

УДК 669.18

## КОНТРОЛЬ ОКСИДНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА IF СТАЛИ\*

*Морозов А.О.<sup>1,2</sup>, инженер-исследователь лаборатории диагностики материалов  
Погодин А.М.<sup>1,2</sup>, младший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов  
Комолова О.А.<sup>1,2</sup>, к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных  
технологий и защиты металлов, старший научный сотрудник лаборатории*

*диагностики материалов (o.a.komolova@gmail.com)*

*Бикин К.Б.<sup>3</sup>, ведущий эксперт (kbbikin@severstal.com)*

*Григорович К.В.<sup>1,2</sup>, академик РАН, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали,  
новых производственных технологий и защиты металлов, заведующий лабораторией  
диагностики материалов*

<sup>1</sup> **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>2</sup> **Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН**  
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

<sup>3</sup> **ПАО «Северсталь»**  
(162608, Россия, Вологодская обл., Череповец, ул. Мира, 30)

**Аннотация.** Современные тенденции в автомобилестроении направлены на снижение массы автомобиля и повышение его безопасности. Высокая пластичность IF-VH стали в сочетании с повышенной прочностью позволяет использовать прокат меньшей толщины в конструкции кузова автомобиля. Достижение высоких пластических свойств в IF-VH стали обеспечивается низким содержанием азота и углерода ( $C < 40 \text{ ppm}$ ,  $N < 40 \text{ ppm}$ ) и контролируемым содержанием углерода в твердом растворе. Возникновение большинства дефектов поверхности листа связано с неметаллическими включениями. Присутствие неметаллических включений в готовой продукции нарушает ее однородность, ухудшает поверхностные свойства стали, усталостную прочность и пластические характеристики металла. В результате выполнения работы методами микрорентгеноспектрального и фракционного газового анализа на растровом электронном микроскопе проанализированы образцы металла трех плавок IF-VH стали, отобранные по всей технологической цепочке производства в СП КС ПАО «Северсталь». Количественно определены основные типы оксидных неметаллических включений, находящихся в стали, а также общее содержание кислорода и азота в металле. Показано, что основными типами оксидных неметаллических включений в исследованных пробах металла являются алюминаты, силикаты и шпинель. Установлены два места с возможным вторичным окислением после ввода алюминия. Между пробами наблюдали заметный прирост азота, что свидетельствовало о вторичном окислении металла. При этом возрастало содержание включений алюминатов в металле и снижалось количество включений алюмомагниевого шпинели. Разработана математическая модель и программное обеспечение, описывающее процесс образования и удаления оксидных неметаллических включений. Адекватность программы подтверждена хорошей сходимостью между расчетными и экспериментальными данными по общему содержанию [O] в различных типах оксидов для первой пробы на установке ковш-печь и в слябе.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, математическое моделирование, автолист, производство стали, VH-эффект.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-782-790

### ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в автомобилестроении направлены на снижение массы автомобиля и повышение его безопасности. Эти задачи решаются за счет использования низкоуглеродистых марок стали, таких как IF-VH сталь, из которых методом штамповки и глубокой вытяжки производят детали корпусов автомобилей. Высокая пластичность IF-VH стали в сочетании с повышенной прочностью позволяет использовать прокат меньшей толщины в конструкции кузова автомобиля, что приводит к снижению его массы, сохраняя при этом

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24146 мк.

высокие прочностные характеристики. Достижение данных свойств в IF-VH стали обеспечивается низким содержанием азота и углерода ( $C < 40 \text{ ppm}$ ,  $N < 40 \text{ ppm}$ ) и контролируемым содержанием углерода в твердом растворе [1 – 6].

Для повышения качества IF-VH стали необходимо контролировать состояние поверхности листового проката. Возникновение большинства дефектов поверхности листа связано с неметаллическими включениями (НВ). По размеру НВ в IF-VH стали можно разделить на микровключения и макровключения. Размер микровключений не превышает 50 мкм. Макровключения, размер которых превышает 50 мкм, распределены неравномерно и их количество гораздо меньше,

однако они существенно влияют на качество готового продукта, поскольку усталостное разрушение всегда происходит в окрестности крупных неметаллических включений независимо от их состава [7 – 10].

Присутствие неметаллических включений в готовом металле нарушает его однородность, ухудшает поверхностные свойства стали, усталостную прочность и пластические характеристики металла. Неметаллические включения являются концентраторами напряжения при деформации, прокатке и штамповке стального листа, что в дальнейшем приводит к возникновению поверхностных дефектов [10, 11]. Негативным эффектом повышенного содержания НВ в стальном расплаве так же является «зарастание» сталеразливочных стаканов, которое сильно снижает скорость разливки и ухудшает технологичность производства [12 – 14].

Целью данного исследования является анализ изменения морфологии и содержания оксидных НВ в металле по всей технологической цепочке производства стали типа IF-ВН и разработка математической модели формирования, модифицирования и удаления неметаллических включений.

