

CHEMISTRY

Межфазное распределение водорода в процессах электрошлакового переплава сталей

В. Я. Кожухарь, В. В. Брем, И. В. Дмитренко, Л. В. Иванченко

Одесский национальный политехнический университет, г.Одесса, Украина
Corresponding. E-mail: kozhukhar-vladimir@ukr.net

Paper received 09.08.17; Accepted for publication 15.08.17.

Аннотация. Для получения в результате переплава сталей с пониженным содержанием водорода определен механизм межфазного распределения его в системе газ – флюс – металл. Установлено, что лимитирующей стадией кинетики процесса, протекающей на межфазной границе, является окислительно-восстановительная реакция с участием водородосодержащих газов и компонентов металлической фазы. Управление лимитирующей стадией позволяет получить в результате переплава изделия высокого качества.

Ключевые слова: распределение водорода, электрошлаковый переплав, флюс, кинетика, механизм, лимитирующая стадия

Вступ. Известно, что получение высококачественных сталей методом электрошлакового переплава (ЭШП) со сниженным содержанием растворенного водорода является сложной задачей. Повышенное содержание водорода оказывает вредное влияние на качественные характеристики и свойства сталей и сплавов. Главным требованием сталеплавильщиков является разработка таких технологических параметров переплава, которые бы дали возможность получать металл с наименьшим содержанием водорода. Вследствие того, что переплав стали, осуществляется в системе газ – флюс – металл, необходимо изучать механизм межфазного его распределения и взаимодействия выше указанных фаз в условиях высоких температур.

Обзор публикаций. В ряде работ (см. например [1, 2]) рассмотрены различные источники поступления водорода в сталь, переплавляемую методом ЭШП. Из анализа этих данных следует, что для стационарного режима открытого переплава основными из них являются только два источника. Водород, находящийся в переплавляемом электроде довольно успешно устраняется, применением вакуумированной стали, для изготовления исходных (переплавляемых) электродов [3–7]. Вторым источником является водород, поступающий в металл через флюсовый расплав из газовой фазы, всегда содержащей водяные пары в зависимости от парциального давления атмосферы (P_{H_2O}). Природа этого фактора оказалась чрезвычайно сложной и к настоящему времени изучена еще недостаточно.

Общий термодинамический анализ состояния газ – флюс – металл приводит к заключению, что выбранная система в процессе переплава оказывается в очень большой степени неравновесной, применительно к технологии ЭШП. Этот вывод непосредственно следует из сопоставления величин окислительно-восстановительного потенциала рассматриваемых фаз, выражаемых через равновесные для них значения парциальных давлений кислорода (P_{O_2}). Если для газовой фазы в кристаллизаторе открытой установки ЭШП $P_{O_2} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ МПа, то величины P_{O_2} , равновесные при рабочих температурах процесса с составами переплавляемых сталей, существенно ниже, чем 10^{-15}

МПа. Так во флюсовом расплаве, контактирующем с газовой и неметаллической фазами, неизбежно возникает большой градиент P_{O_2} по высоте его слоя. Не может быть равновесным при таких обстоятельствах и межфазное распределение водорода в системе газовая фаза – флюс – металл в процессе плавки ЭШП.

Следует признать некорректными попытки авторов некоторых работ оценивать газозащитные свойства флюсов по ходу ЭШП с помощью коэффициента распределения водорода между флюсом и металлом. Нами проведено сравнение плавочных и равновесных величин K_H [5, 6, 8], который подтверждает вывод о том, что состояние процессов, определяющих межфазное распределение водорода в системах ЭШП, далеко от равновесных.

Цель. Определить термодинамические и кинетические особенности и механизм межфазного распределения водорода в процессах электрошлакового переплава сталей.

Методика. Нами в работе [7, 9, 10] предложен количественный параметр относительной водородопроницаемости Q_H флюсовых расплавов (для заданных и неизменных условий проведения плавки) в виде

$$Q_H = ([H]_{исх} + (\Delta[H])_{фл}) / [H]_{исх}, \quad (1)$$

где $[H]_{исх}$ – исходное содержание водорода в переплавляемом электроде, а $(\Delta[H])_{фл}$ – разница между $[H]_{исх}$ и значением $[H]$ в слитке переплавленного металла. Тогда обобщенная характеристика скорости межфазного перехода водорода из газовой фазы в переплавляемый металл, заданная соотношением (1), оказалась бы связанной с P_{H_2O} уравнением типа $Q_H = k \cdot P_{H_2O}$, в котором k – коэффициент пропорциональности.

