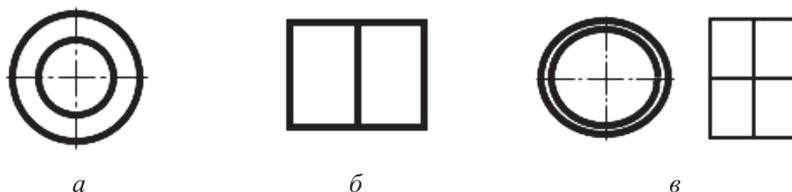


Рис. 5. Типы образцов с остаточными сварочными напряжениями:  
*а* – образец-диск; *б* – пластина; *в* – патрубок

Первый вариант – образец-диск, в котором имитируется собственное напряженное состояние в сварных узлах, содержащих вварки вставок, штуцеров, проплавление по замкнутому контуру. В образце-пластине: моделируется собственное напряженное состояние, но уже в сварных соединениях, содержащих швы значительной протяженности (листовые конструкции, крупногабаритные сосуды). В образце-патрубке: происходит имитация собственного напряженного состояния, возникающего в трубных соединениях. При использовании данного образца допускается нанесение как обоих, так и одного типа шва (кольцевого или продольного).

**2. Испытания на коррозионную трещиностойкость.** В использовании второй группы методов накоплен небольшой опыт, по сравнению с первым. Благодаря созданию искусственного концентратора напряжений или трещины в интересующей среде появляется возможность оценить сопротивляемость разрушению различных зон.

За границей получил большое распространение метод, предложенный Брауном. Для этого образец с предварительно созданной усталостной трещиной нагружают ступенчато, выдерживают на каждой ступени в коррозионной среде и контролируют рост трещины. В качестве параметра коррозионной трещиностойкости  $K_{ISCC}$  принимают максимальное значение  $K_I$ , при котором не обнаружено признаков коррозионного растрескивания в течение заданного времени испытания. Данный метод требует большого количества времени, так как в зависимости от свойств металла и среды длительность выдержки образца на каждой ступени может колебаться от нескольких минут до 2–100 ч [1].

Методы испытаний на растрескивание рассмотрены в ГОСТ 9.903–81 «Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание». Данный стандарт предусматривает три варианта испытаний с предварительно заданной усталостной трещиной: по

времени до разрушения образцов с трещиной; по страгиванию (начало медленного роста) трещины при постоянной нагрузке; по остановке трещины. Положительной характеристикой этих методов является возможность сопоставлять результаты испытаний образцов различных типов, изменяя фактор интенсивности напряжений, затрачивая при этом значительно меньше времени, так как в образце уже установлена начальная трещина с высокой концентрацией напряжений.

Наиболее часто применяемой коррозионной средой для данных испытаний выступает 3%-ный раствор хлористого натрия в дистиллированной воде. В зависимости от условий эксплуатации реальных изделий допустимо выбирать другие среды.

В данном стандарте есть несовершенства, так как он не учитывает морфологию зоны разрушения и рекомендуемые им толщины образцов не всегда обеспечивают получение минимальных значений  $K_{ISCC}$ . Так, например, трудности связаны с необходимостью выбора образцов больших размеров из высокопластичных металлов. Эксплуатационные разрушения при коррозионном растрескивании наиболее часто происходят в высокопластичных материалах в относительно тонких сечениях, что приводит к определенным проблемам при выборе образцов.

Для проведения корректных испытаний на коррозионное растрескивание необходимо четкое фиксирование момента начала развития разрушения или момента прекращения роста коррозионной трещины. При этом большое значение имеет выбор зоны создания исходного дефекта (металл шва, зона термического влияния, сплавления, основной металл), а также наличие термопластических деформаций и остаточных напряжений в вершине трещины, обусловленных процессом сварки.

Одним из недостатков ускоренных коррозионно-лабораторных испытаний образцов является то, что они не моделируют действительные условия работы реальных конструкций. Кроме того, они не позволяют получить достоверной информации об инкубационном периоде развития трещины<sup>3</sup>.

**3. Испытания макетов и узлов.** Третья группа испытаний предполагает максимальное приближение к реальным условиям. В качестве объекта испытания в данном случае используют элементы натуральных сварных узлов, макеты или имитационные образцы. При этом стремят-

---

<sup>3</sup> Gooch T.G. Stress Corrosion Cracking of Welded Joints in High Strength Steels // Welding research supplement. – 298 p.

ся воспроизвести реальную коррозионную обстановку не только среды, но и ее параметры (температура, давление, режим нагружения). Достоинством таких испытаний является сохранение технологического подобия образца и изделия, а также возможности анализировать кинетику разрушения с учетом реального распределения полей напряжений. Данный способ оценки растрескивания позволяет определить участки сварного соединения, являющиеся наиболее вероятными инициаторами разрушения, оценить конструкционную трещиностойкость. В то же время сложность установки макета в неприспособленных для этого участках и дороговизна приборного обеспечения не дает данному способу быть полностью оцененным и широко распространенным для исследования коррозионного растрескивания [2].

Сделаем некоторые выводы. Коррозионное растрескивание сварных соединений представляет собой сложный процесс, который требует правильного выбора сочетаний материалов, агрессивной среды и нагрузки.

Стоит обратить внимание на тот факт, что при проведении испытаний может потребоваться периодический визуальный анализ, включающий в себя прерывание теста и удаление образца из среды. Это может несколько исказить результаты опытов.

При использовании тестовых установок нужно учитывать, что держатель образца может создать «незапланированную» трещину, что сделает возможным начало гальванической коррозии. Чтобы этого избежать, образцы рекомендуется изолировать прокладками из полиэтилена или фторопласта<sup>4</sup>.

Для исследования коррозионного разрушения простой осмотр поверхности недостаточен, это связано с несколькими факторами, включая ограниченный доступ и непредсказуемость характера коррозии. Указанные выше методы испытаний могут выявить причины, характер и механизм разрушения сварных соединений, помогают сделать обоснованный выбор материала, провести сравнительную оценку влияния различных технологических факторов на сварные соединения.

Не стоит забывать, что реальные конструкции содержат различные исходные технологические конструктивные и эксплуатационные концен-

---

<sup>4</sup> ОСТ 1.90212–76. Коррозионно-стойкие стали. Методика испытания на склонность к коррозионному растрескиванию.

траторы напряжений. Для конструкций, работающих в агрессивных средах, перспективно применение метода механики разрушения, заключающегося в испытании образцов с заранее созданными трещинами.

### **Список литературы**

1. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции: механика разрушения и критерии работоспособности. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

2. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 380 с.

3. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. – М.: Машиностроение, 1976. – 198 с.

Получено 17.07.2014

**Ольшанская Татьяна Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvo66@rambler.ru

**Некрасова Софья Юрьевна** – магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; e-mail: sonya\_perm@inbox.ru

**Olshanskaya Tatiana Vasilevna** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department “Welding Production and Technology of Structural Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru

**Nekrasova Sof'ja Jur'evna** – Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sonya\_perm@inbox.ru