

Т. Н. Буряк, Н. В. Ярошенко, А. А. Тараненко

Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады», г. Днепропетровск, Украина

## Анализ материаловедческих аспектов в оценке эксплуатационной надежности сварных труб из коррозионностойкой стали для конденсаторов АЭС

На основе комплексного подхода исследованы физико-механические свойства и другие показатели сварных длинномерных осебно-тонкостенных труб различных производителей из коррозионностойкой стали TP 316L и ее ближайших аналогов на соответствие нормативным требованиям стандартов ASTM A249 и EN 10217-7. Показана целесообразность дополнительных коррозионных исследований труб, предназначенных для конденсаторов АЭС, с целью оптимизации критериев коррозионной стойкости как показателей эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: труба, конденсатор, сталь, стандарт, сварной шов, контрольные испытания, качество, коррозионная стойкость.

Т. М. Буряк, Н. В. Ярошенко, А. О. Тараненко

## Аналіз матеріалознавських аспектів в оцінці експлуатаційної надійності зварних труб з корозійностійкої сталі для конденсаторів АЕС

На основі комплексного підходу виконано матеріалознавські дослідження фізико-механічних властивостей та інших показників зварних довгомірних осебно-тонкостінних труб різних виробників з корозійностійкої сталі TP 316L та її найближчих аналогів на відповідність нормативним вимогам стандартів ASTM A249 і EN10217-7. Показано доцільність додаткових корозійних досліджень труб, що призначені для конденсаторів АЕС, з метою оптимізації критеріїв корозійної тривалості як показників експлуатаційної надійності.

Ключові слова: труба, конденсатор, сталь, стандарт, зварний шов, контрольні випробування, якість, корозійна стійкість.

© Т. Н. Буряк, Н. В. Ярошенко, А. А. Тараненко, 2015

В Украине на ряде энергоблоков АЭС довольно остро обозначилась проблема с состоянием конденсаторов турбин в результате повреждения труб из медно-никелевого сплава МНЖ 5-1 и массового вымывания меди, что оказывает вредное влияние на состояние окружающей среды и работу парогенератора. Наиболее критична ситуация на энергоблоках, где используемая из прудов-охладителей вода содержит соли, ионы хлора, натрия, кальция, сероводород, что приводит к химическим отложениям на поверхности труб и вызывает их коррозионно-эрозионный износ. За рубежом в конденсаторах атомных станций давно используются сварные трубы из нелегированного титана или коррозионностойкой стали марок TP 321, TP 304/304L, TP 316L/316Ti и др. [1–3]. Данные трубы относятся к высоколиквидной продукции прецизионного сортамента — осебно-тонкостенным, высокоточным, длинномерным, с повышенным качеством поверхности из сложных материалов и высоким комплексом технических характеристик. Такой сортамент освоен на современных производствах сварным способом. При этом важным аспектом является существенное снижение отпускной цены сварных труб по отношению к бесшовным из аналогичного материала.

Технологический процесс изготовления труб осуществляется на поточных линиях трубоэлектросварочных агрегатов, где последовательно в автоматизированном режиме выполняются следующие операции: продольная резка холоднокатаного рулонного проката (штрипса, который служит заготовкой) → контроль его геометрических размеров → формовка → аргонодуговая TIG-сварка (Tungsten Inert Gas) кромок → неразрушающий контроль сварного шва и околошовной зоны → шлифовка наружного, раскатка внутреннего грата → калибровка труб → термическая обработка труб в защитной атмосфере → неразрушающий контроль тела трубы → отделка поверхности (по требованию потребителя) → маркировка → порезка на заданную длину → приемка труб, испытания, предусмотренные нормативом, оформление сертификата [4]. Основное преимущество изготовления труб на линии трубоэлектросварочных агрегатов — автоматизированный контроль параметров технологического процесса, включая контроль металла, что уменьшает влияние человеческого фактора, обеспечивает стабильность технологии и качества продукции, увеличивает скорость и объемы производства, способствует снижению себестоимости.

Аргонодуговая TIG-сварка наиболее приемлема для коррозионностойких сталей и сплавов с коэффициентом заполнения сварного шва  $V=1$ . Сварка осуществляется в камере с защитной атмосферой (аргон). Защита шва от внесения вредных и инородных примесей способствует хорошей проварке корня шва. Электрическая дуга используется для нагрева и расплавления кромок металла. Защитный газ (аргон), который поступает из газового сопла, подается в зону сварки и на внутреннюю поверхность труб. Электрод (катод), выполненный из тугоплавкого материала (вольфрам), расположен в центре газового сопла на заданном по отношению к толщине стенки удалении от кромок свариваемого металла. Сварка осуществляется автоматически тремя катодами, расплавляя, формируя и сохраняя ванночку с равномерным распределением по всей глубине шва без подачи в зону сварки присадочных материалов. Многодуговая TIG-сварка в защитной атмосфере обеспечивает высокое качество шва, его плотность (при этом полностью сохраняется химический состав основного металла в структуре шва), отсутствие брызг, шлаков, примесей, непроваров и т. п.

Таблица 1. Химический состав, %, сварных труб из коррозионностойкой стали TP 316L и аналогов в сопоставлении с нормативными требованиями

Размер трубы, мм	Марка стали, стандарт	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
28×0,7	TP 316L, ASTM A249	0,027; 0,032	0,51; 0,54	0,75; 0,72	0,031; 0,032	0,0077; 0,0091	17,20; 16,54	10,59; 10,78	1,89; 1,94	0,0057; 0,0070	Основа
		max 0,030	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,030	16,0—18,0	10,0—14,0	2,0—3,0	—	
25,4×0,71	1.4404, EN10217-7	0,038	0,314	0,90	0,013	0,012	16,82	10,09	1,94	0,031	
		max 0,030	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,015	16,5—18,5	10,0-13,0	2,0—2,5	≤0,11	
22×1,0	1.4435 EN10217-7	0,037	0,453	1,15	0,013	0,012	17,43	12,7	2,52	0,024	
		max 0,030	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,015	17,0—19,0	12,5—15,0	2,5—3,0	≤0,11	
20×0,8	TP 316L, ASTM A249	0,015; 0,016	0,49; 0,49	1,17; 1,19	0,043; 0,044	0,012; 0,012	16,77; 16,89	10,07; 9,94	1,94; 1,91	0,020; 0,023	
		max 0,030	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,030	16,0—18,0	10,0—14,0	2,0—3,0	—	
Допустимая ошибка измерения, %		0,008	0,06	0,04	0,006	0,002	0,18	0,11	0,08	—	—

