МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ СТАЛИ SA-20A АЗОТОМ В ПРОЦЕССЕ ПРОДУВКИ ЧЕРЕЗ ДОННЫЕ ФУРМЫ

*А. Ю. КЕМ¹, д-р техн. наук, профессор; Е. Ю. РОЩУПКИНА², аспирант; А. А. КОЖУХОВ²,
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и металловедения, koshuhov@yandex.ru*

(¹ Донской государственный технический университет, Россия, г. Ростов-на-Дону;

² Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета "МИСиС", Россия, г. Старый Оскол)

Аннотация. Для легирования стали азотом может использоваться любой материал, содержащий азот в достаточном количестве и способный растворяться в жидком металле. Известны методы легирования азотом, основанные на продувке расплава газообразным азотом. Однако для проведения этого процесса необходимо иметь качественную оценку поведения азота на различных стадиях сталеплавильного процесса, располагать достоверными данными как о скорости усвоения азота, так и об условиях его взаимодействия с другими компонентами расплава. В связи с этим является весьма актуальной разработка методики оценки усвояемости азота в условиях продувки с перемешиванием и термодинамических условий образования нитридов ванадия в стали SA-20A. В ходе разработки методики определялась равновесная концентрация азота с учетом параметров взаимодействия; выполнены расчеты мощности перемешивания и усвояемости азота в заданных условиях продувки; среднего эффективного "пузырькового" коэффициента массопередачи азота жидкой стали; продолжительности продувки азотом в условиях перемешивания и термодинамических условий формирования нитридов VN в равновесных и производственных условиях. Показано влияние скорости массопереноса на усвояемость азота сталью. Установлено, что параметры продувки и прежде всего расход газообразного азота определяются числом пузырьков и площадью их поверхности. Представлены результаты апробации разработанной методики. Обоснована необходимость уточнения методики оценки эволюции пузырьков газа в процессе их движения при донной продувке. Сравнение полученных данных с производственными подтверждает достаточность концентрации азота в стали SA-20A для реализации процесса нитридного упрочнения.

Ключевые слова: легирование стали азотом, нитридное упрочнение, продувка газообразным азотом, скорость усвоения азота, образование нитридов ванадия, равновесная концентрация азота, параметры взаимодействия, коэффициент массопередачи, эволюция пузырьков газа.

Ссылка для цитирования: Кем А.Ю., Рошупкина Е.Ю., Кожухов А.А. Методика расчета массообменных процессов при легировании стали SA-20A азотом в процессе продувки через донные фурмы // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 5. С. 463-470.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-5-463-470

METHODOLOGY OF MASS-EXCHANGE PROCESSES CALCULATION IN STEEL SA-20A ALLOYING BY NITROGEN DURING BLOW THROUGH BOTTOM TUYERES

*A. YU. KEM¹, HD (Tech.), Prof.; E. YU. ROSHCHUPKINA², postgraduate; A. A. KOZHUKHOV², HD (Tech.), Prof. Ass.,
Head of Dpt. of Metallurgy and Metal Science, koshuhov@yandex.ru*

*(¹ Donskoy State Technical University, Russia, Rostov-on-Don; ² Stary Oskol Technological Institute
after A.A. Ugarov, (branch) of National Research Technological University "MISiS", Russia, Stray Oskol)*

Abstract. To alloy steel by nitrogen, any material containing nitrogen in necessary amount and being capable to dissolve in the liquid metal, can be used. Methods of alloying by nitrogen, based on melt blowing through by gaseous nitrogen are known. However to carry out this process it is necessary to have a qualitative estimation of nitrogen behavior at various stages of steelmaking process. It is also necessary to have reliable data on the nitrogen assimilation speed and conditions of its interaction with other melt components. Therefore, elaboration of a methodology of estimation of nitrogen assimilability under conditions of blowing through with stirring and thermo-dynamic conditions of vanadium nitrides formation in the steel SA-20A is rather actual. In the course of methodology elaboration, equilibrium nitrogen concentration was determined accounting parameters of interaction, calculation of stirring power and nitrogen assimilability under set conditions of blowing through were accomplished. Besides, calculations were accomplished on average effective "bubble" coefficient of mass-transfer of nitrogen to liquid steel; duration of blow through by nitrogen under conditions of stirring and thermo-dynamic conditions of VN nitrides formation under equilibrium and industry conditions. The effect of mass-transfer speed on the nitrogen assimilability by steel was shown. It was determined, that blow through parameters and first of all, gaseous nitrogen consumption are determined by a number of bubbles and the area of their surface. Results of the elaborated methodology testing presented. The necessity of specifying the methodology of estimation of gas bubbles evolution in the process of their moving during the bottom blow through justified. Comparison of the obtained data with the industrial data were confirmed by the sufficiency of nitrogen concentration in steel SA-20A for realization of the nitride hardening process.

