



# КОМПЛЕКСНАЯ СОПОСТАВИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ TP 316L, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ

Т. Н. БУРЯК, А. А. ТАРАНЕНКО, Н. В. ЯРОШЕНКО, С. П. БУСЬКО, А. Д. МАЛЫШ  
 ГП «НИТИ». 49005, г. Днепропетровск, ул. Писаржевского, 1, а. E-mail: lab241@i.ua

Предложена модель системы управления качеством на основе комплексного подхода и выполнена сопоставительная оценка сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали TP 316L производства Украины, Германии, Италии. Исследованы геометрические, механические, технологические, металлографические, коррозионные, физические показатели. Установлено соответствие стабильно высокого качества труб различных производителей основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM и EN, что достигается благодаря качественному металлу и стабильности технологии изготовления труб. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 4.

*Ключевые слова:* комплексный подход, контроль, стабильность, качество, труба, сварной шов, структура, механические свойства

В настоящее время все большее применение находят сварные трубы малых размеров из коррозионностойких материалов (титана, коррозионностойких марок стали) [1–3]. Поскольку данные трубы отличаются снижением стоимости от 20 до 35 % по отношению к бесшовным из аналогичной стали, особый интерес проявляется к высоколиквидным трубам прецизионного сортамента – особотонкостенным, высокоточным, длинномерным с повышенными техническими характеристиками. Такой сортамент может быть сложным для исполнения в бесшовном варианте, но может быть получен на современных производствах сварным способом. В данной работе разработана программа и осуществлены комплексные исследования качественных показателей сварных труб из коррозионностойкой стали различных производителей из Украины, Италии, Германии.

Материалом исследования служили трубы диаметром от 20 до 28 мм с толщиной стенки от 0,7 до 1,0 мм, длиной от 9 до 15 м из высоколегированной многокомпонентной стали аустенитного класса TP 316L по ASTM и ее аналогов 1.4404 и 1.4435 по EN (табл. 1) [4, 5]. Модель управления качеством и программа испытаний включали оценку на соответствие основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM A 249 и EN 10217-7 (рис. 1, 2). На рис. 2: 1 – *визуальный осмотр*: 1.1 – оценка макроструктуры; 1.2 – контроль геометрических размеров; 2 – *химический анализ*; 3 – *механические испытания*: 3.1 – растяжение при  $T_{исп} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3.1.1 – продольное патрубков; 3.2.2 – поперечное кольцевых образцов; 4 – *технологические испытания*: 4.1 – сплющивание; 4.2 – статический загиб; 4.3 – раздача; 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 –



Рис. 1. Модель системы управления качеством продукции (труб) на основе системного подхода

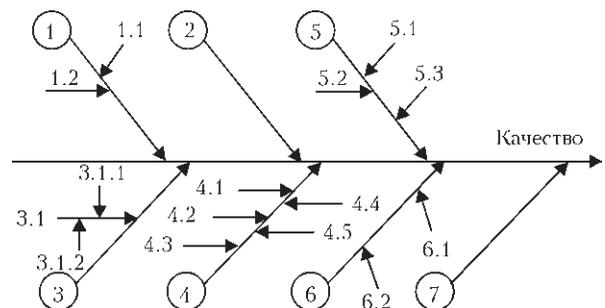


Рис. 2. Структура программных испытаний

МКК (метод АМУ); 6.1 – питтинговая коррозия; 7 – *неразрушающий контроль (УЗК, ВТК)*.

При выборе методов исследования применен комплексный подход: использование труб предполагается в Украине, но изготовлены они по зарубежным стандартам, поэтому использованы стандартизованные отечественные и зарубежные методики, а также дополнительные материаловедческие и физические исследования. Испытания выполнены на базе Научно-инженерного центра ГП «НИТИ», аккредитованного на техническую компетентность по ДСТУ ISO/IEC 17025:2006.

Трубы изготовлены в условиях современных производств аргоно-дуговой сваркой, метод ТИГ, коэффициент шва  $V=1$ , с выполнением термообработки в защитной атмосфере. Сталь, как правило, получают с применением способа аргоно-кислородного дутья (АОД процесс), что обеспечивает в заготовке чистоту по неметаллическим включениям, снижение содержания углерода и серы.

