



## УСКОРЕННАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ

Академик НАН Украины **С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, **М. Е. ШИНЛОВ**,  
**Б. И. КАЗЫМОВ**, кандидаты техн. наук, **В. Ф. ЗАГАДАРЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован процесс термообработки (ТО) при сравнительно кратковременном интенсивном воздействии электромагнитного поля на сварные швы, выполненные контактной стыковой сваркой. Рассмотрены режимы ТО и механические свойства обработанных и контрольных сварных швов. Установлено, что применение ускоренной интенсивной индукционной ТО, предусматривающей кратковременное превышение температуры шва выше точки  $A_{c3}$ , приводит к повышению ударной вязкости сварных швов, уменьшению ширины зоны нагрева, а также экономии энергии, расходуемой на ТО. При продолжительности ТО сварного шва 90...180 с для сталей классов прочности Х65 и Х80 значения ударной вязкости металла сварного шва повышаются до требуемого уровня, при этом прочность металла шва понижается не более чем на 3,6 и 7 % соответственно. Ускоренную индукционную ТО можно использовать для повышения ударной вязкости металла шва соединений труб большого диаметра.

*Ключевые слова:* индукционная термообработка, магистральные трубопроводы, стали контролируемой прокатки, сварной шов, ударная вязкость, ускоренная обработка

К механическим свойствам стенок труб и сварных стыков трубопроводов предъявляются повышенные требования, особенно, если трубопроводы эксплуатируются в экстремальных условиях (высокое давление перекачиваемого продукта, низкая температура эксплуатации).

В настоящее время для сооружения магистральных трубопроводов широко применяют трубы из листовых сталей с повышенной механической прочностью, которые производят с использованием технологии контролируемой прокатки [1]. Сварку стыковых швов при монтаже магистральных трубопроводов выполняют с помощью высокомеханизированных и автоматизированных сварочных комплексов, например, типа «Север», предназначенного для автоматической контактной стыковой сварки [2].

Среди требований, предъявляемых к механическим свойствам материала трубопроводов, работающих при отрицательных температурах, особое место занимают требования к ударной вязкости сварных швов [3]. Известно [4], что термическая обработка (ТО) сварных швов и околошовной зоны является одним из способов увеличения этого показателя.

Применение традиционных способов ТО (нагрев поясами электросопротивления за счет выделяемого в них тепла Джоуля–Ленца [5, 6]; радиационный нагрев инфракрасными излучателями) и оборудования для обработки кольцевых сварных швов труб большого диаметра либо невозможно в монтажных полевых условиях (требуется печной нагрев [7]), либо недостаточно эффективно. При этих способах ТО тепло распространяется от источника нагрева к поверхности стенки трубы, а затем за счет теплопроводности — внутрь стенки.

Ширина зоны нагрева при этом очень большая, что может привести к разупрочнению металла шва и повреждению наружной изоляции труб. Для достижения достаточно высокой температуры ТО и заданного равномерного распределения температурного поля по толщине сварного шва требуется значительное время.

При сварке в полевых условиях продолжительность нагрева при ТО существенно влияет как на механические свойства соединений, так и на производительность сварочного комплекса в целом. Известно, что при увеличении продолжительности ТО снижается мощность источника нагрева, что имеет значение в случае ТО с использованием автономного источника энергоснабжения. Как показал опыт, увеличение продолжительности нагрева приводит к возрастанию степени разупрочнения, что проявляется при сварке труб повышенной прочности, изготовленных из сталей класса прочности Х65–Х80 и выше.

Целью проведенных исследований являлось определение возможностей интенсификации процесса ТО с достижением эффекта улучшения прочностных показателей швов свариваемых труб.

Наиболее эффективные возможности сокращения продолжительности ТО появляются при применении индукционного нагрева токами повышенной частоты. При этом выделение тепла происходит непосредственно в нагреваемой стенке трубы в узкой зоне, формирование которой обусловлено геометрическими размерами индукционной системы и частотой тока в индукторе. При соответствующей частоте тока нагрев сварного шва может происходить практически одновременно по всей его толщине [8]. Так, например, для существующего диапазона толщин стенок труб большого диаметра (14...20 мм), применяемых для сооружения магистральных трубопроводов, приемлемый для ТО



Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей, мас. %

Класс прочности стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Nb
X65	0,136	0,307	1,58	0,009	0,014	0,08	0,010	0,046
X80	0,062	0,461	2,04	0,004	0,016	0,05	0,027	0,042

Примечание. Массовая доля никеля, ванадия и меди составляет менее 0,05 %, молибдена — менее 0,03 %.