Key words: steel alloying by nitrogen, nitride hardening, blowing through by gaseous nitrogen, nitrogen assimilability speed, vanadium nitrides formation, nitrogen equilibrium concentration, interaction parameters, mass-transfer coefficient, gas bubbles evolution.

For citation: Kem A.Yu., Roshchupkina E.Yu., Kozhukhov A.A. Methodology of mass-exchange processes calculation in steel SA-20A alloying by nitrogen during blow through bottom tuyeres. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 5, pp. 463-470. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-463-470

В низколегированных сталях нитридного упрочнения обычно содержится от 0,010 до 0,040 % азота [1]. Для легирования азотом может использоваться любой материал, содержащий азот в достаточном количестве и способный растворяться в жидком металле. Известны методы легирования азотом, основанные на продувке расплава газообразным азотом [2–4].

Однако качественное проведение этого процесса осложняется тем, что для оценки поведения азота на различных стадиях сталеплавильного процесса необходимо располагать достоверными данными как о скорости его усвоения, так и об условиях взаимодействия азота с другими компонентами расплава [5–7].

Специфика электронного строения оболочек атомарного и молекулярного азота, различие в химическом сродстве элементов, составляющих сталь, к азоту определяют кинетику и термодинамику его взаимодействия с элементами, составляющими рассматриваемую марку стали. Растворы азота относятся к растворам внедрения, атомы азота располагаются в междоузлиях кристаллической решетки, являясь своеобразными зародышами упрочняющих фаз [8].

В общем виде взаимодействие газообразного азота с металлами описывается реакцией типа:

при этом константа равновесия реакции записывается в виде:

$$K = a_{\text{Me}}^x p_{\text{N}_2}^{y/2}.$$

Важно, что величина парциального давления молекулярного азота не всегда может быть достаточной для образования соответствующих нитридов. В этом случае необходимо использовать соотношения, определяющие влияние легирующих элементов на растворимость азота в твердом железе и отражающие условия образования нитридов [9]. Равенство химических потенциалов азота в газовой фазе и металлических расплавах определяет равенство активностей азота в них, что позволяет выразить влияние легирующих или примесных элементов через коэффициент активности f_{N}^{R} .

В общем виде связь между парциальным давлением азота p_{N_2} , концентрацией его в расплаве (N) и содержанием нитридообразующего элемента (R) при постоянной температуре может быть представлена следующим образом. С одной стороны, упрочнение связи азота в расплаве в присутствии нитридообразующих элементов приводит к повышению его концентрации в расплаве по сравнению с концентрацией в жидком железе при одинаковых значениях давления азота и температуры; с другой — сохраняется зависимость концентрации азота в стали от его парциального давления в равновесной газовой фазе по закону Сивертса, что определяет взаимосвязь между концентрациями азота и нитридообразующего элемента.

Рассматривая особенности механизма и кинетики взаимодействия азота с жидкой сталью, нужно отметить, что согласно современным представлениям [10] конечная концентрация азота в стали определяется двумя факторами:

– полнотой протекания процесса массопереноса азота из газовой фазы в жидкую сталь, который в металлических расплавах для случая абсорбции с достаточной точностью описывается кинетическим уравнением первого порядка относительно концентрации растворенного азота:

$$\frac{dn}{dt} = S\beta_{\text{ж}}([N]_{\text{s}} - [N]),$$

где $\beta_{\text{ж}}$ — коэффициент массопереноса в жидкой фазе;

– полнотой протекания процесса образования нитридов ванадия в стали.

