

ПРЕССОВАЯ СВАРКА ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ С НАГРЕВОМ ДУГОЙ, УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **В. С. КАЧИНСКИЙ**, канд. техн. наук, **В. Ю. ИГНАТЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан новый способ прессовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем (ПМДС), труб с толщиной стенки, превышающей размеры активных пятен столба дуги. Представлены результаты исследований ПМДС труб с толщиной стенки до 16 мм из низколегированных сталей. Проведена модернизация сварочного оборудования для сварки толстостенных труб.

Ключевые слова: прессовая сварка с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, нагрев торцов труб, формирование соединения, толстостенные трубы

В мировой практике для сварки трубопроводов используются различные способы сварки — ручная электродуговая сварка покрытым электродом, сварка в защитных газах, автоматическая сварка под флюсом, контактная стыковая сварка оплавлением. Одним из высокопроизводительных процессов, получивших применение при строительстве трубопроводов малого (до 100 мм) диаметра с толщиной стенки до 6 мм, является прессовая сварка с нагревом дугой, управляемой магнитным полем (ПМДС) [1–4].

Сущность процесса ПМДС заключается в том, что дуга под действием внешнего управляющего магнитного поля, создаваемого магнитными системами, перемещается в зазоре между торцами свариваемых деталей. При указанном способе сварки сварочный ток изменяют по специальной программе. При определенных условиях линейная скорость движения дуги достигает 200 м/с. Вследствие относительно высокой скорости перемещения сварочной дуги ее тепловая энергия перераспределяется по всей поверхности торцов деталей. В результате происходит относительно равномерный нагрев свариваемых торцов труб. Сварное соединение формируется при сжатии и совместной пластической деформации торцов свариваемых труб. Процесс ПМДС выполняется на воздухе без применения защитных газов.

Важными технологическими параметрами ПМДС являются сварочный ток и напряжение на дуге, зависящие от длины дугового промежутка. Зазор между торцами свариваемых труб обычно составляет от 1,5 до 2,8 мм и относится к установочным параметрам, определяющим напряжение на дуге, расход энергии, подвижность перемещающейся дуги.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона технология и оборудование для ПМДС тонкостенных труб получили широкое применение при сварке деталей из углеродистых и низколегированных сталей в различных отраслях промышленности и стро-

ительства. Технические характеристики гаммы машин для ПМДС труб приведены табл. 1.

Установки МД-102 и МД-103 (рис. 1, а) могут быть использованы в передвижных трубо сварочных комплексах для сварки трубопроводов небольших диаметров. Зажатие, разжатие и осадка труб осуществляются согласно заданному циклу через зажимные и осадочные механизмы [5].

Установка К-872 (рис. 1, б) предназначена для ПМДС трубопроводов различного назначения в полевых условиях. Она имеет подвесную головку клещевого типа, отличительной особенностью которой является раздельное зажатие свариваемых труб [6].

Высокая эффективность ПМДС тонкостенных труб способствовала расширению области ее применения. Одним из новых направлений в применении ПМДС стало проведение исследовательских и экспериментальных работ по сварке толстостенных труб. С этой целью была проведена модернизация сварочного оборудования.

Для сварки толстостенных труб известный процесс оказался неприемлем, поскольку одним из условий равномерного и стабильного нагрева кромок свариваемых деталей является соизмеримость толщины стенки трубы и размеров активных пятен столба дуги. На рис. 2, а видны следы активных пятен столба дуги на внутренних кромках торцов труб после нагрева их при ПМДС. Эти следы меньше, чем поперечное сечение торцов труб. Процесс сварки проходил неустойчиво — с короткими замыканиями. Вследствие воздействия магнитного поля сварочной дуги и существования значительного градиента индукции внешнего магнитного по-

