



УДК 669.187.56.002.2

ЛЕГИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА АЗОТОМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ПРОЦЕССЕ ЭШП

А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, Е. Л. Корзун,
В. Ю. Мастепан, М. В. Самборский

На основе термодинамического анализа сделана попытка оценить возможность азотирования металла из газовой фазы в процессе электрошлакового переплава (ЭШП). Экспериментально показано, что в камерных агрегатах ЭШП при использовании шлаков системы Ca–CaF₂ и атмосферы азота создаются необходимые условия для перехода последнего в металл в количествах, достаточных для легирования.

Using a thermodynamic analysis an attempt was made to evaluate the feasibility of metal nitriding from a gas phase during the electroslag remelting (ESR). It was shown experimentally that in use of slags of Ca–CaF₂ system and atmosphere of nitrogen in chamber-type ESR units the necessary conditions are created for transition of nitrogen to metal in the amounts sufficient for nitriding.

Ключевые слова: азотирование; электрошлаковый переплав; камерная печь; металлический кальций

Использование азота в качестве легирующего элемента широко известно и реализуется различными производителями для получения стали, предназначенной, прежде всего, для работы в сложных условиях. Однако механизм ввода азота в сталь в сравнении с механизмом ввода других легирующих элементов имеет ряд специфических особенностей и до сих пор представляет значительный интерес с точки зрения изучения закономерностей поведения азота и разработки относительно дешевого способа производства стали с гарантированным уровнем содержания азота.

Основные методы ввода азота в металл связаны 1) с использованием материалов с высоким содержанием растворенного азота, 2) соединений азота, легко разлагающихся при температурах металлургических процессов, 3) с активацией молекулярного азота и растворением его в жидком металле.

Недостатками первых двух методов являются необходимость производства специальных ферросплавов или химических соединений, нестабильность усвоения азота из них в процессе легирования и довольно высокая неоднородность содержания азота в готовом металле.

Очевидно, экологически и экономически целесообразнее использовать газообразный азот для легирования металла. Однако сложности, возникающие

из-за затрат энергии на активацию межмолекулярных связей газообразного азота, препятствуют широкому распространению легирования азотом из газовой фазы. Работы по освоению способов легирования металла азотом из газовой фазы активно ведутся уже не одно десятилетие как у нас в стране, так и за рубежом [1–7].

Легировать металл газообразным азотом можно и в жидком, и в твердом агрегатном состояниях. Азотирование твердого металла применяется для изделий, имеющих малые сечения или получаемых методами порошковой металлургии [7–9]. Более распространены технологии легирования азотом из газовой фазы жидкого металла. Их можно классифицировать по величине давления газовой фазы в агрегатах, в которых происходят процессы легирования: при давлении ниже атмосферного — вакуумно-дуговой (ВДП) [10] и плазменно-дуговой переплавы (ПДП) [1, 2, 11, 12]; при атмосферном давлении — продувка жидкого металла в ковше [7], вакуум- и газокислородное обезуглероживание металла [7, 13], плазменно-дуговой [1, 2] и дуговой шлаковый переплавы (ДШП) [6]; при повышенном давлении (высот до 12 МПа) — разливка под давлением [3], плазменно-дуговой переплав [1, 2], электрошлаковый обогрев жидкого металла под давлением (ЭШОД) [4], дуговой шлаковый переплав под давлением (ДШПД) [5] и индукционная плавка под давлением [3, 14, 15].

© А. Д. РЯБЦЕВ, А. А. ТРОЯНСКИЙ, Е. Л. КОРЗУН, В. Ю. МАСТЕПАН, М. В. САМБОРСКИЙ, 2002



Анализ технологии способов легирования газообразным азотом показывает, что для производства сталей с уровнем содержания азота до 0,03 % вполне применимы процессы, происходящие в открытых агрегатах — продувка в ковше, вакуум- и газокислородное обезуглероживание. Для производства высокоазотистых и сверхвысокоазотистых сталей применяются технологии и агрегаты, работающие, как правило, при давлениях газа, отличающихся от атмосферного. При этом все способы получения высокоазотистых сталей характеризуются большой энергоемкостью, сложностью оборудования, особенно реализуемые при повышенных давлениях, и необходимостью предварительной выплавки исходного металла с требуемым конечным химическим составом за исключением азота.

