



УДК 621.791:669.14.018.2/8-194.2

ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ НА ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **В. Ф. ЗАГАДАРЧУК**, инж.,
В. И. ШВЕЦ, **Г. Н. ГОРДАНЬ**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние неметаллических включений (НВ), содержащихся в низколегированных сталях, на формирование соединений при контактной стыковой сварке оплавлением (КССО). Рассмотрены НВ в сталях данного класса, в состав которых входят элементы, не регламентируемые стандартами. Показано, что наличие в стали таких НВ ухудшает ее свариваемость, особенно если в них содержатся элементы, образующие тугоплавкие оксиды. Определены пути совершенствования технологий КССО при сварке сталей с повышенным содержанием НВ.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, режим сварки, низколегированная сталь, легирующий элемент, неметаллическое включение, оксид, свариваемость, соединение, микроструктура, излом, флокграфия

Контактная стыковая сварка оплавлением (КССО) широко используется для соединения проката из низкоуглеродистых и низколегированных сталей (профили, трубы, листы) в заводских и монтажных условиях. Режимы сварки таких изделий регламентированы в различных ведомственных инструкциях и нормативных документах. При их определении обычно принимают во внимание содержание в стали основных легирующих элементов, а также некоторых примесей, в частности, серы и фосфора, содержание которых контролируется. Соединения, выполненные КССО, отличаются стабильными и высокими показателями механических свойств, близкими к соответствующим показателям основного металла. Однако из многолетней практики применения КССО известны случаи, когда при сварке отдельных партий проката, несмотря на отсутствие каких-либо отклонений режимов сварки и химического состава стали от регламентированных значений, не удается получить стабильные показатели механических свойств. Чаще всего это обусловлено наличием неметаллических включений (НВ) в сварных швах.

В современном металлургическом производстве применяются различные методы обработки жидкого металла с использованием шлаков, ферроприсадок, содержащих различные модификаторы и раскислители. В результате их взаимодействия с жидким металлом в нем остаются НВ, содержащие различные элементы, которые не входят в состав легирующих. Их содержание в металле не регламентируется [1].

Целью настоящей работы было исследование влияния НВ в низколегированных сталях на формирование соединений, полученных КССО, и их механические свойства.

Исследования проводили на цельнотянутых трубах нефтегазового сортамента из стали 20, изготовленных на различных предприятиях Украины и России и отличающихся технологией производства. Для сварки были выбраны две партии труб диаметром 168 мм с толщиной стенки 6,5 мм (партия № 1) и диаметром 178 мм с толщиной стенки 10 мм (партия № 2). Сварку труб выполняли на контактной стыковой машине К584 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона, которая серийно выпускается Каховским заводом электросварочного оборудования [2]. Такие машины используются в различных отраслях промышленности, в том числе на предприятиях нефтегазового комплекса для сварки труб диаметром 114...325 мм.

Таблица 1. Параметры режимов сварки труб

№ партии труб	Режим сварки	Время сварки, с	Конечная скорость оплавления, мм/с	Припуск на оплавление, мм	Максимальная потребляемая мощность, кВт·А	Удельное давление осадки, кг/мм ²	Величина осадки, мм	Минимальная скорость осадки, мм/с
1, 2	А (регламентирован ВСН 006–89)	75...80	1,0...1,2	16,5...19,2	76	4,0...5,6	6	25
2	Б (усовершенствованный)	45...50	4,0...4,5	15,0...16,0	304	5,0	7	100

С. И. Кучук-Яценко, В. Ф. Загадарчук, В. И. Швец, Г. Н. Гордань, 2008



Таблица 2. Химический состав стальных труб, мас. %

№ партии труб	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al*	V*	Mo*	Ti*	Nb*	As
1	0,212	0,218	0,60	0,017	0,014	0,03	0,03	<0,02	0,021	<0,02	<0,03	<0,002	0,002	—
2	0,163	0,327	0,52	0,003	0,007	0,11	0,13	0,19	0,010	0,05	0,03	0,002	<0,002	0,01

* Элементы, не регламентируемые ГОСТ.

