



УДК 669.187.25:541.123

АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ЧУГУНА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Р. В. Синяков

Представлены оценки технологических аспектов использования жидкого чугуна в дуговой сталеплавильной печи вплоть до 80 % в составе шихты. С помощью программного комплекса «DesigningMelt» выполнено моделирование плавки с различным расходом кислорода и электроэнергии. Полученные результаты дали возможность выделить критерий, отражающий оптимальный режим применения жидкого чугуна в электропечи. В качестве такового предложено использовать отношение введенной электроэнергии к введенному кислороду на продувку металла за плавку или отношение средней мощности ввода электроэнергии к средней скорости ввода кислорода. Получена зависимость, связывающая оптимальную долю чугуна в шихте с критерием «оптимальности» работы печи.

Presented are the estimates of technological aspects of using the molten cast iron in arc steel-making furnace up to 80 % in the charge composition. Using the program complex «DesigningMelt», the modeling of melting with a different consumption of oxygen and electric power was made. The obtained results gave an opportunity to distinguish a criterion reflecting the optimum condition of application of the molten cast iron in the electric furnace. As such, it was suggested to use the ratio of supplied electric power to added oxygen for metal blowing per melting or ratio of mean power of supplied electric energy to mean rate of oxygen adding. Relation was obtained connecting the optimum share of cast iron in charge with a criterion of «optimality» of furnace operation.

Ключевые слова: ДСП; жидкий чугун; моделирование; технология

Значительное удорожание энергоресурсов, возрастающие требования к гибкости процесса, его экологичности, а также необходимость повышения производительности заставляют отечественные металлургические предприятия закрывать мартеновские цехи и переходить на альтернативные агрегаты, в частности дуговые сталеплавильные печи (ДСП), высвобождая при этом значительное количество жидкого чугуна. В таком случае появляется необходимость использования жидкого чугуна в качестве шихтовой составляющей в ДСП.

В начале века в мире насчитывалось около 30 ДСП, использующих жидкий чугун как составную часть шихты [1]. За последнее время интерес к данной технологии заметно вырос [2], что связано со снижением расхода электроэнергии за счет физического и химического тепла чугуна [3–6], с ускорением плавки [3, 5], уменьшением содержания остаточных элементов в конечном продукте [7].

Однако, как показали промышленные результаты выплавки стали в ДСП, применение жидкого чугуна не всегда способствует повышению производительности сталеплавильного агрегата. Согласно ис-

следованиям, выполненным в работах [1, 8, 9], зависимость количество жидкого чугуна–производительность носит экстремальный характер, а оптимум лежит в диапазоне 20... 32 % чугуна от массы шихты. Это связано с конструктивными особенностями агрегата и технологией выплавки стали в ДСП. В то же время появляются данные о более высокой доле использования чугуна в ДСП — до 50... 60 [5] и даже 80 % [10].

Таким образом, для повышения производительности ДСП необходимо определение оптимальной доли жидкого чугуна, которая по данным работы [8] зависит от производительности оборудования для вдувания кислорода и удаления технологических газов.

На данный момент не существует критерия, позволяющего предварительно без экспериментов на реальной печи оценить оптимальное количество жидкого чугуна в шихте для ДСП или оптимальные параметры работы ДСП для известной доли жидкого чугуна.

Требовалось оценить технологические аспекты использования жидкого чугуна в печи вплоть до 80 % в составе шихты и попытаться выделить критерий, связывающий технико-технологические воз-

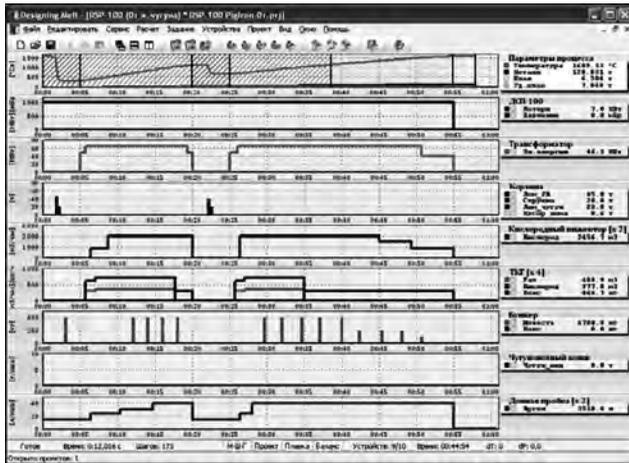


Рис. 1. Проект технологического процесса выплавки стали в 100-тонной ДСП (базовая плавка)