Способ ВДП для производства высокоазотистых и сверхвысокоазотистых сталей не получил распространения из-за трудностей, связанных со стабилизацией дугового разряда при рабочих давлениях 1...90 кПа, и низкого выхода годного кондиционного металла, характерного для вакуумно-дугового переплава. ПДП, несмотря на многочисленные преимущества, не находит широкого применения в производстве указанных сталей из-за сложности оборудования и высоких затрат на производство. Менее энергоемкий и ресурсоемкий процесс ДШП требует предварительной подготовки расходного электрода — технология легирования газообразным азотом в этом случае предусматривает вдувание азота в область дуги через полость в электроде, что удорожает конечную продукцию.

Настоящая работа направлена на опробование возможности получения сталей, легированных азотом из газовой фазы, при давлении в агрегате, равном атмосферному.

Закономерности поведения азота в сталеплавильных процессах с использованием шлака

Активность компонентов α_i в шлаковой оксидной фазе зависит не только от концентрации компонента c_i , но и от парциального давления кислорода P_{O_2} над расплавом шлака [16]. Концентрация и активность i -го компонента в шлаке связаны следующим выражением:

$$c_i = k' a_i \frac{v_i}{P_{O_2}}, \quad (1)$$

где v_i — валентность i -го компонента в шлаке.

Этот экспериментально подтвержденный факт [16–18] в реальных металлургических системах приводит к появлению эффекта «накачки» [19]. Рассмотрим эффект «накачки» в отношении азота на конкретном примере. Известно, что шлак, контактирующий с печной атмосферой ($P = 101325$ Па и $P_{O_2} = 21278,25$ Па), практически не растворяет азот. Находящийся в контакте с металлом слой шла-

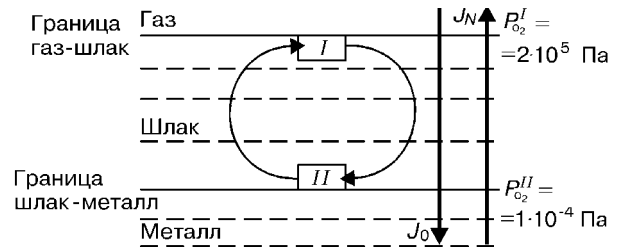


Схема возникновения эффекта «накачки» в оксидных шлаках. J_{O_2} — поток кислорода, J_N — поток азота

ка раскислен ($[O] \approx 0,1\%$; $P_{O_2} \approx 1,013 \cdot 10^{-3}$ Па) и растворяет заметное количество азота.

При конвективном движении отдельные порции шлака попеременно оказываются в областях с пониженной и повышенной окисленностью, поглощая азот вблизи металла и выбрасывая его в атмосферу (рисунок).

Перемешивание шлака играет активную роль в работе азотного «насоса», резко повышая его производительность. Однако и в отсутствие перемешивания эффект «накачки» должен существовать и подчиняться тем же закономерностям. Из сказанного следует, что фактическая концентрация азота в металле всегда ниже, а водорода выше равновесной с печной атмосферой. В пределе это отклонение может достигать значительных величин:

$$[N]_{\text{мин}} = [N]_{\text{равн}} \cdot \left(\frac{P_{O_2}^I}{P_{O_2}^{II}} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (2)$$

Рассмотренная закономерность поведения азота подтверждается практикой. Содержание азота более чем в 10 раз ниже равновесного во всех открытых сталеплавильных агрегатах и даже в дуговых электропечах, где происходит интенсивное насыщение металла азотом в области дуг. При выдержке под шлаком содержание водорода в металле увеличивается, а содержание азота снижается [20–23].

Следовательно, для легирования металла азотом из газовой фазы необходимо: использование жидкого и подвижного (перемешиваемого) шлака; наличие восстановительной атмосферы вблизи границы раздела газ — шлак; наличие градиента окисленности шлака, направленного от границы раздела шлак — металл к границе газ — шлак ($P_{O_2}^I < P_{O_2}^{II}$), причем, чем выше будет этот градиент, тем выше будет движущая сила процесса легирования.

