К. т. н. **Е. А. Шевченко**[1], к. т. н. **А. Н. Шаповалов**[1], к. т. н. **Р. Р. Дёма**[2] (✉), к. т. н. **А. В. Колдин**[2]

[1] *Новотроицкий филиал «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Новотроицк Оренбургской обл., Россия*

[2] *ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия*

УДК 669.187.2:621.365.22.036.538

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ НА СТОЙКОСТЬ ФУТЕРОВКИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Приведены результаты исследований влияния основных технологических параметров выплавки стали (состав шихты, продолжительность плавки и простоев печи, интенсивность окислительного рафинирования и температура металла на выпуске) на стойкость футеровки малого свода дуговой сталеплавильной печи в условиях электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь». Разработаны рекомендации по оптимизации технологического и энергетического режимов плавки стали, которые позволяют продлить срок службы футеровки малого свода и снизить затраты на производство стали.

Ключевые слова: *дуговая сталеплавильная печь (ДСП), футеровка ДСП, малый свод ДСП, стойкость футеровки, технологические параметры.*

Одной из проблем эксплуатации дуговых сталеплавильных печей (ДСП), особенно высокомощных, является повышенный износ теплонагруженных элементов футеровки, таких как нижний пояс боковой стенки, расположенный против дуг, и центральная часть свода [1]. При выполнении футеровки ванны печи из качественных магнезитовых материалов и работе под вспененным магнезиальным шлаком стойкость футеровки боковых стен ДСП достигает 500 плавок и более [2–7]. Поэтому наиболее проблемным элементом в конструкции современной высокомощной ДСП является центральная часть свода (малый свод), работающая в условиях повышенных термических и динамических нагрузок.

Одним из путей повышения стойкости наиболее нагруженных частей футеровки стен и сводов печей является использование новых огнеупорных изделий с повышенной огнеупорностью, химической стойкостью и теплопроводностью. В электросталеплавильном цехе (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» для повышения стойкости малого свода дуговых печей вместимостью 120-т (инжиниринг фирмы SMS Demag, мощность трансформатора 95 МВ·А) постоянно ведутся эксперименты с использованием разных огнеупорных материалов. Так, в течение 2015–2016 гг. для изготовления малого свода ДСП использовали огнеупоры производителей RHI AG, Эй Джи Си Индастрис, Кералит, Puyang Refractories Group Co., Ltd, БКО, Динур, Группа «Магнезит». Анализ производственных данных о работе ДСП за исследуемый период показал, что стойкость малого свода, выполненного из огнеупорных материалов разных поставщиков, изменялась по опытным периодам от 44 до 415 плавок. Причем значительные колебания стойкости футеровки отмечались при применении всех опытных огнеупоров. В таблице приведены усредненные данные о параметрах плавки по периодам эксплуатации наиболее часто используемых огнеупоров.

Кроме значительных колебаний стойкости малого свода по опытным периодам наблюдается большая вариативность параметров плавки (вид, состав и расход компонентов шихты, продолжительность плавки по периодам, шлаковый режим и режим продувки, параметры металла на выпуске). Таким образом, в условиях конкретного сталеплавильного агрегата стойкость огнеупорных элементов футеровки определяется не только эксплуатационными характеристиками применяемых огнеупоров, но и главным образом технологическими параметрами плавки.

✉
Р. Р. Дёма
E-mail: demarr78@mail.ru

Авторами публикаций [8–15] выделяются основные технологические параметры плавки, которые существенно влияют на показатели работы ДСП и стойкость футеровки: состав шихтовых материалов, интенсивность продувки кислородом, общая продолжительность плавки и длительность простоев печи, расход добавок, температура металла на выпуске из печи, режим работы дуг. Для определения влияния технологических параметров плавки на стойкость футеровки электропечей были проанализированы производственные данные о работе ДСП АО «Уральская Сталь» за исследуемые периоды (2015–2016 гг.) испытаний различных вариантов исполнения малого свода (см. таблицу). Всего в течение исследуемых периодов на ДСП проведено 5292 плавки при средней стойкости малого свода 204 плавки.