Примечание. Над чертой приведены результаты фактического контроля образцов, под чертой — требования соответствующих стандартов к определенной марке стали; для труб размером 28×0,7 и 20×0,8 мм выполнены измерения по двум образцам; для труб 25,4×0,71 и 22×1,0 мм — по одному образцу.

Трубы поставляются по стандартам ASTM A249 или EN 10217-7 [5, 6], которыми предусмотрены обязательные требования к марке стали, геометрическим размерам и состоянию поверхности, механическим и технологическим свойствам, выполнению неразрушающего контроля и др. На качественные показатели сварных труб важное влияние оказывает правильный выбор штрипса (по толщине стенки и состоянию поверхности, химическому составу, неметаллическим включениям, величине зерна), что в совокупности влияет на механические и коррозионные свойства, точность геометрических размеров труб.

В ранее выполненных ГП «НИТИ» исследованиях, связанных с выбором материала труб для замены конденсаторов турбин АЭС с учетом мирового опыта, был выбран титан марки ВТ1-0, а в качестве альтернативы — сталь 03X17H14M3. По нашему мнению, для новых энергоблоков со сроком эксплуатации порядка 50 лет следует использовать титан, а для блоков с продленным сроком эксплуатации либо тех, которые дорабатывают свой ресурс, — коррозионностойкую сталь. В настоящее время с целью установления необходимого комплекса материаловедческих характеристик для подтверждения эксплуатационной надежности сварных труб в конденсаторах АЭС впервые в Украине проведены комплексные исследования качества сварных труб различных производителей: Ø28×0,7 мм, сталь TP 316L (Германия); Ø20×0,8 мм, сталь TP 316L (Украина); Ø25,4×0,71 мм, сталь 1.4404 и Ø22×1,0 мм, сталь 1.4435 (Италия).

Коррозионностойкие стали TP 316L, 1.4404 и 1.4435 являются ближайшими аналогами стали 03X17H14M3. Несмотря на то что по химическому составу они близки между собой, полного совпадения по контролируемым элементам нет (табл. 1).

Нормы совпадают по содержанию таких элементов, как углерод, кремний, марганец, фосфор, отличаются по содержанию серы, молибдена, хрома, никеля, азота. В трубах украинского производства низкое содержание углерода (0,015—0,016 %) и довольно высокое содержание

фосфора (0,043—0,044 %). В импортных трубах содержание углерода выше (0,037...0,038 % — Италия, 0,027...0,032 % — Германия), но ниже содержание фосфора (0,013 % — Италия, 0,31...0,32 % — Германия). Положительный фактор: в трубах всех производителей низкое содержание серы — 0,0077...0,012 %; неблагоприятный фактор: содержание никеля и молибдена на нижнем пределе (с учетом ошибки измерения и допустимых стандартами отклонений).

Химический состав труб различных производителей зависит от выбранной марки стали и наследуется от используемой заготовки (поставщика штрипса). На содержание углерода, отрицательно влияющего на коррозионную стойкость, также может повлиять технология изготовления труб.

Для подтверждения качества сварного шва и околошовной зоны выполняется диагностика с применением неразрушающих методов: ультразвукового, вихретокового, пневматического, радиографического или рентген-контроля. К обязательным относятся ультразвуковой (УЗК) и/или вихретоковый (ВТК) контроль, с помощью которых контролируют не только качество сварки, но и тело самой трубы (точность геометрических размеров и др.). При УЗК на эталон или стандартный образец (СО) наносится искусственный дефект типа «риска» с заданными размерами, что более предпочтительно для оценки и выявления дефектов в виде глубоких рисков, трещин, расслоений, в том числе таких, которые не имеют раскрытия. При ВТК искусственный дефект на эталоне или СО имеет вид сквозного, как правило круглого, отверстия, что более предпочтительно для выявления свищей, коротких поверхностных и подповерхностных дефектов в виде раковин, пор, непроваров, проплавлений и т. п. Поэтому для сварных труб ВТК является более важным, чем УЗК, видом неразрушающего контроля.

Измерение геометрических размеров показало (табл. 2), что все трубы соответствуют высокой точности изготовления и удовлетворяют требованиям зарубежных стандартов. Четко просматривается закономерность того, что

Таблица 2. Точность геометрических размеров сварных труб из коррозионностойкой стали TP316L и аналогов

Номинальный размер трубы, мм	Марка стали	Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм
28,0×0,7	TP316L	28,0...28,07 28,0...28,08 28,08...28,10	0,65...0,66 0,65...0,67 0,65...0,66
Нормы ASTM A 249 для 28,0×0,7		27,78...28,10	0,65...0,75
25,4×0,71	1.4404	25,2...25,3 25,2...25,3	0,68...0,70 0,69...0,71
Нормы EN 10217-7 для 25,4×0,71		25,10...25,7	0,51...0,91
22,0×1,0	1.4435	21,7...22,0 22,0...22,1	0,95...0,96 0,95...0,96
Нормы EN 10217-7 для 22,0×1,0		21,7...22,3	0,8...1,2
20,0×0,8	TP316L	19,94...20,01 19,93...20,02	0,77...0,79 0,78...0,80
Нормы ASTM A 249 для 20,0×0,8		19,9...20,11	0,72...0,88

Примечание. Над чертой — результаты фактического контроля образцов, под чертой — стандартные нормы точности для конкретного размера труб по отношению к номинальному.

