

ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДУГОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В. С. КАЧИНСКИЙ, С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Изыскание высокопроизводительных технологий сварки неповоротных стыков труб актуально, особенно при выполнении работ в монтажных условиях. Приведены результаты комплексных исследований по отработке технологии прессовой сварки труб с толщиной стенки более 4...5 мм с использованием управляющего магнитного поля. Определены способы нагрева торцов труб магнитоуправляемой дугой, алгоритмы управления основными параметрами прессовой сварки, проведены всесторонние испытания соединений. Показана возможность получения высоких показателей ударной вязкости сварных соединений при сварке высокопрочных трубных сталей. Библиогр. 10, рис. 7, табл. 5.

Ключевые слова: прессовая сварка, управляющее магнитное поле, магнитоуправляемая дуга, толстостенные трубы, технология сварки, монтажные и стационарные условия, микроструктура, механические свойства

Для предприятий в разных странах, бизнес которых связан со сваркой труб, актуальным является обеспечение стабильности качества сварных соединений неповоротных стыков стальных труб, выполняемых высокопроизводительными технологиями. Важным является также снижение влияния роли сварщика на технологический процесс.

Отмеченное особенно актуально при выполнении соединений труб с повышенной (более 4...5 мм) толщиной стенки, а также при необходимости выполнения соединений в монтажных условиях.

В настоящей работе проведены исследования по расширению возможностей прессовой сварки, в частности, под воздействием внешнего управляющего магнитного поля (УМП). В работе исследованы:

- поведение сварочной дуги в узком зазоре, примерно 2 мм, между торцами толстостенных труб под действием внешнего УМП;
- скорость движения дуги в процессе нагрева торцов толстостенных труб;
- особенности нагрева торцов толстостенных труб;
- поведение жидкого расплава в процессе нагрева труб;
- влияние жидкого расплава на формирование сварного соединения.

Была разработана технология сварки труб с толщиной стенки более 4...5 мм и оборудование для прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД) труб в стационарных и монтажных условиях.

Области применения технологии: сварка газовых и нефтяных трубопроводов; сварка труб для систем

термостабилизации грунта при окружающей температуре до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сварено более 7 тыс. км трубопроводов малого диаметра, поддерживающих в мерзлом состоянии в общей сложности 25 млн м^3 грунта на площади 2,5 млн м^2); при строительстве теплиц (сварено более 50 тыс. стыков труб малого диаметра); области промышленности, где применяется стыковая сварка труб с фитингами, заглушками и др.; сварка трубных заготовок при изготовлении гидравлических цилиндров (сварено более 37 тыс. стыков).

К основным отличиям технологии ПСМД относится возможность выполнения сварки стальных труб на воздухе, без применения защитных газов, а также осуществление технологии ПСМД труб с толщинами стенки, превышающими размеры активных пятен мощных дуговых разрядов.

Сварочная дуга, при использовании способа ПСМД, перемещается под действием внешнего постоянного магнитного поля. Способ сварки применяется в промышленности преимущественно для соединения деталей трубчатого сечения с толщиной стенки до 4 мм диаметром до 100 мм, используемых в автомобильной промышленности, при этом используются защитные газы [1–4]. В ИЭС им. Е. О. Патона была разработана технология ПСМД и сварено более 7 млн полых деталей автомобильного сортамента, без использования защитного газа [5]. Выполнены разработки технологий и оборудования для сварки ПСМД различных трубопроводов [6]. Несмотря на высокую производительность и другие технологические преимущества по сравнению с электродуговыми способами, процесс ПСМД до настоящего времени не нашел широкого промышленного применения в ответственных энергетических установках, в частности, котлостроении, газо- и не-

фтепроводах высокого давления. В значительной степени это обусловлено ограниченной информацией о механических свойствах соединений, выполненных ПСМД, а также отсутствием технологий сварки ПСМД труб с толщиной стенки более 5 мм.

Исследования, проведенные в настоящей работе, были направлены на разработку технологии и оборудования для ПСМД неповоротных соединений труб с толщиной стенок 10...20 мм из высокопрочных сталей и на их основе создание технологии сварки труб диаметром до 320 мм с толщиной стенок, превышающих размеры активных пятен дуги и адаптированной к условиям работы в монтажных и стационарных условиях. Сваривались трубы из различных сталей, в том числе X60, X70, X80, ст35, STPG410, 01Star520. Химический состав и механические свойства сталей приведены в табл.1. Сварка выполнялась на машинах для ПСМД типа МД1, МД-205, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона. В процессе сварки выполнялся операционный контроль основных параметров процесса: ток, напряжение, переме-

шение и усилие при деформации в процессе осадки. Процессы, протекающие в дуговом промежутке между деталями, изучались с использованием скоростной видеосъемки с высокой разрешающей способностью (до 4500 кадров/с), а также осциллографией процесса. Сварные соединения испытывались в соответствии с требованиями международных стандартов для газопроводов и нефтепроводов (API, DNY).

