УДК 669.184:669.018.298.3

П.А. Плохих¹, канд. техн. наук, доцент**Ю.В. Хавалиц¹**, мастер производственного обучения, e-mail: uliya1981havalic@gmail.com**П.А. Плохих²**, мастер кислородно-конвертерного цеха (ККЦ)**А.А. Плохих¹**, магистр, e-mail: plokhikh1998@gmail.com¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» (Мариуполь, Украина)²ЧАО «МК «Азовсталь»» (Мариуполь, Украина)

Эффективность десульфурации при применении различных вариантов внепечной обработки стали

Целью статьи является изучение кинетики процесса десульфурации стали в сталеразливочных ковшах за время выпуска стали из сталеплавильного агрегата и за все время пребывания ее в ковше при рафинировании жидкими известково-глиноземистыми шлаками ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$) либо твердыми шлакообразующими смесями на основе извести (CaO) – ТШС. Известно, что успешная десульфурация зависит от химического состава шлака, времени его формирования в ковше, окисленности металла, условий перемешивания стали в ковше, дополнительных технологических операций, ковшевой обработки. Для изучения кинетики процесса десульфурации были проведены промышленные исследования в кислородно-конвертерном цехе МК «Азовсталь» при выплавке стали 17Г1СУ в 350-тонных конвертерах по различным вариантам обработки металла в сталеразливочных ковшах.

Всего было проведено 1456 плавов, из которых 460 – при обработке синтетическим шлаком (СШ), 271 – при обработке твердой шлакообразующей смесью (ТШС), 630 – при использовании совместно и СШ и ТШС и 94 – без обработки СШ и ТШС. При обработке стали в ковше использовали СШ состава, %: CaO – 47-52; Al_2O_3 – 32-39, SiO_2 – 3-7, MgO – 10-14, $\text{MnO} + \text{FeO}$ до 1,5, TiO_2 – 4-6, S – до 0,035 и твердую шлакообразующую смесь (фракции до 5 мм), состоящую из 76–78 % извести, содержащей до 0,05 % серы, и 22–24 % плавикового шпата – до 0,1 % серы.

Математическая обработка опытных и сравнительных плавов, произведенная методом множественной корреляции, выявила влияние каждого из факторов конвертерного процесса (основность шлака B , удельный расход извести $q_{\text{изв}}$ и плавикового шпата $q_{\text{п.ш.}}$, температуры чугуна), а также основности конвертерного шлака, попадающего в ковш при сливе металла из конвертера, содержания в нем серы $[(S)_{\text{ш}}]$, удельного расхода СШ и ТШС на содержание серы в готовом металле, которое описывается соответствующими уравнениями и характеризуется определенными графическими зависимостями.

Сравнительный анализ эффективности десульфурации различных вариантов в сопоставлении с вариантом, когда металл ничем не обрабатывался, показал, что количество удаленной из металла серы при обработке его твердой шлакообразующей смесью, синтетическим шлаком, совместно шлаком и смесью возросло в 1,36; 2,1 и 2,46 раза соответственно.

Методом корреляционного анализа выявлено, что удельное количество удаленной серы при применении твердой шлакообразующей смеси в 14 раз выше, чем при применении синтетического шлака (при их раздельном применении).

Ключевые слова: рафинирование, десульфурация, известково-глиноземистый синтетический шлак (СШ), твердая шлакообразующая смесь (ТШС), ковш, корреляционный анализ.

Рафинирование металла от серы при производстве качественных сталей – одна из основных задач металлургической технологии. Для определения влияния серы, содержащейся в металлах, на свойства металлопродукции, выполнено достаточно много исследований, в результате проведения которых были разработаны различные методы удаления серы. Исследованиями установлено, что термодинамически более эффективно проводить десульфурацию металла не в сталеплавильных агрегатах, а методами внепечной обработки и желательно перед заливкой чугуна в конвертер. Удаление серы из металла – одна из наиболее важных технологических операций, перенесенная из сталеплавильного агрегата в сталеразливочный ковш.

