

УДК 621.745.58:621.791.72.

С.Н. Жеребцов<sup>1</sup>, Е.А. Чернышов<sup>2</sup>**ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЛЮСОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА**Омский государственный педагогический университет,<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Обобщены результаты экспериментальных исследований и теоретические данные по физико-химическим свойствам и функциям флюсов, применяемых для ведения устойчивых процессов переплава, литья, сварки в различных металлургических технологиях электрошлакового переплава. Рассмотрены энергетические связи катионов с анионами в шлаковых системах различных марок флюсов и их физические свойства. Предложены формулы расчета плотности и основности шлаковых расплавов в зависимости от химического состава флюсов. Исследованы физические плотности, приведены результаты прямых замеров температуры плавления различных флюсов и металлов, сплавов при электрошлаковом переплаве.

*Ключевые слова:* электрошлаковый переплав, флюсы, химический состав, физические свойства, плотность, температура, жидкий шлак, металл.

Проблема получения качественного металла, с заданными физико-механическими свойствами и служебными характеристиками по-прежнему является одной из главных задач в современном мировом металлургическом, литейном производстве, от которой напрямую зависит прогресс во многих отраслях народного хозяйства.

Существует ряд технологических процессов получения качественного литого металла – вакуумно-индукционный переплав, вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевой переплав, имеющие свои достоинства и недостатки и определенные технические ограничения. Они не решают проблему в целом.

Потребление флюсов (шлаков) на основе  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{NaF}$  и т.д. в металлургическом производстве быстро растет. Это обусловлено созданием и внедрением в производство новых методов выплавки качественных сталей и сплавов, к которым предъявляют особые требования физико-химических свойств металлургических флюсов [4, 6].

Шлак является неотъемлемой составляющей каждого процесса (ЭШТ) электрошлаковых технологий, т.е. переплава, литья и т.д. Эффективность, производительность процессов зависит от его свойств, определяющих, главным образом, химическим составом применяемых ингредиентов флюсов.

В результате исследования физико-химических и электрохимических свойств оксидно-фторидных расплавов  $\text{CaF}_2 - \text{Me}_a\text{O}_b$  (Me - Ca, Mg, Al, B, Si, Ti, V, Nb и т.д.) можно сделать некоторые выводы. Характер политерма удельной электропроводимости двойных и тройных систем флюсов указывает преимущественно на их ионную проводимость. Замена ионов  $\text{F}^-$  на ионы  $\text{O}^{2-}$  сопровождается уменьшением электропроводимости.

Теоретические оценки эквивалентной электропроводности в предложении чисто ионной проводимости показывают, что расхождение с экспериментом обусловлено либо процессами ассоциации в расплавах, содержащих  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , либо электронной составляющей проводимости оксидов  $d$ -элементов ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и т.д.).

Эксперименты по изучению испарения компонентов из расплавов показали, что количество возгонов при введении в  $\text{CaF}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  и т.п., увеличивается, что коррелирует с расчетами свободной энергии Гиббса для реакций образования фторидов этих элементов и с температурой их кипения.

При электрохимических исследованиях оксидно-фторидных расплавов в качестве «электрода сравнения» был выбран кислородный электрод. Термодинамические расчеты стандартных электродных потенциалов дают следующие ряды напряжений относительно нулевого кислородного потенциала при 1800 К°:

Оксиды - Ca, Al, Li, Ti, B, Si, Mn, Nb, Cr, Fe, W, Ni, O

Фториды - Ca, Li, Mg, B, Al, Si, Ti, Mn, Cr, Nb, Fe, Ni, W, F

После анализа процессов электролиза различных флюсов при электрошлаковом переплаве и проведения исследовательских работ, получены экспериментальные данные, на основе которых разработаны рекомендации о возможности использования электрохимического модифицирования и легирования переплавляемого металла элементами, восстанавливаемыми из шлака. Разработаны специальные составы модифицирующих флюсов, содержащие различные легирующие добавки для переплава углеродистых конструкционных, высококачественных легированных сталей и жаропрочных сплавов, а также сплавов с особыми физическими свойствами.