Таблица 3. Элементный состав НВ в трубных сталях, мас. %

№ партии труб	Al	Si	Mg	S	Mn	O	V	Ca	Примечание
1	0,382	0,421	0,467	0,132	0,659	1,157	Не опр.	Не опр.	Мелкие оксиды железа
	0,278...0,298	0,321...0,464	0,366...0,775	5,584...13,496	10,358...19,304	1,267...13,425	» »	» »	Оксисульфиды железа и марганца
2	8,680...31,183	1,216...23,117	1,969...8,194	0,105...0,421	0,389...1,000	15,263...37,527	0,018...0,059	0,277...6,819	Оксиды системы Al-Si-Mg-Ca
	0,331...0,653	6,672...30,933	0,328...0,731	0,012...0,050	0,484...0,226	10,206...17,722	0,074...0,062	0,074...0,261	Силикаты железа

На первом этапе исследований сварку труб обеих партий проводили на режиме, регламентируемом ведомственным нормативным документом [3]. Основные параметры режима приведены в табл. 1 (режим А). Испытание сварных соединений труб проводили в соответствии с упомянутым выше нормативным документом и международным стандартом API 1104.

Идентификацию и распределение НВ в исследуемых образцах основного металла и сварных соединений проводили на полированных микрошлифах, содержание химических элементов в НВ определяли на микроанализаторе модели SX-50 Camebax фирмы «Самеса». С целью идентификации структурных составляющих основного металла и сварных соединений в исследуемых образцах применяли травление в нитале, а микроструктуру изучали на микроскопе «Неофот-32» при различных увеличениях. Фрактографические исследования поверхности изломов выполняли на растровом микроскопе JSM-840 с микроанализатором «Lynk-Systems».

Содержание регламентированных легирующих элементов в обеих партиях примерно одинаково (табл. 2), а по составу неконтролируемых включений они различаются (табл. 3). В стали партии № 1 присутствуют мелкие глобулярные включения оксидов железа и включения большего размера оксисульфидов марганца и железа (рис. 1, а). Встречаются однородно распределенные в структуре включения оксидов алюминия, окантованные сульфидной фазой. В стали труб партии № 2 оксисульфиды не наблюдаются. В металле

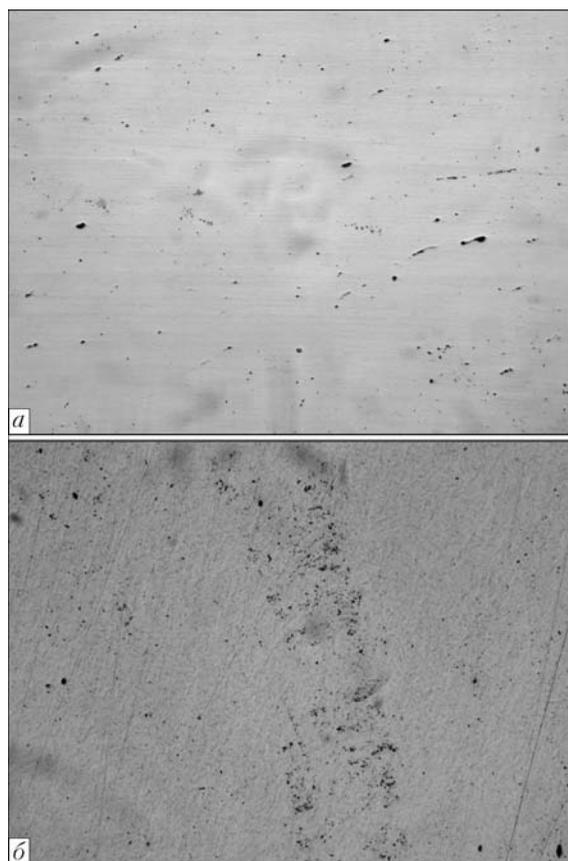


Рис. 1. Неметаллические включения в трубных сталях (X250) партии № 1 (а) и 2 (б)

присутствуют многочисленные частицы сложных оксидов размером порядка 1 мкм, в состав которых входят алюминий, кремний, магний, кальций

