

## ВЛИЯНИЕ АКТИВИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА КАЧЕСТВО СПИРАЛЬНОШОВНЫХ ТРУБ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

**В. В. ПОЛУХИН, А. С. ПРОКОФЬЕВ, Д. В. РОМАШКО, С. В. РЫМАР, Р. С. ГУБАТЮК**  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Работа посвящена развитию технологии высокочастотной сварки при изготовлении электросварных тонкостенных спиральношовных труб путем введения активирующих веществ в зону сварного шва и приложения давления для повышения прочностных характеристик металла сварного соединения. Исследования базируются на научных положениях теоретических основ сварки, материаловедения, проблем прочности металлов. Особенностью рассмотренной технологии сварки является то, что в процессе нагрева соединяемых кромок токами высокой частоты активирующие вещества, имеющие более низкие температуры плавления, переходят в жидкое состояние, связывают поверхностные загрязнения и выносят их наружу при приложении давления. Кромки очищенного металла соединяются в результате протекания диффузных процессов при температурах, близких к температурам плавления основного металла. По сути процесс соединения на завершающей стадии происходит в твердой фазе металла шва. Полученная ширина сварного шва не превышает 4...8 мкм. Металл шва состоит из основного свариваемого металла, обогащенного элементами активирующего вещества. Структура околосшовной зоны близка к структуре основного металла. Возможно изготовление электросварных тонкостенных спиральношовных труб с высоким качеством сварного соединения при высокой скорости сварки. Библиогр. 21, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* тонкостенные спиральношовные трубы, сварка, ток высокой частоты, приложение давления, активирующие вещества

В современных условиях развития трубного рынка актуальным остается производство тонкостенных спиральношовных труб [1–3], у которых соотношение диаметра  $D$  к толщине стенки  $S$  ( $D/S$ ) составляет 80/1 и более. Как правило, толщина стенки таких труб определяется толщиной ленты (штрипса), из которой изготавливают такие трубы.

Тонкостенные спиральношовные трубы отличаются рядом положительных особенностей. Одна из них — высокий коэффициент использования материала по причине уменьшенной толщины стенки и большой величины соотношения  $D/S$ . Другая — высокопродуктивный и экономичный способ их производства. На разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона высокочастотных трубо-электросварных станах изготовление электросварных тонкостенных спиральношовных труб происходит за один проход. Станы позволяют осуществлять широкую регулировку соотношения  $D/S$  за счет изменения диаметра выпускаемых труб, при сохранении толщины стенки трубы  $S$  постоянной. Это обеспечивает возможность производства труб широкой номенклатуры. Стан малогабаритен и собирается по блочной схеме, с возможностью его размещения на небольшом производственном участке или в кузове автоприцепа, железнодорожной платформы, барже, что делает оборудование мобильным.

По энергетическим затратам на погонный метр сварного шва способ высокочастотной сварки в

изготовлении электросварных тонкостенных спиральношовных труб является самым экономичным и высокопроизводительным.

К преимуществам тонкостенных спиральношовных труб можно также отнести возможность нанесения на них защитных покрытий, в том числе и неметаллических, в виде эмали, стекла, синтетических и композитных материалов, как внутри трубы, так и снаружи. В случае полиэтиленового покрытия по внешнему виду трубы схожи с пластиковыми трубами, но существенно прочнее последних. При этом применимы традиционные технологии сварки при сборке труб в трубопроводы и при установке фланцев.

Тонкостенные спиральношовные трубы получили распространение при изготовлении воздуховодов, систем вентиляции, пневматических систем, различных продуктопроводов, в том числе и для сыпучих материалов, а также в системах пожаротушения. Такие трубы можно использовать при изготовлении огнетушителей, емкостей для лакокрасочной промышленности, при производстве баллонов, тубусов, ресиверов и другой подобной продукции.

Труба электросварная спиральношовная тонкостенная — это труба, изготавливаемая при помощи сложной формовки и электросварки листового проката, в данном случае штрипса. Основа технологии производства электросварной спираль-

ношовной трубы заключается в выполнении сварного шва по цилиндрической спирали — по поверхности трубы. Применение токов высокой частоты позволяет существенно повысить скорость изготовления трубы, однако при этом необходимо обеспечить сложно-деформационное формирование и вращательно-поступательное движение свариваемой заготовки. Формированию подвергается как свариваемая заготовка, так и сварной шов.

Спиральный шов в такой трубе одновременно сочетает в себе свойства кольцевого и продольного шва. Так как сварной шов выполняется по цилиндрической спирали, то в спиральношовных трубах наблюдается благоприятное равномерное распределение нагрузок на шов, и металл шва частично разгружается от радиальных напряжений [4] в связи с тем, что швы размещены под углом к образующей цилиндрической поверхности трубы.

