

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЛЮСОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Р. В. Козин, Г. М. Григоренко

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

Рассмотрены функции шлаков при выплавке стали и влияние их свойств на процессы в системе газ–шлак–металл. Показана роль вязкости и электропроводности при производстве слитков ЭШП. Приведена методика измерения вязкости на модернизированном вибрационном вискозиметре конструкции Штенгельмейера. Приведены результаты исследования вязкости ряда шлаков, используемых при электрошлаковом переплаве, и данные их основности. Описана методика измерения электропроводности шлаков и приведены данные электропроводности шлаков ЭШП. Представлены расчетные данные плотности шлаковых расплавов при температуре 1400 °С. Приведены литературные данные поверхностного натяжения фторсодержащих шлаков, химический состав которых близок к составу флюсов, применяемых в электрошлаковых технологиях. Библиогр. 13, табл. 2, ил. 6.

Ключевые слова: шлак; металл; основность; вязкость; электропроводность; плотность; поверхностное натяжение

Введение. Традиционно шлаками называют оксидные расплавы, образуемые в результате протекания обменных реакций при производстве металла. Состав этих шлаков определяется составом расплавляемого металла и шихтовых компонентов. В первичных металлургических агрегатах при выплавке стали в зависимости от условий плавки состав шлаковой фазы изменяют или корректируют путем удаления части шлака из плавильного пространства или (и) добавления других шихтовых шлакообразующих компонентов.

Шлаки наряду с металлами и газовой фазой являются равноправными участниками практически любого металлургического процесса. Их функции многообразны. Важнейшей функцией шлака является сорбция (поглощение) нежелательных примесей — серы, фосфора и некоторых других элементов. Сорбционная способность шлака зависит от его состава, температуры и окислительного потенциала системы металл–шлак. Удаление различных примесей требует разных условий. Так, удаление серы полнее протекает в раскисленной системе, фосфора — в окислительной.

Шлаки в металлургических процессах защищают металлическую ванну от тепловых потерь при контакте с атмосферой, а также металл от взаимодействия с ней и являются средой, которая ассимилирует неметаллические включения и газы, удаляемые из металла. В некоторых случаях шлаки становятся источником тепловой энергии, необходимой для нагрева и расплавления металла. Эти функции шлаков могут быть совмещены в металлургических процессах или их набор может быть расширен в зависимости от предъявляемых к шлаковым расплавам требованиям.

В металлургии одной из основных характеристик оксидных расплавов является их основность.

Ее мерой в общем случае служит отношение суммы концентраций основных оксидов к сумме кислотных (% CaO/ % SiO₂). В литературе встречается большое число других способов выражения основности, которые могут быть более удобными в тех или иных конкретных случаях.

Например, формула расчета основности, рекомендованная Международным институтом сварки (МИС) [1], имеет вид:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{SrO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0,5(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}, \quad (1)$$

где CaO, MgO и т.д. — массовая доля соответствующего химического соединения во флюсе, %.

Если $B > 1$, флюс относится к основному типу, при $B < 1$ — к кислому, при $B = 1$ флюс считается химически нейтральным.

Однако следует иметь в виду, что не существует универсальной шкалы основности и в общем случае следует пользоваться, по возможности, более простыми критериями. Вместе с тем понятие «основность» оказалось очень удобным и широко используется в практической металлургии в качестве простой обобщающей характеристики.

Высокоосновные шлаки обладают хорошей сорбционной способностью по отношению к примесям, жидкоподвижны, газопроницаемы, способствуют стабильности электрических дуг. Эти шлаки «короткие», т.е. имеют короткий температурный интервал перехода от жидкоподвижного в твердое состояние. Кислые шлаки («длинные») более вязкие, обладают хорошими изолирующими свойствами, большим интервалом перехода от жидкого к твердому состоянию. Данные об основности во многих случаях необходимы для прогнозирования процессов взаимодействия в тройной системе газ–шлак–металл.