#### Методы исследования

Одним из самых распространенных способов количественной оценки содержания НВ в стали является металлографический метод анализа – сравнение размеров и формы найденных в металле неметаллических включений с эталонными шкалами с использованием бальных шкал. Для определения химического состава НВ используют метод микрорентгеноспектрального микроанализа, в котором приготовленный металлографический шлиф помещают в камеру сканирующего электронного микроскопа, где происходит детектирование включения, определение его химического состава и размерных характеристик. Данные методы исследования не дают полную картину о распределении и форме НВ в объеме образца [15 – 18]. Метод электрохимического осаждения (ЭО) дает возможность растворить матрицу металла и выделить неметаллические включения для последующего изучения их на сканирующем электронном микроскопе. Данный метод позволяет исследовать морфологию и форму НВ [15, 19]. Метод фракционного газового анализа (ФГА) дает возможность определить общее содержание кислорода в различных типах оксидных неметаллических включений и их объемную долю, что обеспечивает более полную картину о содержании различных типов НВ в стали [20].

В ходе работы проведен анализ существующей технологии выплавки, внепечной обработки и разливки IF-ВН стали. Для этого отобраны пробы металла по всей технологической цепочке (кислородный конвертер → установка ковш-печь (УКП) → установка вакуумирования стали (УВС) → МНРЗ → сляб). Схема ввода

присадок, технологических режимов и отбора проб металла показана на рис. 1.

На количество, форму, размер, тип оксидных неметаллических включений в стали оказывают влияние различные факторы производства:

- химический состав, окисленность, масса, температура стали и шлака;
- химический и фракционный состав раскислителей, шлакообразующих и легирующих материалов и их режим ввода;
- режим продувки инертным газом;
- технология вакуумирования;
- тип, химический состав, футеровка и т. д.

Современные методы контроля неметаллических включений позволяют получать результаты исследования через значительный временной интервал с момента отбора пробы металла, что не дает возможности оперативно корректировать технологию производства. Использование имитационной математической модели образования, модифицирования, удаления неметаллических включений позволит прогнозировать влияние технологических операций на содержание НВ в стальном расплаве.

На сегодняшний день существуют математические модели, которые достаточно подробно описывают процессы зарождения, роста и удаления неметаллических включений в стальном расплаве [21 – 25]. Однако на данный момент отсутствует интегральная математическая модель, которая имитирует процессы зарождения, модификации, роста и удаления НВ в зависимости от режима ввода присадок и продувки инертным газом.

В данной работе разработано математическое описание процесса образования НВ и их удаления из металла в ковше и создано программное обеспечение.

В зависимости от начальных условий, таких как химический состав, температура, масса металла и присадок, математическая модель позволяет прогнозировать, какой тип оксидных включений и их количество образуется при заданных условиях.

При создании математического описания взаимодействий между кислородом и остальными компонентами металла учитывалось, что:

- химические реакции между компонентами расплава протекают одновременно;
- направление реакций определяет градиент химического потенциала;
- возможно протекание как прямых, так и обратных реакций по следующей схеме:



где  $a_1, a_2$  – исходные компоненты реакции;  $a_3, a_4$  – продукты реакции;  $l_1, l_2, l_3, l_4$  – стехиометрические коэффициенты реакции.

В соответствии с постулатами Л. Онзагера сделано допущение, что скорость реакции пропорциональна

