



УДК 621.791.01

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ШОВНОЙ СВАРКОПАЙКИ ТРУБ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, **Д. П. НОВИКОВА**, канд. техн. наук,
Р. В. ЮХИМЕНКО, **А. С. ПРОКОФЬЕВ**, **А. А. ПИСЬМЕННЫЙ**, инженеры,
В. В. ПОЛУХИН, канд. техн. наук, **Вл. В. ПОЛУХИН**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены методики изучения процессов сваркопайки продольных швов труб методом контактного нагрева и нагрева соединяемых кромок протекающим вдоль них электрическим током. Представлены результаты металлографических исследований швов труб, полученных данными методами.

Ключевые слова: высокочастотная сварка, индукционный нагрев, технология сваркопайки, активирующее вещество, механические испытания, трубы

При массовом выпуске труб широко применяют высокочастотную сварку (ВЧС), для которой характерны высокая производительность и незначительные производственные затраты. Однако этот способ, как правило, обеспечивает хорошее качество формирования швов лишь при сварке некоторых марок конструкционных и низколегированных сталей, латуни, меди и алюминия.

Для использования преимуществ ВЧС и расширения сортамента свариваемых материалов необходим новый способ сварки, который характеризовался бы снижением температуры сварки и градиента температур в свариваемых кромок, а также улучшением условий подготовки свариваемых поверхностей кромок. Для этого необходимо изменить способы подведения энергии в зону сварки и формовки заготовки в зоне сварки, а также применять вещества, активирующие свариваемые поверхности.

Исследования основывались на результатах проведенных ранее работ по отработке процессов формовки ленты в трубную заготовку и созданию основных узлов оборудования для формовки и сварки трубчатых изделий. Использовались также результаты исследований электротермических и термомеханических процессов сварки, разработок индукционных сварочных устройств, решения вопросов, связанных со стабилизацией процесса передачи энергии в зону сварки при изменении скорости движения изделия, определения технологических параметров режима сварки в зависимости от геометрических размеров свариваемых материалов [1–4].

На основании проведенных исследований разработаны новая технология процесса сваркопайки (ДСТУ 3761.2–98, п. 3.92), а также элементы оборудования для производства стальных труб спо-

собом индукционного нагрева при введении в зону соединения кромок активирующих веществ. Этот способ объединил положительные качества сварки давлением и пайки. При этом учитывалось, что электрофизические свойства практически всех конструкционных и трубных сталей при индукционном нагреве подобны и возможно распространение режимов нагрева как на один материал, так и на множество других.

Методика исследований процесса сваркопайки соединяемых кромок труб способом нагрева протекающим вдоль них электрическим током (НПТ). Для проведения экспериментов по шовной сваркопайке прямошовных труб при индукционном подведении энергии к заготовке использовали лабораторное оборудование (рис. 1), состоящее из несущей металлоконструкции — станины с направляющими, подвижной каретки с зубчатой рейкой, которая приводится в движение электроприводом и имеет кронштейн для закрепления переднего конца труб, неподвижной валковой клетки для осадки кромок, аппаратуры привода перемещения каретки и индукционного нагрева свариваемых кромок, системы жидкостного охлаждения, пускорегулирующей и контро-

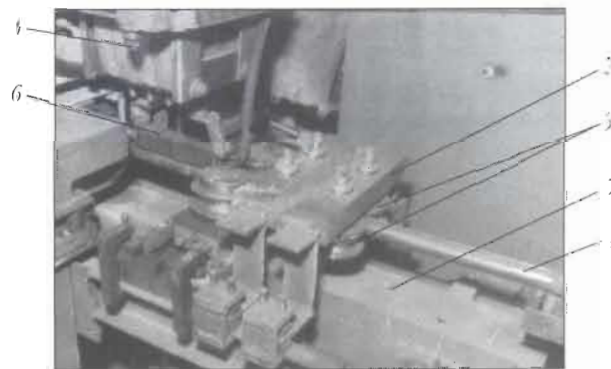


Рис. 1. Лабораторное оборудование для проведения экспериментов: 1 — высокочастотный трансформатор; 2 — валковая клетка; 3 — две пары валков; 4 — свариваемая труба; 5 — станина; 6 — индуктор



лирующей аппаратуры, силовых кабелей и коммуникаций.

