

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ СВАРОЧНЫХ ШЛАКОВ И РАСПЛАВОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Михайлицын С.В.¹, к.т.н., доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» (svmikhaylitsyn@mail.ru)

Шекшеев М.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» (shecsheev@yandex.ru)

Платов С.И.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» (psipsi@mail.ru)

Емелюшин А.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры «Машины и технологии обработки давлением и машиностроения» (emelushin@magtu.ru)

Наумов С.В.², к.т.н., доцент кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» (naumovstanislav@yandex.ru)

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Россия, г. Магнитогорск, Челябинская обл., пр. Ленина, 38)

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

Аннотация. Приведены данные по исследованию вязкости расплавов сварочных шлаков и электродных покрытий по известной методике с помощью вращающегося электровязкометра, работающего по принципу вращающихся коаксиальных цилиндров. Внешним неподвижным цилиндром служил молибденовый тигель с внутренним диам. 20 и высотой 70 мм, заполняемый исследуемым материалом. Внутренним вращающимся цилиндром служила молибденовая головка диаметром и высотой по 10 мм, насаженная на вращаемый молибденовый шпиндель диам. 4 мм. Для изучения вязкости расплавов использовали покрытия электродов, предварительно прокаленные при 1000 °С в течение 30 – 45 мин с целью исключения вспенивания в процессе плавления, и шлаки, полученные в процессе сварки электродами на рекомендуемых режимах. В результате проведенных исследований сварочных электродов с различными видами покрытий определена вязкость жидких сварочных шлаков ($\eta_{ж}$) и расплавов покрытий электродов ($\eta_{п}$). Анализ результатов исследований проводили на полимерах вязкости расплавов покрытий и шлаков, построенных по экспериментальным данным. Температуру начала и интенсивной кристаллизации, расчет энергии активации вязкого течения выполняли по зависимости логарифма вязкости от обратной температуры расплава. Выявлено, что с точки зрения влияния на перенос электродного металла и формирование шва в процессе сварки наиболее интересны физические свойства расплавов покрытий и шлаков при температурах начала кристаллизации и выше. Минералогический состав и температурные зависимости вязкости расплавленных сварочных шлаков основного вида играют главную роль в обеспечении сварки сверху вниз со сквозным проплавлением корня шва. Электроды с основным видом покрытия для сварки сверху вниз характеризуются сварочными шлаками, имеющими наибольшую истинную вязкость при температуре начала кристаллизации в гомогенной области и высокую энергию активации вязкого течения расплавов. Технологические возможности электродов при сварке определяются «потенциалом технологичности», выражаемым разницей физических свойств расплавов «первичных» и «вторичных» шлаков одних и тех же электродов. Чем выше «потенциал технологичности» по величине и шире номенклатура параметров, его определяющих, тем легче осуществить сварку сверху вниз. При разработке новых основных электродов для сварки сверху вниз принципиально возможен ряд вариантов повышения «потенциала технологичности» путем достижения необходимого минералогического состава сварочных шлаков. С этой целью необходимо снижение содержания фтора, повышение содержания оксидов MnO, FeO и Fe₂O₃, частичная замена SiO₂ на TiO₂ и K₂O на Na₂O, целесообразно определенное замещение CaO на оксиды FeO и MnO.

Ключевые слова: электрод, сварка, шлак, покрытие, корень шва, обратный валик, расплав, вязкость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-280-287

При строительстве магистральных трубопроводов для транспортировки газа и нефти применяют трубы диам. до 1420 мм с толщиной стенки до 26 мм [1]. В качестве материала для труб используют высокопрочные низкоуглеродистые, низколегированные стали классов прочности K56 – K70 [2, 3]. В сложившейся практике для сварки неповоротных стыков обычно применяют электроды с основным или целлюлозным видами покрытий [4,5].

При сварке корневого слоя электродами с целлюлозным покрытием обеспечивается требуемое проплавление кромок стыкового соединения с образованием обратного валика во всех пространственных положениях. Однако целлюлозные электроды из-за насыщения свариваемого металла водородом имеют определенные ограничения. Поэтому целесообразнее применять низкоуглеродистые электроды с основным видом покрытия. Но при сварке основными электродами, как пра-

вило, не удастся обеспечить устойчивое проплавление корня шва. В связи с этим предусматривается подварка корня шва изнутри, что иногда выполнить практически невозможно.

Значительный практический интерес представляют принципиально новые электроды с основным видом покрытия, сочетающие в себе преимущества целлюлозных электродов в плане производительности сварки сверху вниз и проплавляющего действия и основные электроды в плане обеспечения высокого качества металла шва.

Основную роль в обеспечении сварки сверху вниз играют физические свойства жидких шлаков и расплавов покрытий электродов, которые обеспечивают получение необходимых сварочно-технологических показателей электродов [6].

Целью настоящей работы является исследование вязкости сварочных шлаков и электродных покрытий и их влияния на формирование корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов.

Для выявления роли шлаковой защиты при сварке сверху вниз были исследованы физико-химические свойства покрытий и сварочных шлаков трех групп электродов (А, Б, В).

