



УДК 669.046.58

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-140-147

Оригинальная статья  
Original article

## ОЦЕНКА ГОМОГЕННОСТИ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА АКП РАСЧЕТНЫМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДАМИ

В. А. Мурысёв<sup>1</sup>, О. Ю. Шешуков<sup>2,3</sup>, В. М. Сафонов<sup>4</sup>,  
С. А. Сомов<sup>1</sup>, А. А. Метелкин<sup>2</sup>, Д. К. Егиазарьян<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> АО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 607060, Нижегородская обл., Выкса, ул. Братьев Баташевых, 45)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>3</sup> Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>4</sup> Выксунский филиал НИТУ «МИСИС» (Россия, 607036, Нижегородская обл., Выкса, п.г.т. Шиморское, ул. Калинина, 206)

✉ [murysev\\_va@vsw.ru](mailto:murysev_va@vsw.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы по определению нерастворенных частиц СаО и MgO в шлаках, формируемых в агрегате ковш–печь. Оценка шлаков по наличию и количеству нерастворенных оксидов СаО и MgO в зависимости от химического состава проводили с помощью полимерной модели, разработанной в УрФУ и усовершенствованной в ИМЕТ УрО РАН. Для определения насыщения многокомпонентного расплава по оксидам СаО и MgO необходимо сравнить два параметра: термодинамическую активность оксида в расплаве, которая зависит от химического состава, и активность насыщения, которая зависит от температуры. Предлагается методика оценки содержания нерастворенных частиц в шлаках, формируемых на участке ковшевой обработки стали АО «ВМЗ». Большинство шлаков содержит нерастворенную известь в количестве не более 10 %, что достаточно для успешной десульфурации стали. Теоретические расчеты по определению нерастворенных частиц были подтверждены в лабораторных условиях при исследованиях производственных шлаков на установке вискозиметра конструкции Штенгельмейера. Лабораторные опыты показали точность расчетного метода определения твердой фазы в шлаках, формируемых в агрегате ковш–печь, путем сравнения изменения вязкости при снижении температуры шлаков. Температура застывания гетерогенного шлака на 200 °С выше, чем гомогенного. При снижении температуры гетерогенного шлака образовывались укрупненные агломераты твердых оксидов, которые контактировали с измерительным зондом, повышая регистрируемую вязкость оксидной системы в интервале температур 1570 – 1590 °С. Результаты лабораторных опытов подтверждают методику определения твердой фазы в шлаке.

**Ключевые слова:** шлаки, агрегат ковш–печь, нерастворенные частицы, гомогенный шлак, гетерогенный шлак, вискозиметр, растворение извести

**Благодарности:** Статья выполнена в рамках государственной работы № FEUZ-2023-0015.

**Для цитирования:** Мурысёв В.А., Шешуков О.Ю., Сафонов В.М., Сомов С.А., Метелкин А.А., Егиазарьян Д.К. Оценка гомогенности рафинировочного шлака АКП расчетным и экспериментальными методами. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(2):140–147. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-140-147>

## ASSESSMENT OF HOMOGENEITY OF LADLE-FURNACE REFINING SLAG BY CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHODS

V. A. Murysev<sup>1</sup>, O. Yu. Sheshukov<sup>2, 3</sup>, V. M. Safonov<sup>4</sup>,  
S. A. Somov<sup>1</sup>, A. A. Metelkin<sup>2</sup>, D. K. Egiazar'yan<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>JSC “Vyksa Metallurgical Plant” (45 Br. Batashevyykh Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

<sup>3</sup>Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

<sup>4</sup>Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607036, Russian Federation)

✉ [murysev\\_va@vsw.ru](mailto:murysev_va@vsw.ru)

**Abstract.** The paper considers the issues of determining undissolved CaO and MgO particles in slags formed in a ladle-furnace unit. The assessment of slags by the presence and quantity of undissolved oxides CaO and MgO, depending on chemical composition, was carried out using a polymer model developed at UrFU and improved at IMeT UrB RAS. To determine the saturation of a multicomponent melt by CaO and MgO oxides, it is necessary to compare two parameters: thermodynamic activity of oxide in the melt, which depends on chemical composition, and saturation activity, which depends on temperature. The authors propose a method for estimating the content of undissolved particles in the slags formed at the steel ladle treatment at JSC VMZ. Most slags contain undissolved lime in an amount less than 10 %, which is sufficient for successful steel desulfurization. Theoretical calculations for determination of undissolved particles were confirmed in laboratory conditions during studies of industrial slags with a Stengelmeyer viscometer. Laboratory experiments showed the accuracy of the calculated method for determining the solid phase in the slags formed in ladle-furnace unit by comparing the viscosity changes with a decrease in the slags temperature. Solidification temperature of heterogeneous slag is 200 °C higher than that of homogeneous one. When temperature of heterogeneous slag decreased, enlarged agglomerates of solid oxides were formed, which fell under the measuring device, respectively, it showed an increased viscosity of the oxide system in the temperature range of 1570 – 590 °C. Laboratory experiments confirm the methodology for determining the solid phase in the slag.