Есть несколько общих функций, которые шлак выполняет в электрошлаковых процессах. Это, прежде всего, энергопреобразующая функция. Шлак является участком электрической цепи с высоким сопротивлением, на котором происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Кроме того, он выполняет теплопередающую функцию, от которой зависит энергетическая эффективность процесса. Эта эффективность тем выше, чем полнее и интенсивнее шлак передает теплоту металлу.

Шлаковая ванна – источник тепла при ЭШП. При прохождении электрического тока через шлаковую ванну (электропроводный шлаковый расплав) в ней выделяется тепло, достаточное для осуществления ЭШП. Количество его определяется по формуле  $Q = 0,24I^2R_m t$ , кал/с, где  $I$  – сила тока;  $R_m$  – сопротивление шлаковой ванны;  $t$  – время процесса.

Удельный расход электроэнергии зависит от величины электрического сопротивления шлака: чем выше второе, тем меньше первый. Высокое сопротивление шлаковой ванны способствует повышению скорости переплава электродов и увеличению производительности процесса. Однако не все выделяющееся в шлаковой ванне тепло расходуется на расплавление электрода, поддержание в жидком состоянии шлаковой и металлической ванн. Часть тепла (около 30-40 %) отводится водой (охладителем), охлаждающей кристаллизатор, и около 10-20 % излучается зеркалом шлаковой ванны, и только около 30-50 % затрачивается на расплавление расходуемого электрода.

Характер распространения тепла в процессе ЭШП зависит от различных электрических и технологических факторов: от типа электрической схемы процесса переплава; принятого электрического режима; количества и химического состава флюса; соотношения размеров электрода и плавильной ёмкости, литейной формы; свойств переплавляемого металла и др. Поэтому реальные энергозатраты при ЭШП существенно выше (1250-1800 кВт.ч на 1 т отливки), чем теоретически требуемые для расплавления 1 т стали (примерно 400-600 кВт.ч). Получается, что только на расплавление самих расходуемых электродов тратится около 40-55 % подводимой активной мощности. Такая, на первый взгляд, неэффективная трата электроэнергии в сфере производства окупается надежной и долговременной работой изделий, полученных с использованием технологии ЭШП, в сфере промышленного применения.

Еще одной важной функцией флюса является рафинирующая способность шлаков в процессе ЭШП. Расплавленный флюс должен обладать максимальным межфазным натяжением на границе с жидким металлом и минимальным - с неметаллическими включениями. Реакционная способность флюса должна обеспечивать удаление вредных примесей, и в то же время не вызывать взаимодействия его компонентов с легирующими компонентами переплавляемого электрода.

Флюс должен содержать минимально возможное количество нестойких соединений для обеспечения постоянства химического состава металла (слитка, сварного шва и т.п.) по ходу всего процесса. Кроме того, он должен обеспечивать легкое возбуждение электрической дуги и высокую стабильность электрошлакового процесса. Шлак имеет температуру плавления ниже и плотность меньше, чем у свариваемого, наплавляемого, переплавляемого или рафинируемого металла.

Важна и защитная функция флюса - шлак должен изолировать металл от вредного воздействия окружающей атмосферы (среды). Применение флюса должно быть экономически целесообразно и не оказывать вредного влияния на здоровье человека.

Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к флюсам ЭШТ, существует и ряд индивидуальных, характерных для каждого из процессов.

Специфичны для электрошлаковой сварки (ЭШС) следующие требования: расплавленный флюс должен обеспечивать достаточное проплавление кромок основного металла и удовлетворительное формирование поверхности сварного шва, без образования подрезов и наплывов; он не должен вытекать между кромками изделия и формирующими шов устройствами и не отжимать ползуны от свариваемых заготовок, его задача способствовать предотвращению образования пор и горячих трещин, а шлаковая корка должна легко удаляться с поверхности шва. Последнее требование важно и для процесса электрошлаковой наплавки (ЭШН), при которой в связи с низкой скоростью охлаждения существует опасность образования окисленного слоя на границе затвердевшего металла со шлаком, препятствующему удалению шлаковой корки с наплавленного металла.