Водородопроницаемость флюсового расплава оценивалась с помощью двух параметров Q_H и Q_H° [6, 7]. Параметр Q_H , определяемый соотношением (1), характеризует относительную водородопроницаемость флюсовой фазы в процессах ЭШП. С целью исключения зависимости Q_H от P_{H_2O} нами предложен стандартный параметр водородопроницаемости флюсов Q_H° , рассчитываемый из равенства

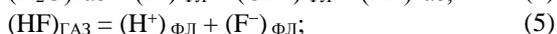
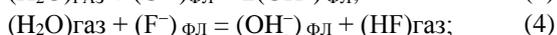
$$Q_H^{\circ} = Q_H \cdot (P_{H_2O}^{\circ} / P_{H_2O})^{0,5}, \quad (2)$$

где P_{H_2O} – парциальное давление паров воды в рабочей (цеховой) атмосфере при проведении плавки ЭШП; $P^{\circ}_{H_2O}$ – парциальное давление паров воды при принятых нами стандартных условиях: 25°C и 50 % относительной влажности атмосферного воздуха ($1,58 \cdot 10^3$ Па).

Следует заключить, что процесс перехода водорода из газовой фазы в переплавляемый металл в условиях ЭШП является кинетическим процессом. С учетом кинетики гетерогенных реакций рассматриваемый процесс можно представить как совокупность следующих основных последовательно протекающих стадий.

1. Массопередача H_2O из объема газовой фазы к верхней поверхности флюсового расплава.

2. Химические реакции на межфазной границе газ – флюс типа



3. Молекулярная диффузия водородосодержащих ионов (OH^- и H^+) через диффузионный слой во флюсовом расплаве (вблизи границы газ – флюс).

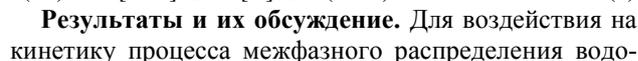
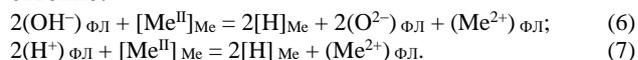
4. Массопередача ионов OH^- и H^+ (или, что то же самое, растворенных во флюсе H_2O и HF) через слой флюсового расплава к нижней его поверхности.

5. Молекулярная диффузия ионов OH^- и H^+ (или, что то же самое, растворенных во флюсе H_2O и HF) во

флюсе через диффузионный слой вблизи его границы с металлом.

6. Окислительно-восстановительные химические реакции на межфазной границе флюс – металл типа

7. Диффузионный отвод продуктов реакции (6) и (7) вглубь металлической и флюсовой фаз соответственно.



Результаты и их обсуждение. Для воздействия на кинетику процесса межфазного распределения водорода в системах ЭШП оказывается важным выявление лимитирующей стадии из приведенного выше ряда. Специальных исследований, посвященных выяснению данного процесса, до сих пор не предпринималось. Высказанные по этому поводу в работах [2–4] предположения не подкреплены специальным экспериментом и не согласуются между собой. Для выявления лимитирующей стадии в кинетическом процессе межфазного перехода водорода по ходу плавки представлялось целесообразным провести и такую серию экспериментов, в которой изменялся бы состав флюсового расплава и состав металлической фазы. С этой целью в отдельной группе опытов в производственных условиях проведены плавки ЭШП с применением наиболее распространенных марок флюсов и в качестве переплавляемого металла стали четырех различных марок (08X18H10T, 12X18H10T, 40XH и 15X2HMA). Результаты этих исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия проведения и результаты опытных плавки по определению величин $(\Delta [H])_{ФЛ}$, Q_H и Q°_H для расплава флюса АНФ-6 при переплаве различных сталей

