

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ТРУБ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Б. И. КАЗЫМОВ, В. Ф. ЗАГАДАРЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Технология контактной сварки оплавлением занимает достаточное место в различных отраслях промышленности, в том числе при сварке труб различного назначения. При высоком качестве соединений в целом ряде случаев наблюдаются выпадения показателей свойств. В работе рассмотрены причины таких выпадений и их связь с исходной структурой металла труб. Установлено, что формирование участков со структурной неоднородностью в соединениях обусловлено структурой и объемом сегрегационных полос неметаллических включений в стали и не связано с технологическими параметрами сварки. При сварке современных трубных сталей, полученных контролируемой прокаткой, обеспечиваются требуемые механические свойства соединений. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* трубопроводы, контактная сварка оплавлением, качество соединений, неразрушающий контроль, стандарты, механические испытания, испытания на изгиб, расслоения, трещины, неметаллические включения, ликвационные полосы, структурная неоднородность, браковочные признаки

Контактная стыковая сварка оплавлением (КСО) успешно используется в различных отраслях промышленности, в том числе при сварке труб различного назначения. Технологии и оборудование для этого способа сварки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, нашли широкое применение при строительстве различных трубопроводов. Процесс сварки полностью автоматизирован. При этом контролируются параметры, что обеспечивает высокую стабильность качества соединений. Кроме этого, проводится неразрушающий контроль сварных соединений с использованием современных систем ультразвукового контроля (УЗК). При выполнении сварочных работ периодически проводятся механические испытания контрольных партий образцов, вырезанных из сваренных кольцевых стыков. Испытания проводятся по методикам, утвержденным нормативными документами, предусмотренными ведомственными и государственными стандартами. Ведомственные стандарты учитывают специфические условия работ при строительстве и обслуживании трубопроводных систем, государственные охватывают более широкие области применения технологий, сварочных материалов.

В последнее десятилетие проводится гармонизация ведомственных и государственных стандартов с международными стандартами. При строительстве сухопутных трубопроводов широко используется международный стандарт API 1104 [1].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт использования технологий КСО при строительстве сухопутных трубопрово-

дов, в частности, результаты всесторонних механических испытаний соединений кольцевых швов из различных сталей, а также неразрушающего контроля (УЗК, рентген-контроля) и операционного контроля параметров режима сварки [2].

Изучение этих данных показывает, что соединения труб, выполненные КСО, отличаются высокими и стабильными показателями по сравнению с другими способами, применяющимися для сварки труб в полевых условиях, что подтверждается публикациями организаций, использующих технологии и оборудование КСО [3]. Анализ имеющихся данных показывает также, что при сварке некоторых партий труб отмечается несовпадение результатов механических испытаний и других видов контроля. При отсутствии каких-либо дефектов по результатам неразрушающего и операционного контроля при испытаниях отдельных образцов на изгиб, наблюдались выпадения показателей ниже допустимых пределов, что приводило к необходимости повторных испытаний.

Целью проведенных исследований было определение причин появления таких выпадений и влияние на них структуры и химического состава стали труб.

Для исследований были взяты кольцевые соединения труб диаметром 1420 мм из стали класса прочности Х60 толщиной стенки 19 мм и стали класса прочности Х70 толщиной стенки 16 мм. Сварка выполнялась на машине К700 с использованием оптимальных режимов, принятых для указанных толщин стенки труб в соответствии с ВСН 006-89 [4]. Всего было исследовано по 18 стыков труб из стали

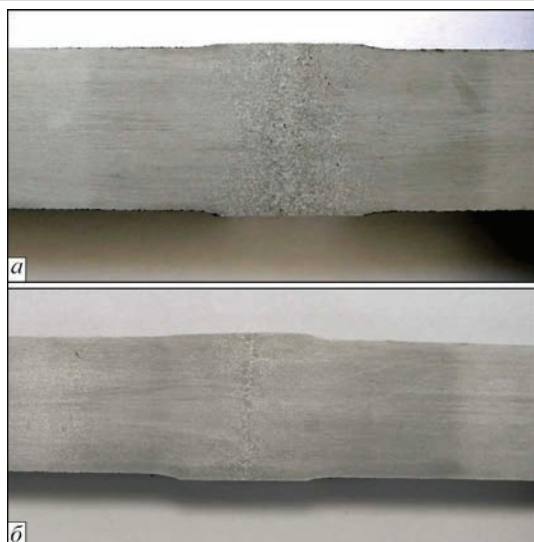


Рис. 1. Макроструктура кольцевых соединений труб из сталей класса прочности X60 (а) и X70 (б)

