

¹Куберский С. В., ¹Подлипенская Л. Е., ^{1,*}Крестин Р. В., ²Шапка А. В.

¹Донбасский государственный технический университет,

²Южный горно-металлургический комплекс

*E-mail: Jacks.m3x@mail.ru

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КОВШЕ

Рассмотрены преимущества и недостатки различных способов газодинамической обработки стали в ковше. Предложена методика расчета поверхности продувочного пятна при пульсирующей подаче газа, учитывающая динамические его изменения в пределах каждой пульсации. Получены зависимости, позволяющие оценить влияние параметров обработки на интенсивность вторичного окисления при продувке стали по базовой и новой технологии. Предложены значения частоты пульсаций при различных расходах продувочного газа, обеспечивающие меньшую интенсивность вторичного окисления в сравнении с базовой технологией. Разработаны технологические рекомендации для усовершенствования действующей продувочной станции и реализации пульсирующей продувки в производственных условиях.

Ключевые слова: *внепечная обработка, сталеразливочный ковш, математическое и физическое моделирование, продувка, аргон, пульсации, продувочное пятно, вторичное окисление.*

Одной из ключевых задач современной черной металлургии является повышение качества стали и эффективности металлургических переделов. Важную роль в ее решении играют процессы внепечной обработки, среди которых особое место занимает продувка расплава инертными газами в сталеразливочном ковше (СК). Данная операция интенсифицирует процессы рафинирования стали, ускоряет расплавление вводимых в нее твердых реагентов и повышает полноту их усвоения, а также обеспечивает гомогенизацию температуры и химического состава металла [1–3].

Основным технологическим параметром продувки является ее интенсивность. Повышение интенсивности в целом позитивно влияет на отмеченные выше процессы, а также на длительность обработки. В то же время интенсивное перемешивание может привести к повышенной загрязненности стали экзогенными неметаллическими включениями (НВ) за счет «затягивания» частиц покровного шлака в объем расплава и эрозионного износа футеровки. Кроме того, возможно дробление скоплений НВ, образовавшихся в результате коагуляции и

коалесценции при всплывании, и уменьшение времени на их ассимиляцию шлаком, что снижает степень рафинирования [2, 4].

В условиях действующих производств используется в основном «струйный режим» продувки [3], при котором объем металла, вовлекаемого в активное перемешивание и гомогенизацию, относительно невелик. При этом происходит раскрытие зеркала металла и образование продувочного пятна, что вызывает вторичное окисление.

Поэтому при обработке в больших ковшах, как правило, используют две продувочные пробки [5]. Это позволяет при одинаковом общем расходе продувочного газа обеспечить:

- меньшую локальную интенсивность продувки и скорость газового потока через одну пробку;
- более благоприятные условия для укрупнения НВ при их всплывании;
- увеличение объема металла, вовлекаемого в перемешивание, и площади его контакта с рафинирующим шлаком, что позитивно влияет на процессы десульфурации и ассимиляции НВ;

– уменьшение эрозии огнеупоров ковша за счет меньшей турбулентности потоков у днища и стенок.

Определенный интерес представляют и новые альтернативные способы перемешивания стали в ковше, обеспечивающие значительное увеличение эффективности процесса [1, 6–10].

Важным параметром, определяющим эффективность всего процесса продувки, является контакт жидкой стали с атмосферой в зоне продувочного пятна. Увеличение этой площади вызывает потерю температуры расплава, ухудшение усвоения раскислителей и легирующих элементов, а также снижение качества металла из-за загрязнения эндогенными НВ и др.

Во многих исследованиях, направленных на изучение гидродинамики перемешивания и размеров продувочного пятна при продувке жидкой стали газом, используются методы физического и математического моделирования [1, 3, 6, 9–17]. Для математического моделирования наиболее часто применяют программный пакет ANSYS, а для физического — водные модели с различными маслами. Размеры продувочного пятна при моделировании определяются как функции геометрии газового сопла, количества сопел и их расположения, интенсивности продувки, геометрических размеров ковша, толщины шлакового слоя и т. д.

