



УДК 669

## УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

*В. О. МОРОЗОВ, С. В. КОНОВАЛЕНКО, В. С. ПУТЕЕВ,  
А. А. КОВАЛЕВ, А. А. БУГРИМОВ, А. В. ПРОТАСЕВИЧ,  
ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»,*

*г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: teh.espc1@bmz.gomel.by.*

*В статье рассмотрены мероприятия по повышению стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей (ДСП) с целью увеличения количества плавков до следующей замены футеровки. Оптимизирована технология присадки шлакообразующих материалов и определен оптимальный режим подачи кислорода в период ведения плавки. Экспериментальные плавки проведены на ДСП-1, ДСП-2 и ДСП-3. Увеличение стойкости футеровки ДСП-1, ДСП-2 и ДСП-3 привело к сокращению ремонтов и времени на замену футеровки. Удельные расходы материалов снизились, что сократило затраты на производство. Фактический расход флюсов остался в пределах норм. Изменения в технологии плавки и контроле над режимом подачи кислорода оказали положительное влияние на производственные, технико-экономические и экологические показатели.*

**Ключевые слова.** *Футеровка, дуговые сталеплавильные печи, стойкость, оптимизация, кислород, удельные расходы, затраты, производство, экономическая эффективность.*

## INCREASING THE DURABILITY OF LININGS IN ELECTRIC ARC FURNACES

*V. O. MOROZOV, S. V. KONOVALENKO, V.S. PUTEEV,  
A. A. KOVALYOV, A. A. BUGRIMOV, A. V. PROTASEVICH,  
OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”,*

*Zhlobin, Gomel Region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: teh.espc1@bmz.gomel.by.*

*The article discusses measures to improve the durability of linings in electric arc furnaces (EAF) to increase the number of heats before the next lining replacement. The technology for adding slag-forming materials was optimized, and the optimal oxygen supply regime during the melting process was determined. Experimental melts were conducted on EAF-1, EAF-2, and EAF-3. The increased durability of the linings in EAF-1, EAF-2, and EAF-3 led to a reduction in repairs and time spent on lining replacements. The specific consumption of materials decreased, reducing production costs. The actual flux consumption remained within the standard limits. Changes in the melting technology and control over the oxygen supply regime positively impacted the production, technical-economic, and environmental performance indicators.*

**Keywords.** *Lining, electric arc furnaces, durability, optimization, oxygen, specific consumption, costs, production, economic efficiency.*

Современная дуговая сталеплавильная печь (далее – ДСП) является универсальным плавильным агрегатом (по степени мобильности, окисленности металла, печной атмосфере, доле жидкой металлошихты) для выплавки различных типов сталей. Оснащение ДСП топливными горелками и фурмами для вдувания газа и пылеугольных материалов, донными устройствами для перемешивания, эркерным выпуском металла, системами автоматического контроля электрического режима вспенивания шлака позволяет сократить удельный расход электроэнергии, расход электродов, продолжительность плавки, а также удвоить производительность печи. Несмотря на это, вопрос о снижении электроемкости выплавки стали и увеличении стойкости футеровки ДСП и сегодня является весьма актуальным [1].

В процессе плавки металла футеровка дуговых сталеплавильных печей подвергается интенсивному воздействию высоких температур, агрессивных шлаков и химических реакций. Это приводит к быстрому износу футеровки, что требует частых ремонтов и замены огнеупорных материалов. Высокие затраты на поддержание футеровки в рабочем состоянии негативно сказываются на экономической эффективности производства. Поэтому увеличение стойкости футеровки ДСП – важная задача, направленная на снижение эксплуатационных затрат и повышение производительности металлургических предприятий.