Однако даже в условиях весьма развитой контактной поверхности результаты процесса усвоения азота металлической ванной не соответствуют его равновесной концентрации [11, 12].

В этой связи целью настоящей работы является разработка методики оценки усвояемости азота в условиях продувки с перемешиванием и термодинамических условий образования нитридов ванадия в стали SA-20A.

Химический состав и параметры обработки стали SA-20A в ковше азотом представлены в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ SA-20A ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПЛАВКИ, %

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL SA-20A, EXPERIMENTAL HEAT, %

C	Mn	Si	Al	V	N
0,175	1,175	0,225	0,035	0,045	0,011

ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ ПРОДУВКИ СТАЛИ ГАЗООБРАЗНЫМ АЗОТОМ В КОВШЕ

TABLE 2. PARAMETERS OF BLOW BY GAS NITROGEN IN LADLE

T, K	[N] _{нач} , %	[N] _{кон} , %	Расход азота, нл/с	Парциальное давление P _{N₂} , Па
1853	0,0045	0,011	6,0	1,017×10 ⁵

При этом для проведения расчетов по базовым данным расход азота принят равным 6 нл/с, его парциальное давление — 1,017×10⁵ Па, давление на выходе из пористой пробки — 1,42×10⁵ Па, T = 1873 К.

Разработка методики оценки усвояемости азота в условиях продувки с перемешиванием и термодинамических условий образования нитридов ванадия в стали SA-20A предусматривала определение равновесной концентрации азота с учетом параметров взаимодействия, проведение расчетов мощности перемешивания и усвояемости азота в заданных условиях продувки, определение среднего эффективного “пузырькового” коэффициента массопередачи азота жидкой стали, расчет продолжительности продувки азотом в условиях перемешивания, расчет термодинамических условий формирования нитридов VN в равновесных и производственных условиях.

Для определения равновесной концентрации азота для марочного состава и базовых технологических режимов использовали известное выражение:

$$[N] = \frac{K_p}{f_{[N]}} p_{N_2}^{1/2}. \quad (1)$$

Расчет коэффициента активности азота проводили с учетом параметров взаимодействия первого порядка:

$$\lg f_N = \varepsilon_N^N [\% N] + \varepsilon_N^C [\% C] + \varepsilon_N^{Mn} [\% Mn] + \varepsilon_N^V [\% V] + \varepsilon_N^{Al} [\% Al] + \varepsilon_N^{Si} [\% Si].$$

По результатам расчетов:

$$\lg f_N = 0,0,11 + 0,13 \cdot 0,175 - 0,002 \cdot 1,175 - 0,093 \cdot 0,045 - 0,028 \cdot 0,035 + 0,047 \cdot 0,225 = 0,023 - 0,002 - 0,004 - 0,001 + 0,011 = 0,02657, \text{ тогда } f_N = 1,063.$$

Для стандартных условий внепечной обработки T = 1873 К, тогда

$$\lg K_{N_2} = -\frac{930}{T} - 0,87 = -\frac{930}{1873} - 0,87 = -1,366.$$

Для плавки базового химического состава K_{N₂} = 0,043. Учитывая, что p_N = 1,017 атм, получим, что равновесная концентрация азота для базовой плавки составит:

$$[N] = 0,043 \cdot (1,017)^{0,5} / 1,063 = 0,0407 \text{ \%}.$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что величина равновесного содержания азота 0,0407 % не достигается по данной марке стали (по производственным данным, концентрация азота в стали SA-20A составляет от 0,012 до 0,014 %). При этом важно, что параметры продувки и площадь контактной поверхности газ – жидкий металл формально не оказывают никакого влияния на результаты расчета процесса азотирования через газовую фазу. Все определяет величина парциального давления азота над поверхностью расплава. Поэтому свяжем парциальное давление с параметрами продувки. Это позволит оптимизировать процесс с точки зрения его продолжительности и расхода газообразного азота.