Несмотря на многообразие исследований и публикаций по данной проблеме, снижение интенсивности вторичного окисления при аргонной продувке остается актуальной научно-технической задачей, и необходим поиск эффективных способов ее решения.

На наш взгляд, перспективным направлением повышения эффективности газодинамической обработки стали является применение пульсирующего режима подачи инертного газа [9, 10]. Такой подход позволяет динамически управлять площадью контакта фаз, создавая условия для интенсификации массообмена при одновременном снижении интенсивности нежелательного вторичного окисления.

Результаты, полученные нами в работах [9, 10], свидетельствуют о значительных преимуществах нового способа по сравнению с используемыми аналогами.

Однако при расчете площади продувочного пятна ранее не учитывалось ее динамическое изменение в течение цикла пульсации, который состоит из двух одинаковых по продолжительности временных промежутков. В первую половину цикла подается продувочный газ, а во второй его подача отсутствует. Следовательно, площадь продувочного пятна будет динамически увеличиваться в момент подачи газа и уменьшаться во время паузы.

Поэтому *цель работы* заключалась в сравнительном анализе интенсивности вторичного окисления стали при стационарном (струйном) и пульсирующем режимах продувки, уточнении методики определения размеров продувочного пятна, а также разработке технологических рекомендаций по реализации нового способа продувки в производственных условиях.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие *задачи*:

– получение зависимостей, позволяющих провести оценку влияния вида и режимов продувки на площадь контакта расплава с атмосферой;

– усовершенствование математической модели для расчета площади контакта расплава с атмосферой в условиях динамического изменения продувочного пятна при пульсирующей подаче газа;

– разработка рекомендаций по модернизации действующей продувочной станции для реализации пульсирующего режима подачи газа в промышленных условиях.

Для изучения гидродинамики ванны при газодинамической обработке стали было использовано физическое моделирование, позволяющее визуализировать потоки, образующиеся при гомогенизации расплава, и динамику изменения размеров продувочного пятна при различных режимах обработки.

Параметры физической модели и методика исследований подробно описаны в работах [9, 10].

При стационарной продувке (по базовой технологии) и постоянной интенсивности продувочное пятно приобретает относительно стабильный контур, который фиксировался фотокамерой. Площадь изображения измерялась с помощью системы трехмерного проектирования «Компас-3D» или графического редактора Photoshop [9, 10].

В ходе физического моделирования изучалось влияние интенсивности продувки (Q , л/мин), а также частоты пульсаций (для пульсирующего режима, ν , п/мин) на степень раскрытия продувочного пятна (S_n , см²), время усреднения модельной жидкости (τ , с) и суммарную площадь ее контакта с атмосферой за это время (S_k , см²).

При газодинамической обработке стали аргонем в СК емкостью 300 т через две пористых пробки интенсивность продувки находится в пределах 200–1200 л/мин (100–600 л/мин на каждую). Такие диапазоны интенсивности соответствуют 4–24 л/мин (2–12 л/мин) для физической модели. Причем в различные периоды обработки интенсивность продувки через одну пробку имеет определенные значения [18]:

- 5 мин от начала обработки 100–250 л/мин (2–5 л/мин);
- 5–20 мин (десульфурация) 250–600 л/мин (5–12 л/мин);
- 20 мин и до конца обработки 100–250 л/мин (2–5 л/мин).

Для более точного определения площади продувочного пятна, динамически изменяющейся в процессе пульсирующей продувки, предложена новая математическая модель, основанная на интегрировании временной зависимости этого параметра, а изменение площади в течение цикла аппроксимировано квадратичной функцией

$$y = ax^2 + bt + c. \quad (1)$$

Для расчета размеров продувочного пятна с учетом динамики изменения его площади в течение одного цикла pulsa-

ции, состоящего из двух одинаковых временных промежутков (период подачи газа и паузы), использовали формулу

$$S(t) = S_1 - at^2. \quad (2)$$

где S_1 — площадь продувочного пятна в период подачи газа;

t — время одного цикла;

a — коэффициент, определяемый по формуле (3):

$$a = \frac{S_1 - S_2}{t_1^2}, \quad (3)$$

где S_2 — площадь продувочного пятна в период паузы;

t_1 — половина цикла ($t/2$).

