

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОГО СОЕДИНЕНИЯ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

**С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Б.И. КАЗЫМОВ, В.Ф. ЗАГАДАРЧУК, А.В. ДИДКОВСКИЙ**  
ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Современные трубопроводные системы рассчитаны на высокие рабочие давления. При строительстве таких систем применяют трубы с толщиной стенки до 40 мм. Для соединения таких труб разрабатываются новые более эффективные методы, в том числе комбинированные. Технология комбинированной сварки предусматривает сварку корневого и заполняющих швов различными методами. Для повышения темпов строительства и качества сварки предлагается корневой шов сваривать контактной сваркой оплавлением, а заполняющие слои электродуговой автоматической сваркой. Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования соединений, выполненных контактной сваркой оплавлением корневых швов при сварке труб с толщиной более 20 мм с различной разделкой кромок, а также исследование качества соединений корневых швов и комбинированных соединений. Проведено исследование влияния разделки кромок на процесс сварки и формирование соединения в условиях повышенного отвода тепла из зоны сварки при оплавлении. Разработана технология контактной сварки корневых швов неповоротных стыков толстостенных труб из высокопрочных сталей, совмещенная с электродуговой сваркой. Определены оптимальные параметры режимов контактной сварки оплавлением при различной толщине выступов разделки корневых швов. Установлен уровень влияния электродуговой сварки на свойства корневых швов, в том числе на повышение вязких свойств сварных соединений. Проведены всесторонние механические испытания соединений корневых швов, выполненных контактной сваркой оплавлением и в сочетании с электродуговой сваркой, свидетельствующие о практической их равнопрочности с основным металлом. Такой комбинированный процесс позволит значительно упростить и ускорить процесс сборки и сварки корневого шва, который предопределяет производительность всего процесса сварки неповоротных стыков. При этом обеспечивается высокая надежность качества корневых швов и всего соединения. Библиогр. 14, рис. 8.

*Ключевые слова:* контактная сварка оплавлением, электродуговая сварка, толстостенные трубы, разделка кромок, неповоротные стыки, корневой шов, комбинированное соединение, технологический зазор, теплоотвод, параметры сварки, распределение температуры, механические испытания

В современных энергетических системах, в том числе и в газотранспортных, рассчитанных на высокие давления, широко используются трубопроводы, сооружаемые из толстостенных труб, изготовленных из высокопрочных сталей [1, 2]. Соединение таких труб представляет собой трудоемкую и ответственную операцию, которая выполняется в полевых условиях, как правило, электродуговой сваркой (ЭДС) высококвалифицированными специалистами. Для электродуговых технологий сварки необходима специальная подготовка торцов труб перед сваркой — изготовление разделки кромок, от геометрической формы и размеров которой во многом зависит качество и механические свойства соединений (рис. 1) [1, 3].

Наиболее сложной и ответственной технологической операцией ЭДС труб является сварка корневого шва. Опыт применения сварки неповоротных стыков различных трубопроводов свидетельствует о том, что большая часть дефектов, выявляемых в них при неразрушающем контроле приходится на корневые швы. Весьма перспективными

для сварки неповоротных стыков толстостенных труб являются комплексы орбитальной электродуговой сварки в среде защитного газа компании CRC-Evans AW. Отличительной особенностью этой технологии являются жесткие требования к геометрическим параметрам разделки и сборки труб перед сваркой, обеспечивающие при сварке требуемую величину зазоров. При этом первую технологическую операцию — сварку корня шва выполняют отдельной установкой с использованием сварочных материалов, отличающихся от используемых для заполнения разделки кромок. Размеры корневой части разделки контролируются шаблоном и должны находиться в пределах десятых долей миллиметра. При этом не всегда удается достигнуть таких же высоких требований по уровню сборки тяжеловесных и крупногабаритных труб перед сваркой на отсутствие недопустимых зазоров и смещений между ними при монтаже в полевых условиях.

Многолетний опыт применения контактной сварки оплавлением (КСО) различных трубопроводов диаметром 114...1420 мм с толщиной



стенки 5...20 мм свидетельствует о высокой эксплуатационной надежности сварных соединений труб, выполненных КСО в различных климатических условиях, в том числе районах Крайнего Севера, при строительстве различных трубопроводов [4, 5]. За последние десятилетия таким способом сварено около 50 тыс. км трубопроводов, которые успешно эксплуатируются. Промышленностью освоен выпуск оборудования для КСО труб, в частности, сварочных машин К584 для труб диаметром 114...325 мм с толщиной стенки 5...14 мм, а также машин типа К830 и К700 для труб диаметром 1220 и 1420 мм с толщиной стенки 12,7...20 мм.

Для сварки труб с большей толщиной стенки (более 20 мм) требуется новое поколение сварочных машин, что связано прежде всего с увеличением их установленной электрической мощности

и усилия осадки. Проекты таких машин разработаны в ИЭС им. Е.О. Патона. Для их промышленной реализации необходимы соответствующие заказы и потенциальные объемы производства.