Таблица 1. Химический состав флюсов, мас. %

Марка флюса	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	C	Fe ₂ O ₃	S	P	MnO	Основность
АНФ-28	41...49	≤5	26...32	≤6	20...24	0,10	0,5	—	0,03	—	1,42
АНФ-32	34...42	24...30	20...27	2...6	5...9	0,10	0,5	0,06	0,03	—	1,29
АН-75	56...59	9...12	6...8	6...8	18...21	0,10	0,5	0,05	0,02	5...7	0,64
АНФ-94	34...40	17...21	11...22	7...11	14...20	0,10	0,5	0,05	0,02	≤2	0,84
АНФ-1П	≥90	≤3	≤5	—	≤2,5	0,10	0,5	0,02	0,05	—	1,33
АНФ-6	Основа	23...31	≤8	—	≤2,5	0,10	0,5	0,02	0,05	—	0,57

Особую роль играет шлак при электрошлаковом переплаве (ЭШП) и электрошлаковой сварке (ЭШС), где помимо рафинирующих и защитных функций он является средой, в которой выделяется тепло, необходимое для осуществления процесса плавки металла. Кроме того шлак при ЭШП выполняет и ряд других функций технологического и металлургического характера.

Если при выплавке стали состав шлака формируется из исходных компонентов, вводимых в шихту, то при ЭШП и ЭШС обычно используются заранее приготовленные шлаки — «синтетические» или флюсы. В их состав входит требуемый набор компонентов, где кроме оксидов присутствуют фториды щелочноземельных металлов, в частности CaF₂, а в некоторых случаях и щелочных металлов. Наличие в таких флюсах в значительных количествах (от 10 до 70 мас. %) галогенидов обеспечивает высокую стабильность электрошлакового процесса и оказывает существенное влияние на технологические свойства шлакового расплава.

Одними из важнейших физических свойств шлаков ЭШП, от которых зависит качество получаемого металла, являются: вязкость, поверхностное натяжение, плотность, электропроводность.

Методы измерения вязкости (μ) жидкостей, в том числе металлургических расплавов, основан на регистрации в процессе измерений различных параметров, функционально связанных с вязкостью. В соответствии с принятой классификацией методы измерения вязкости принято подразделять на две основные группы: стационарные, к которым относятся методы капиллярного истечения, падающего шарика, вращающихся цилиндров и вибрационные; нестационарные — метод крутильных колебаний и параболоида вращения.

Целью данной работы является совершенствование устройства для измерения вязкости вибрационным методом и изучение зависимости вязкости фторидно-оксидных шлаков для электрошлаковых технологий (ЭШТ) от температуры. В табл. 1 приведен химический состав исследованных шлаков.

Устройство и принцип действия электромагнитного вибрационного вискозиметра конструкции Штенгельмейера. Работа электромагнитного вибрационного вискозиметра основана на зависимости амплитуды вынужденных колебаний

стержня от вязкости жидкости, в которой эти колебания производятся [2]. Схема вискозиметра представлена на рис. 1.

Нагляднее электромеханическая ячейка вискозиметра представлена на рис. 2.

Напряжение от сети переменного тока 220 В через стабилизатор напряжения 2 и звуковой генератор 5 подается на обмотку 20 вискозиметра. Напряжение на выходе звукового генератора измеряется вольтметром 6. При прохождении тока через обмотку вибратора в трансформаторе создается переменное магнитное поле. Взаимодействие этого поля с якорем 21 заставляет подвижную систему вискозиметра совершать вертикальные колебания.

Датчик вискозиметра состоит из постоянного магнита 12 с магнитопроводом, катушки 16, при-

