



УДК 621.791.762.1

# ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ТРУБНЫХ СТАЛЯХ КЛАССА ПРОЧНОСТИ Х65–Х80 НА ПОКАЗАТЕЛИ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Ю. В. ШВЕЦ, В. И. ШВЕЦ

ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены всесторонние механические испытания соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. Качество соединений полностью удовлетворяет требованиям международного стандарта API STANDART 1104. При испытаниях на ударный изгиб наблюдались отдельные выпадки показателей  $KCV_{-40}$  ниже уровня, требуемого стандартами DNV-OS-F101 и СТО Газпром 2-3.7-380–2009. Снижение показателей  $KCV_{-40}$  обусловлено формированием в плоскости соединения участков площадью 1...2 мм<sup>2</sup>, отличающихся структурной неоднородностью, которая характерна и для основного металла и проявляется в резко выраженной анизотропии его пластических свойств. Показано, что участки со структурной неоднородностью не образуют колоний, поэтому они не снижают общую работоспособность сварного соединения. Размеры этих участков не превышают допустимых значений, принятых стандартами для дефектов дуговых швов. Наличие отдельных точечных выпадов показателей  $KCV_{-40}$  при испытаниях сварных соединений, выполненных КССО, не следует считать браковочным признаком. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 11.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, высокопрочная сталь, ударная вязкость сварных соединений, термическая обработка сварных швов

Многолетние работы ИЭС им. Е. О. Патона по контактной стыковой сварке труб больших диаметров [1] в последние годы получили дальнейшее развитие. Разработана технология контактной стыковой сварки оплавлением (КССО) толстостенных труб диаметром 1219...1420 мм из высокопрочных сталей, используемых при сооружении современных трубопроводов большой производительности. Технология сварки и термической обработки обеспечивает получение соединений с высокими показателями механических свойств, которые соответствуют требованиям международных стандартов [2–4]. На основе этой технологии ЗАО «Псковэлектросвар» (РФ) при участии ИЭС им. Е.О. Патона разработало новое поколение оборудования для КССО труб диаметром 1219...1420 мм. В настоящее время проводятся всесторонние испытания этого оборудования и технологии сварки, а также ее адаптация к нормативным требованиям, предъявляемым к качеству сварных соединений труб при строительстве морских и наземных трубопроводов, в том числе в условиях Крайнего Севера.

Для таких трубопроводов международными стандартами [3, 4] установлены нормативные показатели ударной вязкости сварных соединений кольцевых швов не менее 37,5 Дж/см<sup>2</sup> при тем-

пературе испытаний, которая должна быть на 20 °С ниже проектной температуры эксплуатации трубопровода.

Целью настоящей статьи является определение факторов, которые влияют на значение и стабильность показателей ударной вязкости соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных КССО.

Разработку технологии сварки проводили на секторах труб диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм, которые изготовлены из листовой стали 10Г2ФБ класса прочности Х70, полученной контролируемой прокаткой с термомеханическим упрочнением, следующего химического состава, мас. %: 0,06 С; 0,21 Si; 1,42 Mn; 0,12 Ni; 0,07 Mo; 0,04 V; 0,04 Al; 0,02 Ti; 0,05 Cr; 0,02Nb; 0,004 S; 0,012 P. Механические свойства основного металла, а также сварных соединений после термической обработки приведены в таблице. Режимы сварки и термической обработки представлены в работах [5, 6]. Все сварные соединения подвергали неразрушающему контролю (радиографическому, ультразвуковому) с высокой разрешающей способностью.

Механические испытания сварных стыков проводили в лаборатории ИЭС им. Е.О. Патона согласно требованиям, изложенным в работе [3]. Данная лаборатория сертифицирована в соответствии с международными стандартами. Ме-



Механические свойства металла труб и сварных соединений

Участок исследования	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С			
			+20	-20	-30	-40
Основной металл	$\frac{484,4...493,5}{490,0}$	$\frac{546,7...556,8}{553,0}$	$\frac{334,7...336,6}{335,8}$	–	–	$\frac{333,0...336,6}{334,9}$
Сварное соединение после термической обработки	–	$\frac{550,6...561,4}{554,6}$	$\frac{147,9...219,5}{173,2}$	$\frac{86,8...171,1}{137,9}$	$\frac{84,5...167,5}{115,5}$	$\frac{19,1...129,1}{98,6}$

таллографические исследования проводили на световом микроскопе «Неофот-32», анализы поверхности изломов и микроструктуры соединений — на Оже-микронде JAMP 9500F фирмы «JEOL» (Япония) в лаборатории металлографических исследований.