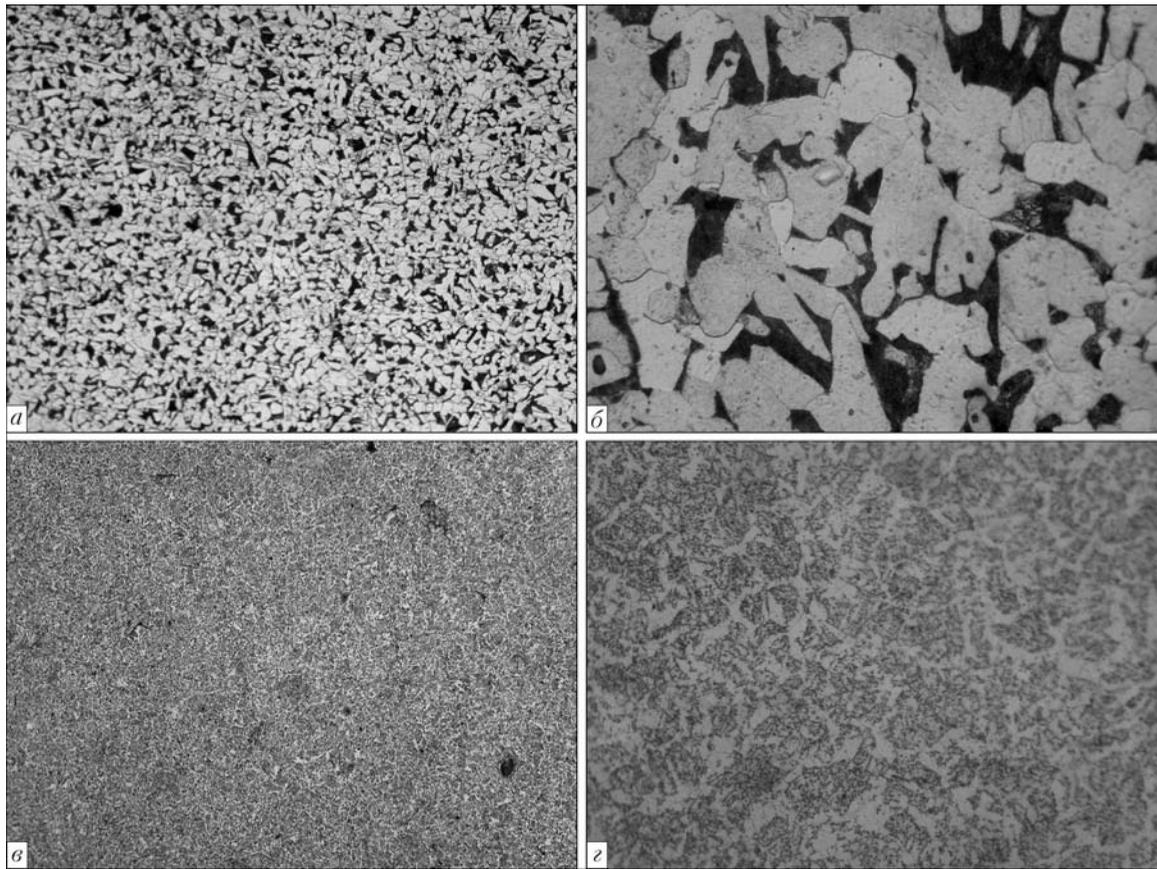


Рис. 2. Микроструктура стали труб партии № 1 (а, б) и 2 (в, г) (а, в — $\times 100$; б, г — $\times 500$)

(рис. 1, б). Частицы наряду с однородным распределением их в объеме образуют также скопления в виде полос. Кроме этих частиц, в стали присутствуют включения силикатов железа с несколько повышенным содержанием элементов, входящих в состав частиц.

Микроструктура сталей труб обеих партий перлитно-ферритная (рис. 2), однако она значительно отличается морфологически. Зерна феррита в стали труб партии № 1 имеют грубую полигональную форму (рис. 2, а, б), между ними расположены колонии перлита. Микроструктура стали труб партии № 2 отличается меньшим размером зерна и состоит из феррита и отпущенных продуктов эвтектоидного распада (рис. 2, в, г).