Постановка проблемы. Для десульфурации конвертерных сталей применяют различные методы. Наиболее технологически и экономически обоснованными признаны способы рафинирования стали жидкими известково-глиноземистыми шлаками ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$) [1] или твердыми шлакообразующими смесями на основе извести (CaO) – ТШС [2].

Успешная десульфурация зависит от химического состава шлака, времени его формирования в ковше, окисленности металла, условий перемешивания стали в ковше, дополнительных технологических операций, ковшевой обработки металла.

Анализ последних публикаций. Проводя эксперименты по получению низкосернистых сталей, мно-

гие исследователи [3–7] указывают на значительное влияние активности кислорода в стали на процессы ее десульфурации. Понижение величины активности кислорода в стали достигаются путем ее раскисления, вакуумирования, обработкой синтетическими шлаками, вдуванием порошкообразных реагентов, продувкой аргоном и другими способами. При этом глубина раскисления по ходу обработки металла увеличивается, и в результате достигаются коэффициенты распределения серы между фазами, близкие к равновесным, для шлаков $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [3]. Имеются данные и других исследователей о приближении коэффициентов распределения серы к равновесным значениям для отдельных шлаковых частиц, образующихся в жидкой стали из продуктов раскисления, в основном оксидов, и расплавляемых частиц вводимых в сталь порошкообразных материалов. По данным ряда исследователей [8, 9], при обработке стали с целью рафинирования твердыми шлакообразующими смесями или синтетическими шлаками достигаемые коэффициенты распределения серы значительно ниже равновесных значений. Эффективность рафинирования при этом не превышает 12 %. Обычно это связано с повышенной окисленностью шлака, содержащего (FeO) и (MnO). По результатам теоретического анализа кинетики массообмена при десульфурации стали в сталеразливочном ковше [10, 11] лимитирующим звеном процесса десульфурации является диффузия серы в шлаковой фазе, но за время выпуска стали из сталеплавильного агрегата система металл – шлак приходит в равновесие, и результаты десульфурации определяются в основном окисленностью металла.

Цель работы. Исходя из вышеизложенного, авторы предприняли попытку дальнейшего изучения кинетики процесса десульфурации стали, для чего были проанализированы различные варианты внепечной обработки металла в ковше, в том числе обработка синтетическим шлаком (вариант 1) [1] и твердой шлакообразующей смесью (вариант 2) [2], а также использование одновременно обоих вариантов (вариант 3) [3].

Метод исследования. Для определения эффективности десульфурации по каждому из указанных вариантов провели еще и сравнительные плавки по обычной технологии, без использования синтетического шлака (СШ) и твердой шлакообразующей смеси (ТШС) (вариант 4).

Промышленные исследования проводили при выплавке стали 17Г1СУ в 350-т конвертерах ККЦ МК «Азовсталь».

Всего было проведено 1456 плавов, из которых 460 – по варианту 1, 271 – по варианту 2, 630 – по варианту 3 и 94 – по варианту 4. При обработке стали в ковше использовали СШ состава, %: CaO – 47-52; Al_2O_3 – 32-39, SiO_2 – 3-7, MgO – 10-14, MnO + FeO до 1,5, TiO_2 – 4-6, S – до 0,035 и твердую шлакообразующую смесь (фракции до 5 мм), состоящую из 76–78 % извести, содержащей до 0,05 % серы, и 22–24 % плавленого шпата – до 0,1 % серы.

Изложение основного материала. Математическую обработку опытных и сравнительных плавов