При ЭШП резко возрастает длительность процесса, а следовательно, к флюсам предъявляются более жесткие требования по стабильности химического состава, достаточной рафинировочной емкости, физическим свойствам.

К флюсам для электрошлакового кокильного литья (ЭКЛ) и центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) дополнительно предъявляется требование по максимальной индифферентности по отношению к материалу футеровки тигля.

В случаях электрошлаковой разливки (ЭШР) длительность заполнения кристаллизатора (изложницы) невелика, поэтому скорость образования гарнисажа должна быть высокой. Кроме того, к гарнисажу предъявляется требование прочности, так как длительный период выдерживает значительное ферростатическое давление жидкого металла. Во всех процессах, предусматривающих использование расходующихся электродов, повышается требование к рафинирующей (десульфуризирующей) способности флюсов.

Шлаковые системы представляют собой солевые, оксидные или оксидно-солевые расплавы, и эффективность процессов ЭШТ будут определяться числом и соотношением компонентов флюса, варьируя которыми, можно изменять температуру его плавления, электрическую проводимость, вязкость, поверхностное натяжение и другие свойства.

Требование гомогенности шлаковой ванны при рабочих температурах процессов делает необходимым использование флюса с температурой плавления ниже температуры ликвидуса металла или сплава. Причем для ЭШС и ЭШН применяются флюсы, у которых эта разница температур достигает 280-460 °С, для ЭШП в стационарный кристаллизатор — 200-350 °С, в подвижный — до 400 °С. В случае ЭШР температура затвердевания флюса должна быть близка к температуре кристаллизации стали.

Эти различные для каждого из процессов требования диктуются тем, что при ЭШС более тугоплавкий флюс может вызвать отжимание ползунов. При ЭШР конечным продуктом является жидкий металл, и снижение температуры плавления шлака позволяет избежать его перегрев, но существует опасность образования заливин при низкой температуре плавления флюса.

При ЭШП различные механические свойства флюсов делают невозможным их применение одновременно при проведении процесса в стационарном и подвижном кристаллизаторах. При переплаве в стационарный кристаллизатор необходима стабильность толщины гар-

нисажного слоя по всей высоте слитка, а при переплаве в подвижный кристаллизатор - еще и устойчивость гарнисажа против растягивающих усилий.

Приведем примеры необходимых температур плавления флюсов: для ЭШР меди и бронз температура плавления 920-1050 °С (температура выпуска металла 1150-1240 °С; латуни - 950-1100 °С ; алюминия - не более 800 °С, чугуна - 1350-1480 °С; стали - 1640-1870°С). При переплаве металлов, входящих в основу химического состава всех сталей и сплавов, применяются соотношения температур плавления, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Температура плавления флюсов и металлов, °С

	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti	Zr	Cr
Металл	1084	1244	1455	1539	1665	1852	1903
Флюс	980	1150	1350	1420	1340	1630	1800

Такие соотношения обусловлены тем, что использование легкоплавкого флюса может явиться причиной его испарения. Применение более тугоплавких флюсов увеличивает объем и глубину металлической ванны, что незамедлительно сказывается на кристаллической структуре слитка. Самую низкую температуру плавления имеют солевые флюсы, самую высокую - оксидные. Промежуточное положение между ними занимают оксидно-солевые флюсы. Температуры плавления ряда однокомпонентных флюсов, используемые в металлургическом производстве, даны в табл. 2 [7, 8].