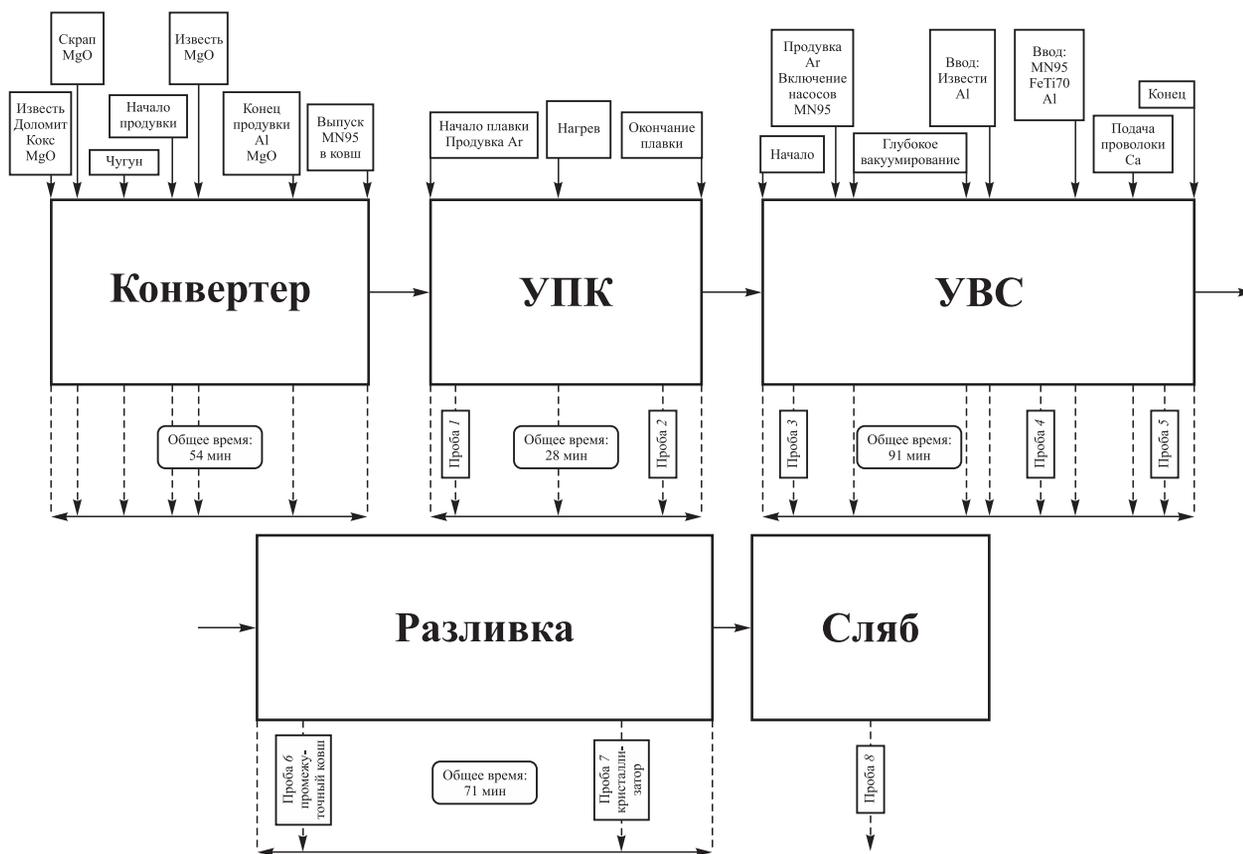


Рис. 1. Схема ввода присадок, технологических режимов и отбора проб металла

Fig. 1. Scheme of additives applying, technological modes and metal sampling

градиенту химического потенциала и рассчитывается по формуле

$$V_i = -S_{\text{пов}} L \text{grad} \mu_i, \quad (1)$$

где  $V_i$  – скорость взаимодействия  $i$ -го компонента, моль/с;  $S_{\text{пов}}$  – поверхность взаимодействия,  $\text{м}^2$ ;  $L$  – коэффициент Л. Онзагера,  $\text{моль}^2/(\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м})$ ;  $\text{grad} \mu_i$  – градиент химического потенциала  $i$ -го компонента,  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{м})$ .

Поскольку  $\text{grad} \mu_i = -\frac{A}{\delta}$ , то

$$V_i = S_{\text{пов}} L \frac{A}{\delta} = -S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_{\phi}}{K_p} = S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_p}{K_{\phi}}, \quad (2)$$

где  $A$  – химическое сродство  $A = -RT \ln \frac{K_{i,\phi}}{K_{i,p}}$ ,  $\text{Дж}/\text{моль}$ ;

$\delta$  – толщина слоя, м;  $K_p$  и  $K_{\phi}$  – равновесная и фактическая константа реакции соответственно.

Скорости реакций характеризуются величиной  $\ln \frac{K_p}{K_{\phi}}$ . Реакция, которая имеет наибольшее значение  $\ln \frac{K_p}{K_{\phi}}$ , принимается за базовую. Скорости всех остальных реакций пересчитывают по формуле [26]

$$V_{Me_xO_y} = V_{\text{баз}} \frac{\ln \frac{K_{p(Me_xO_y)}}{K_{\phi(Me_xO_y)}}}{\ln \frac{K_{p,\text{баз}}}{K_{\phi,\text{баз}}}}. \quad (3)$$

После расчета скоростей взаимодействия между компонентами металла происходит пересчет химического состава металла и неметаллических включений. Таким образом, удается вычислить количество первичных оксидных включений каждого типа.

Для моделирования процессов удаления неметаллических включений при ковшевой обработке стали разработана математическая модель, основанная на вычислении критерия Стокса, характеризующего всплывание НВ в расплаве. В зависимости от величины критерия Стокса делали вывод о возможности удаления НВ из расплава во время донной продувки металла аргоном. После расчета критерия Стокса проводили проверку условия на возможность захвата включения заданного размера пузырьком газа и его переноса в шлаковую фазу. В качестве исходных значений для расчета количества удаленных включений использовали данные по общему содержанию оксидных включений в расплаве, полученные в программе расчета их образования. На выходе из подпрограммы

получали остаточное содержание оксидных включений в жидком металле.

Критерий Стокса, характеризующий отношение величин инерционной силы и вязкого сопротивления среды, рассчитывали по формуле

$$St = \frac{2}{9} \rho_{\text{НВ}} a^2 \frac{u_{\text{пуз}}}{R \mu} \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{НВ}}$  – плотность НВ, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – радиус НВ, м;  $u_{\text{пуз}}$  – скорость всплывания газового пузырька, м/с;  $R$  – радиус всплывающего газового пузырька, м;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкой среды, Па·с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения работы методами ФГА и микро-рентгеноспектральным анализом НВ на электронном микроскопе были проанализированы образцы проб металла трех плавок ИФ-ВН стали, отобранные по всей технологической цепочке производства.

От каждой пробы металла подготавливали образцы массой 1,3 – 1,6 г. Анализ образцов металла проводили на газоанализаторе LECO TC600.

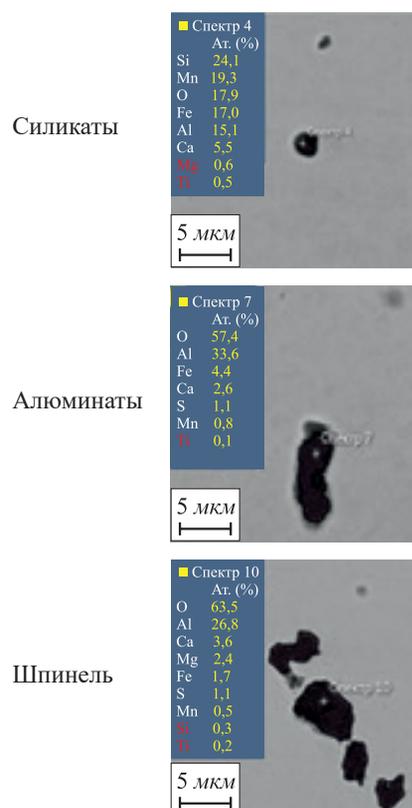
В качестве примера результатов ФГА на рис. 2 представлена типичная кривая газовой выделенности (эволограма) из образца.