диапазон значений частоты тока составляет 1,0... 2,5 кГц.

В ходе исследований оценивали также влияние интенсивности индукционной ТО и продолжительности нагрева на ударную вязкость  $KCV$  и временное сопротивление  $\sigma_B$  металла сварного шва при температуре  $T_{исп} = -20...+20$  °С.

Как известно, особенностью технологии производства сталей с контролируемой прокаткой является обжатие валками стального листа при температуре нагрева ниже температуры точки превращения  $A_{c3}$ , что аналогично процессу наклепа (нагартовки). Поэтому для таких сталей особенно важно исследовать влияние ТО вблизи точки  $A_{c3}$  на показатели прочности (особенно, ударной вязкости).

Предпосылкой для применения ТО при воздействии кратковременного цикла интенсивного индукционного нагрева, при котором температура нагрева сварных швов превышает температуру точки превращения  $A_{c3}$ , явились данные о сдвиге  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при ускоренном нагреве в область повышенных температур [9] и ограниченном росте зерен аустенита [10]. Благодаря этому создаются условия, при которых возможно лишь незначительное снижение прочности металла сварных швов при существенном повышении ударной вязкости.

Для сталей контролируемой прокатки нормируется предел текучести и временное сопротивление, при этом химический состав не регламентирован. Так, например, стали одного и того же класса прочности, но различных производителей обычно отличаются химическим составом, причем перечень марок таких сталей довольно большой.

В данной работе исследуется ТО сварных стыковых швов труб, изготовленных из широко распространенных в настоящее время трубных сталей класса прочности X65 толщиной 15,7 мм и X80

толщиной 18,7 мм. Результаты спектрального анализа их химического состава приведены в табл. 1.

Поскольку для каждой марки стали значение температуры точки  $A_{c3}$  различно, проведены dilatометрические исследования на дифференциальном вакуумном dilatометре «Шевенар» (производство Швейцарии) образцов МИ-102 типа 1 (ГОСТ 6996-66), изготовленных из сталей классов прочности X65 и X80, для которых  $A_{c3}$  составляет соответственно 850 и 880 °С.

ТО подвергали сварные соединения, выполненные контактной стыковой сваркой. Образцы для сварки вырезали из труб диаметром 1420 мм в форме секторов со свариваемым сечением  $s \times 200$  мм (здесь  $s$  — толщина стенки) трубы. Сварку выполняли на универсальной сварочной машине в соответствии с требованиями ВСН-006-89 [11].

Для осуществления индукционной ТО сварных швов создана лабораторная установка, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 1.

В качестве источника питания тока повышенной частоты применяли электромашинные преобразователи типа ПВВ-100-2,5 мощностью 100 кВт с частотой тока 2,5 кГц. Для согласования источника питания и нагрузки использовали силовой трансформатор типа ТЗ-3-800. Батарея косинусных конденсаторов служила для компенсации реактивной мощности индуктора. Нагрев плит со сварным швом осуществляли с одной стороны. Таким образом, с помощью охватывающего трубу индуктора имитировали условия нагрева сварного кольцевого шва труб большого диаметра в трассовых условиях.

В измерительную часть установки входят датчики электрических параметров и температуры. Датчиком напряжения является стандартный измерительный трансформатор напряжения типа ВОС-8. Датчик тока выполнен по принципу пояса Роговского. Для измерения угла сдвига фаз между током и напряжением индуктора применяли фазометр типа Ф2-1. Электрические измерения осуществляли с использованием электронных вольтметров типов ВУ-15 и ВК 7-9, что позволило определить мощность, затраченную на нагрев сварных швов в образцах и оценить требуемую мощность источника питания для выполнения ТО с аналогичным термическим циклом для труб большого диаметра.

