

УДК: 669.14.014:620.197.001.4

**О МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПЫТАНИЙ НА  
СТОЙКОСТЬ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ  
ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ**

**Т.А. Дергач<sup>1</sup> /к.т.н./, Л.С. Северина<sup>1</sup>,  
А.Е. Балев<sup>2</sup>, О.А. Дудка<sup>2</sup>, А.П. Головачук<sup>2</sup>**

*ГП «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический  
институт трубной промышленности им. Я.Е. Осады»<sup>1</sup>,  
ЗАО «СЕНТРАВИС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН», г. Никополь<sup>2</sup>*

Одной из основных причин выхода из строя труб из коррозионностойких сталей и сплавов в условиях эксплуатации в химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности, в тепловой и атомной энергетике является коррозионное растрескивание (КР) /1-4/. Оно происходит под действием растягивающих напряжений и коррозионной среды и зависит от целого ряда внешних и внутренних факторов. К ним относятся: химический и структурный состав стали, технология изготовления труб, состав и температура среды, напряжения, создаваемые при монтаже оборудования (при изгибе, развальцовке, сварке и др.).

В связи с изложенным, все больше потребителей труб из коррозионностойких сталей и сплавов предъявляют требования по обеспечению их стойкости к КР, в частности, в соответствии с требованиями стандарта ASTM-G-36 /5/. Он предусматривает испытания деформированных растяжением образцов в кипящем при температуре 155°C растворе хлорида магния  $MgCl_2 \times 6H_2O$  с оценкой стойкости к КР по времени до образования на поверхности образцов трещин, видимых при увеличении 20<sup>x</sup>. Однако, в указанном стандарте отсутствуют требования к образцам для испытаний, а приводятся ссылки на ряд стандартов, рекомендующих различные виды образцов, а также отсутствуют критерии стойкости к КР. Это затрудняет практическое использование стандарта ASTM-G-36 для приемо-сдаточных испытаний металлопродукции, в том числе труб из коррозионностойких сталей.

Целью настоящей работы явилась разработка на основе стандарта ASTM-G-36 методики приемо-сдаточных испытаний на стойкость к коррозионному растрескиванию трубной заготовки и труб из коррозионностойких сталей и сплавов, включающей требования к образцам и критерии стойкости к КР.

Работа проведена в ЗАО «СЕНТРАВИС ПРДАКШН ЮКРЕЙН».

При разработке методики учитывали данные литературы /2-4/, отечественных и зарубежных стандартов: ГОСТ 9.901 (1-5), ISO 7539 (1-5), ASTM G-1, G-28, G-29, G-30, G-36 и др., а также ранее проведенных ГП «НИТИ» научно-исследовательских работ.

На основании предварительных испытаний образцов трубной заготовки и труб из аустенитных и ферритно-аустенитных сталей на стойкость к КР по стандарту ASTM-G-36 с использованием образцов различных видов, рекомендуемых вышеуказанными стандартами: U-образно изогнутых, со стрелой прогиба, C-образных кольцевых и др., были предложены оптимальные виды образцов для трубной заготовки, толстостенных (горячедеформированных и пере-

дельных холодно- и теплокатаных) труб, тонкостенных холодно- и теплокатаных труб диаметром более 18 мм, а также труб малого диаметра (до 18 мм).

Для испытаний трубной заготовки и труб из аустенитных высоконикелевых сталей, обладающих высокой стойкостью к коррозионному растрескиванию /1-4/ и высокой пластичностью, предложено использовать U-образно изогнутые (на угол 180°) образцы (плоские или сегменты) толщиной 2-3 мм, шириной 10-15 мм и длиной 90-100 мм, с радиусом закругления при изгибе равным не менее трехкратной толщины образца, согласно ASTM-G-30, рис. 1а, а также плоские образцы со стрелой прогиба с трехточечным изгибом согласно ASTM-G-39, ISO 7539-2 и ГОСТ 9.901-2, рис. 1б.

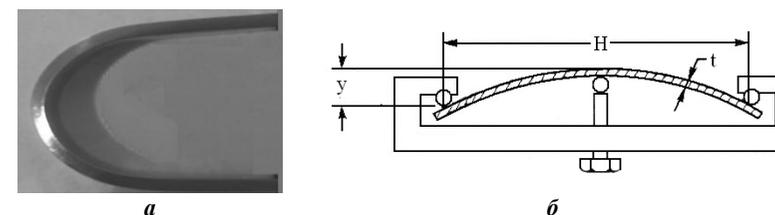


Рис. 1. Вид U-образно изогнутого образца (а) и схематическое изображение образца со стрелой прогиба (б) для испытаний на стойкость к КР.