Перемещение труб относительно индуктора, роликовых проводок и сварочного устройства (сварочной клетки) при сваркопайке происходит с помощью привода с плавной регулировкой скорости вращения приводного электродвигателя, имеющего пятиступенчатый диапазон регулирования скорости линейного перемещения трубы — от 1,2 до 6,4 м/мин.

Проводили измерение и регистрацию электрических параметров индукционного нагрева свариваемых кромок, тепловых параметров (температурные поля в поперечном сечении трубы), деформаций в зоне формирования соединения. Напряжение измеряли с помощью лампового вольтметра типа ВК7-9, а переменный ток частотой 2,5 и 8 кГц — с помощью электродвижущей силы пояса Роговского ламповым вольтметром типа ВУ-15 с коэффициентами чувствительности 834 и 260 А/В. Угол сдвига фаз определяли прибором типа Ф2-1.

Температурные поля регистрировали шестиканальным самописцем типа Н-303 I-6. Первичными преобразователями температуры служили хромель-алюмелевые термопары, зачеканенные в отверстия, расположенные по периметру свариваемой трубы, что позволяет оценить температурное поле в стенках и шве трубы как на этапе ее нагрева, так и охлаждения после сварки. Эксперименты проводили при различных скоростях перемещения трубы, мощности нагрева, зазорах между индуктором и зоной формирования прямолинейного сварного шва трубы. Проведена оценка влияния неточности расположения индуктора над трубой (несоосность и непараллельность установки индуктирующего проводника индуктора с осью трубы). Измерения в пяти поперечных сечениях трубы, расположенных вдоль оси индуктора, и регистрацию температурных полей выполняли также при постоянной мощности, расходуемой на нагрев, и статическом положении трубы под индуктором. Для обеспечения высокой точности измерений показания, снятые с каждой термопары, калибровались с помощью образцовой термопары

вместе с соответствующим каналом усилителя самописца.

Результаты металлографических исследований швов труб, полученных способом НПТ. Эксперименты проводили по сварке продольных швов на стальных трубах диаметром 33,5 мм с толщиной стенки 1,0...3,0 мм. Осадка кромок для стальных труб из стали 20 (ГОСТ 8737-78) размером 33,5×3,0 мм была подобрана экспериментальным путем. В опытах использовали стандартные припои типа ПАН-3 и П-87, а также флюс марки ПВ201.

Микроструктура металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), характерные для данного технологического процесса, представлены рис. 2.

Установлено, что механизм формирования шва при сваркопайке давлением заключается в следующем. При нагреве кромок труб активирующее вещество (припой и флюс) расплавляется, после чего поверхность стальной кромки растворяется в расплавленном припое, затем происходит обогащение жидкого припоя железом. При этом припой настолько сильно обогащается железом, что оно становится основным компонентом расплавленной металлической ванны.

Металл шва имеет двухфазную структуру. Ее можно идентифицировать как твердый раствор меди в железе, образовавшийся вследствие протекания растворо-диффузионных процессов с добавками легирующих элементов припоя — марганца, никеля, кремния (рис. 2, 3).

Металл шва отличается плотной мелкодисперсной дендритной структурой (рис. 2). В некоторых участках расплавленной зоны кристаллизация имеет направленный характер. Так, на рис. 2 хорошо видны иглы дендритов, ориентированные в направлении распространения потока тепла [5].