Для реализации всех перечисленных условий было предложено провести электрошлаковый переплав с использованием активных кальцийсодержащих шлаков в камерной печи [24] с заменой нейтральной газовой атмосферы на азотсодержащую неокислительную. Такой способ удовлетворяет вышеперечисленным требованиям легирования металла газообразным азотом с помощью эффекта «накачки», так как: используется шлак; в небольшом газовом слое над шлаком создается низкий химический потенциал кислорода из-за присутствия в шлаке кальция и его активного испарения; шлак интенсив-



№ плавки	Состав исходных флюсовых компонентов, %	Атмосфера печи	Содержание элементов в металле, % мас		
			N	O	S
	Исходный металл		0,0061	0,0186	0,0143
1	АНФ-1П — 100	Воздух	<u>0,0075</u> 0,0066	— 0,0161	<u>0,0046</u> 0,0053
2	АНФ-1П — 89,3 Ca — 6,0 ТРГМ — 4,7	Воздух	<u>0,0134</u> 0,0088	— 0,0183	<u>0,0039</u> 0,0067
3	CaF ₂ — 93,75 Ca — 6,25	Аргон	<u>0,0023</u> 0,0044	— 0,0071	<u>0,0025</u> 0,0019
4	CaF ₂ — 93,75 Ca — 6,25	Азот	<u>0,0182</u> 0,0265	— 0,0094	<u>0,0030</u> 0,0026
5	CaF ₂ — 100	Азот	<u>0,0127</u> 0,0090	— 0,0105	<u>0,0080</u> 0,0145
6	CaF ₂ — 97,4 ТРГМ — 2,6	Азот	<u>0,0080</u> 0,0071	— 0,0179	<u>0,0096</u> 0,0116

Примечание. Над чертой приведено содержание элемента в пробе, взятой на уровне 15 мм от дна слитка, под чертой — то же на уровне 90 мм от дна слитка.

но перемешивается за счет магнитогидродинамических эффектов в ванне печи. Наличие в шлаке металлического кальция позволяет резко снизить содержание серы в металле, присутствие которой негативно отражается на насыщении железных расплавов азотом [25].

Для проверки вышеприведенных рассуждений провели ряд базовых или сравнительных экспериментов по получению слитков ЭШП под шлаком АНФ-1П; под фторидными шлаками с созданием в процессе переплава потока кислорода, направленного из металла в атмосферу печи за счет окисления на поверхности раздела шлак — газ добавляемого углерода в виде терморасщепляющегося графитового материала (ТРГМ); под фторидными шлаками с созданием в процессе переплава потока кислорода, направленного из металла в атмосферу печи за счет окисления кальция на поверхности раздела шлак — газ.

Методика проведения экспериментов

Переплав электродов из ст.50 диаметром 45 мм осуществляли в камерной печи, созданной на базе агрегата А-550 [26], в кристаллизатор диаметром 90 мм. Электрический режим переплава: сила тока 1,8... 2,0 кА, напряжение 40 В. В качестве основных компонентов шлака использовали промышленный флюс АНФ-1П и фтористый кальций марки ОСЧ-5-2 (ТУ-6-09-2412—72), в качестве добавочных компонентов — металлический кальций чистотой 99,5 % и ТРГМ [27]. Добавки во флюс вводили путем замешивания добавочного компонента в исходный основной компонент перед началом плавки. Для создания печной атмосферы использовали: газообразный аргон с объемной долей аргона $\geq 99,992\%$, кислорода $\leq 0,0007\%$, азота $\leq 0,005\%$; газообразный азот с объемной долей азота $\geq 99,99\%$,

кислорода $\leq 0,0007\%$, аргона $\leq 0,005\%$. Давление газа в камере печи поддерживали на уровне 101 кПа.

Из полученных слитков на высоте 15 и 90 мм от их донной части вырезали поперечные темплеты толщиной 10 мм, из которых отбирали стружку для анализа на содержание в металле серы и азота. С целью определить содержание кислорода из осевой части темплета изготавливали стандартные образцы. Содержание газов исследовали по стандартной методике на установках фирмы «Леко» ТС-300, ЕР-300. Погрешность определения содержания азота и кислорода составляла $1 \cdot 10^{-3}\%$ мас. Содержание серы оценивали методом инфракрасной спектроскопии по стандартной методике на аппарате фирмы «Леко» СS-200, погрешность определения $2 \cdot 10^{-4}\%$ мас. Каждое определение проводили не менее трех раз. Результаты химического анализа металла после ЭШП приведены в таблице.

