



Буряк Т. Н. /к. т. н./, Ярошенко Н. В.,
Тараненко А. А., Лавриненко А. М.
ГП «НИТИ»

Оценка качества сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали

Выполнены комплексные испытания сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали TP 316L и ее аналогов по определению структурных, механических, технологических, коррозионных и др. показателей на соответствие основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM A249 и EN 10217-7. Результаты показали перспективность расширения использования труб и направления для дальнейших исследований. Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: труба, качество, сварной шов, структура, свойство

Integrated tests of welded long extremely thin-walled tubes from corrosion-resisting steel TP 316L and its analogues in determination of structural, mechanical, technological, corrosion and other factors against main and additional requirements of standards ASTM A249 and EN 10217-7 are fulfilled. The results showed perspective of extension of tubes usage and directions for further researches.

Keywords: tube, quality, welded seam, structure, property

В последние десятилетия наблюдается тенденция расширения использования сварных длинномерных и особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали в различных системах трубопроводов, в т. ч. ответственного назначения, как например для АЭС. Если в мировой практике в конденсаторах и теплообменном оборудовании атомной энергетики и химической промышленности сварные трубы из титана и коррозионностойкой стали были внедрены еще в 1970-е годы [1, 2], то в бывшем СССР это сдерживалось по ряду объективных на то время причин: некоторое отставание производства, связанное с неудовлетворительным качеством сварного шва, отсутствием оборудования для изготовления, термообработки и неразрушающего контроля труб длиной до 9 м и более, дефицитом качественной ленточной заготовки (штрипса) толщиной стенки до 1 мм [3] и др.

В современных условиях имеется возможность получать особотонкостенные трубы длиной 30 м и более, с высоким качеством как по основному металлу, так и по сварному шву (аргонно-дуговая сварка TIG с коэффициентом шва $V = 1$), выполнением термообработки, в т. ч. в защитной

атмосфере, ультразвукового и вихретокового контроля [4, 5]. Процесс получения таких труб высокопроизводительный за счет сокращения цикла изготовления, что обеспечивает снижение стоимости сварных труб по отношению к бесшовным на 30-35 %. Однако до настоящего времени в отечественной практике сведения об их качестве остаются ограниченными.

Цель работы

Определение особенностей формирования качественных показателей сварных труб из высоколегированной коррозионностойкой стали на основе их комплексных испытаний (металлографических, механических, коррозионных и др.).

Материал исследования

Трубы сварные прямошовные особотонкостенные длиной 9,1 м размером (диаметр×стенка) $\varnothing 28 \times 0,7$ мм, $\varnothing 25,4 \times 0,71$ мм, $\varnothing 22,0 \times 1,0$ мм из аустенитной стали TP 316L по классификации американского комитета по стандартизации – ASTM и ее аналогов 1.4404, 1.4435 по классификации европейского комитета по стандартизации – EN (табл. 1) [4, 5].

Таблица 1. Химический состав стали TP 316L и ее аналогов в соответствии с требованиями стандартов

Стандарт	№ (марка) стали	C*	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Mo
ASTM A 249	316L	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,030	-	16,0-18,0	10,0-14,0	3,0-2,0
EN 10217-7	1.4404	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	≤ 0,11	16,5-18,5	10,0-13,0	2,5-2,0
EN 10217-7	1.4435	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	≤ 0,11	17,0-19,0	12,5-15,0	3,0-2,5

Примечание. * Для труб с малыми стенками допускается содержание углерода 0,040 % max.

Испытания выполнены на соответствие основным и дополнительным требованиям международных стандартов с использованием зарубежных и отечественных методик (рис. 1).