Используя формулы (2) и (3), получаем выражение для определения среднего размера продувочного пятна за время одного цикла пульсации

$$\begin{aligned} S_n &= \frac{2}{2t_1} \int_0^{t_1} (S_1 - at^2) dt = \frac{1}{t_1} \cdot \left(S_1 t_1 - \frac{at^3}{3} \right) \Big|_0^{t_1} = \\ &= \frac{1}{t_1} \left(S_1 t_1 - \frac{at_1^3}{3} \right), \end{aligned}$$

тогда

$$S_n = S_1 - \frac{at_1^2}{3}.$$

Параметры моделирования и результаты, полученные при пульсирующей и стационарной продувке, представлены в таблице 1. При моделировании пульсирующей продувки использовалась методика планирования эксперимента. Для обоих режимов время гомогенизации определяли при одинаковых значениях интенсивности в диапазоне 2,3–28 л/мин, а диапазон изменения частоты пульсаций (ν) составлял 22–348 пульсаций в минуту (п/мин).

Влияние интенсивности продувки на время гомогенизации, размеры продувочного пятна и общую площадь контакта модельной жидкости с атмосферой за время обработки по базовой технологии показано на рисунке 1.

Таблица 1
Результаты моделирования различных режимов продувки

Q, л/мин	v, п/мин	τ, с	S _п , см ²	S _к , см ²
2,3	–	135	187	25186
6	–	130	293	38125
15	–	61	761	46442
24	–	20,75	1200	24891
28	–	15,4	1334	20569
2,3	185	112,5	309	34763
6	70	82,3	541	44526
6	300	74,1	507	37569
15	22	54	853,2	46073
15	348	41,4	854,1	35359
15	185	48	754,6	36220
24	70	41,4	897	37130
24	300	32,1	990,8	31805
28	185	25,4	1030,1	26165

Полученные данные свидетельствуют об увеличении S_п и уменьшении τ при более интенсивной продувке. При повышении Q до 15 л/мин величина S_к возрастает, а при дальнейшем росте интенсивности (15–28 л/мин) — снижается. Это указывает на преобладающее влияние S_п на интенсивность вторичного окисления в диапазоне Q=2–15 л/мин и τ — в диапазоне 15–28 л/мин.

Обработка данных спланированного эксперимента в программе Statistica позволила получить уравнения регрессии

$$S_p = 413,76 + 38,37Q - 1,59v - 0,61Q^2 + 0,03Qv + 0,003v^2,$$

$$S_k = 48796,1 + 440,9Q - 113,3v - 28,8Q^2 + 0,4Qv + 0,2v^2$$

и отобразить зависимости S_п и S_к от параметров Q и v в виде поверхностей, представленных на рисунках 2 и 3.

Анализ установленных зависимостей показал, что повышение частоты пульсаций в диапазоне 20–340 п/мин с шагом 40 п/мин положительно влияет на изменение поверхности контакта с атмосферой за время обработки (ΔS_к) до 260–280 п/мин.

Абсолютное снижение S_к составляет 3798–442 см² (8–1,2 %) при увеличении частоты в указанном выше диапазоне. Причем с ростом этого параметра влияние заметно снижается (рис. 4). Поэтому с точки зрения технологической и эксплуатационной целесообразности максимальное значение частоты должно быть не более 180–220 п/мин.

При сравнении S_к для стационарной и пульсирующей продувки были установлены оптимальные с точки зрения вторичного окисления значения частоты пульсаций в диапазоне расхода Q=4–24 л/мин (табл. 2).