производили методом множественной корреляции [12]. Изучали влияние на концентрацию серы в металле при повалке конвертера $[S]_{\text{пов}}$ таких технологических факторов, как основность шлака B, средняя концентрация серы в металлошихте $[S]_{\text{ш}}$, удельный расход извести $q_{\text{изв}}$, кг/т, и плавленого шпата $q_{\text{п.ш.}}$, а также температуры чугуна, определяемой при сливе его из миксера в заливочный ковш. На концентрацию серы в готовой стали $[S]_{\text{г.с.}}$ изучали влияние $[S]_{\text{пов}}$, основности конвертерного шлака, попадающего в ковш при сливе металла из конвертера; содержания в нем серы $[(S)_{\text{ш}}]$; удельного расхода СШ и ТШС. При этом были получены уравнения регрессии для всех плавов:

$$[S]_{\text{пов}} = [S]_0 + K_B B, \quad (1)$$

$$[S]_{\text{пов}} = [S]_0 + K_{\text{ш}} S_{\text{ш}} + K_{\text{изв}} q_{\text{изв}} + K_{\text{п.ш.}} q_{\text{п.ш.}} + K_{\text{т.ч.}} t_{\text{ч.}} \quad (2)$$

и для каждого варианта плавов:

$$[S]_{\text{г.с.}} = [S]_0 + K_{\text{пов}} [S]_{\text{пов}} + K_B B + K_{\text{ш}} S_{\text{ш}} + K_{\text{с.ш.}} q_{\text{с.ш.}} + K_{\text{т.ш.с.}} q_{\text{т.ш.с.}} \quad (3)$$

Для выявления характера изменения $[S]_{\text{ч}}$, $[S]_{\text{ш}}$, $[S]_{\text{пов}}$ и $[S]_{\text{г.с.}}$ построили диаграмму (рисунок), данные которой показывают, что при $[S]_{\text{ч}} < 0,022$ % и $[S]_{\text{ш}} < 0,023$ % в период продувки конвертерной ванны протекает процесс ресульфурации металла. Чем ниже концентрация серы в чугуне и основность конечного конвертерного шлака, тем выше степень ее ресульфурации [13]. Более низкую концентрацию серы в готовом металле получили при совместной обработке стали в ковше СШ и ТШС.

Сравнивали эффективность десульфурации различных вариантов в сопоставлении с тем, когда не производили внепечную обработку. При этом установили, что в сравнительном варианте снижение концентрации серы в металле в период от начала раскисления до начала разливки составило:

Концентрации серы в чугуне (1), металлошихте (2), в металле в конце продувки конвертерной ванны (3) и готовой стали (4): 1 – плавки, проведенные с применением шлака и смеси; 2 – синтетического шлака; 3 – твердой шлакообразующей смеси; 4 – обычные плавки

$$\Delta[S]_{\text{пов}} = [S]_{\text{пов}} - [S]_{\text{г.с.}} = 0,0231 - 0,0184 = 0,0047 \%$$

При обработке металла в ковше твердой шлакообразующей смесью, синтетическим шлаком, совместно шлаком и смесью $\Delta[S]$ составило 0,0064, 0,0099 и 0,0114 %, что превысило эффективность десульфурации по сравнению с вариантом 4 в 1,36, 2,10, 2,46 раза соответственно.

При росте основности шлака с 2 до 4 на каждую ее единицу концентрация серы в металле на повалке конвертера снижается на 0,003 %. Так, при В, равном 2, 3 и 4, $[S]_{\text{пов}}$ составляет 0,028, 0,025 и 0,022 %.

Полученное уравнение регрессии $[S]_{\text{пов}} = 0,322[S]_{\text{ш}} - 0,083q_{\text{изв}} + 0,248q_{\text{п.ш.}} + 0,0054(S)_{\text{ш}} + 0,0000246t_{\text{ш}} - 0,0076$; $R = 0,449$; $F = 72,174$ показывает, что на $[S]_{\text{пов}}$ существенно влияют содержание серы в шихте и расход извести. Так, рост $[S]_{\text{ш}}$ на 0,003 % ведет к увеличению $[S]_{\text{пов}}$ на 0,001 %. При удельном расходе извести от 56 до 136 кг/т стали увеличение ее расхода на 10 кг/т (в указанных пределах) будет способствовать снижению концентрации серы в металле в конце продувки ванны кислородом на 0,0008 %.