Из компонентов шихты в условиях АО «Уральская Сталь» наибольшее влияние на показатели плавки и стойкость футеровки оказывает расход жидкого чугуна, доля которого в составе металлошихты изменяется от 35 до 70 %. Влияние расхода жидкого чугуна на стойкость футеровки малого свода ДСП из огнеупоров всех используемых марок (усреднено по опытным периодам) показано на рис. 1. Стойкость футеровки малого свода ДСП снижается с увеличением расхода

Усредненные данные о параметрах плавки по периодам эксплуатации опытных огнеупоров малого свода ДСП

Параметр	Значения параметров*1 по поставщикам огнеупоров*2			В среднем за анализируемый период
	№ 1	№ 2	№ 3	
Количество опытных периодов	7	4	5	26
Стойкость по периодам, плавки	44–348	94–317	74–272	44–415
	165	207	148	204
Интенсивность эксплуатации, плавки/сут	11–23	13–21	11–22	7–24
	18	17	16	17
Масса плавки, т	120,4–135,3	112,4–123,8	114,1–130,6	112,4–135,3
	130,0	119,9	126,0	127,2
Продолжительность плавки (без простоев), мин	43,6–61,1	45,5–62,6	48,0–61,7	42,5–68,8
	54,0	53,4	53,7	53,7
Длительность простоев, мин	9,1–19,9	10,6–20,9	9,3–19,0	9,1–20,9
	12,3	15,0	13,0	12,6
Температура перед выпуском, °С	1670–1679	1671–1675	1674–1678	1667–1680
	1675	1672	1676	1674
Перегрев на выпуске, °С	140–149	141–145	144–148	137–150
	145	142	146	144
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	147,5–261,6	174,9–289,8	196,3–248,3	147,5–289,8
	193,9	242,6	214,3	215,0
Расход кислорода, м^3/т	48,4–63,8	52,2–59,8	52,4–62,3	48,4–69,1
	55,2	56,5	56,4	55,7
Расход компонента шихты в завалку, т:				
чугун жидкий	50,0–98,6	54,3–71,0	65,2–86,1	42,4–98,6
	78,6	61,1	73,3	71,0
чугун твердый	0,2–20,2	0,0–2,0	0,1–12,3	0,0–20,2
	4,3	1,1	3,7	2,7
металлолом	22,2–69,0	35,1–51,6	27,0–58,5	21,7–69,7
	40,2	44,2	40,6	45,3
скрап	13,2–23,3	11,1–26,6	12,0–22,1	9,9–28,6
	17,6	15,7	16,6	16,5
брикеты ГБЖ	0,0–0,0	0,0–19,6	0,0–11,0	0,0–19,6
	0,0	9,5	2,7	2,4
доломит	1,00–1,10	1,00–2,70	0,90–2,30	0,90–2,70
	1,01	1,83	1,40	1,28
известь	1,90–2,40	2,30–3,00	1,80–2,90	1,80–3,10
	2,09	2,78	2,32	2,37
Отдано на плавку, т:				
доломит	0,94–1,49	0,00–1,57	0,00–1,15	0,00–1,57
	1,26	0,63	0,63	0,95
известь	1,74–2,69	1,96–2,36	1,99–3,02	1,74–3,02
	2,26	2,22	2,52	2,33
коксик вдувание	0,09–1,23	0,19–1,12	0,16–1,26	0,02–1,29
	0,59	0,66	0,77	0,59
коксик кусковый	0,76–1,20	1,05–2,36	1,00–1,64	0,76–2,36
	0,95	1,49	1,32	1,20
окатыши	1,80–3,70	1,00–2,70	1,40–3,30	1,00–3,80
	2,59	1,73	2,34	2,35

*1 В числителе — интервал значений, в знаменателе — среднее значение за периоды эксплуатации футеровки малого свода.
*2 Поставщики огнеупоров условно обозначены № 1 – № 3.

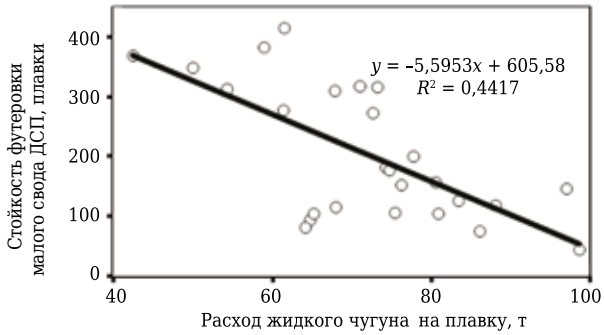

Рис. 1. Влияние расхода жидкого чугуна на стойкость футеровки малого свода ДСП

жидкого чугуна на плавку, что, очевидно, связано с повышением интенсивности окислительного рафинирования и температуры отходящих газов, а следовательно, и теплового воздействия на футеровку. Вариативность расхода этого компонента шихты в условиях АО «Уральская Сталь» определяется с учетом избыточных мощностей доменного цеха и конъюнктуры рынка товарного чугуна.