После обработки эволограм ФГА с помощью программного обеспечения OxSePPro были выделены основные типы оксидных НВ. Содержание кислорода в различных типах оксидных НВ, полученное методом ФГА, после пересчета соответствует объемной доле оксидов данного типа в металле. Результаты определения содержания кислорода в различных типах оксидных НВ, общего кислорода и азота в пробах металла, момент ввода основных присадок на различных этапах

производства ИФ-ВН стали представлены на рис. 3 – 5.

После проведения вакуумной обработки, ввода раскислителей и легирующих, основными типами НВ в расплаве являются алуминаты, в меньшем количестве наблюдается присутствие включений силикатов и шпинели.

С целью подтверждения результатов ФГА методом микро-рентгеноспектрального анализа были проанализированы пробы металла, отобранные от сляба. Результаты анализа неметаллических включений показаны ниже:



На основании этих данных установлено, что основны-

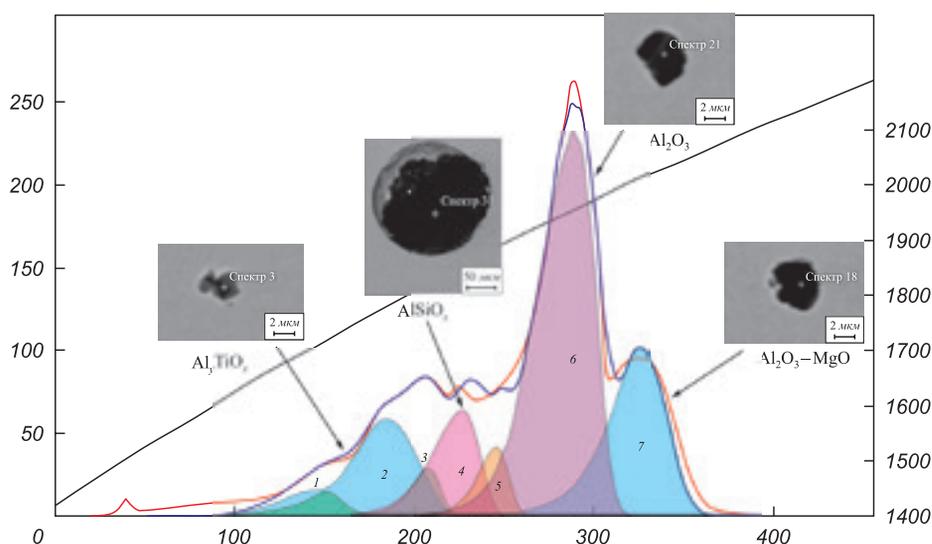


Рис. 2. Результаты определения оксидных неметаллических включений методом ФГА

Fig. 2. Results of determination of oxide non-metallic inclusions by fractional gas analysis

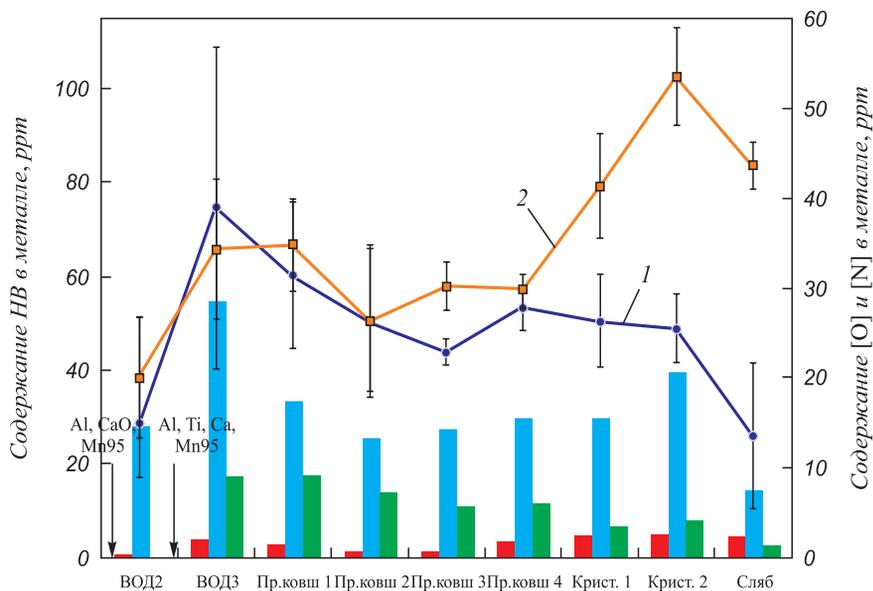


Рис. 3. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 1): 1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 3. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 1): 1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