Таблица 1. Технические характеристики сварочных машин для ПМДС

Параметр	МД-102	МД-103	К-872
Диаметр труб, мм	25...60	57...114	76...219
Толщина стенки труб, мм	2,0...8,0	2,0...10,0	2,5...16,0
Производительность, стык/ч	120	70	20
Время сварки, с	2,5...14,0	14...22	12...100
Потребляемая мощность, кВт	45	60	150
Масса, кг	440	950	2000

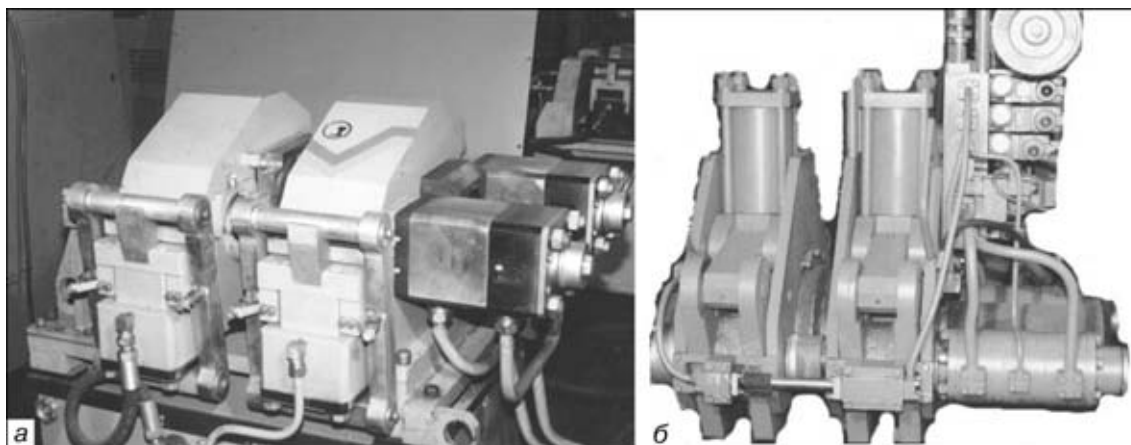


Рис. 1. Сварочные машины типа МД-103 (а) и К-872 (б)

ля в начальный момент нагрева дуга вытесняется из дугового зазора и перемещается по внутренним кромкам торцов труб. При этом столб дуги изогнут в сторону геометрической оси трубы. По мере оплавления внутренних кромок торцов труб дуговой зазор в месте горения дуги увеличивается, градиент распределения индукции магнитного поля в дуговом зазоре уменьшается и сварочная дуга смещается к наружным кромкам торцов труб. Значительная толщина стенки трубы ($\delta = 8$ мм) препятствует стабильному перемещению дуги в область больших значений индукции управляющего магнитного поля. Неравномерное перемещение сварочной дуги в области низких значений индукции управляющего магнитного поля приводит к неравномерному нагреву торцов труб, расплавлению металла и его стеканию.

В настоящей работе представлены результаты проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона исследований процесса ПМДС труб с толщиной стенки до 16 мм. Цель исследований состояла в нахождении способов управления, позволяющих постоянно перемещать сварочную дугу по всей площади поперечного сечения торцов труб. Было определено, что после возбуждения дуги необходимо посред-

ством создания оптимального распределения индукции магнитного поля в дуговом зазоре сместить сварочную дугу к наружным кромкам торцов труб в область максимальных значений магнитной индукции и заставить ее там перемещаться. При этом происходит относительно равномерное распределение тепловой энергии сварочной дуги по кромкам торцов труб. При рассредоточении выделенной тепловой энергии происходит более равномерный нагрев свариваемых торцов труб, чем при перемещении сварочной дуги по внутренним кромкам труб.

На рис. 2, б видны следы активных пятен дуги, образовавшиеся на наружных кромках торцов толстостенных труб после их нагрева при применении ПМДС. Под действием внешнего магнитного поля катодный поток плазмы, смещенный относительно противостоящего ему анодного потока, перемещается. Катодный поток плазмы после достижения анода образует новое анодное пятно, а затем происходит его смещение. Анодное и катодное пятна как бы стремятся расположиться друг против друга.