каждого класса прочности. Механические испытания сварных соединений образцов каждой стали проводились в соответствии с международным стандартом API 1104 [1], а также межгосударственным стандартом ГОСТ 6996–66 [5].

В каждой партии половина образцов испытывалась по стандарту API 1104, вторая — по ГОСТ 6996–66. Результаты механических испытаний сварных соединений приведены в таблице. Механические свойства металла труб имели следующие показатели нормативного предела прочности: трубы класса прочностит X60 — 540 МПа,

трубы класса прочности X70 — 588 МПа. Приводим химический состав металла двух партий труб. Сталь класса прочности X60, мас. %: 0,18 С; 0,42 Si, 1,50 Mn; 0,018 S; 0,014 P; 0,04 Ni; 0,02 Cr; 0,04 Cu. Сталь класса прочности X70, мас. %: 0,07 С; 0,31 Si; 1,53 Mn; 0,004 S; 0,017 P; 0,27 Ni; 0,002 Cr.

Металлографические исследования проводили на световом микроскопе «Неофот-32», анализы химического состава поверхности изломов соединений — на оже-микросзонде JAMP 9500F фирмы «JEOL» (Япония).

На рис. 1 приведены макрошлифы соединений сталей класса прочности X60 и X70. При одинаковой ширине зоны термического влияния (ЗТВ) макроструктура соединений отличается, что обусловлено структурой основного металла труб. В обеих партиях структура основного металла имеет полосчатость. Металл труб из сталей класса прочности X60 (рис. 2, а) имеет по сравнению с металлом труб класса прочности X70 более высокий балл полосчатости 5 согласно ГОСТ 5640. Полосчатость стали класса прочности X70 (рис. 2, б) соответствует баллу 2. Более существенно стали отличаются содержанием неметаллических включений. В стали класса прочности X60 содержание неметаллических включений в полосах проката больше и оценивается баллом 4 по ГОСТ 1778. Цепочки неметаллических включений формируют непрерывные линии (рис. 2, в). В стали класса прочности X70 это отдельные мелкие включения