по толщине стенки трубы поставляются с минусовыми допусками. По соблюдению толщины стенки и качеству поверхности сварные трубы превосходят бесшовные. Поверхность исследованных труб светлая, чистая; дефекты типа трещин, глубоких рисок, плен, налипаний, расслоений при визуальном осмотре без увеличительных приборов не обнаружены. В результате деформации (раскатки) шва наружный и внутренний грат отсутствует. Шероховатость  $R_a$  внутренней (рабочей) поверхности соответствует установленной норме — не более 2,0 мкм.

По уровню механических свойств металл труб характеризуется высокими прочностными и пластическими показателями и удовлетворяет требованиям стандартов (табл. 3).

Для контроля технологической пластичности металла труб (в частности при развальцовке), качества и крепости сварного шва используются различные виды технологических испытаний. Образцы труб выдержали все технологические испытания (дополнительные и нормируемые): на сплющивание (на заданное расстояние, полное, обратное), изгиб с перегибом, статический загиб, раздачу, бортование. После всех испытаний в образцах со швом отсутствовали дефекты в виде трещин, надрывов, непроваров, проплавлений и перекрытий.

Металлографическими исследованиями подтверждено отсутствие дефектов шва и околошовной зоны (рис. 1). Микроструктура труб включает основной металл аустенита с рекристаллизованным зерном от № 6 до № 9 у различных производителей (рис. 2, а, табл. 3); небольшая — до 200 мкм — зона термического влияния и сварной шов с морфологией литой структуры и наличием в ней доли феррита (рис. 2, б). Макро- и микроструктура шва плотная, трещин, непроваров, инородных включений не обнаружено.

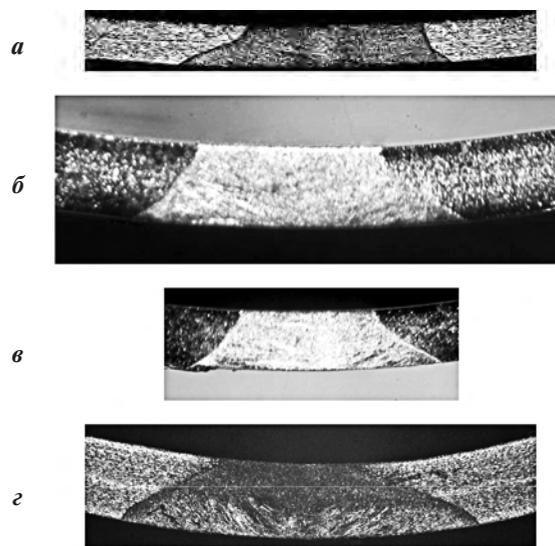


Рис. 1. Макроструктура шва в трубах различных производителей, ×12:  
а — Ø28×0,7мм, сталь TP316L (Германия); б — Ø22×1,0мм, сталь 1.4435 (Италия); в — Ø26,4×0,71мм, сталь 1.4404 (Италия); г — Ø20×0,8мм, сталь TP316L (Украина)

Таблица 3. Механические свойства металла труб и величина зерна основного металла в соответствии с требованиями стандартов

Размер, мм; марка стали	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{1,0}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_{50}$ , %	$\delta_5$ , %	№ зерна
28×0,7; TP316L	559; 607	269; 315	Не опр.	59,0; 59,0	60,0; 60,0	9
25,4×0,71; 1.4404	615; 605	292; 301	348; 329	65,0; 58,5	67,5; 62,5	7
22,0×1,0; 1.4435	563; 566	292; 297	323; 330	62,0; 60,0	64,0; 63,5	6
20,0×0,8; TP316L	617; 623	349; 347	370; 372	55,0; 56,5	57,5; 59,5	8
<i>Нормы стандартов</i>						
ASTM A249	min 485	min 170	Не норм.	min 35	Не норм.	Не норм.
EN 10217-7	490-690	min 190	min 225	min 30	min 40	Не норм.

Примечание.  $\sigma_B$  — предел прочности или временное сопротивление разрыву;  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{1,0}$  — предел текучести;  $\delta_{50}$ ,  $\delta_5$  — относительное удлинение; измерение проводилось по двум образцам.

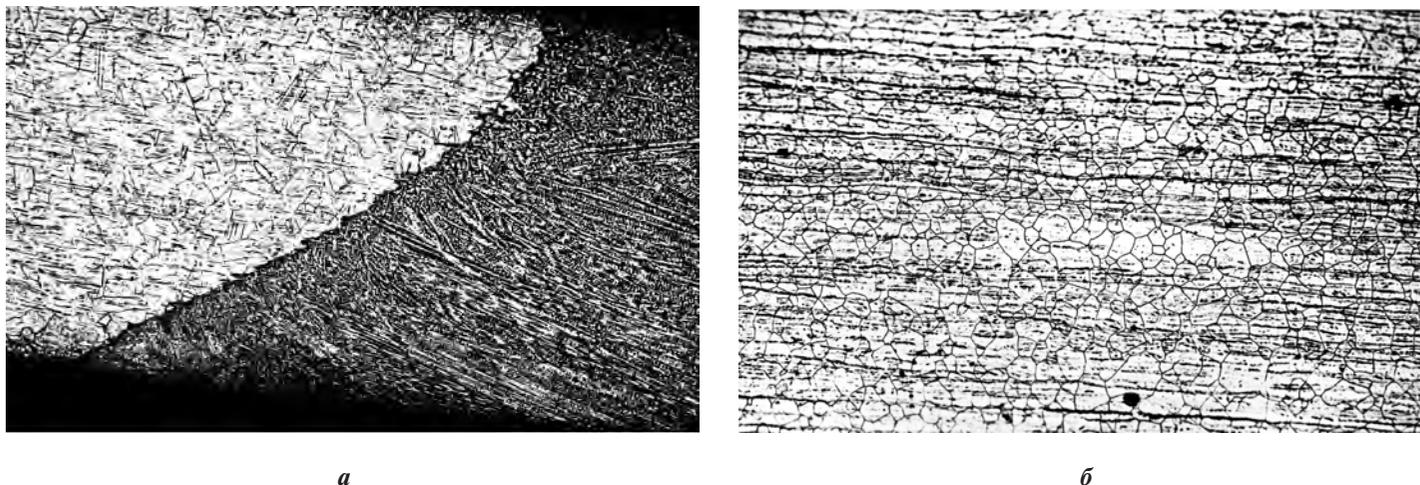


Рис. 2. Типичная микроструктура сварной трубы:  
 а — шов и околошовная зона,  $\times 100$ ; б — основной металл,  $\times 200$