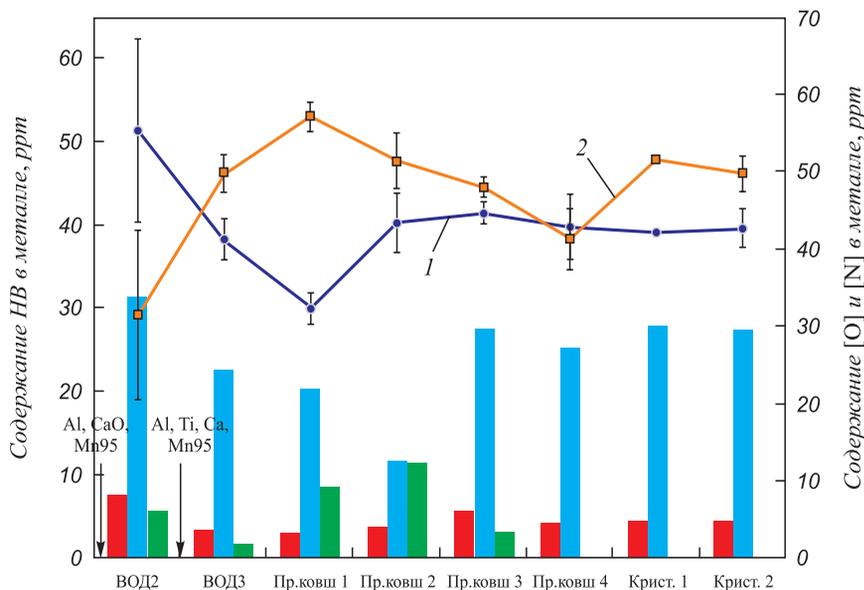


Рис. 4. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 2): 1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 4. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 2): 1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

ми типами НВ, присутствующими в исследованных пробах металла, являются алюминаты, силикаты и шпинель.

После проведения вакуумной обработки содержание азота в металле находилось в диапазоне 20 – 30 ppm. После ввода материалов на вакууматоре происходило увеличение содержания азота на 10 – 15 ppm. Во время разливки содержание азота в металле промежуточного ковша фактически не изменялось, однако его содержание в пробах металла, отобранных из кристаллизатора,

увеличивалось на 10 ppm, что говорит о возможном вторичном окислении расплава.

Для проверки адекватности разработанного программного обеспечения образования и удаления НВ был проведен сравнительный анализ между результатами расчета и данными ФГА. В качестве исходных параметров для расчета использовали химический состав, температуру, массу, окисленность металла и шлака, массу и химический состав вводимых материалов,

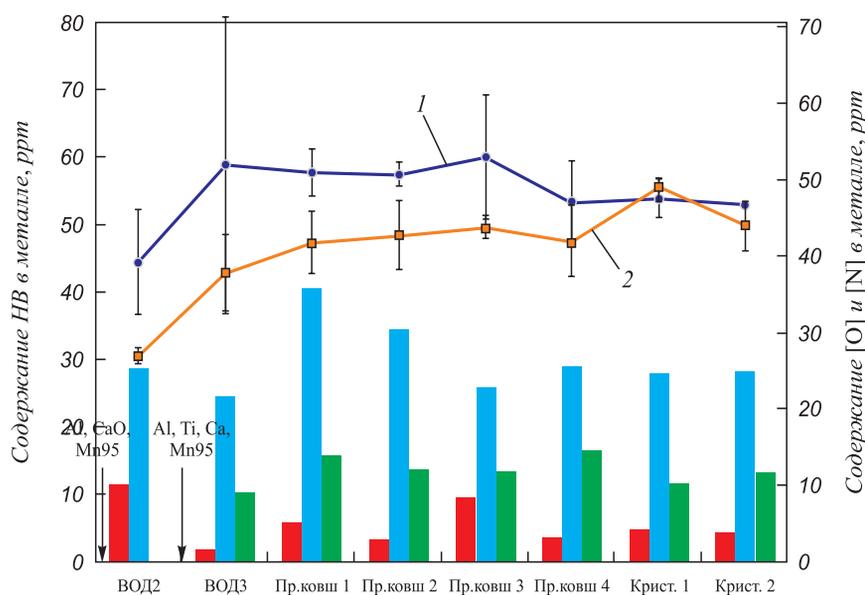


Рис. 5. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 3):  
1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 5. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 3):  
1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

режим продувки металла инертным газом. Сравнение результатов ФГА первой пробы металла, отобранной от каждой из трех плавков на УКП, и расчетов с помощью разработанного программного обеспечения образования и удаления НВ показано в табл. 1.

В табл. 2 приведен результат расчета распределения кислорода по типам оксидных неметаллических включений для первой пробы на УКП.

Сравнение результатов ФГА и расчетов содержания НВ в слябе с помощью разработанного программного обеспечения показано в табл. 3.

В табл. 4 показан результат расчета распределения общего содержания [O] по конкретным типам оксидных включений в слябе для плавки 1.

