



УДК 669.18

Поступила 20.05.2017

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕСУЛЬФУРАЦИИ МЕТАЛЛА В КОНВЕРТЕРНОМ ЦЕХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТОВ

### OPTIMIZATION OF DESULFURIZATION OF METALL IN CONVERTER SHOP USING DIFFERENT REAGENTS

*В. С. БОГУШЕВСКИЙ, М. В. КАЛЕНЧУК, Национальный технический университет Украины  
«КПИ им. Сикорского», г. Киев, Украина, пр. Победы, 37. E-mail: marina.gor2013@gmail.com*

*V. S. BOGUSHEVSKY, M. V. KALENCHUK, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv  
Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine, 37, Pobedy ave. E-mail: marina.gor2013@gmail.com*

*Разработаны математические модели зависимости расхода различных материалов для удаления серы из металла в конвертерном цехе. Установлены ограничения и возмущения, которые влияют на себестоимость процесса десульфурации.*

*The mathematical models for dependency of consumption various materials for the removal of sulfur from the metal in the converter shop are developed. The restrictions and disturbances that affect the cost of the desulfurization process were found.*

**Ключевые слова.** Конвертер, сера, математическая модель, твердая шлакообразующая смесь.

**Keywords.** Converter, sulfur, mathematical model, solid mould powder.

#### Введение

В последнее десятилетие перед производством стали остро встают вопросы, диктуемые рынком металлопродукции. Возросла потребность в металле с содержанием серы 0,01–0,005% и ниже, что обусловлено резким повышением требований к качеству ряда широко применяемых марок сталей [1] и необходимостью устранения анизотропии металла, и стремлением к повышению ударной вязкости сталей, эксплуатируемых при низких температурах. В современных экономических условиях важной задачей является получение металла со снижением энергетических и материальных затрат на производство.

Одной из проблем в связи с этим является создание эффективной и экономичной технологии десульфурации металла на всех этапах его производства в конвертерном цехе. Основной задачей, решаемой с помощью процесса десульфурации, является повышение качества стали и обеспечения технологических возможностей для получения ответственных марок стали со сверхнизким содержанием серы [2].

Использование известных математических моделей процесса десульфурации не обеспечивает оптимального использования материальных ресурсов, приводит к значительным отклонениям исходных параметров. Проблема управления процессом десульфурации металла в существующих работах решена частично. Недостаток известных способов – управление процессом десульфурации только на отдельном агрегате, что не позволяет минимизировать расходы на десульфурацию металла в целом в конвертерном цехе и, как следствие, минимизировать себестоимость производимого металла.

Совершенствование технологических расчетов при рафинировании жидкого металла от вредных примесей, включая удаление серы из чугуна и стали, является важной задачей. Все это подтверждает актуальность решения проблемы получения математической модели процесса удаления серы из металла с целью оптимизации стоимости десульфурации.

Цель настоящей работы – оптимизация себестоимости процесса десульфурации металла в конвертерном цехе на участках внедоменной десульфурации, сталеплавильного агрегата и внепечной обработки стали.

## Результаты исследований

Оптимизируемая целевая функция включает рассчитанные на единицу массы годной стали составляющие ее себестоимости от затрат на производство, являющейся линейной зависимостью от начальных условий и управляющих действий:

$$I = (\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) / (\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i),$$

где  $I$  – функционал удельной себестоимости стали  $C_y$ , грн/т;  $x_i$  – параметры начальных условий и управляющих действий;  $\alpha_0$  – свободный член, который включает общезаводские расходы, не зависящие от управляющих воздействий, грн.;  $\alpha_i, \beta_0, \beta_i$  – коэффициенты;  $n$  – количество учтенных параметров.

Задача оптимизации заключается в нахождении значений управляющих воздействий, обуславливающих  $I = C_y(x_i) \rightarrow \min$  при ограничениях и граничных условиях, учитывающих технологические особенности всех процессов десульфурации, имеющих место при полном цикле производства стали в конвертерном цехе.