В ИЭС им. Е. О. Патона была создана высокопроизводительная технология высокочастотной сварки для изготовления тонкостенных спиральношовных труб из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Это высокочастотная сварка давлением с оплавлением, без оплавления и плавлением [1–3, 5]. Также в ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ индукционной прессовой сварки давлением с применением активирующих веществ в зоне шва и последующей пластической деформации зоны соединения [1, 2, 6, 7–16]. Данный процесс соединения металлов в 2006 г. введен в Государственный стандарт Украины [17] под термином сварко-пайка.

Применение активирующих веществ в зоне шва при их расплавлении позволяет активировать соединяемые поверхности основного металла, частично легировать кромки соединяемого металла, защитить зону сварки от воздействия атмосферы, снизить температуру проведения процесса сварки. При этом формирование и образование самого сварного соединения происходит в твердой фазе без расплавления основного металла. Температура проведения процесса индукционной прессовой сварки давлением с использованием активирующих веществ в зоне шва определяется температурой плавления активирующих веществ, которая ниже температуры плавления основного металла. Применение давления и последующая пластическая деформация сварного соединения позволяют ускорить встречные диффузионные процессы в зоне шва, увеличить площадь соединяемой поверхности в шве, что способствует удалению из зоны шва продуктов активации в виде тонкой жидкой прослойки, омывающей кромки основного металла, и являющейся нежелательным компонентом в сформированном шве. Так, соединение формирует очищенный основной металл,

находящийся в твердом состоянии и имеющий температуру несколько выше точки  $A_{c3}$  диаграммы состояния стали.

Работа посвящена развитию технологии высокочастотной сварки при изготовлении электросварных тонкостенных спиральношовных труб путем приложения давления к свариваемым кромкам и, что ново, введением активирующих веществ в зону сварного шва для повышения его прочностных характеристик. Данное направление работы связано с возрастающим использованием при изготовлении электросварных спиральношовных тонкостенных труб зарубежных низколегированных и коррозионностойких сталей и решает задачу повышения качества сварных соединений при использовании высокочастотной сварки.

Основными технологическими параметрами процесса сварки образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб являются скорость сварки, и соответственно, связанная с ней скорость осадки. Также основными параметрами являются электрические параметры: выходное напряжение и сварочный ток высокочастотного источника питания. Они определяют температуру нагрева свариваемых кромок в точке их схождения и пластические свойства металла шва в зависимости от марки металла. Важным параметром является и начальная величина перекрытия кромок.

Одновременное благоприятное сочетание основных параметров высокочастотной сварки при производстве образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб позволяет получить высокое качество сварного соединения. При этом вследствие сложного процесса формирования из ленты трубной спиральношовной заготовки и выполнения одновременно с высокочастотной сваркой осадки, где помимо встречной деформации свариваемых кромок происходит их раскатка и уменьшение толщины нахлестки до толщины исходного материала (ленты), сварной шов из нахлесточного трансформируется в косостыковой.

Во время формирования сварного шва при производстве образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб происходит концентрация нагрева в точке схождения свариваемых кромок, а также нагрев расположенных в зоне шва активирующих веществ. В результате концентрированного нагрева происходит переход активирующего вещества в жидкую фазу, омывание и активация им свариваемых кромок основного металла, находящихся в твердо-пластичном состоянии. При этом возникают процессы взаимной диффузии активирующего вещества, находящегося в жидкой фазе, в основной металл и наоборот. Приложение давления к свариваемым кромкам в виде осадки усиливает эти процессы в шве, а также

приводит к практически полному удалению продуктов реакции активирующего вещества в грат и последующей его кристаллизации вне шва.

Вследствие осадки происходит также пластическое деформирование свариваемых кромок и частичное выдавливание пластичного металла из зоны шва в виде грата на периферийные более холодные участки шва как внутрь, так и наружу трубы, с его раскаткой по ее поверхности.

Исследовательская работа выполнялась на специальном оборудовании С-460, разработанном в ИЭС им. Е. О. Патона, которое ранее поставлялось на трубные заводы, и используется при изготовлении электросварных тонкостенных спиральношовных труб с применением токов высокой частоты из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Для нагрева сходящихся в спираль кромок используется сварочный высокочастотный генератор ВЧС-160/044 мощностью 160 кВт, частотой 440 кГц с контактным подводом тока к свариваемым крокам. Основные процессы высокочастотной сварки с приложением давления при изготовлении опытных образцов спиральношовных труб диаметром  $D = 98, 108$  и  $152$  мм проводились на низкоуглеродистых сталях марки СтЗсп толщиной  $S = 1,0$  мм и 08кп толщиной  $S = 1,0$  и  $1,3$  мм, низколегированной стали марки S355 (аналог стали 17Г1С) толщиной  $S = 2,0$  мм и коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной  $S = 0,8$  и  $1,0$  мм. Химический состав использованных сталей приведен в табл. 1.