Металлографические исследования сварных соединений выполнялись на оптическом микроскопе «Neophot 32».

Схема процесса ПСМД приведена на рис. 1, а. Дуга под воздействием мощного магнитного поля перемещается в зазоре между торцами свариваемых труб и нагревает их. Интенсивность нагрева определяется током дуги и скоростью вращения. По достижении требуемой температуры нагрева торцы деталей сжимаются и в процессе их деформации формируется соединение.

Как и при других методах сварки давлением для получения качественных соединений при ПСМД необходимо создать заданное температурное поле и обеспечить защиту нагреваемых торцов деталей. Предполагается [7, 8], что частичную защиту от окисления в зазоре создают пары металла, образующиеся при нагреве дугой. Принято считать [4], что стабильный нагрев и защиту торцов деталей от окисления можно получить в том случае, когда диаметр активных пятен дуги идентичен толщине свариваемых труб. Поэтому до настоящего времени процесс сварки ПСМД практически использовался для соединения труб с толщиной стенки не более 5 мм, что соответствует размерам активных пятен мощных дуговых разрядов, которые можно получить при токах 1...2 тыс. А.

Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона технологии базируются на концепции [9], в соответствии с которой при ПСМД, как и при контактной сварке оплавлением (КСО), основным условием получения качественных соединений является формирование на торцах свариваемых деталей в период, предшествующий осадке, слоя расплавленного металла с оксидами входящих в него легирующих элементов. Расплав в результате его нагрева быстро перемещающейся дугой имеет более высокую температуру, чем температура плавления свариваемого материала. Экспериментально установлено, что при контактном оплавлении сталей расплав достигает температуры 1700 °С. Его кристаллизация происходит в интервале 1700...1370 °С. Если деформация нагретых торцов деталей происходит в этом интервале, расплав полностью выдавливается из стыка вместе с оксидами. Длительность интервала кристаллизации расплава зависит от теплофизических свойств

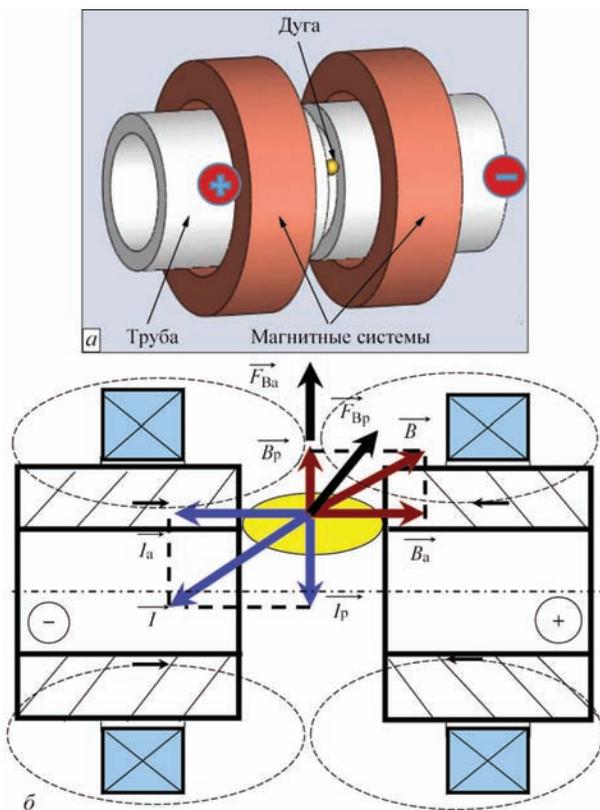


Рис. 1. Прессовая сварка магнитоуправляемой дугой: а — схема процесса; б — силы, воздействующие на дугу (\vec{B} — индукция магнитного поля; \vec{B}_a — аксиальная составляющая индукции магнитного поля; \vec{B}_p — радиальная составляющая индукции магнитного поля; \vec{I} — ток дуги; \vec{I}_a — аксиальная составляющая тока дуги; \vec{I}_p — радиальная составляющая тока дуги; \vec{F}_{Br} — сила, определяющая радиальное движение дуги по торцам труб; \vec{F}_{Ba} — сила определяющая аксиальное движение дуги по торцам труб)