При интенсивности продувки до 5 л/мин S_к для пульсирующей продувки больше, чем для стационарной, и целесообразно вести обработку по базовой технологии.

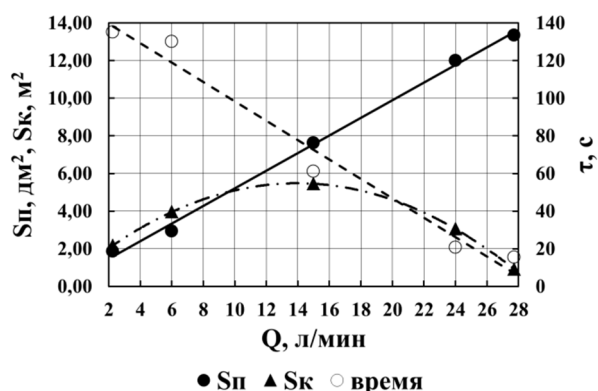


Рисунок 1 — Влияние Q на S_п, S_к, и τ

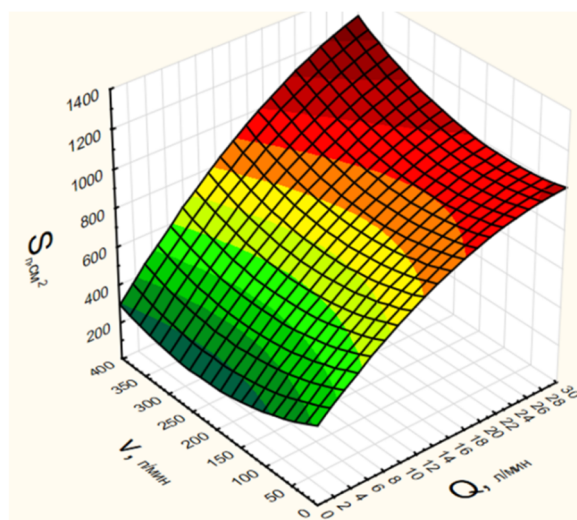


Рисунок 2 — Влияние Q и v на S_п

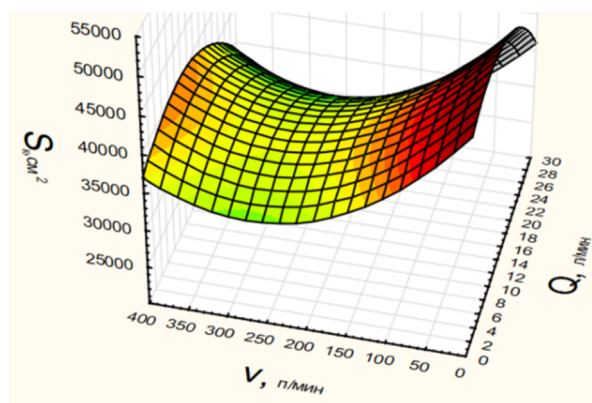


Рисунок 3 — Влияние Q и v на S_k

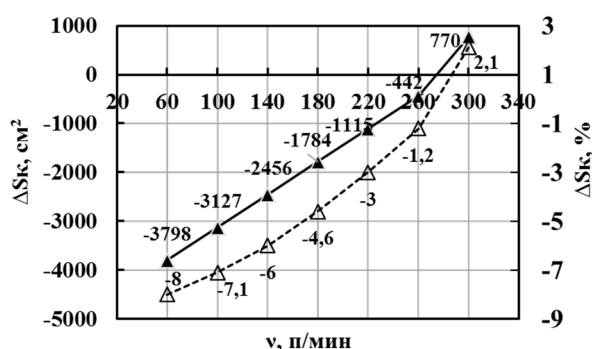


Рисунок 4 — Влияние v на ΔS_k

Таблица 2

Рекомендуемая частота пульсаций для различной интенсивности продувки

Q, л/мин		v, п/мин
Модель	СК 300 т	
>5–6	>250–300	220–260
>6–8	>300–400	60–220
9–21	450–1050	20–340
22–23	1100–1150	>100
24	1200	>180

Кроме того, наблюдается рост S_n (рис. 2) и снижение τ с увеличением интенсивности продувки. Для минимизации размеров продувочного пятна в диапазоне интенсивностей 2–24 л/мин максимальная допустимая частота пульсаций должна снижаться от 250 до 140 п/мин с градиентом 5 п/мин на каждый л/мин роста интенсивности.