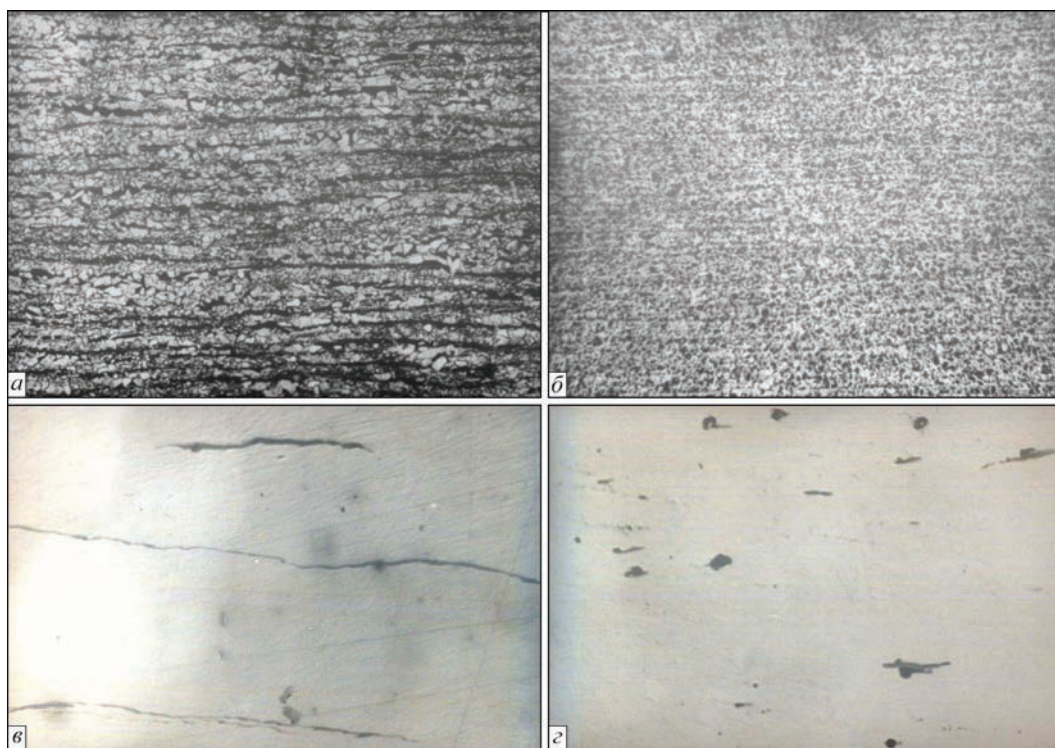


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) основного металла труб из сталей класса прочности X60 (а) и X70 (б); в — цепочки неметаллических включений в стали класса X60 ( $\times 500$ ); г — отдельные мелкие неметаллические включения в стали класса X70 ( $\times 500$ )



Механические свойства кольцевых стыков труб (количество стыков — 9)

Способ оценки	Класс прочности	Предел прочности, МПа	Место разрушения	Испытания на изгиб	
				Угол загиба, град	Качество шва
Испытания по ГОСТ 6996-66	X60	541...563 555	По основному металлу и шву	>70 (7 стыков)	Норма
				<70 (2 стыка)	Брак
	X70	599...619 612	По основному металлу	>70 (8 стыков)	Норма
				<70 (1 стык)	Брак
Испытания по API 1104	X60	547...569 559	– “ –	180	Норма
	X70	589...611 602	– “ –	180	– “ –

не более 3-х баллов (рис. 2, з). По химическому составу включения в обеих сталях представляют собой сульфиды, оксиды и силикаты. Согласно химическому составу металла (таблица) содержание серы в стали труб класса X60 в 3 раза выше, чем в стали класса прочности X70. Это дает основания полагать, что в сегрегационных полосах стали класса прочности X60 преобладают сульфиды марганца. Структура металла по линии соединения и примыкающих к ней участков крупнозернистая (рис. 3, а). Образующаяся структура линии соединения представляет собой полиэдрический феррит. На участке крупного зерна микроструктура представляет собой пластинчатый феррит с упорядоченной второй фазой. Размер первичных зерен аустенита достигает № 2 и № 3 по ГОСТ 5639–82 для соединений труб класса прочности X60 (рис. 3, а) и № 3 и № 4 для соединений труб класса прочности X70 (рис. 3, б).

В металле труб класса прочности X70 отсутствуют строчечные неметаллические включения (рис. 2, з). Это можно объяснить более совершенной технологией производства таких сталей методом контролируемой прокатки.

В таблице приведены результаты механических испытаний сварных соединений, выполненных согласно требованию API 1104 и межгосударственного стандарта ГОСТ 6996–66. Главным отличием ГОСТ 6996–66 от API 1104 является более жесткие испытания образцов сварных соединений на изгиб. Сравнение результатов испытаний показывает, что при испытаниях на растяжение предел прочности соединений труб находится на уровне, соответствующем показателям основного металла указанных сталей. Результаты испытаний сварных соединений на изгиб всех партий образцов по методике API 1104 также соответствуют требованиям этого стандарта. При испытаниях на изгиб партий образцов по методике ГОСТ 6996–66 наблюдались отдельные выпадки показателей ниже допустимого уровня. Это обусловлено появлением трещиноподобных раскрытий (рис. 4, а) и расслоений наружных слоев образцов (рис. 4, б), подвергшихся растяжению при изгибе. В большинстве случаев трещина и последующее расслоение начиналось в местах выхода на поверхность ликва-