Ширина ферритной полоски [4] сварного шва труб партии № 2 в 1,5 раза больше, чем в соединениях труб партии № 1 (рис. 3, а, б). При этом протяженность остальных структурных участков металла ЗТВ и размер зерен в них идентичны, что обусловлено одинаковым тепловложением при сварке. На рис. 4, а представлен макрошлиф соединения труб партии № 1, а на рис. 4, б — партии № 2, сваренных на режиме А. Увеличение ферритной составляющей в шве косвенно свидетельствует о более интенсивном зарождении центров кристаллизации феррита, что может быть вызвано присутствием в шве оксидов, в состав которых входят ванадий и алюминий, которые,

как известно [5], относятся к ферритообразующим элементам.

В работе [6] показано, что на формирование структуры в зоне соединения деталей при КССО существенное влияние оказывает состояние расплава жидкого металла, образующегося при оплавлении контактирующих деталей. Формирование качественных соединений возможно при таких параметрах КССО, когда расплав не успевает закристаллизоваться к моменту деформации торцов свариваемых деталей. При этом большая его часть выдавливается из стыка, а часть остается, формируя структуру с ферритной окантовкой по границам зерен. Расплав и соответственно его остатки в сварном шве отличаются повышенным содержанием кислорода. Поэтому металл на участке ферритной полоски в целом имеет пониженные механические свойства по сравнению с соседними участками. Наличие в стали элементов, образующих тугоплавкие оксидные пленки на поверхности расплава, удаление которых в процессе осадки затруднено, приводит к сохранению оксидных плен в структуре шва, формирование которых во многом зависит от содержания оксидных структур в расплаве. При небольшом количестве оксидов образуются отдельные НВ.

В ферритной полоске соединений труб партии № 1 обнаружены отдельные НВ глобулярной формы (рис. 3, а). В швах труб партии № 2 мно-



Таблица 4. Содержание химических элементов в НВ на различных участках соединений труб партии № 2, мас. %

Участок соединения с НВ	Si	Al	Mn	Fe	V	O
Включения в шве (рис. 3, в)	5,482...24,052	0,300...0,826	2,698...26,686	17,792...53,723	0,354...1,066	25,846...36,060
Включения в МП (рис. 5, з)	14,084...31,699	0,655...1,167	15,690...30,428	4,586...22,436	0,584...0,536	28,654...56,919
Пленка непровара (рис. 5, в)	1,054	0,220	0,753	96,076	0,082	1,665