Установлено, что химический состав труб различных производителей напрямую зависит от особенностей выбранного поставщика металла, при этом на содержание углерода может влиять технология производства труб. Так, в трубах производства Украины низкое содержание углерода (0,015...0,016 %), но несколько повышенное по сравнению с исходным штрипсом (0,011 %) и довольно высокое содержание фосфора (0,043...0,044 %). В трубах импортного производства более высокое содержание углерода (0,037...0,038 % – Италия, 0,027...0,032 % – Германия), но более низкое содержание фосфора

(0,013 % – Италия, 0,0310...0,032 % – Германия). Содержание серы отличается незначительно – колеблется от 0,0077 до 0,012 %, а содержание дорогостоящих элементов никеля и молибдена находится на нижнем пределе. В целом, с учетом допустимых отклонений и ошибки измерения, исследуемый металл соответствовал нормативу, приведенному в табл. 1.

Визуальный осмотр труб показал светлую, чистую поверхность с отсутствием грата за счет деформации (раскатки) и зачистки сварного шва. Причем отечественные трубы получены по двум вариантам: с деформацией шва («р») и без деформации шва («н»), высота внутреннего грата в последнем варианте до 1 мм. Недопустимые дефекты не обнаружены во всех случаях. По геометрическим размерам и отклонениям по диаметру и толщине стенки все трубы соответствовали высокой точности изготовления.

Металлографическими исследованиями установлено, что в шве и околошовной зоне поры, трещины, непровары, инородные включения, проплавления и другие дефекты отсутствуют независимо от варианта изготовления (рис. 3). В микроструктуре труб четко различимы: основной металл с рекристаллизованными зернами аустенита (рис. 4, а, 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 небольшой доли ферритной составляющей (рис. 4, б). Структура основного металла мелкозернистая с величиной зерна от

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

Стандарт	Номер (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	2,0...3,0
EN 10217-7	1.4404	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	≤ 0,11	16,50...18,5	10,0...13,0	2,0...2,5
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	2,5...3,0

\*Для особотонкостенных труб допускается содержание углерода 0,040 % max

**Таблица 2. Механические свойства и величина зерна основного металла труб в соответствии с требованиями стандартов**

Размер, мм; марка стали (производитель)	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{1,0}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_{50}$ , %	$\delta_5$ , %	Номер зерна
Ø28×0,7; TP316L (Германия)	559...607	269...315	Не определяли	59,0...59,0	60,0...60,0	9
Ø25,4×0,71; 1.4404 (Италия)	615...605	292...301	348...329	65,0...58,5	67,5...62,5	7
Ø22,0×1,0; 1.4435 (Италия)	563...566	292...297	323...330	62,0...60,0	64,0...63,5	6
Ø20,0×0,8, «р»; TP316L (Украина)	617...623	349...347	370...372	55,0...56...5	57,5...59,5	8
Ø20,0×0,8, «н»; TP316L (Украина)	588...602	306...322	335...347	56,0...58,0	57,0...62,0	7
Нормы ASTM A249	min 485	min 170	–	min 35	–	–
Нормы EN 10217-7	490...690	min 190	min 225	min 30	min 40	–