Проведенные исследования еще раз подтвердили преимущества пульсирующей продувки, что обусловило необходимость

разработки технических решений для ее реализации в производственных условиях. В качестве объекта модернизации были рассмотрены действующие станции продувки металла инертным газом в СК агрегата «ковш-печь» (АКП) отделения непрерывной разливки стали кислородно-конвертерного цеха ООО «ЮГМК» (Алчевский металлургический комбинат).

Двухпозиционный АКП для независимого управления и ведения технологического процесса оборудован двумя идентичными станциями продувки стали (СПС) аргоном либо азотом в СК (на каждую позицию) производства компании VAI-FUCHS (ladle purging station, type: F2000, 3 lines; fabrication number: ALC531, ALC532). СПС имеет три регулируемые линии (две для продувки через пористые пробки и одну для продувки через фурму), оснащенные необходимыми запорной и регулирующей арматурой, работающей в ручном и автоматическом режиме, а также контрольно-измерительными приборами и оборудованием. Каждая линия рассчитана на рабочие параметры газовых сред:

- давление — 0–20 бар;
- интенсивность — 0–700 Нл/мин.

Для организации пульсирующей подачи аргона каждую линию предлагается дополнить разрешающим клапаном (для перехода на пульсирующий режим подачи газа) и клапаном пульсаций, обеспечивающим подачу газа с определенной частотой (рис. 5). В качестве разрешающего клапана может использоваться любой электромагнитный клапан прямого либо непрямого действия с пропускной способностью (давление и интенсивность) не ниже основных клапанов для стационарной и пульсирующей подачи газа. В качестве клапана пульсаций может быть применен клапан ХСРС ТНР20Е2-Т с приемлемыми для решения данной технической задачи характеристиками:

- тип управления — электромагнитное;
- давление номинальное — 25 бар;
- тип пилотного управления — непрямого действия;

МЕТАЛЛУРГИЯ

- мощность катушки — 33 ВА;
- класс изоляции — Н;
- рабочее напряжение катушки — 220 В;
- допустимые отклонения напряжения ±10 %;
- рабочее давление газа до 25 бар;
- рабочий диапазон температур — от –20 °С до +110 °С.

Клапан указанной серии отличается малым временем срабатывания (0,025–0,1 с), что позволит обеспечить широкий диапазон частоты открытия и закрытия (от 20 до 300 п/мин).

Управление клапанами и установка задания осуществляется посредством человеко-машинного интерфейса (Human-Machine Interface, HMI) комплексной автоматизированной системы управления (АСУ) Уровень 1 АКП. Для реализации пульсирующего режима подачи инертного газа требуется модификация программного обеспечения АСУ ТП Уровня 1, включающая:

- разработку и внедрение нового алгоритма управления запорно-регулирующей арматурой станции продувки, обеспечивающего циклическое изменение расхода газа;

– обновление интерфейса оператора HMI на экране управления продувкой с целью визуализации нового режима и предоставления инструментов для его настройки (установки периода пульсаций, длительности импульсов, расхода газа).

Предложенные изменения позволят:

- реализовать пульсирующий режим подачи инертного газа;
- осуществлять независимую регулировку частоты подачи газа на каждую линию отдельно;
- обеспечить одновременную или попеременную подачу инертного газа на каждую пробку с отдельным регулированием частоты пульсаций и расхода.

В результате проведенных исследований была предложена новая математическая модель расчета поверхности продувочного пятна, образующегося при пульсирующей подаче газа для газодинамической обработки стали в ковше, позволяющая учесть его динамические изменения в течение цикла одной пульсации.