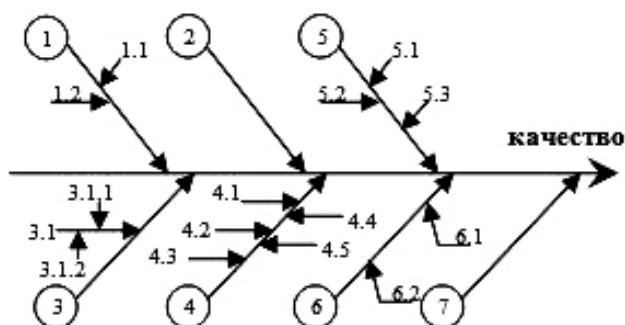


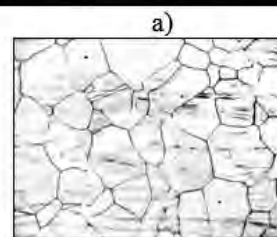
Рис. 1. Структура программных испытаний:

1 - Визуальный осмотр, 1.1 - оценка макроструктуры; 1.2 - контроль геометрических размеров; 2 - Химический анализ; 3 - Механические испытания, 3.1 - растяжение при $T_{исп} = 20^{+15...-10} \text{ } ^\circ\text{C}$, 3.1.1 - продольное патрубков, 3.2.2 - поперечное кольцевых образцов; 4 - Технологические испытания, 4.1 - сплющивание, 4.2 - статический загиб, 4.3 - раздачу, 4.4 - бортование, 4.5 - загиб с перегибом; 5 - Металлографические, 5.1 - оценка величины зерна, 5.2 - микроструктура шва и околошовной зоны, 5.3 - неметаллические включения, 5.4 - топография поверхности; 6 - Коррозионные испытания, 6.1 - МКК (метод АМУ), 6.2 - питтинговая коррозия; 7 - Неразрушающий контроль (УЗК)

Визуальный осмотр труб показал светлую, чистую поверхность с зачисткой сварного шва. Недопустимые дефекты не обнаружены.

В шве и околошовной зоне поры, трещины, непровары, инородные включения, проплавления и другие дефекты отсутствуют (рис. 2а). В микроструктуре труб четко различимы: основной металл с рекристаллизованными зёрнами аустенита (рис. 2б, табл. 2), небольшая околошовная зона (до 200 мкм) с незначительным на 1-2 номера укрупнением зерна по отношению к основному металлу, сварной шов с морфологией дендритоподобной (литой) структуры и наличием в ней ферритной составляющей (рис. 2в).

Для изготовления труб использована ленточная заготовка из стали полученной способом аргоно-кислородного дутья (АОД), следовательно, металл чистый по содержанию неметаллических включений, углерода (0,027-0,038 %), серы (0,0077-0,012 %) и фосфора (0,013-0,032 %).



в)

Рис. 2. Микроструктура сварной трубы: а - общий вид шва, $\times 25$; б - основной металл, $\times 400$; в - околошовная зона, $\times 400$

Сварка способом TIG обеспечила однородность по химическому составу и неметаллическим включениям в основном металле и в шве, что было подтверждено результатами исследований.

Механические свойства определяли путем испытаний на растяжение продольных патрубков (табл. 2) и на разрыв поперечных кольцевых образцов (табл. 3). Из результатов контроля видно, что механические характеристики труб удовлетворяют требованиям стандартов (табл. 2).

Образцы от исследуемых труб выдержали все технологические испытания:

- сплющивание на заданное по отношению к толщине стенки трубы расстояние между сплющиваемыми поверхностями Н от 6,5 до 8,1 мм при расположении шва 90° или 3 часа (образцы труб $\text{ } \varnothing 28 \times 0,7$ мм стали TP 316L дополнительно испытывали на сплющивание до соприкосновения сторон);
- статический загиб патрубка вокруг оправки на 90° загиб с обратным перегибом образца-полосы со сварным швом по методике ASTM;
- раздачу до увеличения диаметра на 10 % оправкой с углом конусности 30° бортование оправкой с углом отбортовки 90° .

Таблица 2. Механические свойства на продольных образцах-патрубках и величина зерна основного металла труб в соответствии с требованиями стандартов

Размер труб; марка стали	$\sigma_{B'} \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_{0,2'} \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_{0,1'} \text{ Н/мм}^2$	$\delta_{50'} \%$	$\delta_{5'} \%$	Зерно, №
$\text{ } \varnothing 28 \times 0,7$; TP316L	559; 607	269; 315	не опр.	59,0; 59,0	60,0; 60,0	9
$\text{ } \varnothing 25,4 \times 0,71$; 1.4404	615; 605	292; 301	348; 329	65,0; 58,5	67,5; 62,5	7
$\text{ } \varnothing 22,0 \times 1,0$; 1.4435	563; 566	292; 297	323; 330	62,0; 60,0	64,0; 63,5	6
Нормы ASTM A249	min 485	min 170	-	min 35	-	-
Нормы EN 10217-7	490-690	min 190	min 225	min 30	min 40	-

После всех этих испытаний на образцах отсутствовали дефекты в виде трещин и надрывов как в основном металле, так и в шве и околошовной зоне.

