

МЕТАЛЛУРГИЯ, ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/135>

THE EFFECT OF BLOWING ON THE OXIDATION OF METAL AND SLAG IN THE PRODUCTION OF LOW-CARBON OXYGEN-CONVERTER STEEL

**Kharvonen A.A., Mikhailov N.S., Romanov V. I.*

Karaganda Industrial University, Karaganda, Kazakhstan

** Correspondent's E-mail: a.kharvonen@ttu.edu.kz*

Author information:

Kharvonen A.A., Karaganda Industrial University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: a.kharvonen@ttu.edu.kz.

Mikhailov N.S., Karaganda Industrial University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: n.mikhailov@ttu.edu.kz.

Romanov V. I., Karaganda Industrial University, Karaganda, Kazakhstan

Abstract – The article discusses the results of a study on the effect of additional blowing on the oxidation of metal and slag during oxygen-converter production of low-carbon steel. The study was conducted by Burdonov B.A. and his co-authors at the Qarmet Metallurgical Plant in Temirtau, Karaganda Region. The article presents modern production data obtained at the same plant and provides a comparative analysis of these data with current trends in the field. It has been established that in modern conditions, the negative effect of overpressing retains its direction, but is significantly reduced in magnitude and partially compensated by means of secondary metallurgy.

Keywords – oxygen converter, additional blowing, metal oxidation, slag FeO, low-carbon steel, secondary metallurgy.

ТӨМЕН КӨМІРТЕКТІ ОТТЕГІ ТҮРЛЕНДІРГІШ БОЛАТ ӨНДІРІСІНДЕГІ МЕТАЛЛ МЕН ҚОЖДЫҢ ТОТЫҒУЫНА ҮРЛЕУДІҢ ӘСЕРІ

**Харвонен А.А., Михайлов Н.С., Романов В.И.*

Қарағанды индустриялық университеті, Қарағанды, Қазақстан

**Корреспондент E-mail: a.kharvonen@ttu.edu.kz*

Авторы туралы ақпарат:

Харвонен А. А., Қарағанды Индустриалдық Университеті, Қарағанды Қ., Қазақстан, e-mail: a.kharvonen@ttu.edu.kz.

Михайлов Н. С., Қарағанды Индустриалдық Университеті, Қарағанды Қ., Қазақстан, e-mail: n.mikhailov@ttu.edu.kz.

Романов В.И., Қарағанды Индустриалдық Университеті, Қарағанды, Қазақстан.

Аңдатпа – Мақалада төмен көміртекті болаттың оттегі-Конвертер өндірісіндегі металл мен қождың тотығуына Үрлеудің әсерін зерттеу нәтижелері қарастырылады. Салыстыру базасы ретінде Б.А. Бурдоновтың және Теміртау қ. "Qarmet" АҚ металлургиялық комбинатында орындалған бірлескен авторлардың жұмысы пайдаланылды, Қарағанды облысы, сол кәсіпорында алынған заманауи өндірістік деректер ұсынылды, олардың салыстырмалы талдауы жүргізілді, сондай-ақ осы саладағы өзекті үрдістермен. Қазіргі жағдайда Үрлеудің теріс әсері өз бағытын сақтайтыны анықталды, бірақ ол айтарлықтай төмендейді және ішінара қайталама металлургия құралдарымен өтеледі.

Түйін сөздер – оттегі түрлендіргіші, үрлеу, металл тотығуы, Қождың FeO, төмен көміртекті болат, қайталама металлургия.

ВЛИЯНИЕ ДОДУВОК НА ОКИСЛЕННОСТЬ МЕТАЛЛА И ШЛАКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ СТАЛИ

**Харвонен А.А., Михайлов Н.С., Романов В.И.*

Карагандинский индустриальный университет, Караганда, Казахстан

** E-mail корреспондента: a.kharvonen@ttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Харвонен А.А., Карагандинский индустриальный университет, Караганда, Казахстан, e-mail: a.kharvonen@tttu.edu.kz.

Михайлов Н.С., Карагандинский индустриальный университет, Караганда, Казахстан, e-mail: n.mikhailov@tttu.edu.kz.

Романов В.И., Карагандинский индустриальный университет, Караганда, Казахстан.