**Keywords:** slag, ladle-furnace unit, undissolved particles, homogeneous slag, heterogeneous slag, viscometer, lime dissolution

**Acknowledgements:** The work was performed within the framework of the state task No. FEUZ-2023-0015.

**For citation:** Murysev V.A., Sheshukov O.Yu., Safonov V.M., Somov S.A., Metelkin A.A., Egiazar'yan D.K. Assessment of homogeneity of ladle-furnace refining slag by calculation and experimental methods. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(2):140–147.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-140-147>

### ВВЕДЕНИЕ

Ковшевая металлургия является качественной стадией обработки металла перед разливкой на УНРС, основной задачей которой является доводка жидкого металла до заданного и однородного химического состава, необходимой температуры, высокой степени чистоты по неметаллическим включениям и вредным примесям [1 – 3].

В агрегате ковш–печь (АКП) в условиях электрошлакового цеха АО «Выксунский металлургический завод» (АО «ВМЗ») формируют высокоосновные, жидкоподвижные шлаки с основной целью – удаление из металла серы, которая снижает служебные свойства стали [1; 4 – 7]. Дополнительно шлак обеспечивает защиту металла от вторичного окисления, снижение теплопотерь с поверхности расплава и поглощение неметаллических включений [1].

Основной задачей при формировании высокоосновного шлака в условиях ковшевой обработки стали (КОС) является обеспечение максимальных десульфуризирующих свойств, достигаемых при наличии «свобод-

ных» анионов кислорода, источниками которых являются основные оксиды CaO и MgO [1; 8 – 11].

Исходя из опыта рафинирования металла на участке КОС известно, что для успешного удаления серы необходимо формировать шлаки, насыщенные по CaO с незначительной долей пересыщения (не более 10 %). В случае полной растворимости извести будет существовать дефицит оксида CaO, что отрицательно отразится на рафинирующих свойствах шлака. Если количество нерастворенной извести будет превышать 10 %, то это также приведет к снижению рафинировочных свойств и к перерасходу шлакообразующих материалов [1; 12].

Для растворения CaO необходимо ввести добавки, которые снизят его температуру плавления и ускорят растворение, например, флюорит (CaF<sub>2</sub>), ОКД (добавка кремнесодержащая) или алюмосодержащие материалы.

Как эффективный разжижитель шлака широко применяется в сталеплавильном производстве флюорит (плавиковый шпат). Однако его применение имеет ряд существенных недостатков [13]:

– фторид кальция способствует разъеданию футеровки сталеразливочных ковшей;

– в условиях высоких температур происходит частичное испарение  $\text{CaF}_2$ , что приводит к ухудшению экологической обстановки.

На современных предприятиях стараются заменить фторид кальция другими разжижающими добавками.

Для растворения  $\text{CaO}$  в шлаке можно использовать материалы на основе кремнезема и глинозема, которые образуют легкоплавкие эвтектики с оксидом кальция и тем самым снижают его температуру плавления. Однако применение материала на основе  $\text{SiO}_2$  для проведения рафинирующих процессов нецелесообразно, так как одним из важнейших условий достижения высокого коэффициента распределения серы в период рафинирования является снижение содержания  $\text{SiO}_2$  в шлаке [1; 14]. Именно поэтому следует использовать разжижающие материалы на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [15 – 17].

Дополнительно необходимо провести оценку шлаков по насыщению  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в зависимости от их химического состава в условиях КОС АО «ВМЗ».

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку шлаков по наличию и количеству нерастворенных в них оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в зависимости от химического состава проводили с помощью полимерной модели (ПМ), разработанной в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) и усовершенствованной в работе [19].

Принцип определения насыщения многокомпонентного расплава по  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  заключается в сравнении двух параметров: термодинамической активности оксида  $\text{CaO}$  в расплаве ( $a_{\text{CaO}}^{\text{рд}}$ ), которая зависит от химического состава, и активности насыщения  $\text{CaO}$  ( $a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ ), которая зависит от температуры.