Номер плавки	Марка стали	Кол-во плавки	$P_{H_2O} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}$, Па	$[H]$, см ³ /100 г	$(\Delta [H])_{ФЛ}$, см ³ /100 г	Q_H	Q°_H
1	08X18H10T	6	15,0	8,3	+2,6	1,31	1,32
2	08X18H10T	8	5,5	7,6	-1,6	0,79	1,33
3	12X18H10T	3	17,7	8,2	+2,8	1,34	1,26
4	12X18H10T	3	15,8	8,3	+2,5	1,30	1,29
5	40XH	2	8,4	1,8	+3,6	3,00	4,09
6	40XH	4	6,3	1,8	+3,2	2,78	4,37
7	15X2HMA	3	19,2	1,8	+2,8	2,57	2,32
8	15X2HMA	3	11,3	1,8	+1,0	2,05	2,41

Скорость первой из указанных выше стадий в стационарном режиме, как можно показать, должна быть пропорциональна концентрации водяных паров в рабочей атмосфере установки ЭШП или, что то же самое для рассматриваемого случая, величине P_{H_2O} цеховой атмосферы.

Если допустить, что лимитирующей стадией является стадия 1, то параметр Q_H не зависел бы ни от состава флюсового расплава, ни от состава переплавляемого металла. Все из приведенных условий находятся в противоречии с опытными данными. Из табл. 1 видно, что величина Q_H пропорциональна P_{H_2O} и, кроме того, зависит от состава флюсовой фазы и от состава переплавляемой стали. Все это вместе взятое позволяет заключить, что стадия 1 в условиях ЭШП не является лимитирующей.

Для лимитируемости анализируемого процесса стадией 2, т.е. скоростью протекания химических реакций (3)...(5), возможно вывести следующее обобщенное соотношение:

$$Q_H = k P_{H_2O}^n, \quad (8)$$

где k – коэффициент пропорциональности, а n – усредненный для трех реакций порядок по H_2O . Параметр n уравнения (8) должен зависеть от состава флюсового расплава и быть нечувствительным к составу металлической фазы. Однако это не подтверждается опытными данными табл.1: n для всех вариантов проведения плавки – величина постоянная ($n \cong 0,5$), не зависящая от состава флюсов.

Из существа уравнений (1) и (2) следует, что при $Q^{\circ}_H < 1$ процесс ЭШП сопровождается дегазацией металла. С другой стороны, показатель Q°_H позволяет выявить и зависимость величины n уравнения (8) от состава металла. В том случае, если таковая отсутствует, величина Q°_H должна быть одинаковой (в пределах какой-то экспериментальной погрешности) для всех марок сталей, переплавляемых способом ЭШП.

Из данных табл. 1, прежде всего, следует, что величины $(\Delta [H])_{ФЛ}$ и Q°_H количественно характеризующие кинетику межфазного распределения водорода в

системе газ – флюс – металл при электрошлаковом переплаве, зависят от состава металлических фаз. Кроме того, для каждой из четырех исследованных сталей величина Q_H пропорциональна $(P_{H_2O})^{0,5}$.

Так, для вариантов плавков 7 и 8 стали марки 15X2HMA (см. табл. 1) парциальные давления водяных паров в цеховой атмосфере составляли $1,94 \cdot 10^3$ и $1,14 \cdot 10^3$ Па, чему отвечает значение $((P_{H_2O})_7 / (P_{H_2O})_8)^{0,5}$ равное 1,30. Отношение же $(Q_H)_7 / (Q_H)_8$ для рассматриваемых групп плавков, рассчитанное по опытным данным табл. 1, равно 1,25. Для вариантов плавков 1 и 2 (сталь марки 08X18H10T) наблюдается еще лучшее согласование выбранных отношений: $((P_{H_2O})_1 / (P_{H_2O})_2)^{0,5} = 1,65$ и $(Q_H)_1 / (Q_H)_2 = 1,66$.

Из приведенных фактов, прежде всего следует, что в плавках с неизменным составом флюса при достаточно малых значениях P_{H_2O} в газовой фазе содержание водорода в готовом металле может быть меньшим по сравнению с таковым в исходных электродах (см. варианты 1 и 2 в табл. 1). Отмеченная закономерность дает возможность по нескольким или одной из проведенных плавков (с известным P_{H_2O}) с помощью выражения (2) определить необходимую степень осушки газовой фазы в установке ЭШП для исключения наводороживания металла. Рассмотрение же численных значений величин Q°_H , также приведенных в обсуждаемых опытных данных (см. табл. 1), позволяют утверждать, что приведенный показатель наводороженности металла в большей степени зависит от состава последнего. При этом следует отметить, что данные табл. 1 вполне корректны. Так, для сталей марок 08X18H10T и 12X18H10T, близких по составу, получены и близкие значения Q°_H .