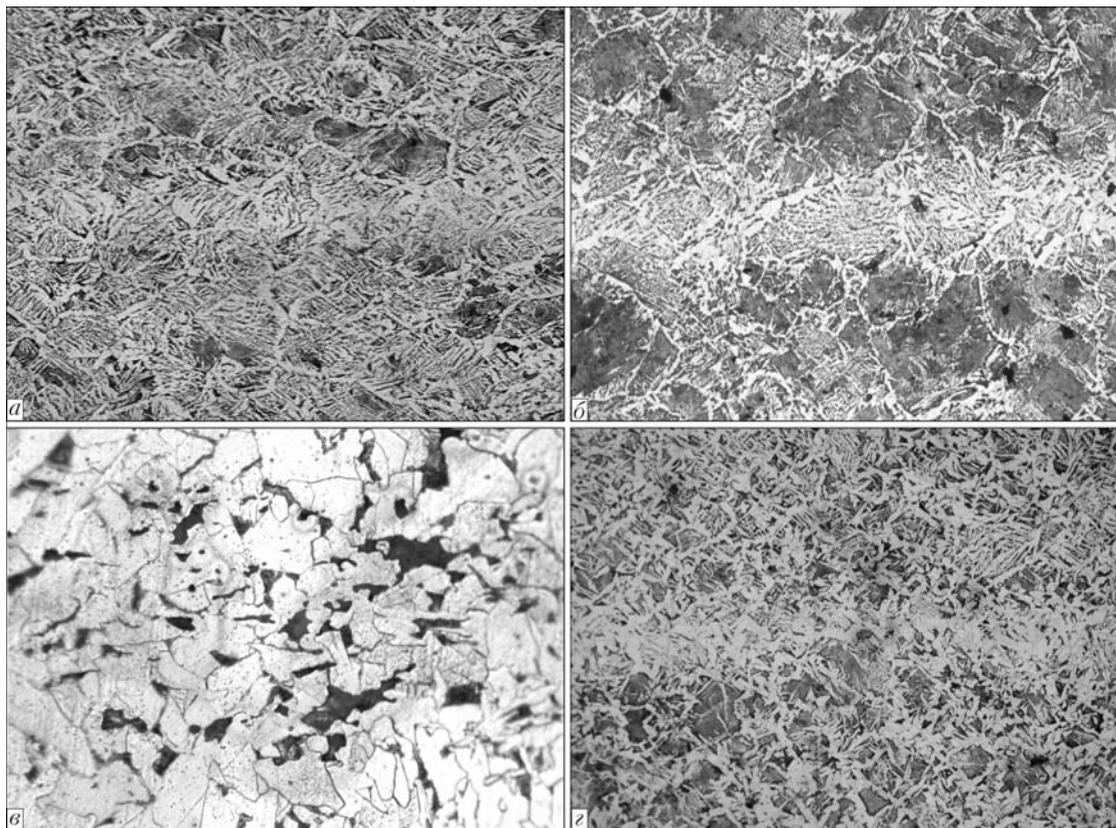


Рис. 3. Микроструктура соединений труб партии № 1 (а) и 2 (б, з); а, б — режим А; в, з — Б (а, б, з — $\times 100$; в — $\times 500$)

Таблица 5. Механические свойства основного металла (ОМ) и соединений труб обеих партий

Режим сварки	№ партии труб	σ_r , МПа		σ_b , МПа		δ , %	
		ОМ	Сварной шов	ОМ	Сварной шов	ОМ	Сварной шов
А	1	$\frac{394...398}{397}$	$\frac{388...391}{390}$	$\frac{559...565}{564}$	$\frac{555...563}{557}$	$\frac{22...24}{23}$	$\frac{21...23}{22}$
	2	$\frac{411...418}{415}$	—	$\frac{543...547}{545}$	$\frac{176...349}{275}$	$\frac{31...33}{32}$	—
Б	2	—	$\frac{408...414}{412}$	—	$\frac{531...537}{534}$	—	$\frac{29...31}{30}$

Окончание табл. 5

Режим сварки	№ партии труб	KCV_{+20} , Дж/см ²		Угол загиба, град	Характер дефектов в изломе
		ОМ	Сварной шов	Сварной шов	
А	1	$\frac{121...153}{150}$	$\frac{30...51}{45}$	120	Дефекты отсутствуют
	2	$\frac{249...263}{259}$	—	$\frac{10...20}{15}$	Оксидные пленки площадью 10...40 мм ² и МП
Б	2	—	$\frac{32...63}{59}$	120	Дефекты отсутствуют



гочисленные выделения НВ расположены не только в плоскости соединения, но и по границам зерен приконтактных участков (рис. 3, б, в). По химическому составу они представляют собой железомарганцевые силикаты, содержащие алюминий и ванадий (табл. 4).