Очевидно, что расход азота будет зависеть от его усвояемости расплавом стали в условиях продувки с перемешиванием. Расчет проводили учитывая, что в рассматриваемом случае реализуется молекулярный перенос азота в жидкой фазе, который базируется на механизме растворения азота в режиме массопереноса из пузыря в жидкий металл, скорость V_р которого описывается уравнением

$$V_p = \frac{dC}{dt} = \frac{\beta S n}{V_{жс}} (C_{пуз} - C_p), \quad (2)$$

где C_{пуз}, C_р — концентрация азота в пузыре (100 %) и равновесная концентрация азота в стали, %; β — средний эффективный коэффициент массопередачи от пузыря к металлу, см/с; n — среднестатистическое число пузырей, шт.; V_{жс} — объем жидкой стали в ковше, см³; S — поверхность пузыря, см².

Поэтапно проведем расчеты по компонентам, составляющим данное выражение.

Величину среднего эффективного коэффициента массопередачи β от пузыря азота к жидкой стали определяли с помощью выражения

$$\beta = 4,8 \times 10^{-5} \varepsilon^{0,28} r_g^{1,5}, \text{ см/с}, \quad (3)$$

где ε — мощность перемешивания, кВт/т; r_g — радиус пузырька, м.

Определение мощности перемешивания для заданных условий продувки азотом проводили по формуле

$$\varepsilon = \frac{4,75 \times 10^{-7} Q T}{M} \lg \left(1 + \frac{H}{1,45} \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{4,75 \times 10^{-7} \times 21,6 \times 1853}{123,54} \lg \left(1 + \frac{3,92}{1,45} \right) = 0,73 \times 10^{-3}, \text{ кВт/т}.$$

Средний размер пузырька азота r_g эмпирически выбран исходя из предположения о пузырьковом режиме продувки. Поскольку продувка осуществлялась через пористую пробку с диаметром пор примерно 0,3 мм, то при поступлении газа в расплав в месте формирования пузыря образуется газовая перемычка — “ножка”. По данным работы [13], отрыв пузыря наступает в момент достижения критического объема газа путем разрыва “ножки”. В момент отрыва “ножка” сохраняется и является зародышем нового пузыря [14]. Для расчетов средний диаметр пузырька азота принимали равным 0,015 м [15].

Отсюда величина среднего эффективного коэффициента массопередачи будет равна для экспериментальной плавки:

$$\beta = 4,8 \times 10^{-5} (0,73 \times 10^{-3})^{0,28} \times 1,5^{1,5} = 1,167 \times 10^{-5} \text{ см/с}.$$

При определении площади поверхности единичного пузырька исходили из того, что при движении пузырьков в расплаве наблюдается их деформация и переход от сферической формы к грибовидной (грибовидной) [16]. Поэтому площадь поверхности определяли, как площадь шарового сегмента, выражая ее через радиус эквивалентного по объему шара:

$$S = 18,033 r_g^2.$$

Для базовой плавки: $S = 18,033 \times 0,015^2 = 40,5 \text{ см}^2$. При этом объем образующегося пузырька V_n составляет:

$$V_n = \frac{4}{3} \pi r_g^3,$$

где Q — расход азота при нормальных условиях, $\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$; M — масса жидкого металла, т; H — высота продуваемого столба стали, м: $H = H_k - H_{\text{св.борт}}$, при этом H_k — высота ковша, $H_{\text{св.борт}}$ — величина свободного борта (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ДЛЯ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

TABLE 3. BASIC PARAMETERS FOR CALCULATION
THE MIXING POWER

Q, $\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$	H, м	M, т	T, К
21,6	3,92	123,540	1853

Для базовой плавки имеем:

$$V_n = \frac{4}{3} \times 3,14 \times 1,5^3 = 14,13 \text{ см}^3,$$

Среднее число пузырей в жидкой стали определяли по секундному расходу газа J , приведенному к температуре и среднему давлению в объеме металла, по среднестатистическому объему пузыря, высоте столба металла H над продувочным устройством, средней скорости всплывания пузырей относительно неподвижных координат, используя выражение

$$n = \frac{J}{4/3 \pi r_g^3} \cdot \frac{H}{\sqrt{g r_g}} \cdot \frac{T_{\text{расплава}}}{T_{\text{газа в пуз.}}} \left(1 + \frac{H}{290} \right).$$