След, оставляемый дугой на торцах труб, после смещения к их кромкам приобретает различные формы, что может быть связано с изменением значений и направления индукции управляющего магнитного поля, электрическими и тепловыми процессами в местах горения дуги, а также шероховатостью обработки поверхности торцов труб.

Сварочная дуга, управляемая магнитным полем, после возбуждения смещается к наружным кромкам торцов толстостенных труб в область максимальных значений индукции магнитного поля. Здесь она начинает перемещаться, производя нагрев свариваемых поверхностей толстостенных труб. При этом столб сварочной дуги изогнут в сторону, противоположную геометрической оси трубы. Благодаря перемещению сварочной дуги по наружным кромкам толстостенных труб происходит их относительно равномерный нагрев.

Полученные образцы (рис. 2) разрезали вдоль осевой линии, а их поверхность была подвергнута металлографическим исследованиям. Как показали результаты, при ПМДС в зоне термического влияния (ЗТВ) в области наружных кромок труб микроструктура участка перекристаллизации представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобла-

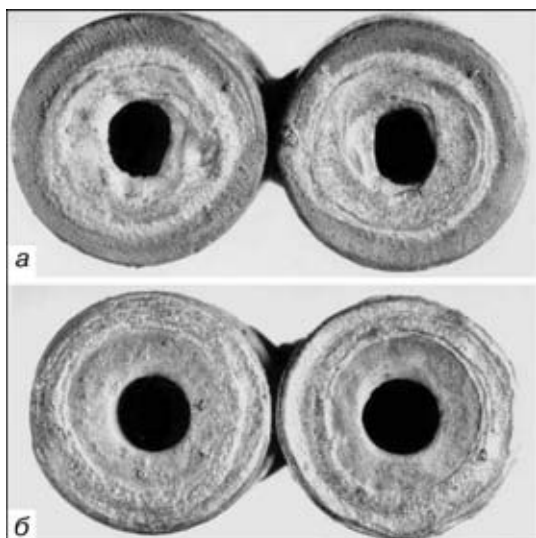


Рис. 2. Следы, оставленные сварочной дугой при перемещении по внутренним (а) и наружным (б) кромкам толстостенных труб ($\delta = 8$ мм)

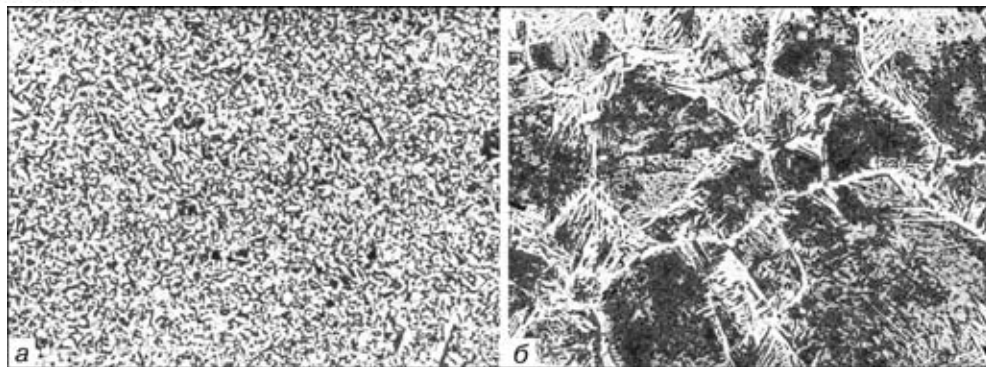


Рис. 3. Микроструктура (X180) металла ЗТВ, полученная при перемещении дуги по внутренним кромкам торцов трубы: *a* — участок перекристаллизации в области наружных кромок; *б* — участок перегрева с грубодисперсной структурой, расположенный на внутренних кромках торцов трубы

данием перлита (рис. 3, *a*). В металле ЗТВ в области внутренних кромок торцов труб расположен участок перегрева. Его металл отличается грубодисперсной структурой, в которой преобладает перлит, наблюдаются также участки бейнита и феррита (в основном в виде сетки, частично игл видманштеттовой структуры) (рис. 3, *б*).