На рис. 1 представлена схема формирования соединения кромок спиральношовной трубы при высокочастотной сварке с приложением давления и применением активирующих веществ: *а* — начало образования соединения, *1* — предварительно нанесенное активирующее вещество на соединяемых кромок металла (нахлесточное соединение); *б* — процесс осадки в виде раскатки нахлесточного соединения с активирующим веществом в зоне шва непосредственно после нагрева токами высокой частоты, *2* — активирующее вещество на соединяемых кромок металла; *в* — сформированное косостыковое соединение кромок, *3* — раскатанный по поверхности трубы выдавленный из шва металл с активирующим веществом; *4* — сформированный сварной шов (с возможными включениями активирующего вещества толщиной  $0...50$  мкм).

При получении опытных образцов спиральношовных труб из указанных сталей использовались активирующие вещества, представляющие собой

Таблица 1. Химический состав использованных сталей

Химический состав [4]	Марка стали			
	СтЗсп	08кп	S355	12Х18Н10Т
C	0,14...0,22	0,05...0,12	0,15...0,2	≤0,12
Cr	≤0,3	≤0,1	≤0,3	17...19
Fe	97	98	96	67
Mn	0,4...0,65	0,25...0,5	1,15...1,6	≤2
Ni	≤0,3	≤0,3	≤0,3	9...11
P	≤0,04	≤0,035	≤0,03	≤0,035
S	≤0,05	≤0,04	≤0,035	≤0,02
Si	0,15...0,3	≤0,3	0,4...0,6	≤0,8
N	≤0,008	—	0,008	—
Cu	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤0,3
As	≤0,08	≤0,08	≤0,08	—
Al	—	—	0,02...0,05	—
V	—	—	≤0,12	—
Ti	—	—	—	0,4...0,8

порошкообразную смесь флюса ПВ-201 или ПВ-209 и медно-никелевого припоя ПАН-3 (ПД58Г32Н8С) (Cu — основа 58 %, Mn — 32, Ni — 8, Si — до 1,5) [18], которая путем напыления, была нанесена на тонкий слой сырого клея, которым были предварительно смазаны свариваемые кромки.

Для фиксации порошкообразной смеси флюса и активирующего вещества на свариваемых кромок применялись цианоакрилатные клеи, а также клеи БФ, содержащие фенолформальдегидную смолу и поливинилацеталь или поливинилбутираль. Эти клеи в процессе сварки не оставляли нежелательных примесей.

Для опытных образцов спиральношовных труб из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной  $S = 0,8$  и  $1,0$  мм использовались активирующие вещества, представляющие собой порошкообразную смесь флюса ПВ-201 или ПВ-209 и порошкообразного припоя ВПр-1 (Cu — основа 65,7...70,8 %, Ni — 27...30, Si — 1,5...2, Fe — 0,1...1,5, В — 0,1...0,3, примеси — 0,5) [18, 19] или самофлюсующегося борно-кремниевого припоя ПГ-Ж14 (Fe — основа 43 %, Ni — 37, С —

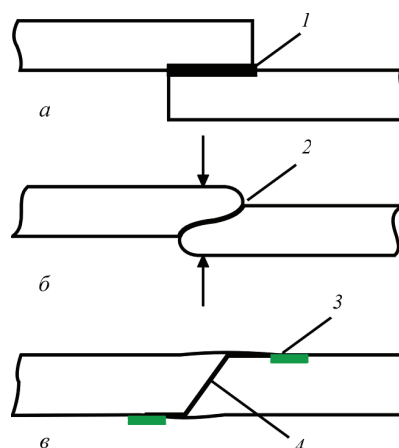


Рис. 1. Схема формирования соединения кромок спиральношовной трубы (описание *а–в* см. в тексте)



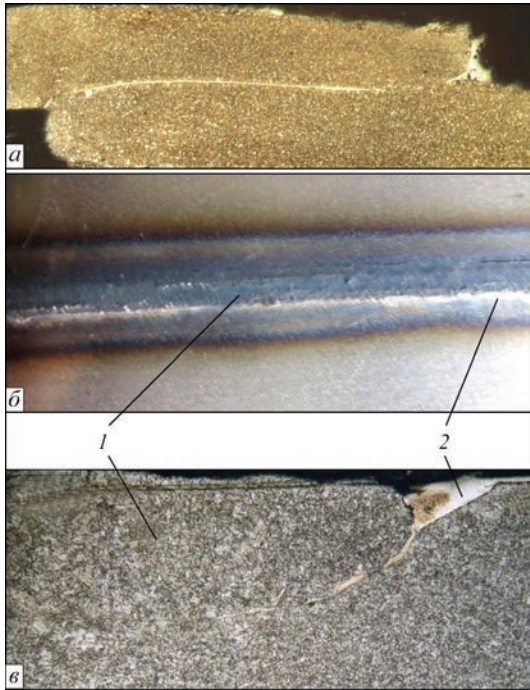


Рис. 2. Этапы формирования косостыкового шва на образцах электросварных тонкостенных спиральношовных труб: *a* — поперечное сечение шва на начальном этапе его образования; *б* — внешний вид сформированного сварного соединения (вид сверху); *в* — поперечное сечение сформированного косостыкового шва на конечном этапе; 1 — выдавленный из шва металл, раскатанный по поверхности трубы; 2 — выдавленное из шва активирующее вещество

