

К.Г. Низяев, Л.С. Молчанов, Е.В. Синегин, С.В. Семирягин, А.Н. Стоянов

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ФУТЕРОВКИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

*Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме математического описания процессов разрушения огнеупорной футеровки кислородных конвертеров в процессе эксплуатации. Представлены результаты статистической обработки производственных данных, позволившие получить математическую модель прогнозирования глубины разрушения футеровки кислородного конвертера в зависимости от технологических параметров процесса выплавки стали.*

*Ключевые слова: кислородный конвертер, стойкость футеровки, статическая модель, прогнозирование.*

**Постановка проблемы.** Современные технологические процессы производства стали требуют высокой степени автоматизации. Что связано с необходимостью повышения технико-экономических показателей производственных процессов и снижения ресурсо-, энерго- и трудоёмкости конечной продукции. В целом эффективность работы плавильных металлургических агрегатов определяется стойкостью огнеупорной футеровки [1]. С целью продления срока её эксплуатации в кислородных конвертерах разработан комплекс таких мероприятий, как торкретирование, раздув шлака и др. В соответствии со сложившейся технологией указанные операции осуществляются постоянно по достижению определенной стойкости футеровки (50 % запланированной стойкости), что приводит к значительным перерасходам [2, 3].

**Анализ публикаций по теме исследования.** В соответствии со сложившейся практикой производства стали в кислородных конвертерах, существует два подхода в операциях продления срока эксплуатации огнеупорной футеровки: проведение измерения геометрических пара-

метров футеровки по окончанию каждой плавки и, основываясь на их результатах, применение методов торкретирования, раздува шлака или присадки MgO-содержащих материалов [4, 5]; осуществление указанных мероприятий по продлению срока эксплуатации огнеупорной футеровки на каждой плавке по достижению 50 % гарантированной стойкости [6, 7].

Применение лазерных систем сканирования футеровки конвертера по окончанию каждой плавки является достаточно дорогостоящим [8]. При этом в ряде случаев (при условии значительного перегрева плавки существует вероятность фокусировки лазерного измерительного устройства на исходящем от футеровки тепловом потоке, а не на самой футеровке; отсутствие возможности оценки глубины разрушения футеровки при значительной зашлакованности футеровки) контрольно-измерительные системы такого рода обладают значительной погрешностью [9].

Применение механического контроля состояния футеровки заключается в сканировании основных, наиболее разрушаемых, участков футеровки (околоцапфенные зоны и донная часть) при помощи специальных эталонных образцов [2]. Применение данной технологии требует значительных трудозатрат и потери времени. При этом полученные результаты являются недостаточно точными, поскольку не учитывают состояния поверхности всего рабочего слоя кислородного конвертера.

**Цель и задачи исследований.** В современных условиях при производстве стали в кислородных конвертерах значительно возрастает роль огнеупорной футеровки. При этом проблема повышения её стойкости связана с конъюнктурными особенностями рынка металлургического сырья в конкретных условиях и особенностями действующей в цехе технологии [10]. Ввиду этого целью данного исследования является создание прогнозной системы, позволяющей определять необходимость проведения операций торкретирования футеровки по результатам текущей плавки. Дополнительным аспектом, который необходимо при этом учитывать, является выбор технологических параметров, наиболее точно и адекватно фиксируемых в ходе плавки.

**Основная часть.** Для построения математико-статистической модели разрушения футеровки кислородного конвертера в процессе эксплуатации изначально с учётом мирового опыта производства стали были определены основные технологические параметры, влияющие на интенсивность процессов разрушения огнеупорных материалов. Указанные параметры для 60-т конвертеров приведены в таблице 1.

Обобщая информацию о механизмах разрушения периклазоуглеродистых огнеупорных материалов при службе в кислородных конвертерах верхнего дутья необходимо отметить, что основными факторами, влияющими на интенсивность их износа, является химический состав шлака, а именно содержание в нём оксидов железа и его основность; масса шлакового расплава, определяющая переход окиси магния из огнеупоров в шлаковую фазу; конечная температура расплава.