На АЭС среди повреждений оборудования и трубных систем доминирует коррозия [7]. Среди коррозионных повреждений преобладают питтинговая (ПК) и ножевая коррозия (НК), коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) [3, 7, 8, 12]. Также имеет место биологическая коррозия под воздействием макро- и микроорганизмов, продуктов их жизнедеятельности, присутствующих в коррозионной среде. Опасность данных видов коррозии особенно велика для конденсаторов со сварными трубами. К основным факторам, обеспечивающим коррозионную стойкость, относятся химический состав стали с соблюдением оптимального соотношения легирующих элементов, уменьшение содержания углерода, серы, фосфора, а также структура и качество поверхности труб [9–12]. Межкристаллитная коррозия (МКК) труб для условий, в которых работают конденсаторы, не представляет непосредственной угрозы, однако обеспечение стойкости к МКК — эффективный метод профилактики и подавления развития других опасных видов коррозии: ПК, НК, КРН [3, 8, 11, 12].

Однозначно отрицательное влияние на коррозионную стойкость оказывает углерод в стали. Положительно сказываются на повышении сопротивления коррозии марганец, хром, никель, молибден, но их влияние не однозначно по отношению к различным видам коррозии. Высокая степень легирования сталей марок ТР 316L, 1.4404, 1.4435, 03X17H14M3, обеспечивая коррозионную стойкость в определенной категории сред, имеет ряд нежелательных последствий, которые необходимо учитывать при выборе марки стали. Априори считается, что увеличение содержания никеля способствует сопротивлению МКК и КРН, но отрицательно влияет на стойкость к биологической коррозии. Повышенное содержание никеля приводит к существенному уменьшению предельной растворимости углерода, в связи с чем содержание углерода в данных сталях стремятся снизить до 0,02–0,03 %. Однако это не всегда удается выполнить технологически и, кроме того, не гарантирует подлинную защиту от коррозии сварных соединений (НК). Поэтому с повышением содержания никеля часто прибегают к стабилизации стали титаном, увеличивая допустимое содержание углерода до 0,08 % (сталь марок ТР 316Ti, 08X17H15M3T), что в свою очередь приводит к образованию включений карбидов, карбонитридов и нитридов титана, в том числе

опасных групповых или строчечных. Включения в стали инициируют появление ПК, поскольку зарождение питтингов происходит на границах раздела металлическая матрица — включение. Особенно вредны с точки зрения очагов зарождения питтингов оксиды, оксисульфиды и сульфиды марганца.

ПК и КРН наиболее интенсивно развиваются в средах, содержащих ионы хлора, например в морской или артезианской воде, а также в средах, содержащих сероводород, NaOH и Ca(OH)<sub>2</sub>, органические соединения, что актуально в условиях работы конденсатора на Южно-Украинской АЭС. Коррозионностойкие стали аустенитного класса, в частности марок ТР 316L, 10X17H13M3T, ТР 321, 08X18H10T, наиболее склонны к КРН, особенно в хлорсодержащих средах, где вредное влияние могут оказывать такие элементы, как азот, фосфор, углерод и молибден, а полезное — никель. Кроме того, молибден увеличивает скорость развития коррозионных трещин. Однако хромо-никель-молибденовые стали, к которым относятся стали марок ТР 316L, ТР 316Ti и их аналоги, практически не склонны к КРН в водных растворах сероводорода. Способствуют развитию КРН значительные растягивающие остаточные напряжения, свойственные сварным трубам, поэтому для минимизации остаточных напряжений термообработка труб должна выполняться обязательно.

К наиболее опасным видам локальной коррозии относится ПК, которая характерна для сталей, обладающих способностью к пассивации и, как известно, активно развивается в средах, содержащих галогены (хлор, фтор), по местам повреждений на пассивированной поверхности. Коррозионная стойкость обеспечивается образованием на поверхности сверхтонкой пассивирующей пленки (10–30 Å) на основе гидратированного гидроксида хрома. Помимо хрома, сильной пассивирующей способностью обладает молибден, причем молибден играет важную роль в упрочнении пленки и ускорении ее пассивации в случае повреждения. Таким образом, положительно на стойкость к ПК влияют хром, молибден, азот, а отрицательно — марганец и углерод. Эквивалент стойкости против питтинговой коррозии (ЭСП, или PRE) рассчитывается по фактическому содержанию элементов, определяющих устойчивость материала к данному виду коррозии:  $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$  [12].

В зависимости от легирования стали существуют минимальные концентрации ионов хлора, при которых стали на основе железа, легированные хромом, не склонны к ПК:

Базовый состав стали	Минимальные концентрации ионов хлора
Fe + 5,6 % Cr	0,003
Fe + 11,6 % Cr	0,017
Fe + 20 % Cr	0,15
Fe + 18 % Cr + 10 % Ni	
или Fe + 24,5 % Cr	0,69
Fe + 29,4 % Cr	1,0

С увеличением концентрации ионов хлора в эксплуатационной среде необходимо увеличивать содержание хрома в стали.

Химическая или структурная неоднородность, образующаяся в результате кристаллизации или термической обработки, также увеличивает склонность к ПК. Не только неметаллические включения, но и любые границы раздела (межфазные, межзеренные) служат предпосылкой для питтингов. При этом мелкозернистая структура опаснее крупнозернистой.