Проведенные без обработки стали СШ и ТШС плавки показали (рисунок (4)), что при $[S]_{\text{ш}} = 0,0152$ % ($[S]_{\text{ш}} = 0,017$ %) получаем в ванне на повалке конвертера 0,0231 % серы, в готовой стали – 0,0183 %. Причем существенное влияние на $[S]_{\text{г.с.}}$ оказывает $[S]_{\text{пов}}$ (коэффициент регрессии $K[S]_{\text{пов}} = 0,51$, доля влияния фактора $d[S]_{\text{пов}} = 0,39$, коэффициент парной корреляции $r[S]_{\text{пов}} = 0,605$). Рост $[S]_{\text{пов}}$ на 0,002 % ведет к увеличению $[S]_{\text{г.с.}}$ на 0,001 %.

При обработке стали в ковше ТШС (рисунок (3)) и среднем содержании серы в чугуне, равном 0,0181 % ($[S]_{\text{ш}} = 0,02$ %), на повалке конвертера в металле имеем 0,0238 % серы, в готовой стали – 0,0174 %. Существенное влияние на $[S]_{\text{г.с.}}$ (оказывает $[S]_{\text{пов}}$ $r[S]_{\text{пов}} = 0,522$, $K[S]_{\text{пов}} = 0,455$, $d[S]_{\text{пов}} = 0,294$). Рост концентрации серы в металле в конце продувки конвертерной ванны на 0,002 % ведет к увеличению $[S]_{\text{г.с.}}$ примерно на 0,001 %. Использование ТШС в количестве 3,12 кг/т стали позволило уменьшить концентрацию серы в готовой стали на 0,001 %, то есть на 1 кг/т стали ТШС снижается концентрация серы в готовом металле на 0,00032 %.

Обработка стали в ковше СШ в количестве 8,80–30,14 кг/т стали (рисунок (2)) (средняя величина рав-

на 15,6) показала, что при $[S]_{\text{ш}} = 0,0195$ % и $[S]_{\text{ш}} = 0,021$ % на повалке концентрация серы в металле составила 0,0255, готовой стали – 0,0156 %. Рост $[S]_{\text{пов}}$ на 0,003 % приведет к увеличению $[S]_{\text{г.с.}}$ на 0,001 %, $r[S]_{\text{пов}} = 0,494$, $K[S]_{\text{пов}} = 0,329$, $d[S]_{\text{пов}} = 0,23$). Использование синтетического шлака позволило снизить концентрацию серы в готовом металле примерно на 0,00036 % ($\Delta[S]_{\text{г.с.}} = -0,023 - 0,016 = -0,0003588$ %), то есть практически незначительно и примерно в 3 раза меньше, чем при использовании ТШС. Это обусловлено, очевидно, тем, что при сливе стали из конвертера пока еще не отсекается конвертерный (окисленный) шлак, попадание которого в ковш даже в небольшом количестве значительно снижает эффективность применения СШ.

Серия плавов, проведенных с применением ТШС и использованием СШ, показала (рисунок (1)), что при $[S]_{\text{ш}} = 0,022$ %, $[S]_{\text{ш}} = 0,023$ % в металле на повалке конвертера получили 0,0257 % серы, в готовой стали – 0,0143 %. В значительной степени количество серы в готовой стали зависит от $[S]_{\text{пов}}$ ($r[S]_{\text{пов}} = 0,406$, $K[S]_{\text{пов}} = 0,286$, $d[S]_{\text{пов}} = 0,1673$).

Рост $[S]_{\text{пов}}$ на каждые 0,003 % приводит к увеличению $[S]_{\text{г.с.}}$ на 0,001 %. Применение ТШС в количестве 3,12 кг/т стали позволило уменьшить $[S]_{\text{г.с.}}$ на 0,0016 %, в то время как использование СШ в количестве 15,6 кг/т – на 0,0027 %. При этом расход СШ превысил расход ТШС в 4,87 раза.

Выводы

Сравнение эффективности десульфурации различных вариантов в сопоставлении с 4, когда не производили внепечную обработку, показало, что количество удаленной из металла серы при обработке его твердой шлакообразующей смесью, синтетическим шлаком, совместно шлаком и смесью возросло в 1,36, 2,1 % и 2,46 раза соответственно.