Учитывая технологические данные производства стали в кислородных конвертерах на отечественных предприятиях следует исключить из дальнейшего анализа сведения о химическом анализе шлаков, поскольку операции по их определению осуществляются лишь два раза в смену, а не по окончании каждой плавки [2, 3]. Кроме того, данный анализ проводится только по окончании плавки, что не позволяет осуществлять превентивные мероприятия по защите огнеупорной футеровки кислородного конвертера ещё на стадии осуществления операции шихтовки плавки.

С целью выявления функциональных взаимосвязей между глубиной разрушения огнеупорной футеровки кислородного конвертера в околоцапфенной области (наиболее динамично разрушаемом участке футеровки) был проведен корреляционный анализ, результаты которого приведены на рисунке 1. Согласно приведенным на нём данным, к наиболее значимым факторам можно отнести: основность шлака; расход чугуна, скрапа и металлического лома; содержание в чугуне кремния и марганца. Среди указанных факторов расходы чугуна металлического лома и скрапа являются взаимосвязанными факторами, что затрудняет их применение для построения математической модели.

Основные технологические параметры, влияющие  
на разрушение футеровки в 60-т конвертерах

Параметр	Величина
Химический состав чугуна, %:	
▪ кремний	0,62 ± 0,05
▪ марганец	0,47 ± 0,04
▪ сера	0,032 ± 0,001
Параметры шлака:	
▪ основность	3,55 ± 0,15
▪ железо общее, %	18,11 ± 0,3
▪ оксид магния, %	4,98 ± 0,19
Расход материалов на плавку, т:	
▪ известь	3,86 ± 0,2
▪ жидкий чугун	54,31 ± 0,39
▪ стальной лом	8,2 ± 0,25
▪ твердый чугун	2,04 ± 0,23
▪ скрап	0,93 ± 0,21
▪ ЖСБ	0,005 ± 0,005
▪ MgO-брикеты	0,287 ± 0,043
▪ плавиковый шпат	0,225 ± 0,133
▪ кремнистый лом	0,12 ± 0,075
Параметры металла на повалке	
▪ содержание углерода, %	0,012 ± 0,001
▪ температура металла, °C	1658 ± 5
Глубина разрушения футеровки, мм	0,45 ± 0,05

Кроме того, необходимо отметить, что применение в качестве входных параметров для модели прогнозирования глубины разрушения футеровки кислородного конвертера расходов жидкого чугуна, металли-

ческого лома и скрапа значительно затруднён тем, что в условиях реального производства практически невозможно определить загрязнение указанных материалов [2]. Что касается содержания в чугуне кремния и марганца, то данные параметры являются взаимосвязанными, но более значимым для процесса разрушения периклазоуглеродистой огнеупорной футеровки именно является содержание кремния в чугуне [11]. Это связано со значительным влиянием на интенсивность растворения MgO в шлаке оксидов кремния.