Не менее важным является испытание на разрыв поперечных кольцевых образцов для опре-

деления прочности сварных соединений с расположением шва 90° относительно оси приложения усилия или 3 часа, где также получены удовлетворительные результаты – разрушения образцов по шву не произошло (табл. 3).

Таблица 3. Испытания на разрыв поперечных кольцевых образцов для определения прочности шва

Размер, мм	σ_{Bt} Н/мм ²	Место разрыва
Ø 28×0,7	603	по основному металлу
	573–619	по основному металлу или в конце зоны термического влияния
Ø 25,4×0,71	591–606	по основному металлу
Ø 22,0×1,0	565–558	по основному металлу

Неразрушающий контроль методом ультразвуковой дефектоскопии показал, что в области сварного шва отклонение сигналов на 2–4 дВ выше по отношению к пороговому уровню от эталона с 10 %-й риской. Скорее всего, это связано с отличием в морфологии структуры шва и основного металла, поскольку металлографическими и технологическими испытаниями дефектов шва или околошовной зоны не было выявлено.

Поскольку зачастую данные трубы предназначены для эксплуатации в агрессивных средах, содержащих галогены (хлориды, фториды), а сварной шов в данном контексте представляется наиболее уязвимым, актуальны исследования коррозионной стойкости шва. В ASTM A249 предусмотрена методика испытаний сварных швов на межкристаллитную коррозию (МКК), заключающаяся в определении коэффициента коррозии R после кипячения образцов в водном растворе соляной кислоты с применением барботажа из стекла до удаления от 40 до 60 % исходной толщины основного металла. Коэффициент коррозии R рассчитывается по потере толщины образца, как отношение разницы по толщине сварного шва до и после испытаний к разнице по толщине основного металла до и после испытаний. По стандарту допустим $R = 1,25$ или менее, другие критерии должны согласовываться с потребителем.

В данной работе выполнены сравнительные исследования по склонности металла к питтинговой коррозии (ПК) в соответствии с основными положениями ГОСТ 9.912 и ASTM G48. Для получения сравнительных данных по разным маркам стали 1.4404 и 1.4435, а также одного и того же материала в различном состоянии (основной металл и сварной шов), образцы выдерживали в агрессивном 10 %-м растворе ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) в течение 5 часов при температуре 20 °С. Анализировали состояние поверхности на наличие, размер, глубину питтингов и характер их расположения, потерю массы образца после

испытаний как разницу по отношению к его исходной массе до испытаний (Δm). Более глубокие питтинги в стали 1.4404 ($\Delta m = 0,1454$ г или 0,71 %), где они образовались как в области шва (один единичный питтинг), так и по основному металлу. В стали 1.4435, питтингов меньше, они более мелкие, сквозных питтингов нет ($\Delta m = 0,1351$ г или 0,76 %).

Образцы от труб Ø 28 × 0,7 мм из стали TP 316L дополнительно испытали в более жестких условиях в 10 %-м растворе ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$): выдержка 72 часа, температура 22 °С. В образцах от основного металла потеря веса составила $\Delta m = 0,1549-0,2344$ г, а в образцах со швом $\Delta m = 0,476-0,507$ г, т. е. металл шва более склонен к ПК.

Также выполнены контрольные испытания на МКК по методу АМУ ГОСТ 6032 кипячением образцов в сернокислотном растворе сульфата меди в течение 8 часов. Согласно нормативу сварные соединения, наплавленный металл и металл шва предшествующему провоцирующему нагреву не подвергаются. В данном случае испытания были выполнены как без провоцирующего нагрева, так и в ужесточенных условиях с провоцирующим нагревом при 650 °С, выдержка 1 час. Трещин в местах Z-образных изгибов образцов не выявлено как на внутренней, так и на наружной поверхности труб. Таким образом, сварные трубы из стали TP 316L и ее аналогов 1.4404 и 1.4435, характеризуются высокой стойкостью к МКК основного металла, сварного шва и околошовной зоны.