Образцы сварных соединений сталей рассматриваемых классов прочности подвергли ТО с тремя вариантами продолжительности нагрева, при которых металл сварного шва находился при температуре выше точки  $A_{c3}$  в течение 90... 180 с (табл. 2). В таблице приведены усредненные зна-

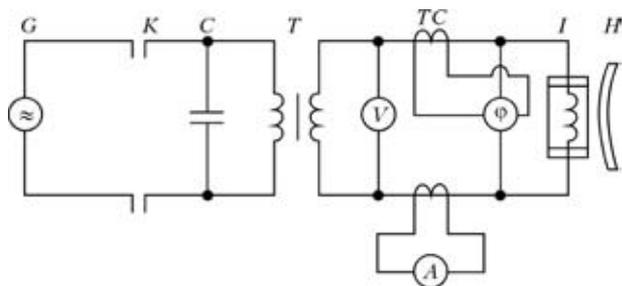


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки: G — источник питания (преобразователь тока высокой частоты); K — контактор; C — батарея косинусных конденсаторов; T — силовой согласующий трансформатор; V — вольтметр; A — амперметр; φ — фазометр; I — индуктор; H — нагрузка индуктора (нагреваемый образец); TC — трансформатор тока

Таблица 2. Параметры режимов ТО

Класс прочности стали	№ режима	$\tau$ , с	$T$ , °C
Х65	1	110	950
	2	130	980
	3	150	1030
Х80	1	90	970
	2	135	1020
	3	180	1060

Примечание.  $\tau$  — продолжительность пребывания металла сварного шва при температуре выше точки  $A_{c3}$ ;  $T$  — температура ТО, усредненная по толщине стенки трубы.

чения температуры по толщине стенки плиты, которые достигаются при указанных режимах ТО. В качестве датчиков температуры использовали хромель-алюмелевые термопары, спаи которых приваривали на половине толщины плиты конденсаторной сваркой в отверстиях, выполненных в каждом сварном стыке. Термический цикл регистрировался самописцем типа КСП. Оперативный контроль температуры нагрева трубы осуществляли с использованием оптического пирометра типа «Промінь».

Методика оценки влияния параметров цикла ТО на механические свойства металла сварных швов заключалась в сравнении временного сопротивления прочности и ударной вязкости сварных образцов, подвергнутых ТО, с базовыми, в качестве которых приняты соответствующие результаты испытаний сварных образцов без ТО. В лаборатории механических испытаний ИЭС им. Е. О. Патона испытаниям подвергали образцы по ГОСТ 6996–66, которые вырезаны механическим способом из швов, выполненных стыковой контактной сваркой оплавлением.

Зависимости построены по точкам, являющимся средними арифметическими результатами испытаний образцов, прошедших ТО по трем вариантам режимов (табл. 2). Надрез выполняли по центру сварного шва таким образом, чтобы направление удара маятникового копра приходилось в тангенциальном направлении к оси трубы, из которой вырезали плиты для сварки. Место нанесения надреза определяли путем химического травления шлифованной поверхности образца в 10%-м растворе надсернистого аммония.

Для стали класса прочности Х65 (рис. 2, а) во всем диапазоне температур испытаний можно отметить существенное увеличение ударной вязкости. Так, при температуре испытаний образцов  $-20^\circ\text{C}$ , подвергнутых ТО при температуре выше точки  $A_{c3}$  с выдержкой в течение 100... 150 с, значения ударной вязкости возросли в 5,2... 8,8 раза; при  $T_{\text{исп}} = 0$  — в 7,7... 13,0 раз; при  $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$  — в 9,3... 12,8 раза.

Для стали класса прочности Х80 (рис. 2, б) во всем диапазоне температур испытаний также отмечается существенное увеличение ударной вязкости. При температуре испытаний образцов  $20^\circ\text{C}$ , прошедших ТО при температуре выше точки  $A_{c3}$  с выдержкой в течение 90... 180 с, имеет место

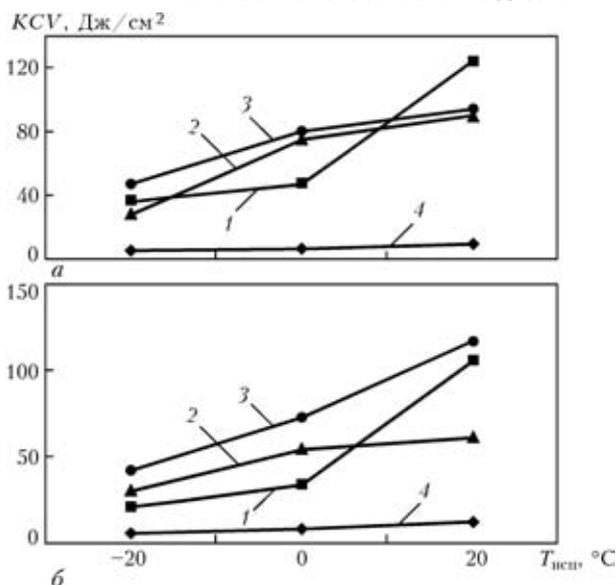


Рис. 2. Изменение ударной вязкости  $KCV$  образцов из стали класса прочности Х65 (а) и Х80 (б) в зависимости от температуры испытаний  $T_{\text{исп}}$  при различных режимах ТО (1–3) и без ТО (4)

увеличение ударной вязкости в 3,3... 6,7 раза; при  $T_{\text{исп}} = 0$  — в 4,0... 8,7 раза, при  $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$  — в 5,0... 9,6 раза.