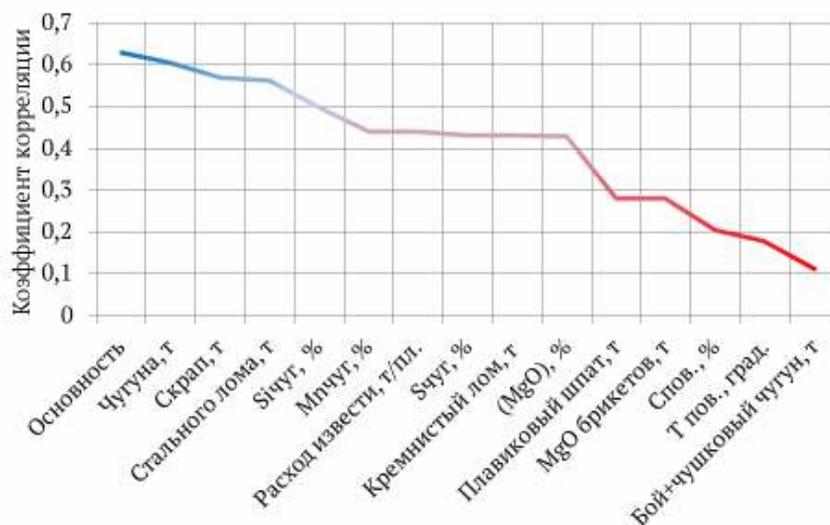


Рисунок 1 – Результаты корреляционного анализа глубины разрушения футеровки кислородного конвертера в околоцапфенных областях от технологических факторов и параметров

Кроме того, учитывая физико-химические особенности разрушения углеродистой связи в составе огнеупорного материала, решающее влияние на указанный процесс будут иметь концентрация оксидов железа и марганца в шлаке, а также температура шлакового расплава [12]. В практике металлургического производства концентрация оксидов железа в шлаке обратно пропорциональна содержанию углерода в расплаве. Таким образом, в состав математической модели дополнительно должны быть введены такие параметры, как температура металла на повалке и содержание в нём углерода.

Учитывая, что основным компонентом периклазоуглеродистых огнеупорных материалов является оксид магния, то переход его в шлак по закону перераспределения компонентов шлаковой системы определяется массой шлака [13]. Объективным показателем массы шлака в реальном производственном процессе выплавки стали является масса применяемой извести [14]. Кроме того, значительное влияние на разрушение футеровки будет оказывать применение плавикового шпата, поскольку фториды значительно снижают температуру плавления оксидных систем [15]. Исходя из сказанного выше, в модель для прогнозирования глубины разрушения огнеупорной футеровки кислородного конвертера были включены параметры расхода извести и плавикового шпата на плавку.

Методом регрессионного анализа была определена функциональная взаимосвязь между рассмотренными технологическими факторами и глубиной разрушения периклазоуглеродистой огнеупорной футеровки при эксплуатации в кислородных конвертерах. Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$H_p = 0,000125 \cdot T_{пов} - 6,46902 \cdot C_{пов} + 0,00043 \cdot M_{пш} + 0,012792 \cdot M_{изв} + 0,431442 \cdot Si_{чуг}, R^2 = 0,974, \quad (1)$$

где  $H_p$  – глубина разрушения периклазоуглеродистой футеровки кислородного конвертера в околоцапфенной зоне, мм;  $T_{пов}$  – температура металла в конвертере перед сливом металла, °C;  $C_{пов}$  – содержание углерода в конвертере перед сливом металла, %;  $M_{пш}$  – расход плавикового шпата на плавку, т;  $M_{изв}$  – расход извести на плавку, т;  $Si_{чуг}$  – содержание кремния в чугуне, %.

Адекватность полученной математической модели оценивалась посредством сопоставления прогнозных значений глубины разрушения футеровки и фактических (рисунок 2).

В соответствии с проведенными исследованиями установлена адекватность полученной модели прогнозирования глубины разрушения огнеупорной футеровки кислородного конвертера в околоцапфенных зонах. Таким образом, разработанная математическая модель может быть эффективно использована для прогнозирования процессов разрушения

футеровки кислородного конвертера в ходе выплавки стали, что позволит своевременно применять мероприятия по продлению срока эксплуатации огнеупорной футеровки (раздув шлака, торкретирование) и, как следствие, увеличить срок эксплуатации огнеупорной футеровки в целом.