В табл. 5 приведены результаты механических испытаний соединений труб обеих партий, сваренных на режиме А. Показатели испытаний образцов партии № 1 весьма близки к аналогичным показателям испытаний образцов основного металла. Механические свойства соединений труб партии № 2 значительно ниже, чем основного металла. Все образцы этой партии разрушились по зоне соединения — ферритной полоске. При визуальном осмотре на поверхности изломов можно выделить характерные участки, отличающиеся макро- и микроструктурой. На участках, где присутствует металлическая связь, излом имеет крупнокристаллическое строение (рис. 5, а, участок 1). В местах отсутствия кристаллического излома соединение проходит через монолитную оксидную плену (рис. 5, участок 2). При КССО такое соединение классифицируется как непровар и отличается низкой пластичностью и прочностью. В зависимости от химического состава оксидные пленки могут иметь различную окраску, выделяющую их на поверхности излома. В изломах образцов партии № 2 имелись участки, отличающиеся мелкокристаллической структурой (рис. 5, а, участок 3). Фрактографические исследования участков 1–3 показывают, что на участке излома 1 (рис. 5, б) наблюдается характерная для хрупкого разрушения структура транскристаллитного скола. Структура участка излома 2 (рис. 5, в) представляет собой монолитную оксидную плену толщиной более 20...30 мкм с включениями сложных оксидов на силикатной основе. Участок излома 3 характеризуется ямочным изломом. В неглубоких ямках располагаются преимущественно фрагменты разрушенной оксидной пленки, толщина которой не превышает 10...20 мкм (рис. 5, г). Мелкие ямки с небольшими гребнями разрушений свидетельствуют о пластической деформации металла на этом участке в момент зарождения трещины. При визуальном осмотре эти участки поверхности излома независимо от химического состава стали имеют окраску от серой до матовой. В практике КССО их определяют как «матовые пятна» (МП). При небольшой площади МП относительно площади поперечного сечения образцов их влияние на показатели статических испытаний на растяжение сравнительно низкие.

Образцы партии труб № 1 при стандартных механических испытаниях разрушались за пределами плоскости соединения и ЗТВ, поэтому исследования проводили на изломах образцов с надрезами по линии сварки. Анализ полученных дан-

ных показывает, что в изломах образцов партии № 1 обнаружены единичные глобулярные включения, по составу близкие к включениям основного металла. При испытаниях сварных соединений партии № 2 наиболее низкие показатели наблюдались в образцах, где обнаружены оксидные пленки и МП большой площади. В отличие от НВ образцов партии № 1 они формируются в виде протяженных плен в плоскости соединения, площадь которых составляет от 10 до 60 % ее поверхности. В состав оксидных плен, согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (табл. 4), входят, кроме железа и кремния, алюминий и ванадий, которые не являются контролируемыми элементами для этой стали. При этом содержание ванадия в оксидной пленке МП почти в 70...100 раз превышает его среднее содержание в стали. Приведенные данные дают основание полагать, что доминирующее влияние на формирование оксидных плен и МП в сварных швах труб партии № 2 оказывают оксиды, содержащие алюминий, кремний, магний и ванадий в составе стали. Сочетание этих элементов ведет к образованию сложных легкоплавких оксидов, приповерхностный слой расплава которых при сварке содержит тугоплавкие оксидные пленки, из-за которых затрудняется удаление оксидов при осадке. В местах скопления оксидов в стали (см. рис. 1, б) вероятность образования оксидных плен более высокая. При сварке отдельных образцов труб из партии № 2, где содержание ванадия не превышало 0,02 %, были получены соединения без дефектов в плоскости соединения при том же режиме А который был разработан для труб

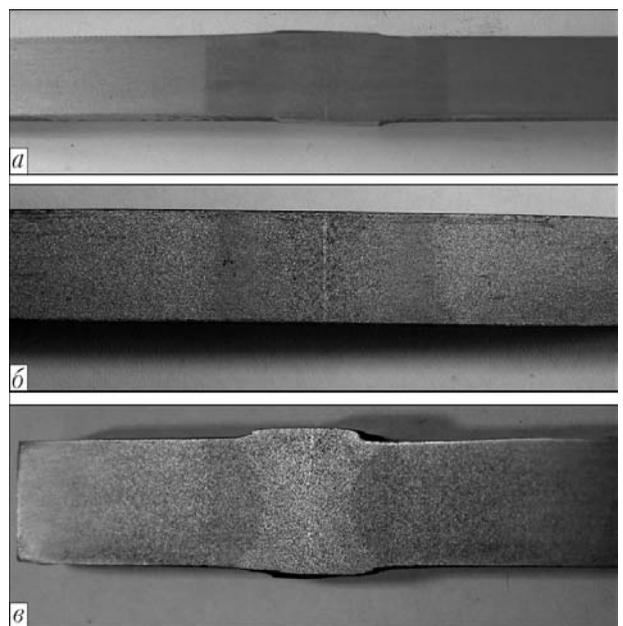


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений труб (×2): а — партия № 1 режим А; б — партия № 2, режим А; в — партия № 2, режим Б

