

УДК 669.046.554-982

Смирнова Е.А., Шаповалов А.Н.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УДАЛЕНИЯ АЗОТА ИЗ СТАЛИ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ДАННЫМ

Аннотация. Представлены результаты изучения закономерностей удаления азота из стали марки 10ХСНД в условиях кислородно-конвертерного и электросталеплавильного производств ПАО «Северсталь». Показаны усредненные данные по выплавке, ковшевой обработке и вакуумированию стали. Приведены особенности технологии производства стали марки 10ХСНД в кислородно-конвертерном (ККЦ) и электросталеплавильном (ЭСПЦ) цехах. Установлены параметры технологического процесса производства, в наибольшей степени влияющие на содержание азота в стали. Для условий выплавки стали в ККЦ параметрами, которые в наибольшей степени влияют на содержание азота и степени его удаления, являются: продолжительность плавки и расход лом на плавку; температура металла перед обработкой на установке «ковш-печь» (УКП) и время работы под током; продолжительность вакуумной обработки и масса плавки. Для условий выплавки стали в ЭСПЦ основными параметрами являются: время работы под током и расход чугуна на плавку; время работы под током на УКП и удельный расход аргона; продолжительность глубокого вакуумирования и удельный расход аргона при вакуумировании.

На основе статистического и регрессионного анализов производственных данных были разработаны варианты вакуумной обработки, обеспечивающие достижение заданного содержания азота в стали.

Ключевые слова: азот, вакуумирование стали, продолжительность вакуумной обработки, глубина вакуума, температура металла в ковше, расход аргона

Как известно, повышенное содержание азота в большинстве случаев оказывает отрицательное влияние на свойства стали, понижая ударную вязкость и ухудшая её пластичность [1-4]. Вредное влияние азота наиболее сильно проявляется для малоуглеродистых сталей, которые должны иметь высокие пластические свойства. Поэтому обеспечение требуемого содержания азота в стали является одной из приоритетных задач сталеплавильного производства, решаемая на различных этапах производства – от выплавки до ковшевой обработки и разливки.

Для изучения эффективности производства стали 10ХСНД в условиях конвертерного и электросталеплавильного цехов ПАО «Северсталь» и определения параметров, которые в наибольшей степени влияют на осадочное содержание азота и его степень удаления, был произведен анализ технологических данных за январь-июнь 2021 года. Из множества выплавляемых марок сталей для анализа была выбрана сталь марки 10ХСНД, как одна из самых массовых и выплавляемых обоими цехами, что позволяет проводить сравнительный анализ эффективности удаления азота.

В рассматриваемых цехах разработаны отличные друг от друга технологии производства готового продукта, схематично представленные на рис. 1.

Усредненные данные о технологических параметрах производства стального полупродукта представлены в табл. 1.

Высокая степень дефосфорации обеспечивается благодаря высокоосновному шлаку и поддержанию его высокой окисленности, что подтверждается данными табл. 1. При этом уровень содержания фосфора на выпуске из конвертера в 2 раза больше, чем из

шахтной печи, что связано с более высокой долей чугуна, являющегося основным источником фосфора.

Также видно, что в режиме работы шахтной печи содержание азота выше, чем в конвертере. Это связано с тем, что в начальный период плавки в шахтной печи (до расплавления шихты) активно развивается процесс азотирования металла в высокотемпературной зоне при работе с открытыми дугами, которые не закрыты слоем шлака.

Следует заметить, что температуры перед выпуском в ковш при разных режимах выплавки отличаются. Это обусловлено тем, что следующей стадией обработки металла, выплавленного в шахтной печи, является вакуумирование, при котором подогрев металла не проводится.

Усредненные данные о технологических параметрах и результатах обработки изучаемой стали на УКП приведены в табл. 2.

При обработке металла на УКП проводят усреднительную продувку аргоном в течение 4–6 мин, науглероживание металла и десульфурацию. После отбора проб металла и шлака производят ввод алюминиевой катанки и наводят рафинировочный шлак путем ввода извести при работающих дугах.