Микроструктура металла расплавленного слоя на наружных и внутренних кромках труб заметно отличается. На внутренних кромках она представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием перлита. Феррит находится в виде доэвтектоидных выделений вдоль границ кристаллитов и феррита, ориентированного по Видманштетту. В микроструктуре наружных кромок торцов содержание феррита больше, чем перлита, массовая доля которого весьма незначительна.

При перемещении сварочной дуги по наружным кромкам толстостенных труб в металле ЗТВ в области наружных кромок торцов труб находится участок перегрева (рис. 4, *a*). Микроструктура его металла представляет собой ферритную сетку по границам бывших зерен аустенита, наблюдается наличие феррита, ориентированного по Видманштетту, перлита, незначительное содержание бейнита. Зона термического влияния в области внутренних кромок (рис. 4, *б*) начинается участком перекристаллизации, отличающимся мелкодисперсной ферритно-перлитной структурой с укрупненными зернами. Микроструктура металла расплавленного слоя на внутренних кромках представляет собой ферритно-перлитную смесь, в которой фер-

рит расположен в виде выделений доэвтектоидного типа и игл видманштеттовой структуры.

На наружных кромках труб структура металла расплавленного слоя отличается от описанной выше. Она представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием феррита. Значительная массовая доля феррита выделяется вдоль границ кристаллитов в доэвтектоидной области.

В результате проведенного сравнения известного и нового способов ПМДС было доказано определяющее влияние длительного воздействия сварочной дуги на отдельные участки поверхности нагрева толстостенных труб.

При известном процессе ПМДС в области внутренних кромок после нагрева образуется участок перегрева, занимающий до 70 % площади поверхности нагреваемого сечения торца трубы. Структура его металла имеет феррит, ориентированный по Видманштетту, и обладает пониженной деформационной способностью. После осадки участок перегрева остается в центральной части сварного соединения, что отрицательно сказывается на качестве сварного соединения. Применение известного процесса ПМДС не позволяет получить качественные сварные соединения, если размер активных пятен дуги меньше, чем площадь свариваемого сечения труб.

При новом процессе ПМДС микроструктура, подобная описанной выше, образуется на наружных кромках торцов труб. Участок перегрева занимает до 30 % площади поверхности нагреваемого сечения торца трубы в области наружных кромок. После проведения осадки участок перегрева уда-

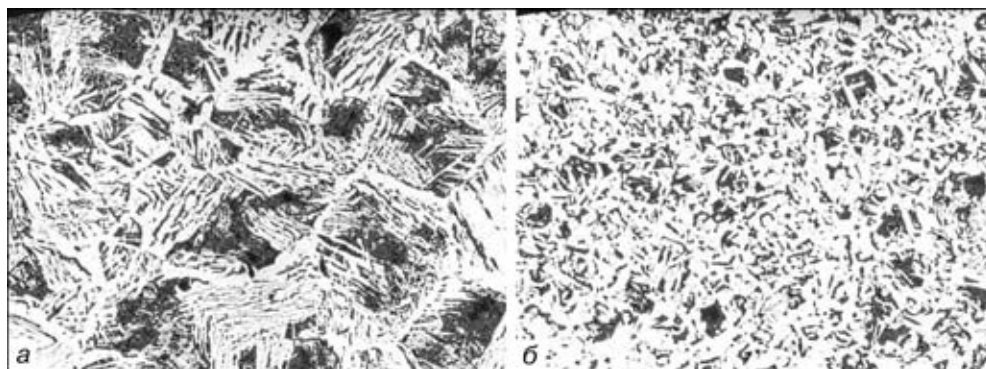


Рис. 4. Микроструктура (X180) металла ЗТВ, полученная при перемещении дуги по наружным кромкам торцов труб: *a* — участок перегрева в области наружных кромок; *б* — участок перекристаллизации с укрупненными зернами, расположенный на внутренних кромках торцов труб