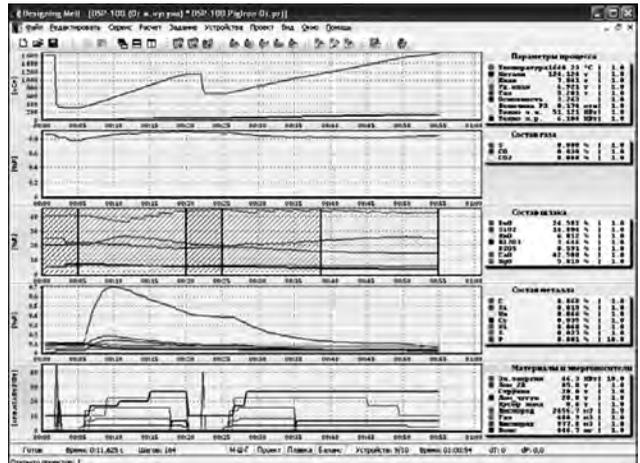


Рис. 2. Результаты моделирования технологического процесса базовой плавки

возможности ДСП и оптимальное количество жидкого чугуна в шихте.

Для решения поставленной задачи выбрали программный комплекс «DesigningMelt» [11] — инструмент, позволяющий разрабатывать новые технологические процессы, оценивать применение новых видов материалов и оборудования без проведения дорогостоящих и длительных экспериментов на реальной печи.

В качестве исследуемого технологического процесса выбрали выплавку стали в 100-тонной ДСП с эркерным выпуском полупродукта. Печь работает с жидким остатком металла 10 т и шлака 5 т со средней температурой 1600 °С. Оборудование печи состоит из трансформатора мощностью 80 МВ·А, двух кислородных инжекторов с максимальным расходом кислорода по 2000 м³/ч каждый, четырех газокислородных горелок с мощностью по 3,5 МВт каждая, четырех инжекторов для вдувания угля на вспенивание шлака, двух донных пробок для продувки ванны аргоном, бункеров, позволяющих вводить шлакообразующие материалы. Загрузка металлолома в печь осуществляется двумя корзинами: завалка и одна подвалка. Таким образом, структурно плавка состоит из шести периодов с учетом выпуска металла [11]. В данном проекте массу металлолома в корзинах приняли соответственно 65 и 60 т. Согласно условиям ведения плавки в ДСП, в завалку необходимо добавлять лом чугуна, а при его отсутствии эквивалентно заменять углеродсодержащими материалами (например, коксом). Обычно в завалку добавляют 15... 20 % чугунного лома, поэтому в первой корзине предусмотрели 25 т твердого чугуна.

Режимы ввода электроэнергии, кислорода, угля, шлакообразующих, работы горелок, а также моменты подвалки корзин принимали предлагаемые программным комплексом в соответствии с заданными техническими и технологическими ограничениями на работу оборудования (рис. 1).

После имитации (расчета проекта) получили технологический процесс с траекторией, представленной на рис. 2, и следующими параметрами на момент выпуска: [С] — 0,06 %, окисленность шлака

(FeO) — 24 %; основность шлака — 3,2; температура металла — 1640 °С.

Рассчитанную плавку приняли как базовую, а полученные параметры — как цель моделирования со следующими ограничениями: содержание углерода на выпуске составляет 0,059... 0,061 %; окисленность шлака (содержание оксида железа) — не более 25 %; основность шлака — не менее 2,9; температура металла на выпуске — 1639... 1641 °С. Массу металла на выпуске приняли равной 115 т.

Затем в проекте плавки к конструктивным особенностям ДСП добавили возможность заливать жидкий чугун, что осуществляется по трем основным вариантам [7, 12]: сверху при открытом своде из ковша, через рабочее окно печи посредством съемного желоба и через стационарный желоб, установленный на печи. В данной работе приняли заливку чугуна через стационарный желоб после частичного проплавления первой корзины.