Методика определения насыщения расплава по  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  заключается в следующем (рис. 1). В точке 1,

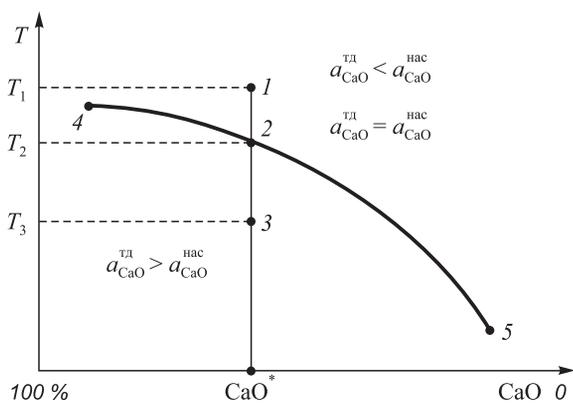


Рис. 1. Методика расчета количества твердых частиц оксида  $\text{CaO}$  в гетерогенном шлаке

Fig. 1. Method for calculating the amount of solid  $\text{CaO}$  particles in heterogeneous slag

соответствующей температуре  $T_1$ , справедливо неравенство  $a_{\text{CaO}}^{\text{рд}} < a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ , то есть расплав не насыщен оксидом  $\text{CaO}$ .

От точки 1 до точки 2 (не включая саму точку 2) происходит снижение  $a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ . В точке 2, определяемой температурой  $T_2$ , расплав становится насыщенным по оксиду  $\text{CaO}$  и достигает термодинамической активности этого оксида в расплаве, то есть справедливо равенство  $a_{\text{CaO}}^{\text{рд}} = a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ . Это условие соответствует определенному значению  $\text{CaO}^*$  в расплаве. При дальнейшем снижении температуры до  $T_3$  и постоянном составе шлака избыток оксида  $\text{CaO}$  будет присутствовать в виде твердой фазы, так как  $a_{\text{CaO}}^{\text{рд}} > a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ . Соответственно, можно определить состав шлака и температуру, при которых начинает выделяться твердая фаза  $\text{CaO}$ : это линия 4 – 2 – 5 (рис. 1).

Таким образом, методика определения количества нерастворенных частиц  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  и полного состава жидкой фазы гетерогенного шлака состоит в следующем:

- 1) определение минимальной температуры, при которой термодинамические активности оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  не превышают активностей насыщения;
- 2) при необходимости снижение расчетного количества оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  в шлаке для соблюдения условия  $a_{\text{CaO}}^{\text{рд}} = a_{\text{CaO}}^{\text{нас}}$ ;
- 3) определение массовой доли нерастворенных частиц оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  по балансу компонентов исходной концентрации компонентов шлака при заданной температуре.

Для проверки этой методики были отобраны шлаки, формируемые в сталеразливочном ковше на участке КОС электросталеплавильного цеха АО «ВМЗ» с известным химическим составом (табл. 1).

С помощью представленной методики и ПМ был рассчитан состав гомогенной фазы каждого шлака и количество твердой фазы оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  (табл. 2).

Шлак 4 гомогенный, так как не содержит твердых фаз  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ; шлак 5 является гетерогенным и содержит твердые фазы  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ; шлаки 1 – 3, 6 гетерогенные и содержат только нерастворенный оксид  $\text{CaO}$ , количество которого не превышает 10 %.

Таблица 1. Химический состав исследуемых шлаков

Table 1. Chemical composition of the studied slags

Шлак	Содержание, мас. %				
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO + MnO
1	52,7	9,8	27,0	6,1	<1,5
2	50,7	9,9	28,8	6,7	
3	52,7	8,4	29,6	5,2	
4	47,3	9,6	31,1	6,9	
5	50,9	9,3	26,2	9,2	
6	52,5	8,9	26,6	6,6	

Таблица 2. Химический состав гомогенной фазы и наличие твердой фазы в исследуемых шлаках

Table 2. Chemical composition of homogeneous phase and presence of solid phase in the studied slags

Шлак	Содержание, мас. %, в жидкой фазе					Количество выделившегося из исходной оксидной смеси (гетерогенного шлака), мас. %	
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO + MnO	MgO	CaO
1	52,52	10,66	29,36	6,63	<1,5	0	4,56
2	52,00	10,26	29,84	6,94		0	0,52
3	52,75	9,03	31,80	5,59		0	3,73
4	49,33	10,01	32,43	7,20		0	0
5	49,87	10,39	29,26	9,50		0,72	6,47
6	51,56	10,07	30,10	7,47		0	7,28

Определив тип шлаков, можно провести сравнение их физических свойств (вязкости и температуры плавления) на лабораторной установке.