Нестационарный характер гидродинамики газовых пузырьков в расплаве при донной продувке ковша необходимо учитывать, поскольку их движение зависит от целого ряда теплофизических и физико-химических свойств газа в объеме пузырька и, в том числе, от его геометрических размеров. Однако эволюцию отдельных пузырьков газа вследствие коалесценции, диспергирования и массообмена при движении двухфазного потока в рамках настоящей работы не рассматривали. Принимали, что форма пузырька близка к сферической и сохраняется по мере всплывания от начала отрыва от поверхности пробки τ_0 до момента касания поверхности расплава τ_k .

Понятно, что неравномерность поля температур расплава по высоте обуславливает и нестационарный характер изменения по высоте геометрического размера пузырька. Однако, учитывая данные работы [17] о том, что газовые пузыри практически мгновенно принимают темпера-

туру расплава, считали, без потери практической точности вычислений, размер пузырька неизменным (0,015 м).

Для базовой плавки средний расход азота составлял 6 нл/с, или 6000 см³, тогда среднее чис-

ло пузырьков в объеме 6000 см³ будет равно: 6000/14,13 = 425 шт.

В объеме ковша их количество в 1 с составит:

$$n = 425 \frac{3,92}{\sqrt{9,81 \times 1,5}} \cdot \frac{1853}{1853} \left(1 + \frac{3,92}{290} \right) = 425 \left(\frac{3,92}{3,836} \right) \times 1,0 \times 1,0135 = 440 \text{ шт.}$$

Среднеравновесную концентрацию азота в расплаве, достигаемую за время подъема пузырька от продувочного устройства до поверхности жидкой стали, определяли, используя значения константы равновесия и коэффициента активности азота, по эмпирической формуле

$$C_p = \frac{K_N}{2f_N} \sqrt{\frac{1+H}{145}} + 1.$$

Для экспериментальной плавки среднеравновесная концентрация составит:

$$C_p = \frac{0,043}{2 \times 1,063} \sqrt{\frac{1+3,92}{145}} + 1 = 0,0202 \times 1,017 = 0,0205 \text{ \%}.$$

Полученные для базовой плавки данные позволили определить величину скорости массопереноса, см/с:

$$V_p = \frac{\beta S n}{V_{жс}} (C_p - C).$$

Для $(C_p - C) = 100 - 0,0205 = 99,98$ получим:

$$V_p = \frac{1,167 \times 10^{-5} \times 40,5 \times 440 \times 99,98}{17,73 \times 10^6} = 113271 \times 10^{-11}.$$

Поскольку количество усвоенного расплавом стали заданного состава азота определяется выражением

$$[N] = V_p \tau,$$

где τ — время продувки, с, тогда время продувки для экспериментальной плавки составит для достижения целевой величины 0,011 % N:

$$\tau = \frac{[N]}{V_p} = 0,011 / 113271 \times 10^{-11} = 9711,2 \text{ с} = 2,697 \text{ ч.}$$

Следует отметить, что полученный результат может казаться недостатком легирования продувкой газообразным азотом (длительность процесса), но в обычных условиях, как правило, продувка расплава производится в ковше и не влияет на производительность дуговой сталеплавильной печи в целом.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что необходимо “работать” с величиной V_p . Очевидно, что V_p — это параметры продувки (прежде всего расход газообразного азота), определяющие число пузырьков и площадь их поверхности. Важным представляется и уточнение методики оценки эволюции пузырьков в процессе их движения при донной продувке.

При разработке методики термодинамических расчетов процесса образования нитридов ванадия в расплаве стали SA-20A использовали данные работ [5, 7, 18]. Для расчета концентраций азота в заданных расплавах сталей в условиях равновесия с нитридом ванадия VN рассматривали реакцию:

для которой справедливо:

$$\Delta G_{(VN)}^0 = -214783 + 82,48T, \text{ Дж};$$

$$\lg K_{(VN)} = -\frac{\Delta G_{(VN)}^0}{RT} = \lg \frac{1}{f_N [\% N] [\% V] f_V}.$$

Величина коэффициента активности азота для базовой плавки ранее уже определена и составляет $f_N = 1,063$.