Несмотря на идентичную технологию рафинирования, степень десульфурации стали в ККЦ (37,2%) более чем в 2 раза меньше, чем при обработке стали в ЭСПЦ (84,77 %). Это объясняется большей массой обрабатываемого металла в ковше, что накладывает кинетические ограничения на процесс десульфурации.

Усредненные данные о технологических параметрах и результатах вакуумирования приведены в табл. 3.



Рис. 1. Технологии получения готового продукта:
а – ККЦ; б – ЭСПЦ

Таблица 2

Технологические параметры и результаты обработки стали на УКП

Параметр	Величина параметра*		
	ККЦ	ЭСПЦ	
Длительность обработки общая, мин	<u>32,48-73,05</u> 51,26	<u>32,35-83,05</u> 66,8	
Длительность работы под током, мин	<u>18,78-48,73</u> 32,51	<u>17,93-73,75</u> 32,46	
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	<u>11,62-27,93</u> 19,76	<u>21,33-92,37</u> 62,46	
Удельный расход аргона, м ³ /т	<u>0,08-0,65</u> 0,29	<u>0,11-0,89</u> 0,34	
Температура перед УКП, °С	<u>1592-1674</u> 1638,92	<u>1662-1696</u> 1678,27	
Последний замер температуры на УКП, °С	<u>1556-1665</u> 1630	<u>1571-1644</u> 1595	
Основность шлака	<u>2,58-5,2</u> 3,43	<u>1,88-3,29</u> 2,25	
FeO в шлаке, %	<u>0,52-5,8</u> 1,48	<u>0,45-4,3</u> 0,97	
Степень удаления серы, %	<u>25,26-67,06</u> 37,22	<u>58,95-94,58</u> 84,77	
Химический анализ ковшевой пробы на УКП, %	C	<u>0,044-0,109</u> 0,07	<u>0,088-0,114</u> 0,10
	P	<u>0,004-0,014</u> 0,010	<u>0,005-0,015</u> 0,009
	S	<u>0,005-0,033</u> 0,014	<u>0,002-0,008</u> 0,003
	N	<u>0,003-0,007</u> 0,005	<u>0,005-0,008</u> 0,006

* В числителе – диапазон изменения; в знаменателе – среднее значение.

Анализ литературных данных [1, 2, 5-13] показал, что на содержание азота в стали влияет множество производственных факторов. Для изучения степени влияния каждого параметра был использован метод регрессионного анализа.

Значительные колебания содержания азота в стали связаны с изменением параметров обработки в достаточно широком диапазоне, как показывают данные табл. 3. Поскольку на эффективность вакуумирования влияет большое количество разнообразных факторов, то для получения адекватных закономерностей, описывающих процесс дегазации металла, необходимо анализировать работу конкретного технологического агрегата.

Таблица 1

Параметры выплавки стального полупродукта в кислородном конвертере (КК) и шахтной печи (ШП)

Параметр	Величина параметра*		
	КК	ШП	
Длительность плавки, мин	<u>31,7-54,8</u> 38,9	<u>38-97,2</u> 50,8	
Длительность работы под током, мин	-	<u>29-57,6</u> 37,03	
Вес плавки, т	<u>301,4-358,9</u> 335,3	<u>122-156,1</u> 138,2	
Расход электроэнергии, МВт·ч/т	-	<u>0,22-0,63</u> 0,29	
Расход O ₂ , м ³ /т	<u>43,7-86,2</u> 63,97	<u>44,23-81,38</u> 56,34	
Масса металлолома, т	<u>37,8-94,6</u> 66,2	<u>86,6-153</u> 103,67	
Расход жидкого чугуна, т	<u>210-374,8</u> 308	<u>0-55</u> 34,53	
Температура перед выпуском, °С	<u>1592-1674</u> 1638,92	<u>1662-1669</u> 1678,27	
Основность печного шлака, ед.	<u>3,31-5,46</u> 4,35	<u>3,43-4,68</u> 3,63	
Состав стального полупродукта, %	C	<u>0,019-0,071</u> 0,045	<u>0,026-0,107</u> 0,077
	P	<u>0,004-0,020</u> 0,011	<u>0,002-0,011</u> 0,006
	S	<u>0,010-0,037</u> 0,021	<u>0,013-0,032</u> 0,021
	N	<u>0,002-0,006</u> 0,004	<u>0,004-0,015</u> 0,006

* В числителе – диапазон изменения; в знаменателе – среднее значение.