Согласно работе [3], представленный вариант имеет недостатки в виде образования конгломератов при использовании последующих корзин с металлоломом. В данном исследовании этот недостаток отчасти нивелируется более ранним началом интенсивной продувки ванны кислородом. Средняя скорость заливки чугуна в печь колеблется от 2 [4] до 10 [1] т/ч, в текущем процессе скорость заливки чугуна приняли равной 5 т/ч.

Применяемые в сталеплавильном производстве чугуны различаются главным образом по химическому составу [13, 14], в данном исследовании содержание углерода в жидком чугуне равнялось 4,6, кремния — 0,5, марганца — 0,7 %, температура — 1300 °С. При моделировании твердую часть шихты заменяли жидким чугуном в следующей последовательности: сначала чугунный лом завалки, затем металлолом подвалки и при исчезновении подвалки — металлолом завалки.

Моделирование выплавки стали в ДСП выполняли по трем вариантам для разных максимальных расходов кислорода (2000, 2500 и 3000 м³/ч на каждый) через кислородные инжекторы и с применением до 80 % жидкого чугуна в составе шихты.

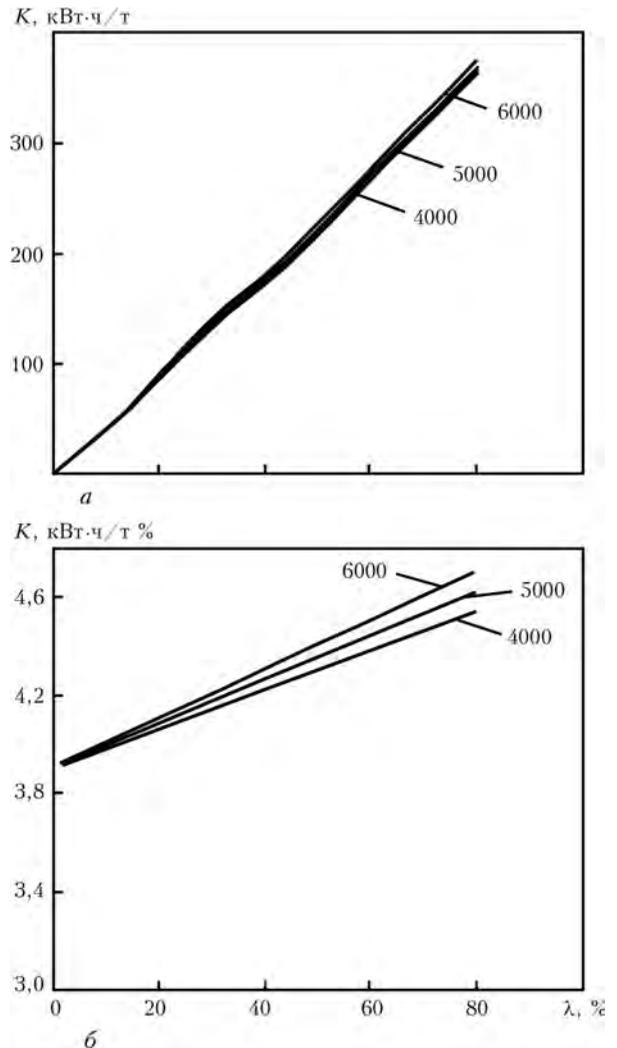
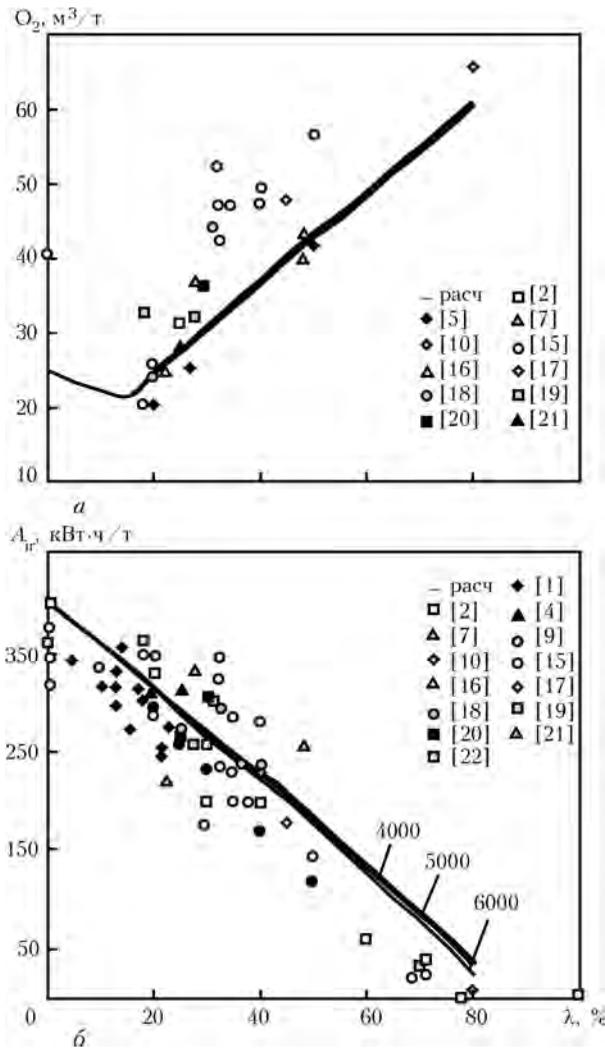