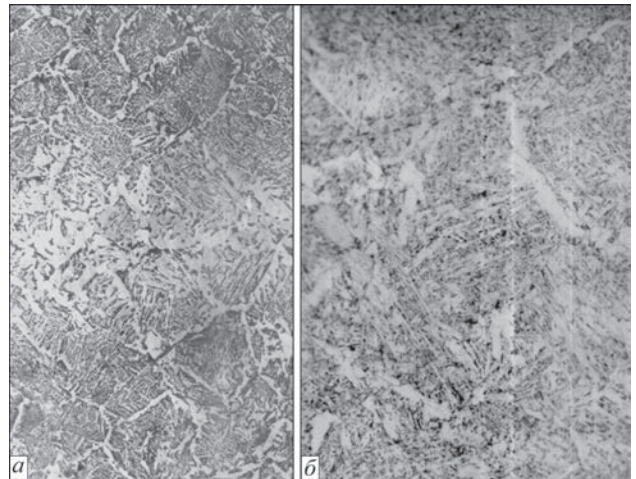


Рис. 3. Микроструктура металла соединения сталей класса прочности X60 (а, ×100) и X70 (б, ×200)

ционных полос и разрушение образца происходило после уменьшения площади сечения образца, если его изгиб продолжался. Зарождение начальной трещины происходило на отдельных участках растягиваемой поверхности в зависимости от ширины ликвационной полосы, выходящей на поверхность образца после его обработки и снятия усиления сварного шва — грата.

Как видно из рис. 5, а [6], угол изгиба волокон и ликвационных прослоек имеет максимальное значение в центре шва и снижается по мере удале-

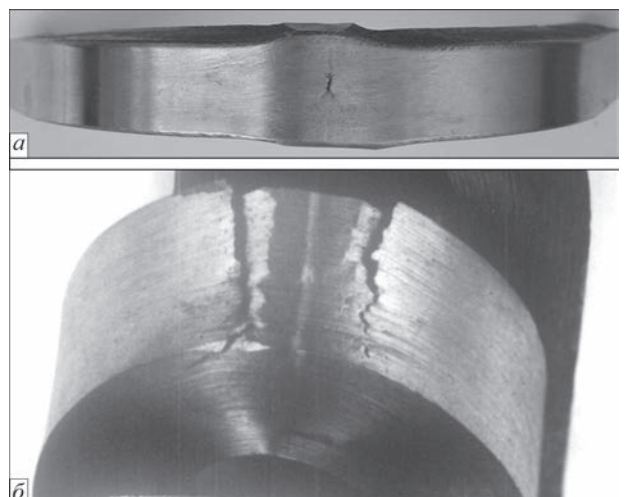


Рис. 4. Дефекты соединений труб, выполненных КСО: трещиноподобное раскрытие (а); расслоение наружного слоя (б)

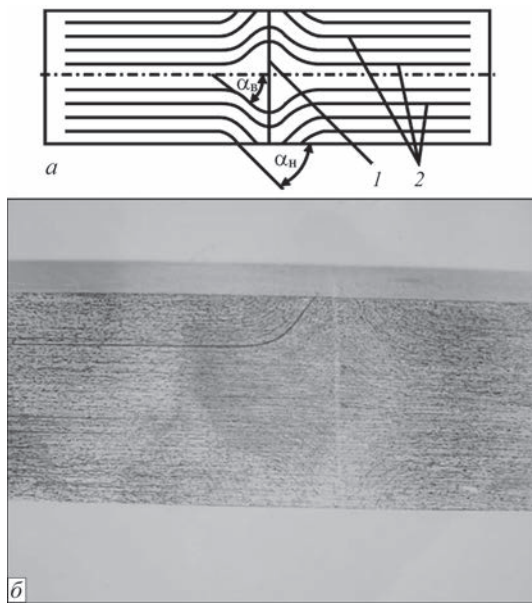


Рис. 5. Схема сварного соединения (а) и место выхода ликвационной полосы на поверхность стенки трубы (б): 1 — линия соединения; 2 — полосы проката;  $\alpha_n$  — угол изгиба полос проката у поверхности;  $\alpha_b$  — угол изгиба полос проката в середине соединения

ния волокон от центра к поверхности листа. При этом максимальная деформация сжатия нагретых приконтактных слоев металла наблюдается в центре сварного шва, а по мере удаления от центра полосы претерпевают сжатие с изгибом, крайние слои испытывают растягивающие напряжения, воздействующие на ликвационные прослойки и снижающие их плотность. В большинстве случаев надрывы и трещины в зоне растяжения поверхностных слоев происходят в местах выхода ликвационных прослоек на поверхность сварных образцов на расстоянии 2...3 мм от центра шва (рис. 5, б). Это обусловлено увеличением толщины сегрегаций в результате «раскрытия» ликвационного слоя при его деформации, а также пониженными механическими свойствами участков с неметаллическими включениями.