Другими важными показателями, влияющими на стойкость футеровки малого свода, являются общая продолжительность плавки и длительность простоев печи (рис. 2). Видно, что с ростом продолжительности плавки стойкость футеровки малого свода линейно снижается, что объясняется увеличением длительности теплового воздействия на футеровку. Для описания влияния длительности простоев, связанных главным образом с техническим состоянием оборудования, лучше подходит степенная зависимость (см. рис. 2, *б*), из которой следует, что футеровка малого свода наиболее интенсивно разрушается в первые 10–15 мин простоев, в течение которых резко возрастают термические напряжения.

Таким образом, условия эксплуатации и стойкость футеровки малого свода ДСП значительно определяются температурными условиями плавки, которые, в свою очередь, находятся в тесной взаимосвязи с компонентным составом шихты и режимом окислительного рафинирования. Основным окислителем, применяемым в технологии электроплавки в условиях АО «Уральская Сталь», является кислород дутья, поэтому его расход за плавку, определяемый составом шихты, существенно влияет на количество образующихся печных газов и их температуру. Анализ данных о работе ДСП за исследуемые периоды (рис. 3) показывает, что с увеличением удельного расхода кислорода, а следовательно, и общего количества образующихся в рабочем пространстве печи высокотемпературных газов стойкость футеровки малого свода линейно снижается. Таким образом, увеличение расхода (и интенсивности продувки) кислорода, приводящее к повышению количества печных газов и их температуры, ухудшает условия службы футеровки малого свода из-за более интенсивного термического и динамического воздействия.

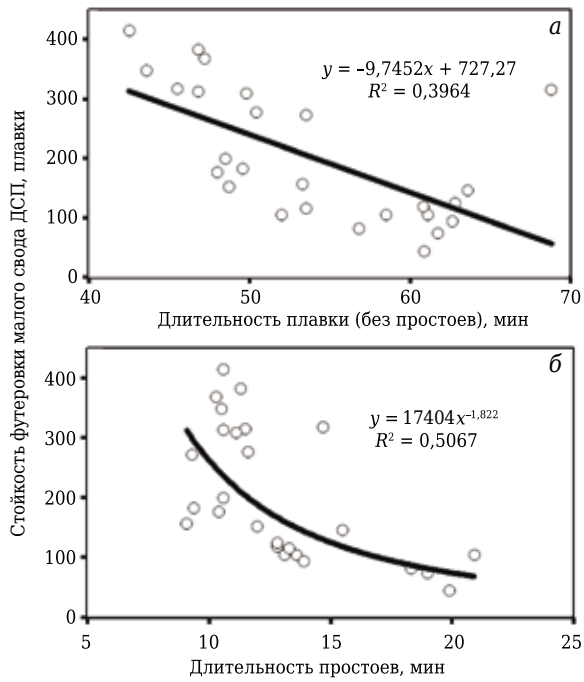

Рис. 2. Влияние общей продолжительности плавки без простоев (*а*) и длительности простоев печи (*б*) на стойкость футеровки малого свода ДСП

Резервом снижения удельного расхода кислорода при выплавке стали в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» является переход на технологию, исключающую избыточное обезуглероживание стального полупродукта. Так, при проведении плавки по действующей технологии на выпуске из ДСП получают полупродукт с содержанием углерода от 0,02 до 0,23 % (в среднем 0,06 %) независимо от марки выплавляемой стали. Такая технологическая особенность связана со скоротечностью плавки и с отсутствием прогнозных расчетов потребности в окислителях. В этих условиях для устранения завышенного содержания углерода в стальном полупродукте и нарушения ритмичности производства продувку

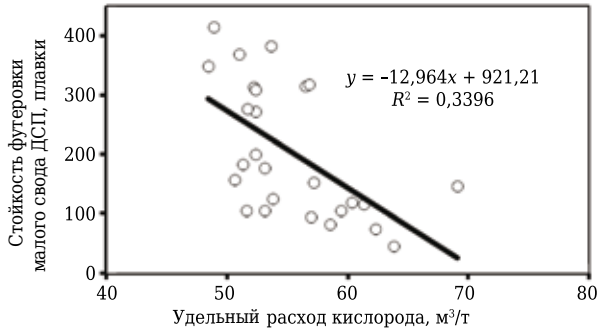

Рис. 3. Влияние удельного расхода кислорода на стойкость футеровки малого свода ДСП