Таким образом, совместное рассмотрение экспериментальных результатов по водородопроницаемости флюсовых расплавов, приведенных в табл. 1 приводит к выводу, что вторая стадия рассматриваемого гетерогенного процесса межфазного переноса водорода в процессах ЭШП не является лимитирующей.

Стадии 3 и 5 сходны между собой и связаны с молекулярной диффузией водорода в флюсовом расплаве. В случае лимитируемости одной из этих скоростей всего процесса межфазного распределения водорода в

плавках ЭШП величина Q°_H зависела бы от состава флюса и была бы нечувствительна к природе переплавляемого металла. Последнее, как уже отмечено, с опытными данными не согласуется. Кроме того, как показано в сообщении [11, 12], коэффициент молекулярной диффузии водорода в расплавах фторидно-оксидных флюсов исключительно высок (в среднем $1,1 \cdot 10^{-4}$ см/с). Все это вместе взятое позволяет заключить, что стадии 3 и 5 не могут быть лимитирующими. Лимитируемость рассматриваемого процесса стадией 7 еще более маловероятна, поскольку скорости диффузионных процессов в жидких металлах намного превосходят таковые в шлаковых расплавах [12].

В табл. 1 сведены полученные нами (см. также [13, 14] данные по политермам динамической вязкости η расплавов флюсов различных марок. Из указанных данных можно видеть, что при температурах выше 1600...1650 °С (т.е. в области рабочих температур электрошлакового переплава сталей) флюсы оказываются уже настолько перегретыми (и соответственно структурно разупорядоченными), что их вязкость с дальнейшим ростом температуры остается практически неизменной. Определенные по политермам величины вязкости для исследованных флюсов при 1700 °С с выходом на горизонтальные участки температурных зависимостей η всех исследованных флюсов приведены в табл. 2. Рассматривая совместно величины η и Q°_H , можно видеть (см. табл. 2), что стандартная водородопроницаемость фторидно-оксидных расплавов флюсов ЭШП оказывается не связанной с их вязкостью. Так, вязкость расплавленного флюса марки АНФ-7 при 1700 °С составляет только 0,004 Па·с, вязкость при той же температуре флюса АН-291 – на порядок величины больше (0,045 Па·с). Однако отношение соответствующих им величин Q°_H составляет ~1,5. В общем же, несмотря на то, что минимальные и максимальные величины η для приведенных в табл. 2 флюсов отличаются друг от друга более чем в 20 раз, а отвечающие им значения стандартной водородопроницаемости – величины одного порядка.

Таблица 2. Результаты опытных плавков по определению величин Q°_H для расплавов флюсов ЭШП при переплаве стали 12X18H10T

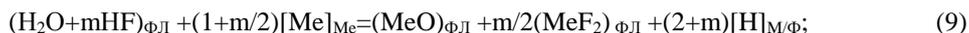
№ флюса	Марка флюса	Содержание основных компонентов во флюсах, мас. %					Вязкость флюса при 1700°С, Па·с	Q°_H
		CaF ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂		
1	АНФ-6	59,4	4,8	—	30,8	1,0	0,022	1,19
2	АНФ-7	79,6	19,9	—	—	—	0,004	1,58
3	АНФ-13	54,4	16,6	—	22,0	6,5	0,016	1,13
4	АНФ-14	68,3	3,2	—	12,5	15,4	0,003	0,95
5	АНФ-25	52,6	13,5	13,5	16,0	2,5	0,020	1,36
6	АНФ-28	46,7	27,3	—	1,6	23,0	0,020	1,26
7	АНФ-29	40,4	25,6	3,5	15,1	13,0	0,012	1,39
8	АНФ-291	16,3	22,8	20,6	38,2	1,5	0,045	1,05

Полученный результат по отсутствию связи между η и Q°_H для жидких флюсов в процессах ЭШП представляется неожиданным, поскольку до сих пор предполагалось, что кинетика наводороживания переплавляемого металла лимитируется процессами массопереноса водорода в жидких флюсах. В последнем же

случае, как показано в монографии [14] применительно к металлургическим оксидным шлакам, вязкость расплавов оказывается решающим фактором, определяющим водородопроницаемость. Приведенные доводы позволяют предположить, что массоперенос водорода во флюсовом расплаве (стадия 4) не являет-

ся лимитирующим этапом многостадийного кинетического процесса межфазного распределения водорода в системе газ – флюс – металл в процессе ЭШП.