Исходя из изложенного, в рамках выполненных исследований образцы труб подвергли контролю на стойкость к МКК и ПК.

Большинство ускоренных методов испытаний по определению коррозионной стойкости выполняются в растворах галогенов (хлора или фтора), поскольку эти вещества инициируют и ускоряют процессы коррозионных повреждений в наибольшей степени.

Склонность к ПК в зарубежной практике исследуют преимущественно по стандарту ASTM G48 [14], в отечественной — по ГОСТ 9.912 [15]. Испытания проводят в 10 % водном растворе хлорного железа: 100 г трихлорида железа гексагидрат ( $FeCl_3 \cdot H_2O$ ) на 900 мл дистиллированной воды. В нормативной документации требований по данному виду коррозии как таковых нет. Методики оценки склонности к ПК в основном сводятся к получению дополнительных сравнительных данных по питтингостойкости материалов (основной металл и зона сварного шва одной и той же трубы, разные марки стали, состояние поставки с термообработкой и деформацией шва или без, различное состояние подготовки поверхности и пр.). Вместе с тем зарубежные потребители при закупке труб из коррозионностойких сталей, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах, часто выставляют требования по стойкости к ПК в соответствии с ASTM G48. Эти требования могут быть выражены определенными критериями: установлением критической температуры ПК, удельной потери массы образцов, условной скорости коррозии и т. д.

Эквивалент стойкости против питтинговой коррозии, рассчитанный по результатам фактического анализа ( $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$ ), в металле исследованных труб различных поставщиков составляет:

Сталь	PRE
316L, $\varnothing 28 \times 0,7$ мм	23,05...23,5
316L, $\varnothing 20 \times 0,8$ мм	23,5...23,6
1.4404, $\varnothing 25,4 \times 0,71$ мм	23,7
1.4435, $\varnothing 22 \times 1,0$ мм	26,2

Наиболее высокие значения по данному эквиваленту имеет сталь 1.4435 из-за более высокого содержания

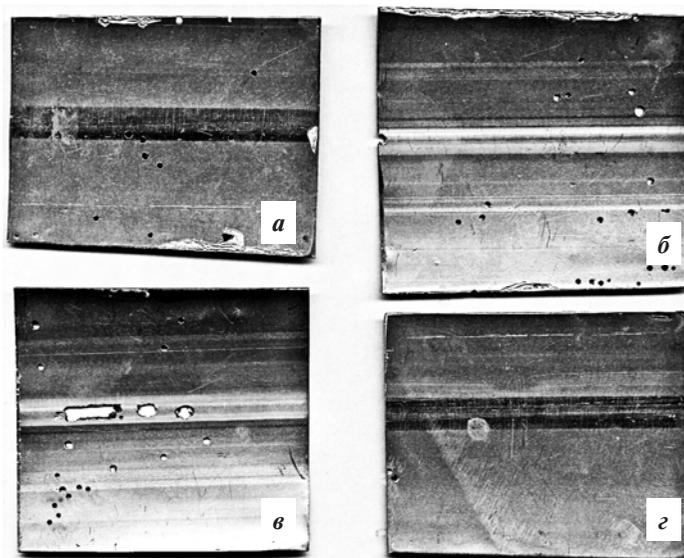


Рис. 3. Внешний вид образцов труб  $\varnothing 28 \times 0,7$  мм, сталь TP 316L, со швом после испытаний на ПК (22 °С, 72 ч)

молибдена и хрома. В стали 1.4404 значения PRE выше, чем в стали TP 316L, поскольку стандартом EN, в отличие от ASTM, предусмотрено легирование сталей азотом.

Образцы труб  $\varnothing 28 \times 0,7$  мм из стали TP 316L испытывались на ПК по методу А стандарта ASTM G48 в водном растворе хлорного железа в течение 72 ч. Данный метод предусматривает проведение испытаний при 22 и 50 °С; поскольку известно, что в стали TP 316L с повышением температуры испытаний интенсивно развивается ПК, выбрана температура 22 °С. В результате на наружной и внутренней поверхности зафиксировано наличие как зарождающихся, так и сквозных по основному металлу и по шву питтингов, а также растратов, свидетельствующих о склонности к локальной коррозии. По шву признаки ПК носят более масштабный характер по типу сквозной ножевой коррозии (рис. 3). Вследствие этого после испытаний потеря массы образцов со швом (0,4761—0,5070 г) в 2—3 раза превысила потерю массы образцов основного металла (0,1549—0,2344 г) тех же труб.

Поскольку сварные трубы  $\varnothing 28 \times 0,7$  мм из стали TP 316L фактически не выдержали испытания на стойкость против ПК по указанному режиму стандарта ASTM G48, метод А, в дальнейшем испытания проводили в соответствии с методикой ГОСТ 9.912. Образцы труб  $\varnothing 20 \times 0,8$  мм из стали TP 316L,  $\varnothing 25,4 \times 0,71$  мм из стали 1.4404,  $\varnothing 20 \times 1$  мм из стали 1.4435 испытали на ПК по методике ГОСТ 9.912 в водном растворе хлорного железа при температуре 20 °С в течение 5 ч. Исследования показали, что повреждаемость металла ПК (глубина питтингов и потеря массы образцов) зависит не только от таких известных факторов, как структура, качество поверхности и химический состав, но и от толщины стенки образца.