U-образный изгиб образцов осуществляют в один или два этапа. При одноэтапном нагружении образец изгибают по U-образной форме на оправке заданного диаметра и сохраняют его в этой форме с помощью фиксирующего хомута или болта и гайки. При двухэтапном нагружении формируют приблизительно U-образную форму образца на оправке, а затем стягивают его концы до параллельности сторон с помощью специального устройства.

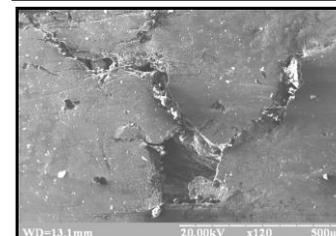
Испытание на U-образно изогнутых образцах является более жестким, чем на образцах со стрелой прогиба, поскольку в первом случае металл, кроме пластической деформации, возникающей непосредственно при изгибе, подвергается дополнительной упругой деформации при стягивании концов образцов до параллельности сторон для придания им U-образной формы.

Проведены испытания на стойкость к КР по ASTM-G-36 U-образно изогнутых образцов от труб из железохромоникелевого сплава, из аустенитных хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей (типа 08X18H10T, 03X17H14M3 и др.), от трубной заготовки и горячепрессованных труб из дуплексной ферритно-аустенитной стали UNS S 31803 (02X22H5AM3).

Результаты испытаний показали, что трещины на вершине U-образных образцов труб из железохромоникелевого сплава не образовались за 500 часов, то есть, установлена их высокая стойкость к КР.

На поверхностях образцов трубной заготовки из ферритно-аустенитной стали 02X22H5AM3 и образцов труб из аустенитных сталей трещины появились через относительно короткий промежуток времени от 5 до 24 часов.

В ряде случаев при U-образном изгибе образцов трубной заготовки из ферритно-аустенитной стали наблюдали хрупкие трещины-надрывы, рисунок



ке 2, что не позволяло использовать их для проведения испытаний и оценки стойкости к КР.

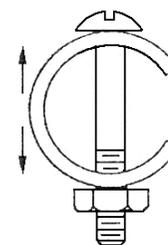
Рис. 2. Хрупкие трещины на вершине U-образного образца трубной заготовки из стали 02X22H5AM3,  $\times 120$ .

В связи с этим для испытаний трубной заготовки и толстостенных труб из аустенитных сталей, обладающих более низкой, чем высоконикелевые стали, стойкостью к КР, а также более прочных ферритно-аустенитных и ферритных сталей, предложено использовать только плоские образцы со стрелой прогиба с трехточечным изгибом, рис. 1б. Преимуществом таких образцов является возможность создания в них за счет изгиба с помощью прижимного болта упругих растягивающих напряжений заданной величины и определения критических напряжений растрескивания (максимальных напряжений, при которых образование трещин не происходит в течение длительного времени испытаний) для трубной заготовки и труб из различных классов и марок стали. Максимальное растягивающее напряжение  $\sigma$  (МПа) по середине пролета таких образцов рассчитывается из соотношения:  $\sigma = 6 E t y / H^2$  (1), где:  $E$  – модуль упругости стали, МПа;  $t$ ,  $y$  и  $H$  – толщина образца, величина его максимального прогиба и расстояние между опорами соответственно, мм.

За основу для выбора величины растягивающих напряжений принимали нормируемый согласно стандартов и технических условий на трубную заготовку и трубы их предел текучести.

На образцах со стрелой прогиба проведены испытания на стойкость к КР в соответствии со стандартом ASTM-G-36 трубной заготовки и горячепрессованных труб из ферритно-аустенитной стали 02X22H5AM3. Напряжения в образцах соответствовали пределу текучести стали (450 МПа), а также 80, 70 и 60% от него. Установлено, что образцы трубной заготовки выдержали длительные испытания на стойкость к КР только при напряжениях, равных 270 МПа (60% от  $\sigma_{02}$ ), а образцы горячепрессованных труб – при более высоких напряжениях, 360 МПа (80 % от  $\sigma_{02}$ ), что объясняется положительным влиянием увеличения химической и структурной однородности стали, измельчением структуры и увеличением ее текстурированности в последних.

Для проведения испытаний на стойкость к КР в соответствии с ASTM-G-36 холоднокатаных и теплокатаных труб диаметром более 18 мм, геометрические размеры которых не позволяют изготовить плоские образцы, в методике предложено использовать С-образные (пружинные) образцы с вырезанной частью по окружности, которая по длине соответствует радиальному углу  $60^\circ$ , в соответствии с ASTM-G-38, ISO 7539-5 и ГОСТ 9.901-5, рис. 3. В них требуемые растягивающие напряжения создаются стягиванием с помощью гайки болта, вставленного в отверстия, расположенные по диаметру кольца, и рассчитываются из уравнений:  $OD = OD_f - \Delta$  (2) и  $\Delta = f \pi D^2 / 4 E t Z$  (3), где:  $OD$  и  $OD_f$  – наружный диаметр С-образного кольца до и после нагружения соответственно, мм;  $f$  и  $E$  – задаваемое напряжение и модуль упругости стали соответственно, МПа;  $\Delta$  – изменение наружного диаметра после напряжения



кольца, мм;  $D$  и  $t$  – средние диаметр и толщина стенки образца, мм;  $Z$  – поправочный коэффициент, зависящий от толщины образца.