Цель данной работы – разработка и внедрение мероприятий, направленных на увеличение стойкости футеровки ДСП, снижение затрат на ее обслуживание и удельные расходы материалов.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются сталевары при эксплуатации футеровки:

- высокие температуры, достигающие 1600–1800 °С, которые приводят к термическому разрушению огнеупорных материалов;
- шлаки, содержащие оксиды железа, кальция, магния и других элементов, которые могут взаимодействовать с футеровкой и вызывать ее эрозию;
- механическое воздействие металла и шлака, приводящее к эрозии и механическому износу футеровки;
- частые ремонты и замены футеровки, приводящие к значительным экономическим потерям (затраты на материалы и работы, потери, связанные с остановками производства).

Мероприятия, направленные на увеличение стойкости футеровки ДСП, включают в себя изменение технологии присадки шлакообразующих материалов, таких, как известь, антрацит, флюсы и определение оптимального режима подачи кислорода в период ведения плавки.

Перед началом выполнения работы произведен детальный расчет материального баланса, который позволил определить исходные параметры предложенных мероприятий. В табл. 1 приведены основные расчетные показатели до и после внедрения мероприятий.

Таблица 1. Основные расчетные показатели до и после внедрения мероприятий

Показатель	До внедрения	После внедрения
Основность с учетом расхода футеровки	2,67	2,41
Стойкость ДСП, плавков	674	843
Время плавки, мин	42	43
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т (жидкое стекло)	356	361
Получено расплава, т	105,42	105,71
Время энергетического периода плавки (под током), мин	33,05	33,62
Содержание серы по расплаву выпуск, %	0,032	0,034
Содержание фосфора по расплаву выпуск, %	0,003	0,004
Количество извести, кг	5340,22	4655,17
Количество флюса, кг	1400,00	1550,00
Количество печного шлака, кг	14680,24	13954,86
Состав шлака периода плавления, %:		
CaO	36,33	34,49
MgO	11,02	11,92
SiO <sub>2</sub>	13,38	14,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25	1,32
FeO	25,61	25,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,96	6,91
FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,57	32,46
MnO	4,38	4,62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	0,25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,83	0,87
Производительность печи с учетом ремонтов, т/ч	132,28	134,47
Расход кислорода, м <sup>3</sup> /ч	4551,31	4054,31
Удельный расход кислорода дутья+горелки, м <sup>3</sup> /т	43,17	38,35
Удельный расход извести, кг/т	50,66	44,04
Удельный расход ФОМИ, кг/т	13,28	14,66
Металлошихта, т	120,00	120,00

Результаты расчета материального баланса показали, что внедрение мероприятий приведет к значительным улучшениям производственных, технико-экономических и экологических показателей. Основные изменения включают:

- снижение основности с учетом расхода футеровки, что свидетельствует о более эффективном использовании материалов;
- увеличение стойкости ДСП, что позволит сократить количество ремонтов и время на замену футеровки;
- незначительное увеличение времени плавки и энергетического периода плавки, что может быть связано с оптимизацией процесса;
- снижение количества извести и печного шлака, что указывает на более эффективное использование материалов;
- снижение удельного расхода кислорода, что свидетельствует о более эффективном использовании кислорода.

В рамках проведения работы выполнены следующие мероприятия.

Изменена технология присадки шлакообразующих материалов. Шлакообразующие материалы играют важную роль в процессе плавки, влияя на состав шлака и его вязкость. Правильный выбор и дозировка этих материалов приводят к снижению времени плавки и увеличению стойкости футеровки.

Оптимизация технологии присадки шлакообразующих материалов и рациональное распределение в процессе плавки включают в себя анализ требований к шлаку, выбор подходящих материалов и определение оптимальной дозировки материалов.

Анализ требований к шлаку в конкретном процессе плавки (химический состав металла, температура плавки, тип стали и другие факторы) определяет шлакообразующие материалы, такие, как известь, антрацит и флюсы. Каждый материал вносит свой вклад в формирование шлака: известь обеспечивает основную (щелочную) среду, антрацит – углеродный компонент, а флюсы улучшают вязкость и химические свойства шлака.