Обсуждение полученных результатов

При переплаве на воздухе (плавка №1) содержание азота в стали практически не изменяется, хотя содержание кислорода снижается, что, очевидно, в открытом процессе связано с ассимиляцией шлаком оксидных включений. При аналогичном переплаве в атмосфере азота (плавка №5) отмечено небольшое повышение его содержания в переплавленном металле.

Переплав под кальцийсодержащим шлаком в атмосфере аргона (плавка №3) приводит к резкому снижению содержания контролируемых примесных элементов в стали: кислорода, азота и серы. При добавлении в шлак металлического кальция и переплаве в атмосфере азота происходит насыщение металла азотом из газовой фазы (плавка №4). Од-



нако при добавлении ТРГМ (плавки №2, 6) эффект «накачки» азота не подтверждается.

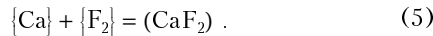
На наш взгляд, такое поведение азота объясняется составом шлаковой системы, используемой для переплава: мы применили фторидную систему, а теоретические рассуждения построили на основе анализа поведения азота в оксидных шлаках. Для фторидной системы или фторидно-оксидной с преобладанием фторидной части по аналогии с закономерностью, установленной для оксидных фаз (выражение (1)), с большой долей вероятности можно предположить, что активность компонента в шлаке зависит не только от его концентрации, но и от парциального давления фтора над шлаковым расплавом:

$$c_i = k' a_i P_{F_2}^{\frac{v_i}{2}} \quad (3)$$

Для азота выражение (3) принимает вид

$$(N) = k_N P_{N_2}^{\frac{1}{2}} P_{F_2}^{-\frac{3}{2}} \quad (4)$$

С целью определить направление потока фтора в процессе электрошлакового переплава под фторидными шлаками рассчитаем величину равновесного парциального давления фтора на границах шлак — газ и металл — шлак. В условиях открытого процесса ЭШП с применением фторидного шлака равновесное давление фтора на указанных границах определяется равновесием реакции образования фторида кальция, составляющего основу шлака

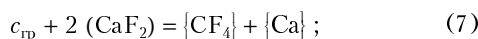


Энергия Гиббса (Дж/моль) реакции (5) имеет следующую зависимость от температуры [16]:

$$\Delta G_6 = -970000 + 84 T \quad (6)$$

Высокие значения константы равновесия реакции (5) — $K_6 = 4,6 \cdot 10^{22}$ при 1873 К и $K_6 = 9,1 \cdot 10^{21}$ при 1973 К говорят о чрезвычайно низких значениях парциального давления фтора на обеих границах раздела фаз. Отсутствие достаточно сильного восстановителя фторида кальция как в газовой, так и в металлической фазах обуславливает равенство парциальных давлений фтора на рассматриваемых фазовых границах.

При вводе ТРГМ на поверхность шлака равновесие реакции (5) за счет образования фторидов углерода не нарушается:



$$\Delta G_7 = 36800 + 67,5 T > 0. \quad (8)$$

Поэтому в металле плавки №2 и 6 содержание азота близко к его содержанию в контрольном слитке (плавка №1).

При вводе в состав шлака металлического кальция мы искусственно сдвигаем равновесие реакции (5) в сторону исходных веществ. При этом можно рассчитать парциальное давление фтора над кальцийсодержащим шлаком, приняв в первом прибли-

жении парциальное давление кальция равным 101325 Па:

$$K_6 = \frac{a(CaF_2)}{P_{Ca} P_{F_2}} \quad (9)$$

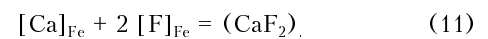
Величина парциального давления фтора на границе раздела фаз газ — шлак определяется из следующего выражения:

$$P_{F_2} = \frac{a(CaF_2)}{K_6 P_{Ca}} = \frac{a(CaF_2)}{\exp\left(-\frac{\Delta G_6}{RT}\right) P_{Ca}} = \frac{1}{\exp\left(-\frac{\Delta G_6}{RT}\right)} = \exp\left(\frac{\Delta G_6}{RT}\right) \quad (10)$$

Примем активность фторида кальция равной единице, а температуру шлака на границе с газом 1973 К. Тогда парциальное давление фтора на границе газ — шлак составит $P_{F_2}^1 = 1,1 \cdot 10^{-17}$ Па.