Таблица 3

Технологические параметры и результаты вакуумирования стали

Параметр	Величина параметра* при обработке стали	
	ККЦ	ЭСЦ
Длительность глубокого вакуумирования, мин	<u>13,7-26,7</u> 19,9	<u>15,0-17,0</u> 15,4
Минимальное давление в вакуум-камере, мбар	Н.д.	<u>0,41-1,43</u> 0,59
Расход аргона, м ³ /т	<u>0,2-0,3</u> 0,14	<u>0,014-0,084</u> 0,039
Первый замер температуры на УВС, °С	<u>1551-1628</u> 1595	<u>1514-1588</u> 1545,19
Последний замер температуры на УВС, °С	<u>1551-1602</u> 1568	<u>1514-1588</u> 1545,19
Свободный борт, мм	<u>500-1300</u> 903,51	<u>800-1000</u> 806
[N], %	<u>0,004-0,006</u> 0,005	<u>0,004-0,008</u> 0,006
Средняя степень удаления азота, %	9,73	11,2

* В числителе – диапазон изменения; в знаменателе – среднее значение.

Было установлено, что для условий выплавки стали в ККЦ параметрами, которые в наибольшей степени влияют на содержание азота и степень его удаления, являются: продолжительность плавки и расход лома на плавку; температура перед обработкой на УКП и время работы под током; время вакуумирования и масса плавки. Для условий выплавки стали в ЭСПЦ основными параметрами являются: время работы под током и расход чугуна на плавку; время работы под током на УКП и удельный расход аргона; длительность вакуумирования и удельный расход аргона на УВС.

Влияние основных параметров выплавки и ковшевой обработки на остаточное содержание азота в стали в условиях ЭСПЦ показано на диаграммах, представленных на рис. 2–4.

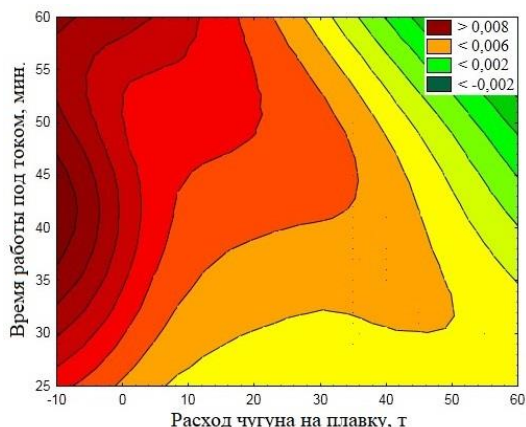


Рис. 2. Зависимость остаточного содержания азота (выплавка) от времени работы под током и расхода чугуна на плавку в условиях ЭСПЦ

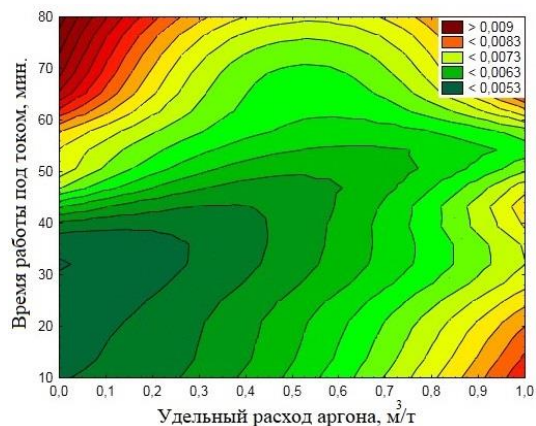


Рис. 3. Зависимость остаточного содержания азота (обработка на УКП) от времени работы под током и удельного расхода аргона в условиях ЭСПЦ