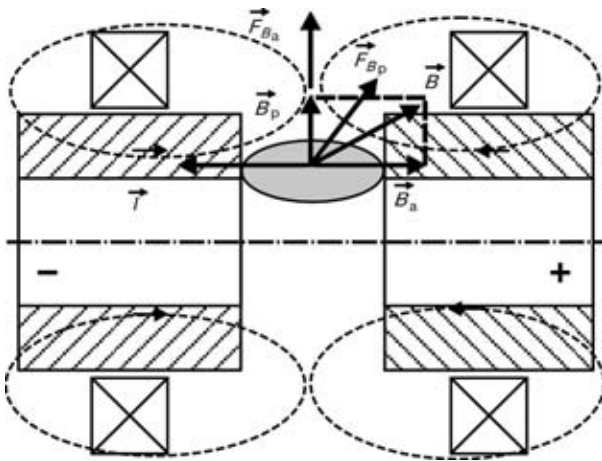


Рис. 5. Действие сил, определяющих характер перемещения сварочной дуги при ПМДС: I — составляющая тока дуги; B — индукция магнитного поля; $P_{B_r}^z, P_{B_a}^z$ — соответственно радиальная и аксиальная составляющие магнитной индукции поверхности; $F_{B_r}^z, F_{B_a}^z$ — силы, оказывающие влияние соответственно на аксиальное и радиальное перемещение дуги по торцам труб

ляется из зоны соединения, что положительно влияет на формирование сварного шва.

Сущность нового способа ПМДС труб схематически показана на рис. 5. Процесс нагрева торцов происходит при перемещении сварочной

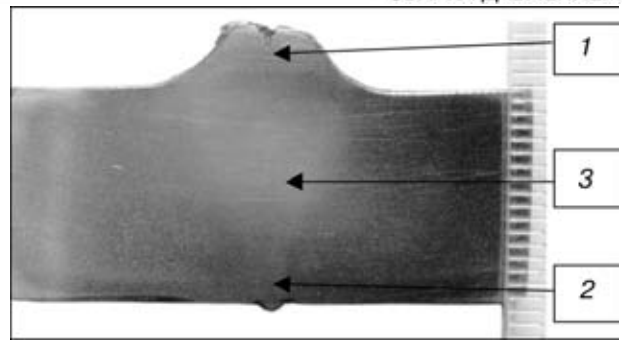


Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения трубы ($\delta = 16$ мм): 1–3 — участки, на которых проводились металлографические исследования

дуги по наружным кромкам в область повышенных значений радиальной составляющей B_r индукции управляющего магнитного поля, что обеспечивает устойчивое перемещение сварочной дуги.

При достижении требуемого нагрева, соответствующего необходимому для пластической деформации прогреву торцов труб, происходит изменение сил $F_{B_a}^z, F_{B_r}^z$ и значений сварочного тока, что приводит к сканированию сварочной дуги по поверхности торцов труб. После этого осуществляют осадку. В результате проведенных исследований была решена главная задача — разработан способ,