Группа А – традиционные электроды с основным видом покрытия, пригодные для сварки во всех пространственных положениях, кроме сверху вниз. Подгруп-

па А' – электроды с плохим формированием обратного валика при сварке корневого слоя шва стыкового соединения (УОНИ-13/55, Е-В121, Fox EV50), подгруппа А'' – электроды, обеспечивающие формирование обратного валика (LB52U).

В группу В вошли универсальные электроды с основным видом покрытия, т.е. позволяющие осуществлять сварку как снизу вверх, так и сверху вниз. В подгруппу Б' включены электроды, позволяющие в принципе проводить сварку сверху вниз на вертикальной плоскости, но не гарантирующие образование обратного валика при сварке корневого слоя шва стыкового соединения (ВСФС-50, LB 26V), а в подгруппу Б'' вошли специальные электроды, обеспечивающие сварку сверху вниз, в том числе корневого слоя шва с образованием обратного валика (Philips 27P, LB86VS).

В группу В вошли целлюлозные и другие электроды на рутиловой шлаковой основе (ВСЦ-4, ОЗС-4, В-14).

При исследовании покрытий электродов и сварочных шлаков были приняты понятия «первичный» и «вторичный» шлаки. Под «первичным» шлаком подразумеваем расплав покрытия электрода, а под «вторичным» – переплавленный в процессе экспериментов сварочный шлак. При этом считаем, что реальный сварочный шлак по своим свойствам находится между «первичным» и «вторичным» шлаками. Оксидный состав исследуемых сварочных шлаков приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Оксидный состав сварочных шлаков

Table 1. Oxide composition of welding slags

Группа электродов	Марка электродов	Вид покрытия	Содержание оксидов в шлаках, % (по массе)											
			CaO _(общ.)	SiO ₂	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	F	
А'	УОНИ-13/55	Основной	43,8	22,8	3,0	4,0	–	4,9	0,7	1,6	0,69	2,13	10,60	
	Е-В121		38,2	20,9	6,4	9,0	1,1	4,8	0,5	0,9	1,81	1,42	11,20	
	Fox EV50		40,5	18,5	6,8	7,2	0,9	4,3	0,8	0,6	1,14	1,64	12,50	
А''	LB52U		41,0	28,7	6,5	5,0	0,2	4,5	0,7	4,4	1,81	1,11	2,80	
Б'	ВСФС-50		28,6	22,0	8,5	8,0	0,65	7,4	11,0	4,0	0,19	2,40	3,40	
	LB26V		52,5	27,5	1,8	3,4	2,0	4,3	0,9	1,8	0,19	2,06	3,40	
Б''	Philips 27P		34,0	21,4	13,0	7,8	1,8	9,3	0,8	1,8	0,24	2,13	1,60	
	LB86VS		48,4	26,4	3,3	4,8	1,6	5,4	0,7	1,6	0,12	2,06	3,40	
В	ВСЦ-4		Целлюлозный	7,2	19,0	34,8	13,5	2,3	11,2	4,6	1,4	1,39	4,02	0,06
	ОЗС-4		Рутиловый	3,3	18,0	33,0	14,5	4,0	14,0	3,1	5,6	2,94	1,37	0,16
	В-14	Ильменитовый	8,8	18,0	31,0	13,6	3,6	13,7	2,0	3,4	1,37	1,81	0,10	

П р и м е ч а н и е: Подгруппы электродов, обозначенные одним штрихом – электроды с плохим формированием обратного валика при сварке корневого слоя шва стыкового соединения, или электроды, позволяющие в принципе производить сварку сверху вниз на вертикальной плоскости, но не гарантирующие образование обратного валика при сварке корневого слоя шва стыкового соединения; подгруппы электродов, обозначенные двумя штрихами – электроды, обеспечивающие формирование обратного валика, или специальные электроды, обеспечивающие сварку сверху вниз, в том числе корневого слоя шва с образованием обратного валика.

При изучении вязкости расплавов использовали покрытие электродов, предварительно прокаленные при 1000 °С в течение 30 – 45 мин с целью исключения вспенивания в процессе плавления, и шлаки, полученные в процессе сварки электродами на рекомендуемых режимах.

Исследования выполняли по известной методике с помощью вращающегося электровязкозиметра, работающего по принципу вращающихся коаксиальных цилиндров [6]. Схема электровязкозиметра представлена на рис. 1. Внешним неподвижным цилиндром служил

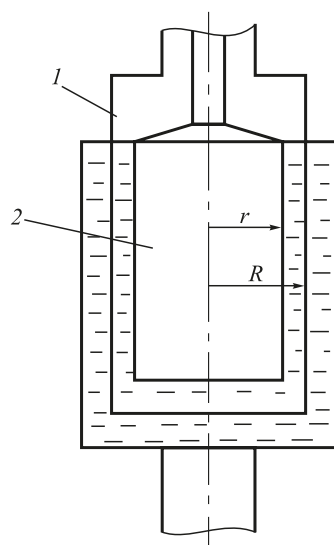


Рис. 1. Принципиальная схема электровязкозиметра: 1 – внешний цилиндр; 2 – внутренний цилиндр

Fig. 1. Schematic diagram of an electroviscosimeter: 1 – outer cylinder; 2 – inner cylinder

молибденовый тигель с внутренним диам. 20 и высотой 70 мм, заполняемый исследуемым материалом. Внутренним вращающимся цилиндром служила молибденовая головка диам. 10 и высотой 10 мм, насаженная на вращаемый молибденовый шпиндель диам. 4 мм.