Таблица 1. Химический состав сталей, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Al
09Г2С	0,11	0,75	1,38	0,015	0,016	0,05	0,05	0,25	0,05	-	-	0,01
35	0,39	0,35	0,75	0,035	0,04	0,25	0,25	0,25	-	-	-	-
X70	0,030	0,156	1,45	0,004	0,004	0,30	0,14	0,07	0,20	0,022	0,062	-
01Star520	0,159	0,172	1,19	0,012	0,006	0,13	0,04	0,04	0,03	0,002	0,002	0,03
STPG410	0,25	0,34	0,9	0,024	0,033	-	0,001	0,001	-	-	-	-

свариваемых материалов и принятой технологии сварки:

$$t_{ж} = \frac{\delta_{ж} \gamma q}{\lambda (d\theta / dx_{x=0})}, \quad (1)$$

где $t_{ж}$ — длительность кристаллизации; $\delta_{ж}$ — толщина слоя расплава; $d\theta/dx_{x=0}$ — градиент температурного поля в приконтактном слое; λ — коэффициент теплопроводности; q — теплосодержание расплавленного металла при температурах, превышающих температуру его плавления.

При выборе технологии сварки имеется возможность варьировать условиями нагрева деталей и частично величиной $\delta_{ж}$. Наиболее благоприятные условия для формирования качественных соединений по плоскости соединения создаются при сварке с минимальным градиентом температурного поля, что связано с большим энерговлечением в зону нагрева, и неблагоприятно сказывается на формировании структуры металла в ЗТВ, особенно при сварке высокопрочных сталей. Поэтому изыскания оптимальных технологий сварки ПСМД перечисленных сталей были направлены на разработку технологий, отличающихся минимальным энерговлечением и высокими градиентами температурного поля ЗТВ.

Исследование процессов, протекающих в дуговом зазоре при нагреве торцов труб перемещающейся дугой проводилось на трубах диаметром до 320 мм с толщиной стенки до $\delta = 12$ мм с использованием скоростной видеосъемки. Основные параметры процесса (индукция УМП, ток дуги, напряжение) варьировались в пределах значений, принятых при ПСМД таких труб. ПСМД выполняются как с использованием постоянных магнитов, так и электромагнитов. На промышленных установках, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона, получили применение постоянные магнитные системы.

На рис. 2 приведены фотографии, иллюстрирующие поведение дуги в зазоре и нагрев торцов в различные периоды сварки ПСМД труб. Ток дуги составлял 200...250 А, напряжение на дуге $U_{д} = 25$ В. После возбуждения дуги в зазоре между торцами, скорость движения дуги постоянно увеличивается, достигая к моменту выполнения осадки от 50 до 240 м/с в зависимости от диаметра труб, выполняя их нагрев (рис. 2, а). По мере повышения температуры торцов увеличивается толщина расплава на них (рис. 2, б), который удерживается на поверхности торцов силами поверхностного натяжения. При достижении определенной толщины расплав под воздействием

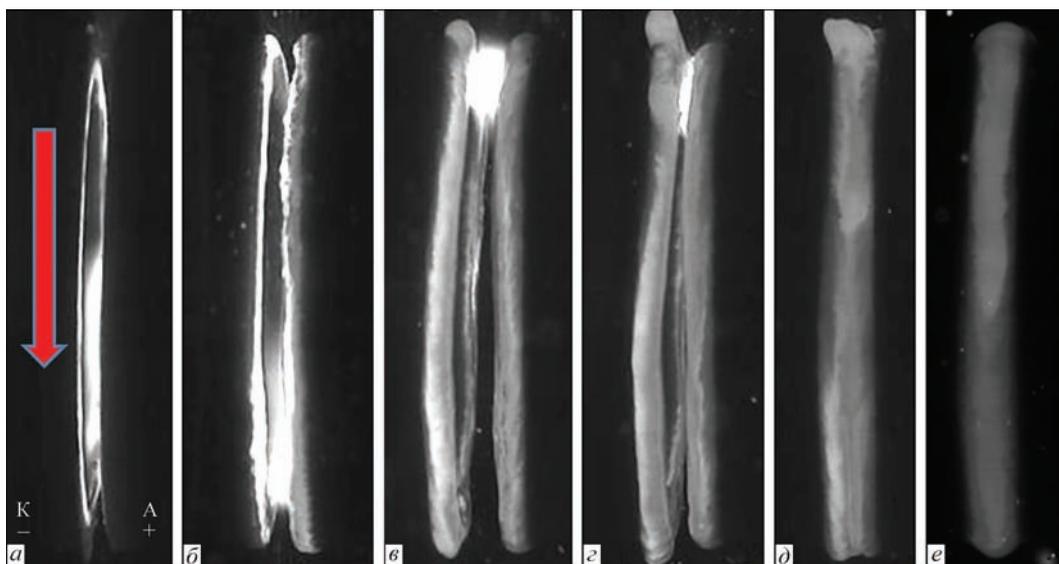


Рис. 2. Стадии ПСМД труб: а — начало перемещения дуги под действием УМП; б — формирование слоя расплава на торцах труб; в — перемещение расплава в процессе нагрева; г — обновление расплава перед осадкой; д — начало осадки; е — формирование сварного соединения