Сравнение экспериментальных результатов и дан-

Таблица 1

**Сравнение результатов ФГА проб металла и расчета с помощью программы образования НВ для первой пробы на УКП**

Table 1. Comparison of the results of fractional gas analysis of the metal samples and calculation according to the program for the formation of non-metallic inclusions for the first metal sample on the LF

Плавка	Общее содержание [O] в оксидах по ФГА, ppm	Общее содержание [O] в оксидах по расчету, ppm
1	678,43 ± 13,01	654,45
2	990,93 ± 77,88	1006,16
3	742,50 ± 36,73	649,19

Таблица 2

**Наблюдаемые типы включений и их количество при расчете для первой пробы на УКП**

Table 2. Detected types of inclusions and their total content at calculation for the first metal sample on the LF

Плавка	Содержание [O] в разных типах оксидных включений по расчету, ppm
1	FeO = 183,31 MnO = 435,83 SiO <sub>2</sub> = 30,05
2	FeO = 410,55 MnO = 565,38 SiO <sub>2</sub> = 30,22
3	FeO = 186,98 MnO = 443,53 SiO <sub>2</sub> = 23,94

Таблица 3

**Сравнение результатов ФГА металла и расчета с помощью программы образования НВ для сляба**

Table 3. Comparison of the obtained results of fractional gas analysis and calculations carried out using software for the formation of non-metallic inclusions

Плавка	Общее содержание [O] в оксидах по ФГА, ppm	Общее содержание [O] в оксидах по расчету, ppm
1	17 ± 1	17

Таблица 4

**Наблюдаемые типы включений и их количество при расчете для первой пробы на УКП**

*Table 4. Detected types of inclusions and their total content at calculation for the first metal sample on the LF*

Плавка	Содержание [O] в разных типах оксидных включений по расчету, ppm
I	FeO = 0,6 MnO = 1,5 SiO <sub>2</sub> = 6,0 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 5,0 CaO = 4,5

ных расчетов показали хорошую сходимость по общему содержанию [O] в оксидах для первой пробы на установке ковш-печь и в слябе плавки I.

**Выводы**

В результате проведенного исследования образцов металла трех плавов IF-ВН стали, отобранных по всей технологической цепочке методами ФГА и микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе, количественно определены основные типы включений в стали, а также общее содержание кислорода и азота в металле. Отмечено, что основными типами НВ в исследованных пробах металла являются алюминаты, силикаты и шпинель.

Показана динамика изменения различных типов неметаллических включений в пробах металла на технологических этапах ковшевой обработки и разливки промышленных плавов IF-ВН стали.

Наличие основных типов НВ в пробах, отобранных от сляба, подтверждено методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе. Установлено, что преобладающим типом неметаллических включений после ввода алюминия на вакууматоре являются включения алюминатов. Причем их содержание в металле практически не уменьшалось на этапах вакууматор – промежуточный ковш – кристаллизатор.

Установлены два места с возможным вторичным окислением после ввода алюминия. Между пробами наблюдали заметный прирост азота, что свидетельствовало о вторичном окислении металла. При этом возросло содержание включений алюминатов в металле и снижалось количество включений алюмомагниевого шпинели.

Разработана математическая модель и программное обеспечение, описывающее процессы образования и удаления оксидных неметаллических включений. Адекватность работы программного обеспечения подтверждена хорошей сходимостью между расчетными и экспериментальными данными по общему содержанию

[O] в различных типах оксидов для первой пробы на установке ковш-печь и в металле сляба.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бхатташария Д. Перспективы развития высокопрочных IF-сталей // Междунар. семинар «Современные достижения в металлургии и технологии производства сталей для автомобильной промышленности», 17 – 18 февр. 2004. – М.: Металлургиздат, 2004. С. 71 – 82
2. Родионова И., Филиппов Г. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения // Национальная металлургия. 2004. № 2. С. 93 – 97.
3. Титов В. Стальной прокат для автомобильной промышленности // Национальная металлургия. 2004. № 5. С. 84 – 89.
4. Pampa Ghosh, Chiradeep Ghosh, Ray R.K. Precipitation in interstitial free high strength steels // ISIJ International. 2009. Vol. 49. No. 7. P. 1080 – 1086.
5. Горкуша Д.В., Комолова О.А., Григорович К.В. и др. Исследование критериальных параметров достижения ВН эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3 – 4. С. 201 – 210.
6. Myung-Duk Seo, Jung-Wook Cho, Kwang-Chun Kim, Seon-Hyo Kim. Evolution of non-metallic inclusions in ultra low carbon steel after aluminum deoxidization // ISIJ International. 2014. Vol. 54. No. 3. P. 475 – 481.
7. Зайцев А.И., Родионова И.Г., Хорошилов А.Д. и др. Анализ природы возникновения поверхностных дефектов холоднокатаного проката из IF-сталей // Электromеталлургия. 2012. № 7. С. 36 – 40.
8. Zhou Xiaolei, Shi Zhe, Zhang Guifang. The evolution of non-metallic inclusions in IF steel // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 696. P. 62 – 65.
9. Shiozawa K., Lu L. Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel // Advanced Materials Research. 2008. Vol. 44 – 46. P. 33 – 42.
10. Bate P.S. Texture development in the cold rolling of IF steel // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 38. No. 1. P. 365 – 377.
11. Jin Ma, Bo Zhang, Daokui Xu etc. Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel // Int. Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32. P. 1116 – 1125.
12. Jouni Ikäheimonen, Kauko Leiviskä, Jari Ruuska, Jarkko Matkala. Nozzle clogging prediction in continuous casting of steel // 15<sup>th</sup> Triennial World Congress, July 21 – 26, 2002, Barcelona, Spain. P. 143 – 147.
13. Tehovnik F., Burja J., Arh B., Knap M. Submerged entry nozzle clogging during continuous casting of al-killed steel // Metalurgija. 2015. Vol. 54. No. 2. P. 371 – 374.
14. Щукина Л.И., Туваев В.Ф., Комолова О.А., Григорович К.В. Исследование причин пониженной разливаемости листовой стали на отечественных предприятиях // Сб. тр. XV Междунар. конгресса сталеплавателей, к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. 2018. С. 357 – 362.
15. Karasev A.V., Suito H. Analysis of size distributions of primary oxide inclusions in Fe-10 mass pct Ni-M (M = Si, Ti, Al, Zr, and Ce) alloy // Metallurgical and Materials Transactions B. 1999. Vol. 30. No. 2. P. 259 – 270.
16. Ohta H., Suito H. Characteristics of particle size distribution of deoxidation products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe10 mass % Ni alloy // ISIJ International. 2006. Vol. 46. No. 1. P. 14 – 21.
17. Kanbe Y., Karasev A., Todoroki H., Jönsson P.G. Application of extreme value analysis for two- and three-dimensional determinations of the largest inclusion in metal samples // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No. 4. P. 593 – 602.