По изменению нагрузки на валу электродвигателя при вращении молибденовой головки судили об изменении вязкости расплава.

Предварительную градуировку установки осуществляли по касторовому маслу, вязкость которого изучена в пределах от 0,1 до 3,76 Па·с [7]. Плавление сварочных шлаков и покрытий электродов и измерение их вязкости осуществляли в печи сопротивления Таммана. Температуру измеряли платинородиевой термопарой ПР 30/6. Для защиты расплава от взаимодействия с воздухом подавали аргон в плавильное пространство печи.

Эксперименты проводили исходя из предположения о достижении гомогенного состояния расплавов, понижая температуру со скоростью 2 – 3 °С/мин до температуры, при которой вязкость расплава соответствовала 4 Па·с. Далее охлаждение вели до полной остановки шпинделя в расплаве. Температуру остановки шпинделя условно принимали за температуру начала плавления (конца кристаллизации $T_{к.к}$).

По экспериментальным данным строили политермы вязкости расплавов покрытий и шлаков (рис. 2, а, б), из которых видно, что политермы вязкости «первичных» шлаков занимают несколько более широкий температурный диапазон, чем «вторичных». В свою очередь, сварочные шлаки основных электродов для сварки сверху вниз характеризуются более плавным изменением вязкости при снижении температуры, при этом вязкость начинает возрастать при более высоких тем-

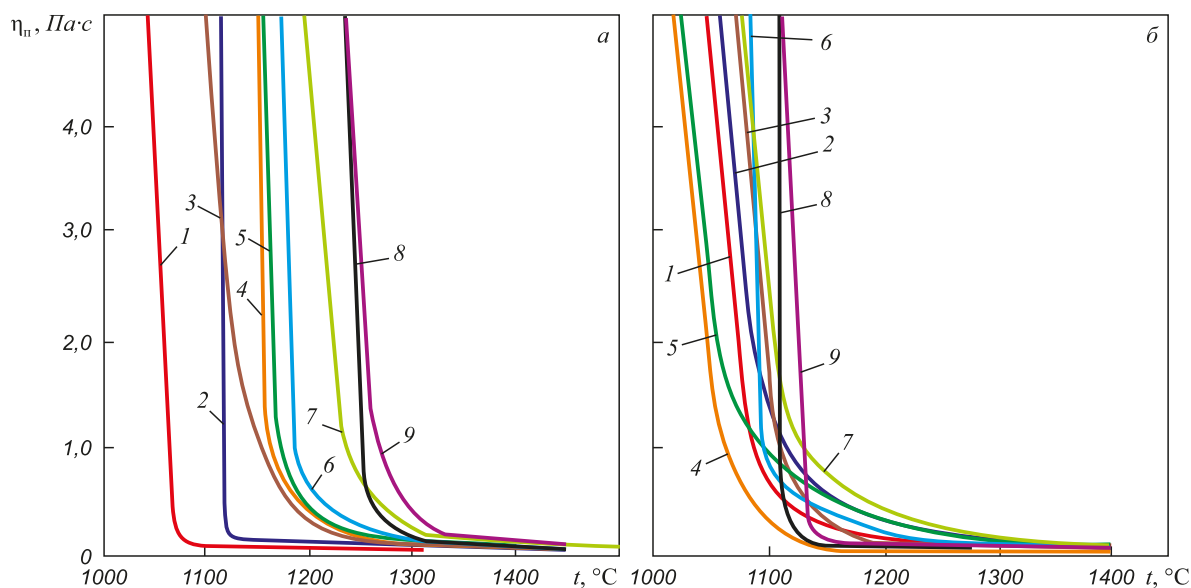


Рис. 2. Зависимость вязкости покрытий электродов (а) и сварочных шлаков (б) от температуры расплава: 1 – Fox EV50; 2 – LB86VS; 3 – ВСЦ-4; 4 – В-14; 5 – Philips 27P; 6 – LB52U; 7 – LB26V; 8 – УОНИ-13/55; 9 – ОЗС-4

Fig. 2. Dependence of viscosity of electrode coatings (a) and welding slags (b) on temperature of melt: 1 – Fox EV50; 2 – LB86VS; 3 – VSC-4; 4 – B-14; 5 – Philips 27P; 6 – LB52U; 7 – LB26V; 8 – UONI-13/55; 9 – OZS-4

пературах, чем у сварочных шлаков электродов других типов. Для «первичных» шлаков такая зависимость не обнаружена.

Для определения температур начала ($T_{н.к}$) и интенсивной кристаллизации ($T_{и.к}$), а также для расчета энергии активации вязкого течения температурную зависимость вязкости расплавов представляли в виде зависимостей логарифма вязкости от обратной температуры (рис. 3, а, б).

Высокотемпературный перелом прямой принят за начало кристаллизации расплава, а другой, как правило, более резкий перегиб – за точку интенсивной кристаллизации.