1,4, Cr — 14, В — 2,2, Si — 2,5, твердость *HRC* 38...45) [20].

Установлено, что активирующая порошкообразная смесь компонентов должна содержать одну часть флюса и семь-десять частей припоя при напылении порошкообразной смеси толщиной 0,05...0,15 мм.

На рис. 2 приведены этапы формирования косостыкового шва на образцах электросварных тонкостенных спиральношовных труб. Процесс осадки осуществлялся в виде раскатки нахлесточного соединения непосредственно после его нагрева токами высокой частоты с нанесенным на свариваемые кромки активирующим веществом.

На рис. 2, *a* показано поперечное сечение косостыкового шва на начальном этапе его формирования.

На рис. 2, *б* показана внешняя поверхность образца электросварной тонкостенной спиральношовной трубы со сформированным сварным швом (вид сверху) после проведения осадки кромок нахлесточного соединения. Виден выдавленный из шва металл, раскатанный по поверхности трубы и выдавленное активирующее вещество в виде тонкой пленки с удаленными из зоны шва продуктами его реакции. На рис. 2, *в* приведено сформированное поперечное сечение косостыкового шва на конечном этапе, у которого толщина

Таблица 2. Зависимость угла загиба и ширины зоны термического влияния от скорости сварки с применением давления и применением активирующих веществ при различном анодном напряжении

Номер п/п	Перекрытие, мм	Скорость сварки, м/мин	Параметры		
			Угол загиба		Ширина зоны термического влияния, мм
			I вариант	II вариант	
Анодное напряжение 4,0 кВ					
1	2,0	10	100	60	12
2		15	110	100	10
3		20	180	140	7
4	3,0	10	180	150	13
5		15	180	180	11
6		20	180	180	9
7	4,0	10	180	180	14
8		15	180	150	12
9		20	180	140	11
Анодное напряжение 5,0 кВ					
10	2,0	15	20	10	10
11		20	70	50	10
12		25	90	40	9
13	3,0	15	180	150	11
14		20	180	180	10
15		25	180	180	9
16	4,0	15	180	180	12
17		20	180	150	11
18		25	160	140	10
Анодное напряжение 6,0 кВ					
19	2,0	15	50	30	10
20		20	90	80	9
21		25	120	100	8
22	3,0	15	160	120	10
23		20	180	180	9
24		25	180	180	8
25	4,0	15	180	180	12
26		20	180	180	10
27		25	160	140	9

$S_{ш}$  несколько больше или равна толщине ленты (штрипса) трубы:  $S_{ш} \geq S$ .

Выполнение швов на образцах электросварных тонкостенных спиральношовных труб проводилось на экспериментальной установке разработки ИЭС им. Е. О. Патона при скоростях движения ленты 15, 20 и 25 м/мин, при соответствующих показателях мощности от примененного сварочного высокочастотного генератора 50, 80 и 110 кВт. Длина участка нагрева свариваемых кромок (расстояние от места контакта токоподвода сварочного высокочастотного генератора на свариваемых кромках сформированной спиральношовной трубной заготовки до места точки схождения кромок и вхождения их в формирующие валки) составляла 35...50 мм. Ширина зоны фиксации следов примененного активирующего вещества на поверхности образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб достигала 15 мм. Величина перекрытия кромок выбиралась на уровне 0,25...2,5 от толщины  $S$  примененной лен-

Таблица 3. Зависимость сопротивления разрыву образцов швов спиральношовных труб размером 108×1,0 мм от скорости сварки с приложением давления и применением активирующих веществ и величины перекрытия при различном анодном напряжении и длине зоны разогрева 35/50 мм

Номер п/п	Перекрытие, мм	Скорость сварки, м/мин	Сопротивление разрыву, МПа
Анодное напряжение 4,0 кВ			
1	2,0	10	40
2		15	90
1		20	340
4	3,0	10	360
5		15	380
6		20	380
7	4,0	10	350
8		15	380
9		20	380
Анодное напряжение 5,0 кВ			
10	2,0	20	60
11		25	140
12		30	340
13	3,0	20	350
14		25	355
15		30	345
16	4,0	20	363
17		25	370
18		30	370
Анодное напряжение 6,0 кВ			
19	2,0	15	60
20		20	250
21		25	265
22	3,0	15	330
23		20	370
24		25	370
25	4,0	15	370
26		20	370
27		25	370

ты, но не превышала 4,5 мм для толщины ленты  $S = 2$  мм при диаметре трубы  $D = 152$  мм, что позволяло получать надежное сварное соединение и поддерживать стабильный режим формирования образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб. При этом после осадки путем раскатки толщина стенки шва  $S_{ш}$  в образцах электросварных тонкостенных спиральношовных труб практически достигала толщины примененной ленты  $S$ .