Оптимальная дозировка зависит от объема плавки, характеристик печи и требований к шлаку. Дозировка может меняться в разные периоды плавки. Например, на начальных этапах плавки может быть увеличен расход извести для образования жидкой ванны, а затем уменьшен для стабилизации шлака.

Материалы добавляются в определенные зоны плавки: в корзины и жидкую ванну. Распределение может меняться в зависимости от фазы плавки, окисленности металла и других параметров. Важно подбирать дозировку так, чтобы обеспечить стабильный состав шлака и обеспечить эффективность процесса плавки.

Оптимизация количества извести в процессе плавки стали в ДСП является важным фактором для повышения эффективности и сокращения времени плавки. Правильное количество и распределение извести позволяют улучшить теплопередачу, снизить вязкость шлака и повысить эффективность процесса плавки. Количество извести влияет на время плавки, так как известь является основным компонентом шлака и ее избыток может привести к увеличению вязкости шлака. Вязкий шлак затрудняет перемешивание и теплообмен между шлаком и металлом, что замедляет процесс плавки. Также известь влияет на теплопроводность шлака. При избыточном количестве извести шлак может стать менее теплопроводным, что замедляет передачу тепла от дуги к металлу. Это приводит к увеличению времени, необходимого для достижения нужной температуры плавки.

В процессе выполнения работы оптимизирована технология плавки в дуговой сталеплавильной печи: изменено количество присадки шлакообразующих материалов и их рациональное распределение в определенные периоды ведения плавки [2].

Определен оптимальный режим подачи кислорода в период ведения плавки. Избыточная подача кислорода в ДСП может существенно повлиять на процесс плавки и качество конечного продукта.

Последствия повышенной подачи кислорода:

1. Увеличение угара металла. Избыточное количество кислорода может привести к повышенному окислению металла, что увеличивает угар (потери металла). В результате снижается выход годного металла и увеличиваются затраты на производство.

2. Повышение температуры. Избыточная подача кислорода может привести к локальному перегреву футеровки печи, что ускоряет ее износ. В результате требуются более частые ремонты и замены футеровки, что увеличивает эксплуатационные затраты.

3. Образование оксидов. Избыточный кислород способствует образованию оксидов железа (FeO), которые могут взаимодействовать с футеровкой и шлаком, ухудшая их свойства.

4. Вспенивание шлака. Избыточная подача кислорода может вызвать вспенивание шлака, что усложняет технологический процесс и может привести к выбросам шлака из печи. В результате требуются дополнительные операции по корректировке состава шлака, и увеличивается общее время плавки.

Оптимизация режима подачи кислорода в ДСП является важным фактором для повышения эффективности и сокращения времени плавки. Правильное управление количеством кислорода позволяет уменьшить угар металла, снизить негативное воздействие на футеровку и предотвратить локальное перегревание и износ футеровки ДСП.

С целью повышения стойкости футеровки ДСП на каждом этапе плавки был определен оптимальный режим подачи кислорода, включающий в себя контроль над количеством кислорода, подаваемого через газокислородные горелки в определенный период ведения плавки. В результате проведения экспериментальных плавок подобран оптимальный режим расхода кислорода в периоды работы газокислородных горелок, а именно изменена фаза инъекции кислорода на этапе доводки плавки на жидкой ванне ДСП-1,2,3 и в конце расплавления каждой отдельной порции загрузки металлической шихты (корзины). Получены следующие результаты:

- расход кислорода ДСП-1 на жидкой ванне снижен на четырех газокислородных инжекторах на 500 м<sup>3</sup>/ч, в конце расплава корзины – на 200 м<sup>3</sup>/ч;
- расход кислорода ДСП-2, 3 на жидкой ванне снижен на трех газокислородных инжекторах на 400 м<sup>3</sup>/ч, в конце расплава корзины – на 100 м<sup>3</sup>/ч.

В результате проведенных мероприятий, направленных на увеличение стойкости футеровки ДСП, изменена технология присадки шлакообразующих материалов и определен оптимальный режим подачи кислорода, достигнуты следующие результаты:

1. Увеличена стойкость футеровки ДСП-1, 2, 3, т.е. увеличено количество плавков до следующей замены футеровки. В табл. 2 приведено сравнение стойкости футеровки сталеплавильных печей до и после внедрения мероприятий.