Методом корреляционного анализа выявлено, что удельное количество удаленной серы при применении твердой шлакообразующей смеси в 14 раз выше, чем при применении синтетического шлака (при их раздельном применении). При совместной же обработке ими стали в ковше этот показатель составил всего лишь около трех.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воинов С.Г. и др. Рафинирование стали синтетическими шлаками. М.: Металлургия, 1970. 463 с.
2. Пронский П.И. и др. Рафинирование котельной стали твердыми шлакообразующими смесями в ковшах большой емкости. Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1978. № 10. С. 30–31.
3. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. II. Основы и технология ковшевой металлургии: пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
4. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Производство стали в агрегатах «печь-ковш». Донецк: Юго-Восток, 2003. 300 с.

5. Туркдоган Е.Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах. Труды конф. «Инжекционная металлургия'86»: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1990. С. 10–44.
6. Вихлевщук В.А., Баптизмманский В.И., Поляков В.А. Эффективная технология производства низкосернистой стали. *Черная металлургия. Бюл. НТИ*. 1991. № 6. С. 54–55.
7. Nosočenko O.V., Melnik S.G., Poživanov M.A. Příprava konvertorové oceli k plynulé odlévání. Sborník X mezinárodní hutnické konference "Plynulé odlévání oceli". Třinec, říjen, 1989. S. 135–140.
8. Поживанов М.А., Семенченко П.М., Казаков С.В. Десульфурация металла в ковше активными шлаковыми смесями. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1991. № 4. С. 35–38.
9. Черевко В.П., Вихлевщук В.А., Лонской А.М. Анализ степени использования рафинирующей способности кусковых и порошкообразных смесей при различных методах ковшевой обработки. Труды IV Конгресса сталеплавильщиков. М.: ОАО Черметинформация, 1997. С. 261–264.
10. Охотский В.Б. Модель эмульгирования шлака и металла падающей струей. *Процессы литья*. 1999. № 3. С. 3–10.
11. Меджибожский М.Я. Некоторые вопросы внепечного рафинирования и десульфурации стали синтетическими шлаками. *Вопросы теории и практики сталеплавильного производства*. М.: ММИ, 1991. С. 148–154.
12. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М.: Гостехиздат, 1958. 388 с.
13. Конопля В.Г., Плохих П.А., Гулыга Д.В. О влиянии сернистого шлака на концентрацию серы в низкосернистой конвертерной стали. *Изв. АН СССР. Металлы*. 1980. № 6. С. 21–26.

Надійшла 10.02.2020

REFERENCES

1. Voinov, S.G. et al. (1970). Steel refining with synthetic slags. Moscow: Metallurgiya, 463 p. [in Russian].
2. Pronsky, P.I. et al. (1978). Refining of boiler steel with solid slag-forming mixtures in large-capacity ladles. *Ferrous metallurgy. Bull. NTI*, no. 10, pp. 30–31 [in Russian].
3. Knyuppel', G. (1984). Deoxidation and vacuum processing of steel. Part II. Fundamentals and technology of ladle metallurgy: transl. from German. Moscow: Metallurgiya, 414 p. [in Russian].
4. Dyudkin, D.A., Bat', S.Yu., Grinberg, S.E., Marintsev, S.N. (2003). Steel production in ladle furnace units. Donetsk: Yugo-Vostok, 300 p. [in Russian].
5. Turkdogan, E.T. (1990). Technological improvements in injection metallurgy and in the processes of metal refining in a ladle in the 80s. Transactions of Conf. "Injection metallurgy'86": transl. from English. Moscow: Metallurgiya, pp. 10–44 [in Russian].
6. Vikhlevschuk, V.A., Baptismanskiy, V.I., Polyakov, V.A. (1991). Effective technology for the production of low-sulfur steel. *Ferrous metallurgy. Bull. NTI*, no. 6, pp. 54–55 [in Russian].
7. Nosočenko, O.V., Melnik, S.G., Poživanov, M.A. (1989). Příprava konvertorové oceli k plynulé odlévání. Sborník X mezinárodní hutnické konference "Plynulé odlévání oceli". Třinec, říjen, S. 135–140 [in Czech].
8. Pozhivanov, M.A., Semenchenko, P.M., Kazakov, S.V. (1991). Desulfurization of metal in a ladle with active slag mixtures. *Metallurgical and mining industry*, no. 4, pp. 35–38 [in Russian].
9. Cherevko, V.P., Vikhlevschuk, V.A., Lonskoy, A.M. (1997). Analysis of the degree of use of the refining ability of lumpy and powder mixtures with various methods of ladle processing. Proceedings of the IV Congress of steelmakers. Moscow: OAO Chermetinformatiya, pp. 261–264 [in Russian].
10. Okhotsky, V.B. (1999). The model of emulsification of slag and metal falling spray. *Casting processes*, no. 3, pp. 3–10 [in Russian].
11. Medzhibozhsky, M.Ya. (1991). Some issues of out-of-furnace refining and desulfurization of steel by synthetic slags. *Questions of theory and practice of steelmaking*. Moscow: MMI, pp. 148–154 [in Russian].
12. Lukomsky, Ya.I. (1958). The theory of correlation and its application to the analysis of production. Moscow: Gostekhizdat, 388 p. [in Russian].
13. Konoplya, V.G., Plokhikh, P.A., Gulyga, D.V. (1980). About the influence of sulfur slag on sulfur concentration in low-sulfur converter steel. *Izv. USSR Academy of Sciences. Metals*, no. 6, pp. 21–26 [in Russian].