Наряду с этим, учитывая имеющийся парк машин для КСО труб, представляется целесообразным использовать их для реализации технологии комбинированной сварки, объединяющей два технологических процесса: сварку корневого шва КСО и последующее заполнение оставшейся разделки кромок ЭДС [6]. Этот метод позволяет значительно упростить и ускорить процесс сборки и сварки корневого шва, который предопределяет производительность сварочных работ неповоротных стыков труб. При этом обеспечивается высокая надежность качества корневых швов и всего комбинированного соединения. Для выполнения корневых швов толстостенных труб может быть использован весь имеющийся парк машин для КСО без его существенной реконструкции.

Для КСО корневого шва необходимо на торцах труб с заводской (стандартной) разделкой кромок (рис. 1, а) выполнить специальную разделку (рис. 1, б). Заводская (стандартная) разделка на торцах труб, поставляемых на трассу, может переделываться в полевых условиях под разные методы ЭДС [3] с целью экономии сварочных материалов. Параметры разделки зависят от толщины стенки труб и способа сварки как корневого, так и заполняющих слоев дуговых швов. При выполнении разделки стремятся уменьшить количество удаляемого металла труб. Для сравнения на рис. 1, в приведена схема разделки торцов в состоянии сборки труб для сварки по методу CRC-Evans AW.

Параметры разделки для КСО корневых швов толстостенных труб могут изменяться в широких пределах и значительно отличаться от параметров разделок известных методов ЭДС. Это позволяет при сварке комбинированных соединений минимизировать энергозатраты при подготовке и сварке труб, повысить производительность работ, снизить расход сварочных материалов для ЭДС, стоимость которых в 2...3 раза превосходит стоимость материала труб. Последнее особенно важно при строительстве трубопроводов в отдаленных районах, когда для ЭДС приходится доставлять большое количество сварочных материалов.

Целью настоящей работы является разработка технологии КСО корневых швов при строительстве трубопроводов с толщиной стенки более 20 мм, а также исследование качества, определение механических свойств корневых швов и комбинированных соединений.

Исследование технологии сварки корневых швов выполняли на секторах шириной 100...200 мм из

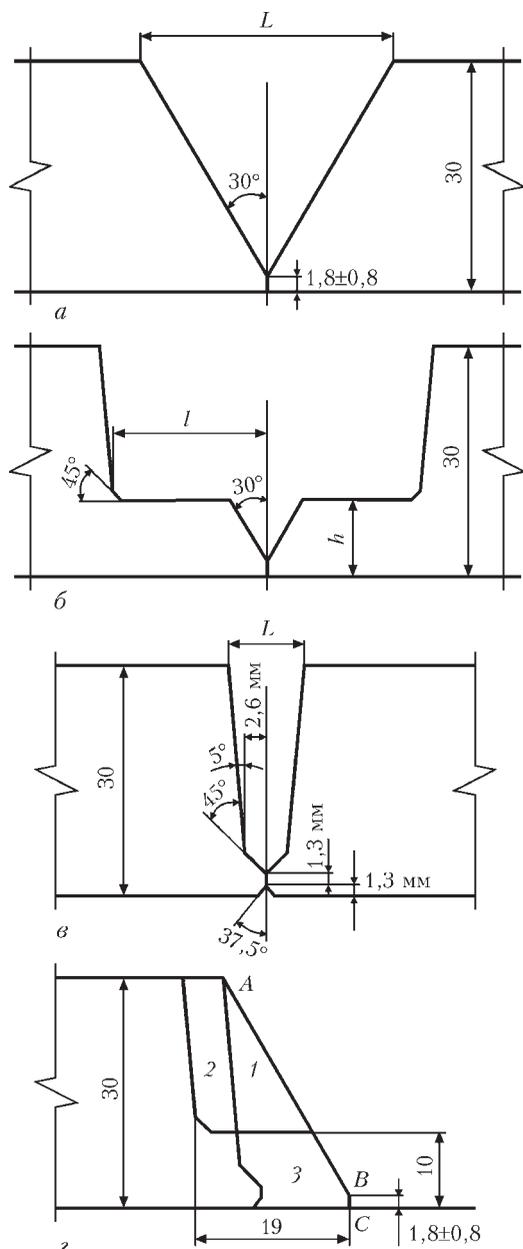


Рис. 1. Схемы разделки кромок: для ручной электродуговой сварки (а); КСО (б); CRC (в); совмещенные схемы (z)

труб диаметром 219×20 и 325×25 мм из углеродистой стали и толстостенных труб современного производства диаметром 1219×27 мм стали 10Г2ФБ. Для отработки режима сварки корневых швов толщиной 6...12 мм использовали также пластины из стального проката углеродистых сталей толщиной до 30 мм. Сварку секторов и пластин выполняли на лабораторной установке с программным управлением основными параметрами режима [7]. Для апробации режимов сварки были взяты трубы диаметром 219×20 мм из стали 20Г. Трубы сваривали на машине К584 с использованием программы, по которой основные параметры изменялись в функции перемещения, что позволяло выполнять заданные припуски на оплавление и осадку с точностью ±0,5мм.

Качество исследуемых стыков оценивали по результатам механических испытаний, которые проводились в соответствии с действующими стандартами, а также по результатам металлографического анализа соединений и фактографических исследований изломов образцов, специально разрушенных по корневому шву.