Точки излома экспериментальной прямой определяли расчетным путем. Для этого методом наименьших квадратов [8] находили уравнение каждого отрезка ломаной прямой, имеющих вид

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где y – логарифм вязкости расплава, Па·с; x – обратная температура расплава, K^{-1} ; a и b – коэффициенты.

Коэффициенты a и b рассчитывали из системы уравнений [8]

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i, \end{cases} \quad (2)$$

где x_i и y_i – координаты точек отрезка ломаной прямой;

$\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$; n – количество точек на отрезке.

Решая систему уравнений для двух отрезков ломаной прямой, определяли точку их пересечения.

Энергию активации вязкого течения определяли по тангенсу угла наклона отрезка прямой при температуре выше температуры начала кристаллизации [9].

Согласно экспоненциальной формуле Я.И. Френкеля [10] имеем

$$\eta = A \exp\left(\frac{E_\eta}{RT}\right), \quad (3)$$

где η – вязкость расплава, Па·с; A – постоянный коэффициент, зависящий от состава и строения расплава; E_η – энергия активации вязкого течения, Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Энергию активации вязкого течения можно представить в виде [9]

$$E_\eta = R \left(\frac{\ln \eta_1 - \ln \eta_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \right). \quad (4)$$

В табл. 2 представлены значения вязкости и температуры в точках перегибов зависимостей $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$,

а также энергия активации расплавов покрытий электродов и сварочных шлаков. Видно, что кристаллизация расплавов покрытий исследуемых электродов и расплавов сварочных шлаков начинается при температурах ниже температуры плавления стали [11]. Поэтому с точки зрения влияния на перенос электродного металла и формирование шва в процессе сварки

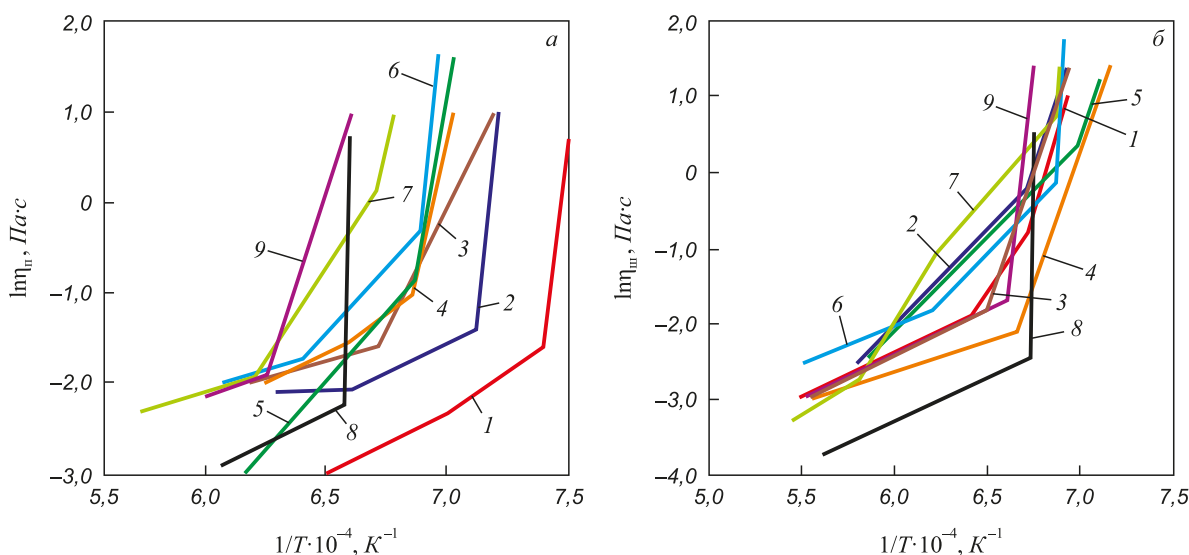


Рис. 3. Зависимость логарифма вязкости покрытий электродов (а) и сварочных шлаков (б) от обратной температуры расплава: 1 – Fox EV50; 2 – LB86VS; 3 – ВСЦ-4; 4 – В-14; 5 – Philips 27P; 6 – LB52U; 7 – LB26V; 8 – УОНИ-13/55; 9 – ОЗС-4

Fig. 3. Dependence of the logarithm of viscosity of electrode coatings (a) and welding slags (б) on the reciprocal temperature of melt: 1 – Fox EV50; 2 – LB86VS; 3 – VSC-4; 4 – B-14; 5 – Philips 27P; 6 – LB52U; 7 – LB26V; 8 – UONI-13/55; 9 – OZS-4

Температурные характеристики и энергия активации вязкого течения расплавов покрытий электродов и сварочных шлаков

Table 2. Temperature characteristics and activation energy of melts viscous flow for electrode coatings and welding slags