В работе был использован вибрационный метод измерения вязкости. Вибрационный вискозиметр, работающий в режиме резонансных колебаний, позволяет измерять вязкость расплавов в пределах 0,1 – 15 Па·с. Высокая чувствительность вибрационного вискозиметра обусловлена тем, что он работает на резонансных колебаниях и вязкость шлака нарушает условия резонанса. Для получения резонанса необходимо, чтобы частота тока, питающего катушку вибратора, была равна собственной частоте механических колебаний подвижной системы вискозиметра. При наступлении резонанса амплитуда колебаний подвижной системы становится максимальной и в обмотке измерительной катушки индуцируется максимальная ЭДС. Конструкция использованного вибрационного вискозиметра была разработана Штенгельмейером [20] (рис. 2).

Принцип работы вискозиметра состоит в том, что при опускании зонда в расплав шлака резонанс колебаний нарушается: чем больше вязкость шлака, тем меньше становится амплитуда колебаний подвижной системы и тем меньше ЭДС в измерительной катушке. Настройка вискозиметра на резонанс проводится с помощью автогенератора. Так как измерительная катушка находится в магнитном поле кольцевого магнита, то в ней появляется ток, частота которого равна частоте колебаний подвижной системы вискозиметра, то есть в ней появляется ток резонансной частоты. С помощью усилительной схемы, питающейся от источника постоянного тока, повышается мощность колебаний этого тока. Усиленные колебания снова поступают в катушку вибратора, таким образом, автоматически поддерживаются резонансные колебания вискозиметра.

Для устранения передачи энергии колебаний от вискозиметра к опоре микровинтового подъемника вискозиметр устанавливали на амортизирующие пружины, состоящие из четырех пар спиральных пружин. Так как стабильность работы электродинамических датчиков зависит от постоянства температуры окру-

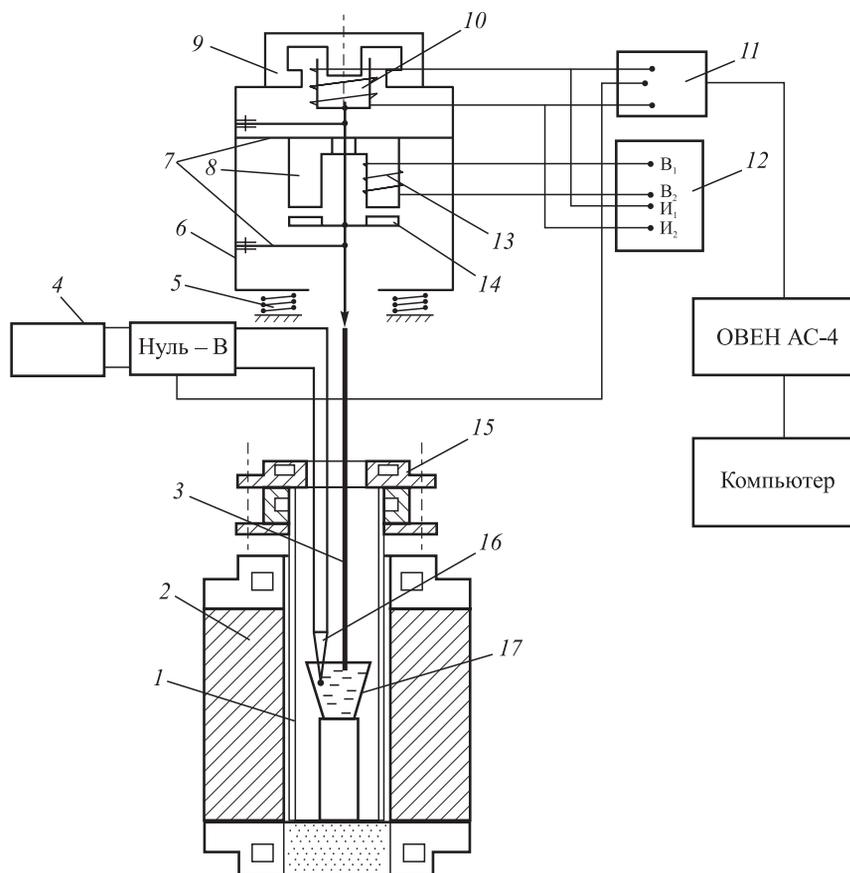
жающей среды, то вискозиметр экранировали от теплового излучения.