При исследовании партии образцов обнаружено, что вблизи границы шва со стороны основного металла трубы располагается белая ферритная полоска α -Fe, содержащая в твердом растворе легирующие элементы припоя ПАН-3 (рис. 3). Она возникла вследствие сегрегации из зазора легкоплавких составляющих припоя, а также ускорения процессов диффузии в условиях пластической де-

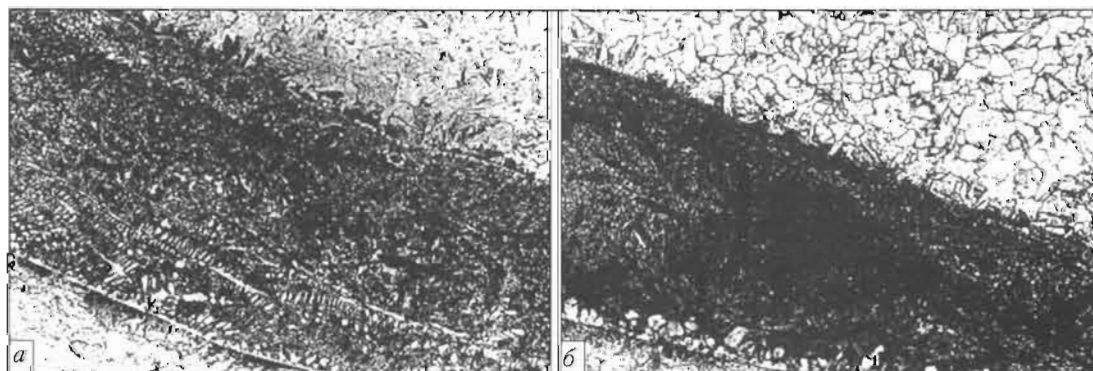


Рис. 2. Микроструктура металла сварного шва (а, $\times 400$) и ЗТВ (б, $\times 800$).

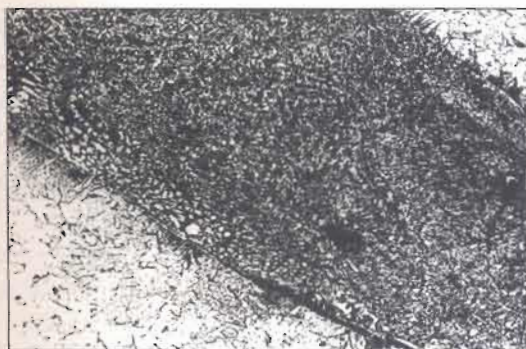


Рис. 3. Микроструктура ($\times 800$) участка соединения с ферритной полоской на границе раздела металла шва и ЗТВ

формации. В результате проведенных металлографических исследований установлено, что увеличение размеров зерен в металле ЗТВ не происходит, а благодаря наличию мелкого зерна в металле шва обеспечивается высокая прочность и пластичность паяных соединений [5, 6].

На рис. 4 представлена микроструктура металла швов с хорошим формированием, выполненных при степени осадки не менее 30 %.

Среди исследованных соединений есть образцы (рис. 4, а), в которых жидкая фаза отсутствует и существует лишь четкая линия раздела между стыкуемыми поверхностями, а также образцы (рис. 4, б), в которых жидкая прослойка полностью не удалена из зоны соединения и шов получен за счет кристаллизации расплавленного участка.

На основании изучения микрошлифов под микроскопом и полученных снимков можно заключить, что шов имеет хорошее формирование. Ни в одном из образцов опытной партии дефектов в виде трещин, пор, раковин обнаружено не было.

Результаты механических испытаний образцов, вырезанных из труб, показали, что их прочность на разрыв не меньше прочности основного металла (ОМ) — 416 МПа для стали 20, а угол загиба до разрушения составляет 180° .

Результаты исследования процесса сваркопайки продольных швов труб, полученных способом контактного нагрева (КН). Моделирование этого процесса выполняли с использованием оборудования линии для ВЧС труб диаметром 20...76 мм. С целью получения исходных данных для разработки специализированного сборочно-сварочного узла проведены эксперименты по сваркопайке труб диаметром 33,5 мм; при этом использовали стальную (Ст3) ленту толщиной 1,5 мм и шириной 100 мм. После формовки ленты в трубную заготовку перед сварочной клетью на кромки заготовки наносилось активирующее вещество — смесь флюса ПВ201 и припоя ПАН-3, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона. Связующим веществом был каучук, растворенный в бензине.