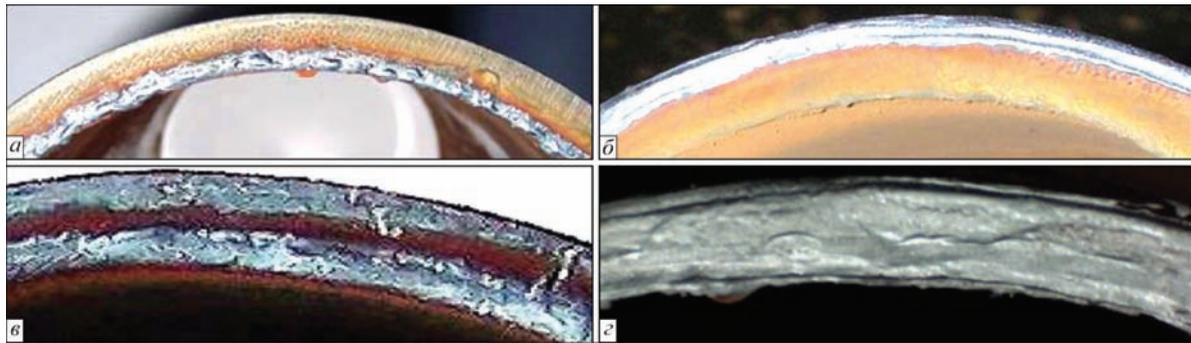


Рис. 3. Управление положением дуги на свариваемой поверхности труб: *a* — дуга перемещается по внутренним кромкам труб; *б* — дуга перемещается по наружным кромкам труб; *в* — сканирование дуги с внутренней на наружную кромку труб; *г* — формирование на торцах труб стабильного по толщине расплава

сил, вращающих дугу вдоль нагреваемых торцов (рис. 2, *в*), начинает двигаться в том же направлении. Регулируемая скорость этого движения при определенных условиях может достигать 3 м/с. Движение расплава обусловлено действием электродинамических сил и давлением газа в дуговом зазоре, возбуждаемом перемещающимся столбом дуги, при этом происходит перемешивание расплавленного слоя металла. Перед осадкой слой расплава на торцах достаточно равномерно распределен по периметру трубы и толщине ее кромок (рис. 2, *г*). В начальный период осадки зазор между торцами уменьшается и дуговой разряд прекращается на период закрытия зазора (рис. 2, *д*), который при скорости осадки 200 мм/с длится 0,01 с. При уменьшении зазора до величины $2\delta_{ж}$ между торцами начинает формироваться сплошная прослойка расплава металла (рис. 2, *е*), которая под действием магнитного поля (подача тока через торцы не прекращается) продолжает круговое движение. Это способствует обновлению расплава и образованию сплошной прослойки по всему сечению свариваемых труб. В момент закрытия зазора расплав выдавливается из стыка и происходит деформация нагретых слоев металла в твердой фазе.

Приведенные данные показывают, что поведение расплава в период, предшествующий осадке, оказывает доминирующее влияние на формирование соединений при ПСМД. В этот период, измеряемый сотыми долями секунды, поверхность торцов не подвергается прямому воздействию дуги и контактирует с воздушной средой, окружающей зону сварки. При этом площадь участков, покрытых жидким расплавом, может значительно превышать площадь активных пятен дуги, что позволяет сделать вывод о возможности формирования качественных соединений на участках торцов при достаточно больших интервалах перерывов в прохождении дуги через эти участки. Этот вывод был положен в основу разработки технологии ПСМД труб с толщиной стенки, значительно превосходящей размеры активных пятен мощных дуг.

На основе проведенных исследований быстропротекающих процессов поведения расплава в зазоре при ПСМД были разработаны алгоритмы управления параметрами процесса ПСМД в различные периоды сварки. Программой сварки предусмотрены два периода. В первом происходит нагрев труб, обеспечивающий получение заданного температурного поля и деформацию торцов. Во втором периоде, предшествующем деформации (осадке), обеспечивается формирование в зазоре расплава, стабильного по толщине и поддерживаемого в жидком состоянии за счет интенсивного энерговыделения. Для этого процесс кратковременно переводится в режим дугоконтактного нагрева, что сопровождается увеличением мощности. Для получения стабильного и равномерного по толщине труб нагрева, а также требуемых условий формирования расплава при сварке толстостенных труб в ИЭС им. Е. О. Патона разработана система управления движением дуги, схема которой приведена на рис. 1, *б*.