В образцах, испытанных на статический изгиб после термической обработки и представленных на рис. 1, разрушений и трещин не обнаружено.

Как видно из таблицы и рис. 1, 2, у термообработанных сварных соединений показатели ударной вязкости удовлетворяют требованиям в температурном диапазоне +20...–30 °С [3, 4], предъявляемым к морским трубопроводам. С понижением температуры испытаний  $T_{исп}$  образцов на ударный изгиб показатели KCV снижаются, а разброс их значений возрастает (рис. 2). Тем не менее при  $T_{исп} = -30$  °С они остаются на достаточно высоком уровне 84,5...167,5 Дж/см<sup>2</sup>, а при  $T_{исп} = -40$  °С, которая предусмотрена для континентальных трубопроводов в условиях Крайнего Севера, разброс показателей возрастает и наблюдаются отдельные выпадки ниже уровня 37,5 Дж/см<sup>2</sup>, регламентированного стандартом DNV-

OS-F101. Количество таких образцов, испытанных при указанной температуре, не превышает 10...15 %. При этом средний показатель KCV остается достаточно высоким — 98,6 Дж/см<sup>2</sup>.

Контроль сварных соединений всех образцов неразрушающими методами не обнаружил каких-либо несовершенств структуры металла по плоскости соединения, которые можно было бы классифицировать как дефектные, даже при настройке приборов на повышенную чувствительность.

Макро- и микроструктура соединения труб, выполненного на оптимальном режиме с последующей термообработкой, приведены на рис. 3. Общая ширина зоны термического влияния (ЗТВ) после сварки и термообработки составляет около 60 мм. Основу микроструктуры металла ЗТВ так же, как и основного металла, составляет феррит. По линии соединения микроструктура отличается несколько большим по сравнению с микроструктурой ЗТВ размером ферритного зерна (10...15 мкм) и наличием частично распавшегося

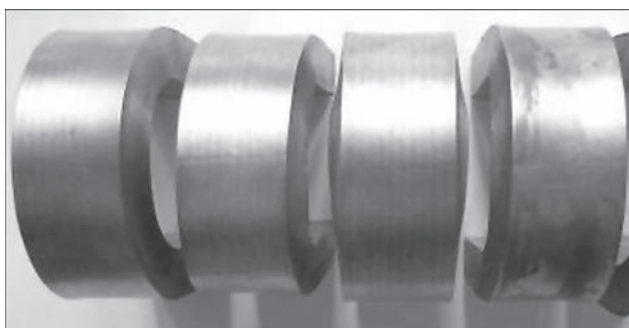


Рис. 1. Образцы сварного соединения, испытанные на статический изгиб после термообработки