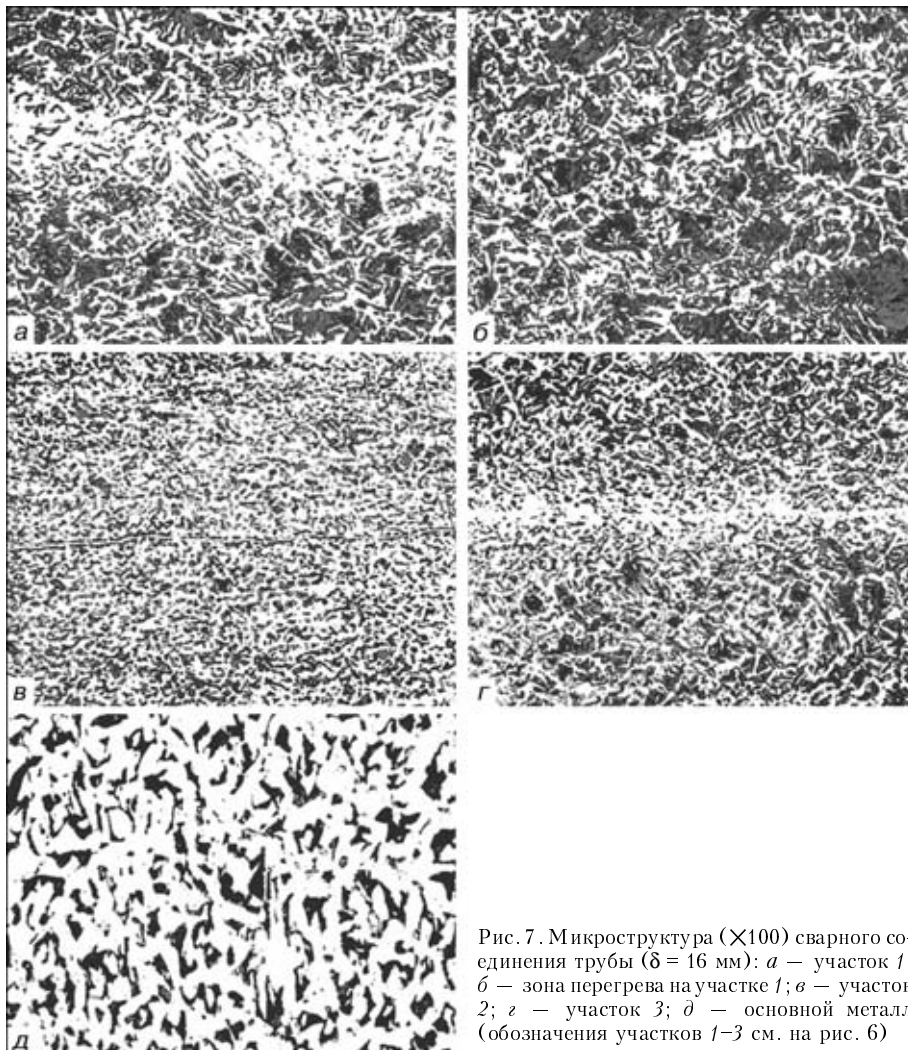


Рис. 7. Микроструктура ($\times 100$) сварного соединения трубы ($\delta = 16$ мм): а — участок 1; б — зона перегрева на участке 1; в — участок 2; г — участок 3; д — основной металл (обозначения участков 1–3 см. на рис. 6)



Рис. 8. Сварное соединение трубы размером 76×16 мм (время сварки 104 с)

с помощью которого можно перемещать дугу по всей площади поперечного сечения труб.

Как было отмечено выше, формирование сварных соединений толстостенных труб при ПМДС, как и при других прессовых способах сварки, происходит при совместной деформации стыкуемых поверхностей деталей, нагретых до пластического состояния. Равномерный нагрев торцов труб является основным, но недостаточным условием для формирования качественного сварного соединения. При ПМДС защитные газы, как правило, не используются. Это приводит к окислению нагреваемых торцов труб кислородом воздуха и образованию в процессе сварки оксидов. Удаление оксидов на торцах нагреваемых деталей является необходимым условием, которое надо соблюдать для всех видов прессовой сварки.