После возбуждения дуги в зазоре между торцами труб в результате воздействия радиальной составляющей B_p индукции магнитного потока обеспечивается устойчивое движение по внутренней кромке периметра труб (рис. 3, *а*). Под воздействием аксиальной составляющей B_a обеспечивается устойчивое движение дуги по наружной кромке труб (рис. 3, *б*). Периодическое изменение величины указанных составляющих приводит к сканирующим движениям дуги между наружной и внутренней поверхностями труб (рис. 3, *в*). При этом обеспечивается равномерный нагрев торцов в первом периоде и формирование расплава во втором (рис. 3, *г*).

Анализ приведенных особенностей нагрева быстро перемещающейся дугой позволил определить оптимальную программу управления параметрами сварки ПСМД.

На базе перечисленных исследований в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны технологии сварки ПСМД высокопрочных труб диаметром 60...219 мм с толщиной стенки 6...16 мм. В табл. 1

Таблица 2. Основные технологические параметры при ПСМД и КСО

Тип или марка стали	Размер трубы Ду, мм	Процесс сварки	Время сварки, с	Усилие осадки, кН	Припуск на нагрев, мм	Припуск на осадку, мм	Потребляемая мощность, первый период, кВт·А	Потребляемая мощность, второй период, кВт·А
Х70	168×7	ПСМД	34,7	247	0	7,5	19,6	58,7
		КСО	37,2	177	15	8	25,1	60,2
35	76×16	ПСМД	105,0	241	0	10	22,4	64,6
		КСО	120,0	168	36	19	40,2	98,4



Рис. 4. Формирование сварных соединений при ПСМД

приведен химический состав некоторых труб этой категории, в табл. 2 основные сравнительные параметры, характеризующие режимы сварки при ПСМД и КСО. В табл. 3 представлены основные технологические параметры при ПСМД труб и для сравнения приведены аналогичные параметры, характеризующие технологию сварки таких же труб при контактной сварке оплавлением, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона.

Из сравнения приведенных данных видно, что длительность процессов, а также потребляемая мощность при ПСМД и КСО труб одинаковых размеров отличается незначительно, что свидетельствует об идентичности тепловой эффективности процессов.

Таблица 3. Основные технологические параметры ПСМД сварки труб

Тип или марка стали	Размер трубы Ду, мм	Время сварки, с	Усилие осадки, кН	Укорочение труб, мм
Х70	168×7	34,7	247	8,5...8,9
01Star520	121×7	27	200	8,8...9,2
01Star520	121×10	43	278	10,7...11,2
35	76×16	82	255	16,4...16,9
09Г2С	42×4	14	40,6	3,9...4,1
STPG410	60,5×5,5	19	80	5,8...6,8

Таблица 4. Механические свойства основного металла и сварного соединения труб при ПСМД и КСО

Тип стали (процесс сварки)	σ_r , МПа	σ_b , МПа	KCV_{20} , Дж/см ²	KCV_{-20} , Дж/см ²
Х70	$\frac{448,9...469,1}{460,6}$	$\frac{528,8...566,8}{551,0}$	$\frac{248,4...265,7}{256,5}$	$\frac{248,4...265,7}{256,5}$
Х70 (ПСМД)	$\frac{411...440}{425,5}$	$\frac{532...548}{540}$	$\frac{124,8...253,4}{189,1}$	$\frac{149,3...244,4}{196,8}$
Х70 (КСО)	-	$\frac{536...543}{539}$	$\frac{31,6...238,4}{134,5}$	$\frac{29,2...141}{85,3}$

При ПСМД потери металла на оплавление значительно ниже, чем при КСО, а для получения качественных соединений необходимы усилия осадки в 1,5 раза больше. Последнее свидетельствует о меньшей температуре слоев металла, подвергающихся деформации при осадке. Формирование сварных соединений труб из стали Х70 размером 168×7 мм, выполненных ПСМД, приведены на рис. 4. Контроль припуска осадки труб позволяет значительно уменьшить высоту усиления сварного соединения. Высота усиления сварного соединения составляет 0,8...1,8 мм.

Механические испытания соединений труб, выполненных ПСМД, проведенные в соответствии с требованиями стандартов API, NDV, показали, что прочностные и пластические свойства соединений находятся на уровне показателей основного металла (табл. 4, 5).

Как известно [10], при различных способах сварки давлением перечисленных сталей, в том числе КСО, наблюдается резкое снижение величины ударной вязкости, особенно при низких температурах испытаний. Для получения требуемых пластических свойств таких соединений требуется дополнительная термообработка. Все соединения перечисленных труб (табл. 2, 3), сваренных ПСМД без термообработки, имели показатели ударной вязкости при температурах испытаний 20; -20; -40 °С не ниже 80 % аналогичных показателей основного металла.