Аннотация – В статье рассмотрены результаты исследования влияния додувок на окисленность металла и шлака при кислородно-конвертерном производстве низкоуглеродистой стали. В качестве базы сравнения использована работа Бурдонова Б.А. и соавторов, выполненная на металлургическом комбинате АО «Qarmet» г.Темиртау, Карагандинская обл. Представлены современные производственные данные, полученные на том же предприятии, проведён их сопоставительный анализ, а также с актуальными тенденциями в данной области. Установлено, что в современных условиях отрицательный эффект додувок сохраняет своё направление, однако существенно снижается по величине и частично компенсируется средствами вторичной металлургии.

Ключевые слова – кислородный конвертер, додувки, окисленность металла, FeO шлака, низкоуглеродистая сталь, вторичная металлургия.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проведено ретроспективное сопоставление результатов классического исследования додувок 1973 года (Бурдонов Б.А. и др.) с современными производственными данными АО «Qarmet» (4514 плавов без додувок и 334 плавки с додувками, октябрь 2025 – апрель 2026). Установлено, что при фиксированном конечном содержании углерода додувка по-прежнему смещает регрессионную зависимость FeO–C в сторону более высокой окисленности шлака, однако величина сдвига (0,7–0,9 п.п.) на порядок меньше, чем в 1973 году (рост FeO с 13,8 до 17,7%). Показано, что связь между содержанием кислорода и углерода при додувках становится менее устойчивой (R^2 снижается с 0,47 до 0,17), что указывает на возросшую вариабельность процесса, а не на однозначный рост средней окисленности металла. Выявлено, что в современных условиях додувка обеспечивает заметное снижение содержания фосфора (около 14%), что делает её технологически оправданной операцией при контролируемом окислительном режиме. Показано, что часть негативных последствий додувок (потери марганца, повышение FeO) компенсируется на стадии вторичной металлургии, что принципиально отличает современную практику конвертерного производства от условий 1973 года.

ВВЕДЕНИЕ

Додувки – повторные подачи кислорода в конвертерную ванну после первоначальной остановки продувки – являются распространённой технологической операцией при производстве низкоуглеродистой стали. Они применяются для корректировки температуры, состава металла или удаления примесей, прежде

всего фосфора и серы, когда плавка не достигает целевых параметров в конце основной продувки.

Влияние додувок на качество конвертерной стали остаётся предметом производственного интереса, поскольку повторное воздействие кислородной струи потенциально изменяет окислительный баланс ванны, угар раскислителей и чистоту стали по неметаллическим включениям. В 1973 году Бурдонов Б.А., Гахов Н.Ф., Лобачев В.С. и соавторы опубликовали результаты систематического исследования этой проблемы применительно к условиям Карагандинского металлургического комбината [1, 5, 8]. Работа установила чёткую отрицательную связь между проведением додувок и качеством кислородно-конвертерной стали.

Настоящая статья преследует цель провести ретроспективный анализ результатов того времени, сопоставить их с современными производственными данными, полученными на том же предприятии, и оценить, насколько изменился характер влияния додувок за истекший период с учётом развития современных технологий конвертерного производства и вторичной металлургии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты проводились на 250-тонных конвертерах, работающих с отводом газов без дожигания. Металл продували через четырёхсопловую фурму при расходе кислорода 750–850 м³/мин. Масса металлошихты составляла 300 т, в том числе 65–75 т лома. Влияние додувок изучалось на 28 плавках стали 10сп с раскислением силикомарганцем, ферросилицием и алюминием [1, 3, 9].

Регрессионный анализ показал, что с уменьшением содержания углерода в конце

продувки нарастает концентрация кислорода в металле, причём после второй и третьей додувки эта зависимость смещается в сторону более высокой окисленности. Авторы [1, 6] объяснили данный эффект ослаблением перемешивания ванны при сниженном расходе кислорода в режиме додувки (600–800 м³/мин) и повышенном положении фурмы, вследствие чего поступающий кислород расходуется преимущественно на окисление железа, а не на обессеривание и уменьшение концентрации углерода.

Сопоставительные данные по 14 плавкам без додувок и 14 плавкам с додувками при одинаковом конечном содержании углерода (C = 0,08%) представлены в Таблице 1.

«Угар Mn» и «Угар Si» – относительные потери от исходного содержания, %.