Необходимые термические циклы сваркопайки обеспечиваются установкой для индукционной сварки труб диаметром 20...76 мм.

При контактной сваркопайке (рис. 5) ток к кромкам трубы подводился через скользящие контакты 1 или расположенный в этом месте охватывающий трубную заготовку индуктор (на рисунке не показан).

При нагреве свариваемых кромок трубной заготовки проходящим электрическим током происходит нагрев активирующего вещества, предварительно нанесенного на кромки, которое в расплавленном состоянии взаимодействует с металлом кромок.

Нагрев свариваемых кромок продолжается до места схождения кромок, где начинается процесс сваркопайки. Как и при способе НПТ, расплавленное активирующее вещество при контакте с ОМ значительно обогащается железом. При этом ОМ трубной заготовки является основным компонентом расплавленной прослойки, образующейся на свариваемых кромках перед местом их схождения. Здесь при максимальной плотности тока формируется сварной шов. При этом под воз-

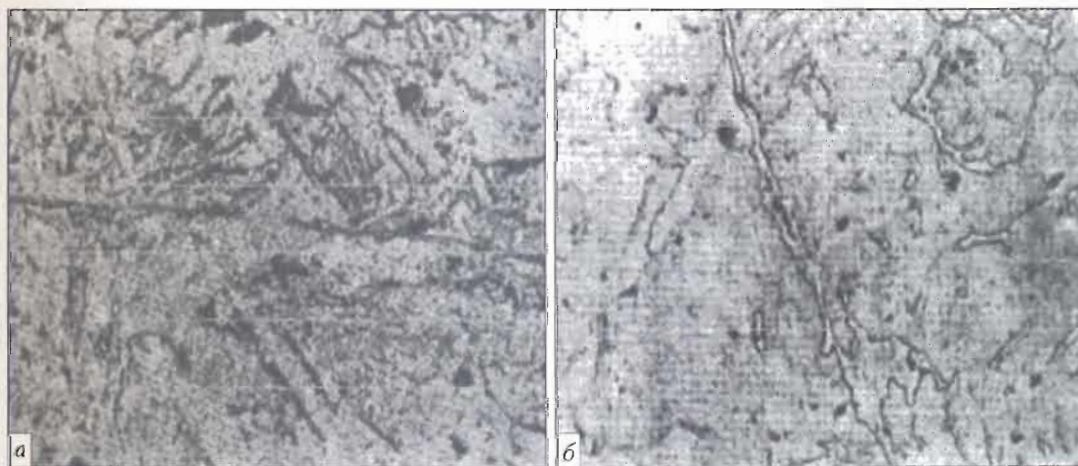


Рис. 4. Микроструктура участков металла шва с полным (а, $\times 320$) и неполным (б, $\times 100$) выдавливанием жидкой фазы из зоны соединения

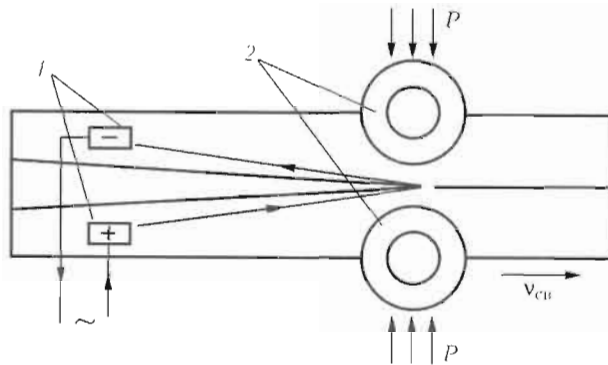


Рис. 5. Схема ВЧС с контактным подводом тока к кромкам трубы: 1, 2 — см. в тексте

действием сварочных валков 2 сначала происходит контактирование поверхностей кромок трубной заготовки, покрытых расплавленным активирующим веществом, а затем осадка кромок, которые омываются жидким активирующим веществом.