Рис. 3. Расход электроэнергии A и кислорода на тонну металла в зависимости от доли жидкого чугуна в шихте. Цифры у кривых (здесь и на рис. 4, 6) обозначают максимальную суммарную интенсивность продувки металла кислородом

Рис. 4. Влияние количества жидкого чугуна на экономию электроэнергии K : a — абсолютное значение; b — процент чугуна

Сравнительный анализ результатов моделирования с существующими промышленными показателями работы ДСП, в которых применяют в качестве шихты жидкий чугун, показал адекватность моделей, используемых в программном комплексе «DesigningMelt». С увеличением количества жидкого чугуна в шихте расход электроэнергии снижается, кислорода на продувку металла — растет (рис. 3). В результате экономия электроэнергии уже при 20 % жидкого чугуна в составе шихты составляет около 90 кВт·ч/т (рис. 4, a). Поскольку в данном исследовании заменяли твердый чугун, соответственно отсутствует дополнительный приход энергии с химическим теплом чугуна. При замене металлолома экономический эффект будет еще выше и по расчетам, приведенным в работе [6], составит 116 кВт·ч/т.

По данным разных авторов, при включении 1 % жидкого чугуна в шихту экономия электроэнергии составляет от 3,3 [8] и 3,5 [13] до 4,8 [5] кВт·ч/т. Как видно из рис. 4, b , данный параметр не является постоянным и имеет прямо пропорциональную зависимость от количества жидкого чугуна, а также

является функцией интенсивности продувки металла кислородом.

Небольшое снижение расхода кислорода отмечено при массовой доле жидкого чугуна в составе шихты до 20 % (рис. 3). Это объясняется, во-первых, наличием в шихте 20 % чугуна лома, который пропорционально заменяли жидким чугуном, что практически не влияло на расход кислорода. Во-вторых, сокращение расхода электроэнергии ведет к уменьшению расхода углеродсодержащего материала на вспенивание шлака и, соответственно, снижению доли кислорода.

Недостатком использования жидкого чугуна в шихте ДСП является увеличение количества шлака и отходящих газов (рис. 5), что следует учитывать в случае применения данного материала в составе шихты.

Как видно из рис. 6, с увеличением доли жидкого чугуна в составе шихты длительность плавки сначала монотонно снижается, достигает минимального значения и при определенном количестве чугуна начинает расти, что подтверждает экстремальный характер зависимости. Максимальная производительность печи достигается при минимальной длительности плавки, которая соответствует опти-