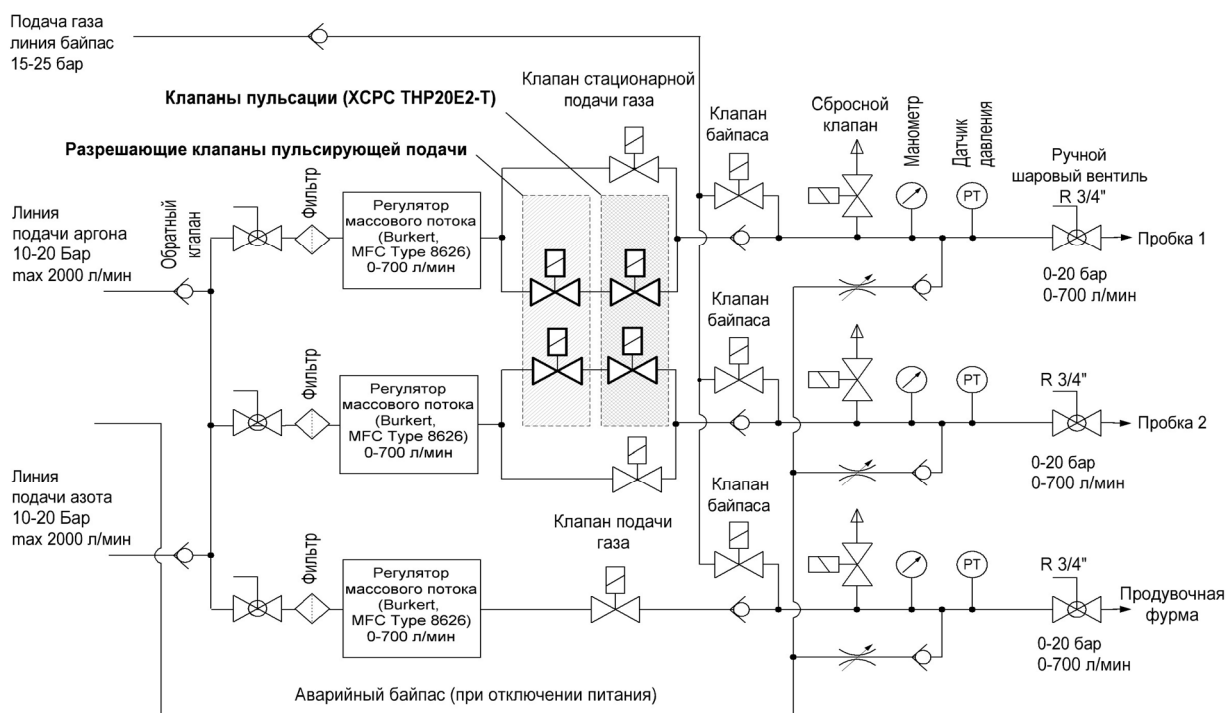


Рисунок 5 — Усовершенствованная схема для пульсирующей подачи продувочного газа

Получены зависимости, позволяющие качественно и количественно оценить влияние параметров обработки на размеры продувочного пятна и интенсивность вторичного окисления при продувке стали по базовой и новой технологии.

Предложены наиболее приемлемые значения частоты пульсаций при различных расходах продувочного газа, обеспечивающие меньший контакт стали с атмосферой за время обработки по сравнению с базовой технологией.

Показано, что для получения удовлетворительных параметров обработки и увеличения долговечности применяемого

оборудования частота пульсаций не должна превышать 180–220 п/мин.

Разработаны технологические рекомендации по внесению изменений в схему действующей станции продувки стали инертными газами, а также подобрано оборудование для реализации пульсирующей продувки в производственных условиях.

В ходе дальнейших исследований предполагается проведение сравнительного анализа эффективности стационарной и пульсирующей продувки при одновременном рассмотрении двух важных параметров — времени гомогенизации и интенсивности вторичного окисления.