Для КСО корневого шва на торцах труб выполняли разделку кромок с параметрами выступов  $h$  и  $l$  как показано на рис. 1, б. Разделку изготавливали за счет уменьшения толщины стенки трубы со стороны наружной поверхности трубы. Для этих целей применяют стандартное оборудование — мобильные кромкострогальные агрегаты. После сварки выступов образуется корневой шов. Схема корневого шва, выполненного КСО, показана на рис. 2, а. После получения соединения необходимо удалить усиление корневого шва и наплывы металла и заполнить оставшуюся часть разделки ЭДС.

При определении геометрических размеров разделки кромок под КСО труб следует учитывать, что с уменьшением толщины выступов увеличивается объем механической обработки торцов, а также объем разделки для ее заполнения ЭДС.

На рис. 1, г представлена для сравнения схема разделок труб с толщиной стенки 30 мм для комбинированных технологий сварки. Аналогом для сравнения выбраны разделки: заводская — обозначена контуром А–В–С (рис. 1, г) и по технологии CRC (рис. 1, в). Части кромок, удаляемые при различных методах сварки, обозначены 1, 2 и 3. Для КСО корневых швов  $h = 6...7$  мм удаляется участок 1, а при сварке  $h > 7$  мм участок 1+2. При CRC соответственно участки 1+3. Из сравнения участков 2 и 3 видно, что участок 2 по площади примерно равен участку 3. Следовательно, трудоемкость подготовки кромок при КСО не превышает объема работ CRC.

В процессе исследований параметры разделки изменяли в интервале  $h = 6...12$  мм, а  $l = 10...22$

мм. При этом во всех случаях ширина разделки кромок  $L$  (рис. 2, а) по наружной поверхности труб оставалась равной заданному размеру для выполнения заполняющего шва ЭДС.

При КСО выступы разделки укорачиваются на величину припуска на сварку  $\Delta_{св} = \Delta_{опл.} + \Delta_{осад.}$  (припуски на оплавление и осадку). При выборе величины параметра разделки  $l$  необходимо учитывать не только припуск на сварку, но и особенности образования соединения КСО, когда при осадке на поверхности корневого шва между кромками разделки формируется усиление. На рис. 2, а представлена схема соединения, полученного при оптимальном соотношении указанных

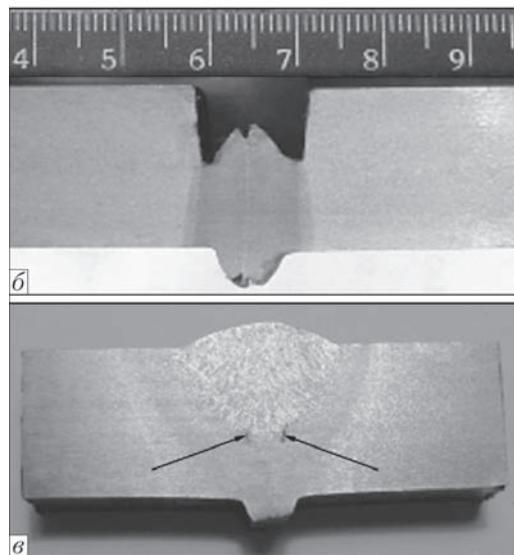
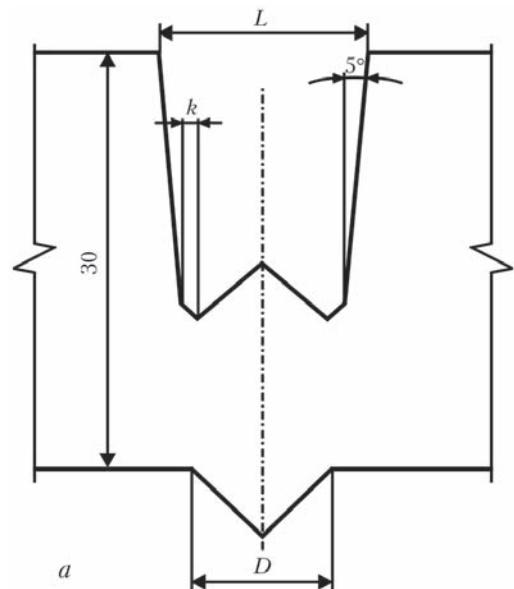


Рис. 2. Схема и макрошлиф соединений: а — схема корневого шва, выполненного на оптимальном режиме КСО ( $D$  — ширина усиления;  $L$  — расстояние между кромками по наружной поверхности;  $k$  — технологический зазор между кромками и усилением); б — макрошлиф корневого шва; в — макрошлиф комбинированного соединения при нарушении параметров режима сварки (стрелками показано несплавление металла шва)