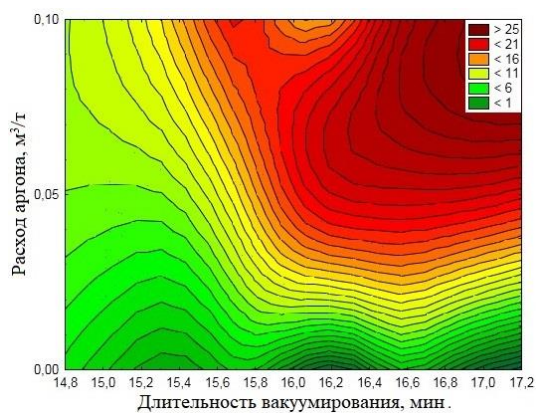


Рис. 4. Зависимость степени удаления азота (обработка на УВС) от длительности вакуумирования и удельного расхода аргона в условиях ЭСПЦ

Влияние основных параметров выплавки и ковшевой обработки на остаточное содержание азота в стали в условиях ККЦ показано на диаграммах, представленных на рис. 5–7.

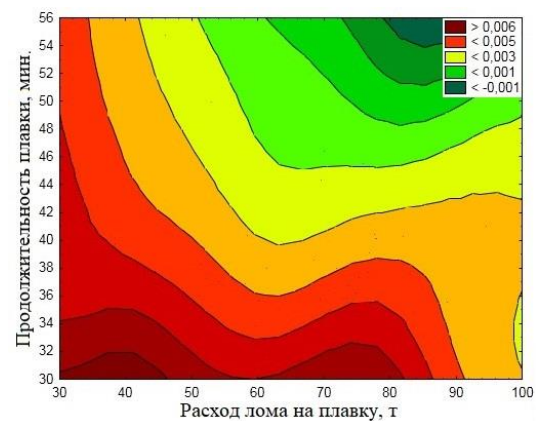


Рис. 5. Зависимость остаточного содержания азота (выплавка) от продолжительности плавки и расхода лома на плавку в условиях ККЦ

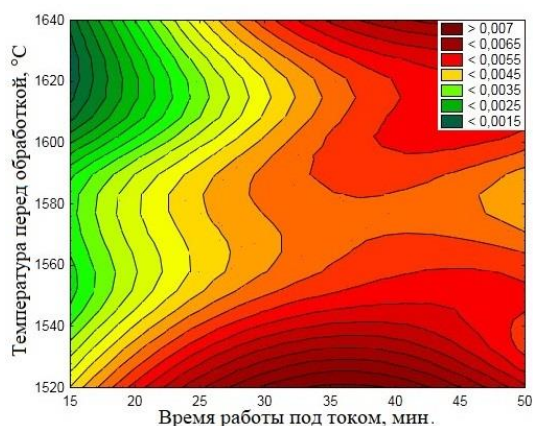


Рис. 6. Зависимость остаточного содержания азота (обработка на УКП) от температуры перед обработкой на УКП и времени работы под током в условиях ККЦ

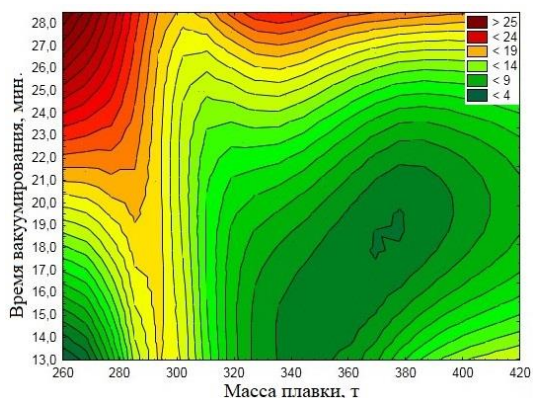


Рис. 7. Зависимость степени удаления азота (обработка на УВС) от времени вакуумирования и массы плавки в условиях ККЦ

Из представленных данных следует, что в условиях ЭСПЦ для гарантированного получения азота в стали не более 0,008 % необходимо: вести плавку стали в шахтной печи с расходом чугуна не менее 40 т при продолжительности плавки более 45 мин; проводить усреднительную продувку аргоном на УКП с расходом не более 0,8 м³/т при длительности работы под током не более 55 мин; проводить глубокое вакуумирование на УВС в течение более 16 мин при удельном расходе аргона не менее 0,05 м³/ч.