Таблица 2

Температура плавления флюсов, применяемых в производстве ЭШР, °С

CaF <sub>2</sub>	CaCl	CaO	NaF	NaCl	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgF <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>
1400	772	2580	992	801	1035	2050	1263	707
BaF <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	BaO	LiF	LaF <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CeO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
1280	960	1920	890	1430	2320	2700	2415	1610
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	LiCl	CsF	LiF	MgO	TiO <sub>2</sub>
680	290	2700	1842	614	692	870	2800	1870

Таблица 3

Температуры в °С плавления расходуемых электродов и флюсов в плавильной ёмкости при ЭШР, °С

Марка расходуемого электрода	Ст20	Ст. 09Г2С, 17Г1С	10Г2ФБЮ	15Х5М	Х18Н10Т	Х17Н13М3Т
Жидкий металл	1650/1740	1670/1720	1690/1740	1710/1860	1650/1770	1660/1800
Жидкий флюс	1790/1960	1810/1980	1850/2030	1940/2240	1890/2150	1950/2140
Марка расходуемого электрода	Х23Н18	ЭП202	ЖС6-У	ЖС3-ДК	ЖС6-К	Чугун Сч20
Жидкий металл	1680/1760	1610/1780	1520/1650/1800	1510/1640/1780	1540/1640/1800	1340/1480
Жидкий флюс	1960/2120	1780/2050	1780/1920/2170	1760/1930/2140	1790/1910/2160	1580/1710

На основе разработанной физической модели взаимодействия жидкого флюса и металла в процессе электрошлакового переплава проведены научно-исследовательские работы на

базе ЗАО «Омский завод специальных изделий», ОАО « Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» по определению оптимальных химических составов флюсов и температур переплава расходоуемых электродов. Данные исследования проводились на протяжении ряда лет и получены практические результаты, которые используются на металлургическом производстве для получения качественных изделий из сталей и сплавов.

В табл. 3 приведены рекомендуемые температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) как расплавленного флюса, так и жидкого металла. Замеры температур проводили прямым методом- опусканием термомпары в жидкий металл и шлак на протяжении всего процесса электрошлакового переплава (табл. 3).

Плотность жидкого шлака также является его определяющим физическим свойством, влияющим на параметры ведения процесса ЭШЛ ( электрошлакового литья) [1, 7] Наименьшую плотность имеют солевые флюсы. Например, у флюса АНФ-1П при  $1450^{\circ}\text{C}$  плотность составляет  $2,52 \text{ г/см}^3$  и снижается при вводе других солей (например, плотность  $\text{NaF} - 1,95 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{NaCl} - 1,55 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - 2,09 \text{ г/см}^3$ ).

Добавка 50 %  $\text{MgF}_2$  уже при  $1150^{\circ}\text{C}$  приводит к понижению плотности шлака до  $2,5 \text{ г/см}^3$ . В окисно-солевых флюсах ввод оксидов повышает плотность, что объясняется повышением плотности упаковки частиц в расплаве. Так, при добавлении  $\text{CaO}$  происходит замена анионов  $\text{F}^-$  ( $r_{\text{F}^-}=0,33 \text{ нм}$ ) на  $\text{O}^{2-}$  ( $r_{\text{O}^{2-}}=0,132 \text{ нм}$ ), хотя их радиусы близки, но различны заряды, а это сказывается на энергии их связей с катионами  $\text{Ca}^{2+}$ . Плотность флюса АНФ-7 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,63 \text{ г/см}^3$ .

Еще в большей степени повышает плотность шлаковых расплавов ввод глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Энергия связи катионов  $\text{Al}^{3+}$  с анионами  $\text{O}^{2-}$  больше, чем  $\text{Ca}^{2+}$  с  $\text{F}^-$  в силу различия эффективных ионных радиусов ( $r_{\text{Al}^{3+}}=0,057 \text{ нм}$ ;  $r_{\text{Ca}^{2+}}=0,106 \text{ нм}$ ) и зарядов. Плотность флюса АНФ-6 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,88 \text{ г/см}^3$ .