При измерении вязкости расплавов использовали зонд длиной 300 мм, изготовленный из вольфрамовой проволоки диаметром 1,5 мм. Зонд погружали в расплав флюса на глубину 10 мм. Погружение зонда в исследуемый расплав осуществляли при помощи микровинтового подъемника, на котором закреплен вискозиметр. Глубину погружения отсчитывали по шкале микровинтового подъемника, а начало отсчета (касание зондом расплава) фиксировали с помощью измерителя ТРМ-200 по падению сигнала относительно движения зонда на воздухе. Для измерения вязкости использовали цифровой мультиметр, включенный параллельно измерительной катушке: его показания пропорциональны амплитуде и частоте колебаний измерительной катушки. Регистрация сигналов температуры и выходного сигнала мультиметра происходила в автоматическом режиме при помощи измерителя двухканального ТРМ-200. Выходной сигнал измерителя имеет интерфейс RS-485. Через автоматический преобразователь интерфейсов USB/RS-485 ОВЕН АС-4 сигнал поступал на компьютер и записывался в виде таблиц Excel. Регистрацию сигналов вели непрерывно на протяжении всего эксперимента с интервалом 1 с.

Тарировку вискозиметра проводили по шлаку, содержащему 40 мас. % CaO, 40 мас. % SiO<sub>2</sub> и 20 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вязкость этого шлака при различных температурах известна [7]. Это позволило провести «горячую» тарировку на шлаках с заранее известной вязкостью. Полученные результаты нескольких тарировок были суммированы и наложены на один график зависимости вязкости от полученного с вискозиметра сигнала. Далее было подобрано уравнение, наиболее точно описывающее полученные результаты:

$$\eta = 2 \left( -6,263 + \frac{43,088}{\ln E} \right),$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  $E$  – ЭДС, регистрируемая измерителем, мВ.



**Рис. 2.** Принципиальная схема вискозиметра конструкции Штенгельмейера:

- 1 – чехол из  $Al_2O_3$ ; 2 – печь сопротивления; 3 – вибрирующая стержень, нижняя часть которого является зондом; 4 – мультиметр цифровой; 5 – амортизирующие пружины; 6 – корпус вискозиметра; 7 – плоские пружины; 8 – сердечник вибратора; 9 – кольцевой магнит; 10 – измерительная катушка; 11 – измеритель цифровой TRM-200; 12 – автогенератор; 13 – обмотка якоря; 14 – якорь вибратора; 15 – водоохлаждаемая крышка; 16 – W – WRe термопара; 17 – тигель с расплавом

**Fig. 2.** Schematic diagram of the Stengelmeyer viscometer:

- 1 –  $Al_2O_3$  case; 2 – resistance furnace; 3 – vibrating rod, the lower part of which is a probe; 4 – digital multimeter; 5 – shock-absorbing springs; 6 – viscometer housing; 7 – flat springs; 8 – vibrator core; 9 – annular magnet; 10 – measuring coil; 11 – digital TRM-200 meter; 12 – auto generator; 13 – armature winding; 14 – vibrator anchor; 15 – water-cooled lid; 16 – W – WRe thermo-steam; 17 – crucible with melt

Коэффициенты уравнения были определены при анализе более чем 20 точек, полученных при тарировке вискозиметра. Каждая точка получена усреднением 100 – 150 значений вязкости при изотермической выдержке и одновременном замере вязкости тарировочного шлака. Относительная ошибка при измерении вязкости составляла  $\pm 5\%$ .

Методика проведения экспериментов включала в себя:

- подготовку шлаковой смеси, при этом объем подготовленной смеси должен был обеспечивать образование слоя жидкого шлака толщиной не менее 26 мм для тигля диаметром 10 мм и глубиной 30 – 40 мм;

- загрузку полученной смеси в молибденовый тигель, установку тигля в высокотемпературную нагревательную печь, нагрев до температуры порядка  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , скорость нагрева около  $9\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ , инертная атмосфера обеспечивалась подачей аргона в рабочий объем печи снизу;

- опускание вибрационной головки вискозиметра, касание вольфрамовым зондом поверхности шлака и заглубление с помощью микровинта на глубину 10 мм;

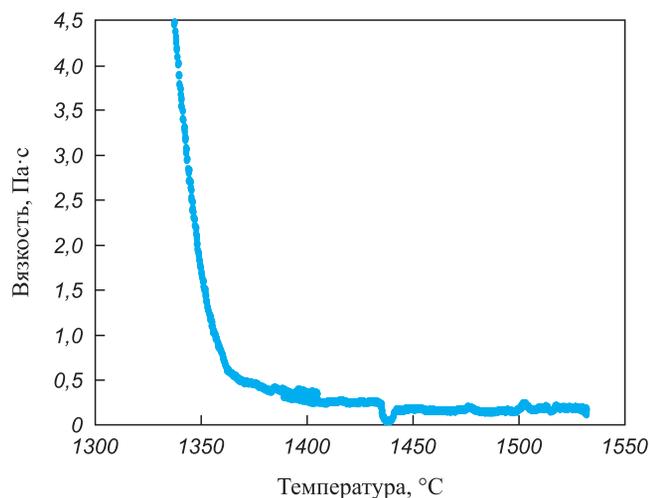
- выдержку с замером вязкости при заданной температуре в течение 5 мин, запись данных по вязкости и температуре шлака происходила в автоматическом режиме на компьютер с интервалом 1 с;

- постепенное охлаждение расплава со скоростью  $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ ; охлаждение продолжалось до затвердения расплава, в течение всего процесса шла непрерывная запись полученных данных;

- нагрев расплава до температуры расплавления для освобождения конца зонда из расплава.