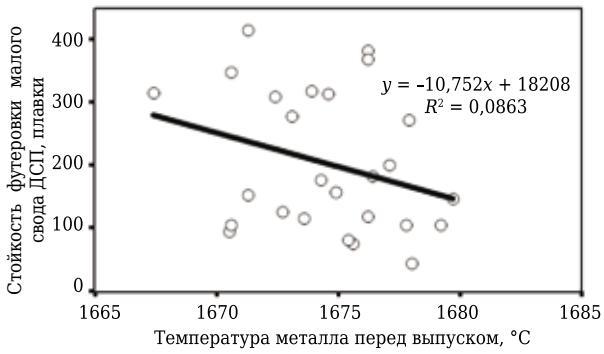

Рис. 4. Влияние температуры металла перед выпуском на стойкость футеровки малого свода ДСП

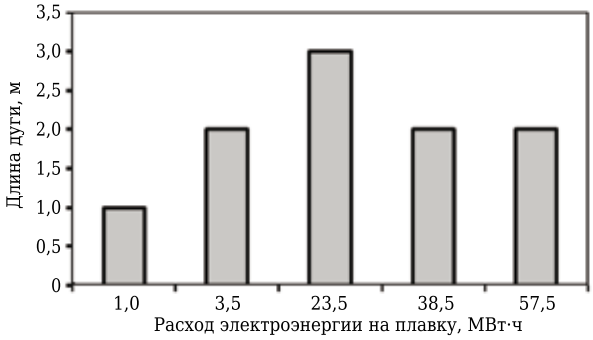

Рис. 5. Режим работы электрической дуги ДСП

металла в ДСП ведут для получения низкоуглеродистого металла на выпуске (ниже марочного на 0,05 % и более) с последующим науглероживанием в ковше при обработке в установке ковш-печь (УКП). Результат — не только повышенная окисленность стального полупродукта и высокий угар раскислителей на выпуске, но и перерасход кислородного дутья и снижение стойкости футеровки.

Следствием избыточного обезуглероживания расплава в ДСП и роста температуры его плавления является необходимость повышения температуры металла перед выпуском для обеспечения заданного перегрева, величина которого определяется технологией последующей ковшевой обработки. На рис. 4 показано влияние температуры металла на выпуске из печи на стойкость футеровки малого свода ДСП. Видно, что с повышением температуры металла на выпуске из печи стойкость футеровки линейно снижается. Это объясняется негативным воздействием электрической дуги при дополнительном подогреве металла, а также может свидетельствовать о плохом экранировании дуги вспененным шлаком.

Таким образом, установлено, что при прочих относительно равных условиях стойкость футеровки малого свода ДСП снижается с повышением доли чугуна в металлошихте, продолжительности плавки и простоев печи, расхода кислорода и температуры металла на выпуске. Кроме этих параметров на условия службы футеровки дуговых печей существенно влияет электрический режим работы дуг. Установлено [16–20], что общепринятым режимом работы дуг, позволяющим за счет более эффективного нагрева снизить вредное воздействие на футеровку и расход электроэнергии, является работа на коротких и средних дугах при нерасплавленной шихте и переход на средние и длинные дуги при образовании жидкой ванны в течение всего окислительного периода.

Анализ электрического режима работы дуг ДСП ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» (рис. 5) показывает, что выход на среднюю дугу происходит при расходе 3,5 МВт·ч электроэнергии вместо требуемого согласно действующей технологической инструкции уровня 10 МВт·ч. Это приводит к тому, что электроды не успевают погрузиться в металлошихту и проплавить колодцы требуемой глубины, необходимые для экранирования футеровки от теплового воздействия электрической дуги. Улучшение электрического режима работы дуг и условий службы футеровки возможно только при увеличении порогового выхода на средние (и длинные) дуги до уровня энергии 10 МВт·ч, потребленной с начала плавки электроэнергии. Таким образом, для повышения стойкости футеровки малого свода ДСП в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» рекомендуется:

- придерживаться установленного в технологической инструкции электрического режима и не выходить на средние и длинные дуги раньше положенных значений затраченной электроэнергии (10 МВт·ч);
- минимизировать простои печи при общей продолжительности плавки (без простоев) в соответствии с номинальными параметрами работы ДСП от 45 до 55 мин;
- корректировать расход кислорода на плавку в зависимости от его потребности на рафинирование для устранения избыточного обезуглероживания расплава и повышения температуры его плавления;
- производить выпуск металла из печи с минимальным перегревом, необходимым для проведения последующих технологических операций.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту № 11.2054.2017/ПЧ в рамках государственного задания на 2017–2019 гг. (номер проекта — 11.2054.2017/4.б).