Таблица 2. Сравнение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей до и после внедрения мероприятий

Агрегат	До внедрения мероприятий, плавков	После внедрения мероприятий, плавков
ДСП-1	433	770
ДСП-2	445	788
ДСП-3	445	666

2. Снижено количество ремонтов и времени на ремонтные работы по замене футеровки.

ДСП-1 – выплавлено 8006 плавков. При выплавке аналогичного количества плавков до внедрения мероприятий проводилось 18 ремонтов, после внедрения мероприятий проведено 10 ремонтов по замене футеровки, сокращение времени на замену футеровки составило 112 ч или 4,7 сут.

ДСП-2 – выплавлено 7459 плавков. При выплавке аналогичного количества плавков до внедрения мероприятий проводилось 16 ремонтов, после внедрения мероприятий проведено 9 ремонтов по замене футеровки, сокращение времени на замену футеровки составило 98 ч или 4,1 сут.

ДСП-3 – выплавлено 6660 плавков. При выплавке аналогичного количества плавков до внедрения мероприятий проводилось 15 ремонтов, после внедрения мероприятий проведено 10 ремонтов по замене футеровки, сокращение времени на замену футеровки составило 70 ч или 2,9 сут.

3. Снижены удельные расходы материалов и затраты на производство. В табл. 3 приведено отклонение (снижение/увеличение) удельного расхода материалов после внедрения мероприятий.

Таблица 3. Удельные отклонения (снижение/увеличение) материалов после внедрения мероприятий

Материалы	Отклонение	
	Агрегаты ДСП-1, 2	Агрегат ДСП-3
Кислород, м <sup>3</sup> /т	-5,10	-1,80
Известь, кг/т	-6,35	
Металлошихта, кг/т	-15,06	-9,34
Шлак, кг/т	-35,00	-36,42
Огнеупорные изделия и материалы, кг/т	-0,61	-0,68
Флюсы, кг/т	+1,42	+2,76

Изменение технологии присадки шлакообразующих материалов и определение оптимального режима подачи кислорода привело к снижению удельных расходов материалов и затрат на производство, кроме повышения удельного расхода флюсов, однако следует отметить, что фактический расход флюсов остался в пределах нормы.

### Выводы

Оптимизация технологии присадки шлакообразующих материалов и контроль над режимом подачи кислорода привели к улучшению производственных, технико-экономических и экологических показателей. Данные изменения позволили увеличить стойкость футеровки ДСП более чем в 1,5 раза, снизить затраты на производство суммарно на 34,03 млн. руб. за 2023-й год и повысить эффективность использования дуговых сталеплавильных печей.

Специалисты предприятия продолжают работу по совершенствованию технологии выплавки, доводки разливки стали для производства конкурентоспособной продукции, востребованной потребителями на внешних и внутренних рынках металлопродукции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Жук, В.Л.** Оптимизация энергозатрат в металлургических технологиях / В.Л. Жук, В.И. Заика, И.В. Тупилко. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – С. 50–51.
2. Оптимизация технологии выплавки стали в электросталеплавильном цехе / С.В. Коноваленко [и др.] // Сталь. – 2021. № 2. – С. 27–29.

### REFERENCES

1. **Zhuk V.L., Zaika V.I., Tupilko I.V.** *Optimizacija jenergozatrať v metallurgicheskijah* [Optimization of energy consumption in metallurgical technologies]. Moscow, Vologda: Infra-Inzhenerija Publ., 2021, pp. 50–51.
2. **Konovalenko S.V.** *Optimizacija tehnologii vyplavki stali v jelektrostaleplavil'nom cehe* [Optimization of steel smelting technology in an electric steelmaking shop]. *Stal' = Steel*, 2021, no. 2, pp. 27–29.