Группа электродов	Марка электродов	$T_{н.к}$, К	η при $T_{н.к}$, Па·с	$T_{и.к}$, К	η при $T_{и.к}$, Па·с	$T_{к.к}$, К	E_{η} , кДж/моль
Покрyтия электродов							
<i>A'</i>	УОНИ-13/55 Fox EV50	1524	0,11	1524	0,11	1475	121,0
		1410	0,12	1350	0,21	1245	115,5
<i>A''</i>	LB52U	1575	0,18	1465	0,69	1335	61,4
<i>B'</i>	LB26V	1620	0,21	1495	1,20	1445	118,7
<i>B''</i>	Philips 27P LB86VS	1577	0,07	1456	0,43	1315	95,0
		1522	0,13	1403	0,25	1335	62,4
<i>B</i>	BCЦ-4 ОЗС-4 Б-14	1490	0,21	1490	0,21	1155	66,5
		1600	0,17	1600	0,17	1470	76,0
		1520	0,22	1460	0,35	1335	90,4
Сварочные шлаки							
<i>A'</i>	УОНИ-13/55 Fox EV50	1485	0,09	1485	0,09	1470	88,8
		1560	0,14	1490	0,40	1390	81,1
<i>A''</i>	LB52U	1610	0,16	1460	0,85	1330	69,3
<i>B'</i>	LB26V	1720	0,065	1460	1,90	1370	158,4
<i>B''</i>	Philips 27P LB86VS	1435	1,395	1435	1,395	1300	208,4
		1489	0,74	1489	0,74	1375	198,9
<i>B</i>	BCЦ-4 ОЗС-4 Б-14	1535	0,17	1535	0,17	1280	68,2
		1515	0,18	1515	0,18	1415	62,8
		1500	0,12	1500	0,12	1210	41,6

наиболее интересны физические свойства расплавов покрытий и шлаков при температурах начала кристаллизации и выше.

Для всех без исключения «первичных» шлаков исследуемых электродов при $T_{н.к}$ характерны близкие значения вязкости в диапазоне 0,07 – 0,22 Па·с.

В.В. Подгаецкий указывает [12], что при одинаковых условиях основные оксиды (типа R_2O и RO) снижают вязкость расплава, а кислотные (типа RO_2 и R_2O_3) повышают ее. Это обуславливается тем, что основные оксиды при растворении в расплаве образуют небольшого размера катионы и уменьшают размеры анионов, что вызывает снижение вязкости.

Вязкость гетерогенных шлаков при переходе в исследуемое гомогенное состояние понижается при введении компонентов, которые способствуют образованию легкоплавких соединений, вследствие изменения растворимости тугоплавких составляющих шлака (CaO , MgO , Cr_2O_3) [13, 14]. Для основных гомогенных шлаков компонентами, понижающими вязкость, служат CaF_2 и Al_2O_3 .

Разжижающее действие плавикового шпата и других соединений фтора хорошо известно [15 – 19]. Это справедливо и для сварочного производства, поскольку плавление электрода и кристаллизация металла свар-

ного шва происходят за короткий промежуток времени (несколько секунд), и фтор, находящийся в компонентах покрытия, не успевает улетучиться в атмосферу при их расплавлении.

Как видно из табл. 2, среди «первичных» шлаков электродов основного вида наименьшей вязкостью при $T_{и.к}$ обладают расплавы покрытий электродов подгруппы *A'*, содержащие небольшое количество соединений фтора.

Однозначной зависимости параметра E_{η} расплавов покрытий от вида и назначения электродов не прослеживается.

Анализ данных по «вторичным» шлакам (табл. 1 и 2) показывает, что минимальная вязкость так же, как и для «первичных» шлаков, характерна для расплавов сварочных шлаков, содержащих наибольшее количество фтора (электроды марок УОНИ-13/55, Fox EV50). Этим, очевидно, объясняется невозможность сварки такими электродами способом сверху вниз.

Различия в значениях $T_{н.к}$ для основных «вторичных» шлаков весьма значительны, а для электродов подгруппы *B''* эта температура минимальна. При этом вязкость на порядок выше, чем у расплавов сварочных шлаков остальных электродов. Столь высокая вязкость в гомогенной зоне расплава свидетельствует о высоком

значении истинной вязкости шлаков для электродов подгруппы *B''* [13, 14], характеризующей энергию активации движения молекул внутри однородной жидкой фазы. Об этом свидетельствуют и значения E_{η} , которые более чем в 2 раза выше таковых для шлаков других электродов. Поэтому логично предположить, что высокие значения η и E_{η} расплавов сварочных шлаков в гомогенной зоне определяют возможность сварки электродами способом сверху вниз и способствуют формированию обратного валика при сварке корневого слоя шва.

Высокую вязкость расплавов сварочных шлаков электродов группы *B* можно объяснить за счет снижения содержания соединений фтора и повышения содержания Fe_2O_3 [13, 14]. Вступление оксида Fe_2O_3 в соединение с CaO снижает вязкость шлаковой системы как и FeO и MnO . При этом вязкость исследуемых расплавов возрастает по мере снижения отношения содержания оксидов типа RO к оксидам типа RO_2 , т.е. с повышением кислотности шлака, что согласуется с литературными данными [12, 19 – 23].

Таким образом, главным отличием электродов с основным покрытием, способных к качественной сварке способом сверху вниз (подгруппа *B''*), является высокая истинная вязкость расплавов сварочных шлаков при $T_{н.к}$, т.е. в гомогенной области, при высокой энергии активации вязкого течения.