Для рассмотрения поведения фтора на границе раздела фаз шлак — металл примем следующие допущения: основой жидкого металла является железо, концентрациями остальных элементов пренебрегаем; раствор фтора в жидком железе является бесконечно разбавленным.

Учитывая распределение введенного в исходный флюс кальция между фазами системы, поведение фтора на границе раздела шлак — металл можно описать реакцией



Эту реакцию можно представить как сумму реакции (5) и следующих реакций:



$$\Delta G_{10} = 163200 - 58,6 T \quad [19]; \quad (13)$$



$$\Delta G_{12} = A + BT. \quad (15)$$

Учитывая приведенные выше допущения, значение параметра A в формуле (15) можно приравнять к значению начальной теплоты растворения фтора в жидком железе, которую можно оценить с помощью метода Мисдемы [28, 29] по формуле

$$\Delta H_F^\infty = \frac{2 V_F p}{n_{WS_{Fe}}^{-\frac{1}{3}} + n_{WS_F}^{-\frac{1}{3}}} \times \quad (16)$$

$$\times \left\{ - (k_{Fe} - k_F)^2 + Q \left(n_{WS_{Fe}}^{\frac{1}{3}} - n_{WS_F}^{\frac{1}{3}} \right)^2 - aR \right\},$$

где $V_F = 14,61 \text{ см}^3/\text{моль}$ — мольный объем фтора [30]; n_{WS_i} — электронная плотность на границах атомной ячейки Вигнера — Зейтца; $n_{WS_{Fe}} = 5,54$, ус-



ловные единицы плотности [31]; k_i — электроотрицательность элемента, $k_{Fe} = 4,93$ [28], $k_F = 3$ [30]; $p = 14200$ Дж/моль [28], $Q = 9400$ Дж/моль [29], $R = 0$ [29] — параметры модели Миедемы; a — коэффициент, учитывающий агрегатное состояние раствора, для жидких растворов $a = 0,73$ [29].

Величину электронной плотности на границах атомной ячейки Вигнера — Зейтца для фтора определяли по эмпирической корреляционной зависимости, найденной Миедемой [31]:

$$n_{WS_i} = 8,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{B_i}{V_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

где B_i — объемный модуль сжатия, кг/см², который определяется из выражения [32]

$$B_i = \left(\frac{6,13}{r_s/a_0} \right)^5 \cdot 10^{10} \text{ (дин/см}^2\text{)} = \left(\frac{6,13}{r_s/a_0} \right)^5 \cdot 10197, \quad (18)$$

где a_0 — борковский радиус; r_s — радиус сферы, объем которой равен объему, приходящемуся на один электрон проводимости:

$$r_s = \left(\frac{3}{4 \pi n_i} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (19)$$

где n_i — плотность электронного газа при рассмотрении растворяемого элемента в металлическом состоянии

$$n_i = \frac{N_A z_i \rho_i^m}{A_i}, \quad (20)$$

где $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро; z_i — число валентных электронов, $z_F = 1$; ρ_i^m — плотность растворяемого элемента в металлическом состоянии, для фтора принята плотность в твердом состоянии $\rho_F = 1,3$ г/см³, A_i — относительная атомная масса.

В результате расчета получено, что начальная теплота растворения фтора в жидком железе составляет 314766 Дж/моль. Используя положения теории квазирегулярных растворов, получаем изобарно-изотермический потенциал выражения (15) с числовыми значениями:

$$\Delta G_{12} = 314766 - 45 T. \quad (21)$$

Тогда выражение этого потенциала для реакции (11) будет иметь вид:

$$\Delta G_9 = \Delta G_5 - \Delta G_{10} - 2\Delta G_{12} = -1762732 + 233 T. \quad (22)$$

Из выражения константы равновесия реакции (11)

$$K_9 = \frac{a_{(CaF_2)}}{a_{[C]} a_{[F]}^2} \quad (23)$$

при допущении, что температура на границе шлак — металл составляет 1873К, активность кальция в расплаве равна его растворимости в чистом жидком железе — 0,0001 % мас [33], а активность фторида

кальция в шлаке равна 1, находим, что парциальное давление фтора на границе раздела шлак — металл $P_{F_2}^H = 5,6 \cdot 10^{-11}$ Па.