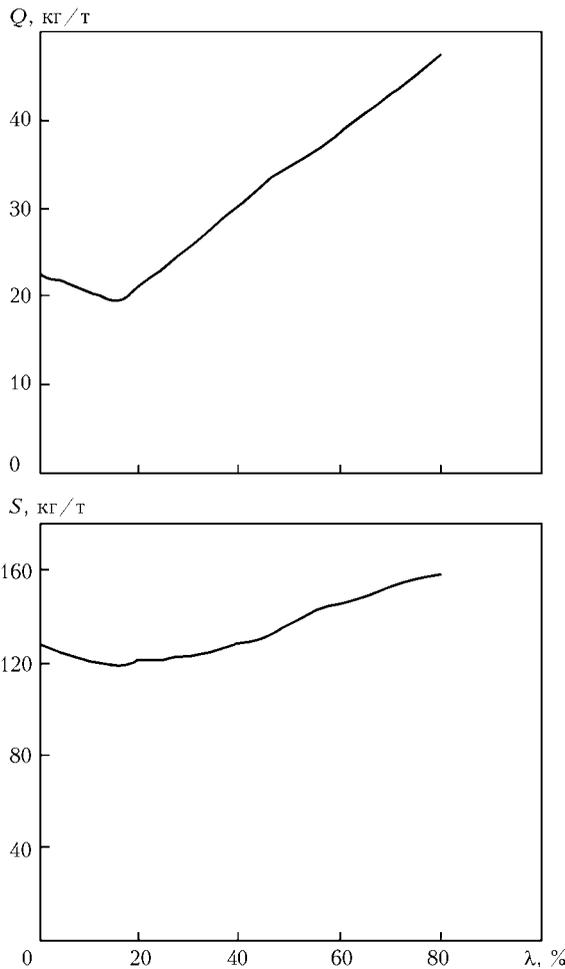


Рис. 5. Влияние доли жидкого чугуна на количество отходящих газов Q и образующегося шлака S

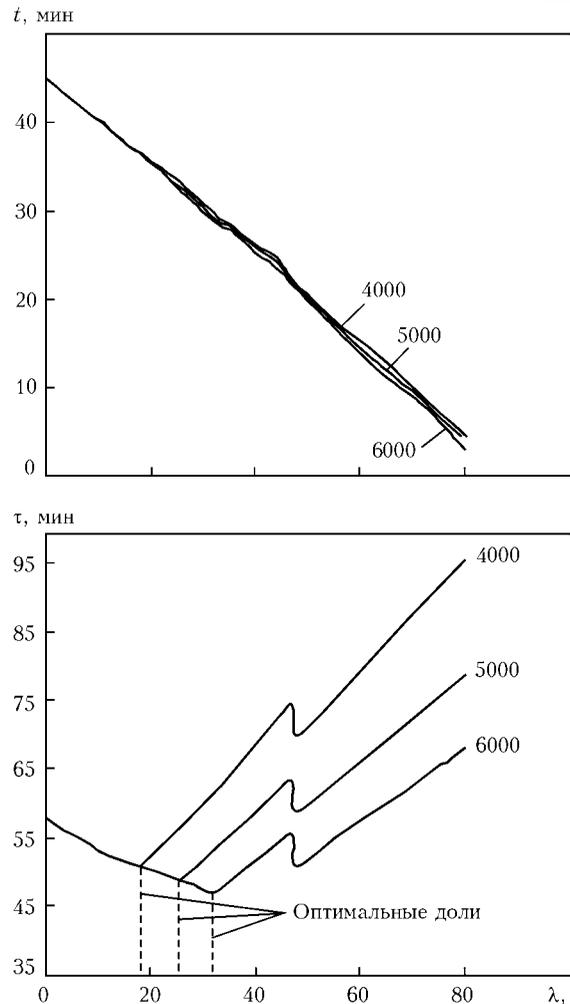


Рис. 6. Оценка оптимальной доли жидкого чугуна на плавку (расчет): t — длительность работы печи под током; τ — продолжительность плавки

мальной доле жидкого чугуна.

Отмеченный перелом на кривой при 48 % жидкого чугуна в шихте ДСП соответствует исчезновению периода подвалки моделируемой плавки, а по глубине приблизительно равен длительности данного периода. Продолжительность работы печи под током с увеличением количества жидкого чугуна в шихте постоянно снижается, а зависимость носит нелинейный характер (рис. 6).

Оптимальная доля чугуна не постоянна, она зависит от мощности дутьевых устройств (рис. 6). С увеличением интенсивности вдувания кислорода при данной мощности трансформатора оптимальное количество жидкого чугуна в шихте растет. Очевидно, верно и обратное — с увеличением мощности трансформатора при заданной интенсивности вдувания кислорода оптимальная доля жидкого чугуна в шихте снижается [8].