Качество сварного шва экспериментальных электросварных тонкостенных спиральношовных труб, полученных с применением активирующих веществ, оценивалось по результатам механических испытаний образцов, вырезанных из этих труб, по таким параметрам, как угол загиба и сопротивление растяжению. Зона термического влияния определялась по изменению цвета и структурному анализу металла шва и околшовной зоны. Наличие царапин выявлялось визуально.



Рис. 3. Образцы с фрагментами сварного шва после проведения механических испытаний на разрыв. Тип образцов — 8 по ГОСТ 6996–66



Рис. 4. Образцы электросварных тонкостенных спиральношовных труб со сварными швами, выполненными с приложением давления: а — сверху труба из стали 08кп, внизу — S355; б — 12X18H10T

Установлено, что на качество шва существенное влияние оказывают электрические параметры высокочастотной сварки. Для получения образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб при различных скоростях движения ленты 15, 20 и 25 м/мин, изменялись показатели анодного напряжения на лампе генератора, которое влияет на подводимую электрическую мощность в зону шва.

Были получены образцы с фрагментами сварного шва для проведения механических испытаний. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены данные результатов механических испытаний на разрыв образцов с фрагментами сварного шва электросварных тонкостенных спиральношовных труб диаметром  $D = 108$  мм и толщиной стенки  $S = 1,3$  мм, выполненных из стали 08кп.

На рис. 3 представлены образцы с фрагментами сварного шва после проведения механических испытаний на разрыв. Образцы — тип 8 по ГОСТ 6996-66. Временное сопротивление разрыву составляет 370...380 МПа. Разрушение образцов происходит по основному металлу. При 20 °С для термообработанной стали 08кп предел прочности  $\sigma_B$  составляет 310...440 МПа. Представленные данные свидетельствуют о высокой прочности полученного сварного соединения в спиральношовной трубе, которая достигается, в том числе, и за



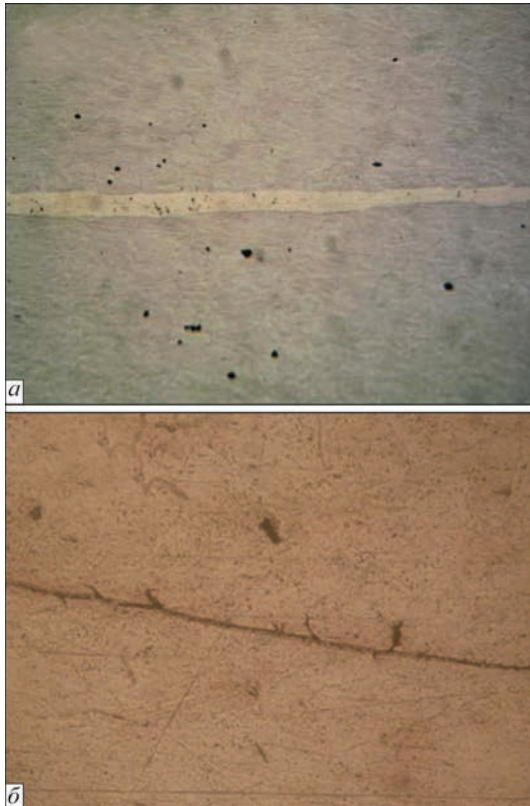


Рис. 5. Микрошлифы ( $\times 500$ ) образцов швов спиральношовных труб, выполненных с приложением давления и применением активирующих веществ: *а* — шов трубы из стали 08кп; *б* — 12Х18Н10Т

счет термомеханического упрочнения сварного шва вследствие проведения последующей осадки в виде раскатки нахлесточного соединения свариваемых кромок с нанесенным активирующим веществом в зоне шва.

На рис. 4, *а* в верхней его части показан образец электросварной тонкостенной спиральношовной трубы диаметром  $D = 108$  мм с толщиной стенки  $S = 1,0$  мм из стали 08кп с узкой зоной термического влияния, в нижней части — образец электросварной тонкостенной спиральношовной трубы диаметром  $D = 108$  мм с толщиной стенки  $S = 2,0$  мм из стали S355 с широкой зоной термического влияния. Для образца из стали S355 использовалось активирующее вещество в виде смеси припоя ПАН-3 и флюса ПВ-201. Разница в ширине зоны термического влияния определяется сочетанием таких параметров, как скорость сварки, величина вкладываемой в сварной шов мощности, химический состав стали.