Сравнивая парциальные давления фтора на различных границах раздела шлаковой фазы, констатируем наличие градиента концентраций фтора, направленного в металл, что приводит к появлению потока фтора, направленного из металла. Поток фтора в свою очередь обуславливает формирование противоположно направленного ему потока азота.

Таким образом, при электрошлаковом переплаве в камерной печи в атмосфере азота с использованием шлаков системы Ca—CaF₂ за счет эффекта «накачки» возможно осуществлять легирование переплавляемого металла азотом из газовой фазы.

1. *Лакомский В. И.* Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техника, 1974. — 336 с.
2. *Григоренко Г. М., Помарин Ю. М.* Водород и азот в металлах при плазменной плавке. — Киев: Наук. думка, 1989. — 200 с.
3. *Рашев П.* Производство легированной стали. — М.: Металлургия, 1981. — 248 с.
4. *О месте электрошлаковой технологии в производстве сверхвысокоазотистых сталей* // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. А. Тихонов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 3. — С. 4–13.
5. *Азотирование жидкого металла из газовой фазы при дуговом шлаковом переплаве под давлением* // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. К. Лебедев и др. // Там же. — С. 14–18.
6. *Свяжин А. Г.* Легирование стали азотом // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. — 1990. — № 6. — С. 23–32.
7. *Процессы азотирования при дуговом шлаковом переплаве* // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Г. М. Григоренко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 3. — С. 14–16.
8. *Microstructure and mechanical properties of high nitrogen austenitic steels produced by nitrogen absorption at solid state* // S. Takaki, S. Tsuchijama, H. Jto et al // Zairyo to Process-Current Advances in Materials and Processes. — 2000. — 13, N 3. — P. 364–365.
9. *Kataoka K., Tsuchijama S., Takaki S.* Microstructure and mechanical properties of high nitrogen austenitic steels produced through mechanical milling process // Ibid. — P. 358–361.
10. *Готин В. Н., Шалимов Ал. Г.* Вакуумный дуговой переплав стали и сплавов с регламентированным содержанием азота // Сталь. — 1993. — № 11. — С. 32–35.
11. *Кац Я. Л., Лактионов А. В., Окорочков Г. Н.* Взаимодействие азота с металлическими расплавами при вакуумно-плазменном нагреве. Часть 1 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 3. — С. 82–87.
12. *Кац Я. Л., Лактионов А. В., Окорочков Г. Н.* Взаимодействие азота с металлическими расплавами при вакуумно-плазменном нагреве. Часть 2 // Там же. — 1990. — № 4. — С. 88–91, 107.
13. *Выплавка высокоазотистых хромоникелемарганцевых сталей методом газокислородного рафинирования* // В. А. Лейбензон, С. С. Казаков, Ю. В. Садовников и др. // Сталь. — 1999. — № 8. — С. 18–20.
14. *Получение высокоазотистых сталей и их свойства* // Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Г. Ф. Торхов, В. А. Слышанкова // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — Вып. № 1. — С. 68–88.
15. *Имамудинов И.* Больше азотистой стали стране // Эксперт. — 2002. — № 5. — 24 с.
16. *Морозов А. Н., Пономаренко А. Г., Козлов Ю. Е.* О растворимости азота в шлаках // Изв. АН СССР. Металлы. — 1971. — № 6. — С. 53–57.
17. *Пономаренко А. Г., Козлов Ю. Е., Морозов А. Н.* К вопросу о растворимости азота в шлаках // Там же. — 1974. — № 3. — С. 64–68.
18. *Влияние окислительного потенциала на растворимость азота в шлаковых расплавах* // Ю. И. Уточкин, А. В. Павлов, Т. Фройде, В. Г. Гугля // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1993. — № 3. — С. 10–15.
19. *Григорян В. А., Беляничков Л. Н., Стомахин А. Я.* Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.
20. *Явойский В. И.* Газы в ваннах сталеплавильных печей. — М., Свердловск: Металлургиздат, 1952. — 250 с.
21. *Морозов А. Н.* Водород и азот в стали. — М.: Металлургия, 1968. — 284 с.