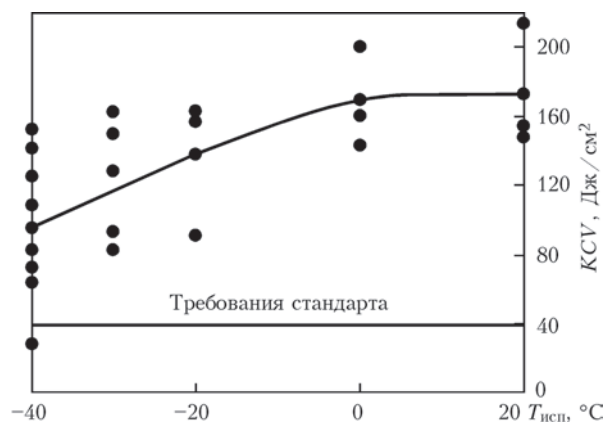


Рис. 2. Температурная зависимость ударной вязкости сварных соединений

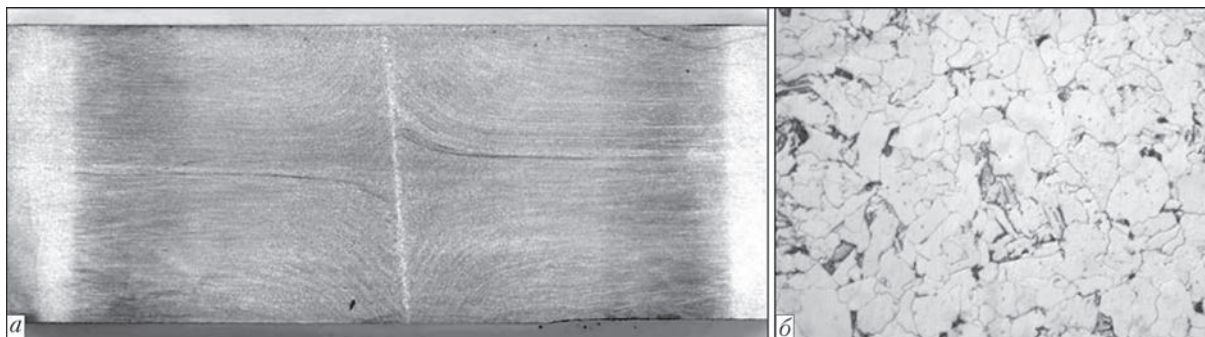


Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б, ×1000) соединения трубной стали на участке линии соединения

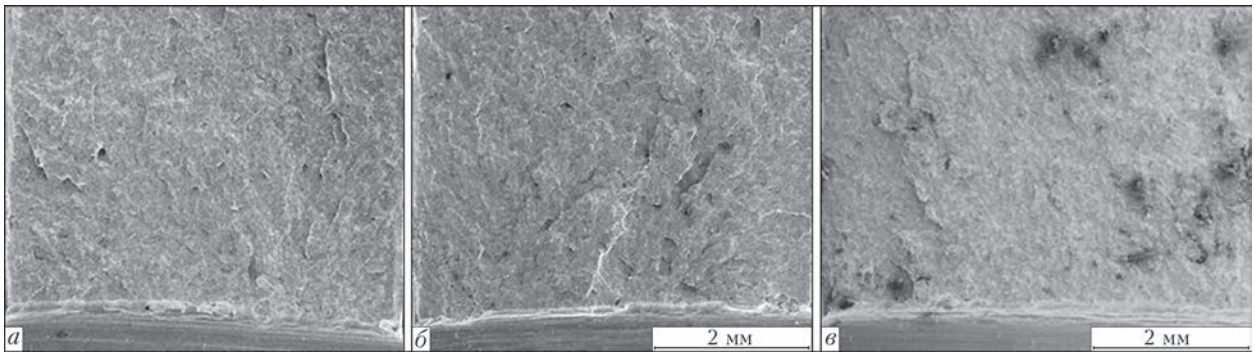


Рис. 4. Макроструктура изломов сварных образцов после испытаний на ударный изгиб: а —  $KCV_{-40} = 110$  Дж/см<sup>2</sup>; б — 29,1; в — 19,1

с образованием зернистого бейнита остаточного аустенита.

В ходе сравнения микроструктуры шва образцов, которые при испытаниях показали минимальные и максимальные значения  $KCV_{-40}$ , не выявлено каких-либо отличий.

Проведен анализ структуры изломов сварных образцов после испытаний на ударный изгиб. Исследования показали, что изломы образцов во всех случаях кристаллические (рис. 4). Развитый рельеф в некоторых случаях связан с наличием в металле крупных неметаллических включений.

Микроструктура поверхности изломов всех образцов морфологически едина (рис. 5). Фасетки скола с типичными для разрушения сколом элементами структуры такими, как ступеньки ручьистого узора и язычки, сочетаются с гребнями отрыва – элементами вязкого разрушения. Характерно наличие вторичных трещин по межфазным границам.

Ударная вязкость образцов с такой микроструктурой при практически отсутствующих неметаллических включениях соответствовала нормативным требованиям (рис. 4, а).

У образцов с низкой ударной вязкостью отмечалось наличие на поверхности излома скоплений неметаллических включений (рис. 4, в). Микро-