18. Manish Marotrao Pande, Muxing Guo. Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis optical emission spectroscopy technique // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 11. P. 1778 – 1787.
19. Горкуша Д.В., Григорович К.В., Карасев А.В., Комолова О.А. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки низкоуглеродистой стали класса IF // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 5. С. 345 – 352.
20. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Mathematical models, algorithms and software for dynamic simulation of leadle treatment technology // *Metallurgia Italiana*. 2019. No. 3. P. 20 – 24.
21. Mapelli C., Barella S., Gruttadauria A., Mombelli D. Prevision of inclusion content in structural steel // 5<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany. 2012. P. 1 – 9.
22. Seshadri V., Antônio da Silva C., Alves da Silva I. A physical modeling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain // *Tecnologia. Metallurgia, Materiais Mineracao*. 2012. Vol. 9. No. 1. P. 22 – 29.
23. Zhang L., Thomas B.G., Wang X., Cai K. Evaluation and control of steel cleanliness – review // 85<sup>th</sup> Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002. P. 431 – 452.
24. Lifeng Zhang. Fluid flow and inclusion removal in molten steel continuous casting strands // 5<sup>th</sup> Int. Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13 – 15 December, 2006. P. 1 – 9.
25. Pérez J. Inclusion control model in ladle metallurgy furnace // McMaster University, Master's thesis, Ontario, 2012. P. 131.
26. Grigorovich K.V., Komolova O.A. Mathematical modeling and optimization of steelmaking technologies // Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS2018). June 13 – 15, 2018, Venice, Italy.

Поступила в редакцию 15 октября 2020 г.

После доработки 15 октября 2020 г.

Принята к публикации 20 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 10, pp. 782–790.

## CONTROL OF OXIDE NON-METALLIC INCLUSIONS IN PRODUCTION OF IF STEEL

A.O. Morozov<sup>1,2</sup>, A.M. Pogodin<sup>1,2</sup>, O.A. Komolova<sup>1,2</sup>,  
K.B. Bikin<sup>3</sup>, K.V. Grigorovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow,  
Russia

<sup>3</sup>JSC “Severstal”, Cherepovets, Vologda Region, Russia

**Abstract.** Modern trends in the automotive industry are aimed at reducing vehicle weight and increasing its safety. The high ductility of IF-BH steel in combination with increased strength allows the use of thinner rolled products in the car body structure. Achievement of high plastic properties in IF-BH steel is ensured by the low content of nitrogen and carbon (C <40 ppm, N <40 ppm) and controlled carbon content in the solid solution. The majority of sheet surface defects are associated with non-metallic inclusions. The presence of non-metallic inclusions in the finished product violates its homogeneity, deteriorates the surface properties of steel, fatigue strength and plastic characteristics of the metal. As a result of the work performed by the methods of fractional gas and micro-X-ray spectral analysis on a scanning electron microscope, metal samples of three IF-BH steel melts were analyzed, taken along the entire process chain of production. The main types of oxide non-metallic inclusions in the steel were quantitatively determined, as well as the total oxygen and nitrogen content in the metal. It is shown that the main types of oxide non-metallic inclusions in the investigated metal samples are aluminates, silicates and spinel. An increase in nitrogen content in the metal after breakdown of the vacuum on the VD was established, which indicates secondary oxidation of the metal. In metal of the samples in the section between the tundish and the crystallizer, nitrogen content in the metal increases which indicates the secondary metal oxidation. At the same time, the content of inclusions of aluminates in the metal increased and the number of inclusions of aluminum-magnesium spinel decreased. A mathematical model and software have been developed that describe the formation and removal of oxide nonmetallic inclusions. Adequacy of the program was confirmed by good convergence between the calculated and laboratory data on the total content [O] in various types of oxides for the first sample at the ladle-furnace unit and in the slab.

**Keywords:** non-metallic inclusions, mathematical modeling, auto sheet, steel production, BH effect.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-782-790