Для решения задачи оптимального управления необходимо получить математическое выражение целевой функции в явном виде. Для этого параметры  $x_i$  разбиваем на три группы. В первую включаем управляющие воздействия, представляющие собой расходуемые на плавку материалы. Значения коэффициентов при них  $\alpha_i$  представляют собой цену материалов и энергоресурсов. Во вторую группу входят возмущения – начальные и конечные условия процесса, а значения коэффициентов при них представляют собой влияние возмущений на удельную себестоимость металла. В третью группу включаются управляющие параметры процесса с соответствующими весовыми влияниями на удельную себестоимость металла.

Для выплавки в конвертерах низкосернистых сталей [3] содержание серы в чугуна должно быть не более 0,010–0,015%, а для выплавки особо низкосернистых – не должно превышать 0,005%. Вместе с тем, доменные цеха не всегда в состоянии обеспечить стабильное получение качественного чугуна при одновременном сохранении достаточно высокой производительности и экономичности процесса. Поэтому все более широкое применение для повышения качества передельного чугуна получает внепечное рафинирование, которое обеспечивает выплавку высококачественных сталей с содержанием серы менее 0,01%.

Существует большое количество различных технологий внепечной десульфурации жидкого чугуна. Результаты исследований [4] и опыт внепечной обработки чугуна свидетельствует, что наиболее эффективным реагентом для десульфурации металла в промышленном производстве является магний.

Эффективному использованию магния для десульфурации чугуна способствуют уменьшение размеров пузырьков паров магния и рассредоточение их по всей ванне; увеличение общей площади поверхности всплывающих пузырьков пара, отнесенной к единице расхода магния, а также увеличение длительности реакции путем введения магния как можно глубже в ванну [5].

При низких значениях конечного содержания серы растущая растворимость магния уменьшает степень использования магния, при этом вероятность встречи в чугуне магния с серой уменьшается. Итак, для удаления последних тысячных долей процента серы нужен повышенный расход магния. При повышении температуры чугуна также наблюдается перерасход магния на десульфурацию, поэтому растет давление паров магния и его растворимость в металле.

Поэтому очень важно провести предварительный расчет целесообразности использования магнийсодержащих реагентов для получения заданного содержания серы. На рис.1 показаны эмпирические зависимости между остаточным содержанием серы в чугуне, начальной ее концентрацией и удельным расходом магния [2].

Как видно из рисунка, независимо от начального содержания серы эмпирические кривые являются экспонентами и при низких содержаниях серы (ниже 0,01%) дальнейшее увеличение расхода магния является экономически нецелесообразным, поскольку не приводит к значительному снижению содержания серы в чугуне. Тогда возникает необходимость использования

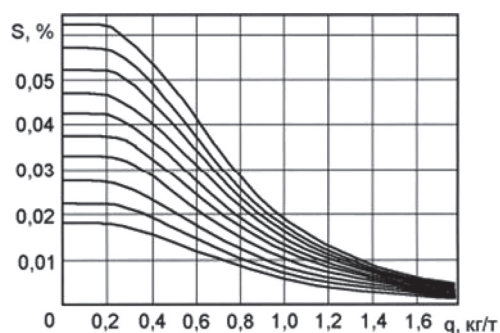


Рис. 1. Номограмма для определения расхода магния на десульфурацию чугуна магниевой смесью

других или дополнительных способов десульфурации, например, применение твердых шлакообразующих смесей или силикокальция.

Предлагается методика расчета необходимого количества магния для десульфурации чугуна, включающая следующие этапы. На первом этапе проводится компьютерный расчет расхода магния, позволяющий получить необходимые исходные данные для проведения продувки чугуна магнием. Исходными данными для расчета являются начальное и конечное содержание серы в металле, а также ограничения по пропускной способности фурмы с учетом ее конструкции и времени на обработку металла.