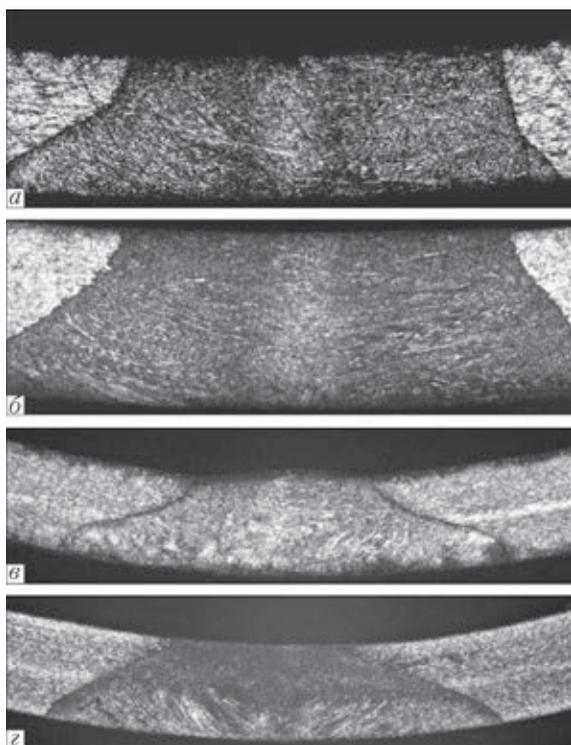


Рис. 3. Макроструктура ( $\times 12$ ) сварного соединения труб различных производителей, : а – Германия; б – Италия; в – Украина (шов без деформации); г – Украина (деформированный шов)

№ 6 до № 9, отличается, очевидно, в зависимости от структуры исходного штрипса у различных производителей (табл. 2).

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: трубы характеризуются высоким комплексом прочностных и пластических свойств, без существенных отличительных особенностей (табл. 2). В большей степени на формирование уровня механических свойств в трубах влияет химический состав и величина зерна в заготовке.

Трубы выдержали технологические испытания на параметры, заданные в соответствии с конкретными размерами исследуемых образцов: все виды сплющивания (на заданное расстояние, полное, обратное), статический загиб патрубка, изгиб с перегибом полосы со швом, раздачу, бортование. После всех этих испытаний на образцах отсут-

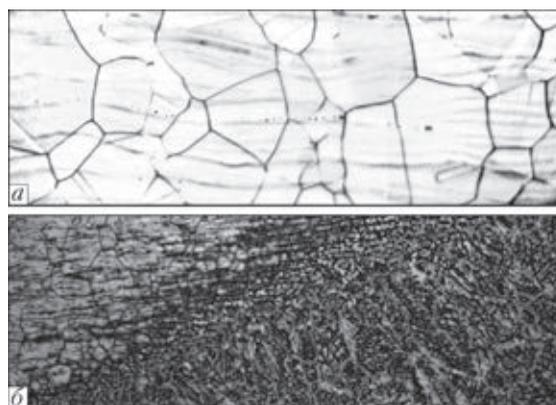


Рис. 4. Типичная микроструктура электросварных труб: а – основной металл ( $\times 200$ ); б – околошовная зона + шов ( $\times 100$ ) ствовали дефекты в виде трещин, надрывов, непроваров, проплавлений и перекрытий.

Не менее важным является испытание на разрыв поперечных кольцевых образцов для определения прочности сварных соединений с расположением шва  $90^\circ$  относительно оси приложения усилия (или 3 ч). По уровню предела прочности получены удовлетворительные результаты по всем вариантам. Разрушение образцов по шву не произошло в трубах с деформацией (раскаткой) шва, образцы без раскатки разрушились в области шва (табл. 3).

Также выполнены контрольные испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) по методу АМУ кипячением образцов в сернокислотном растворе сульфата меди в течение 8 ч. Обычно 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  $650^\circ\text{C}$ , выдержка 1 ч. Трещин в местах Z-образных изгибов образцов не выявлено как на внутренней, так и на наружной поверхности труб. Таким образом, сварные трубы всех производителей из стали TP 316L и ее аналогов 1.4404 и 1.4435, характеризуются высокой стойкостью к МКК основного металла, сварного шва и околошовной зоны.

При производстве и диагностике сварных труб особая роль отводится неразрушающим видам контроля. Вихретоковый контроль (ВТК) является обязательным, а ультразвуковой (УЗК) дополнитель-

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

Размер, мм (производитель)	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Место разрыва
Ø28×0,7 (Германия)	603	по основному металлу
	573...619	по основному металлу или в конце зоны термического влияния
Ø25,4×0,71 (Италия)	591...606	по основному металлу
Ø22,0×1,0 (Италия)	565...558	->-
Ø20,0×0,8, вар. «р» (Украина)	639...693	->-
Ø20,0×0,8, вар. «н» (Украина)	642...673	по шву или в зоне термического влияния (разрушение пластичное)



ным. От проведения испытаний гидравлическим давлением данного вида труб зачастую отказываются и изготовители, и потребители, так как требуется просушивание внутреннего канала, иначе могут возникнуть проблемы, связанные с коррозией, кроме того, в особотонкостенных трубах могут возникнуть дополнительные напряжения, что также оказывает отрицательное влияние. ВТК установлен в поточной линии трубоэлектросварочных станков на производстве. Контроль проводится в два этапа: контроль шва (качества сварки), а затем тела трубы на наличие продольных и поперечных дефектов по наружной и внутренней поверхности. По сертификатным данным производителей все представленные трубы годные, т.е. прошли 100 % ВТК.