Следовательно, при разработке новых электродов с основным видом покрытия, обеспечивающих стабильное образование обратного валика при сварке сверху вниз корневого слоя шва, наиболее перспективным является получение сварочного шлака с низким содержанием фтора и высоким содержанием оксида Fe_2O_3 , а также с частичной заменой CaO на FeO и MnO , а SiO_2 – на TiO_2 .

Выводы. Различия в физических свойствах сварочных шлаков и более размытые границы этих свойств для покрытий электродов, а также определенные закономерности в получении близких свойств шлаков электродов одной группы независимо от их конкретного минералогического состава, определяемого кинетикой кристаллизации шлаков, указывают на существование различий в свойствах шлаков и покрытий для одних и тех же электродов. По-видимому, чем значительнее различия свойств двух предельных состояний шлака («первичного» и «вторичного»), тем шире технологические возможности электродов при сварке. Поэтому для оценки универсальности электродов определена степень этих различий, выражаемая абсолютным изменением значений физических свойств расплавов сварочных шлаков по отношению к значениям физических свойств расплавов покрытий электродов и названная «потенциал технологичности». Среди электродов с основным видом покрытия наибольший «потенциал технологичности» по номенклатуре свойств в целом имеют электроды подгруппы *B''*, чем, очевидно,

объясняется возможность сварки этими электродами способом сверху вниз, в том числе корневого слоя шва со сквозным проплавлением [24, 25]. Высокие сварочно-технологические свойства целлюлозных электродов марки ВСЦ-4 при низком «потенциале технологичности» определяются, очевидно, металлургическими особенностями высоководородистых покрытий и иным, чем у основных электродов, механизмом проплавления. Таким образом, при разработке новых электродов с основным видом покрытия, обеспечивающих гарантированное проплавление корневого слоя шва при сварке сверху вниз [26], необходимо получить высокий «потенциал технологичности», в частности, стремиться к снижению вязкостных свойств расплавов покрытий, одновременно добиваясь получения сварочного шлака с высокой вязкостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A., Mazur I.P., Platov S.I., Sychkov A.B. The research on surface properties of welding slags and electrode coatings // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 724 – 730.
2. Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vyshemirskii E.M. Special features of the evaluation of the weldability of low-carbon high-strength pipe steels // Welding International. 2011. Vol. 25. No. 10. P. 777 – 783.
3. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Ramus' A.A., Ramus' R.O. Control of softening processes in the heat-affected zone during welding of high-strength steels // Metal Science and Heat Treatment. 2016. Vol. 58. No. 7-8. P. 435 – 441.
4. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Нефтегазовое строительство. – М.: ОМЕГА-Л, 2010. – 774 с.
5. Сварка трубопроводов: Учебн. пособие / Ф.М. Мустафин, Н.Г. Блехерова, О.П. Квятковский и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 350 с.
6. Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б. Проектирование сварочных электродов для нефтегазового комплекса. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2016. – 182 с.
7. Техника и технологии производства и переработки растительных масел: Учебн. пособие / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. – 96 с.
8. Балдин К.В., Башлыков В.Н., Рукосуев А.В. Высшая математика: Учебник. – М.: Флинта: НОУ ВПО «МПСиИ», 2010. – 360 с.
9. Доронин Ю.В. Гидродинамические явления в сварочной ванне и их влияние на формирование обратной стороны шва при односторонней сварке // Сварка и диагностика. 2010. № 5. С. 14 – 20.
10. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
11. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. 8-е изд. перераб. и испр. – М.: ООО «Издательство «Оникс»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.
12. Физико-химические исследования оксидов и шлаковых систем / Б.Р. Гельчинский, Э.В. Дюльдина, В.Н. Селиванов, Д.К. Белашенко. – М.: Изд-во ООО «Физматлит», 2016. – 136 с.
13. Родзевич А.П. Физико-химические основы металлургических процессов: Учебн. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 298 с.
14. Зборщик А.М. Металлургия стали: конспект лекций. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2008. – 238 с.
15. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахпазов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. – М.: Интерконтат Наука, 2008. – 352 с.
16. Есаулов Г.А., Гасик М.И., Горобец А.П., Климчик Ю.В. Исследование влияния фторида кальция на энерготехнологические