На втором этапе зависимости (рис. 1) скорректировали с учетом влияния температуры чугуна на расход магния.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных установлена зависимость степени использования магния для десульфурации чугуна от его температуры и содержания в нем серы в виде следующего уравнения множественной регрессии  $q$ , кг/т:

$$q = 0,6 + 42,25S_H - 56,29S_K - 152,49S_H S_K - 650,09S_H^2 + 1408,66S_K^2 + 4645,18S_H^3 - 13337,9S_K^3 + f(t), \quad (2)$$

где  $q$  – расход магния на десульфурацию, кг/т;  $S_H$  – исходное содержание серы в чугуне, %;  $S_K$  – конечное содержание серы в чугуне, %;  $f(t)$  – функция, зависящая от температуры расплава, °С.

К управляющим параметрам процесса десульфурации чугуна магнием относится глубина погружения фурмы, влияющая на эффективность использования магния. При увеличении погружения фурмы расход магния на единицу удаленной серы уменьшается. Это объясняется удлинением пути пузырей паров магния в металле, а также повышением растворимости его паров в расплаве с увеличением ферростатического давления на выходе фурмы.

Влияние глубины погружения фурмы  $h_\phi$  на эффективность использования магния  $\beta$  можно описать математической зависимостью, полученной на основании исследований, представленных в [2]:

$$\beta = -2,175h_\phi + 6,405,$$

где  $\beta$  – эффективность использования магния, кг/кг;  $h_\phi$  – глубина погружения фурмы, м.

К ограничениям следует отнести глубину погружения фурмы в пределах, предусмотренных технологической инструкцией  $h_{\phi \min} \leq h_\phi \leq h_{\phi \max}$ , максимальную скорость подачи магния, не приводящую к выбросам чугуна, и продолжительность обработки чугуна.

Данные работы [6] показывают, что результаты, полученные в пределах точности промышленного эксперимента, не позволяют установить связь между степенью использования магния при десульфурации природно-легированного чугуна и содержания в нем кремния. Но в работе [7], посвященной научным аспектам десульфурации металла, показано, что в доменном процессе изменение содержания кремния в чугуне заметно влияет на содержание в нем серы: с уменьшением [Si] на 0,1% содержание серы увеличивается на 0,003%, что может быть представлено уравнением:

$$[S] = 0,058 - 0,033 [Si],$$

где [S], [Si] – соответственно содержание серы и кремния в чугуне, %.

На основе этих данных получены зависимости влияния содержания кремния в чугуне на расход магния при десульфурации магнией-доломитовой смесью. Из рис. 2 следует, что увеличение содержания кремния в чугуне приводит к росту расхода магния на десульфурацию при одинаковом количестве удаленной серы, т. е. содержание Si в чугуне можно отнести к возмущениям, которые будут влиять на удельную себестоимость стали.

При необходимости получения низких содержаний серы целесообразно перенести дальнейшее ее удаления на продувку в конвертере и внепечную обработку стали.

На показатели процесса десульфурации в кислородных конвертерах большое влияние оказывают шлаковый, ду-

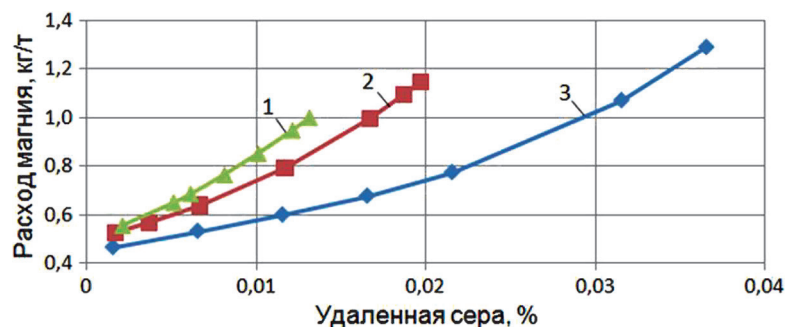


Рис. 2. Влияние содержания кремния в чугуне на расход магния при десульфурации магнией-доломитовой смесью: 1 – 1,3%; 2 – 1,1%; 3 – 0,5%