В трубах из стали 1.4404 с толщиной стенки 0,71 мм образовались питтинги различных размеров и расположения по шву и по основному металлу. На внутренней поверхности их больше, они более грубые по глубине и размерам; есть единичные и в скоплениях. Присутствуют групповые и один сквозной питтинг в области шва (рис. 4, а). Поверхность образца из стали 1.4435 с толщиной стенки 1,0 мм более устойчива к питтингообразованию, где идет



а



б

Рис. 4. Внешний вид образцов труб со швом после испытаний на ПК (20 °С, 5 ч):  
а — Ø25×0,7 мм, сталь 1.4404; б — Ø22×1,0 мм, сталь 1.4435

стравливание металла с поверхности более равномерно: по основному металлу питтингов нет вообще, на наружной поверхности единичные в области шва, а на внутренней поверхности цепочка мелких неглубоких зарождающихся питтингов по шву; сквозные не наблюдаются (рис. 4, б). Разница в потере массы образцов после испытаний для стали 1.4404 (0,1454 г, 0,71 %) на 5–6 % превышает разницу в потере массы для стали 1.4435 (0,1351 г, 0,76 %). Можно допустить, что на глубину проникновения питтингов и уменьшение массы образцов оказала влияние также толщина стенки образца: чем она больше, тем менее на данном этапе заметны потери. В целом это подтверждает, что благодаря более высоким концентрациям хрома и молибдена в стали 1.4435 стойкость ее к ПК несколько выше, чем стойкость стали 1.4404. Дополнительного изучения требует картина образования питтингов. Более хаотично они располагаются в трубах из стали 1.4404 и строго вдоль по шву сплошной цепочкой в трубах из стали 1.4435 (рис. 4, б). Предположительно это может быть связано с более высоким содержанием никеля в данной марке, который способствует склонности сварных соединений к коррозии.

Исследования особенностей ПК в трубах импортного производства выполнены на образцах с раскатанным сварным швом при отсутствии внутреннего грата. Трубы Ø20×0,8 мм из стали TP 316L, изготовленные в Украине, были исследованы по двум вариантам: с раскаткой шва без внутреннего грата и без раскатки шва с наличием внутреннего грата до 0,1 мм (фактически 0,08–0,09 мм). Шероховатость  $R_a$  внутренней поверхности составила 0,31...0,76 мкм (в среднем 0,56 мкм) в трубах с раскатанным швом и 0,27...1,34 мкм в трубах без раскатки шва. Испытания на стойкость к ПК выполнены по ГОСТ 9.912 в водном растворе хлорного железа при 20 °С в течение 5 ч. Получены интересные, на наш взгляд, данные. Потеря массы образцов со швом (0,004...0,008 г) незначительно превышает потерю массы образцов основного металла тех же труб (0,002...0,005 г), но в образцах с раскатанным швом потеря массы (0,006...0,008 г) оказалась в 1,5–2 раза большей, чем в образцах с внутренним гратом (0,004 г). Сквозных питтингов по шву нет. Кроме того, в образцах с раскатанным швом питтингообразование в шве активнее происходит по внутренней (рабочей) поверхности (аналогично подобным трубам импортного производства), а в образцах с нераскатанным внутренним гратом, наоборот, по наружной поверхности. В основном металле питтинги либо отсутствовали, либо они незначительные и неглубокие, во многом благодаря качественной поверхности данных труб.

Ряд стандартов ASTM, в частности ASTM A249, в качестве не обязательного, а дополнительного требования к сварным трубам, включают оригинальную методику испытания сварного шва на стойкость к МКК, которая заключается в кипячении образцов в водном растворе химически чистой соляной кислоты (50:50) с применением барботажа из стекла. Время испытаний (от 2 до 24 ч) определяется по потере толщины основного металла, которая должна составлять от 40 до 60 % исходной толщины. Коэффициент коррозии  $R$  рассчитывается по потере толщины металла до и после испытаний как отношение разницы по толщине сварного шва к разнице по толщине основного металла. Для сварных труб допустимый коэффициент коррозии  $R \leq 1,25$ ; другие критерии, например  $R \leq 1$ , должны согласовываться с потребителем [5]. Для так называемых сварно-деформированных труб, т. е. холоднодеформированных, полученных из сварной трубы с последующей ее деформацией, коэффициент коррозии нормируется от 0,9 до 1,1 [13]. Согласно требованиям стандартов, данные испытания проводятся только по требованию потребителя. По результатам испытаний, выполненных итальянским производителем, в трубах Ø22×1,0 мм из стали 1.4435  $R = 0,93$ , а в трубах Ø22×0,8 мм из стали 1.4404  $R = 0,96$ .

По показателю  $R$  целесообразно определить оптимальные критерии коррозионной стойкости труб и проводить испытания каждым поставщиком в качестве аттестационных разово либо периодически с предоставлением протоколов. При получении удовлетворительных результатов рекомендуется принимать трубы с учетом данного показателя коррозионной стойкости сварного шва под гарантию производителя с указанием в сертификате на трубы.

Обычно при испытаниях на МКК сварные соединения, наплавленный металл и металл шва не подвергаются предварительному провоцирующему нагреву. В нашем случае испытания выполнены по методу АМУ как без провоцирующего нагрева, так и в ужесточенном режиме с предшествующим провоцирующим нагревом (650 °С, 1 ч) и последующим 8-часовым кипячением образцов сварных труб в сернокислом растворе сульфата меди. После этого образцы были изогнуты специальным способом. Трещины в местах Z-образных изгибов образцов не выявлены как на внутренней, так и наружной поверхности труб, ни по шву и околшовоной зоне, ни по основному металлу. Таким образом, в исследованном массиве данных все сварные трубы являются стойкими к МКК независимо от производителя и марки стали (TP 316L, 1.4404, 1.4435).

## Выводы

1. Выполнена комплексная сопоставительная оценка показателей качества сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали TP 316L и ее аналогов 1.4404, 1.4435 на соответствие основным требованиям международных стандартов ASTM A249 и EN 10217-7, которые регламентируются для теплообменников и конденсаторов. Установлено, что трубы, изготовленные на современных действующих производствах Германии, Италии, Украины с применением аргонодуговой TIG-сварки, по своим характеристикам сопоставимы между собой. По качеству шва, геометрическим размерам высокой точности изготовления, состоянию поверхности, уровню механических и технологических свойств, структуре, стойкости к межкристаллитной коррозии все трубы удовлетворяют нормативам.