Это достигнуто прежде всего за счет энергосбережения при сварке и регулирования движением расплава в дуговом зазоре в период, предшествующий деформации нагретых торцов перед осадкой. Формирование стабильного по толщине расплава $\delta_{ж}$ на торцах труб обеспечило возможность получать качественные соединения при более высоких градиентах температурного поля в приконтактной области (рис. 5).

Таблица 5. Механические свойства сварных соединений труб

Тип или марка стали	Размер труб Ду, мм	Основной металл σ_B , МПа	Сварное соединение σ_B , МПа	Основной металл KCV_{20} Дж/см ²	Сварное соединение KCV_{20} Дж/см ²	Основной металл KCV_{-20} Дж/см ²	Сварное соединение	
							KCV_{-20} Дж/см ²	KCV_{-40} Дж/см ²
09Г2С	42×5	<u>460...478</u> 469	<u>453...484</u> 465	<u>57...5</u> 58	<u>59,0...78,1</u> 68,5	<u>57,8...58,0</u> 57,9	<u>64,0...74,5</u> 69,3	-
35	89×10	<u>538...565</u> 551	<u>528...554</u> 541	<u>56...64</u> 60	<u>52...965</u> 70	-	-	-
01Star520	191×7	<u>638...665</u> 651	<u>618...674</u> 656	<u>116...154</u> 135	<u>87...152</u> 119	-	-	-
STPG410	60,5×5,5	<u>452...464</u> 458	<u>450...462</u> 456	<u>90...98</u> 94	<u>86...92</u> 89	<u>102...104</u> 98	<u>87...94</u> 91	<u>88...94</u> 92

Соответственно снижается температура при-контактных слоев и разупрочнение металла. На рис.6 приведены температурные поля в зоне нагрева при сварке ПСМД и КСО труб диаметром 168 мм, $\delta = 7$ мм. Температура нагрева приконтактных слоев на расстоянии 2 мм от поверхности оплавления в момент перед началом деформации при ПСМД составляет не более 1050 °С, а при сварке таких труб КСО она на 100 °С выше. Экспериментально установлено, что при скоростном нагреве образцов из стали Х70 до температуры более 1100...1150 °С наблюдается резкое снижение показаний KCV .

Поскольку в процессе деформации структура центральной части шва и по линии соединения определяется структурой этих слоев, то распределение температуры, приведенной на рис. 6 (кривая 2), представляется оптимальной при различных способах сварки давлением для получения высоких показателей KCV . На рис. 7, а представлена микроструктура соединения труб диаметром 168 мм, $\delta = 7$ мм из стали Х70, выполненного ПСМД на оптимальном режиме (табл. 2). Металл по линии сварки имеет ферритно-перлитную структуру с выделениями феррита в виде прерывистой полосы толщиной до 10 мкм. В центральной части структура мелкозернистая (8, 9 балл) с твердостью $HV 2470...2640$ МПа. Общая ширина ЗТВ при ПСМД составила 10 мм. Для сравнения на рис. 6, б, приведена аналогичная структура при

сварке таких же труб сваренных КСО. Структура по линии сварки крупнозернистая (балл 3...5) с преобладанием перлитной составляющей и множественными скоплениями полигонального феррита, ширина ферритной полосы составляет 100 мкм. На этом участке наблюдается снижение твердости на 10 %, а также ударной вязкости, что является следствием перегрева приконтактных участков до температур более 1200 °С, в которых происходило формирование сварного шва (кривая 1 на рис. 6).

Общая ширина ЗТВ при КСО составила 18 мм. Качественные соединения при нагреве, соответствующему кривой 2 на рис. 6, были получены только при ПСМД. При КСО использование такого режима нагрева приводит к формированию по линии соединения дефектов в виде тонких оксидных плен, хотя микроструктура в центре шва подобна получаемой при ПСМД. Возможность получения при ПСМД качественных соединений при более высоких градиентах температурного поля обусловлена формированием в зазоре стабильного по толщине расплава.