Рост плотности наблюдается и при одновременном вводе в расплав  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Так, плотность флюса АНФ-8 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,90 \text{ г/см}^3$ . Вероятно, это объясняется образованием комплексов  $\text{Al}_x\text{O}_y^{z-}$ . Также влияет и ввод  $\text{MgO}$ . Катионы  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r_{\text{Mg}^{2+}}= 0,078 \text{ нм}$ ), хотя и имеют одинаковый заряд с  $\text{Ca}^{2+}$ , но благодаря меньшему радиусу достигается повышенная плотность упаковки частиц в расплаве из-за появления новых связей  $\text{Mg}^{2+} - \text{O}^{2-}$ .

Наибольшую плотность имеют расплавы оксидных шлаков, плотность которых растет с вводом  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и падает с вводом  $\text{SiO}_2$ , приводящим к образованию анионных комплексов  $\text{SiO}_4^{4-}$ , ослабляющих межйонные связи.

Наибольшее влияние на плотность расплавов на основе  $\text{CaF}_2$  оказывают добавки  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , затем  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ .

Зачастую плотность применяемых при процессах ЭШТ шлаковых систем в диапазоне рабочих температур не превышает  $3,0 \text{ г/см}^3$ , что существенно не влияет на разделение шлаковой и металлической фаз. С ростом температуры плотность шлаковых расплавов понижается.

Предложена формула (1) расчета [1, 2, 3, 5] плотности шлаковых расплавов при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$  в зависимости от их химического состава:

$$\frac{1}{\gamma} = 0,416\text{SiO}_2 + 0,303\text{CaO} + 0,372\text{MgO} + 0,328\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,389\text{CaF}_2 . \quad (1)$$

О прочности связи различных катионов с анионами в шлаковых расплавах судят, сопоставляя значения как ионных радиусов, так и ионных потенциалов. Наиболее высокое значение отношения заряда иона к его радиусу имеют ионы  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ , которые характеризуются большими зарядами и малыми ионными радиусами. Связь этих катионов с анионом кислорода  $\text{O}^{2-}$  должна быть гораздо прочнее связи других катионов. Комплексные анионы при большом радиусе имеют заметно меньший заряд и соответственно более низкие значения отношения заряда к радиусу, чем катионы металлов, кроме катионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$ , что является показателем слабой связи сложных анионов с катионами.

В расплавленных шлаках катионы и анионы с сильными силовыми полями притягиваются друг к другу с большей силой, а слабые ионы вытесняются и адсорбируются на поверхности расплава, понижая его поверхностное натяжение. Это ионы типа  $Me_xO_2^{z-}$  ( $SiO_4^{4-}$ ;  $Si_2O_7^{6-}$ ;  $Si_3O_9^{6-}$ ;  $MnO_4^{4-}$ ;  $FeO_3^{3-}$ ;  $TiO_3^{2-}$ ;  $CrO_3^{3-}$ ;  $ZrO_3^{2-}$  и др.). Наиболее поверхностно-активным веществом является NaF, с повышением его концентрации, например в системе  $CaF_2 - NaF$ , поверхностное натяжение расплава резко снижается.  $SiO_2$  и  $TiO_2$  также являются поверхностно-активными веществами, хотя и более слабыми.  $ZrO_2$  практически не влияет на поверхностное натяжение, а с повышением концентрации MgO в системе  $Ca_2-Mg$  и  $Al_2O_3$  в системе  $CaF_2-Al_2O_3$  поверхностное напряжение возрастает.[3] CaO оказывает на расплав  $CaF_2-CaO$  меньшее влияние, чем предыдущие два оксида. В этом случае слабые ионы  $Ca^{2+}$  и  $F^-$  заменяются более сильными, и их концентрация в поверхностном слое растет, способствуя повышению связи поверхностных ионов с основной массой расплава. [2]