Received 10.02.2020

Анотація

П.А. Плохих¹, канд. техн. наук, доцент

Ю.В. Хавалиць¹, майстер виробничого навчання,

e-mail: uliya1981havalic@gmail.com

П.А. Плохих², майстер киснево-конвертерного цеху (ККЦ)

А.А. Плохих¹, магістр, e-mail: plokhikh1998@gmail.com

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (Маріуполь, Україна)

²ПАТ «МК «Азовсталь» (Маріуполь, Україна)

Ефективність десульфурзації при застосуванні різних варіантів позапічної обробки сталі

Метою статті є вивчення кінетики процесу десульфурзації сталі в сталерозливних ковшах за час випуску сталі з сталеплавильного агрегату і за весь час перебування її в ковші при рафінуванні рідкими вапняно-глиноземистими шлаками ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$) або твердими шлакоутворюючими сумішами на основі вапна (CaO) – ТШС. Відомо, що успішна десульфурізація залежить від хімічного складу шлаку, часу його формування в ковші, окислення металу, умов перемішування сталі в ковші, додаткових технологічних операцій, ковшової обробки. Для вивчення кінетики процесу десульфурзації були проведені промислові дослідження в киснево-конвертерному цеху МК «Азовсталь» при виплавці сталі 17Г1СУ в 350-тонних конвертерах за різними варіантами обробки металу в сталерозливних ковшах.

Всього було проведено 1456 плавов, з яких 460 – при обробці синтетичним шлаком (СШ), 271 – при обробці твердою шлакоутворюючою сумішшю (ТШС), 630 – при використанні спільно і СШ і ТШС і 94 – без обробки СШ і ТШС. При обробці сталі в ковші використовували СШ складу, %: CaO – 47-52; Al_2O_3 – 32-39, SiO_2 – 3-7, MgO – 10-14, $\text{MnO} + \text{FeO}$ до 1,5, TiO_2 – 4-6, S – до 0,035 і тверду шлакоутворюючу суміш (фракції до 5 мм), що складається з 76–78 % вапна, що містить до 0,05 % сірки, і 22–24 % плавикового шпату – до 0,1 % сірки.

Математична обробка дослідних і порівняльних плавов, вироблена методом множинної кореляції, виявила вплив кожного з факторів конвертерного процесу (основність шлаку B, питома витрата вапна $q_{\text{вап}}$ і плавикового шпату $q_{\text{п.ш.}}$, температури чавуну), а також основності конвертерного шлаку, що потрапляє в ківш при зливці металу з конвертера, вмісту в ньому сірки $[(S)_{\text{ш}}]$, питомої витрати СШ і ТШС на вміст сірки в готовому металі, яке описується відповідними рівняннями і характеризується певними графічними залежностями.