Расчет величины f_V для базовой плавки проведем, используя выражение

$$\lg f_V = e_V^V [\% V] + e_V^C [\% C] + e_V^{Mn} [\% Mn] + e_V^N [\% N] + e_V^{Al} [\% Al] + e_V^{Si} [\% Si].$$

Для базовой плавки $\lg f_V$ будет равен:

$$\begin{aligned} \lg f_V &= 0,015 \cdot 0,045 + (-0,340) \cdot 0,175 + 0,0 \cdot 1,175 + \\ &+ (-0,35) \cdot 0,011 + 0,0 \cdot 0,035 + 0,042 \cdot 0,225 = \\ &= 0,000675 - 0,0595 - 0,00385 + 0,00945 = -0,0532. \end{aligned}$$

Поскольку для марганца и алюминия параметры взаимодействия с ванадием неизвестны [19], то в этом случае принимали их величины равными нулю.

Тогда для базовой плавки $f_V = 0,8847$.
Найдем величину $\Delta G_{(1)}^0$ для базовой плавки:

$$\Delta G_{(VN)}^0 = -214783 + 82,48 \times 1853 = -61947,56 \text{ Дж.}$$

Запишем

$$\lg K_{(VN)} = -\frac{\Delta G_{(VN)}^0}{RT} = \lg \frac{1}{f_N [\% N] [\% V] f_V} = -\lg f_N - \lg [\% N] - \lg [\% V] - \lg f_V.$$

Отсюда количество азота, необходимое для образования нитридов ванадия, будет равно:

$$\begin{aligned} \lg [\% N] &= \frac{\Delta G_{(VN)}^0}{RT} - \lg f_N - \lg [\% V] - \lg f_V. \\ \lg [\% N] &= (-61947,56/8,3121853) - 0,02657 - \\ &\quad - (-1,3467) - (-0,0532) = -2,6496. \end{aligned}$$

Отсюда $[\% N] = 0,00224$.

Это значит, что для образования нитридов ванадия в стали SA-20A, содержащей 0,045 % V, необходимая концентрация азота составляет 0,00224 %.

Для подтверждения проведем простой стехиометрический расчет реакции нитридообразования, используя закон соединительных весов или кратных отношений:

Используя данные о молярной массе, получим:

$$50,95 + 0,5 \times 14 = 64,95.$$

Далее составляем соответствующие пропорции:

$$\begin{array}{l} 50,95 - 64,95 \\ 0,045 \% V - x \% VN \end{array}$$

тогда

$$x \% VN = \frac{0,045 \times 64,95}{50,95} = 0,05736 \%$$

и

$$\begin{array}{l} 0,05736 - x \% N_2 \\ 64,95 - 7 \end{array}$$

тогда

$$x \% N_2 = \frac{0,05736 \times 7}{64,95} = 0,006 \%.$$

Из данных стехиометрического расчета следует, что превышение по концентрации азота составляет $0,006:0,00224 = 2,68$ раза, т. е. равновесная концентрация азота для реализации процесса нитридообразования является избыточной. Наблюдаемая разница при этом может быть связана растворением ванадия в стехиометрическом нитриде [18], что не учитывается предложенной методикой расчета.