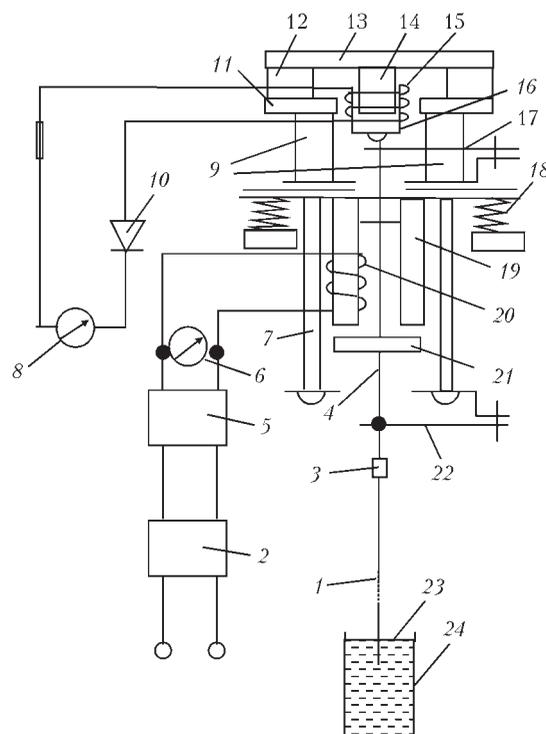


Рис. 1. Схема вискозиметра конструкции Штенгельмейера: 1 — индентор; 2 — стабилизатор напряжения; 3 — зажим; 4 — стержень; 5 — звуковой генератор; 6 — вольтметр; 7 — стойка вибратора; 8 — милливольтметр; 9 — стойки постоянного магнита; 10 — диод; 11, 13, 14 — магнитопроводы; 12 — постоянный магнит; 15 — обмотка; 16 — катушка подвижной системы; 17, 22 — пружины; 18 — амортизирующее устройство; 19 — трансформатор; 20 — обмотка вибратора; 21 — якорь; 23 — расплав; 24 — тигель

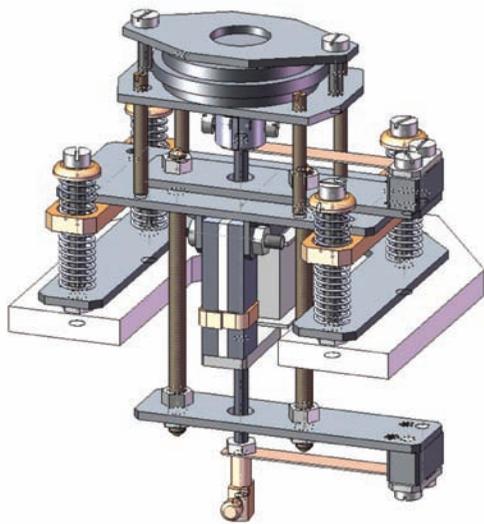


Рис. 2. Трехмерная модель электромеханической ячейки вискозиметра конструкции Штенгельмейера

соединенной через диод 10 к милливольтметру 8. Постоянный магнит закреплен на стойках 9.

Для измерения вязкости вискозиметр настраивается на резонанс. Для этого с помощью звукового генератора устанавливают частоту тока в обмотке вибратора, равной частоте собственных колебаний подвижной системы вискозиметра. При наступлении резонанса амплитуда колебаний подвижной системы становится максимальной, в обмотке датчика индуцируется электродвижущая сила (э. д. с.) и стрелка милливольтметра дает максимальное отклонение. Для повышения точности измерения схема возбуждения колебаний звуковым генератором усовершенствована.

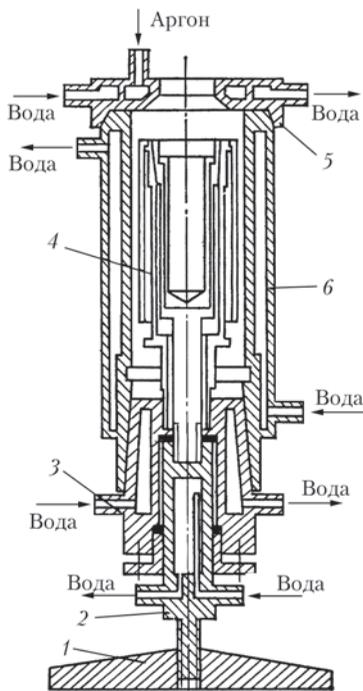


Рис. 3. Нагревательная печь: 1 — основание; 2 — внутренний токоподвод; 3 — наружный токоподвод; 4 — графитовый нагреватель; 5 — крышка; 6 — камера

Так как вибрационный вискозиметр работает на резонансной частоте, которая при измерениях вязкости не изменяется, показания датчика зависят только от амплитуды подвижной части вискозиметра. При опускании индентора в жидкость резонанс нарушается. Чем больше вязкость жидкости, тем меньше становятся амплитуда колебаний подвижной системы и показания милливольтметра.

Между корпусом вискозиметра и опорой расположены пружины амортизирующего устройства 18, которое устраняет передачу энергии колебаний от вискозиметра к опоре. Большое значение в устранении влияния передачи колебаний на опору имеет конструктивное устройство стойки для подъема и опускания вискозиметра при измерениях вязкости. Стойка должна иметь постоянную жесткость, т. к. в этом случае потеря в ней энергии в поднятом и опущенном состояниях вискозиметра будет постоянна и ее значения войдут в градуировку. Такому требованию удовлетворяет П-образная стойка с центральным расположением стержня, по которому передвигается винтовой ползун с вискозиметром.