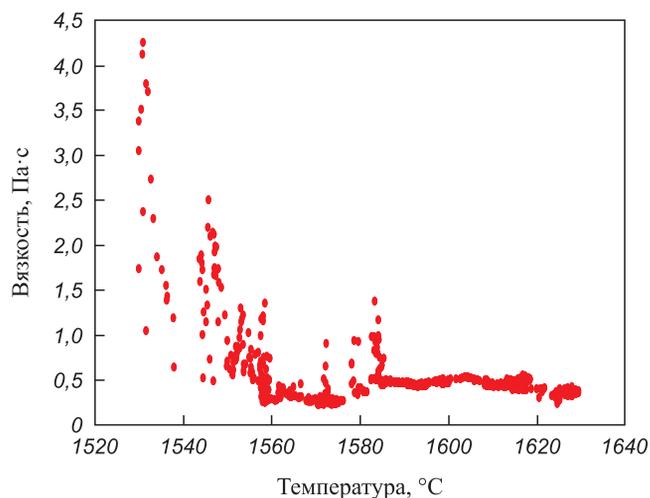
## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ОПЫТОВ

Были проведены замеры вязкости гомогенного и гетерогенного шлаков 4 и 5 (табл. 2). Данные по замерам вязкости представлены на рис. 3 и 4.



**Рис. 3.** Зависимость вязкости гомогенного шлака от температуры

**Fig. 3.** Dependence of viscosity of homogeneous slag on temperature



**Рис. 4.** Зависимость вязкости гетерогенного шлака от температуры

**Fig. 4.** Dependence of viscosity of heterogeneous slag on temperature

Представленные данные показывают следующее:

- непосредственный замер вязкости гетерогенных шлаков представляет некоторую проблему, так как в регистрируемый сигнал вносятся значительные помехи из-за взаимодействия зонда вискозиметра и твердых частиц шлака;

- при сравнительно близких параметрах химического состава гетерогенный шлак имеет повышенную вязкость за счет наличия твердых частиц в своем объеме;

- гетерогенный шлак имеет повышенную температуру кристаллизации, так как нерастворенные частицы могут выступать подложками в процессе кристаллизации жидкого шлака. Это выражается в более коротком интервале кристаллизации от начала заметного роста вязкости до затвердевания (порядка 20 – 30 °C для гетерогенного шлака и 60 °C для гомогенного).

Шлак, насыщенный оксидами MgO и CaO, обладает повышенной вязкостью. Температура затвердевания шлака на 200 °C выше, чем у гомогенного. Для проведения рафинировочных процессов необходимо наводить высокоосновной гомогенный шлак.

Из сопоставления данных, представленных на рис. 3 и 4, следует, что гетерогенный шлак обладает повышенной температурой плавления: для гомогенного шлака температура застывания составляет 1350 – 1370 °C, что соответствует теоретическим данным; температура плавления представленного гетерогенного шлака находится в интервале 1560 – 1590 °C. Дополнительно необходимо отметить, что при снижении температуры гетерогенного шлака образовывались укрупненные агломераты твердых оксидов, которые контактировали с измерительным зондом, при этом фиксировалась повышенная вязкость оксидной системы (интервал температур 1570 – 1590 °C).

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На участке КОС АО «ВМЗ» отобрано шесть проб шлаков; определено содержание твердой фазы оксидов CaO и MgO при температуре 1600 °C расчетным способом и по методике, представленной на рис. 1. Получены следующие результаты:

- шлак 4 не содержит твердой фазы, то есть он полностью гомогенный;

- шлак 5 содержит твердые фазы оксидов CaO и MgO;

- шлаки 1 – 3 и 6 содержат твердую фазу оксида CaO в количестве не более 10 %.