Таким образом, оптимальная доля жидкого чугуна в шихте в основном зависит от максимальной производительности оборудования для ввода кислорода и мощности трансформатора. Авторы данной статьи предположили, что возможным критерием, определяющим оптимальное количество чугуна в шихте ДСП, может быть отношение мощности трансформатора P_{tr} (кВт) к интенсивности ввода кислорода P_{pr} ($\text{м}^3/\text{ч}$):

$$\eta = \frac{P_{tr}}{P_{pr}} \quad (1)$$

Поскольку оптимальной плавкой является технологический процесс, в котором длительность работы трансформатора и устройств для ввода кислорода (на максимальной мощности) практически равны и не имеют бестоковых (безводных) пауз, выражение (1) можно переписать в следующем виде:

$$\eta = \frac{Q_{tr}}{Q_{pr}} \quad (2)$$

где Q_{tr} — количество введенной электроэнергии на тонну металла, кВт·ч/т; Q_{pr} — количество введенного кислорода на продувку на тонну металла, $\text{м}^3/\text{т}$.

Для оптимальных долей жидкого чугуна при моделировании (рис. 6) установили соответствующее им отношение (2) и построили кривую (рис. 7), описываемую следующим выражением:

$$\eta = 34,4e^{-0,044\lambda} - 0,8 \quad (3)$$

где λ — доля жидкого чугуна в составе шихты ДСП, %.

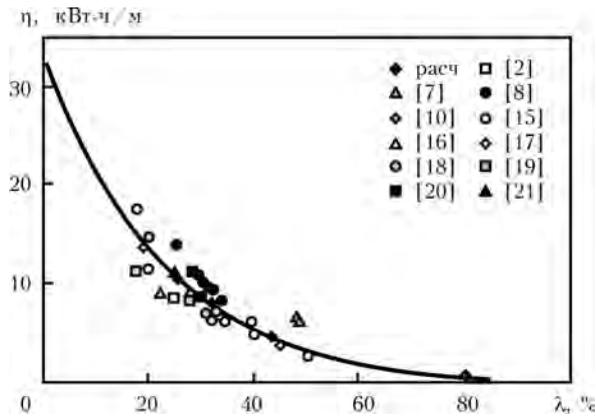


Рис. 7. Зависимость отношения расхода электроэнергии к расходу кислорода от оптимальной доли жидкого чугуна

Выполнив преобразования, получили уравнение, позволяющее по известным технико-технологическим характеристикам печи оценить оптимальную долю жидкого чугуна в составе шихты:

$$\lambda = 22,73 \ln \left(\frac{34,4}{\eta + 0,8} \right). \quad (4)$$

Точками представлены результаты обработки промышленных данных о работе ДСП по выражениям (1) или (2). Как видно из рис. 7, экспериментальные данные хорошо укладываются на полученную кривую.

Выводы

1. Представлены оценки технологических аспектов использования жидкого чугуна в дуговой сталеплавильной печи вплоть до 80 % в составе шихты, определены достоинства и недостатки применения жидкого чугуна.

2. С использованием программного комплекса «DesigningMelt» выполнено моделирование плавки с различными расходами кислорода и электроэнергии. Полученные результаты дали возможность выделить критерий, отражающий оптимальный режим применения жидкого чугуна в электропечи, в виде отношения введенной электроэнергии к введенному кислороду на продувку металла за плавку.

3. Получена зависимость, связывающая выделенный критерий с оптимальной долей жидкого чугуна в шихте ДСП.

1. Haissig M., Genter R. B., Villemin B. Hot Metal in EAFs // AISE Steel Technology. — 2002. — № 3. — С. 41–48.
2. Sampaio R. S., Jeremy J., Vieira J. B. Hot Metal Strategies for the EAF Industry // Iron & Steel Technology. — 2009. — № 2. — С. 31–37.
3. Экономические и технологические аспекты использования жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // А. И. Кагунин, Н. А. Козырев, А. П. Данилов и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. — 2001. — № 4. — С. 24–26.
4. The continuous charging of hot metal in the DC vessel of Cockerill-Sambre Marcinelle // В. Charue, M. Van Den