На рис. 4, *б* показан образец электросварной тонкостенной спиральношовной трубы диаметром  $D = 98$  мм с толщиной стенки  $S = 0,8$  мм из стали 12Х18Н10Т. При получении данного образца применялось активирующее вещество в виде самофлюсующегося припоя ПГ-Ж14. Несмотря на довольно узкую зону термического влияния для получения протяженных высококачественных

сварных соединений образцов электросварных тонкостенных спиральношовных труб из коррозионностойких сталей в дальнейшем необходимо обеспечить надежную защиту зоны сварного шва защитными газами от воздействия окружающей среды в используемой экспериментальной установке. Пока же полученный сварной шов визуально отличается от основного металла — коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

На рис. 5, *а* показан микрошлиф сварного шва образца спиральношовной трубы диаметром  $D = 108$  мм с толщиной стенки  $S = 1,3$  мм из стали 08кп, полученный в процессе высокочастотной сварки с применением активирующих веществ: припой ПАН-3, флюс ПВ-201. Отчетливо виден сварной шов в виде сформировавшейся под давлением осадки тонкой остаточной прослойки закристаллизовавшегося активирующего вещества, которое не было полностью выдавлено из зоны соединения. Ширина шва (прослойки) не превышает  $4 \dots 8$  мкм. При этом химический состав образовавшегося сварного шва обогащен элементами основного свариваемого металла, примененного активирующего вещества, и частично продуктами активации поверхности. Структура металла близкой к шву околошовной зоны приближается к структуре основного металла.

На рис. 5, *б* показан микрошлиф сварного шва из стали 12Х18Н10Т, полученный в процессе высокочастотной сварки с применением активирующего вещества — самофлюсующегося припоя ПГ-Ж14, без применения защитных газов. В месте соединения кромок видно активирующее вещество, заполнившее микронеровности поверхностей соединения. Ширина шва составляет около 1 мкм. Химический состав образовавшегося сварного шва обогащен элементами основного свариваемого металла, однако и здесь имеется визуальное отличие полученного металла шва от основного металла.

Предполагается, что для получения стабильного сварного соединения коррозионностойких и легированных сталей при высокочастотной сварке применительно к выполнению спиральных швов труб необходима защита нейтральными газами зоны формирования соединения или повышение скорости сварки для минимального по времени контакта расплавленных и еще не закристаллизовавшихся активирующих веществ с атмосферой воздуха. Это задача дальнейших исследований.

Повышение скорости сварки возможно за счет увеличения вкладываемой мощности высокочастотного генератора, что позитивно скажется и на экономических показателях сварочного процесса.

Дальнейшие исследования необходимо продолжить для поиска оптимального управления

сварочным процессом [21] и модернизации оборудования, особенно в поиске способа защиты зоны сварки от атмосферных воздействий в случае использования коррозионностойких и легированных сталей. Однако уже сейчас очевидно, что данный процесс может стать перспективным при изготовлении качественных и недорогих тонкостенных спиральношовных труб, в том числе и с последующим нанесением на них защитных покрытий.

### Выводы

1. Применение высокочастотной сварки обеспечивает возможность производства электросварных тонкостенных спиральношовных труб широкой номенклатуры диаметров, что является актуальным для различных отраслей промышленности.

2. При высокочастотной сварке спиральношовных труб с приложением давления и применением активирующих веществ последние обеспечивают связывание поверхностных загрязнений и вытеснение их за пределы свариваемого сечения при приложении давления. В результате кромки очищенного металла соединяются при температурах, близких к температурам плавления основного металла, при развитии в металле диффузных процессов, и процесс соединения на завершающей стадии происходит в твердой фазе основного металла.

3. Перспективы применения технологии высокочастотной сварки в производстве электросварных тонкостенных спиральношовных труб состоят в получении качественных швов. Одним из путей развития является введение активирующих веществ в зону шва, что позволяет получать качественные сварные соединения низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