## REFERENCES

1. Bkhattashariya D. Prospects for the development of high-strength IF-steels. In: *Mezhdunarodnyi seminar “Sovremennye dostizheniya v metallurgii i tekhnologii proizvodstva staley dlya avtomobil'noi promyshlennosti”*, 17 – 18 fevralya 2004 [Int. Seminar “Modern developments in metallurgy and technologies of steels for automotive industry”, 17 – 18 February, 2004]. Moscow: Metallurgizdat, 2004, pp. 71–82. (In Russ.).
2. Rodionova I., Filippov G. Technological aspects of the production of steel for automotive industry. *Natsional'naya metallurgiya*. 2004, no. 2, pp. 93–97. (In Russ.).
3. Titov V. Rolled steel for automotive industry. *Natsional'naya metallurgiya*. 2004, no. 5, pp. 84–89. (In Russ.).
4. Pampa Ghosh, Chiradeep Ghosh, Ray R.K. Precipitation in interstitial free high strength steels. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 7, pp. 1080–1086.
5. Gorkusha D.V., Komolova O.A., Grigorovich K.V., Alpatov A.V., Arsenkin A.M. Criteria for achieving the BH effect in ultra-low carbon steels for deep drawing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3-4, pp. 201–210. (In Russ.).
6. Myung-Duk Seo, Jung-Wook Cho, Kwang-Chun Kim, Seon-Hyo Kim. Evolution of non-metallic inclusions in ultra low carbon steel after aluminum deoxidization. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 3, pp. 475–481.
7. Zaitsev A.I., Rodionova I.G., Khoroshilov A.D., Mezin F.I., Semernin G.V., Mishnev P.A., Zhironkin M.V., Bikin K.B. Analysis of surface defects occurrence in cold-rolled products from IF-steels. *Elektrometallurgiya*. 2012, no. 7, pp. 36–40. (In Russ.).
8. Zhou Xiaolei, Shi Zhe, Zhang Guifang. The evolution of non-metallic inclusions in IF steel. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 696, pp. 62–65.
9. Shiozawa K, Lu L. Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel. *Advanced Materials Research*. 2008, vol. 44–46, pp. 33–42.
10. Bate P.S. Texture development in the cold rolling of IF steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 38, no. 1, pp. 365–377.
11. Jin Ma, Bo Zhang, Daokui Xu, En-Hou Han, Wei Ke. Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel. *Int. Journal of Fatigue*. 2010, vol. 32, pp. 1116–1125.
12. Jouni Ikäheimonen, Kauko Leiviskä, Jari Ruuska, Jarkko Matkala. Nozzle clogging prediction in continuous casting of steel. In: *15<sup>th</sup>*

- Triennial World Congress, July 21 – 26, 2002, Barcelona, Spain*, pp. 143–147.
13. Tehovnik F., Burja J., Arh B., Knap M. Submerged entry nozzle clogging during continuous casting of al-killed steel. *Metallurgija*. 2015, vol. 54, no. 2, pp. 371–374.
  14. Shchukina L.I., Tuvaev V.F., Komolova O.A., Grigorovich K.V. Investigation of the causes of reduced spillability of sheet steel at domestic enterprises. In: *Sbornik trudov: XV Mezhduнародnyi kongress staleplavil'shchikov* [Proceedings of XV Int. Congress of Steelmakers]. 2018, pp. 357–362. (In Russ.).
  15. Karasev A.V., Suito H. Analysis of size distributions of primary oxide inclusions in Fe-10 mass pct Ni-M (M = Si, Ti, Al, Zr, and Ce) alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1999, vol. 30, no. 2, pp. 259–270.
  16. Ohta H., Suito H. Characteristics of particle size distribution of deoxidation products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe10 mass % Ni alloy. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 1, pp. 14–21.
  17. Kanbe Y., Karasev A., Todoroki H., Jönsson P.G. Application of extreme value analysis for two- and three-dimensional determinations of the largest inclusion in metal samples. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 4, pp. 593–602.
  18. Manish Marotrao Pande, Muxing Guo. Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis optical emission spectroscopy technique. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 11, pp. 1778–1787.
  19. Gorkusha D.V., Grigorovich K.V., Karasev A.V., Komolova O.A. Content modification of different types of non-metallic inclusions during low-carbon IF steel ladle treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 345–352. (In Russ.).
  20. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Mathematical models, algorithms and software for dynamic simulation of ladle treatment technology. *Metallurgia Italiana*. 2019, no. 3, pp. 20–24
  21. Mapelli C., Barella S., Gruttadauria A., Mombelli D. Prevision of inclusion content in structural steel. In: *5<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany*. 2012, pp. 1–9.
  22. Seshadri V., Antônio da Silva C., Alves da Silva I. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. *Tecnologia. Metalurgia, Materiais e Mineracao*. 2012, vol. 9, no. 1, pp. 22–29
  23. Zhang L., Thomas B.G., Wang X., Cai K. Evaluation and control of steel cleanliness – review. In: *85<sup>th</sup> Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA*, 2002, pp. 431–452.
  24. Lifeng Zhang. Fluid flow and inclusion removal in molten steel continuous casting strands. In: *5<sup>th</sup> Int. Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia*, 2006, pp. 1–9.
  25. Pérez J. *Inclusion Control Model in Ladle Metallurgy Furnace: McMaster University, Master's thesis, Ontario*, 2012, p. 131.
  26. Grigorovich K.V., Komolova O.A. Mathematical modeling and optimization of steelmaking technologies. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS2018), 2018, Venice, Italy*.
- Funding.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 18-29-24146 mk.
- Information about the authors:**
- A.O. Morozov, Research Engineer of the Laboratory of Materials Diagnostics*  
*A.M. Pogodin, Junior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics*  
*O.A. Komolova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, Senior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics (o.a.komolova@gmail.com)*  
*K.B. Bikin, Leading Expert (kbbikin@severstal.com)*  
*K.V. Grigorovich, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, Head of the Laboratory of Materials Diagnostics*
- Received October 15, 2020  
 Revised October 15, 2020  
 Accepted October 20, 2020