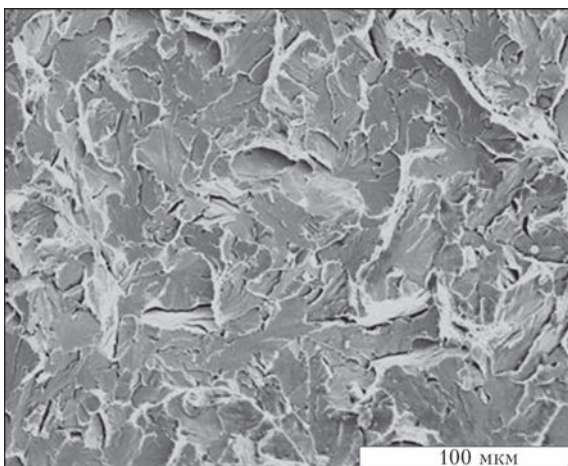
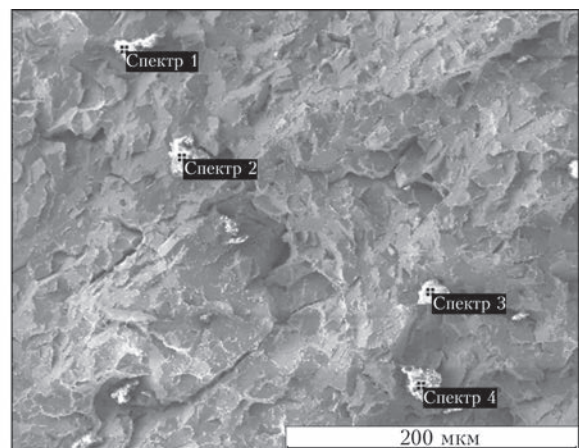


Рис. 5. Микроструктура поверхности излома после испытаний на ударный изгиб

рентгеноспектральный анализ химического состава позволил выделить следующие типы. Это комплексные оксиды кремния, кальция, алюминия размером до 50 мкм (рис. 6, спектры 1, 2), частицы на основе кремния (рис. 6, спектры 3, 4). Эти включения являются тугоплавкими продуктами металлургических реакций, которые переходят в шов, практически не претерпевая изменений в термодинамических условиях сварки. В их состав также могут входить примесные и легирующие элементы такие, как сера, ниобий и титан.

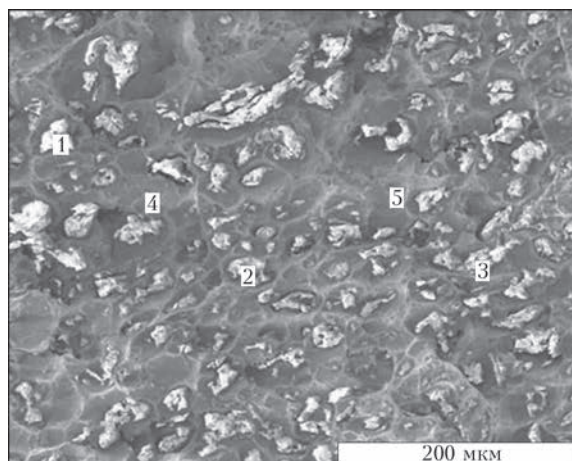
Другой тип наблюдаемых включений, образующих скопления — это силикаты. Участки с частицами силикатов, которые удалось наблюдать, занимали площадь до нескольких квадратных миллиметров. Оплавленный вид и многочисленность частиц дают основание предположить, что они представляют собой фрагменты раздробленной в стыке жидкой пленки (рис. 7).

Для оценки влияния неметаллических включений в стали на структуру и состав включений в



Спектр	C	O	Al	Si	S	Fe
1	37,48	26,42	14,67	3,23	0,88	17,32
2	66,53	19,9	–	0,25	–	13,30
3	22,66	0,72	–	72,67	–	3,94
4	39,47	2,23	–	46,02	–	12,27

Рис. 6. Тугоплавкие неметаллические включения на поверхности излома сварного соединения и результаты их микро-рентгеноспектрального анализа (здесь и далее ат. %)



Спектр	C	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
1	5,89	60,91	2,19	11,83	0	0,17	0,82	0	16,63	1,57
2	11,50	56,43	6,40	12,94	0,41	0,70	1,02	0	9,28	1,33
3	1,02	55,44	2,39	16,09	0,10	0,11	0,50	0,02	22,84	1,50
4	4,81	1,39	0,04	0,58	0,08	0	0,24	0,19	1,92	90,76
5	3,64	0,82	0	0,29	0,11	0,19	0	0	1,86	93,08

Рис. 7. Марганцовистые алюмосиликаты на поверхности излома соединения труб

сварных швах были проведены металлографические исследования основного металла.