твовой и температурный режимы плавки [3]. Как показывает практика, в конвертере можно удалить не более 40% серы, попадающей в металл из шихтовых материалов. Так, определяющим фактором в процессе десульфурации является эффективная основность шлака. С увеличением основности увеличивается и степень десульфурации. Однако при увеличении основности выше 3,5, как правило, снижается вязкость шлака, а, следовательно, и его активность, т. е. ухудшаются кинетические условия перехода серы из металла в шлак и его серопоглощительная способность используется не полностью. Снижение вязкости шлака путем уменьшения его основности нерационально. Увеличение окисленности шлака изменением дутьевого режима или присадки железной руды также неэффективно, так как увеличивается окисленность металла и снижается его качество. Влияние содержания закиси железа в шлаке на действительный коэффициент распределения серы проявляется довольно сложно и обусловлено комплексным действием и изменением термодинамических и кинетических условий обессеривания [8]. Зависимость основности шлака от фактического коэффициента распределения серы имеет вид

$$B = \frac{\delta_S - 0,093}{1,063},$$

где  $B$  – основность шлака;  $\delta_S$  – коэффициент распределения серы.

Условия ведения конвертерной плавки – окислительные, в шлаке много оксидов железа, поэтому добиться в конвертере высокой степени десульфурации трудно. Однако определенная часть серы по ходу плавки удаляется частично в шлак, частично в газовую фазу [9].

К управляющим параметрам относятся положение фурмы, расход кислородного дутья, масса и время подачи сыпучих материалов. Повышение положения фурмы над уровнем спокойной ванны приводит к увеличению температуры металла (изменяется количество охлаждающих материалов), окисленности ванны (изменяется количество шлакообразующих извести, плавикового шпата), массовых долей марганца в металле и оксида магния в шлаке (изменяется количество раскислителей и огнеупоров). Аналогично влияет на себестоимость металла и изменение удельного расхода кислорода.

Для реализации процесса глубокой десульфурации металла в конвертерной плавке нужно использовать специальные шлаковые смеси, что требует значительных технико-экономических затрат в сталеплавильном производстве [7] или использование внепечной обработки стали разнообразными реагентами.

Для внепечной обработки стали с целью удаления серы часто применяют силикокальций. При использовании силикокальция увеличивается содержание кремния, поэтому при обработке стали с низким содержанием кремния его применять нецелесообразно. Кроме того, использование того или иного материала зависит от его дефицитности и стоимости. В промышленном производстве при выплавке металла с особыми требованиями по чистоте и пластическим свойствам, например, при выплавке стали для газонефтепроводных труб в северном исполнении используют в основном молотый силикокальций, который подают в потоке инертного газа. Расход порошкообразных материалов и продолжительность обработки зависят от начального и конечного содержания серы в готовой стали, материала футеровки ковша и используемого шлака, производительности пневмонасоса [10]. На рис. 3 приведена зависимость содержания серы в стали от расхода силикокальция при вдувании в ковш с шамотной футеровкой.

После обработки экспериментальных данных [10] статистическим методом с помощью ПЭВМ получили аналитическую формулу для расчета расхода силикокальция на десульфурацию стали  $q_{SiCa}$ , кг/т:

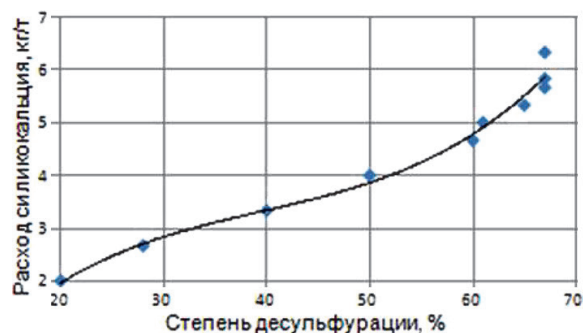


Рис. 3. Зависимость расхода силикокальция от степени десульфурации стали

$$q_{SiCa} = 6 \cdot 10^{-5} \eta_S^3 - 0,007 \eta_S^2 + 0,344 \eta_S - 2,399,$$

где  $\eta_S$  – степень десульфурации стали, %.