Минимальная толщина расплава при ПСМД труб составляет 0,6 мм, а при КСО толщина расплава колеблется в пределах 0,15...0,2 мм. В соответствии с выражением (1) формирование качественных соединений при ПСМД можно обе-

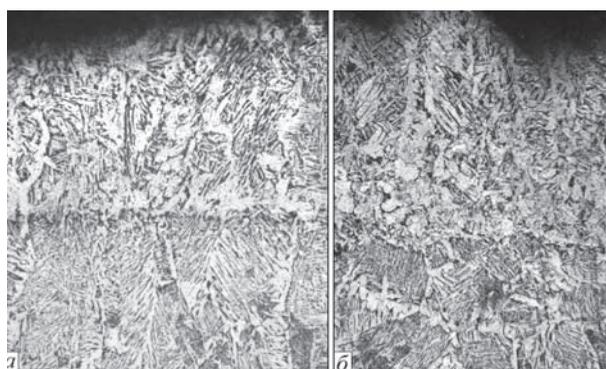


Рис. 5. Микроструктура (×200) литого металла на катоде (а) и аноде (б)

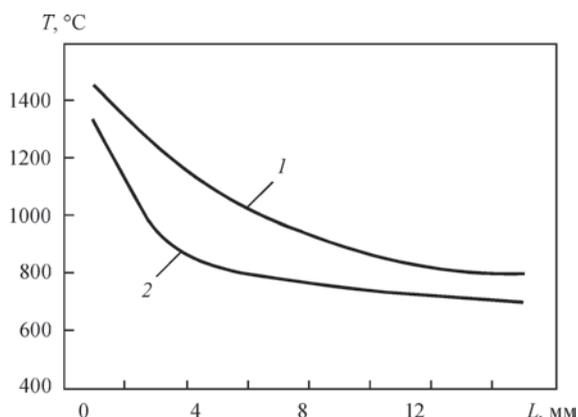


Рис. 6. Распределение температуры при КСО (1) и ПСМД (2) (расстояние указано от стыка)

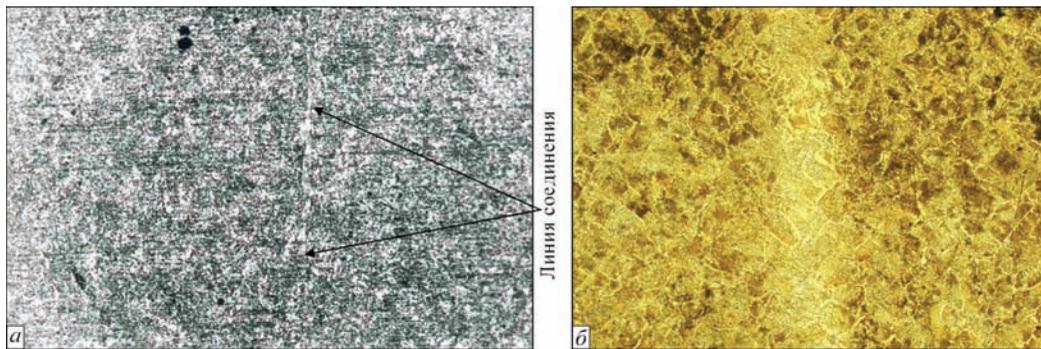


Рис. 7. Микроструктура сварных соединений: а — при ПСМД ($\times 150$); б — при КСО ($\times 100$)

спечить при более высоких градиентах температурного поля в ЗТВ. Приведенные данные свидетельствуют о том, что качественные соединения высокопрочных сталей при различных способах сварки давлением можно получить при относительно низкой температуре нагрева приконтактных слоев металла, если наряду с использованием источников высококонцентрированного нагрева обеспечить перед осадкой формирование в контакте между свариваемыми деталями стабильного по толщине слоя расплава.

Выводы

Установлено, что доминирующим фактором, определяющим формирование соединений при ПСМД, является наличие слоя расплава на торцах труб в начальный период осадки.

Определены способы равномерного нагрева торцов труб вращающейся дугой, толщина которых превышает диаметр активных пятен дуги.

Определены алгоритмы управления основными параметрами ПСМД и режимы процесса, обеспечивающие качественную сварку высокопрочных труб диаметром до 320 мм с толщиной стенки до 16 мм.

Проведены всесторонние испытания соединений толстостенных труб из высокопрочных сталей, выполненных ПСМД, подтверждающие равнопрочность сварных соединений с основным металлом и высокие пластические свойства. Определена возможность получения высоких показателей ударной вязкости при сварке ПСМД высокопрочных трубных сталей без термической обработки.

Разработаны технологии сварки ПСМД различных труб из высокопрочных сталей с толщиной стенок до 16 мм диаметром 20...320 мм.

Список литературы

1. Hagan D., Riley N. (1979) MIAB welding. Part 2. Fabrication the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**, 625, 627–629.
2. Ganovski F. J. (1974) The magnetarc welding process. *Weld. Met. Fab.*, June.
3. Kenji Takagi, Hirokazu Otsuka, Fumiho Abakida et al. (1987) Establishment of optimum welding conditions of magnetically impelled arc butt welding and application to field operation. *International Institute of Welding*, III-8801.