Библиографический список

1. ***Поволоцкий, Д. Я.*** Электрометаллургия стали и ферросплавов / *Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс* [и др.]. — М. : Металлургия, 1974. — 551 с.

2. ***Бондаренко, И. А.*** Повышение стойкости футеровки ДСП-2 при использовании обожженного магнезиально-известкового флюса в условиях ОАО

БМЗ — управляющая компания холдинга БМК / *И. А. Бондаренко, А. К. Турыгин, А. Л. Артамошин* [и др.] // Литье и металлургия. — 2013. — № 4 (73). — С. 99–101.

3. ***Аксельрод, Л. М.*** Повышение стойкости футеровки ДСП путем использования MgO–CaO флюса / *Л. М. Аксельрод, М. Б. Оржех, И. В. Кушнерев* // Электрометаллургия. — 2009. — № 11. — С. 9–13.

4. ***Шевченко, Е. А.*** Повышение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей путем совершенствования шлакового режима с применением магнийсодержащих материалов / *Е. А. Шевченко, А. Н. Шаповалов, Е. В. Братковский* // Черные металлы. — 2018. — № 9 (1041). — С. 16–21.

5. ***Buchebner, G.*** Latest developments in magnesia-carbon bricks for modern electric arc furnaces / *G. Buchebner, A. Hanna, K.-M. Zettl* // AISTech — Iron and Steel Technology Conference Proceedings. — 2013. — Vol. 2. — P. 2583–2591.

6. ***Schemmel, T.*** Magnesia carbon refractories for electric arc furnaces — material properties, lining concepts and wear patterns / *T. Schemmel, T. Leppkes, L. Sun* // SEAISI Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute). — 2015. — Vol. 44 (1). — P. 59–64.

7. ***Jansen, H.*** MgO–C bricks for BOF linings / *H. Jansen* // Ironmaking & Steelmaking. — 2007. — Vol. 34, № 5. — P. 384–388.

8. ***Кудрин, В. А.*** Технологические процессы производства стали : уч. пособие / *В. А. Кудрин, В. А. Шишимиров.* — Ростов-на-Дону : Феникс, 2017. — 302 с.

9. ***Лопухов Г. А.*** Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах / *Г. А. Лопухов* // Электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 2–26.

10. ***Бигеев, А. М.*** Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : уч. для вузов ; 3-е изд., перераб. и доп. / *А. М. Бигеев, В. А. Бигеев.* — Магнитогорск : МГТУ, 2000. — 544 с.

11. ***Гудим, Ю. А.*** Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы : монография / *Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев.* — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. — 547 с.

12. ***Еланский, Д. Г.*** Тенденции развития электросталеплавильного производства / *Д. Г. Еланский* // Электрометаллургия. — 2001. — № 5. — С. 3–18.

13. ***Егоров, А. В.*** Электроплавильные печи черной металлургии : уч. для вузов / *А. В. Егоров.* — М. : Металлургия, 1985. — 280 с.

14. ***Некрасов, И. В.*** Влияние способов интенсификации электроплавки на стойкость футеровки ДСП / *И. В. Некрасов, О. Ю. Шешуков, В. С. Гуляков* // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2008. — № 4. — С. 82–85.

15. ***Зуев, М. В.*** О влиянии способов интенсификации электроплавки на стойкость футеровки ДСП-135 ОАО «Северский трубный завод» / *М. В. Зуев, О. Ю. Шешуков, А. И. Степанов* [и др.] // Сталь. — 2011. — № 7. — С. 46–48.

16. ***Ахметов, У. Б.*** Интенсификация плавления шихты в дуговых сталеплавильных печах путем оптимизации управления энергетическим режимом: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02, 05.13.06 : защищена 11.11.08 / Ахметов Урал Булякбаевич. — Магнитогорск, 2008. — 155 с.

17. ***Рушно, Э.*** Электродуговая печь с системой динамического автоматического регулирования фирмы Danieli / *Э. Рушно, К. Бергман, С. Олунд* // Электрометаллургия. — 2005. — № 8. — С. 42–48.

18. ***Смоляренко, В. Д.*** Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития / *В. Д. Смоляренко* // Электрометаллургия. — 2003. — № 11. — С. 12–19.

19. ***Стомахин, А. Я.*** Электросталеплавильное производство / *А. Я. Стомахин* // Электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 35–37.

20. ***Николаев, А. А.*** Разработка усовершенствованной методики выбора мощности статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи / *А. А. Николаев* // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. — 2017. — № 3. — С. 74–94. ■

Получено 24.02.19

© Е. А. Шевченко, А. Н. Шаповалов, Р. Р. Дёма, А. В. Колдин, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