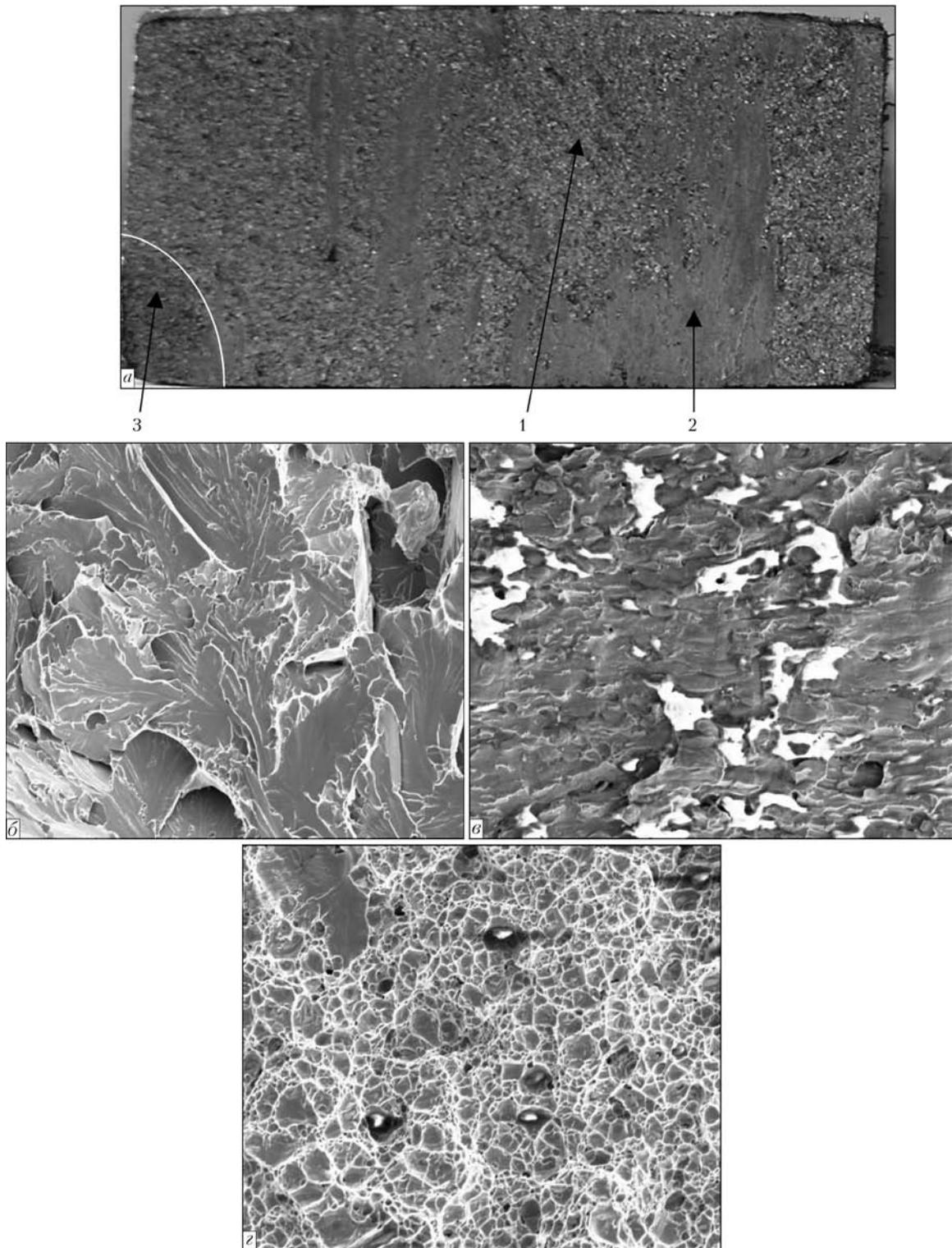


Рис. 5. Поверхность излома ($\times 6$) соединения труб партии № 2, сваренных на режиме А (а) и фрактографическая картина ($\times 300$) на отдельных участках: 1 — крупнокристаллическое строение; 2 — оксидная пленка; 3 — матовое пятно

выпуска 1990-х годов, подобных по химическому составу исследованной партии № 1.