- Neste, C. Morettin et al. // 6th Eur. Elec. Steelmak. Conf. (Dusseldorf, June 13–15, 1999). — Dusseldorf, 1999. — С. 35–37.
5. Production and use of pig iron and hot metal in the EAF steelmaking practice of Brazil and India // K. Scheidig, S. W. G. Scherer, T. B. Martins et al. // Ibid. — Dusseldorf, 1999. — С. 38–42.
6. Энергетика сталеплавильных процессов // В. П. Лузгин, К. Л. Косырев, А. Е. Семин, Д. А. Досматов // Электрометаллургия. — 2010. — № 1. — С. 17–24.
7. Разработка технологии выплавки стали в электропечах с повышенным расходом жидкого чугуна // Л. А. Годик, Н. А. Козырев, П. А. Шабанов и др. // Черная металлургия. — 2009. — № 4. — С. 42–46.
8. Won S. T. S., Jie F. The Development of Hot Metal Charging Process // SEAISI Quarterly J. — 2010. — № 2. — С. 32–40.
9. Fior A. A., Sellan R. EAF Hot Metal Processing at Integrated Steel Plants // AISE Steel Technology. — 2002. — № 3. — С. 20–25.
10. Выплавка стали в ДСП с повышенным расходом жидкого чугуна // С. В. Прохоров, И. Д. Новицкий, Ю. А. Ивин, А. Х. Валиахметов // Труды одиннадцатого конгресса сталеплавильщиков (г. Нижний Тагил, сент. 2011 г.). — М.: ОАО «Черметинформация», 2011. — С. 778–795.
11. Синяков Р. В. Разработка технологии выплавки и внепечной обработки стали с использованием программного комплекса «DesigningMelt» // Современ. электрометаллургия. — 2011. — № 2. — С. 34–37.
12. Разработка технологии выплавки стали в электропечах с использованием жидкого чугуна // А. И. Кагунин, Л. А. Годик, Н. С. Анашкин и др. // Сталь. — 2000. — № 5. — С. 33–35.
13. Гудим Ю. А., Зинуров И. Ю., Киселев А. Д. Производство стали в электропечах. Конструкция, технологии, материалы: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. — 547 с.
14. Jian-Ping Duan, Yong-Liang Zhang, Xue-Min Yang. EAF steelmaking process with in-creasing hot metal charging ratio and improving slagging regime // Intern. J. of Minerals, Metallurgy and Materials. — 2009. — 16, № 4. — С. 375–382.
15. Michael G. K. Grant, Kenneth C. Kaiser, Serban M. Cantacuzene. Optimization of Oxygen Steelmaking in Non-Conventional EAF Operations // AISTech 2005 Proceedings. — 2005. — V. 1. — С. 545–553.
16. Abel M. The use of scrap substitutes like cold/hot DRI and Hot Metal in electric steelmaking // Archives of metallurgy and materials. — 2008. — 53, № 2. — С. 353–357.
17. High Efficiency Production Practice of a 100 t DC EBT EAF at Xing Cheng SteelWorks // Xiaohong Xu, Xiaojiang Ruan, Guowei Zhang et al. // AISTech Proceedings. — 2006. — V. 2. — С. 413–422.
18. Installation of praxair's coJet(r) gas injection system at sumikin steel and other EAFs with hot metal charges // Cates Larry, Fujimoto Kuniharu, Okada Yasukazu et al. // Ibid. — 2008. — V. 1. — С. 723–731.
19. Charging hot metal to the EAF using Consteel // T. Jiemin, W. Xuefeng, M. B. Ferri, P. Argenta // Millenium Steel International. — London, 2006. — С. 79–86.
20. Оценка энергетики электроплавки при работе современной дуговой печи с использованием альтернативных источников тепла // А. Д. Киселев, А. П. Сокур, И. Ю. Зинуров, А. М. Шумаков // Современ. пробл. электрометаллургии стали: Материалы XII межд. конф. (Челябинск, май 2004 г.) — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — С. 245–246.
21. Особенности материального и теплового балансов ДСП-180 ОАО «ММК» // В. А. Бигеев, А. Е. Малофеев, А. В. Пантелеев и др. // Современ. пробл. электрометаллургии стали: Материалы XII межд. конф. (Челябинск, сент. 2007 г.). — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. — С. 207–211.
22. Особенности работы дуговых сталеплавильных печей с применением жидкого чугуна // Ю. А. Ивин, А. Б. Великий, Н. В. Сорончук и др. // Сталь. — 2008. — № 7. — С. 49–50.

ДонНТУ, г. Донецк
Поступила 28.09.2011