2. Проведены дополнительные материаловедческие исследования по анализу коррозионной стойкости сварных труб с точки зрения их эксплуатационной надежности. По результатам ускоренных коррозионных испытаний, образцы исследованных труб из стали TP 316L и ее аналогов 1.4404, 1.4435, независимо от варианта исполнения, проявляют склонность к питтинговой и ножевой коррозии сварного шва. Поэтому целесообразно требования к коррозионной стойкости сварных труб считать не дополнительными, а обязательными. При эксплуатации сварных труб из коррозионностойкой стали в агрессивных условиях требуется уточнение по некоторым критериям. Для этого необходимо продолжить исследования по отработке методики испытаний на стойкость против питтинговой коррозии и уточнение критериев по питтингоустойчивости сварных швов.

3. Выбор материала труб следует осуществлять с учетом водно-химического режима работы конденсаторов на АЭС. Для предотвращения проблем вследствие коррозии, в случае длительной эксплуатации в условиях с повышенным содержанием солей, ионов хлора, сероводорода, карбонатных отложений и т. п., рекомендуется выбирать либо стальные трубы, усиленные по толщине стенки, оптимально легированные элементами, повышающими коррозионную стойкость, стали, либо тонкостенные трубы из титана.

## Список использованной литературы

1. Оценка качества сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали / Т. Н. Буряк, Н. В. Ярошенко, А. А. Тараненко, А. М. Лавриненко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2014. — № 5. — С. 40—43.
2. Хэнсон К. Ф. Тенденция использования титана в теплообменных аппаратах / К. Ф. Хэнсон // *Материалы 3-й междунар. конф. «Металловедение и технология»*, Москва, 1978. — М.: ВИЛС, 1978. — С. 423—435.
3. Обоснование материала для замены конденсаторов турбоагрегатов АЭС и создание технических условий на длинномерные трубы: Отчет о НИР (аннотационный): / ГП «НИТИ»; рук. Т. Н. Буряк; Исполн.: Н. В. Ярошенко, А. А. Тараненко, В. М. Ворона, И. П. Островский, Л. Г. Ковалева, И. А. Ванжа. — № 108-06, ГР № 0106U012027. — Днепропетровск, 2006. — 65 с.
4. Современная технология производства в Украине высококачественных сварных труб прецизионного сортамента из коррозионностойкой стали / Т. Н. Буряк, И. А. Кацай, В. Г. Кузнецов, А. И. Новиков, А. А. Тараненко, Н. В. Ярошенко // *Автоматическая сварка*. — 2015. — № 2. — С. 1—6.
5. Standard Specification for Welded Austenitic Steel Boiler, Superheater, Heat-Exchanger, and Condenser Tubes: ASTM A249/A249M-10a. [November 2010, DOI:10.1520/AO249\_AO249M-10a]. — USA, New York, 2010. — P. 10. — (Standard Com. A01 ASTM USA).

6. Welded Steel Tubes for Pressure Purposes: Technical Delivery Conditions. Part 7: Stainless Steel Tubes: EN 10217-7. [February 2005, № EN 10217:7-2005:E]. — EU, Brussels, 2005. — P. 37. — (Standard Com. CEN).

7. Denisov V. G. Corrosion strength monitoring off NPP component residual lifetime / V. G. Denisov, V. N. Belous // *Proc. International Conf. “Erosion and corrosion nuclear plant materials”*.— Kiev (Ukraine) — Vienna: Int. atom energy agency, 1994. — P. 1—14.

8. Герасимов В. В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющих сталей / Герасимов В. В., Герасимова В. В. // *Металлургия*. — М., 1976. — 176 с.

9. Свистунова Т. Коррозионностойкие сплавы на основе никеля для сред особо высокой агрессивности // *Национальная металлургия*. — 2003, январь-февраль. — С. 98—104.

10. Горынин И. В. Разработка и выбор материалов для быстрых реакторов с натриевым теплоносителем / Горынин И. В., Трапезников Ю. М., Марков В. Г. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — 1999. — № 9. — С. 24—31.

11. Кикичев Р. Н. Коррозионное растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов / Р. Н. Кикичев // *Металлы*. — 2003. — № 2. — С. 61—66.

12. Ульянин Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы [Справочник] / Е. А. Ульянин // *Металлургия*. — М., 1991. — 256 с.

13. Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes: ASTM A312/A312M-08. [April 2008, DOI:08.1520/AO312-08]. — USA, New York, 2008. — P. 20. — (Standard Com. A01, A01.10 ASTM USA).

14. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys By Use of Ferric Chloride Solution: ASTM G48-11 [September 2011, DOI:10.1520/G048-11]. — USA, New York, 2011. — P. 11. — (Standard Com. G01 ASTM USA).

15. Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии: ГОСТ 9.912-89 [Введен 01.01.1991] — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 18 с.