Выводы

Предложена методика оценки усвояемости азота в условиях продувки с перемешиванием и термодинамических условий образования нитридов ванадия в стали SA-20A. Показано влияние скорости массопереноса на усвояемость азота сталью. Установлено, что параметры продувки, и прежде всего расход газообразного азота, определяют число пузырьков и площадь их

поверхности. Показана необходимость уточнения методики оценки эволюции пузырьков газа в процессе их движения при донной продувке. Сравнение полученных данных с производственными подтверждает достаточность концентрации азота в стали SA-20A для реализации процесса нитридного упрочнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ровнушкин В.А., Смирнов Л.А. Проблемы производства и применения стали с ванадием: материалы международного семинара. — Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 95–121.
2. Ивлев С.А., Казаков С.В., Свяжин А.Г. Использование газообразного азота для внепечной обработки стали. — М.: ИМет, 1987. С. 10.
3. Тимофеев П.В., Семин А.Е., Меркер Э.Э. Интенсификация процесса газового азотирования жидкой стали в ковше азотом // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 11. С. 68–70.
4. Шабалов И.П., Филиппов Г. А., Семин А.Е., Шукина Л.Е. Влияние способа азотирования жидкого расплава на содержание азота в стали // Металлург. 2015. № 1. С. 64–68.
5. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Дмитриенко В.И. и др. Экспериментальное исследование процесса комплексного микролегирования стали ванадием и азотом // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 10. С. 29–32.
6. Гизатулин Р.А., Козырев Н.А., Сапрыкин А.А. и др. Легирование стали азотом при продувке в ковше через донные и погружаемые фурмы // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. междунар. научно-практич. конф. Юргинский технологический институт. 2014. С. 328–332.
7. Gizatulin R.A., Nokhrina O.I., Kozyrev N.A. Nitrogen microalloying of steel with injection in the ladle through bottom tuy-

- eres and submersible tuyeres // *Steel in Translation*. 2010. T. 40. № 6. С. 522–525.
8. Аверин В.В., Ревякин А.В., Федорченко В.И., Козина Л.Н. Азот в металлах. — М.: Металлургия, 1976. — 221 с.
 9. Григорович К.В., Арсенкин А.М., Демин К.Ю. и др. Перспективы использования карбонитридообразующих элементов в углеродистых сталях с целью повышения комплекса их механических свойств // *Металлы*. 2011. № 5. С. 157–163.
 10. Ивлев С.А. Исследование взаимодействия азота с расплавами на основе железа в системах с различной окисленностью и разработка методов регулирования его содержания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Москва, 2005. — 24 с.
 11. Свяжин А.Г., Халек М.А., Шевченко А.Д. Массообмен при продувке жидкой стали в ковше азотом // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1984. № 9. С. 37–42.
 12. Алексеев В.И., Юсупов В.С., Лазаренко Г.Ю. Некоторые проблемы производства легированных азотом сталей правильными методами // *Перспективные материалы*. 2009. № 1. С. 62–69.
 13. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. — М.: Металлургия, 1993. — 351 с.
 14. Жуков В.П. Научные основы и технология переработки сульфидно-оксидных и металлических расплавов с использованием продуктов сгорания природного газа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 1998.
 15. Новокрешенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П. и др. Математическое моделирование гидродинамики пузырькового режима при донной продувке печи-ковша. Сообщение 1 // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2011. № 4. С. 61–65.
 16. Лукс А.Л., Крестин Е.А., Матвеев А.Г. и др. Исследование скорости всплытия пузыря газа в процессе барботажа при различных режимах // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2016. № 1 (22). С. 34–40.
 17. Новокрешенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П. и др. Математическое моделирование гидродинамики пузырькового режима при донной продувке печи-ковша. Сообщение 3 // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2013. № 5. С. 36–42.
 18. Шишков В.И., Жихарев В.М. Термодинамические свойства нитрида ванадия // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Металлургия*. 2012. № 15 (274). С. 46–49.
 19. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.

Поступила 30 января 2020 г.