Рис. 3. Схематическое изображение C-образного образца от теплокатаной трубы для испытаний на стойкость к КР.

Схема деформации растяжения в C-образных образцах (в тангенциальном направлении относительно образующей трубы) отличается от схемы деформации в U-образных образцах и образцах со стрелой прогиба (в продольном направлении). Вместе с тем, использование C-образных образцов для испытаний относительно тонкостенных труб является, на наш взгляд, наиболее приемлемым, поскольку позволяет создавать в них напряжения заданной величины и определять критические напряжения растрескивания.

На C-образных образцах были проведены испытания на стойкость к КР теплокатаных труб  $\varnothing 18 \times 2,8$  мм из ферритно-аустенитной стали 02X22H5AM3. При этом, кроме определения критических напряжений растрескивания, было установлено влияние на результаты испытаний подготовки поверхности образцов: образцы со шлифованной поверхностью выдержали длительные, более 200 часов, испытания при напряжениях, равных 360 МПа (80% от  $\sigma_{0,2}$ ), рис. 4а, б, а при более высоких напряжениях, равных пределу текучести (450 МПа), они растрескались за 24 часа, рис. 4в, г. Коррозионное растрескивание носило транскристаллитный характер, рис. 4г.

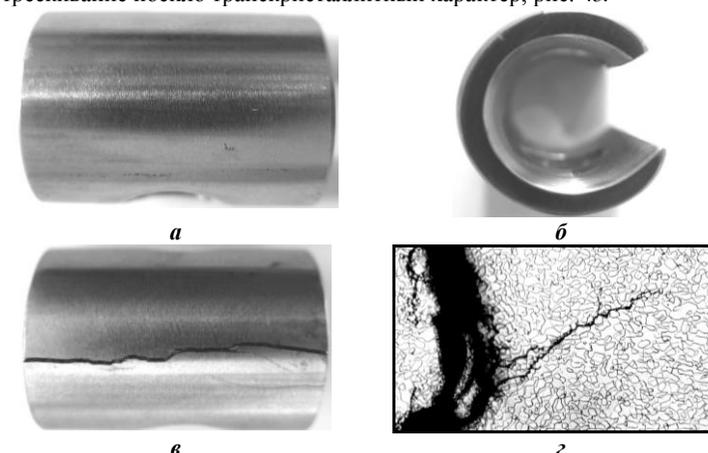


Рис. 4. Внешний вид (а-в) и структура (г,  $\times 200$ ) C-образных шлифованных образцов теплокатаной трубы из стали 02X22H5AM3 после испытаний на стойкость к КР при напряжениях: а, б – 360; в, г – 450 МПа.

С-образные образцы труб с травленной поверхностью выдержали длительные испытания на стойкость к КР (в течение более 240 часов) при более высоких растягивающих напряжениях, равных 450 МПа. Отрицательное влияние шлифовки на стойкость к КР, по-видимому, обусловлено созданием на поверхности образцов дополнительных растягивающих напряжений.

Таким образом, показано, что использование образцов со стрелой прогиба и С-образных кольцевых образцов позволяет проводить сравнительные испытания труб из разных сталей, изготовленных по различным технологическим вариантам, а также исследовать влияние на стойкость к КР технологических факторов трубного производства (режимов термической обработки, правки, шлифовки, травления и др.) и при необходимости вносить коррективы с целью повышения качественных характеристик труб.

Для испытаний на стойкость к КР образцов труб малого диаметра, менее 18 мм, для которых не представляется возможным изготовить С-образные образцы, предложено использовать кольцевые образцы полного поперечного сечения двух типов. Первые из них – в виде патрубков длиной 20-30 мм, рис. 5, в которых тангенциальные растягивающие напряжения на наружной поверхности создаются путем сплющивания кольца по ГОСТ 9941 (или ГОСТ 6032) путем сближения сжимаемых плоскостей до расстояния  $H$  в мм, вычисляемого для аустенитных сталей и сплавов по формуле 4, а для ферритно-аустенитных и ферритных сталей по формуле 5:

$$H = \frac{1,08 \times D \times c}{0,08 \times D + c} \quad (4), \quad \text{и} \quad H = 0,5 D + 2 c \quad (5),$$

где:  $D$  и  $c$  – наружный диаметр и толщина стенки трубы, мм;

Второй тип образцов – в виде недеформированных патрубков длиной 80-100 мм, которые отбирают от труб после правки; вследствие этого поверхностные слои металла на их наружной поверхности подвержены относительно высоким растягивающим напряжениям, которые в зависимости от марки стали и режима правки могут достигать более 200 Н/мм<sup>2</sup>.