### Список литературы

1. Pis'menny A. S. (1997) *High-frequency welding of metals*. Amsterdam, Harwood Acad. Publ.
2. Письменный А. С. (2008) *Высокочастотная сварка металлических изделий*. Киев, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона.
3. Письменный А. С., Полухин В. В., Полухин Вл. В. и др. (2005) Изготовление и применение тонкостенных спиральношовных труб. *Автоматическая сварка*, **9**, 32–36.
4. Письменный А. С., Прокофьев А. С., Губатюк Р. С. и др. (2012) Повышение прочностных характеристик спиральношовных труб конструкционного назначения. *Там же*, **3**, 40–44.
5. Лебедев В. К., Скачко Ю. Н., Полухин В. В. и др. (1974) Оплавление кромок при высокочастотной сварке. *Там же*, **11**, 16–19.
6. Слепак Э. С., Хаснулин В. С., Клужинский В. Л., Шульман И. Е. (1980) *Сварка токами высокой частоты в энергомашиностроении*. Москва, Машиностроение.
7. Табелев В. Д., Карета Н. Л., Панасенко А. И. и др. (1985) Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой с приложением давления. *Автоматическая сварка*, **11**, 26–29.
8. Табелев В. Д. (1991) *О формировании соединений при пайке с пластическим деформированием основного ме-*

*тала. Материалы и технология пайки*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, сс. 50–54.

9. Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С. (1993) Ударная вязкость стыковых соединений, паяных с пластическим деформированием основного металла. *Автоматическая сварка*, **8**, 29–31.
10. Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С. (1983) Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов. *Там же*, **9**, 25–27.
11. Лебедев В. К., Письменный А. С., Мартынова Т. И. (1992) Опыт использования композиционного припоя для сварки-пайки давлением. *Там же*, **9–10**, 42–43.
12. Письменный А. С., Новикова Д. П., Юхименко Р. В., Прокофьев А. С. и др. (2008) Особенности технологии высокочастотной шовной сварки-пайки труб. *Там же*, **2**, 29–33.
13. Письменный А. С., Прокофьев А. С. (2002) Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ. *Там же*, **7**, 22–27.
14. Письменный А. С., Полухин В. В., Прокофьев А. С., Бондарев В. А. (2002) Экспресс-методика для разработки и проверки технологий пайки давлением. *Там же*, **1**, 48–50.
15. Письменный А. С., Прокофьев А. С., Бондарев В. А. (2001) Индукционная сварка-пайка безарматурных тройниковых соединений труб. *Там же*, **4**, 46–50.
16. Письменный А. С., Прокофьев А. С. (2000) Технология сварки-пайки фланцев с трубой. *Там же*, **5**, 50–52.
17. (1999) ДСТУ 3761.2-98 *Зварювання та споріднені процеси. Частина 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення* (ISO 857:1990). Київ, Держспоживстандарт України.
18. *Припой*. URL: <http://termoizolit.ru/pripoi>. (дата обращения: 23.02.2018).
19. *Марочник сталей и сплавов*. URL: [http://www.splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://www.splav-kharkov.com/choose_type.php). (дата обращения: 26.02.2018).
20. *Наплавочный порошок*. URL: <https://grandlada.com/naplavochniy-poroshok/131>. (дата обращения: 23.02.2018).
21. Пантелеймонов Е. А., Самофалов М. В. (2012) Применение электрических параметров режима высокочастотной сварки спиральношовных труб для организации процессов управления и контроля. *Сварщик*, **4**, 10–12.

### References

1. Pis'menny, A.S. (1997) *High-frequency welding of metals*. Amsterdam, Harwood Acad. Publ.
2. Pismenny, A.S. (2008) *High-frequency welding of metal products*. Kiev, PWI [in Russian].
3. Pismenny, A.S., Polukhin, V.V., Polukhin, V.I. et al. (2005) Production and application of thin-walled spiral-welded pipes. *The Paton Welding J.*, **9**, 29-32.
4. Pismenny, A.S., Prokofiev, A.S., Gubatyuk, R.S. et al. (2012) Increase of strength characteristics of spirally-welded pipes of structural designation. *Ibid.*, **3**, 30-34.
5. Lebedev, V.K., Skachko, Yu.N., Polukhin, V.V. et al. (1974) Fusion of edges in high-frequency welding. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 16-19 [in Russian].
6. Slepak, E.S., Khasnulin, V.S., Kluzhinsky, V.L., Shulman, I.E. (1980) *High-frequency welding in power engineering*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Tabelev, V.D., Kareta, N.L., Panasenko, A.I. et al. (1985) Structure and phase composition of welds made by capillary brazing under pressure. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 26-29 [in Russian].
8. Tabelev, V.D. (1991) On formation of joints in brazing with plastic deformation of base metal. *In: Materials and technology of brazing*. Kiev, PWI, 50-54 [in Russian].
9. Lebedev, V.K., Tabelev, V.D., Pismenny, A.S. (1993) Impact strength of butt joints brazed with plastic deformation of base metal. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 29-31 [in Russian].
10. Lebedev, V.K., Tabelev, V.D., Pismenny, A.S. (1983) Butt pressure brazing of steel pipelines. *Ibid.*, **9**, 25-27 [in Russian].