Лабораторные опыты подтвердили адекватность расчетного метода определения наличия твердой фазы в шлаках, формируемых в АКП, путем сравнения изменения вязкости при снижении температуры шлаков 4 и 5. Температура застывания гетерогенного шлака была на 200 °C выше при сравнительно схожем составе шлака. Отмечено, что при снижении температуры гетерогенного шлака образовывались укрупненные агломераты твердых оксидов, которые контактировали с измерительным зондом, повышая регистрируемую вязкость оксидной системы (интервал температур 1570 – 1590 °C).

## Выводы

С недавнего времени с целью повышения эффективности и экологической безопасности производства стали произошел полный отказ от применения флюорита, добавка которого кардинально решала задачу быстрого растворения извести и формирования жидкоподвижного рафинирующего шлака. Именно поэтому обеспечение оптимальных свойств шлака, формируе-

мого в АКП, является весьма актуальной задачей. Разработанный метод определения предела растворимости оксида СаО в рафинирующем шлаке позволяет осуществлять мониторинг и корректировку как текущей технологии ковшевого рафинирования стали, так и проектирования ее новых вариантов.

Методика определения наличия твердой фазы в шлаке, формируемом в агрегате ковш-печь, была подтверждена при проведении лабораторных опытов путем сравнения показателей вязкости шлака при снижении температуры. Установлено, что температура затвердевания гетерогенного шлака на 200 °С выше, чем гомогенного.

Расчетная и экспериментальная методики показали хорошую сходимость результатов, отмечается только разница в вязкостных характеристиках шлаков из-за наличия в них нерастворенных частиц. Это позволяет проводить предварительную оценку свойств формируемых на АКП шлаков расчетным путем, применяя экспериментальное исследование только для подтверждения комплекса расчетов по набору шлаков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бигеев А.М., Бигеев В.А. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали*. Магнитогорск: МГТУ; 2000:544.
2. Fandrich R., Lungen H.-B., Wuppermann C.-D. Actual review on secondary metallurgy. *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*. 2008;105(7–8):364–374. <https://doi.org/10.1051/metal:2008053>
3. Fandrich R., Luengen H.-B., Wuppermann C.-D. Secondary metallurgy – State of the art and research trends in Germany. *Stahl und Eisen*. 2008;128(2):45–53.
4. Cao Q., Pitts A., Nastac L. Numerical modelling of fluid flow and desulphurisation kinetics in an argon-stirred ladle furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018;45(3):280–287. <http://doi.org/10.1080/03019233.2016.1262574>
5. Shen C., Liping W., Junbo G., Yuanwang P., Fei H. Industrial investigation of decarburization and desulphurization behaviour of 120 t new single snorkel degasser. *Ironmaking and Steelmaking*. 2020;47(7):713–721. <http://doi.org/10.1080/03019233.2019.1580029>
6. Agapitov E.B., Lemeshko M.A., Sokolova M.S. Prospects for the use of hollow electrodes for deep desulfurization of steel in the ladle-furnace unit. *Materials Science Forum*. 2020;989:474–479. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.474>
7. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Development of LF-software for modeling of refining processes in a ladle-furnace. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1347:012066. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1347/1/012066>
8. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Савельев М.В., Шевченко О.И., Егиазарьян Д.К. К вопросу о десульфурации стали в агрегате «ковш-печь». В кн.: *Физико-химические основы металлургических процессов. Международная научная конференция имени академика А.М. Самарина*. Москва: ИМЕТ РАН; 2019:77.
9. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Савельев М.В., Шевченко О.И., Егиазарьян Д.К. Применение ионной теории для расчета сульфидной емкости шлаков. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2021;64(2):104–111. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-104-111>
10. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Savel'ev M.V., Shevchenko O.I., Egiazar'yan D.K. Application of ionic theory to calculate sulfide capacity of slags. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(2):104–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-104-111>
11. Savelyev M.V., Sheshukov O.Y., Egiazar'yan D.K., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Calculation of sulfur removal in ladle furnace unit by means of ionic theory of slags. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;966:012068. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012068>
12. Соммервиль И.Д. Измерение, прогноз и применение емкостей металлургических шлаков / Пер. с англ. В кн.: *Инжекционная металлургия' 86*. Москва: Металлургия; 1990:107–120.
13. Металлургия стали / В.И. Явойский, Ю.В. Кряковский, В.П. Григорьев, Ю.М. Нечкин, В.Ф. Кравченко, Д.И. Бородин. Москва: Металлургия; 1983:584.
14. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали / А.А. Метелкин, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, О.И. Шевченко. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ; 2015:144.
15. Поволоцкий Д.Я. Физико-химические основы процессов производства стали. Челябинск: изд. ЮУрГУ; 2006:183.
16. Socha L., Hudzieczek Z., Michalek K., Pilka V., Piegza Z. Verification of physical modelling of steel desulphurization in the plant conditions of the homogenization station. In: *METAL 2014– 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014:64–71.
17. Socha L., Bažan J., Gryc K., Morávka J., Styrnal P., Pilka V., Piegza Z. Optimisation of the slag mode in the ladle during the steel processing of secondary metallurgy. *Materiali in Tehnologije*. 2013;47(5):673–678.
18. Современная сталь: теория и технология: учебное пособие / О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, А.А. Метелкин, Е.Ю. Лозовая, О.И. Шевченко, М.В. Савельев. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ; 2020:400.
19. Новиков В.К., Невидимов В.Н. Полимерная природа расплавленных шлаков. Екатеринбург: изд. ВПО УГТУ – УПИ; 2006:62.
20. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеев, И.В. Некрасов и др. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ; 2015:144.
21. Штенгельмейер С.В. Электромагнитный вибрационный вискозиметр. *Заводская лаборатория*. 1964;(2):238–239. Shtengel'meier S.V. Electromagnetic vibration viscometer. *Zavodskaya laboratoriya*. 1964;(2):238–239. (In Russ.).