22. *Стомахин А. Я.* О взаимодействии металлического расплава с азотом в электрической дуге // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1970. — № 4. — С. 87–90.
23. *Поведение азота по ходу выплавки качественных сталей в различных сталеплавильных агрегатах* / С. С. Морозов, Ю. В. Кряковский, А. А. Сафронов и др. // Там же. — 1987. — № 5. — С. 28–32.
24. *Рябцев А. Д., Троянский А. А.* Производство слитков титана, хрома и сплавов на их основе в камерных печах под «активными» металлосодержащими флюсами // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 4. — С. 6–10.
25. *Линчевский Б. В.* Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. — М.: Металлургия, 1986. — 222 с.
26. *Рябцев А. Д.* Установка для электрошлакового переплава высокорекреационных металлов и сплавов под активными кальцийсодержащими флюсами в контролируемой атмосфере или вакууме // Сб. науч. тр. ДонГТУ Металлургия. — Донецк: ДонГТУ, 1999. — Вып. 14. — С. 58–60.
27. *Использование термораспепленного графита в качестве тепло- и газонезолирующего покрытия при электрошлаковом переплаве сталей и сплавов* / А. А. Троянский, А. П. Ярошенко, М. В. Савоськин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1999. — № 3. — С. 9–15.
28. *Могутнов Б. М., Томили И. А., Шварцман Л. А.* Термодинамика сплавов железа. — М.: Металлургия, 1984. — 208 с.
29. *Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов* / В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, А. Г. Пономаренко и др. — М.: Металлургия, 1989. — 288 с.
30. *Свойства элементов: справ. изд. в 2-х кн.* / Под ред. М. Е. Дрица. — Книга 2. — М.: Металлургия, 1997. — 448 с.
31. *Рудницкий Л. А.* Некоторые поверхностные и объемные свойства твердых тел в терминах электроотрицательности // Журн. физ. химии. — 1979. — Т. LIII, № 12. — С. 3003–3010.
32. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела. — М.: Мир, 1979. — 2 т.
33. *Кубашевски О.* Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. — М.: Металлургия, 1985. — 184 с.

Донецкий национальный технический университет
Поступила 10.09.2002

УДК 669.187.526.002.5

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ СТАЛЬНЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

**В. И. Дубоделов, В. К. Погорский, В. К. Шнурко,
П. И. Загоровский, В. Б. Шабанов, О. В. Свиридов,
В. Е. Панченко, В. Г. Гапонов**

Рассмотрены различные типы оборудования для разлива стали. Предложено использовать магнитодинамическую установку для перегрева и разлива железоуглеродистых сплавов в качестве звена технологической схемы электрошлаковой наплавки прокатных валков.

Different types of equipment for steel casting are considered. The use of a magnetodynamic unit for overheating and casting of iron-carbon alloys as a link in the technological diagram of the electroslag cladding of mill rolls is offered.

Ключевые слова: магнитодинамическая установка; электрошлаковая наплавка; жидкий металл; прокатный валок; сталь; нагрев металла; разлива стали

Электрошлаковая наплавка стальных деталей жидким металлом относится к одной из наиболее эффективных технологий в спецэлектрометаллургии [1]. Реализация данного способа в промышленных условиях требует применения устройств для управляемой подачи жидкого присадочного металла в кристаллизатор. Анализ процесса электрошлаковой наплавки стальных деталей показывает, что заливочное оборудование должно отвечать следующим требованиям: полезная ёмкость не менее массы металла одного слоя наплавки; возможность длитель-

ной выдержки и при необходимости подогрева расплава до температуры 1550... 1600 °С; обеспечение непрерывной или периодической порционной подачи расплава в кристаллизатор с заданным расходом.

В сталеплавильном производстве жидкую сталь разливают в основном ковшами с применением стопорных устройств или шибера для управления расходом расплава и отсечки струи. Такое оборудование для технологии с длительным циклом разлива стали небольшими порциями (1... 10 кг) и расходом (0,1... 5 кг/с) непригодно, так как обеспечить выполнение этих условий с помощью названных выше исполнительных механизмов весьма трудно.

© В. И. ДУБОДЕЛОВ, В. К. ПОГОРСКИЙ, В. К. ШНУРКО, П. И. ЗАГОРОВСКИЙ, В. Б. ШАБАНОВ, О. В. СВИРИДОВ, В. Е. ПАНЧЕНКО, В. Г. ГАПОНОВ, 2002