- показатели обработки колесной стали на установке ковш-печь // Электromеталлургия стали и ферросплавов. 2014. № 2. С. 51 – 57.
17. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. Учебник для вузов. 6-изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 768 с.
 18. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.П. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.
 19. Зборщик А.М. Теоретические основы металлургического производства: конспект лекций. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2008. – 189 с.
 20. Petetskii V.N. Effect of the physical properties of slag on its formation when welding with a seamless flux-cored wire // Welding International. 1995. Vol. 9. № 7. P. 573 – 575.
 21. Kuang-Hung, Po-Yuan Chen. Tseng Effect of TiO₂ Crystalline Phase on Performance of Flux Assisted GTA Welds // Materials and Manufacturing Processes. 2016. Vol. 31. No. 3. P. 359 – 365.
 22. Voropai N.M., Bel'for L.M., Fetisova T.Ya. Viscosity and electrical conductivity of welding flux slags of the TiO₂-CaF₂-MgO system // Welding International. 1990. Vol. 4. No. 4. P. 264 – 267.
 23. Mills K.C., Keene V.J. Physicochemical properties of molten CaF₂-based slags // International Metals Reviews. 1981. Vol. 26. No. 1. P. 21 – 69.
 24. Зверева И.Н., Картунов А.Д., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емелюшин А.Н. Сварочные электроды для нефтегазового комплекса // Сварочное производство. 2016. № 5. С. 36 – 38.
 25. Зверева И.Н., Картунов А.Д., Платов С.И., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А. Электроды для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2015. Т. 15. № 1. С. 92 – 95.
 26. Доронин Ю.В., Волобуев Ю.В. Особенности физико-химических свойств шлаковых систем сварочных материалов, формирующих обратную сторону шва при односторонней дуговой сварке // Сварка и диагностика. 2008. № 2. С. 17 – 23.

Поступила 17 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 4, pp. 280–287.

INVESTIGATION OF VISCOSITY OF LIQUID WELDING SLAGS AND MELTS OF ELECTRODE COATINGS

S.V. Mikhailitsyn¹, M.A. Sheksheev¹, S.I. Platov¹, A.N. Emelyushin¹, S.V. Naumov²

¹Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The article provides data on investigation of viscosity of welding melts of slags and electrode coatings using common technique of rotating electric viscometer operating on the principle of rotating coaxial cylinders. Molybdenum crucible with internal diameter of 20 mm and height of 70 mm, filled with test material had served as an external stationary cylinder. An internal rotating cylinder was molybdenum head 10 mm in diameter and 10 mm in height, mounted on a rotating molybdenum spindle with diameter of 4mm. To study viscosity of melts were used: electrode coatings tempered in advance at 1000 °C for 30 – 45 minutes in order to avoid foaming during melting process, and slags obtained through welding by electrodes at recommended modes. As a result of the investigations of welding electrodes with various types of coatings, viscosity of liquid welding slags (η_l) and electrodes coatings melts (η_m) were determined. Analysis of the results was carried out on viscosity polytherms of melts of coatings and slags based on experimental data. Calculations of the temperatures of the start and intensive crystallization, of activation energy of viscous flow were performed based on dependence of viscosity logarithm on melt reciprocal temperature. It was revealed that in regard to influence on electrode metal transfer and weld seam formation during welding, the most interesting are physical properties of coatings and slags melts at temperatures of crystallization start and higher. Mineralogical composition and temperature dependences of viscosity of molten welding slags of the basic type play a major role in providing welding from downward with through penetration of the seam root. Basically coated electrodes for downward welding can be characterized by crystallization start in homogeneous area and high activation energy of melts viscous flow. Technological capabilities of electrodes in welding were determined by “manufacturability potential”, understood as difference in physical properties of melts of “primary” and “secondary” slags of the same electrodes. The higher the “manufacturability potential” is in terms of size and the wider range of determining parameters, the easier is downwards welding. In developing new basic electrodes for downward welding, a number of options for increasing “manufacturability potential” are possible through achieving necessary mineralogical composition of welding slags. For that reduction of fluorine content, increase of content of MnO, FeO and Fe₂O₃ oxide, partially replace-

ment of SiO₂ with TiO₂ and K₂O with Na₂O are necessary, definite substitution of CaO for FeO and MnO oxides is appropriate.

Keywords: electrode, welding, slag, coating, weld root, reverse roller, melt, viscosity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-280-287

REFERENCES

1. Mikhailitsyn S.V., Sheksheev M.A., Mazur I.P., Platov S.I., Sychkov A.B. The research on surface properties of welding slags and electrode coatings. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 724–730.
2. Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vysheirskii E.M. Special features of the evaluation of the weldability of low-carbon high-strength pipe steels. *Welding International*. 2011, vol. 25, no 10, pp. 777–783.
3. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Ramus' A.A., Ramus' R.O. Control of softening processes in the heat-affected zone during welding of high-strength steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016, vol. 58, no. 7-8, pp. 435–441.
4. Mazur I.I., Shapiro V.D. *Neftegazovoe stroitel'stvo* [Oil and gas construction]. Moscow: OMEGA-L, 2010, 774 p. (In Russ.).
5. Mustafin F.M., Blekherova N.G., Kvyatkovskii O.P. etc. *Svarka truboprovodov: Uchebn. posobie* [Pipeline welding: Manual]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2002, 350 p. (In Russ.).
6. Mikhailitsyn S.V., Sheksheev M.A., Sychkov A.B. *Proektirovanie svarochnykh elektrodov dlya neftegazovogo kompleksa* [Design of welding electrodes for oil and gas complex]. Magnitogorsk: MG TU, 2016, 182 p. (In Russ.).
7. Nagornov S.A., Dvoret'skii D.S., Romantsova S.V., Tarov V.P. *Tekhnika i tekhnologii proizvodstva i pererabotki rastitel'nykh masel: Uchebn. posobie* [Technics and technology of production and processing of plant oils: Manual]. Tambov: TGTU, 2010, 96 p. (In Russ.).
8. Baldin K.V., Bashlykov V.N., Rukosuev A.V. *Vysshaya matematika: Uchebnik* [Higher mathematics: Manual]. Moscow: Flinta: NOU VPO MPSI, 2010, 360 p. (In Russ.).
9. Doronin Yu.V. Hydrodynamic phenomena in the weld bath and their influence on formation of weld seam underside during one-sided welding. *Svarka i diagnostika*. 2010, no. 5, pp. 14–20. (In Russ.).
10. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali: Uchebnik dlya vuzov* [Theory and technology of steel production: Textbook for universities]. Moscow: Mir, 2003, 528 p. (In Russ.).

11. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [A handbook on physics for engineers and university students]. Moscow: Izdatel'stvo Oniks: Izdatel'stvo Mir i Obrazovanie, 2006, 1056 p. (In Russ.).
12. Gel'chinskii B.R., Dyul'dina E.V., Selivanov V.N., Belashchenko D.K. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya oksidov i shlakovykh sistem* [Physicochemical studies of oxides and slag systems]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 136 p. (In Russ.).
13. Rodzevich A.P. *Fiziko-khimicheskie osnovy metallurgicheskikh protsessov: Uchebn. posobie* [Physical and chemical foundations of metallurgical processes: Manual]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010, 298 p. (In Russ.).
14. Zborshchik A.M. *Metallurgiya stali: konspekt lektsii* [Metallurgy of steel: Summary of lectures]. Donetsk: DonNTU, 2008, 238 p. (In Russ.).
15. Zaitsev A.I., Mogutnov B.M., Shakhpazov E.Kh. *Fizicheskaya khimiya metallurgicheskikh shlakov* [Physical chemistry of metallurgical slags]. Moscow: Interkontakt Nauka, 2008, 352 p. (In Russ.).
16. Esaulov G.A., Gasik M.I., Gorobets A.P., Klimchik Yu.V. Investigation of the influence of calcium fluoride on energy and technological indicators of wheel steel processing on ladle-furnace. *Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov*. 2014, no. 2, pp. 51–57. (In Russ.).
17. Voskoboinikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya. Uchebnik dlya vuzov* [General metallurgy. Textbook for universities. 6-ed. Revised]. Moscow: Akademkniga, 2005, 768 p. (In Russ.).
18. Vegman E.F., Zherebin B.P., Pokhvisnev A.N. etc. *Metallurgiya chuguna* [Pig iron metallurgy]. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
19. Zborshchik A.M. *Teoreticheskie osnovy metallurgicheskogo proizvodstva: konspekt lektsii* [Theoretical foundations of metallurgical production: Summary of lectures]. Donetsk: DonNTU, 2008, 189 p. (In Russ.).
20. Petetskii V.N. Effect of the physical properties of slag on its formation when welding with a seamless flux-cored wire. *Welding International*. 1995, vol. 9, no. 7, pp. 573–575.
21. Kuang-Hung, Po-Yuan Chen. Tseng Effect of TiO₂ Crystalline Phase on Performance of Flux Assisted GTA Welds. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016, vol. 31, no. 3, pp. 359–365.
22. Voropai N.M., Bel'for L.M., Fetisova T.Ya. Viscosity and electrical conductivity of welding flux slags of the TiO₂-CaF₂-MgO system. *Welding International*. 1990, vol. 4, no. 4, pp. 264–267.
23. Mills K.C., Keene B.J. Physicochemical properties of molten CaF₂-based slags. *International Metals Reviews*. 1981, vol. 26, no. 1, pp. 21–69.
24. Zvereva I.N., Kartunov A.D., Mikhailitsyn S.V., Sheksheev M.A., Sychkov A.B., Emelyushin A.N. Welding electrodes for oil and gas complex. *Svarchnoe proizvodstvo*. 2016, no. 5, pp. 36–38. (In Russ.).
25. Zvereva I.N., Kartunov A.D., Platov S.I., Mikhailitsyn S.V., Sheksheev M.A. Electrodes for manual arc welding in the oil and gas industry. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015, vol. 15, no. 1, pp. 92–95. (In Russ.).
26. Doronin Yu.V., Volobuev Yu.V. Features of physicochemical properties of slag systems of welding materials forming the reverse side of weld seam in single-sided arc welding. *Svarka i diagnostika*. 2008, no. 2, pp. 17–23. (In Russ.).

Information about the authors:

S.V. Mikhailitsyn, Cand. Sci. (Eng), Assist. Professor of the Chair "Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering" (svmikhaylitsyn@mail.ru)

M.A. Sheksheev, Cand. Sci. (Eng), Assist. Professor of the Chair "Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering" (sheksheev@yandex.ru)

S.I. Platov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Chair "Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering" (psipsi@mail.ru)

A.N. Emelyushin, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair "Machinery and Metal Forming Technology and Mechanical Engineering" (emelushin@magtu.ru)

S.V. Naumov, Cand. Sci. (Eng), Assist. Professor of the Chair "Welding Production, Metrology and Materials Technologies" (naumovstanislav@yandex.ru)

Received July 17, 2017