В работах [6–8] выполнено исследование бесшовных труб из стали TP 316L изготавливаемых по ASTM A213 [9]. Сравнительный анализ показывает, что по основным показателям, как качество поверхности, механические свойства, структура (неметаллические включения, величина зерна), стойкость к МКК др., сварные трубы не уступают бесшовным.

Выводы и рекомендации

На основании результатов комплексных испытаний установлено, что полученные в условиях современных производств, сварные длин-

номерные особотонкостенные трубы из коррозионностойкой стали TP 316L и ее аналогов, являются качественным, надежным материалом, отвечающим основным и дополнительным требованиям стандартов. С учетом экономической целесообразности, связанной со значительным удешевлением по сравнению с бесшовными трубами, рекомендовано расширение применения сварных труб в оборудовании определенного типа. Вместе с тем, для эксплуатации сварных труб в оборудовании ответственного назначения при агрессивных условиях требуется уточнение требований к трубам по некоторым параметрам. Для этого, прежде всего, необходимо продолжить исследования по отработке методик неразрушающего контроля (ультразвукового, вихретокового) и коррозионных испытаний (на стойкость к МКК) сварных швов, а также уточнения критериев по питтинговой коррозии.

Библиографический список

1. Уайэтт Л. М. Материалы ядерных энергетических установок. – М.: Атомиздат, 1979. – 255 с.
2. Хэнсон К. Ф. Тенденции использования титана в теплообменных аппаратах // Материалы 3-й Международной конференции «Титан. Металловедение и технология». – М.: ВИЛС, 1978. – С. 423-435.
3. ГОСТ 11068-81 «Трубы электросварные из коррозионностойкой стали» с изм. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 8 с.
4. ASTM A249/A249M-10a «Стандартная спецификация на сварные трубы из аустенитной стали для котлов, пароперегревателей, теплообменников и конденсаторов». – ASTM Комитет США, 2010. – 10 с.
5. EN 10217-7:2005 «Сварные стальные трубы для работы под давлением. Технические условия поставки. – Часть 7: трубы из нержавеющей стали. – Европейский комитет по стандартизации (CEN), Брюссель, 2005. – 38 с.
6. Обеспечение качества труб из коррозионностойких сталей по зарубежным стандартам / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, Н. В. Ярошенко и др. // Сталь, Москва. – 2009. – № 6. – С. 61-64.
7. Пути улучшения качественных показателей труб из коррозионностойкой стали аустенитного класса / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, Н. В. Ярошенко и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2008. – № 3. – С. 53-87.
8. Использование непрерывнолитой заготовки для производства труб из коррозионностойких сталей / Г. Г. Шепель, Т. Н. Буряк, Н. В. Ярошенко и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2010. – № 1. – С. 65-67.
9. ASTM A213/A213M-04b «Стандарт на бесшовные ферритные и аустенитные легированные котельные, пароперегревательные и теплообменные трубы». – ASTM Комитет США, 2004. – 16 с.

Поступила 27.04.2014



УДК 621.774
Кузнецов Е. Д. / д. т. н./
ГП «НИТИ»

Производство

Технологические и метрологические аспекты организации производства в Украине циркониевых труб с повышенными эксплуатационными свойствами

Рассмотрены потенциальные причины разрушения циркониевых труб, используемых в качестве оболочек ТВЭЛ атомных реакторов, их взаимосвязь с размерными погрешностями поверхностей и отклонениями внутреннего диаметра. Показаны недостатки технологии с применением струйного травления. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: циркониевые трубы, топливные оболочки, долговечность, состояние поверхностей, размерные погрешности, механизмы разрушения

Potential reasons of failure of zirconium tubes used as claddings of nuclear reactors, their relationship with surface dimensional inaccuracies and inner diameter deviations are considered. The drawbacks of the technology using the jet etching are shown.

Keywords: zirconium tubes, fuel cladding, endurance, surface condition, dimensional inaccuracies, failure procedures