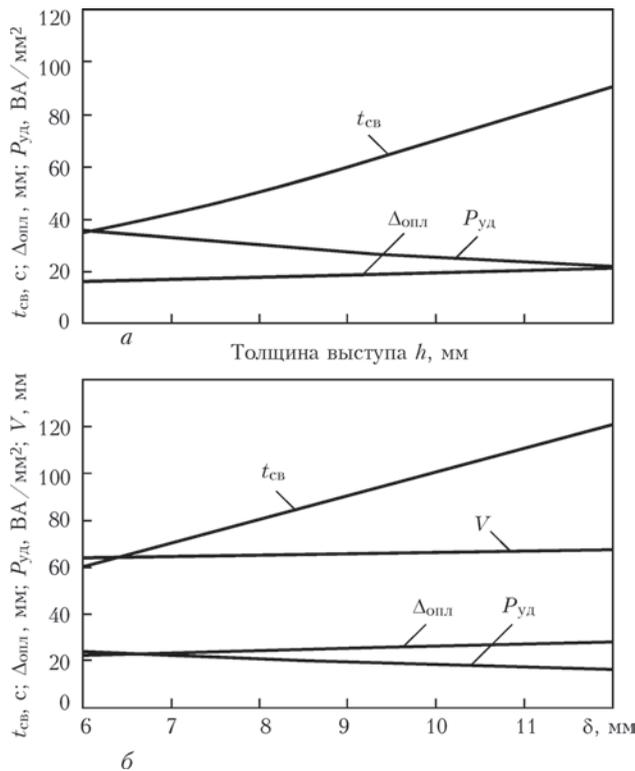


Рис. 3. Зависимость параметров сварки от толщины выступов  $h$  (а); толщины стенки труб (б), где  $t_{св}$  — длительность процесса сварки;  $\Delta_{опл}$  — припуск на оплавление;  $P_{уд}$  — удельная мощность в конечный период оплавления;  $V$  — величина вылета кромок из токоподводящих зажимов

параметров с учетом размера усиления. При нарушении этого требования происходит сжатие усиления с наплывами окисленного металла кромками разделки. После удаления верхней части усиления с наплывами металла, особенно при визуальной оценке зачистки сварного соединения и готовности разделки к заполнению ЭДС, может появиться ложное представление о полном удалении усиления. В действительности между кромками разделки и оставшейся частью усиления появятся зажатые прослойки окисленного металла, которые трудно переплавить ЭДС при заполнении разделки. Макроструктура комбинированного соединения с прослойками окисленного металла в корневом шве представлена на рис. 2, в. Для того, чтобы гарантировать образование качественного соединения без подобного дефекта, между усилением и кромками разделки должен быть предусмотрен технологический зазор  $k$  (рис. 2, а).

Экспериментальным путем установлено, что при сварке корневых швов с параметром разделки  $h = 6 \dots 12$  мм технологический зазор  $k$  должен быть  $1,5 \dots 2$  мм. Таким образом, параметр разделки  $l$  перед КСО толстостенных труб с толщиной стенки  $\delta > 20$  мм определяется зависимостью:  $l = \Delta_{св}/2 + D/2 + k$ , где  $D$  — ширина усиления корня шва. Поскольку нашими исследованиями установлено, что  $D/2 + k \sim h/2$ , то параметр выступов раздел-

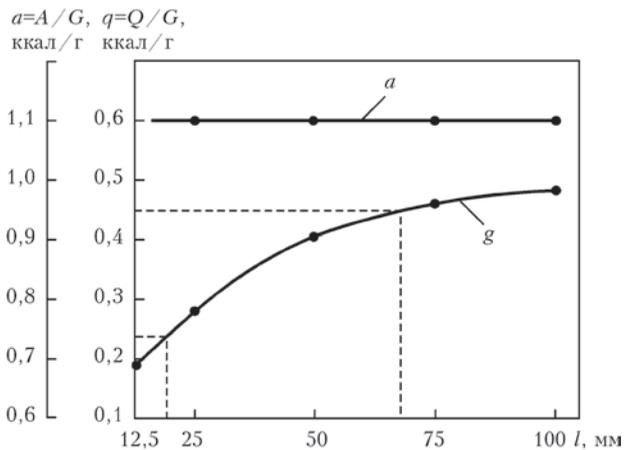


Рис. 4. Зависимость удельного количества накопленной (g) и израсходованной (a) энергии от величины вылетов при сварке секторов толщиной 10 мм

ки  $l = \Delta_{св}/2 + h/2$ , где  $h$  — толщина выступа в разделке кромок.

При определении оптимальных режимов КСО труб с различными параметрами разделки торцов необходимо, прежде всего, учитывать комплексное влияние толщины выступов  $h$  на основные показатели процесса оплавления. Как видно из графика рис. 3, а с увеличением параметра  $h$  возрастает длительность процесса сварки и припуск на оплавление, снижается удельная потребляемая мощность. При сварке толстостенных труб с разделкой кромок на идентичных режимах формирование соединения будет происходить в условиях более интенсивного теплоотвода из зоны сварки в тело толстостенной трубы. Конфигурация торцов труб с разделкой создает условия нагрева, которые имеют место при сварке труб с уменьшенными вылетами. В первом случае тепло отводится в массивные объемы металла, во втором — в токоподводящие зажимы. На рис. 4 показана зависимость количества накопленного в зоне нагрева тепла от величины вылетов из зажимов сварочной машины при оплавлении секторов труб с толщиной стенки  $\delta = 10$  мм, полученная калометрированием оплавленных образцов. Уменьшение вылетов секторов при сварке в 3,5 раза привело к увеличению потерь энергии на 45...50%. Приведенные данные относятся к условиям нагрева при оплавлении секторов, когда теплоотвод в зажимы происходит с двух сторон. Эти потери меньше при одностороннем теплоотводе при сварке труб, но они могут существенно влиять на формирование соединений при минимальных расстояниях от зажимов до зоны сварки.