Таким образом, можно отметить тенденцию к возрастанию ударной вязкости металла сварного шва, подвергнутого ускоренной индукционной ТО, во всем диапазоне температур испытаний. При этом наблюдается некоторый разброс значений ударной вязкости, что является характерным для соединений, выполненных сваркой давлением.

Металлографические исследования сварных соединений до и после ТО по предложенной технологии подтвердили результаты механических испытаний. В структуре металла образцов сварных стыков из сталей обеих марок не было обнаружено крупных зерен, являющихся причиной низкой ударной вязкости. Структура металла в зоне сварки соединений после ТО более однородная и мелкозернистая (рис. 3).

На рис. 4 представлены результаты испытаний на растяжение образцов сварного шва со снятым усилением (гратом) полной толщины типа МИ-18 по ГОСТ 6996–66.

Прочность сварных соединений после ТО по предложенной технологии по сравнению с применяемой ранее имеет более высокие значения в связи со сравнительно малой продолжительностью термического цикла. Однако и в этом случае показатели прочности снижаются.

Для сталей класса прочности Х65 характерно снижение прочности на разрыв после интенсивной ТО по сравнению с основным металлом не более чем на 3,6 % (рис. 4, а), а у сталей класса прочности Х80 данный показатель составляет 7,0 % (рис. 4, б). Из-за того, что при испытаниях на растяжение использовали образцы малой ширины, полученные выше значения прочности занижены по сравнению с реальными соединениями труб. В силу проявления эффекта контактного упрочнения действительные значения прочности на разрыв сварного

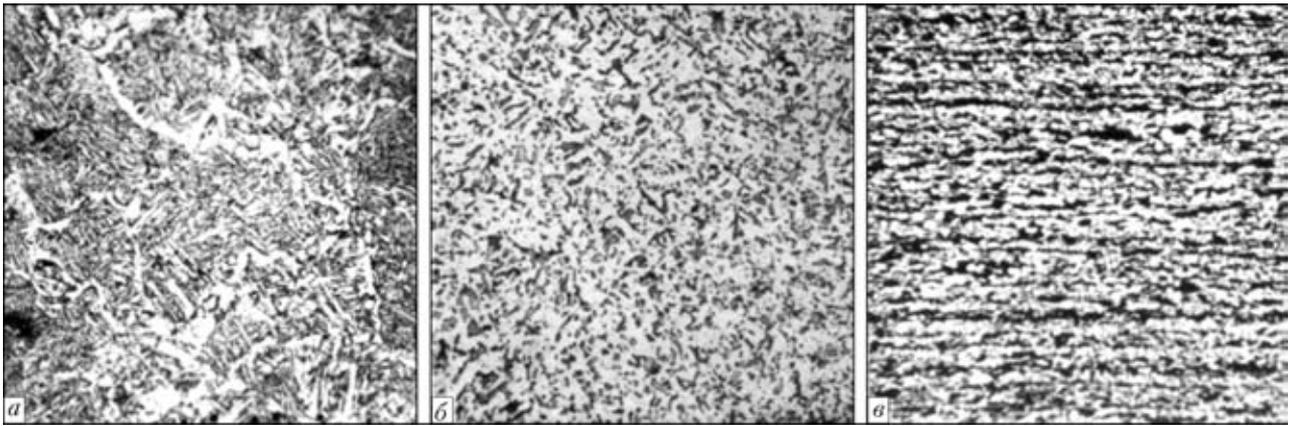


Рис. 3. Характерная микроструктура (X100) металла в зоне стыка трубных сталей класса прочности X65, X80 в состоянии после сварки (а) и после ТО (б), а также основного металла (в)

соединения полного сечения труб будут выше [12], что подтверждается экспериментальными и расчетными данными [13].

Результаты механических испытаний показали, что наиболее высокие показатели ударной вязкости сварных соединений достигаются при более высоких параметрах режима ТО. При испытаниях на прочность наблюдается обратная зависимость, однако для указанных сталей она выражена менее заметно.