Индентор изготавливается из молибденовой или вольфрамовой проволоки диаметром 1,2 мм (1,0...2,0) и длиной 300 мм. Амплитуда колебаний шпинделя 1...2 мм, глубина погружения его в жидкость 10...20 мм. Тигель для шлака изготавливают из молибдена или графита, при этом глубина тигля 35 мм, а внутренний диаметр 12 мм. В качестве нагревателя использовали предназначенную для газового анализа печь системы ЦНИИЧермет ПВП-2, модернизированную применительно к работе в инертной атмосфере рис. 3.

Графитовый нагреватель этой печи состоит из удлиненного тигля, двух электродов и экрана. Все детали печи охлаждаются водой, а крышка имеет дополнительную полость для подачи газа. Как показывает опыт, такая печь, питаемая от сварочного трансформатора СТШ-500, может надежно работать при температуре до 2000 °С [2].

Расплавление шлака ведется в среде аргона. При достижении заданной для исследования температуры в шлаковый расплав опускается индентор вискозиметра и обязательным условием является погружение его на глубину 10 мм. Затем происходит выключение печного трансформатора, как следствие температура шлакового расплава понижается. Контроль температуры ведется термопарой ВР 5/20 ГОСТ 3044-84, которая находится в алундовом чехле с оголенным спаем, и его необходимо проводить кратковременным погружением спая в расплав, чтобы предотвратить растворение (расплавление) термопары. Вторичный прибор (милливольтметр) отградуирован под термопару ВР 5/20.

На описанной установке проводили изучение зависимости вязкости шлаков, приведенных в табл. 1, от температуры.

Большая часть результатов изучения вязкости шлаков этим или подобным методом опубликована в работе [3] и сопоставима с результатами, полученными авторами данной статьи.

При ЭШП очень важной функцией шлака является образование гарнисажа, предупреждающего прямой контакт между жидким металлом и стенками кристаллизатора и изолирующего их как электрически, так и термически. От свойств гарнисажа в значительной степени зависит качество поверхности слитка. Поскольку эта поверхность формируется на внутренней поверхности шлакового гарнисажа, то ее качество определяется прежде всего профилем этой поверхности, стабильностью толщины в процессе переплава, а также способностью шлаковой оболочки сопротивляться разрушению под воздействием различных сил [4].

Если кристаллизатор и слиток не перемещаются один относительно другого, на шлаковый гарнисаж действуют незначительные растягивающие усилия, обусловленные продольной и поперечной усадкой слитка и шлаковой корки. Обычно они не вызывают разрушения шлаковой корки, благодаря чему слитки, выплавленные в стационарном кристаллизаторе, имеют, как правило, ровную и гладкую поверхность [4].

При переплаве в подвижном кристаллизаторе процесс формирования поверхности слитка значительно усложняется, так как гарнисаж подвергается значительным растягивающим усилиям. В этом случае для получения достаточно хорошей поверхности слитка между гарнисажом и жидким металлом всегда должна находиться прослойка жидкого шлака, которая обеспечивает подпитку возникающих разрывов гарнисажа и уменьшает опасность образования дефектов на поверхности слитков при их вытягивании из кристаллизатора. Для получения качественной поверхности слитка при переплаве в подвижном кристаллизаторе необходимо, чтобы температура плавления шлака была значительно ниже температуры плавления металла, шлак был «длинным» и пластичным в твердом состоянии [4].

Этим требованиям отвечают шлаки АНФ-28, АНФ-32, АНФ-94, характерные кривые вязкости которых представлены на рис. 4.

Одно из важных свойств жидкого шлака — его плотность (ρ). Например, флюс АНФ-1П при 1450 °С имеет плотность 2,52 г/см³. В окисидно-солевых шлаках ввод оксидов повышает плотность, что объясняется повышением плотности упаковки частиц в расплаве. Так при добавлении СаО происходит замена анионов F⁻ ($r_{F^-} = 0,133$ нм) на O²⁻ ($r_{O^{2-}} = 0,132$ нм), хотя их радиусы близки, но заряды различны, а это сказывается на энергии их связей с катионами Са²⁺. Еще в большей степени повышает плотность