Как видно из рисунка, максимальная степень десульфурации составляет около 70%, дальнейшее увеличение расхода материала не будет приводить к оптимальному управлению процессом удаления серы.

Для дальнейшего повышения эффективности внепечной десульфурации стали путем обработки порошкообразными реагентами необходимо использование ковшей с основной футеровкой, создание более благоприятных условий для эмульгирования шлака и протекания



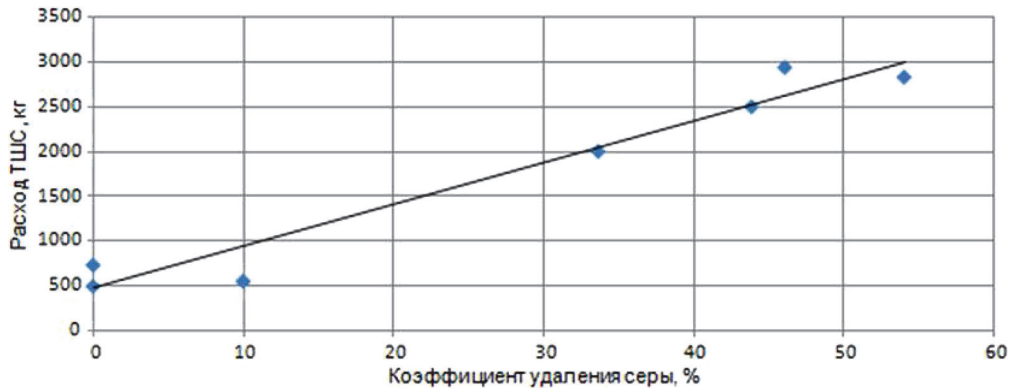


Рис. 4. Зависимость расхода ТШС на десульфурацию стали от коэффициента удаления серы

абсорбционных процессов, что связано с оптимизацией составов и режимов вдувания порошкообразных смесей на основе кальция.

Для десульфурации стали в современных условиях также широко применяется метод обработки стали твердыми шлакообразующими смесями (ТШС), который позволяет повысить качество металла и отказаться от дорогостоящей обработки стали синтетическим шлаком.

Обычно в состав таких смесей входят CaO и CaF<sub>2</sub>. Анализ диаграмм состояния систем CaO–CaF<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO–CaF<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> [11] показал, что для получения шлаков с температурой плавления не выше 1350 °С необходимо иметь в них не менее 15–20% CaF<sub>2</sub>.

Используя данные [12], получена зависимость коэффициента удаления серы от расхода ТШС на десульфурацию стали (рис. 4).

Аналитическая формула для расчета расхода ТШС на десульфурацию стали имеет вид  $q_{\text{ТШС}}$ , кг/т:

$$q_{\text{ТШС}} = 0,213\eta_S^2 + 36\eta_S + 506,3,$$

где  $\eta_S$  – степень десульфурации стали, %.

Обработка металла в ковше ТШС имеет два основных недостатка: малая (по современным требованиям к качеству металла) степень десульфурации и нестабильность получаемых при обработке результатов. К недостаткам данного способа обработки стали можно также отнести жесткие требования к качеству извести и плавикового шпата, необходимость дополнительного перегрева металла для формирования шлака, более высокие теплотери стали (до 50 °С) в процессе выпуска, транспортировки и разлива на МНЛЗ. Более высокие потери тепла связаны не только с затратами на формирование шлака, но и с теплоизлучением из-за малой толщины шлака в ковше.