При разработке оборудования для данного вида ТО сварных кольцевых швов труб большого диаметра значительный интерес представляет оценка электрической мощности, расходуемой на выполнение индукционной ТО рассматриваемого вида.

Как показали измерения, значения активной мощности индуктора должны составлять около 85 кВт на 1 м погонной длины сварного шва при толщине стенки труб 16...19 мм.

На рис. 5 (кривая 1) показана зависимость мощности специально разработанных индукторов от диаметра труб, полученная на основании экспериментальных данных.

Например, при ТО труб диаметром 820, 1020, 1220 и 1420 мм с толщиной стенки 16...19 мм необходимо обеспечить мощность индукционного на-

грева соответственно около 220, 280, 330 и 380 кВт, что ниже мощности (рис. 5, кривая 2), потребляемой индуктором при ТО труб большого диаметра, осуществляемой на ранее предложенном режиме [14].

Потребляемая при ТО мощность является особо важным показателем в случае выполнения работ в полевых условиях, когда мощность передвижной электростанции ограничена. Одной из схем организации работ предусматривается питание высокочастотного преобразователя от той электростанции, которую использует сварочная машина. ТО осуществляют сразу же после сварки и удаления внутреннего и наружного грата. В данном случае индуктор и наружный гратосниматель могут быть объединены в единый агрегат, для которого используется один механизм перемещения вдоль трубопровода (либо трубоукладчик, либо автономная система перемещения). Во время работы индуктора сварочная машина перемещается в конец трубопровода, где выполняются подготовительные работы для приварки следующей трубы.

В зависимости от условий строительства удаление наружного грата можно выполнять независимо от сварки. Такую схему применяют, если все производственные средства необходимо сосредоточить на выполнении главной технологической операции, например сварке в период наиболее благоприятных климатических условиях. В этом случае для удаления грата и ТО используют отдельную электростанцию.

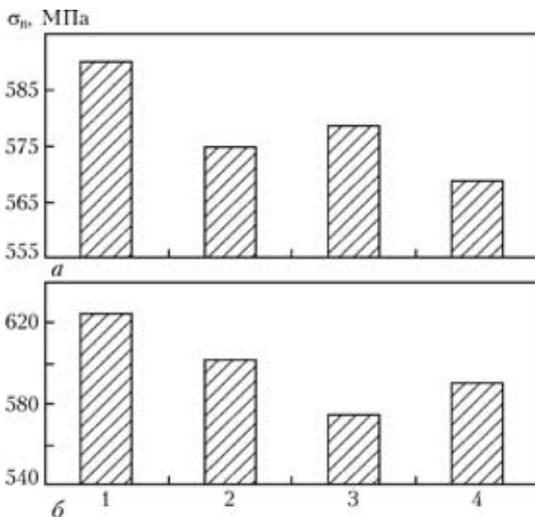


Рис. 4. Временное сопротивление  $\sigma_y$  образцов из стали класса прочности X65 (а) и X80 (б): 1 – без ТО; 2–4 – с ТО (соответственно режимы 1–3 по табл. 2)

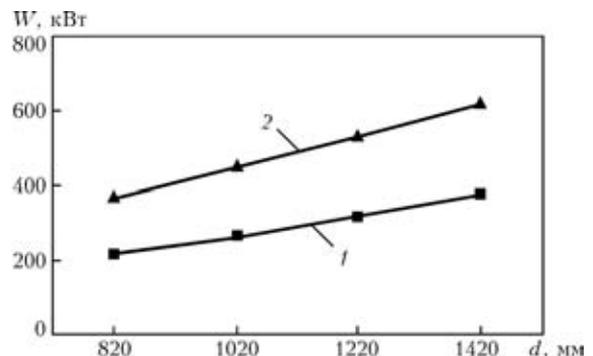


Рис. 5. Зависимость мощности индуктора от диаметра труб: 1, 2 – см. объяснения в тексте



В промежутке между сварочными работами для выполнения ТО сварных швов целесообразно пользоваться электростанцией сварочной установки.

### Выводы

1. Применение ускоренной интенсивной индукционной ТО, предусматривающей кратковременное превышение температуры металла шва выше точки превращения  $A_{c3}$ , приводит к увеличению ударной вязкости сварных швов, уменьшению ширины зоны нагрева и экономии энергии, затрачиваемой при ТО.

2. При осуществлении ТО сварного шва в течение 90...180 с для сталей классов прочности X65 и X80 (соответствующих химических составов) значения ударной вязкости металла сварного шва повышаются до требуемого уровня, при этом прочность стандартных образцов сварного шва понижается не более чем на 3,6 и 7,0 % соответственно.