Как показывают проведенные исследования, анизотропия механических свойств характерна для основного металла труб из стали класса прочности X60 диаметром 1420 мм производства 1990-х годов.



Рис. 6. Внешний вид образца с трещиной по линии сварки

При исследованиях на разрыв образцов, вырезанных вдоль проката и в направлении, перпендикулярном поверхности проката, отношение  $\sigma_{п.пр}/\sigma_B$  в отдельных случаях составляло  $K = \sigma_{п.пр}/\sigma_B = 0,8$ , где  $\sigma_B$  — прочность металла труб вдоль проката,  $\sigma_{п.пр}$  — прочность металла труб поперек проката. Также имели место низкие показатели ударной вязкости  $KCV$  основного металла этих труб, испытанных по толщине стенки с надрезом, расположенным вдоль направления прокатки. При комнатной температуре минимальные показатели  $KCV$  составляли 32,3 Дж/см<sup>2</sup>, а при температуре минус 20 °С снижались до 14,5 Дж/см<sup>2</sup>.

В некоторых образцах сварных соединений при испытаниях на изгиб наблюдались трещины небольшой протяженности по линии сварки (рис. 6). При этом угол изгиба образцов составлял 180° и состояние шва по наличию и допустимой величине трещин соответствовало требованиям API 1104. При этом такие образцы не отвечали требованию ГОСТ 6996–66. При визуальном осмотре таких образцов, после доведения их до полного разрушения за счет дополнительного изгиба, на поверхности излома обнаруживались участки, где на фоне кристаллического излома имелись участки, отличающиеся от остальной поверхности излома неразвитым рельефом и темной окраской (рис. 7). Такие дефекты в практике контактной сварки получили определение «матовые пятна» (МП) [7]. Степень влияния МП на показания испытаний на изгиб определяется их площадью и местом расположения на плоскости соединения. Если МП расположено на участке, подвергающемся растяжению, то показатели испытаний могут снижаться даже при небольшой площади МП (16...20 мм<sup>2</sup>). При испытаниях на растяжение наличие МП площадью 30...50 мм<sup>2</sup> не влияет на результаты испытаний. При исследовании микроструктуры МП на сканирующем электронном микроскопе установлено, что она носит ямочный характер (рис. 8). В ямках наблюдаются многочисленные мелкие неметаллические включения. По своему составу эти включения не отличаются от неметаллических включений на основе Mn, Si, S и Fe, входящих в состав стали труб класса прочности X60. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что на формирование МП оказывают влияние неметаллические включения, содержащиеся в основном металле труб. Рассматривая различные возможности попадания их в сварное соединение из ликвационных полос, можно предположить, что участок ликвационной полосы при ее деформации может располагаться по плоскости соединения. Это предположение допустимо, если считать, что угол изгиба ликвационных полос при деформации близок к 90°. Подобное формирова-





Рис. 7. МП на поверхности излома

ние структуры в процессе деформации проката рассматривалось в работе [8] применительно к сварке труб трением. Было показано, что снижение пластических свойств обусловлено ориентацией ликвационных полос параллельно плоскости сварки. Как видно из схемы сварного соединения (рис. 5, а), выполненного КСО, угол изгиба даже в центре шва не превышает 30°. Поэтому в соединении при деформации может выйти незначительная часть «материала» ликвационной полосы и ее влияние на формирование шва не будет существенным.