Были проведены работы по усовершенствованию режима А, с учетом сварки труб современного производства, отличающихся большим содержанием НВ. Они были направлены на разработку способов повышения концентрации нагрева при оплавлении приконтактных слоев металла в

сочетании с их скоростной деформацией, обеспечивающих сокращение длительности кристаллизации жидкого расплава на поверхности оплавления и взаимодействия его с воздушной средой искрового промежутка. Это потребовало создания новой системы регулирования процесса оплавления и переоборудования некоторых узлов сварочной машины К584. В результате проведенных ис-



следований разработан режим сварки Б (см. табл. 1), обеспечивающий получение качественных соединений труб партии № 2. По сравнению с режимом А он отличается меньшей длительностью процесса сварки, большей концентрацией энергии при оплавлении, повышенной скоростью осадки. Сварные соединения отличаются меньшей протяженностью ЗТВ (см. рис. 4, в), уменьшением балла зерна и ширины ферритной полосы (см. рис. 3, з). Механические свойства сварных соединений партии № 2 соответствуют нормативным документам, а в изломах отсутствуют дефекты типа оксидных плен (табл. 5 режим Б).

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной адаптивности технологии КССО к изменениям структуры металла свариваемых сталей, в том числе и по содержанию в нем НВ. Однако они не дают оснований для отмены контроля над содержанием НВ в сталях при определении режимов сварки и технологий. Особенно опасно наличие сегрегации включений, представленной на рис. 1, б. При сварке образцов труб на участках, где сегрегация попадала в зону сварных соединений, не удалось получить стабильные показатели механических испытаний даже с использованием усовершенствованного режима сварки Б и последующей термической обработки. В местах выхода сегрегации в зону соединения наблюдались оксидные пленки большой площади. Для получения стабильного качества сварных стыков рассматриваемых сталей ограничение содержания некоторых НВ, в частности, с высокой температурой плавления, представляется наиболее рациональной мерой для конструкций ответственного назначения. Например, снижение содержания ванадия в сталях труб партии № 2 с 0,05 до 0,02 % позволило бы сваривать эти трубы на установленном нормативами режиме А с большими допусками на изменение условий экс-

плуатации без переоснащения и модернизации сварочного оборудования. По такому пути пошли некоторые предприятия нефтегазового комплекса РФ.

Выводы

1. Наличие в углеродистых и низколегированных сталях НВ, содержащих элементы, которые образуют тугоплавкие оксидные структуры, ухудшает их свариваемость при КССО.

2. Режимы сварки указанных сталей, установленные нормативными документами, требуют корректировки в случае повышенного содержания в стали неконтролируемых примесей металлургического производства, особенно содержащих титан, ванадий и кальций.

3. Разработана технология сварки труб исследованных сталей с повышенным содержанием НВ, обеспечивающая получение механических свойств сварных соединений, соответствующих нормативным требованиям.

4. При изготовлении деталей ответственного назначения целесообразно ввести контроль проката, поступающего на сварку, для определения в нем локальных сегрегаций НВ.

1. Калинин Е. С. Хладостойкая низколегированная сталь. — М.: Металлургия, 1976. — 288 с.
2. Контактная сварка трубопроводов / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. А. Сахарнов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 180 с.
3. ВСН 006–89. Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Сварка. — М.: Миннефтегазстрой, 1989. — 55 с.
4. Особенности образования ферритной полосы при сварке давлением / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 6. — С. 11–17.
5. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1983. — 359 с.
6. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.

Influence of nonmetallic inclusions (NMI) contained in low-alloyed steels on joint formation in flash-butt welding was studied. NMI based on chemical elements not belonging to alloying elements of this steel class and defined as endogenous impurities were considered. It is shown that the presence of such NMI in steel impairs its weldability, particularly if they contain elements forming refractory oxides. Ways of improvement of flash-butt welding technologies for joining steels with an increased NMI content were determined.

Поступила в редакцию 10.12.2007