Экспериментально установлено, что при управлении перемещением столба дуги по свариваемым торцам труб ($\delta = 16$ мм) удаётся обеспечить требуемую частоту прохождения дуги, благодаря чему расплав сохраняется в жидком состоянии. Оксиды вместе с жидким металлом в процессе пластической деформации торцов труб вытесняются из зоны соединения. Использование нового процесса позволяет получать сварные соединения с минимальным внутренним усилением (рис. 6).

Металлографические исследования сварного соединения трубы размером 76×16 мм из стали 35 производили после травления в 4%-м растворе HNO_3 в спирте. Исследования микроструктуры сварного соединения были выполнены на оптическом микроскопе «Neophot-32» при увеличении 100 и 180.

Измерение твердости металла ЗТВ проводили на твердомере «Леко» при нагрузке 10, 100 и

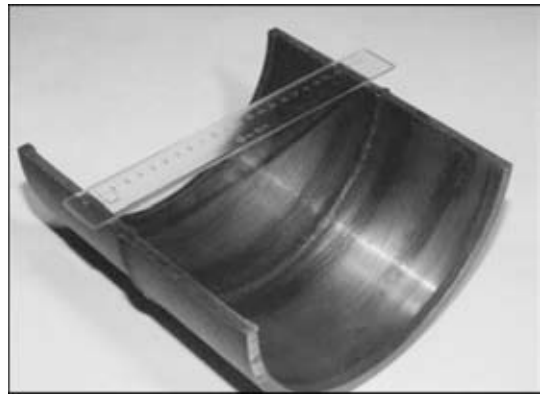


Рис. 9. Секция сварного соединения трубы размером 219×8 мм (время сварки 38 с)

1000 г. Металлографические измерения проводили в разных участках сварного соединения (см. 1–3 на рис. 6). Микроструктура сварного соединения на участке 1 представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием ферритной составляющей, небольшая часть феррита ориентирована по Видманштетту (рис. 7, а). Ширина линии сварного соединения на данном участке составляет 0,126 мм, твердость HV_{100} 151...165. Зона термического влияния состоит из нескольких ярко выраженных участков — перегрева шириной 3,906 мм, а также полной и неполной перекристаллизации — соответственно шириной 2,268 и 1,638 мм.

Структура металла участка перегрева представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием перлитной составляющей. Перлит выделяется в виде зерен, отороченных по краям ферритными выделениями. Большая часть феррита ориентирована по Видманштетту. Металл участка перегрева имеет твердость HV_{100} 181...199, размер зерна по ГОСТ 5639–82 соответствует 6-му, реже 5-му баллу (рис. 7, б).

Металл участка полной перекристаллизации имеет структуру ферритно-перлитную мелкодисперсную (10-й балл) и твердость HV_{200} 170. Металл участка неполной перекристаллизации отличается ферритно-перлитной структурой с размером зерна, соответствующим 7-му баллу.

На участке 2 (рис. 7, в) микроструктура металла линии сварного соединения ферритная, ее ширина составляет 0,01 мм, твердость металла — HV_{100} 201...205. Зона термического влияния состоит из участков полной и неполной перекристаллизации, участок перегрева отсутствует. Ширина участка

полной перекристаллизации составляет 1,008, а неполной перекристаллизации — 2,394 мм. Микроструктура металла участка полной перекристаллизации представляет собой мелкодисперсную ферритно-перлитную смесь с размером зерна, соответствующим 9–10-му баллу, твердость металла составляет HV_{100} 199...220. На участке неполной перекристаллизации наблюдается наличие феррита+перлита, размер зерна соответствует 7–8-му баллу, твердость металла — HV_{100} 181...196.