Таблица 1 – Средний состав металла и шлака перед выпуском (данные 1973 года [1])

Режим	C, %	Mn, %	S, %	[O], %	FeO шл., %	Угар Mn, %	Угар Si, %
Без додувок	0,08	0,154	0,031	0,044	13,8	9,6	25,2
С додувками	0,08	0,106	0,03	0,0567	17,7	13,6	31,0

Содержание кислорода в металле при додувках возросло с 0,0440 до 0,0567%, FeO в шлаке – с 13,8 до 17,7%; угар марганца увеличился с 9,6 до 13,6%, угар кремния при осаждающем раскислении – с 25,2 до 31,0%. Балл загрязнённости силикатными и силикосульфидными включениями составил в среднем 3,81 против 2,79 на плавках без додувок. Доля образцов, выдержавших испытание на холодный изгиб, снизилась с 94% (без додувок) до 85,3% (с додувками) [1, 7].

Регрессионный анализ по FeO показал следующие уравнения (Рис. 1):

– без додувки: $y = -60,076x + 24,247$, $R^2 = 0,1047$;

– с додувкой: $y = -57,06x + 24,808$, $R^2 = 0,1037$,

где y – содержание FeO в шлаке, %; x – конечное содержание углерода в металле, %.

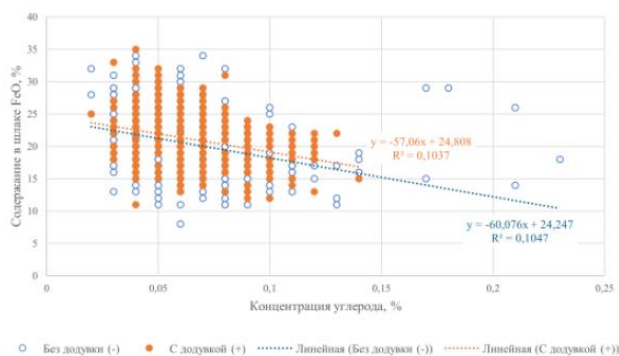


Рис. 1 – Влияние додувки на содержание FeO в шлаке в зависимости от содержания углерода

Обе зависимости отрицательные: с ростом концентрации углерода FeO в шлаке снижается, что полностью согласуется с физикохимией процесса. При сопоставлении на одинаковом уровне углерода (0,04–0,10%) линия «с додувкой» расположена выше линии «без додувки» – разница составляет порядка 0,7–0,9 п.п. по FeO. Следовательно, додувка сохраняет тенденцию к повышению окисленности шлака при одинаковом конечном содержании углерода, хотя эффект заметно слабее, чем в 1973 году. Низкие значения $R^2 \approx 0,10$ для обеих групп указывают на то, что углерод объясняет лишь около 10% вариации FeO, тогда как определяющую роль играют сопутствующие технологические факторы.

Для зависимости «кислород–углерод» получены уравнения (Рис. 2):

– с додувкой: $y = -3030,9x + 800,44$, $R^2 = 0,1666$;

– без додувки: $y = -5376,5x + 948,59$, $R^2 = 0,4702$,

где y – содержание растворённого кислорода, ppm; x – содержание углерода, %.

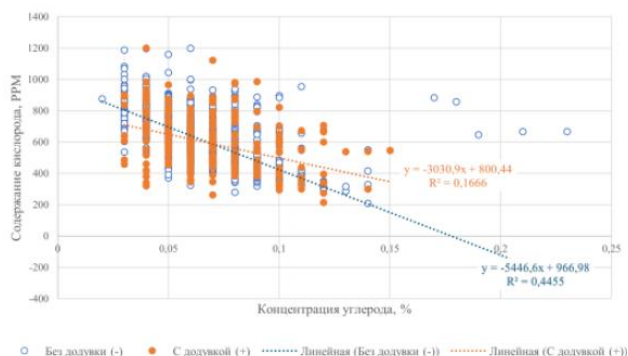


Рис. 2 – Влияние додувки на содержание растворённого кислорода в зависимости от содержания углерода

Без додувки связь C–O достаточно устойчива ($R^2 = 0,47$), тогда как при додувке она существенно размывается ($R^2 = 0,17$). Это означает, что додувка не столько однозначно повышает средний кислород, сколько делает его поведение менее

предсказуемым. Линии пересекаются приблизительно при $C \approx 0,063\%$, что подтверждает немонотонный характер влияния додувки на содержание кислорода в зависимости от уровня конечного углерода.

Средние значения технологических показателей перед выпуском представлены в Таблице 2. В отличие от Таблицы 1, где приведены относительные угары Mn и Si (%), столбцы [Mn]выпуск и [Si]выпуск представляют абсолютное содержание элементов в металле перед выпуском (%). Прямое сравнение [O] между группами некорректно без поправки на различие конечного углерода (0,060% против 0,069%); корректная оценка дана регрессионным методом выше.