Микроструктура основного металла представляет собой ферритную матрицу с незначительным количеством перлитных колоний (рис. 8, а). Раз-

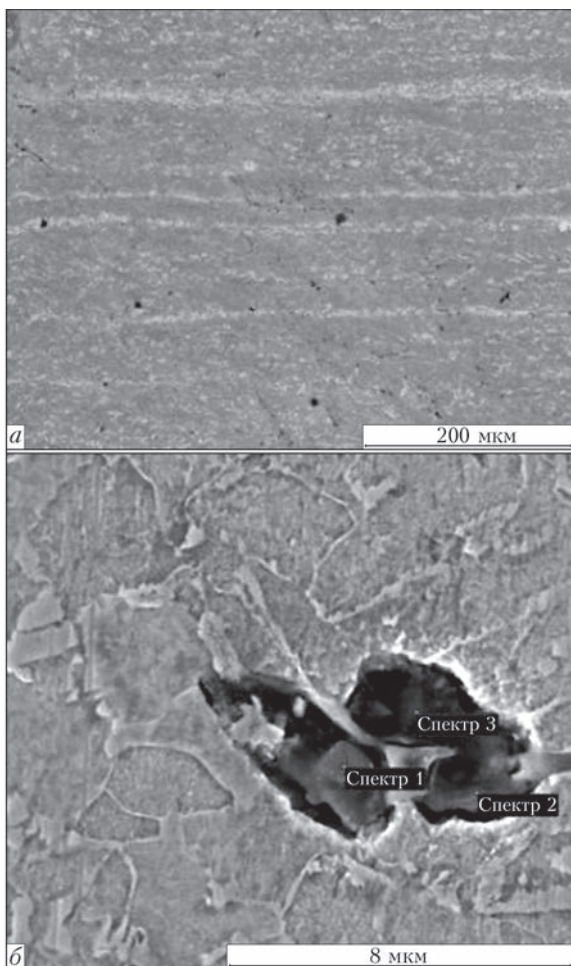
мер зерен феррита оценочно находится в пределах от нескольких до 10 мкм (балл 11...12 по ASTM), при этом крупные зерна феррита вытянуты вдоль направления прокатки. Характерным является значительный уровень полосчатости микроструктуры, которая наблюдается благодаря строчечному расположению продуктов эвтектоидного превращения.

Неметаллические включения, которые главным образом представлены комплексными оксидами и сульфидами алюминия, кремния, кальция, марганца, железа (рис. 8, б), в микроструктуре распределены неоднородно и зачастую сосредотачиваются в полосах прокатки.

Для определения влияния структурной неоднородности основного металла труб на ударную вязкость были проведены испытания образцов, вырезанных из основного металла при различном расположении надреза в образцах Шарпи относительно полос прокатки. Так, в случае надреза на поверхности трубы поперек направления прокатки при  $T_{исп} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$   $KCV = 333,0...3336,2/334,9$ , а при надрезе посередине поверхности торца трубы вдоль центральной линии прокатки  $KCV = (9,8...236,5)/53,5$  Дж/см<sup>2</sup>.

Испытания образцов основного металла на ударную вязкость при надрезе по центральной линии прокатки показали, что результаты не удовлетворяют требованиям [4, 5]. Характерные изломы образцов показаны на рис. 9.

Показатели испытаний образцов с надрезом вдоль полос прокатки отличаются резко выраженной нестабильностью. Из девяти образцов с надрезом по центральной линии прокатки у шести результаты были ниже требуемых 37,5 Дж/см<sup>2</sup> (при минимальном значении 9,8 Дж/см<sup>2</sup>). Как видно, в пределах полосы на отдельных участках ударная вязкость высокая. Локальное понижение пластических свойств вызвано структурной неоднородностью полосы проката. Однако это не мо-



Спектр	O	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	59,87	0,74	24,29	9,53	0,23	2,52	2,82
2	36,10	1,73	1,36	0	0,98	0	59,83
3	46,09	1,31	6,84	0,53	5,14	2,53	37,56

Рис. 8. Микроструктура основного металла (а) и неметаллических включений в основном металле (б)



Рис. 9. Поверхность излома ударных образцов Шарпи при надрезе по центральной линии прокатки: а —  $KCV = 9,8$  Дж/см<sup>2</sup>; б — 22,2; в — 30,8

жет ослабить металл даже в пределах участка, измеримого с толщиной листа.

На изломе основного металла, раскрытого по полосе прокатки, наблюдаются многочисленные включения (рис. 10). По своей природе они весьма близки к наблюдаемым в основном металле. Основой их являются оксидные структуры кремния, алюминия, марганца, оксиды и сульфиды железа.