Результаты испытаний на стойкость к КР по стандарту ASTM G-36 кольцевых деформированных сплющиванием и недеформированных (но после правки) образцов холоднотянутых труб  $\varnothing 14 \times 2,3$  мм из ферритно-аустенитной стали 02X22H5AM3 показали, что даже после 300 часов испытаний трещины на их поверхности, а также в их структуре даже после травления шлифов в щавелевой кислоте, отсутствовали, рис. 5.

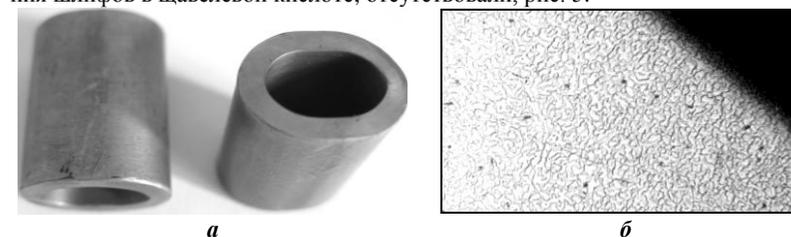


Рис. 5. Вид (а,  $\times 4$ ) и структура (б,  $\times 500$ ) сплюснутых образцов холоднотянутых труб из стали 02X22H5AM3 после испытаний на стойкость к КР.

Аналогичные образцы теплокатаных труб из аустенитной стали 03X17H14M3 (316L) показали более низкую стойкость к КР; коррозионные трещины на поверхности образцов-патрубков от труб после правки, а также в структуре стали появились менее, чем через 24 часа испытаний. Травление металлографических шлифов от указанных патрубков в шавелевой кислоте способствовало более четкому выявлению коррозионных трещин, рис. 6.

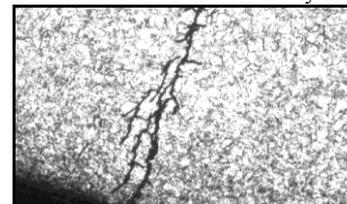


Рис. 6. Структура образца-патрубка теплокатаной трубы  $\varnothing 10 \times 1,2$  мм из стали 03X17H14M3 после правки и испытаний на стойкость к КР. (поперечный травленный шлиф),  $\times 200$ .

На основании результатов комплексных испытаний, проведенных по разработанной методике, установлены критерии стойкости к КР труб из ряда коррозионностойких сталей, выпускаемых ЗАО «СЕНТРАВИС», а также даны рекомендации по повышению их стойкости к КР.

#### **Выводы**

1. На основе зарубежных и отечественных стандартов разработана методика сдаточных испытаний на стойкость к коррозионному растрескиванию трубной заготовки и труб из коррозионностойких сталей и сплавов, в которой предложены и обоснованы оптимальные виды образцов в зависимости от размеров труб, класса и марки стали, а также критерии их стойкости к КР.
2. По разработанной методике проведены испытания на стойкость к КР образцов трубной заготовки и труб из аустенитных и ферритно-аустенитных сталей, которые показали ее работоспособность и возможность применения для проведения приемо-сдаточных испытаний в заводских условиях.
3. Увеличение объема сдаточных испытаний труб позволит более полно прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации, повысить надежность и конкурентоспособность.

#### **Библиографический список**

1. Зубченко А.С., Харина И.Л., Рунов А.Е. и др. Коррозионное растрескивание сварных соединений трубопроводов из стали 08X18H10T энергоблоков с реакторами типа РБМК // Производство проката. – 2006. – № 2 – С. 85-92.
2. Изыскание, исследование и промышленное освоение стали, устойчивой против коррозионного растрескивания. Научно-техническая информация о работах ЦНИИТМАШ., М.: – 1967.– 172 с.
3. Бесшовные трубы из нержавеющей стали. Материалы технического симпозиума фирмы Кобэ Стил, Япония. – 1985. – 138 с.
4. Stainless Steel Pipe and Tubing. Mannesmann rushers – worker. – Материалы фирмы Маннесманн. – 1987. – 143 с.
5. ASTM G-36. Стандартная методика оценки стойкости металлов и сплавов к растрескиванию вследствие коррозии под напряжением в кипящем растворе хлорида магния. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, Conshohocren. – 2000 – 11 с.