Данные, приведенные на графике рис. 3, б, соответствуют режимам КСО труб с толщиной стенки  $6 \dots 12$  мм на машинах К584. Например, при сварке труб толщиной 10 мм без разделки, как видно из графика рис. 3, б, величина вылетов из зажимов

должна быть не менее 68 мм, что в 3,5 раза превышает длину выступов  $l$  разделки при  $h = 10$  мм.

На рис. 5 (кривая 1) приведено распределение температуры на участке протяженностью 12 мм от поверхности оплавления при сварке труб диаметром 219 мм с толщиной стенки  $\delta = 10$  мм на нормативном режиме (расстояние между токоподводящими зажимами 68 мм,  $t_{св} = 95$  с), обеспечивающем качественную сварку.

Кривая 2 на рис. 5 характеризует распределение температуры на том же участке зоны термического влияния (ЗТВ) образцов толстостенных труб с толщиной стенки  $\delta > 20$  мм с параметрами разделки кромок  $h = 10$  мм и  $l = 19$  мм. Температура на исследуемом участке ниже на 100...150 °С. При испытаниях стандартных образцов из этих соединений на изгиб показатели были нестабильны. В отдельных образцах имели место трещины по зоне соединения.

Потери на теплоотвод в определенной степени могут быть компенсированы за счет повышения интенсивности источника нагрева при оплавлении в различные его периоды, предусмотренные программой.

Ужесточение режимов сварки при всех исследуемых толщинах выступов также приводит к увеличению удельных давлений, необходимых для получения качественных соединений. Поэтому при создании специализированного оборудования для комбинированной сварки нельзя рассчитывать на существенное снижение мощности и его массы по крайней мере для принятого соотношения размеров выступов разделки. С увеличением длины выступов  $l$  режимы сварки труб будут приближаться к принятым для соответствующих толщин стенок труб без разделки и снижение энергетических показателей будет более ощутимым.

Следует отметить, что при оптимизации формы разделки для комбинированной сварки энергетические показатели оборудования не являются доминирующими. Сокращение времени сварки корневого шва до 1...2 мин независимо от диаметра труб позволяет повысить производительность общего технологического потока при строительстве трубопроводов.

При определении оптимальной толщины  $h$  выступов разделки весьма существенным показателем является толерантность принятой технологии к точности сборки труб перед сваркой. С увеличением толщины выступов разделки смещения кромок и влияние величины зазора между ними в меньшей степени влияют на качество соединений и допустимые отклонения могут быть шире. С этой точки зрения толщины выступов в пределах 8...12 мм представляются наиболее приемлимыми.

В результате проведенных исследований разработаны режимы сварки толстостенных труб диаметром 219 мм с толщиной стенки  $\delta = 20$  мм с разделкой кромок на машине K584. При этом толщина выступов разделки изменялась в пределах 6...12 мм, а размер  $L$  разделки оставался неизменным, равным заданному значению. На графиках рис. 3, а приведены оптимальные значения основных параметров сварки на жестких режимах, обеспечивающих качественные соединения при различной толщине выступов. Оптимальный режим характеризуется повышенной удельной мощностью (30 %), меньшим временем сварки (на 20...40 %) и меньшим припуском на сварку (на 20...30 %), чем рекомендуемый для труб с такими же толщинами стенок. Такие соединения отличаются узкой зоной термического влияния, величина которой не превышает параметра разделки  $l$ . Макрошлиф такого соединения с параметром разделки  $h = 10$  мм показан на рис. 2, б.

Распределение температуры в зоне нагрева при сварке на таких режимах корневых швов толщиной 10 мм приведено на рис. 5, кривая 3. Сравнение кривых 2 и 3 показывает, что повышение концентрации нагрева за счет увеличения мощности на всех этапах сварки позволило получить в приконтактных участках распределение температуры, необходимой для формирования качественных соединений (рис. 5, кривая 3).

Всесторонние механические испытания корневых швов всех исследуемых толщин, выполненных на оптимальных режимах, подтвердило высокое качество соединений.