Приложение давления осадки P сварочными валками приводит к выдавливанию расплавленной прослойки на свариваемых кромках в грат, при этом туда же вместе с расплавленной прослойкой удаляются оксидные пленки и продукты активации свариваемых поверхностей. Выдавливание расплавленной прослойки происходит в плоскости схождения кромок трубной заготовки в трех направлениях — вверх, вниз и назад.

В формировании прямошовного сварного шва, которое начинается в месте схождения кромок, принимают участие смоченные расплавом прослойки и предварительно очищенные от оксидов и загрязнений поверхности трубной заготовки.

С целью эксперимента сваркопайку труб выполняли на различных режимах, отличающихся определенными соотношениями электрической мощности и скорости процесса.

В результате на различных режимах (табл. 1) с постепенным уменьшением удельной погонной энергии были сварены четыре участка труб. Степень деформации соединяемых кромок по толщине шва составляла от 40 до 55 %.

Металлографические исследования швов труб, полученных способом КН. Для проведения металлографического анализа были подготовлены четыре образца труб. Металлографические исследования шлифов сварных соединений с полирован-

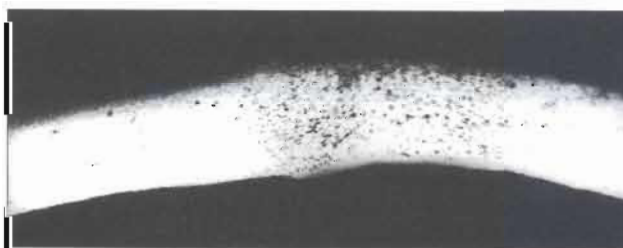


Рис. 6. Макрошлифы (X25) участка металла шва и ЗТВ в образце № 1

Таблица 1. Режимы сваркопайки экспериментальных образцов

№ образцов	Скорость сваркопайки, м/мин	Степень деформации, %
1	20	43
2	15	40
3	25	45
4	15	50

ной поверхностью показали, что трещины в металле шва отсутствуют. После травления трещины в металле шва также не обнаружены (рис. 6).

Измерения микротвердости осуществляли на приборе М-400 фирмы «Лесо». Шаг между точками измерения составлял 10 мкм.

В табл. 2 приведены результаты распределения микротвердости всех участков соединения.

Степень деформации соединения в плоскости шва составила 40...50 % (табл. 1). Она такая же, как и у стыковых соединений труб, выполненных способом сваркопайки [7–10]. Некоторое повышение твердости в определенных зонах металла шва связано с тем, что ввиду высокой (до 25 м/мин) скорости сваркопайки применяли интенсивное водяное охлаждение шва, при этом размер зерна металла шва был в 1,5...2,0 раза больше, чем ОМ [5].

Таким образом, установлено, что разработанная новая технология шовной индукционной сварки в твердой фазе труб (сваркопайка) может быть реализована двумя способами. Первый осуществляется способом НПТ; второй — путем комбинированного нагрева НПТ с КН торцов кромок труб на завершающем этапе процесса нагрева перед осадкой кромок. Оба способа сваркопайки обеспечивают хорошее качество формирования швов.

Активирующее вещество как физико-химический агент, способствующий соединению кромок, влияет не только на протекание длительных (для рассматриваемой технологии) растворо-диффузионных процессов, характерных для обычной пайки, но и обеспечивает очищение поверхности кромок. Это позволяет расширить класс припоев, которые могут быть применены для реализации технологии шовной сваркопайки изделий в твердой фазе.

Таблица 2. Микротвердость соединений, полученных при различных режимах сваркопайки

№ образца	HV 005			
	ОМ	Шов	ЗТВ	Грат
1	169	205	192	184
2	169	194	186	206
3	177	181	169	227
4	172	199	176	182

Процесс сваркопайки протекает в температурном интервале, определенном температурой плавления применяемых активирующих веществ. При сваркопайке продольных швов труб наилучшие результаты достигаются при тепловложении, обеспечивающем температуру этого процесса на 150...200 °С выше, чем температура плавления припоя, и степени пластической деформации кромок (40±10) %.