REFERENCES

1. Rovnushkin V.A., Smirnov L.A. *Problemy proizvodstva i primeneniya stali s vanadiem: materialy mezhdunarodnogo seminar* [Problems of production and application of steel with vanadium: materials of International seminar]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2007, pp. 95–121. (In Russ.).
2. Ivlev S.A., Kazakov S.V., Svyazhin A.G. *Ispol'zovanie gazoobraznogo azota dlya vnepechnoi obrabotki stali* [Application of gas nitrogen for steel ladle treatment]. Moscow: IMet, 1987, p. 10. (In Russ.).
3. Timofeev P.V., Semin A.E., Merker E.E. Intensification of the process of liquid steel gas nitration in ladle by nitrogen. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2006, no. 11, pp. 68–70. (In Russ.).
4. Shabalov I.P., Filippov G.A., Semin A.E., Schukina L.E. Effect of liquid steel nitration method on nitrogen content in the steel. *Metallurg*, 2015, no. 1, pp. 64–68. (In Russ.).
5. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Dmitrienko V.I. etc. Experimental study of steel complex micro-alloying by vanadium and nitrogen. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2014, vol. 57, no. 10, pp. 29–32. (In Russ.).
6. Gizatuln R.A., Kozyrev N.A., Saprykin A.A. etc. Steel alloying by nitrogen at blow in ladle through bottom and submerged tuyeres. *Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya: sb. tr. mezhdunar. nauchno-praktich. konf. Yurginskii tekhnologicheskii institut*, 2014, pp. 328–332. (In Russ.).
7. Gizatuln R.A., Nokhrina O.I., Kozyrev N.A. Nitrogen microalloying of steel with injection in the ladle through bottom tuyeres and submersible tuyeres. *Steel in Translation*, 2010, vol. 40, no. 6, pp. 522–525.
8. Averin V.V., Revyakin A.V., Fedorchenko V.I., Kozina L.N. *Azot v metallakh* [Nitrogen in metals]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 221 p. (In Russ.).
9. Grigorovich K.V., Arcenkin A.M., Demin K.Yu. etc. Perspectives of carbonitride-forming elements application in carbon steels aiming at increasing their complex of mechanical properties. *Metally*, 2011, no. 5, pp. 157–163. (In Russ.).
10. Ivlev S.A. *Issledovanie vzaimodeistviya azota s rasplavami na osnove zheleza v sistemakh s razlichnoi okislennost'yu i razrabotka metodov regulirovaniya ego soderzhaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of nitrogen interaction with iron based melts in the systems with various oxidation and elaboration of methods of its content control: Extended Abstract of Sci. Diss.]. Moscow, 2005, 24 p. (In Russ.).
11. Svyazhin A.G., Khalek M.A., Shevchenko A.D. Mass-exchange during liquid steel blow by nitrogen in a ladle. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1984, no. 9, pp. 37–42. (In Russ.).
12. Alexeev V.I., Yusupov V.S., Lazarenko G.Yu. Some problems of production by melting methods of steels alloyed by nitrogen. *Perspektivnye materialy*, 2009, no. 1, pp. 62–69. (In Russ.).
13. Surin V.A., Nazarov Yu.N. *Masso- i teploobmen, gidrogazodinamika metallurgicheskoi vannы* [Mass- and heat exchange, hydrodynamics of a metallurgical bath]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 351 p. (In Russ.).
14. Zhukov V.P. *Nauchnye osnovy i tekhnologiya pererabotki sul'fidno-oksidnykh i metallicheskiх rasplavov s ispol'zovaniem produktov sgoraniya prirodnogo gaza: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific fundamentals and

- technology of processing of sulfide-oxide and metal melts with application natural gas combustion products: Extended Abstract of PhD Diss.]. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 1998. (In Russ.).
15. Novokhschenov S.A., Svydki V.S., Zhukov V.P. etc. Mathematical simulation of hydrodynamics of bubble mode during bottom blow in a ladle-furnace. Report 1. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2011, no. 4, pp. 61–65. (In Russ.).
 16. Luks A.L., Krestin E.A., Matveev A.G. etc. Study of gas bubble emersion speed in the barbotage process at different modes. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*, 2016, no. 1 (22), pp. 34–40. (In Russ.).
 17. Novokhschenov S.A., Svydki V.S., Zhukov V.P. etc. Mathematical simulation of hydrodynamics of bubble mode during bottom blow in a ladle-furnace. Report 3. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2013, no. 5, pp. 36–42. (In Russ.).
 18. Shishkov V.I., Zhikharev V.M. Thermodynamic properties of vanadium nitride. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Metallurgiya*, 2012, no. 15 (274), pp. 46–49 (In Russ.).
 19. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theretical fundamentals of electro-steelmaking processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).

Received January 30, 2020