Анализ всей совокупности имеющихся в литературе и полученных нами экспериментальных данных по изучению особенностей поведения водорода в процессе ЭШП позволяет заключить, что уровень наводороженности переплавляемого металла, в основном, определяется скоростью протекания химических реакций взаимодействия растворенных во флюсе содержащих водород окислительных газов (H_2O и HF) с относительно легко окисляющимися компонентами металлической ванны (стадия 6). Нами ранее [5, 6] показано, что в расплавах фторидно-оксидных флю-



Возможно, предположить далее, что в этом процессе лимитирующим этапом является реакция (9), скорость протекания которой лимитируется собственно химическим актом. С другой стороны, скорость протекания реакции (9) определяет уровень стационарной концентрации атомарного водорода на рассматриваемой межфазной границе – $(2+m)[H]_{\text{МФ}}$. Соотношение между последним, задающим термодинамический стимул растворения водорода в металлической ванне плавки, и уровнем исходной наводороженности переплавляемого металла определяет, в конечном итоге, уровень текущей наводороженности переплавляемого металла в процессе ЭШП. При этом металл может как дополнительно наводороживаться за счет преимущественного протекания реакции (11), так и частично дегазироваться за счет преимущественного протекания в обратном направлении реакций (11) и (9).

Таким образом, решающее влияние на механизм процессов межфазного перехода водорода в электрошлаковых переплавных процессах оказывает реакция (9). Из всей совокупности приведенных выше опытных данных можно также видеть, что при принятой технологии ЭШП (с применением фторидно-оксидных флюсов) реакция (9), лимитирующая скорость гетерогенного процесса межфазного распределения водорода, протекает обратимо. Подавление этой реакции или ее торможение (в соответствии с предложенным механизмом) допускают принци-

пов, контактирующих с парами H_2O , растворяются одновременно H_2O и HF . Соотношение их концентраций в жидком флюсе определяется как составом флюса, так и его температурой. Поэтому в общем случае растворенные во флюсе H_2O и HF могут быть представлены как обобщенный реагент вида $(H_2O + mHF)$, в котором m – коэффициент, характеризующий соотношение этих газов в конкретном расплаве.

С учетом отмеченных обстоятельств процессы взаимодействия растворенных в жидкой шлаковой фазе водородсодержащих газов с наиболее активными окисляющимися компонентами (Me^{II}) металлической ванны (на межфазной границе флюс – металл) можно представить следующими схемами:

альную возможность не только исключения наводороживания металла при ЭШП, но и возможность его значительной дегазации (по водороду) в ходе плавки. Вместе с тем следует отметить, что дополнительным резервом снижения потока поступающего в переплавляемый металл водорода является возможность стимулирования протекания реакции (10) в прямом направлении. Эффективность такого приема значительно возрастает, если одновременно с ускорением процесса (10) будет в значительной мере кинетически заторможен процесс (11).