Наиболее вероятно, что переход неметаллических включений из полос прокатки в плоскость соединения происходит через расплав, формирующийся на поверхности оплавления при сварке. Толщина слоя расплава при оплавлении низколегированных сталей изменяется в пределах 0,1...0,6 мм.

В работе [7] показано, что при наличии в оплавляемых торцах деталей отверстий, заполненных оксидами железа или какими-либо металлическими наполнителями, в месте их выхода на оплавляемые торцы в расплаве формируется участок, обогащенный наполнителем. При осадке этот участок расплава деформируется и многократно увеличивается его площадь.

В рассматриваемом случае формирования структурной неоднородности в плоскости роль наполнителя выполняет содержимое ликвационной полосы в месте ее выхода на поверхность оплавления.

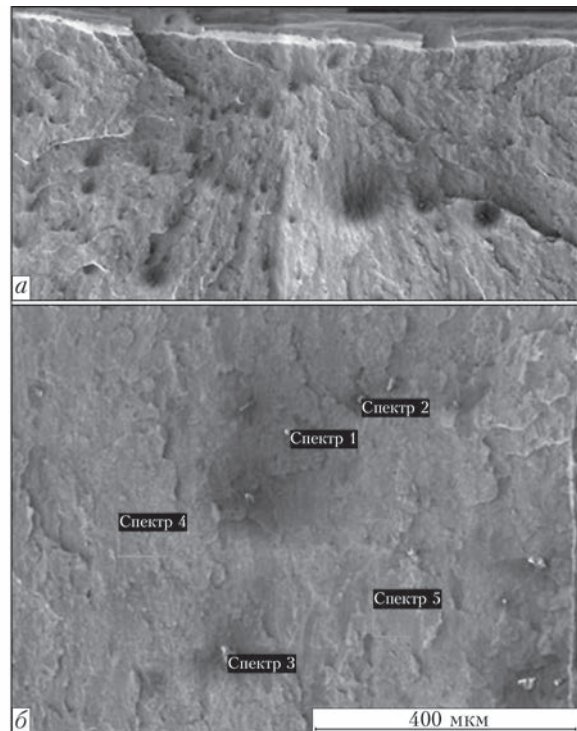
При оценке механических свойств сварных соединений труб большого диаметра в соответствии с нормативами [3, 4] рассматривают показатели испытаний стандартных образцов, вырезанных из секторов шириной 300 мм симметрично на четырех участках периметра трубы. При этом сравнивают результаты механических испытаний и показатели неразрушающего контроля. На основании анализа этих данных по каждому сектору делают вывод о допустимости отклонений показателей механических свойств и выявленных дефектов.

При испытаниях сварных соединений труб, выполненных КССО на оптимальных режимах, не было выявлено каких-либо отклонений от норма-

тивных требований по пределу прочности, а также при испытаниях на статический изгиб.

Для оценки распределения участков с низкими свойствами  $KCV$  в натурном образце была выполнена координатная привязка положения ударных образцов в испытуемом секторе трубы шириной 300 мм. На рис. 11 показаны результаты  $KCV_{40}$  по периметру и толщине сварного стыка.

Как видно, ударные образцы с показателями, ниже требуемых, не образуют колоний, а распре-



Спектр	O	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	63,20	0,04	19,42	0,51	4,65	2,48	9,70
2	29,10	0,15	0,40	8,43	3,82	2,12	55,98
3	6,88	1,98	0,27	2,41	0,32	0,13	88,01
4	8,27	0,62	0,49	1,21	1,75	1,56	86,10
5	11,15	0,47	1,66	4,62	0,23	1,86	80,01

Рис. 10. Макро- (а) и микроструктура (б) излома основного металла, раскрытого по полосе прокатки, и результаты микрорентгеноспектрального анализа

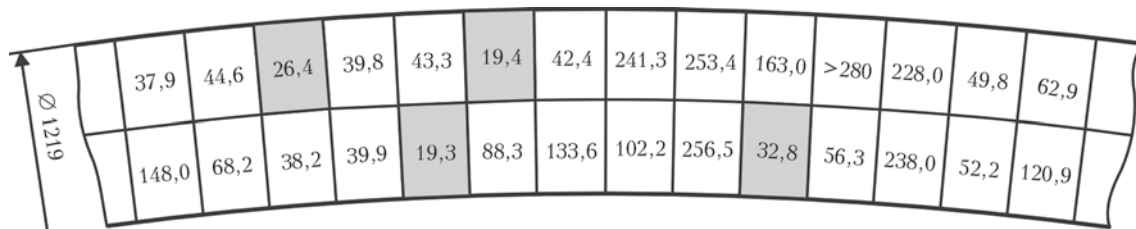


Рис. 11. Результаты испытаний образцов по периметру и толщине сварного стыка на ударный изгиб при температуре испытаний  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

делены стохастически по сечению сварного соединения. Следовательно, сварное соединение не будет иметь протяженных явно ослабленных участков с точки зрения показателей вязкости.