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Владимир Александрович Мurysev**, главный специалист Инженерно-технологического центра, АО «Выксунский металлургический завод»

**E-mail:** [murysev\\_va@vsw.ru](mailto:murysev_va@vsw.ru)

**Олег Юрьевич Шешуков**, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории Проблем техногенных образований, Институт металлургии Уральского отделения РАН

**E-mail:** [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru)

**Владимир Михайлович Сафонов**, д.т.н., профессор кафедры электрометаллургии, Выксунский филиал НИТУ «МИСИС»

**E-mail:** [wmsafonov@gmail.com](mailto:wmsafonov@gmail.com)

**Сергей Александрович Сомов**, начальник отдела Инженерно-технологического центра, АО «Выксунский металлургический завод»

**E-mail:** [somov\\_sa@vsw.ru](mailto:somov_sa@vsw.ru)

**Анатолий Алексеевич Метелкин**, к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**E-mail:** [anatoliy82@list.ru](mailto:anatoliy82@list.ru)

**Денис Константинович Егiazарьян**, к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий, Уральский Федеральнй Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, заведующий лабораторией Проблем техногенных образований, старший научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН

**ORCID:** 0000-0002-9833-7191

**E-mail:** [avari@mail.ru](mailto:avari@mail.ru)

**Vladimir A. Murysev**, Chief Specialist of the Engineering and Technology Center, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”

**E-mail:** [murysev\\_va@vsw.ru](mailto:murysev_va@vsw.ru)

**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Chief Researcher of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru)

**Vladimir M. Safonov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Electrometallurgy, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

**E-mail:** [wmsafonov@gmail.com](mailto:wmsafonov@gmail.com)

**Sergei A. Somov**, Head of the Department of the Engineering and Technology Center, JSC “Vyksa Metallurgical Plant”

**E-mail:** [somov\\_sa@vsw.ru](mailto:somov_sa@vsw.ru)

**Anatolii A. Metelkin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

**E-mail:** [anatoliy82@list.ru](mailto:anatoliy82@list.ru)

**Denis K. Egiazar'yan**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after The First President of Russia B.N. Yeltsin; Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**ORCID:** 0000-0002-9833-7191

**E-mail:** [avari@mail.ru](mailto:avari@mail.ru)

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**V. A. Murysev** – отбор промышленных шлаков, анализ лабораторных испытаний, написание статьи.

**O. Yu. Sheshukov** – постановка задачи исследований, редактирование статьи.

**V. M. Safonov** – постановка задачи исследований, редактирование статьи.

**S. A. Somov** – отбор промышленных шлаков, анализ лабораторных испытаний.

**A. A. Metelkin** – обобщение результатов лабораторных и промышленных испытаний, написание статьи.

**D. K. Egiazar'yan** – проведение лабораторных испытаний, обсуждение полученных результатов, написание статьи.

**V. A. Murysev** – selection of industrial slags, analysis of laboratory tests, writing the text.

**O. Yu. Sheshukov** – formulation of the research problem, editing the text.

**V. M. Safonov** – formulation of the research problem, editing the text.

**S. A. Somov** – selection of industrial slags, analysis of laboratory tests.

**A. A. Metelkin** – summarising the results of laboratory and industrial tests, writing the text.

**D. K. Egiazar'yan** – carrying out laboratory tests, discussion of the results, writing the text.

Поступила в редакцию 08.11.2023

После доработки 19.02.2024

Принята к публикации 20.02.2024

Received 08.11.2023

Revised 19.02.2024

Accepted 20.02.2024