В условиях ККЦ для гарантированного получения азота в стали не более 0,008 % необходимо: вести плавку в конвертере в течение более 42 мин при расходе лома не менее 60 т; проводить обработку стали на УКП при начальной температуре более 1540°С при длительности работы под током менее 30 минут; проводить глубокое вакуумирование на УВС в течение более 20 мин при массе плавки не более 310 т.

При проведении регрессионного анализа производственных данных были получены уравнения, позволяющие прогнозировать степень удаления азота при вакуумировании:

$$\Delta[N]_{\text{ШП}} = 98,613 + 6,698 \cdot \tau + 168,768 \cdot v_{\text{ар}} + 0,0059 \cdot t,$$

$$\Delta[N]_{\text{КК}} = 24,708 + 0,634 \cdot \tau + 1,783 \cdot v_{\text{ар}} - 0,0818 \cdot m,$$

где $\Delta[N]_{\text{ШП}}$, $\Delta[N]_{\text{КК}}$ – степени удаления азота в результате вакуумирования стали, выплавленной в шахтной печи (ШП) и кислородном конвертере (КК), соответственно;

$v_{\text{ар}}$ – удельный расход аргона, м³/т;

t – первая температура на УВС, °С;

τ – время глубокого вакуумирования, мин;

m – масса плавки, т.

Полученные уравнения регрессии позволяют прогнозировать степень удаления азота при текущих параметрах вакуумирования для условий эксплуатации УВС камерного типа ПАО «Северсталь», а также количественно оценить степень влияния каждого технологического параметра (при постоянстве других факторов) на степень удаления азота в стали.

На основе результатов статистического и регрессионного анализов производственных данных были разработаны два варианта вакуумной обработки:

- обеспечение максимальной степени удаления азота;

- обеспечение рационального использования расхода аргона, длительности и глубины вакуумирования стали с минимальными затратами.

В табл. 4 и 5 представлены текущие, предельно возможные и экономически целесообразные параметры, а также результаты вакуумной обработки.

Таблица 4

Текущие и предлагаемые параметры вакуумирования стали марки 10ХСНД в кислородно-конвертерном цехе

Параметры	Текущие	Для максимальной степени удаления азота	Рациональные	
			для экономии аргона	для экономии электроэнергии
Длительность глубокого вакуумирования на УВС, мин	20	30	27	23
Масса металла в ковше, т	337	337	337	337
Удельный расход аргона, м ³ /т	0,146	0,33	0,2	0,3
Степень удаления азота, %	10,08	16,75	14,61	12,25

Таблица 5

Текущие и предлагаемые параметры вакуумирования стали марки 10ХСНД в ЭСПЦ

Параметры	Текущие	Для максимальной степени удаления азота	Рациональные	
			для экономии аргона	для экономии электроэнергии
Удельный расход аргона, м ³ /т	0,0381	0,0813	0,035	0,065
Длительность глубокого вакуумирования, мин	15,4	15	15	15,4
Температура металла в ковше перед обработкой, °С	1544,9	1554,9	1544,9	1545,9
Степень удаления азота, %	11,01	21,04	14,36	15,55

Таким образом, подбирая параметры вакуумирования с учетом технологических возможностей и рациональных уровней, можно прогнозировать уровень содержания азота в стали по уравнениям регрессии, а также определять рациональное сочетание параметров ее обработки для получения требуемой глубины удаления азота.