Плавленый шпат (флюорит)  $CaF_2$  в настоящее время применяется для автоматической сварки, а также для электрошлакового переплава и наплавки высоколегированных нержавеющей хромоникелевых аустенитных сталей и сплавов, титана и других активных металлов. Флюорит  $CaF_2$  представляет собой минерал класса галоидных соединений. Флюорит содержит 51,33 % Ca и 48,67 % F, а также примеси в ничтожном количестве (хлор, газы, редкоземельные элементы, уран, марганец и др.). Плотность плавленого шпата в твердом состоянии составляет примерно 3,18 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1365 °С. Плотность жидкого флюорита при температуре 1400 °С равна 2,40 г/см<sup>3</sup>. Структура кристаллической решетки — кубическая: ионы  $Ca^{2+}$  располагаются по вершинам и в центре граней большого куба, а ионы  $F^-$  - в центре восьми малых кубов, из которых как бы состоит большой куб. Каждый ион  $Ca^{2+}$  окружен восемью ионами  $F^-$ , а каждый ион  $F^-$  — четырьмя ионами  $Ca^{2+}$ . Структура подобно рода носит название флюоритовой.

Шлаки на основе  $CaF_2$  имеют невысокие значения поверхностного натяжения, а повышение межфазного натяжения на границе шлак-металл, благодаря вводу добавок  $Al_2O_3$ , CaO и MgO предопределило применение шлаковых систем на их основе. Это флюсы, нашедшие широкое применение в промышленности: АНФ-6, АНФ-8, АН-291, АН-295 и др. Фтористые шлаки обладают и повышенной адгезией к неметаллическим включениям - оксидам и нитридам.

Вязкость и электрическая проводимость являются наиболее важными технологическими свойствами флюсов. Они определяют интенсивность прохождения физико-химических процессов и технико-экономические показатели ЭШТ. В области рабочих температур вязкость косвенно характеризует рафинировочную способность шлака и его электрическую проводимость, а при температурах кристаллизации металла - характеризует его формирующую способность. Технологические и электрические параметры могут быть предварительно рассчитаны по результатам замеров электрической проводимости шлака.

Из флюсов для ЭШП интерес вызывают флюсы АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-32. Вязкость флюсов при охлаждении повышается медленно из-за склонности к образованию кристаллических стеклообразных структур по причине относительно высокого содержания  $SiO_2$ . Среди них флюс АНФ-28 имеет наименьшую температуру плавления (1170 °С) и большой температурный интервал затвердевания. Кроме того, ниже температуры выпадения эвтектики флюсы АНФ-28 и АНФ-29 обладают заметной текучестью, а при достаточно высокой скорости охлаждения (30 – 40 С/мин) эти флюсы еще достаточно текучи (около 1,0 Пас) и при температуре 1100 °С.

Из сварочных флюсов [5,8] наибольший интервал затвердевания имеет флюс АН-8, наименьший - АНФ-1П, который является и наиболее тугоплавким. Флюсы АН-22, АН-348А, ФЦ-7 занимают промежуточное положение.

Вязкость флюсов для термообработки при рабочих температурах 860 - 1150 °С (для АН-ШТ1) и 780 - 880 °С (для АН-ШТ2) не превышает 0,8 Пас.

Из сварочных флюсов наименьшая электрическая проводимость у флюса ФЦ-7, наибольшая - у АН-25. Среди флюсов для переплава наибольшей электрической проводимостью обладают флюсы АНФ-1П и АНФ-7, наименьшей - бесфторидный АН-29. Флюс АНФ-6 занимает промежуточное положение. У флюсов АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-82 наблюдается резкое увеличение электрической проводимости при температурах 1720 - 1840 °С.

Устойчивость процессов ЭШТ, хотя и возрастает с повышением электрической проводимости шлаковых расплавов, но в то же время требует ввода более значительной электрической мощности для выделения достаточного количества теплоты в шлаковой ванне.