Все приведенные данные дают основание считать, что наличие в сварных соединениях участков структурной неоднородности и соответственно локальное снижение показателей ударной вязкости на контрольном участке площади сварного соединения не следует рассматривать как браковочный признак при оценке качества соединений, выполненных КССО.

Стандартами [4, 8] для электродуговой сварки определены размеры допустимых дефектов и их суммарная протяженность на любом участке сварного шва длиной 300 мм при их неразрушающем контроле. Максимальная суммарная длина таких участков 50 мм, а ширина до 1,5 мм применительно к дефектам типа «непровар». Даже если принять, что участки со структурной неоднородностью при КССО близки к непроварам при дуговой сварке, то указанные выпадки показателей ударной вязкости в соединениях в стыковых швах находятся в допустимых по нормативу пределах. В действительности механические свойства участков со структурной неоднородностью значительно выше и не содержат несплошностей, где металлическая связь вообще отсутствует.

Поэтому наличие отдельных выпадков показателей ударной вязкости при низких температурах испытаний не следует относить к браковочным признакам.

### Выводы

1. Проведены всесторонние механические испытания соединений труб из высокопрочных сталей, выполненных КССО. Качество соединений полностью удовлетворяет требованиям международного стандарта API STANDART 1104. Установлено, что при испытаниях на ударный изгиб наблюдались отдельные выпадки показателей  $KCV_{-40}$  ниже

уровня, требуемого стандартами DNV-OS-F101 и СТО Газпром 2-3.7-380-2009.

2. Средствами неразрушающих методов контроля сварных соединений в соединениях с низкими показателями  $KCV_{-40}$  не выявлено каких-либо дефектов сварки. Установлено, что снижение показателей  $KCV_{-40}$  обусловлено формированием в плоскости соединения участков площадью 1...2 мм<sup>2</sup>, отличающихся структурной неоднородностью, характерной и для основного металла, которая проявляется в резко выраженной анизотропии его пластических свойств.

3. Показано, что участки со структурной неоднородностью не образуют колоний, а распределены стохастически по сечению сварного соединения, поэтому они не снижают общую работоспособность сварного соединения. Размеры таких участков не превышают допустимых значений, принятых стандартами для дефектов швов, полученных при дуговой сварке.

4. Наличие отдельных локальных выпадков показателей  $KCV_{-40}$ , наблюдаемых при испытаниях сварных соединений, которые выполнены КССО, не следует считать браковочным признаком.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка трубопроводов. – Киев: Наук. думка, 1986. – 206 с.
2. API STANDART 1104. Welding of pipelines and related facilities, 21st Edition.
3. DNV-OS-F101. Offshore standart. Submarine pipelines systems. – Jan. 2000.
4. Инструкция по технологии сварки морских газопроводов: СТО Газпром 2-3.7-380-2009. – М., 2009.
5. Контактная стыковая сварка оплавлением толстостенных труб из высокопрочных сталей класса прочности K56 / С.И.Кучук-Яценко, Ю.В.Швец, В.Ф.Загадарчук и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 5. – С. 5-11.
6. Технология термической обработки соединений труб из стали категории прочности K56, сваренных контактной стыковой сваркой оплавлением / С.И.Кучук-Яценко, Ю.В.Швец, В.Ф.Загадарчук и др. // Там же. – 2013. – № 2. – С. 3-8.
7. Образование «матовых пятен» в соединении, выполненном контактной сваркой / С.И.Кучук-Яценко, Б.И.Казымов, В.Ф.Загадарчук и др. // Там же. – 1984. – № 11. – С. 23-26.
8. Инструкция по неразрушающему контролю сварных соединений при строительстве сухопутных и подводных газопроводов из сталей X-80, X-100: СТО Газпром 22.4-359 – 2009. – М., 2009. – 195 с.

Поступила в редакцию 29.10.2014