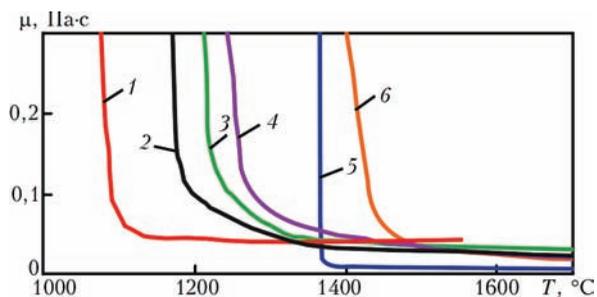


Рис. 4. Зависимость вязкости флюсов от температуры: 1 — АН-75; 2 — АНФ-28; 3 — АНФ-32; 4 — АНФ-94; 5 — АНФ-1П; 6 — АНФ-6

шлаковых расплавов ввод глинозема Al₂O₃. Энергия связи катионов Al³⁺ с анионами O²⁻ больше, чем Са²⁺ с F⁻ из-за различия эффективности ионных радиусов ($r_{Al^{3+}} = 0,057$ нм; $r_{Ca^{2+}} = 0,106$ нм) и зарядов. Плотность флюсов АНФ-6 при 1450 °С составляет 2,88 г/см³.

Рост плотности наблюдается и в одновременном вводе в расплав СаО и Al₂O₃. Вероятно, это объясняется образованием комплексов Al_xO_y^{z-}. Наибольшую плотность имеют расплавы оксидных шлаков, плотность которых растет с вводом СаО, Al₂O₃ и падает с вводом в расплав SiO₂, приводящим к образованию анионных комплексов SiO₄⁴⁻, ослабляющих межионные связи [3].

Зачастую плотность применяемых в процессах ЭШП шлаковых систем в диапазоне рабочих температур не превышает 3,0 г/см³, что при плавке стали существенно не влияет на разделение шлаковых и металлических фаз. С ростом температуры плотность шлаковых расплавов понижается. Более строго к определению плотности шлаков необходимо подходить при работе с цветными металлами [3].

Авторами работы [5] предложена формула расчета плотности шлаковых расплавов при температуре 1400 °С.

$$\frac{1}{\rho} = 0,416 \cdot SiO_2 + 0,303 \cdot CaO + 0,372 \cdot MgO + 0,328 \cdot Al_2O_3 + 0,389 \cdot CaF_2. \quad (2)$$

Результаты расчетов по формуле (2), а также данные по поверхностному натяжению синтетических флюсов, которые наиболее близки к применяемым в электрошлаковых технологиях [1, 6, 7], приведены в табл. 2.

По сравнению с оксидными шлаками на основе СаF₂ имеют более низкие значения поверхностного натяжения и обладают повышенной адгезией к неметаллическим включениям.

Электропроводность (R) жидких флюсов подобно другим физическим свойствам (вязкости, поверхностному натяжению, плотности) относится к структурно-чувствительным характеристикам, по которым можно судить о строении, характере

Таблица 2. Значения плотности и поверхностного натяжения флюсов ЭШТ

Флюс	Элементы, мас. %				Плотность, г/см ³	Поверхностное натяжение, мдж/м ² при <i>t</i> , °С*	Источник
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂			
№ 1 (АНФ-28)	52,0	–	48,0	–	2,78	$\frac{440}{1500}$	[6]
№ 2 (АНФ-32)	40,0	30,0	30,0	–	3,34	$\frac{400}{1600}$	[1]
№ 3 (АН-75)	60,39	25,32	10,49	–	2,78	$\frac{347}{1500}$	[6]
№ 4 (АНФ-94)	29,0	30,0	6,0	21	3,27	$\frac{375}{1450}$	[7]
№ 5 (АНФ-1П)	100,0	–	–	–	2,61	$\frac{400}{1400}$	[6]
№ 6 (АНФ-6)	75,4	24,6	–	–	2,71	$\frac{450}{1500}$	[6]

*В числителе приведены значения поверхностного натяжения, в знаменателе — температуры.

связей между частицами и структурных изменениях в расплавах при различных температурах [2, 8]. Наряду с этим электропроводность расплавленных флюсов играет существенную роль в процессах ЭШТ [9, 10] и зависит от их состава. Обычно при 1600 °С ее показатели составляют 1...8 Ом⁻¹·см⁻¹. Более электропроводны основные шлаки. Особенно сильно увеличивают электропроводность шлака добавки окислов щелочных металлов и галогенидов (плавикового шпата). Электропроводность, как и вязкость увеличивается при повышении температуры. Поэтому представляет большой научный и прикладной интерес информация о электропроводности флюсов, применяемых в процессах специальной электрометаллургии.