Все флюсы разделяются на кислые, в которых преобладают такие оксиды, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ; основные с преобладающим количеством  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  и нейтральные. Амфотерные оксиды, такие как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в кислых шлаках ведут себя как основные, а в основных, как кислые. Хлористые и фтористые соединения - нейтральны.

Для определения основности шлака [2, 3, 5], изучаемого и применяемого в производстве, можно использовать выражение (формула)

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + B \text{aO} + \text{SrO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + 1/2 \cdot (\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 1/2 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}, \quad (2)$$

где  $B$  – степень основности флюса;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaF}_2$  и др. – содержание химических соединений во флюсе, %.

При  $B > 1$  флюс считается основным; при  $B < 1$  – кислым; при  $B \approx 1$  – нейтральным.

Классификация шлаков по степени кислотности или основности является условной. Для сварки и наплавки применяемые флюсы и шлаки имеют кислотность  $K = 1,2-1,5$ . При большей величине  $K$  шлаки для сварки не пригодны, так как повышение кислотности за счет повышения содержания  $\text{SiO}_2$  ухудшает стабильность дугового процесса, шлаки становятся слишком вязкие, вследствие чего химическая активность падает, что приводит к образованию пор и шлаковых включений в металле шва.

Таким образом, для электрошлакового переплава сталей наиболее приемлемыми являются флюсы на основе фторсодержащих соединений  $\text{CaF}_2$  с введением в них  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и т.д., что обеспечивает при ЭШП необходимую производительность и получение высококачественного литого электрошлакового металла [4,6].

#### Библиографический список

1. **Степанов, В.В.** Плотность расплавленных флюсов для электрошлакового переплава и подогрева / В.В. Степанов, Б.Е. Лопаев // Автоматическая сварка, 1967. № 2. С. 39–41.
2. **Якобашвили, С.Б.** Поверхностное и межфазное натяжение бинарных расплавов на основе  $\text{CaF}_2$  / С.Б. Якобашвили, И.И. Фрумин // Автоматическая сварка. 1962. № 10. С. 41–45.
3. **Якобашвили, С.Б.** Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков / С.Б. Якобашвили. – Киев: Техніка, 1970. – 208 с.
4. **Лютый, И.В.** Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов / И.В. Лютый, Ю.В. Латаш. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 188 с.
5. **Подгаецкий, В.В.** Сварочные флюсы / В.В. Подгаецкий, И.И. Люборец. – Киев: Техніка, 1984. – 167 с.
6. **Латаш, Ю.В.** Очищение металла от неметаллических включений при электрошлаковом переплаве / Ю.В. Латаш [и др.] // Автоматическая сварка. Киев: АН СССР. 1960. № 9. С.17–23.
7. **Никитин, Б.М.** О фазовом составе фторсодержащих шлаков электрошлакового переплава / Б.М. Никитин, Т.И. Литвинова, Т.Ф. Решенко // Изв. АН СССР. Металлы. 1966. №6. С. 58–64.
8. **Жмойдин, Г.И.** Плавкость фторсодержащих шлаков // Изв. АН СССР. Металлы. 1969. №6. С. 9–16.

Дата поступления  
в редакцию 01.02.2016

S.N. Zharebtsov<sup>1</sup>, E.A. Chernishov<sup>2</sup>

**FEATURES PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES FLUX USED  
IN THE TECHNOLOGY OF ELECTROSLAG REMELTING**

Omsk state pedagogical university,<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

The experimental studies and theoretical data on the physico-chemical properties and functions of fluxes used for conducting sustainable processes remelting, casting, welding in various metallurgical technologies ESR. Discussed energy ties cations and anions in the slag systems of different brands fluxes and their physical properties. The formulas for calculating the density and the basicity of slag melts, depending on the chemical composition of the flux. The physical density, the results of direct measurements of the melting point of the various fluxes and metal alloys at electroslag remelting.

*Key words:* electroslag remelting, fluxes, chemical composition, physical properties, density, temperature, liquid slag and metal.