Более вероятным представляется формирование МП из расплава жидкого металла, постоянно обновляющегося на торцах деталей при оплавлении [9]. В работе [10], выполненной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, было показано, что полость в торцах, имитирующая неметаллические включения в металле и заполненная «материалом» ликвационной полосы – неметаллическими включениями, приводит на этом участке поверхности к образованию соединения с дефектом типа МП.

Аналогичное явление возможно, если ликвационная полоса имеет достаточно большой объем. Ее «материал», взаимодействуя с расплавом, который формируется на торцах свариваемых деталей в процессе оплавления перед осадкой, обогащает его на отдельных участках и этим создает условия для образования МП.

При небольших размерах МП до 15 мм<sup>2</sup> существенного влияния на показания механических свойств сварных соединений при испытании на изгиб и растяжение не наблюдается. При большей площади МП показатели испытаний на изгиб снижаются. Следует отметить, что МП крайне редко встречались при испытании соединений из стали класса прочности Х70, а их размеры не превышали 15 мм<sup>2</sup>. В сварных соединениях из стали класса прочности Х60 вероятность появления МП значительно больше, их площадь достигала 30 мм<sup>2</sup>. Это

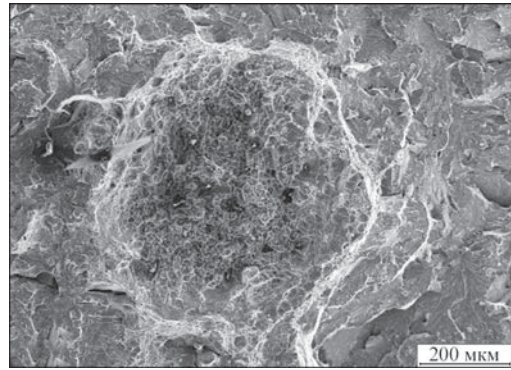


Рис. 8. Микроструктура поверхности излома соединения на участке МП

подтверждает взаимосвязь появления МП с содержанием в стали неметаллических включений. В основном металле стали класса Х60 наблюдаются наиболее крупные сегрегационные полосы, которые содержат сульфиды Mn, образующие хрупкие прослойки в металле. Содержание серы в этой стали почти в 3 раза превышает ее уровень в стали класса прочности Х70.

Из сравнения показателей механических испытаний образцов сварных соединений из сталей класса прочности Х60 и Х70 на изгиб по стандартам API 1104 и ГОСТ 6996–66 видно, что все выпадения ниже нормативных значений приходится на испытания по ГОСТ 6996–66 образцов из стали класса прочности Х60. Это обусловлено принятой схемой вырезки образцов из сварного соединения. При испытаниях по ГОСТ 6996–66 растяжение при изгибе приходится на волокна, примыкающие к наружной или внутренней поверхности трубы, степень их удлинения при одинаковом радиусе изгиба увеличивается с увеличением толщины образца. При испытаниях по методике API 1104 толщина изгибаемого образца остается постоянной, а ширина пропорциональна толщине стенки трубы. Все волокна, независимо от изменения угла изгиба образца сварного соединения, подвергаются одинаковому растяжению. Поэтому результаты испытаний по стандарту API 1104 более объективно отражают пластические свойства металла на разных участках как в плоскости соединения, так и сварного шва в целом. Приведенные данные подтверждают целесообразность применения стандарта API 1104 при оценке уровня механических свойств соединений, выполненных КСО независимо от толщины стенки труб.

При оценке качества соединений по результатам механических испытаний на изгиб необходимо принимать во внимание особенности структуры стали свариваемых труб, наличие в основном металле большого количества сегрегационных включений, особенно сульфидов, которые могут вызывать появление расслоений в образцах при испытаниях.

Появление отдельных трещин и расслоений в образцах при испытании на изгиб и снижение по-

казателей ниже требуемого уровня не могут быть основанием для негативного заключения по всей контрольной партии. Повторные испытания позволяют установить, является ли трещина (или расслоение) единичной на поверхности образца или она обнаруживается на образцах, вырезанных, на других участках соединения.