Таблица 2 – Средний состав металла и шлака перед выпуском (современные данные)

Режим	C, %	Mn, %	S, %	[O], ppm	FeO шл., %	[Mn] выпуск, %	[Si] выпуск, %
Без додувок	0,060	0,061	0,018	635	20,6	0,432	0,137
С додувками	0,069	0,057	0,0187	596	20,63	0,435	0,133

Средний конечный углерод в группе с додувками выше (+15% относительно), что само по себе снижает равновесный кислород. Содержание Mn ниже при додувках (–6,6%), что согласуется с более высоким угаром марганца. Содержание FeO практически не изменилось (+0,03 п.п.).

Анализ данных по фосфору показал, что додувка способствует его более полному удалению: содержание P на выпуске при додувках ниже примерно на 14%, что является технологически значимым положительным эффектом.

На последующих стадиях обработки (вторичная металлургия) часть различий, зафиксированных на выпуске, компенсируется: у плавов с додувками наблюдается более низкое содержание C и S и более высокое содержание Mn по сравнению с показателями на выпуске. Это свидетельствует о том, что современная схема вторичной обработки металла на АПК способна нивелировать часть негативных последствий додувок.

К общим закономерностям относятся следующие. Во-первых, в обоих случаях додувка при сопоставлении на одинаковом уровне конечного углерода сопровождается более высокой окисленностью шлака. Во-вторых, в обоих случаях наблюдается негативное влияние на содержание марганца. В-третьих, додувка в обеих ситуациях предстаёт как операция, не являющаяся

«бесплатной» по металлургическому балансу: улучшение одних показателей достигается за счёт ухудшения других.

Вместе с тем различия весьма существенны. Раньше додувка давала резкий рост FeO в шлаке (с 13,8 до 17,7%), сильный рост кислорода в металле (с 0,0440 до 0,0567%) и значительный совместный угар Mn и Si. В современных данных средний FeO практически не изменился (+0,03 п.п.), а среднее содержание кислорода оказалось даже ниже в группе с додувками. Снижение выраженности негативного эффекта связано с совокупностью факторов: совершенствованием систем управления конвертерным процессом, возможностью точнее задавать режим додувки (расход кислорода, положение фурмы над условным «зеркало» металла), а также принципиальным изменением роли последующей обработки металла.

Необходимо также отметить методическое различие двух работ. В исследовании [1, 3] обе сравниваемые группы имели одинаковый конечный углерод ($C = 0,08\%$), что обеспечивало «чистое» выделение эффекта додувки. В современных данных группа с додувками имеет в среднем более высокий конечный углерод (0,069 против 0,060%), что затрудняет прямое сравнение средних значений. Регрессионный подход – сопоставление при фиксированном C – даёт более корректную картину и подтверждает сохранение направления эффекта (додувка → более высокий FeO), но с существенно меньшей величиной.

Тенденции, выявленные в настоящей работе, согласуются с результатами актуальных исследований. Lv Changhai et al. [2, 10] показали, что выход за пределы критического диапазона C является механизмом, объясняющим наблюдаемый сдвиг регрессионных линий FeO–C, что напрямую подтверждает наш вывод о систематическом смещении зависимости при додувках. He X. et al. [3, 5, 10] обосновали, что непредсказуемость поведения кислорода при повторных продувках – отражённая в снижении R^2 с 0,47 до 0,17 – является ключевым аргументом в пользу их минимизации средствами автоматического управления. You D. et al. [4, 7, 8] показали, что даже умеренный рост окисленности шлака при додувках (+0,7–0,9 п.п. при фиксированном C) усиливает нагрузку на вторичную металлургию через межфазные реакции в ковше, что соответствует наблюдаемой необходимости дополнительной коррекции состава металла после выпуска плавов с додувками.

ВЫВОДЫ

1. Раннее исследование [1, 6] зафиксировало выраженное отрицательное влияние додувок: рост окисленности металла и шлака, увеличение угара раскислителей, повышение загрязнённости стали оксидными неметаллическими включениями и снижение выхода годного листа при испытании на изгиб.

2. Современные производственные данные АО «Qarmet» (4 514 плавов без додувок и 334 плавки с додувками, октябрь 2025 – апрель 2026) подтверждают сохранение направления эффекта: при фиксированном уровне конечного углерода додувка систематически смещает зависимость FeO–C в сторону более высокой окисленности шлака. Вместе с тем величина этого сдвига существенно уменьшилась.