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений толстостенных труб

Марка стали	Размер трубы, мм	σ_b , МПа		KCV, Дж/см ²		$\sigma_{0,2}$, МПа
		основной металл	сварное соединение	основной металл	сварное соединение	
20	89×12	488...509 502	488...509 502	92...100 97	78...86 82	290
	108×8	488...509 502	486...506 500	90...100 95	76...92 84	305
35	219×8	488...509 502	488...509 502	92...100 97	79...94 85	295
	76×16	538...565 551	538...565 551	56...64 60	37...54 44	345

Микроструктура на участке 3 переходная. Ширина линии сварного соединения составляет 0,0252 мм (рис. 7, з). Микроструктура участка 3 ферритная, твердость металла составляет HV_{100} 192...202. Зона термического влияния состоит из участков перегрева, а также полной и неполной перекристаллизации. Микроструктура этого участка шириной 1,386 мм характеризуется более мелким размером зерна металла — примерно 8-й балл. Она является ферритно-перлитной, значительная часть феррита ориентирована по Видманштетту, твердость металла составляет HV_{100} 182...199. Микроструктура основного металла ферритно-перлитная, размер зерна соответствует 7–8-му баллу, твердость — HV_{100} 192 (рис. 7, д).

В результате проведенных исследований на модернизированном сварочном оборудовании разработан новый способ ПМДС применительно к трубам с толщиной стенки 16 мм (рис. 8 и 9). Механические свойства сварных соединений труб представлены в табл. 2. Стабильность получения

качественных соединений достигается путем контроля и управления основными технологическими параметрами режима непосредственно в процессе сварки.

1. *Ganowski F. J.* The magnetarc welding process // *Weld. Met. Fabric.* — 1974. — June. — P. 206–213.
2. *Edson D. A.* Magnetically impelled arc butt welding of thick wall tubes. — S. I. [1982]. — 7 p. — (*Intern. Inst. of Welding; Doc. III-726-82*).
3. *Takagi K., Aracida F.* Magnetically impelled arc butt welding of gas pipeline // *Metal Constr.* — 1982. — № 10. — P. 542–548.
4. *Качинский В. С., Игнатенко В. Ю.* Прессовая сварка трубчатых деталей с нагревом дугой, управляемой магнитным полем (оборудование и технология) // *Автомат. сварка.* — 1997. — № 7. — С. 39–41.
5. *Положительное* решение на заявку № 94128094. Машина для прессовой сварки с нагревом дугой управляемой магнитным полем / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. Ю. Игнатенко, В. С. Качинский. — Принято 20.12.94 (Украина).
6. *Положительное* решение на заявку № 98115957. Машина для прессовой сварки с нагревом дугой управляемой магнитным полем / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. Ю. Игнатенко, В. С. Качинский. — Принято 21.11.98 (Украина).

A new process has been developed of magnetically impelled arc-butt welding (MIABW) of pipes with the wall thickness greater than the dimensions of the active spots of the arc column. The paper presents the results of studying MIABW of low-alloy steel pipes with the wall thickness up to 16 mm. Welding equipment has been upgraded to weld thick-walled pipes.

Поступила в редакцию 12.04.2002

Вниманию специалистов!



Общество сварщиков Украины
Украинский аттестационный комитет сварщиков
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Межотраслевой учебно-аттестационный центр НТК
«ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»

проводят в сентябре 2002 г. в Киеве
НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОНКУРС

«Лучший сварщик Украины»

На конкурсе будут определяться лучшие сварщики в следующих номинациях:

- ручная дуговая сварка покрытыми электродами (111);
- дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертных газах (141);
- дуговая сварка металлическим электродом в активных газах (135);
- газовая сварка (311).

К участию в национальном конкурсе допускаются победители и лауреаты конкурсов сварщиков, проведенных в регионах Украины.

Оргкомитетом национального конкурса разработано «Положение о национальном конкурсе «Лучший сварщик Украины», с которым можно ознакомиться в региональных отделениях Общества сварщиков Украины.

За дополнительной информацией обращаться в рабочую группу оргкомитета:

Илюшенко Валентин Михайлович, исп. директор Общества сварщиков Украины,
тел.: (044) 227-2466; 227-8759

Котик Владимир Трофимович, техн. директор Украинского аттестационного
комитета сварщиков, тел.: (044) 441-1741