Выводы. Рассмотрены особенности кинетики и механизма отдельных стадий процесса межфазного перехода водорода в системах ЭШП с привлечением всего комплекса полученных в работе и литературных данных. Сделано заключение, что лимитирующей стадией кинетики процесса является окислительно-восстановительная реакция, протекающая на межфазной границе флюс-металл с участием растворенных во флюсовом расплаве водородсодержащих газов (H_2O и HF) и легко окисляющихся компонентов металлической фазы. Установлено, что лимитирующая межфазная реакция протекает обратимо и допускает принципиальную возможность проведения ЭШП сталей, как с дополнительным наводороживанием металла, так и со значительным удалением из него водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожухарь В.Я. Водородопроницаемость расплавов стандартных и опытных фторидно-оксидных флюсов / В.Я. Кожухарь, О.Н. Романов, И.А. Новохатский, В.В. Брем // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 3. – С. 23-26.
2. Медовар Б.И. К вопросу об электрошлаковой выплавке крупнотоннажных заготовок из высоколегированных сталей и заготовок / Б.И. Медовар, Л.Б. Медовар, А.К. Цыгуленко [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1999. – № 2. – С. 26-30.
3. Кожухарь В.Я. Влияние добавок соединений гидридообразующих элементов на водородозащитные свойства флюсов / В.Я. Кожухарь, В.В. Брем, Ю.М. Елутатов // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2000. – № 1(10). – С.192-196.
4. Кожухарь В.Я. Взаимодействие водяного пара и водородосодержащих газов со шлаками / В.Я. Кожухарь, В.В. Брем, А.С. Абеленцева // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2007. – № 2(28). – С.220-223.
5. Брем В.В. Розчинність водню у фторидно-оксидних розплавах: [монографія] / В.В. Брем, В.Я. Кожухар. – Одеса: Астропринт, 2008. – 124 с.
6. Брем В.В. Проникність водню у фторидно-оксидних розплавах: [монографія] / В.В. Брем, В.Я. Кожухар. – Одеса: Екологія, 2010. – 108 с.
7. Брем В.В. Проникність водню у фторидно-оксидних розплавах різних систем / В.В. Брем, В.Я. Кожухар, І.В. Дмитренко // Вісник Нац. технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 10. – С. 94-102.
8. Брем В.В. Визначення вмісту водню у фторидно-оксидних флюсах / В.В. Брем, С.П. Буга // Праці Одеського політехнічного університету. – Одесса, 2008. – № 1(10). – С. 10-14.

- хнічного університету. – Одеса, 2013. – № 3(42). – С. 190-195.
9. Брем В.В. Підготовка проб рідкого флюсу для газового аналізу після переплаву сталей / В.В. Брем, І.В. Дмитренко, С.П. Буга, І.В. Шаповал // Збірник наукових праць VII МНТК "Сучасні проблеми технології неорганічних речовин та ресурсозбереження". – Дніпропетровськ. – 2015 р. – С. 85.
 10. Брем В.В. Відбір проб рідкого флюсу для газового аналізу на вміст водню / В.В. Брем, В.Я. Кожухар, Л.В. Іванченко, І.В. Дмитренко, С.П. Буга // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences, 2015, III(5), Is. 41, С. 57-62.
 11. Кожухарь В.Я. Диффузия водорода во фторидно-оксидных расплавах / В.Я. Кожухарь, В.В. Брем, Ю.М. Епутатов // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 1998. – № 1(5). – С. 248-251.
 12. Брем В.В. Властивості фторидно-оксидних флюсів: [монографія] / В.В. Брем. – Одеса: Екологія, 2010. – 328 с.
 13. Брем В.В. Вплив добавок на в'язкість фторидно-оксидних розплавів / В.В. Брем, В.Я. Кожухар, І.В. Дмитренко // Вісник Нац. технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 10. – С. 85-94.
 14. Кожухарь В.Я. Розроблення теоретичних основ і технології одержання нових складів флюсів: [монографія] / В.Я. Кожухар, В.В. Брем, І.В. Дмитренко, Л.В. Іванченко. – Одеса: Екологія, 2017. – 268 с.