3. По зависимости кислород–углерод современные данные не обнаруживают однозначного роста среднего содержания кислорода при додувках. Додувка делает связь C–O менее устойчивой (R^2 снижается с 0,47 до 0,17), что указывает на возросшую вариабельность процесса и большую чувствительность к сопутствующим технологическим условиям.

4. В современных условиях додувка обеспечивает значимое снижение содержания фосфора (около 14%), что является её технологически обоснованным применением. Негативные последствия – умеренный рост FeO в шлаке и потеря марганца – частично компенсируются на стадии вторичной металлургии, что принципиально отличает современную практику.

5. Додувку следует рассматривать как допустимую, но металлургически не нейтральную корректирующую операцию, требующую контроля окислительного режима и

последующей вторичной обработки металла. Перспективным направлением является минимизация числа повторных продувок за счёт совершенствования систем управления конвертерным процессом [2, 3, 4].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

«Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов».

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторский вклад (таксономия CRediT): Харвонен А. А.: сбор и курирование производственных данных, их визуализацию, проведение исследования и анализ полученных результатов. Михайлов Н. С.: принимал участие в обзоре научной литературы и анализе данных. Романов В. И.: научное руководство работой, рецензирование и редактирование статьи. Все авторы одобрили финальную версию работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Qarmet» за предоставление производственных данных и содействие в проведении научного исследования.

АВТОРСКОЕ ПРАВО

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] B. A. Burdonov, N. F. Gakhov, V. S. Lobachev i dr., «Vliyanie doduvok na kachestvo nizkouglerodistoy kislorodno-konverternoy stali» [Influence of additional blowing on the quality of low-carbon oxygen-converter steel], *Stal*, No. 6, pp. 491–493, 1973.
- [2] Lv Changhai, Li Jing, Yan Wei, Zhang Hongjun, «Optimizatsiya konechnogo kontrolya dlya nizkouglerodistoy i nizkofosforistoy stali, proizvodimoy konverternym sposobom s odnim shlakom» [Optimization of endpoint control for low carbon and phosphorus steel produced by converter single slag process], *ISI International*, Vol. 62, No. 9, pp. 1845–1851, 2022. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-102
- [3] Kh. Khe i dr., «Prognozirovanie ob"ema produvki kislorodom v kislorodno-konvertornom protsesse na osnove neyronnoy seti obratnogo rasprostraneniya oshibki i inkrementnogo obucheniya» [Prediction of oxygen-blowing volume in BOF steelmaking process based on BP neural network and incremental learning], *High Temperature Materials and Processes*, Vol. 41, 2022.
- [4] D. Yu, K. Bernkhard, P. Mayer i dr., «Modelirovanie protsessy vypuska plavki iz kislorodnogo konvertera: reaktsii v kovshe» [Modeling of the BOF tapping process: the reactions in the ladle], *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 52, pp. 1854–1865, 2021. doi: 10.1007/s11663-021-02153-2