С целью снижения тепловых потерь при десульфурации стали ТШС нужно использовать ограничение, связанное с охлаждающей способностью реагента:

$$1580\text{ °С} \leq t_{\text{Ме}} - 100 \frac{m_{\text{ТШС}}}{(m_{\text{ч}} + m_{\text{л}}) \cdot 0,9} 24\text{ °С} \leq 1650\text{ °С},$$

где  $t_{\text{Ме}}$  – температура металла, °С;  $m_{\text{ТШС}}$  – масса ТШС, необходимая для десульфурации стали, т;  $m_{\text{ч}}$  – масса чугуна на плавку, т;  $m_{\text{л}}$  – масса стального лома на плавку.

С учетом полученных зависимостей, ограничений, управляющих воздействий процессов и возмущений можно записать функцию в обобщенном виде:

$$I = f_1(x, y) + f_2(z) + f_3(w) + f_4(w) + f_5(h) + f_6(p),$$

где  $f_1(x, y)$  – функция для расчета расхода магния, зависящая от начального и конечного содержания серы в металле;  $f_2(z)$  – функция, зависящая от основности шлака в конвертере;  $f_3(w)$ ,  $f_4(w)$  – функции для расчета расхода силикокальция и ТШС, зависящие от степени десульфурации стали;  $f_5(h)$  – функция, учитывающая влияние глубины погружения фурмы на степень десульфурации;  $f_6(p)$  – функция, которая учитывает влияние высоты фурмы при продувке в конвертере и интенсивности дутья на степень десульфурации стали.

Оптимальные значения управляющих параметров определяли методом наискорейшего спуска на ПЭВМ.

## Выводы

За последние годы наблюдается тенденция к снижению себестоимости стали, что является следствием освоения проектной мощности агрегатов, дальнейшего совершенствования технологического процесса, повышения стойкости футеровки конвертеров, применения средств механизации и автоматизации технологических процессов.

Для снижения содержания серы в чугуне широко используют магний и магнийсодержащие реагенты. С увеличением расхода магния на удаление серы при низком ее содержании эффективность его использования уменьшается и при определенных значениях становится нецелесообразной. На эффективность десульфурации передельного чугуна также влияет его температура, чем ниже температура жидкого чугуна, тем лучше идет удаление серы из металла. Получены зависимости влияния содержания кремния в чугуне на определения расхода магния при десульфурации чугуна. Установлено, что увеличение содержания кремния в чугуне приводит к росту расхода магния при одинаковом количестве удаленной серы, т. е. содержание Si в чугуне можно отнести к возмущениям, которые будут влиять на удельную себестоимость стали. Получены зависимости для определения расхода материалов для проведения десульфурации на разных участках конвертерного цеха с учетом ограничений, влияющих на эффективность и себестоимость процесса.

## Литература

1. Дюдкин Д. А. Преимущества десульфурации чугуна лигатурами системы Fe-Si-Mg / Д. А. Дюдкин, А. М. Зборщик, В. П. Онищук и др. // Сталь. 1999. № 4. С. 26–28.
2. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием / Н. А. Воронова. М.: Metallurgia, 1980. 240 с.
3. Борнацкий И. И. Десульфурация металла / И. И. Борнацкий. М.: Metallurgia, 1970. 320 с.
4. Вергун А. С. Механизм процесса десульфурации чугуна магнием / А. С. Вергун // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 3. С. 19–22.
5. Москвитин В. И. Metallurgia легких металлов / В. И. Москвитин, И. В. Николаев, Б. А. Фомин. М.: МИСиС, 2005. 416 с.
6. Зборщик А. М. Порошковая проволока для глубокой десульфурации чугуна магниевыми реагентами / А. М. Зборщик, В. В. Кисленко, С. Н. Маринцев // Черная metallurgia. Бюллетень научно-технической информации. 2000. № 3–4 (1203–1204). С. 36–38.
7. Югов П. И. Научные аспекты десульфурации металла / П. И. Югов // Metallurg. 1997. № 1. С. 26–29.
8. Бигеев А. М. Metallurgia стали: Учеб. для вузов / А. М. Бигеев. М.: Metallurgia, 1988. 480 с.
9. Turkdogan E. T. Slag composition variations causing variations in steel dephosphorisation and desulphurisation in oxygen steelmaking / E. T. Turkdogan // ISIJ International. 2000. Vol. 40. P. 827–832.
10. Внепечная обработка расплавов. Методические указания по изучению дисциплины. Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. 41 с.
11. Атлас шлаков. Справ. изд. / Пер. с нем. М.: Metallurgia, 1985. 208 с.
12. Чумаков С. М., Зинченко С. Д. Комплексная технология получения низкосернистой стали в ККЦ ОАО «Северсталь» // Тр. 5-го Конгресса сталеплавильщиков. М., 14–17 октября 1998. М., 1999.