Порівняльний аналіз ефективності десульфурзації різних варіантів в зіставленні з варіантом, коли метал нічим не оброблявся, показав, що кількість вилученої з металу сірки при обробці його твердою шлакоутворюючою сумішшю, синтетичним шлаком, спільно шлаком і сумішшю зросла в 1,36; 2,1 і 2,46 рази відповідно.

Методом кореляційного аналізу виявлено, що питома кількість вилученої сірки при застосуванні твердої шлакоутворюючої суміші в 14 разів вище, ніж при застосуванні синтетичного шлаку (при їх роздільному застосуванні).

Ключові слова

Рафінування, десульфурізація, вапняно-глиноземистий синтетичний шлак (СШ), тверда шлакоутворююча суміш (ТШС), ківш, кореляційний аналіз.

Summary

P.A. Plokhikh¹, PhD (Engin.), Associate Professor

Yu.V. Khavalits¹, Industrial Training Master, e-mail: uliya1981havalic@gmail.com

P.A. Plokhikh², Master of the basic oxygen furnace shop (BOF)

A.A. Plokhikh¹, Master, e-mail: plokhikh1998@gmail.com

¹SHEI “Pryazovskyi State Technical University” (Mariupol, Ukraine)

²PJSC “Azovstal Iron and Steel Works” (Mariupol, Ukraine)

Efficiency of desulfurization in the application of different options for out-of-furnace treatment of steel

The purpose of the article is to study the kinetics of the process of desulfurization of steel in steel casting ladles during the release of steel from the steelmaking unit and during its stay in the ladle when refining liquid limestone-alumina slag ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$) or solid slag forming. It is known that successful desulfurization depends on the chemical composition of the slag, the time of its formation in the ladle, the oxidation of the metal, the conditions of mixing steel in the ladle, additional technological

operations, ladle processing. To study the kinetics of the process of desulfurization, industrial studies were carried out in the oxygen-converter shop of PJSC "Azovstal Iron and Steel Works" with the melting of 17Г1СУ steel in 350-ton converters for different metal processing options in steel casting ladles.

A total of 1456 smelts were carried out, of which 460 – when treated with synthetic slag (SS), 271 – when treated with solid slag-forming mixture (SSFM), 630 – when used together with SS and SSFM and 94 – without treatment of SS and SSFM. In the treatment of steel in the ladle there were used synthetic slag composition, %: CaO – 47-52; Al_2O_3 – 32-39, SiO_2 – 3-7, MgO – 10-14, MnO + FeO up to 1.5, TiO_2 – 4-6, S – up to 0.035 and solid slag-forming mixture (fractions up to 5 mm), consisting of 76–78 % lime containing up to 0.05 % sulfur and 22–24 % fluor-spar – up to 0.1 % sulfur.

Mathematical processing of experimental and comparative smelts produced by the method of multiple correlation revealed the influence of each of the factors of the converter process (the basicity of slag B , the specific consumption of lime q_{lime} and fluor-spar $q_{f.s.}$, cast iron temperature), as well as the basicity of converter slag falling into the ladle when draining metal from the converter, its sulfur content $[(S)_s]$, the specific flow rate of the SS and the SSFM on the sulfur content of the finished metal, which is described by the corresponding equations and is characterized by certain graphic dependencies.

Comparative analysis of the desulfurization efficiency of different options in comparison with the variant when the metal was not treated in any way, showed that the amount of sulfur recovered from the metal in the processing of its solid slag-forming mixture, synthetic slag, together slag and mixture increased in 1.36, 2.1 and 2.46 times, respectively.

The method of correlation analysis revealed that the specific amount of sulfur recovered when applying solid slag-forming mixture is 14 times higher than when using synthetic slag (with their separate application).

Keywords

Refining, desulfurization, aluminous calcareous synthetic slag (SS), solid slag-forming mixture (SSFM), ladle, correlation analysis.