3. Исходя из результатов механических испытаний сварных швов труб из сталей классов прочности X65 и X80 можно рекомендовать ускоренную индукционную ТО для повышения ударной вязкости металла сварного шва труб большого диаметра.

1. *Погоржельский В. И.* Технология контролируемой прокатки низколегированных сталей // Производство высококачественного проката. — М.: Металлургия, 1979. — С. 10-20.
2. *Контактная стыковая сварка трубопроводов / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. А. Сахарнов и др.* — Киев: Наук. думка, 1986. — 208 с.

The process of heat treatment (HT) at a comparatively short-term intensive action of the electromagnetic field on the welds made by flash-butt welding was studied. HT modes and mechanical properties of the treated and control welds are considered. It is established that application of accelerated intensive induction HT, envisaging a short-term increase in weld temperature above  $A_{c3}$  point, leads to an increase in the index of impact toughness of welds, narrowing of the heating zone, as well as saving of the energy consumed in HT. At weld HT duration of 90 to 180 s for steels of X65 and X80 steel grades, values of weld metal impact toughness are increased up to the required level, while the weld metal strength decreases by not more than 3, 6 and 7 %, respectively. Accelerated induction HT can be used for improvement of impact toughness of the metal of welds of large diameter pipes

3. *СП 105-34-96.* Свод правил сооружения магистральных газопроводов. — М.: РАО «Газпром», 1996. — 42 с. — Введ. 01.10.96.
4. *Местная термообработка сварных стыковых соединений газопроводных труб диаметром 1420 мм / В. К. Лебедев, Ю. В. Скульский, С. И. Кучук-Яценко и др.* // Авто-мат. сварка. — 1977. — № 10. — С. 38-40.
5. *Корольков П. М.* Местная термическая обработка сварных тройников и тройниковых соединений // Стр-во трубопроводов. — 1987. — № 7. — С. 24-25.
6. *Корольков П. М.* Термообработка сварных соединений трубопроводов в полевых условиях // Монтажные и спец. работы в строительстве. — 1996. — № 11/12. — С. 21-24.
7. *Хромченко Ф. А., Корольков П. М.* Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.
8. *Бабат Г. И.* Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 552 с.
9. *Гриднев В. Н., Ошкадеров С. П., Телевин Р. В.* К вопросу об  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращениях в деформируемых углеродистых сталях при скоростном нагреве // Металлофизика. — 1970. — Вып. 9. — С. 107-109.
10. *Головин Г. Ф., Зимин Н. В.* Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1979. — 120 с.
11. *ВСН 006-89.* Инструкция по технологии стыковой электроконтактной сварке оплавлением магистральных трубопроводов из сталей с пределом прочности до 60 кгс/мм<sup>2</sup>. — М.: ВНИИСТ, 1989. — 48 с.
12. *Бакиш О. А.* Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение // Свароч. пр-во. — 1985. — № 7. — С. 20-21.
13. *Контактная стыковая сварка высокопрочных труб большого диаметра / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Махненко, Б. И. Казымов и др.* // Стр-во трубопроводов. — 1987. — № 7. — С. 21-25.
14. *Исследование режимов работы индукторов для термообработки стыков труб при строительстве трубопроводов / А. Г. Шварцман, Г. В. Будкин, И. Н. Бриельков и др.* // Свароч. пр-во. — 1990. — № 6. — С. 20-21.

Поступила в редакцию 06.05.2005

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ УГЛОВЫХ ШВОВ ВО ВСЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

Автоматическая сварка угловых швов во всех пространственных положениях выполняется в  $CO_2$  со свободным формированием металла на сварочном токе 180...300 А; скорость сварки составляет 0,08...0,10 м/мин.

Технология позволяет в потолочном положении выполнить сварку угловых швов с катетом 8...12 мм за один проход. Швы формируются без подрезов и наплывов с плавным переходом к основному металлу.

При этом достигаются более высокие пластические свойства сварных соединений по сравнению с известными технологиями. Малогабаритное сварочное оборудование имеет соответствующий уровень автоматизации и обеспечивает высокое качество сварных швов при их выполнении операторами невысокой квалификации. Производительность по сравнению с ручной сваркой увеличивается в 2-2,5 раза.

Предлагаемая технология сварки не имеет аналогов в мировой практике.

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 48  
Тел./факс: (38044) 287-62-13, 529-06-07; E-mail: paton48@paton.kiev.ua