Наличие отдельных трещин, как приведено в рассмотренном случае, не является браковочным признаком, даже если угол изгиба был ниже нормативных требований. Появление трещин по всей ширине образца или на образце(ах) соседних с ним(и) свидетельствует о необходимости корректировки режимов КСО. При испытаниях на изгиб образцов из сварных стыков стальных труб класса прочности Х60 и Х70 толщиной более 10 мм наличие в изломах МП площадью до 15 мм<sup>2</sup> не следует считать браковочным признаком и основанием для корректировки параметров режима сварки.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие обобщения: при КСО труб в зоне сварного соединения формируются участки со структурной неоднородностью, которые могут стать очагами развития расслоений и трещин при испытании образцов на изгиб; формирование таких участков определяется структурой и объемом сегрегационных полос неметаллических включений в стали и не связано с технологическими параметрами сварки; при сварке современных трубных сталей класса прочности Х70...Х80, отличающихся более высокими требованиями к чистоте, наличие участков структурной неоднородности в сварных швах практически не влияет на результаты механических испытаний; при испытании больших партий образцов на изгиб в некоторых из них наблюдались трещиноподобные раскрытия по центру шва, что было обусловлено образованием на этих участках структурной неоднородности, характеризующейся как «матовые пятна». Установлено, что их химический состав близок к составу неметаллических включений ликвационных полос основного металла. Вероятность появления «матовых пятен» выше при сварке сталей, отличающихся повышенным содержанием неметаллических включений. Если их площадь не превышает 15 мм<sup>2</sup>, они не влияют на результаты механических испытаний исследованных партий образцов сталей класса прочности Х60 и Х70; сравнение результатов испытаний сварных соединений КСО труб из различных сталей показывает, что методика испытаний, предусмотренная стандартом API 1104, позволяет более объективно оценивать свойства соединений труб, отличающихся различным составом сталей и толщиной стенки.

## Список литературы

1. API Standart 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities ASME Boiler and Pressure Vessel, 19 ed., 1999.
2. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.
3. Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П. Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Строительство трубопроводов. – 1988. – № 4. – С. 8–11.
4. ВСН 006-89 Ведомственные строительные нормы. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка: 1989-07-01, Миннефтегазстрой.
5. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Москва: Изд-во стандартов.
6. Пластичность соединений трубных сталей при контактной стыковой сварке / С. И. Кучук-Яценко и др. // Автоматическая сварка. – 1980. – № 2. – С. 1–8.
7. Кучук-Яценко С. И., Швец Ю. В., Швец В. И. Влияние неметаллических включений в трубных сталях класса прочности Х65...Х80 на показатели ударной вязкости сварных соединений, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением // Там же. – 2014. – № 12. – С. 5–10.
8. Dunkerton S. B. Toughness Properties of Friction Welds in Steels // Welding Research. Supplement to the Welding Journal. – 1986. – № 8. – 193-s.–202-s.
9. Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко и др. // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 3–9.
10. Образование матовых пятен в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой / С. И. Кучук-Яценко и др. // Там же. – 1984. – № 11. – С. 23–26.

С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казимов,  
В. Ф. Загадарчук

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## ВПЛИВ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ТРУБ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ КОНТАКТНИМ ЗВАРЮВАННЯМ ОПЛАВЛЕННЯМ

Технологія контактної зварювання оплавленням займає достатнє місце в різних галузях промисловості, в тому числі при зварюванні труб різного призначення. При високій якості з'єднань в цілому ряді випадків спостерігаються випадки показників властивостей. В роботі розглянуті причини таких випадів та їх зв'язок з первинною структурою металу труб. Встановлено, що формування ділянок із структурною неоднорідністю в з'єднаннях обумовлено структурою і обсягом сегрегаційних смуг неметалевих включень в сталі та не пов'язане з технологічними параметрами зварювання. При зварюванні сучасних трубних сталей, отриманих контрольною прокаткою, забезпечуються необхідні механічні властивості з'єднань. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 8.

*Ключові слова:* трубопроводи, контактне зварювання оплавленням, якість з'єднань, неруйнівний контроль, стандарти, механічні випробування, випробування на вигин, розшарування, тріщини, неметалеві включення, ліквацийні смуги, структурна неоднорідність, бракувальні ознаки

Поступила в редакцію 23.02.2017