11. Lebedev, V.K., Pismenny, A.S., Martynova, T.I. (1992) Experience of application of composite filler metal for pressure braze-welding. *Ibid.*, **9-10**, 42-43 [in Russian].
12. Pismenny, A.S., Novikova, D.P., Yukhimenko, R.V. et al. (2008) Technology peculiarities of high-frequency seam braze-welding of pipes. *The Paton Welding J.*, **2**, 22-25.
13. Pismenny, A.S., Prokofiev, A.S. (2002) Press welding of pipes using activating materials. *Ibid.*, **7**, 19-23.
14. Pismenny, A.S., Polukhin, V.V., Prokofiev, A.S. et al. (2002) Express-method for development and verification of pressure brazing technologies. *Ibid.*, **1**, 47-50.
15. Prokofiev, A.S., Pismenny, A.S., Bondarev, V.A. et al. (2001) Induction braze-welding of no-accessory T-joints. *Ibid.*, **4**, 43-47.
16. Prokofiev, A.S., Pismenny, A.S. (2000) Technology of braze-welding of flanges to tubes. *Ibid.*, **5**, 48-50.
17. (1999) DSTU 3761.2-98 (ISO 857:1990): *Welding and allied processes. Pt. 2: Welding and brazing processes. Terms and definitions*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
18. *Filler materials*. URL: <http://termoizolit.ru/pripoi> [in Russian].
19. Steels and alloys grades. URL: [http://www.splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://www.splav-kharkov.com/choose_type.php) [in Russian].
20. Surfacing powder. URL: <https://grandlada.com/naplavochniy-poroshok/131> [in Russian].
21. Pantelejmonov, E.A., Samofalov, M.V. (2012) Application of electric parameters of high-frequency welding mode of spirally-welded pipes for organization of management and control processes. *Svarshchik*, **4**, 10-12 [in Russian].

## ВПЛИВ АКТИВУЮЧИХ РЕЧОВИН НА ЯКІСТЬ СПІРАЛЬНОШОВНИХ ТРУБ, ОТРИМАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

**В. В. ПОЛУХІН, О. С. ПРОКОФ'ЄВ, Д. В. РОМАШКО, С. В. РИМАР, Р. С. ГУБАТЮК**

Робота присвячена розвитку технології високочастотного зварювання при виготовленні тонкостінних спіральшовних труб шляхом введення активуючих речовин у зону зварного шва і прикладання тиску, підвищення характеристик міцності металу зварного шва. Дослідження ґрунтуються на наукових положеннях теоретичних основ зварювання, матеріалознавства, проблем міцності металів. Особливістю розглянутої технології зварювання є те, що в процесі нагрівання з'єднуваних кромок струмами високої частоти активуючі речовини, що мають більш низькі температури плавлення, переходять в рідкий стан, зв'язують поверхневі забруднення і виносять їх назовні при прикладанні тиску. Кромки очищеного металу з'єднуються в результаті протікання дифузних процесів при температурах, близьких до температур плавлення основного металу. По суті процес з'єднання на завершальній стадії відбувається в твердій фазі металу шва. Отримана ширина зварного шва не перевищує 4...8 мкм. Метал шва складається з основного металу, що зварюється, збагаченого елементами активуючої речовини. Структура біляшовної зони близька до структури основного металу. Можливо виготовлення електрозварних тонкостінних спіральшовних труб з високою якістю зварного з'єднання при високій швидкості зварювання. Бібліогр. 21, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова:* тонкостінні спіральшовні труби, зварювання, струм високої частоти, прикладання тиску, активуючі речовини

## INFLUENCE OF ACTIVATORS ON THE QUALITY OF SPIRALLY-WELDED PIPES, PRODUCED WITH APPLICATION OF HIGH-FREQUENCY CURRENTS

**V.V. POLYKHIN, A.S. PROKOFYEV, D.V. ROMASHKO, S.V. RYMAR, R.S. GUBATYUK**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

The paper deals with development of the technology of high-frequency welding in manufacture of thin-walled spirally-welded pipes by adding activators to the weld zone and pressure application to improve the strength characteristics of welded joint metal. Investigations are based on scientific principles of theoretical fundamentals of welding, materials science and problems of metal strength. A feature of the considered welding technology is the fact that during heating of the edges to be joined by high frequency currents the activators, having lower melting temperatures, go into the liquid state, bind surface contamination and transport it to the surface at pressure application. Edges of the cleaned metal are joined as a result of running of diffusion processes at temperatures close to base metal melting temperatures. Essentially, the process of joining at the final stage proceeds with the weld metal being in the solid phase. Obtained weld width is not greater than 4 – 8 μm. Weld metal consists of the base metal being welded, enriched in activator elements. Near-weld zone structure is close to that of the base metal. Thin-walled spirally-welded pipes can be produced with a high quality of welded joint at a high welding speed. 21 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* thin-walled spirally-welded pipes, high-frequency current, pressure application, activators

Поступила в редакцію 11.09.2018