## References

1. Buryak, T.N., Yaroshenko, N.V., Taranenko, A.A., Lavrynenko, A.M. (2014), “Quality Assessment of Welded Long Thin-Walled Pipes Made of Stainless Steel” [Otsenka kachestva svarnykh dlinnomernykh osobotnostennykh trub iz korrozionnostoikoiki stali], *Metallurgical and Mining Industry*, No. 5, pp. 40—43. (Rus)
2. Hanson, K.F. (1978), “Trends of Using Titanium in Heat Exchangers” [Tendentsiia ispolzovaniia titana v teploobmennykh apparatakh], *Proceedings of the 3rd Int. Conf. “Metallurgy and Technology”*, Moscow, A-RILA, pp. 423—435. (Rus)
3. Buryak, T.N., Yaroshenko, N.V., Taranenko, Vorona, V.M., Ostrovskii, I.P., Kovaliova, L.G., Vanzha, I.A. (2006), “Justification of the Material to Replace NPP Turbine Generator Condensers and Development of Technical Conditions for Long Pipes. R&D Report (Abstracts)” [Obosnovaniie materiala dlia zameny kondensatorov turboagregatov AES i sozdaniie tekhnicheskikh uslovii na dlinnomernyie truby. Otchet of NIR (Annotatsionnyi)], SE “Ya.Ye. Osady SRTI”, Dnipropetrovsk, 65 p. (Rus)
4. Buryak, T.N., Katsai, I.A., Kuznetsov, V.G., Novikov, A.I., Taranenko, A.A., Yaroshenko, N.V. (2015), “Modern Ukrainian Production Technology for High-Quality Precise Welded Pipe Assortment of Stainless Steel” [Sovremennaia tekhnologiya proizvodstva v Ukraine vysokokachestvennykh svarnykh trub pretsizionnogo sortamenta iz korrozionnostoikoiki stali], *Automatic Welding*, No. 2, pp. 1—6. (Rus)
5. Standard Specification for Welded Austenitic Steel Boiler, Superheater, Heat-Exchanger, and Condenser Tubes: ASTM A249/A249M-10a, November 2010, DOI:10.1520/AO249\_AO249M-10a, — USA, New York, 2010. — Standard Com. A01 ASTM USA, p. 10.
6. Welded Steel Tubes for Pressure Purposes, Technical Delivery Conditions Part 7: Stainless Steel Tubes: EN 10217-7, February 2005, No. EN 10217:7-2005:E, EU, Brussels, 2005, Standard Com. CEN, p. 37
7. Denisov, V. G. (1994), “Corrosion Strength Monitoring of NPP Component Residual Lifetime”, *Proc. International Conf. “Erosion and Corrosion Nuclear Plant Materials”*, Kyiv (Ukraine), Vienna: Int. Atomic Energy Agency, pp. 1—14.

8. Gerasimov V.V., Gerasimova, V.V. (1976), "Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels" [Korrozionnoie rastreskivaniie austenitnykh nerzhzheviuschikh stalei], Metallurgy, Moscow, 176 p. (Rus)
9. Svistunova, T. (2003), "Corrosion-Resistant Nickel-Based Alloys for High Aggressive Media" [Korrozionnostoikiie splavy na osnove nikelia dlia sred osobovysokoi agressivnosti], National Metallurgy, January-February, pp. 98–104. (Rus)
10. Gorynin, I.V., Trapeznikov, Yu.M., Markov, V.G. (1999), "Development and Selection of Materials for Fast Reactors with Sodium Coolant" [Razrabotka i vybor materialov dlia bystrykh reaktorov s natrievym teplonositelem], Metallurgy and Heat Treatment of Metals, No. 9. pp. 24–31. (Rus)
11. Kikichev, R.N. (2003), "Corrosion Cracking of Austenitic Chromium-Nickel Steels and Alloys" [Korrozionnoie rastreskivaniie khromonikelevykh stalei i splavov], Metals, No. 2, pp. 61–66. (Rus)
12. Ulyanin, E.A. (1991), "Corrosion Resistant Steels and Alloys. Manual." [Korrozionnostoikiie stali i splavy. Spravochnik], Metallurgy, Moscow, 256 p. (Rus)
13. Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes: ASTM A312/A312M-08, April 2008, DOI:08.1520/A0312-08, USA, New York, 2008, Standard Com. A01, A01.10 ASTM USA, p. 20.
14. Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys By Use of Ferric Chloride Solution: ASTM G48-11, September 2011, DOI:10.1520/G0048-11, USA, New York, 2011. Standard Com. G01 ASTM USA, 11 p.
15. Unified Corrosion and Ageing Protection System. Corrosion-Resistant Steels and Alloys. Methods of Accelerated Tests for Resistance to Pitting Corrosion: GOST 9.912–89 [Yedinaiia sistema zaschity ot korrozii i stareniiia. Stali i splavy korrozionnostoikiie. Metody uskorennykh ispytanii na stoikost k pittingovoi korrozii: GOST 9.912–89], Introduced on 01 January 1991, Moscow, Publishing of Standards, 1990, 18 p. (Rus)

Получено 10.03.2015.

## ВИМОГИ ДО СПИСКУ ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Список використаної літератури переслідує багато цілей в науковій статті:

- відображає те, звідки з'явилася ідея дослідження;
- підключає читачів до інших досліджень, одночасно залучаючи читачів і до роботи автора;
- дає контекст для роботи автора;
- вказує на інтерес до цієї галузі досліджень.

Правильне описання джерел, на які посилаються автори, є запорукою того, що цитовану публікацію буде враховано в процесі оцінювання наукової діяльності її авторів, а отже, й організації, регіону, країни. За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність тощо. Тому найважливішими складовими в бібліографічних посиланнях є *прізвища всіх авторів*, без скорочення їх кількості.

У бібліографічному описанні обов'язково наводяться автори та назва твору, місце публікації, для книжки – місто та видавництво,

для статті – назва збірника чи журналу, його номер або випуск, дата публікації, кількість сторінок у книжці або сторінки, на яких вміщено статтю.

### Приклад оформлення бібліографічних посилань:

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Применение риск-информированных подходов в инспекционной деятельности / А. М. Дыбач, Г. В. Громов, А. Е. Севбо, М. Х. Гашев, В. С. Бойчук // Ядерна та радіаційна безпека. — К., 2010. — Вип. 3 (47). — С. 9–15.
2. Звіт про науково-дослідну роботу : Оперативний та технологічний аналіз порушень у роботі АЕС України у 2013-2014 рр. : Оперативний та технологічний аналіз порушень у роботі АЕС України за 2013 рік (проміжний, етап 3) / ДНТЦ ЯРБ; керівник О. І. Лігоцький; викон. С. В. Недбай, Г. Г. Мелешко, Р. І. Серафін. — К., 2014. — 213 с. — № держреєстрації 011U004712.
3. Положення про порядок розслідування та обліку порушень в роботі атомних станцій : НП 306.2.100-2004 // Офіційний вісник України. — 2004. — № 51. — Стор. 187, ст. 3382. Код акту 31072/2004.
4. Коновалов А. И. Гайковерт нового века / А. И. Коновалов // Атомная стратегия. — 2006. — № 22. — С. 33. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.proatom.ru/files/as22\\_20\\_40.pdf](http://www.proatom.ru/files/as22_20_40.pdf)