Список литературы

1. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
2. Внепечное вакуумирование стали / А.Н. Морозов, М.М. Стрекаловский, Г.И. Чернов, Я.Е. Кацнельсон. М.: Metallurgy, 1975. 288 с.
3. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Metallurgy стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
4. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 528 с.
5. Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. Внепечная обработка стали: учебник для вузов. М.: МИСиС, 1995. 256 с.
6. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Оптимизация работы установки циркуляционного вакуумирования стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 1 (5). С. 23-28.
7. Смирнов А.Н., Сафонов В.М. Вакуумирование стали: технология, оборудование // Электроталлургия. 2008. № 11. С. 8-14.
8. Шаповалов А.Н., Тутарова В.Д., Калитаев А.Н. Совершенствование технологии вакуумирования осевых марок сталей в условиях ЭСПЦ ОАО «Уральская Сталь» // Литейные процессы. 2013. №12. С. 93-103.
9. Повышение эффективности удаления азота при вакуумировании стали в условиях АО «Уральская Сталь» / Тутарова В.Д., Шаповалов А.Н., Потапова М.В., Калитаев А.Н., Куц Н.А. // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2019. №18. С. 4-14.
10. Состояние и перспективы развития ковшового вакуумирования жидкой стали / Протасов А.В., Сивак Б.А., Лукьянов А.В., Никитенко А.С., Щёголев Н.А. // Черная металлургия. Бюлл. Научно-технической и экономической информации. 2010. № 11 (1331). С. 38-44.
11. Оценка перспективы вакуумной обработки стали в ЭСПЦ ПАО «ММК» / Бигеев В.А., Кретова А.О., Баландина Т.А., Коптякова С.В., Слющенков Д.С. // Теория и технология металлургического производства. 2019. №2(29). С. 23-28.
12. Tutarova V.D., Shapovalov A.N., Kalitaev A.N. Objective Laws of Nitrogen Removal in the Vacuum Tank Degasser // Materials Science Forum, 2020, T. 989, C. 381-387.
13. Smirnova E.A., Eliseeva I.A., Shapovalov A.N. The Degassing Laws for Railway Wheel Steel in a Vacuum Tank Degasser // Defect and Diffusion Forum, 2021, 410, 269-274.

Сведения об авторах

Смирнова Елизавета Андреевна – студентка, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

STUDYING REGULARITIES OF NITROGEN REMOVAL FROM STEEL ACCORDING TO PRODUCTION DATA

Smirnova Elizabeth A. – student, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia.

Shapovalov Alexey N. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Abstract. The paper presents the results of studying the regularities of nitrogen removal from steel grade 10HSND under the conditions of oxygen-converter and electric steel-smelting production facilities of Severstal PJSC. Shown are averaged data on smelting, ladle processing and vacuuming of steel. The features of the technology for the production of steel grade 10KhSND in the oxygen-converter shop (BOF) and electric arc-furnace shop (EAF shop) are given. The parameters of the technological process of production that have the greatest effect on the nitrogen content in steel are established. For the conditions of steelmaking in BOF, the parameters that have the greatest effect on the nitrogen content and the degree of its removal are: melting duration and scrap consumption for melting; temperature of the metal before processing at the "ladle-furnace" (LF) unit and the time of operation under current; the duration of vacuum treatment and the weight of the melt. For the conditions of steel smelting in the EAF shop, the main parameters are: the time of operation under current and the consumption of cast iron for melting; operating time under current at the LF and argon consumption; deep vacuum duration and specific argon consumption in vacuum treatment.

Based on statistical and regression analyzes of production data, vacuum treatment options were developed to achieve the desired nitrogen content in steel.

Keywords: nitrogen, steel vacuuming, vacuum treatment duration, vacuum depth, metal temperature in the ladle, argon consumption

Ссылка на статью:

Смирнова Е.А., Шаповалов А.Н. Изучение закономерностей удаления азота из стали по производственным данным // Теория и технология металлургического производства. 2022. №3(42). С. 11-16.

Smirnova E.A., Shapovalov A.N. Studying regularities of nitrogen removal from steel according to production data. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 42, no. 3, pp. 11-16.