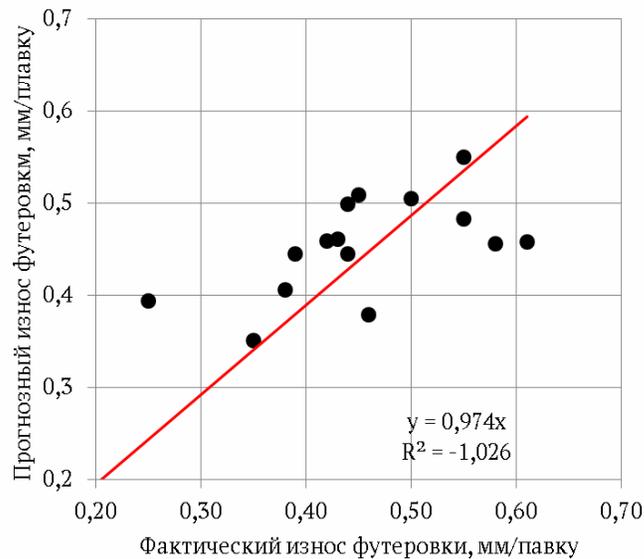


Рисунок 2 – Результаты проверки на адекватность полученной модели прогнозирования разрушения огнеупорной футеровки в околоцапфенных зонах кислородного конвертера

#### **Выводы и перспективы дальнейших исследований:**

1. На основании выполненных исследований определены контролируемые технологические факторы, которые влияют на интенсивность разрушения огнеупорной футеровки кислородных конвертеров.

2. Методом множественного регрессионного анализа построена математическая модель для прогнозирования глубины разрушения огнеупорной футеровки кислородного конвертера в околоцапфенных зонах, характеризующаяся достаточно высокой сходимостью с результатами фактической эксплуатации кислородных конвертеров.

3. Применение разработанной математической модели прогнозирования глубины разрушения огнеупорной футеровки кислородного конвертера в условиях реального металлургического предприятия по-

зволит своєчасно здійснювати проміжні ремонтні заходи і, відповідно, підвищити загальний термін експлуатації сталевих футеровок.

#### **ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА**

1. Валуев А.Г. Опыт эксплуатации периклазоуглеродистой футеровки конвертера из изделий производства RHI / А.Г. Валуев, И.В. Говгаленко, И.Г. Афанасьев // Новые огнеупоры. – 2011. – № 3. – С. 103 – 105.
2. Производство конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ – 233-СТ. КК-02-2014. Днепропетровск : ПАО «Евраз – ДМЗ им. Петровского», 2014. – 95 с.
3. Выплавка конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ 230-С320-12. Днепропетровск : ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского», 2012. – 53 с.
4. Оптимизация показателей стойкости и снижение затрат на футеровку конвертера / А.Н. Смирнов, К.Е. Писмарев, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, К.Н. Шарандин // Металл и литье Украины. – 2011. – № 11. – С. 24-28.
5. Использование самораспадающихся магниевых гранул для нанесения гарнисажа на футеровку конвертера / К.Н. Демидов, В.Г. Овсянников, О.Ф. Шатилов, В.Ф. Дьяченко, Т.В. Борисова, О.Б. Воронина // Новые огнеупоры. – 2005. – № 1. – С. 15 – 17.
6. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, А.Н. Смирнов // Металл и литье Украины. – 2010. – № 9 – 10. – С. 4-7.
7. Аксельрод Л.М. Развитие производства огнеупоров в мире и в России, новые технологии / Л.М. Аксельрод // Новые огнеупоры. – 2011. – № 3. – С. 106-120.
8. Ламм Р., Винтгенс П. Использование технологии 3-размерного лазерного сканирования в качестве технологического инструмента в конвертерном цехе // Труды VIII конгресса сталеплавателей. – М.: Черметинформация, 2002. – С. 97-102.
9. АСУТП в конвертерном производстве [Учебник] / А.Г. Величко, В.П. Иващенко, А.А. Верховская, В.И. Головкин, А.Н. Селегей. – Днепропетровск: НМетАУ, 2016. – 245 с.

10. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.
11. Износ периклазоуглеродистых огнеупоров в конвертере при изменении типа их антиоксидантов / С.Б. Бойченко, Д.П. Васильев, Б.М. Бойченко, Л.С. Молчанов // Бюллетень НТИЭИ Черная металлургия. – 2016. - № 5. – С. 57 – 60.
12. Пищида В.И., Бойченко Б.М., Тарнавский М.С. Модель процесса растворения огнеупоров в конвертерных шлаках // Теория и практика металлургии. - 2003. - №5-6. - с.124-128.
13. Теорія металургійних процесів [Підручник] / В.Б. Охотський, О.Л. Костьолов, В.К. Сімонов [та ін.]. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.
14. Охотский В.Б. Модели металлургических систем / В.Б. Охотский. – Днепропетровск : «Системные технологии», 2006. – 287 с.
15. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы / А.С. Бережной. – К.: Наук. думка, 1988. – 200 с.

#### REFERENCES

1. Valuev A.G. Opyit ekspluatatsii periklazouglerodistoy futerovki konvertera iz izdeliy proizvodstva RHI / A.G. Valuev, I.V. Govgalenko, I.G. Afanasev // Novyye ogneuporyi. – 2011. – # 3. – P. 103 – 105.
2. Proizvodstvo konverternoy stali. Tehnologicheskaya instruktsiya. TI – 233-ST. KK-02-2014. Dnepropetrovsk : PAO «Evraz – DMZ im. Petrovskogo», 2014. – 95 p.
3. Vyiplavka konverternoy stali. Tehnologicheskaya instruktsiya. TI 230-S320-12. Dneprodzerzhinsk : PAO «Dneprovskiy metallurgicheskiy kombinat im. Dzerzhinskogo», 2012. – 53 p.
4. Optimizatsiya pokazateley stoykosti i snizhenie zatrat na futerovku konvertera / A.N. Smirnov, K.E. Pismarev, A.A. Serdyukov, A.F. Tonkushin, K.N. Sharanidin // Metall i lite Ukrainyi. – 2011. – # 11. – P. 24-28.
5. Ispolzovanie samoraspadayuschihnya magnezialnyih granul dlya naneseniya garnisazha na futerovku konvertera / K.N. Demidov, V.G. Ovsyannikov, O.F. Shatilov, V.F. Dyachenko, T.V. Borisova, O.B. Voronina // Novyye ogneuporyi. – 2005. – # 1. – P. 15 – 17.

6. Sovremennaya futerovka dlya krupnykh kislorodnykh konverterov / A.A. Serdyukov, A.F. Tonkushin, A.N. Smirnov // Metall i lite Ukrainyi. – 2010. – # 9 – 10. – P. 4-7.
7. Akselrod L.M. Razvitie proizvodstva ogneuporov v mire i v Rossii, novyie tehnologii / L.M. Akselrod // Novyie ogneuporyi. – 2011. – # 3. – P. 106-120.
8. Lamm R., Vintens P. Ispolzovanie tehnologii 3-razmernogo lazernogo skanirovaniya v kachestve tehnologicheskogo instrumenta v konverternom tsehe // Trudy VIII kongressa staleplavilshchikov. – M.: Chernetinformatsiya, 2002. – P. 97-102.
9. ASUTP v konverternom proizvodstve [Uchebnik] / A.G. Velichko, V.P. Ivashchenko, A.A. Verhovskaya, V.I. Golovko, A.N. Selegey. – Dnepropetrovsk: NMetAU, 2016. – 245 p.
10. Boychenko B.M. Konverterne virobnitstvo stali / B.M. Boychenko, V.B. Ohotskiy, P.S. Harlashin. – Dnipro-petrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2004. – 454 p.
11. Iznos periklazouglerodistykh ogneuporov v konvertere pri izmenenii tipa ih antioksidantov / S.B. Boychenko, D.P. Vasilev, B.M. Boychenko, L.S. Molchanov // Byulleten NTIEI Chernaya metallurgiya. – 2016. - # 5. – P. 57-60.
12. Pischida V.I., Boychenko B.M., Tarnavskiy M.S. Model protsessa rastvoreniya ogneuporov v konverternykh shlakah // Teoriya i praktika metallurgii. - 2003. - #5-6. - P. 124-128.
13. Teoriya metalurgicheskikh protsesiv [Priruchnik] / V.B. Ohotskiy, O.L. Kostolov, V.K. Simonov [ta In.]. – K.: IZMN, 1997. – 512 p.
14. Ohotskiy V.B. Modeli metallurgicheskikh sistem / V.B. Ohotskiy. – Dnepropetrovsk : «Sistemnyie tehnologii», 2006. – 287 p.
15. Berezhnoy A.S. Mnogokomponentnyie schelochnyie oksidnyie sistemyi / A.S. Berezhnoy. – K.: Nauk. dumka, 1988. – 200 p.