4. Edson D. A. (1982) Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Thick Wall Tubes. *Ibid*, III-726-82, July.
5. Кучук-Яценко С. И., Качинский В. С., Игнатенко В. Ю., Коваль М. П. (2010) Прессовая сварка магнитоуправляемой дугой деталей автомобильного сортамента. *Автоматическая сварка*, **6**, 33–37.
6. Takagi K., Aracida F. (1982) Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Gas Pipeline. *Metal Construction*, **10**, 542–548.
7. Гельман А. С. (1950) *Контактная сварка*. Москва, Машиностроение.
8. Орлов В. Д., Дмитриев Ю. В., Чакалев А. А. и др. (1975) *Технология и оборудование контактной сварки*. Москва, Машиностроение.
9. Кучук-Яценко С. И. (ред.) (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Киев, Наукова думка.
10. Кучук-Яценко С. И., Швец Ю. В., Загадарчук В. Ф. и др. (2012) Контактная стыковая сварка оплавлением толстостенных труб из высокопрочных сталей класса К56. *Автоматическая сварка*, **5**, 5–11.

References

1. Hagan, D., Riley, N. (1979) MIAB welding. Part 2. Fabrication the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**(625), 627–629.
2. Ganovski, F.J. (1974) The magnetarc welding process. *Weld. Met. Fab.*, June.
3. Kenji Takagi, Hirokazu Otsuka, Fumiho Abakida et al. (1987) Establishment of optimum welding conditions of magnetically impelled arc butt welding and application to field operation. *IIW Doc*. III-8801.
4. Edson, D.A. (1982) Magnetically impelled arc butt welding of thick wall tubes. *Ibid.*, III-726-82.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachinsky, V.S., Ignatenko, V.Yu et al. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of parts of automobile range of products. *The Paton Welding J.*, **6**, 28-31.
6. Takagi, K., Aracida, F. (1982) Magnetically impelled arc butt welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **10**, 542-548.
7. Gelman, A.S. (1950) *Resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie.
8. Orlov, V.D., Dmitriev, Yu.V., Chakalev, A.A. et al. (1975) *Technology and equipment of resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie.
9. Kuchuk-Yatsenko S.I., (ed.) (1992) *Flash-butt welding*. Kiev, Naukova Dumka.
10. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, Yu.V., Zagadarchuk, V.F. et al. (2012) Flash-butt welding of thick-walled pipes from high-strength steels of K56 strength class. *The Paton Welding J.*, **5**, 2-7.

В. С. Качинский, С. И. Кучук-Яценко

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ФОРМУВАННЯ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ
ТОВСТОСТІННИХ ТРУБ З ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ
ДУГОЮ, КЕРОВАНОЮ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

Дослідження високопродуктивних технологій зварювання неповоротних стиків труб актуально особливо при виконанні робіт в монтажних умовах. Наведено результати комплексних досліджень із відпрацювання технології пресового зварювання труб з товщиною стінки більше 4...5 мм з використанням керуючого магнітного поля. Визначено способи нагріву торців труб дугою, керованою магнітним полем, алгоритми управління основними параметрами пресового зварювання, проведено всебічні випробування з'єднань. Показана можливість отримання високих показників ударної в'язкості зварних з'єднань при зварюванні високоміцних трубних сталей. Бібліогр. 10, рис. 7, табл. 5.

Ключові слова: пресове зварювання, керуюче магнітне поле, дуга, керована магнітним полем, товстостінні труби, технологія зварювання, монтажні та стаціонарні умови, мікроструктура, механічні властивості

V. S. Kachinskii, S. I. Kuchuk-Yatsenko

E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU.
11 Kazimir Malevich str., 03680, Kiev
E-mail: office@paton.kiev.ua

JOINT FORMATION IN MAGNETICALLY-IMPELLED
ARC BUTT WELDING OF THICK-WALLED PIPES
FROM HIGH-STRENGTH STEELS

Searching for highly-efficient technologies of welding position butt joints of pipes is especially urgent, particularly during operation performance in site. The paper gives the results of comprehensive research on optimization of the technology of pressure welding of pipes with more than 4 – 5 mm wall thickness, using a controlling magnetic field. Methods of heating pipe edges by magnetically-impelled arc, algorithms of controlling the main parameters of pressure welding have been determined and comprehensive testing of the joints has been performed. Possibility of achieving high values of welded joint impact toughness in welding high-strength pipe steels is shown. 10 Ref., 7 Figures, 5 Tables.

Keywords: pressure welding, controlling magnetic field, magnetically-impelled arc, thick-walled pipes, welding technology, site and stationary conditions, mechanical properties

Поступила в редакцію 02.06.2017

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



**Міжнародна конференція
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрметалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел. (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com