- [5] Ch. G. Chzhou, Ts. G. Chen', I. Tszi, L. Ts. Ay, Sh. Kh. Van, Ts. Ya. Chen', T. S. Yuan', «Vliyanie sil'nookislitel'nogo defosforiruyushchego shlaka konvertera na protsess defosfor-atsii zhidkoy stali» [Effect of highly oxidizing converter dephosphorization slag on dephosphorization behaviour of molten steel], *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 50, No. 8, pp. 958–968, 2023. doi: 10.1080/03019233.2023.2168344
- [6] Yu. Go, D. Khe, S. Li, K. Feng, «Model' prognozirovaniya soderzhaniya ugleroda v rezhime real'nogo vremeni dlya stadii doduvki konvertera na osnove fizicheskii informirovannoy seti PI-LSTM» [Real-Time Carbon Content Prediction Model for the Reblowing Stage of Converter Based on PI-LSTM], *Materials*, Vol. 18, No. 19, Art. no. 4631, 2025. doi: 10.3390/ma18194631
- [7] I. Kan, Yu.-G. Tan', Ts.-S. Chzhao, K. Yan, V.-V. Lyu, Sh. Yue, «Korreksiya konechnogo soderzhaniya ugleroda v kislorodno-konvertornom proizvodstve na osnove fil'tra Kalmana i modeli vyvoda po pretsedentam (CBR)» [End-point carbon content correction in converter steelmaking based on the Kalman filter and CBR model], *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 2024. doi: 10.1177/03019233241303546
- [8] Ch. Van, Ts. Lyu, Kh. Lyu, Sh. Vey, «Obzor metodov prognozirovaniya konechnogo soderzhaniya ugleroda v kislorodno-konvertornom protsesse» [A review of end-point carbon prediction for BOF steelmaking process], *High Temperature Materials and Processes*, Vol. 39, No. 1, pp. 653–662, 2020. doi: 10.1515/htmp-2020-0098
- [9] R. Kh. Chzhan, Ts. Yan, Kh. Sun', V. K. Yan, «Prognozirovanie koeffitsienta ispol'zovaniya izvesti pri defosforatsii v kislorodno-konvertornom proizvodstve na osnove onlayn-posledovatel'noy mashiny ekstremal'nogo obucheniya s mekhanizmom zabyvaniya» [Prediction of lime utilization ratio of dephosphorization in BOF steelmaking based on online sequential extreme learning machine with forgetting mechanism], *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 31, No. 3, p. 508, 2024. doi: 10.1007/s12613-023-2732-4
- [10] G. Syuy, M. Li, Ts.-V. Syuy, Ch.-Kh. Tszya, Ts.-F. Chen', «Tekhnologiya upravleniya konechnym soderzhaniiem ugleroda v kislorodno-konvertornom proizvodstve na osnove funktsional'noy modeli tsifrovogo dvoynika» [Control technology of end-point carbon in converter steelmaking based on functional digital twin model], *Journal of University of Science and Technology Beijing (Chinese Journal of Engineering)*, Vol. 41, No. 4, pp. 521–527, 2019. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.013

REFERENCES

- [1] B. A. Burdonov, N. F. Gakhov, V. S. Lobachev, et al., "Vliyanie doduvok na kachestvo nizkouglerodistoy kislorodno-konvertornoy stali" [Influence of additional blowing on the quality of low-carbon oxygen-converter steel], *Stal' [Steel]*, no. 6, pp. 491–493, 1973.
- [2] Lv Changhai, Li Jing, Yan Wei, and Zhang Hongjun, "Optimization of endpoint control for low carbon and phosphorus steel produced by converter single slag process," *ISIJ International*, vol. 62, no. 9, pp. 1845–1851, 2022. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-102
- [3] X. He et al., "Prediction of oxygen-blowing volume in BOF steelmaking process based on BP neural network and incremental learning," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 41, 2022.
- [4] D. You, C. Bernhard, P. Mayer, et al., "Modeling of the BOF tapping process: the reactions in the ladle," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 1854–1865, 2021. doi: 10.1007/s11663-021-02153-2
- [5] C. G. Zhou, Q. G. Chen, Y. Ji, L. Q. Ai, S. H. Wang, Q. Y. Chen, and T. X. Yuan, "Effect of highly oxidizing converter dephosphorization slag on dephosphorization behaviour of molten steel," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 50, no. 8, pp. 958–968, 2023. doi: 10.1080/03019233.2023.2168344
- [6] Y. Guo, D. He, X. Li, and K. Feng, "Real-Time Carbon Content Prediction Model for the Reblowing Stage of Converter Based on PI-LSTM," *Materials*, vol. 18, no. 19, Art. no. 4631, 2025. doi: 10.3390/ma18194631
- [7] Y. Kang, Y.-G. Tan, J.-X. Zhao, K. Yang, W.-W. Liu, and S. Yue, "End-point carbon content correction in converter steelmaking based on the Kalman filter and CBR model," *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 2024. doi: 10.1177/03019233241303546
- [8] Z. Wang, Q. Liu, H. Liu, and S. Wei, "A review of end-point carbon prediction for BOF steelmaking process," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 39, no. 1, pp. 653–662, 2020. doi: 10.1515/htmp-2020-0098
- [9] R. H. Zhang, J. Yang, H. Sun, and W. K. Yang, "Prediction of lime utilization ratio of dephosphorization in BOF steelmaking based on online sequential extreme learning machine with forgetting mechanism," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 31, no. 3, p. 508, 2024. doi: 10.1007/s12613-023-2732-4
- [10] G. Xu, M. Li, J.-W. Xu, C.-H. Jia, and Z.-F. Chen, "Control technology of end-point carbon in converter steelmaking based on functional digital twin model," *Journal of University of Science and Technology Beijing (Chinese Journal of Engineering)*, vol. 41, no. 4, pp. 521–527, 2019. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.013