Соединения корневых швов низколегированной стали группы прочности X70, выполненных на оптимальных режимах, показали высокие и стабильные результаты. Образцы на разрыв разрушались по корню, включающему в основном всю

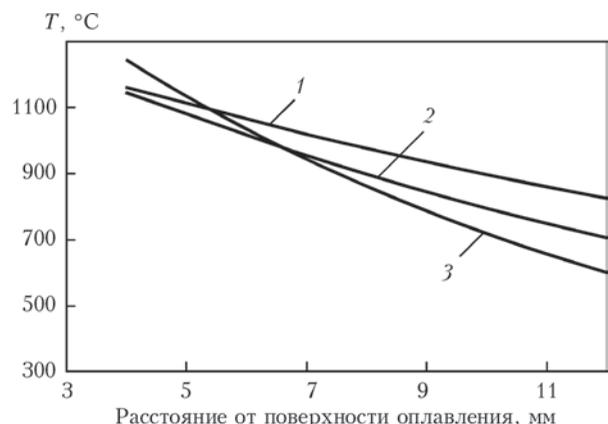


Рис. 5. Линейное распределение температуры при сварке трубы диаметром 219×10 мм на регламентированном режиме (кривая 1); корневого шва ( $h = 10$  мм) трубы диаметром 219×20 мм на регламентированном режиме (2); корневого шва ( $h = 10$  мм) трубы диаметром 219×20 мм на оптимальном режиме (3)

зону сварки (рис. 6, а). Разрушающие напряжения находились в пределах  $\sigma_p = 640 \dots 657$  МПа, что выше прочности металла труб  $\sigma_{вр.м.тр.} = 610$  МПа. Это объясняется тем, что пластическая деформация сосредоточена в узкой зоне корневого шва с малым поперечным сечением, что приводит к механическому упрочнению металла всех участков корня.

После разрушения образцы имели изломы, которые определяются как вязкие, что свидетельствует о пластичности корневого шва. Эти данные подтверждаются испытаниями корневых швов на загиб. Ввиду малой протяженности деформируемого участка (корневого шва), расположенного в разделке кромок, в металле возникают большие напряжения. Несмотря на столь жесткие испытания, образцы имели угол изгиба  $180^\circ$  без трещин в зоне сварки (рис. 6, б). Прочность корневых швов на трубах стали 20 имели  $\sigma_p = 534 \dots 559$  МПа, а прочность металла труб  $\sigma_{вр.м.тр.} = 518$  МПа.

Поверхности изломов корневых швов, разрушенных при испытаниях на разрыв, имели однородный развитый рельеф, без дефектов сварки.

Следующим этапом проведенных исследований являлось изучение свойств комбинированных соединений. Комбинированные соединения получали путем заполнения образующейся в результате сварки корневого шва разделки ручной ЭДС. Перед наплавкой в разделке кромок удаляли усиление и наплывы металла соединения КСО.

Наплавку проводили электродами УОНИ-45/55 на режимах, рекомендованных для сварки стальных изделий. Все соединения показали высокие свойства, отвечающие требованиям нормативных документов [3, 8]. На рис. 7 представлены ма-

крошлиф и образцы после испытаний на разрыв и изгиб. Прочность и пластичность соединений соответствует аналогичным показателям металла труб. Разрывные образцы разрушались за зоной сварки по металлу труб. Изогнутые образцы при углах  $180^\circ$  не имели трещин.

При заполнении разделки кромок ЭДС металл корневого шва испытывает тепловое воздействие, которое по своей природе проявляется как термическая обработка. Измерения температуры металла в контрольных точках вдоль шва на стороне поверхности под разделкой кромок показали, что ее значения на элементарном участке при различных условиях ЭДС может быть в диапазоне температур от  $600$  до  $1150$   $^\circ\text{C}$ .

Эффективность теплового воздействия различных режимов ЭДС на свойства комбинированных соединений оценивали по показателям ударной вязкости. Ударную вязкость КСВ определяли на стандартных образцах с острым надрезом. Надрез изготавливали по толщине стенки трубы. При этом доля соединения КСО составляла  $30 \dots 50$  %. Такие образцы в наибольшей мере определяют вязкие свойства соединений с различным состоянием металла комбинированного шва, одна часть которого выполнена КСО без литого металла, другая — ЭДС с литым металлом.

Результаты исследований показали заметное воздействие на металл корневых швов термического цикла ЭДС при температурах выше критической точки  $A_{C3}$ , т. е. при температурах нормализации. Такой способ термообработки рекомендуется для повышения показателей ударной вязкости соединений КСО [9, 10].

При наплавке корневого шва толщиной  $6 \dots 10$  мм длительность пребывания металла при температурах  $900 \dots 1150$   $^\circ\text{C}$  на отдельных участках шва, независимо от его толщины, была в пределах  $T_{нагр.} = 20 \dots 30$  с. В результате такого разброса параметров термического воздействия наблюдается большая разница между максимальными и минимальными показателями ударной вязкости на одном и том же сварном шве. Ударная вязкость образцов соединений стали 20 составляла: при температуре  $+20$   $^\circ\text{C}$  —  $(62 \dots 142)/83$  Дж/см<sup>2</sup>, при  $-20$   $^\circ\text{C}$  —  $(20 \dots 51)/39$  Дж/см<sup>2</sup>. Металл труб стали 20 при  $-20$   $^\circ\text{C}$   $(23 \dots 49)/40$  Дж/см<sup>2</sup>. Соединения трубной стали 10Г2ФБ показали ударную вязкость при  $+20$   $^\circ\text{C}$  —  $(96 \dots 206)/114$  Дж/см<sup>2</sup>, при  $-20$   $^\circ\text{C}$   $(20 \dots 49)/42$  Дж/см<sup>2</sup>. При отрицательной температуре появляются единичные образцы, которые имеют показатели ниже минимально требуемых значений. Однако они не оказывают отрицательного влияния на эксплуатационные свойства сварных соединений труб полного сечения. Об