## References

1. Djudkin D. A., Zborshhik A. M., Onishhuk V. P. et al. Preimushhestva desul'furacii chuguna ligaturami sistemy Fe-Si-Mg [Advantages of desulphurization of cast iron by ligatures of the Fe-Si-Mg system]. *Stal' – Steel*, 1999, no. 4, pp. 26–28.
2. Voronova N. A. *Desul'furacija chuguna magniem* [Desulfurization of cast iron by magnesium]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980, 240 p.
3. Bornackij I. I. *Desul'furacija metalla* [Desulphurization of metal]. Moscow, Metallurgija Publ., 1970, 320 p.
4. Vergun A. S. *Mehanizm processa desul'furacii chuguna magniem* [Mechanism of the process of desulphurization of cast iron by magnesium]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' = Metallurgical and mining industry*, 2000, no. 3, pp. 19–22.
5. Moskvitin V. I., Nikolaev I. V., Fomin B. A. *Metallurgija legkih metallov* [Metallurgy of light metals]. Moscow, MISIS Publ., 2005, 416 p.
6. Zborshhik A. M., Kisenko V. V., Marincev S. N. *Poroshkovaja provoloka dlja glubokoj desul'furacii chuguna magnievyimi reagentami* [Powder wire for deep desulfurization of cast iron with magnesium reagent]. *Chernaja metallurgija. Bjulleten' nauchno-tehnicheskoi informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific and technical information*, 2000, no. 3–4 (1203–1204), pp. 36–38.
7. Jugov P. I. *Nauchnye aspekty desul'furacii metalla* [Scientific aspects of metal desulfurization]. *Metallurg = Metallurgist*, 1997, no. 1, pp. 26–29.
8. Bigeev A. M. *Metallurgija stali: Uchebnik dlja vuzov* [Metallurgy of Steel: A Textbook for Higher Schools]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988, 480 p.
9. Turkdogan E. T. *Slag composition variations causing variations in steel dephosphorisation and desulphurisation in oxygen steelmaking*. *ISIJ International*, 2000, vol. 40, pp. 827–832.
10. *Vnepchnaja obrabotka rasplavov. Metodicheskie ukazanija po izucheniju discipliny* [Ladle treatment of melts. Methodical instructions for the study of discipline]. Editor P. O. Bykov. Pavlodar: S. Toraihyrov Pavlodar State University, 2006, 41 p.
11. *Atlas shlakov. Sprav. izd.* [Atlas slag. Reference book]. Moscow, Metallurgija Pub., 1985, 208 p.
12. Chumakov S. M., Zinchenko S. D. *Kompleksnaja tehnologija poluchenija nizkosernistoj stali v KKC ОАО «Severstal'»* [Complex technology for obtaining low-sulfur steel in the KCTS of ОАО «Severstal'»]. *Proceedings of the 5th Congress of Steel-smelters*. Moscow, 14–17 oktober 1998, Moscow, 1999.