Received 03.03.2020.

Accepted 10.03.2020.

***Статистична прогностна модель руйнування футеровки кисневого конвертера***

*Розглянуто актуальну проблему математичного описання процесів руйнування вогнетривкої футеровки кисневих конвертерів у процесі їхньої експлуатації. Представлено результати статистичної обробки виробничих даних методами кореляційного і множинного регресійного аналізу, на підставі яких була отримана математична модель, що дозволяє прогнозувати глибину руйнування футеровки кисневого конвертера залежно від технологічних параметрів процесу виплавки сталі. Показано можливість прогнозування динаміки руйнування футеровки на підставі інформації про технологічні параметри киснево-конвертерної плавки.*

**Statistical predictive model of the wearing of the oxygen converter lining**

*Methods for extending the life of the oxygen converters lining, such as gunning and slag blowing after melting, are considered. Based on a literature review, the effectiveness of such systems for monitoring the lining state as laser scanning systems and mechanical control are analyzed, their advantages and disadvantages are shown. Since gunning and slag blowing lead to an inevitable increase in the cost of steel, the aim of the work was to create a mathematical model to predict the lining wear at the end of smelting. Based on the forecast using a mathematical model in a production environment, we can conclude if it is necessary to carry out lining repair operations. To create a mathematical model, the factors that have the greatest influence on the lining wear were previously selected by the method of correlation analysis. Such factors included the carbon content in steel before tapping and its temperature, the consumption of fluorspar and lime for melting, and the silicon content in steelmaking iron. Using the method of multiple regression analysis, a mathematical model was determined in the form of a polynomial, which allows determining the lining wear at the end of each melt. Comparison of the actual data on the lining wear with the results of calculation using the model showed their high convergence, which confirms the adequacy of the obtained model. The application of the developed mathematical model for predicting the wear depth of the oxygen converter lining in a real metallurgical enterprise will allow timely carrying out repair measures and, accordingly, to increase the overall life of the refractory lining.*

**Низяев Константин Георгиевич** - д.т.н., профессор, зав. кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины.

**Молчанов Лавр Сергеевич** - к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины.

**Синегин Евгений Владимирович** - к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины.

**Семерягин Сергей Владимирович** - к.т.н., заместитель генерального директора ООО НПП «Днепроэнергосталь».

**Стоянов Александр Николаевич** - к.т.н., доцент, доцент кафедры металлургии стали, Национальной металлургической академии Украины.

**Нізяєв Костянтин Георгійович** - д.т.н., професор, зав. кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

**Молчанов Лавр Сергійович** - к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

**Синегін Євген Володимирович** - к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

**Семерягін Сергій Володимирович** - к.т.н., заступник генерального директора ООО НПП «Днепроенергосталь».

**Стоянов Олександр Миколайович** - к.т.н., доцент, доцент кафедри металургії сталі, Національної металургійної академії України.

**Niziaiev Kostiantyn** - Doctor of Science (Tech.), Professor, Head of Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Molchanov Lavr** - PhD, Professor (Assistant), Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Synehin Yevhen** - PhD, Professor (Assistant), Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Semeriahin Serhii** - PhD, Deputy General Director of RPE “Dneproenergostal” LLC.

**Stoianov Oleksandr** - PhD, Associate Professor, Professor (Assistant), Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.