Как следует из техники металлургического эксперимента для определения электропроводности расплавленных флюсов используют исключительно контактные методы [11]. В этом случае главное внимание следует уделять выбору и конструкции датчика (электролитической ячейки), включающего тигель и электрод (электроды). Наиболее широко применяются два типа датчиков: тигель с двумя параллельными электродами; тигель с элект-

родом, расположенным в центре (вторым электродом при этом служит сам тигель).

Основным условием при выборе материала электролитической ячейки является его устойчивость по отношению к коррозионно-агрессивному воздействию шлаковых расплавов, электропроводность которых необходимо определять. При контакте электродов с расплавом не должны возникать побочные электрические явления (термо-э. д. с., э. д. с. и др.). Если их нельзя исключить, то в процессе исследований необходимо вносить поправки в полученные результаты и учитывать размер побочных явлений при калибровке и настройке ячейки. В качестве материала для изготовления тиглей и электродов могут служить железо, молибден, платина, графит и др.

Определяя электропроводность расплавленных флюсов, необходимо измерять сопротивление расплава, заключенного между электродами или электродом и стенкой тигля. Применяют два способа измерения — способ моста переменного тока и вольтметр-амперметр. Первый из них более широко распространен в лабораторных исследованиях, второй — в заводской практике. Удельную электропроводность вычисляют из измеренного сопротивления, определив по водному раствору или расплаву

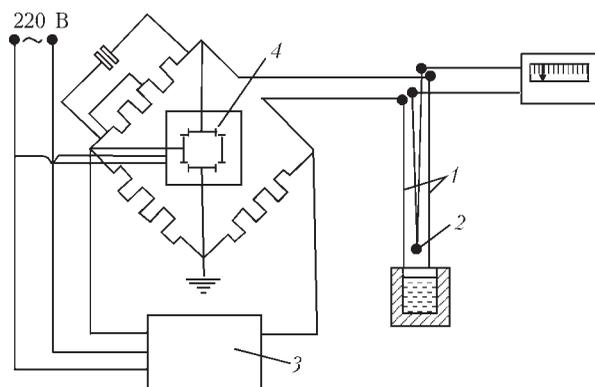


Рис. 5. Схема установки для измерения электропроводности расплавленного флюса: 1 — электроды; 2 — термопара ВР5/20; 3 — звуковой генератор; 4 — осциллограф

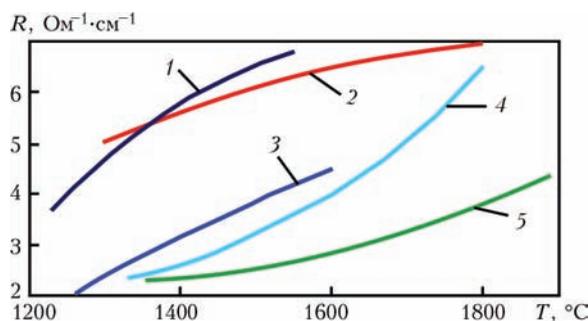


Рис. 6. Изменение электропроводности флюса в зависимости от изменения температуры: 1 — АНФ-75; 2 — АНФ-1П; 3 — АНФ-94; 4 — АНФ-32; 5 — АНФ-6

электролита (чаще всего КС1) с известной электропроводностью — «сопротивление ячейки» [12].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона создана установка, позволяющая определять электропроводность жидких флюсов в инертной атмосфере [13]. Она укомплектована микровинтовым подъемником, графитовой нагревательной печью сопротивления ПВП-2, сварочным трансформатором ТСШ-500, электро- и теплоизмерительной аппаратурой, системой газо- и водоснабжения, а также электролитической ячейкой и измерительными приборами.