При выполнении УЗК сварных труб исследуемого сортамента следует иметь в виду, что отличия в структурных параметрах, выраженные в том, что имеются основной металл, околошовная зона или зона термического влияния и шов, где равноосная рекристаллизованная структура аустенита в основном металле отличается от литой структуры с наличием феррита в шве, могут приводить к возникновению сигналов.

В условиях ГП «НИТИ» выполнен ультразвуковой контроль образцов труб  $\varnothing 20,0 \times 0,8$  мм, изготовленных в Украине, на отрезках по 1,5 м, полученным по двум вариантам: с деформацией (раскаткой) шва «р» и с нераскатанным швом «н». Соответственно были изготовлены два стандартных образца для настройки УЗ-дефектоскопа с искусственными дефектами типа «риска» глубиной 10 % номинальной толщины стенки. Параметры искусственных продольных отражателей типа «риска»: длина 9,7 мм, ширина 0,175 мм, глубина 0,088 мм. В трубах по варианту «н» регистрировались сигналы от сварного шва, которые на 6 ДБ меньше, чем сигналы от искусственных дефектов. В связи с этим, при организации автоматизированного УЗК в условиях полномасштабного производства может возникнуть проблема перебраковки труб данного типа. В целом, следует констатировать, что в трубах отечественного производителя, изготовленных и проконтролированных по двум вариантам, не выявлены дефекты, эквивалентные искусственным дефектам стандартного образца,

т.е. трубы годные в соответствии с установленными требованиями. В настоящее время проводятся работы по УЗК с поперечной ориентацией искусственного дефекта типа «риска».

### Выводы

Выполнены комплексные сопоставительные исследования качественных показателей сварных особотонкостенных длинномерных труб из коррозионностойкой стали TP 316L различных производителей Украины, Италии, Германии. На основании результатов испытаний установлено, что полученные в условиях современных производств трубы по уровню геометрических, механических, технологических, металлографических, коррозионных и физических параметров, отвечают основным и дополнительным требованиям международных стандартов, в частности, евро нормам. Сравнительная оценка качества труб не выявила существенных различий, трубы, полученные в различных условиях, по уровню проконтролированных показателей сопоставимы между собой. Таким образом, все сказанное выше свидетельствует о стабильности производства и является гарантией надежности и высокого качества сварных труб. Предложена модель системы управления качеством на основе комплексного подхода с целью объективного выбора изготовителя заданного вида заготовки и труб с гарантией стабильного качества продукции.

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. Тенденции использования титана в теплообменных аппаратах // Матер. 3-й Междунар. конф. «Титан. Металловедение и технология». – М.: ВИЛС, 1978. – С. 423–435.
3. Обоснование материала для замены конденсаторов турбоагрегатов АЭС и создание технических условий на длинномерные трубы: Отчет о НИР / ГП «НИТИ», № 108-206; ГР № 0106U012027. – Днепрпетровск, 2006. – 65 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. – Ч. 7: Трубы из нержавеющей стали. – Европ. комитет по стандартизации (CEN). – Брюссель, 2005. – 38 с.

A model of quality management system, based on an integrated approach is proposed, and comparative evaluation of welded extended superthin-wall pipes from corrosion-resistant TR 316L steel manufactured in Ukraine, Germany, and Italy, was performed. Geometrical, mechanical, technological, metallographic, corrosion and physical indices have been studied. A correspondence of pipes of different manufacturers to stable high quality is established, in keeping with the basic and additional requirements of ASTM and EN standards that is achieved due to high quality metal and reproducibility of pipe manufacturing technology. 5 References, 3 Tables, 4 Figures.

*Keywords: integrated approach, testing, stability, quality, pipe, weld, structure, property*

Поступила в редакцию  
23.12.2014