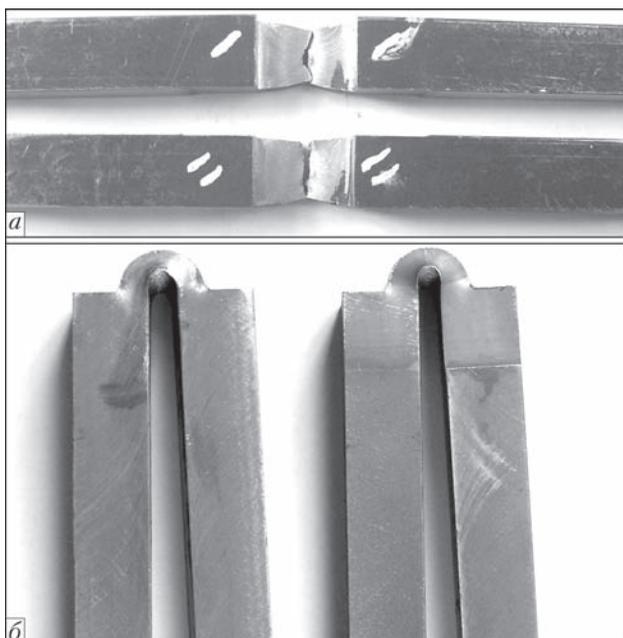


Рис. 6. Образцы соединений стали 10Г2ФБ с корневым швом после испытаний на растяжение (а) и загиб (б)

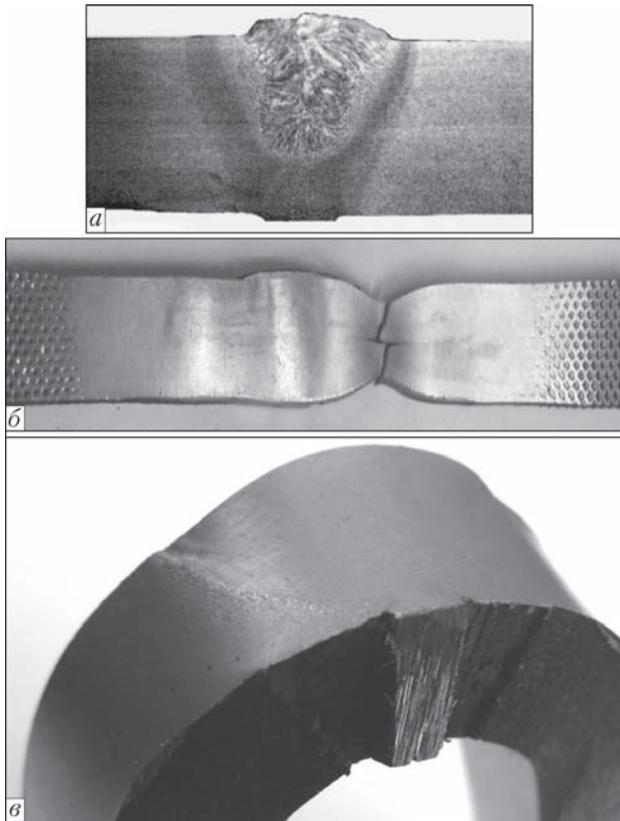


Рис. 7. Образцы комбинированных соединений: макрошлиф (а), после испытаний образцов на разрыв (б) и загиб (в)

этом свидетельствуют результаты приведенных исследований [11, 12].

Термическое воздействие ЭДС повышается с увеличением длительности пребывания металла при температурах нормализации путем наплавки на первый наплавленный слой последующих горячих слоев. В этом случае металл корневого шва подвергается циклическому термовоздействию (рис. 8). Например, при ручной ЭДС время пребывания элементарного участка шва при температурах нормализации за первый цикл было 20 с. Суммарное время двух циклов составило 45 с, а с учетом третьего цикла время увеличилось до 80 с. В результате средние показатели ударной вязкости увеличились на 8...14%. При этом между первым–вторым и вторым–третьим циклами были технические перерывы (для удаления шлака) длительностью 90 с. Соединения стали Х70 имели 46...48 Дж/см<sup>2</sup> при отрицательной температуре –20 °С.

В комбинированных соединениях с корнем толщиной 12 мм длина участков, не подвергнутых термическому воздействию, увеличивается. В результате возрастает количество образцов с минимальными показателями.

При ручной ЭДС характерна неравномерность теплового воздействия. О нем можно судить по глубине проплавления корневого шва. На участке протяженностью 120 мм при толщине корня 10 мм проплавление было в пределах 0,2...3,0 мм.