REFERENCES

1. Kozhuhar, V.Ya. Hydrogen permeability of melts of standard and experimental fluoride oxide fluxes / V.Ya. Kozhuhar, O.N. Romanov, I.A. Novohatskiy, V.V. Brem // Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. – 1998. – № 3. – P. 23-26.
2. Medovar, B.I. On the issue of electroslag smelting of large-tonnage billets from high-alloy steels and blanks / B.I. Medovar, L.B. Medovar, A.K. Tsykulenko [at all] // Problemy spetsialnoy elektrometallurgii. – 1999. – № 2. – P. 26-30.
3. Kozhuhar, V.Ya. The effect of additives of hydride-forming elements on the water-protective properties of fluxes / V.Ya. Kozhuhar, V.V. Brem, Yu.M. Eputatov // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – Odesa, 2000. – № 1(10). – P.192-196.
4. Kozhuhar, V.Ya. Interaction of water vapor and hydrogen-containing gases with slags / V.Ya. Kozhuhar, V.V. Brem, A.S. Abelentseva // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – Odesa, 2007. – № 2(28). – P.220-223.
5. Brem, V.V. Solubility of hydrogen in fluoride-oxide melts: [monograph] / V.V. Brem, V.Ya. Kozhuhar. – Odesa: Astroprint, 2008. – 124 p.
6. Brem, V.V. Permeability of hydrogen in fluoride-oxide melts: [monograph] / V.V. Brem, V.Ya. Kozhuhar. – Odesa: Ekologiya, 2010. – 108 p.
7. Brem, V.V. Permeability of hydrogen in fluoride-oxide melts of different systems / V.V. Brem, V.Ya. Kozhuhar, I.V. Dmitrenko // Visnik Nats. tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prats. «Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya» – Harkiv: NTU «HPI», 2010. – № 10. – P. 94-102.
8. Brem, V.V. Determination of hydrogen content in fluoride-oxide fluxes / V.V. Brem, S.P. Buga // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – Odesa, 2013. – № 3(42). – P.190-195.
9. Brem, V.V. Preparation of samples of liquid flux for gas analysis after steel remelting / V.V. Brem, I.V. Dmitrenko, S.P. Buga, I.V. Shapoval // Zbirnik naukovih prats VII MNTK "Suchasni problemi tehnologiyi neorganschnih rechovin ta resursozbezheniya". – Dnipropetrovsk, 2015 r. – p. 85.
10. Brem, V.V. Sampling of liquid flux for gas analysis of the hydrogen content / V.V. Brem, V.Ya. Kozhuhar, L.V. Ivanchenko, I.V. Dmitrenko, S.P. Buga // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Sciences, 2015, III(5), Is. 41, P. 57-62.
11. Kozhuhar, V.Ya. Diffusion of hydrogen in fluoride-oxide melts / V.Ya. Kozhuhar, V.V. Brem, Yu.M. Eputatov // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – Odesa, 1998. – № 1(5). – P. 248-251.
12. Brem, V.V. Properties of fluoride-oxide fluxes: [monograph] / V.V. Brem. – Odesa: Ekologiya, 2010. – 238 p.
13. Brem, V.V. Influence of additives on the viscosity of fluoride-oxide melts / V.V. Brem, V.Ya. Kozhuhar, I.V. Dmitrenko // Visnik Nats. tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prats. «Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya» – Harkiv: NTU «HPI», 2010. – № 10. – P. 85-94.
14. Kozhuhar, V.Ya. Development of theoretical bases and technology for obtaining new flux composition: [monograph] / V.Ya. Kozhuhar, V.V. Brem, I.V. Dmitrenko, L.V. Ivanchenko. – Odesa: Ekologiya, 2017. – 268 p.

Interphase distribution of hydrogen in the processes of steels electroslag remelting

V. V Brem, V. Ya Kozhukhar, I. V.Dmitrenko, L. V. Ivanchenko

Abstract. To obtain steels with a reduced hydrogen content as a result of the remelting, was determined a mechanism of the interphase distribution of it in the gas-flux-metal system. It was established that the limiting stage of the process' kinetics, proceeding at the interface, is the oxidation-reduction reaction with hydrogen-containing gases and metal phase components. The control of the limiting stage makes it possible to obtain high-quality products as a result of remelting.

Keywords: hydrogen distribution, electroslag remelting, flux, kinetics, mechanism, limiting stage.

Межфазное распределение водорода в процессах электрошлакового перепада сталей

В. Я. Кожухарь, В. В. Брем, И. В. Дмитренко, Л. В. Иванченко

Аннотация. Для получения в результате перепада сталей с пониженным содержанием водорода определен механизм межфазного распределения его в системе газ – флюс – металл. Установлено, что лимитирующей стадией кинетики процесса, протекающей на межфазной границе, является окислительно-восстановительная реакция с участием водородосодержащих газов и компонентов металлической фазы. Управление лимитирующей стадией позволяет получить в результате перепада изделия высокого качества.

Ключевые слова: распределение водорода, электрошлаковый перепад, флюс, кинетика, механизм, лимитирующая стадия