Исследования показали, что, как правило, при осадке не менее 30 % площади металла сформированного шва представляют собой образовавшиеся общие для обеих кромок зерна ОМ. При остывании и формировании шва также встречаются тонкие (менее 10 мкм) фрагменты невыдавленной закристаллизовавшейся прослойки, являющейся сплавом применяемого припоя, обогащенного ОМ кромок.

Проведенные испытания образцов на прочность при статическом растяжении показали, что она равна ОМ. Значения угла изгиба образцов свидетельствуют о высокой пластичности соединения. Способом сваркопайки можно получать соединения, имеющие высокие стабильные показатели ударной вязкости.

Из изложенного выше следует, что способ сваркопайки может быть положен в основу промышленной технологии производства металлических изделий не только из материалов, обычно соединяемых способом ВЧС, но и из новых ма-

териалов и марок сталей, особенно тех, которые претерпевают негативные изменения при превышении некоторых критических температур нагрева, а известные способы сварки или пайки не могут обеспечить необходимые условия для качественного формирования швов.

1. Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. — Л.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
2. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 328 с.
3. Шамов А. Н., Лукин И. В., Иванов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. — Л.: Политехника, 1991. — 240 с.
4. Pismenny A. S. High-frequency welding of metals. — Amsterdam: Harwood Acad. Publ., 1997. — 150 p. — (Welding and Surfacing Rev.; Vol. 7, pt 1).
5. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 416 с.
6. Шлыков А. А. Справочник термиста. — М.: Mashgiz, 1956. — 332 с.
7. Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С. Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 25–27.
8. Физическое моделирование осадки при сварке или пайке-сварке труб встык / В. К. Лебедев, А. С. Письменный, О. Г. Касаткин, М. Е. Шинлов // Там же. — 1993. — № 8. — С. 17–20.
9. Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С. Ударная вязкость стыковых соединений, паянных с пластическим деформированием основного металла // Там же. — 1993. — № 8. — С. 29–31.
10. Письменный А. С., Шинлов М. Е., Бурженецкий А. И. Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента // Там же. — 1995. — № 12. — С. 35–38.

The procedures for studying the processes of braze-welding of longitudinal welds of pipes by the method of contact heating and heating of the edges being welded by electric current passing along them are presented. The results of metallographic investigations of pipe welds produced by these methods are given.

Поступила в редакцию 22.02.2007.
в окончательном варианте 14.05.2007

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

Разработана порошковая проволока ПП-Нп-30Х20МН и технология электродуговой наплавки штоков гидроцилиндров различных механизмов и машин — крепей шахтных проходческих комбайнов, карьерных автосамосвалов и т. д.

Штоки гидроцилиндров изготавливают из сталей типа 30Х и для защиты от коррозии их рабочую поверхность хромируют. По предложенной технологии наплавка изношенных штоков может производиться после предварительной механической обработки рабочей поверхности или непосредственно по хромовому гальваническому покрытию.

Штоки наплавляются в один слой под флюсом АН-26П. Разработанная порошковая проволока обеспечивает получение наплавленного металла системы легирования Fe-Cr-Ni-Mo, обладающего высокой коррозионной стойкостью в первом наплавленном слое. Шлифовка наплавленной поверхности обеспечивает необходимую чистоту, а высокая коррозионная стойкость наплавленного слоя исключает операцию хромирования. Имеется опыт наплавки штоков диаметром 70 мм и выше.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11,
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 2
Тел./факс: (38044) 287 63 57
E-mail: ryabtsev@paton.kiev.ua

итальных
ень
ции, %

ы в ме-
решины
с. 6).
ляли на
ду точ-
деления
ия.
ости шва
е, как и
х спосо-
не твер-
связано
скорости
е охлаж-
шва был

работан-
свар-
ет быть
сущест-
комби-
кромки
ева пе-
копайки
ования

мичес-
кромки,
ых (для
диффу-
обычной
жности
рипов,
изации
в твер-

ученных
Грат
184
206
227
182