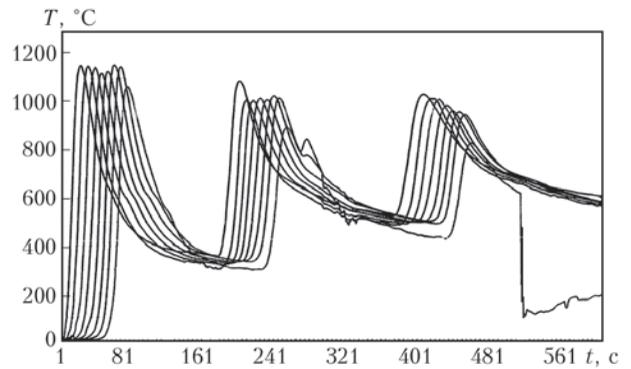


Рис. 8. Распределение температуры в корне шва при заполнении разделки ЭДС

Следует обратить внимание на то, что большая разница между минимальными и максимальными значениями отдельных образцов может быть вызвана не только неравномерным термовоздействием на металл корневого шва, но и объективно существующими свойствами ударных испытаний сварных соединений независимо от метода их сварки, когда во многих случаях происходит разброс показателей [13, 14].

Сочетание контактного и электродугового швов оказывает взаимное положительное влияние на свойства соединений. С одной стороны в контактном шве нет литого металла и, соответственно, в нем отсутствует ряд дефектов, свойственных ЭДС. В то же время под действием ЭДС корневой шов подвергается термической обработке. Иногда она оказывается недостаточно полной при отрицательных температурах испытаний, но в любом случае способствующей повышению вязких свойств металла сварного соединения.

## Выводы

Разработана базовая технология КСО утолщенных корневых швов неповоротных стыков толстостенных труб диаметром 219...325 мм с толщиной стенки более 20 мм из углеродистой и высокопрочной стали.

Определены оптимальные геометрические размеры разделки кромок торцов при КСО толстостенных труб.

Определены оптимальные параметры режимов КСО корневых швов толстостенных труб.

Проведены всесторонние механические испытания корневых швов и комбинированных соединений, свидетельствующие о их равнопрочности с металлом труб.

Установлено положительное влияние тепловложения при заполнении разделки шва ЭДС на вязкие свойства металла корневого шва, выполненного КСО.

Определены энергетические показатели оборудования, необходимого для КСО корневых швов



толщиной 6...12 мм с использованием имеющегося парка машин для контактной сварки оплавлением труб.

1. *Формирование* технических требований к сварным соединениям газопроводов из высокопрочных сталей применительно к МГ Бованенково-Ухта / Е.М. Вышемирский, В.И. Беспалов, Д.Г. Будревич, А.А. Латышев // Сб. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», 27–28 окт. 2009 г. – С. 312–321.
2. *Козлов В.В.* Организация и проведение мероприятий по обеспечению качества сварочных работ при строительстве системы магистрального трубопровода Сахалин–Хабаровск–Владивосток: Сб. докл. отраслевого совещания ОАО «Газпром». – ООО «Газпромэкспо». – М.: 15–19 ноября, 2010 г. – С. 108–112.
3. *СТО Газпром.* Инструкция по сварке магистральных трубопроводов с рабочим давлением до 9,8 МПа. – Введ. 22.09.2007.
4. *Патон Б.Е., Лебедев В.К., Кучук-Яценко С.И.* Комплекс «Север – 1» для контактной стыковой сварки неповоротных стыков труб больших диаметров // Автомат. сварка. – 1979. – № 11. – С. 41–45.
5. *Мазур И.И., Серафин О.М., Карпенко М.П.* Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Стр-во трубопроводов. – 1989. – № 4. – С. 8–11.
6. *Пат. 222998 РФ.* Способ сварки труб при изготовлении трубопроводов / В.И. Хоменко, С.И. Кучук-Яценко, Б.И. Казымов, В.Ф. Загадарчук, К.П. Биковец. – Опубл. 27. 02. 2003 г., Б. № 14.
7. *Кучук-Яценко С.И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
8. *API Standart 1104.* Welding of Pipelines and Related Facilities ASME Boiler and Pressure Vessel, 19ed, 1999.
9. *Ускоренная* индукционная термообработка сварных швов труб из сталей контролируемой прокатки / А.С. Письменный, М.Е. Шинлов, С.И.Кучук-Яценко и др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 3. – С. 9–13.
10. *Технология* термической обработки соединений труб из стали класса прочности K56, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением // С.И. Кучук-Яценко, Ю.В. Швец, В.Ф. Загадарчук и др. / Там же. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
11. *Особенности* испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В.И. Кирьян, Б.И. Казымов и др. // Там же. – 2008. – № 10. – С. 5–11.
12. *Кирьян В.И., Кучук-Яценко С.И., Казымов Б.И.* О требованиях к ударной вязкости соединений трубопроводов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением // Там же. – 2015. – № 2. – С. 3–7.
13. *Кирьян В.И., Семенов С.Е.* Оценка соответствия целевому назначению сварных соединений магистральных трубопроводов из микролегированных сталей // Там же. – 1995. – № 3. – С. 4–9.
14. *К методологии* контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В.И. Кирьян, Б.И. Казымов, В.И. Хоменко // Там же. – 2006. – № 10. – С. 3–9.

Поступила в редакцию 01.07.2015

## Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»

13–15 июня 2016 г.

Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

### Тематика конференции:

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

### Организационный комитет:

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com  
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016  
www.patonpublishinghouse.com