Принципиальная схема моста переменного тока приведена на рис. 5. Электролитическая ячейка состоит из двух электродов 1 диаметром 1,5 мм, изолированных друг от друга алундовыми трубками, между которыми в защитном алундовом чехле расположен спай вольфрам-ренийевой термопары 2. Подводящие провода термопары заключены в алундовые трубки. В схему компенсационного моста входят три магазина сопротивления (R_1 , R_2 и R_3) типа Р517 М с пределами измерения сопротивления от 0,01 до 10 000 Ом и магазин емкости типа Р513. В качестве нуля-инструмента используется осциллограф 4 типа С1-1, на экране которого в процессе измерений фиксируются все энергетические импульсы. Источником переменного тока является генератор ГЗ-33 звуковой и ультразвуковой частот 3 с диапазоном от 18 до 200 000 Гц. Электропитание схемы осуществляется стабилизированным напряжением 220 В.

На рис. 6 приведены результаты измерения электропроводности некоторых флюсов, применяемых для ЭШТ по данным работы [19].

Выводы

Отработана методика измерения вязкости шлаковых расплавов на модернизированном вибрационном вискозиметре конструкции Штенгельмейера. Подтверждено, что температурная зависимость вязкости используемых в ЭШТ шлаков АНФ-28, АНФ-32, АНФ-94 имеет более пологий характер по сравнению со шлаками АНФ-1П и АНФ-6 и поэтому они более пригодны для ЭШТ в подвижном кристаллизаторе.

Приведены расчетные значения основности и плотности ряда шлаков ЭШТ, а также данные их поверхностного натяжения и температурной зависимости электропроводности.

1. Подгаецкий В. В. Сварочные шлаки / В. В. Подгаецкий, В. Г. Кузьменко. — К.: Наукова думка, 1988. — 252 с.
2. Установка для исследования вязкости шлаковых расплавов / А. А. Ждановский, В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — К.: Наукова думка, 1976. — Вып. 4. — С. 102–106.
3. Медовар Б. И. Металлургия электрошлакового процесса / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов. — К.: Наукова думка, 1986. — 248 с.
4. О механизме формирования поверхности слитка при ЭШТ с относительным перемещением кристаллизатора / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Л. Артамонов [и др.] // Рафинирующие переплавы. — К.: Наукова думка, 1975. — С. 49–54.
5. Степанов В. В. Плотность расплавленных флюсов для электрошлакового переплава и подогрева / В. В. Степанов, Б. Е. Лопаев // Автоматическая сварка. — 1967. — № 2. — С. 39–41.
6. Якобошвили С. Б. Поверхностное и межфазное натяжение бинарных сплавов на основе CaF_2 / С. Б. Якобошвили, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. — 1962. — № 10. — С. 41–45.
7. Якобошвили С. Б. Исследование межфазного натяжения на границе шлак–металл и поверхностного натяжения сварочных шлаков / С. Б. Якобошвили, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. — 1961. — № 10. — С. 15–19.
8. Жмойдин Г. И. Взаимосвязь транспортных свойств со структурой ассоциированных расплавов / Г. И. Жмойдин // Свойства и структура шлаковых расплавов. — М.: Наука, 1970. — С. 38–66.
9. Латаш Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. — М.: Металлургия, 1970. — 239 с.
10. Новый способ производства крупных кузнечных слитков высокого качества / Ю. В. Латаш, А. Е. Воронин, В. А. Николаев [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1975. — Вып. 2. — С. 31–42.
11. Арсентьев П. П. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, М. Г. Крашенинников. — М.: Металлургия, 1968. — 552 с.
12. Ерохин А. А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов / А. А. Ерохин. — М.: Наука, 1975. — 166 с.
13. Установка для измерения электропроводности расплавленных флюсов / А. А. Ждановский, Ю. В. Латаш, О. А. Горчинский [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — К.: Наукова думка, 1978. — Вып. 8. — С. 113–115 с.

Functions of slags in melting steels and effect of their properties on the processes in gas-slag-metal system are considered. The role of viscosity and electric conductivity in producing ESR ingots is shown. Method of measuring the viscosity in the modernized vibration viscosimeter of Stengelmeier design is given. The results of investigation of viscosity of some slags used in electroslag remelting and data of their basicity are given. The method of measuring the electric conductivity of slag is described and data of electric conductivity of ESR slags are given. The calculated data of density of slag melts at temperature 1400 °C are presented. The literature data of surface tension of fluorine-containing slags, chemical composition of which is closed to the composition of fluxes used in electroslag technologies are given. Ref. 13, Tables 2, Figures 6.

Keywords: slag; metal; basicity; viscosity; electric conductivity; density; surface tension

Поступила 22.09.2016