Список источников

1. Волкова В. И., Рябов Д. Ю., Шиллер П. Р. Исследование процесса продувки газом при внепечной обработке стали // Вестник Пермского технического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. № 2. С. 64–75. EDN MBHTVJ
2. Зависимость содержания неметаллических включений в стали от состава шлака на установке «печь-ковш» / М. А. Власов [и др.] // Теория и технология металлургического производства. 2019. № 29. С. 19–23. EDN LXS BIM
3. Роговский А. Н., Шипельников А. А. К вопросу об эффективной технологии продувки аргоном в сталеразливочном ковше для гомогенизации и защиты от вторичного окисления стали // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник материалов V международной научно-технической конференции. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТИ», 2020. С. 97–102. EDN ULXTUP
4. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали : учебник для вузов. М. : Мир; АСТ, 2003. 528 с. EDN QMZMYF
5. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle a water model study / K. Chattopadhyay [et al.] // Ironmaking and Steelmaking. 2009. Vol. 36. Iss. 7. P. 537–542. DOI: 10.1179/174328109X445732
6. Численное моделирование гидродинамики перемешивания сталей в промышленном ковше при различных временных режимах подачи аргона / А. Н. Чичко [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 4 (36). С. 28–31.
7. Каменев А. А., Кожухов А. А., Семин А. Е. Исследование процесса продувки жидкой стали в сталеразливочном ковше инертным газом // XV Конгресс сталеплавильщиков : сборник трудов. Москва — Тула : РПК ПринтАП, 2018. Т. 1. С. 279–282. EDN BVRNAW
8. Зазян А. С., Терлецкий С. В., Шатило В. А. Опыт освоения технологии альтернирующей продувки стали в сталеразливочных ковшах на ОАО «БМЗ» // Литье и металлургия. 2013. № 1 (69). С. 14–16. EDN SZHCUR
9. Куберский С. В., Романчук Я. А., Саратовский Р. Н. Физическое моделирование пульсационного перемешивания металла в сталеразливочном ковше // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 47–55. EDN PIMMZN
10. Усовершенствование физической модели пульсационного перемешивания расплава в сталеразливочном ковше / С. В. Куберский, Р. В. Крестин, Р. Н. Саратовский, Я. Ю. Сервитовский // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2023. № 2 (76). С. 21–29. EDN KWL RVM

11. Моделирование электромагнитных сил и вихревых течений в установке «ковш-печь» / А. Л. Кухарев, М. И. Мокрицкий, С. А. Сбитнев, Т. В. Яковенко // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2024. № 5 (79). С. 49–55. EDN MQVUOE

12. Шипельников А. А., Бобылева Н. А., Коневзерова А. Д. Моделирование продувки стали аргоном в сталеразливочном ковше // *Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции / отв. ред. Е. В. Павлов. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т , 2020. С. 288–291. EDN KTEWJY*

13. Исследование продувки стали аргоном в сталеразливочном ковше / Е. Н. Тюленев [и др.] // *Металлург*. 2020. № 3. С. 58–63. EDN YTRHBJ

14. Cao Q., Nastac L. Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle // *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45. Iss. 10. P. 984–991. DOI: 10.1080/03019233.2018.1426697

15. Sheng D-Y. Study on steel/slag interaction in a gas stirring ladle by numerical simulation and physical modelling experiment // *Clean Steel : 7th International Conference on Clean Steel, Balatonfüred, HU, 04–06 Juny 2007. P. 183–192.*

16. Krishnakumar K., Irons G. A. A model study of slag eye formation during gas purging at the surface of a metal bath // *ICS 2005 : 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, US, 9–12 May 2005. Vol. 1. P. 833–844.*

17. Study of slag/metal interface in ladle treatment / P. Dayal, K. Beskow, J. Björkvall, Du Sichen // *Ironmaking and Steelmaking*. 2006. Vol. 33. Iss. 6. P. 454–464. DOI: 10.1179/174328106X149842

18. ТИ 229-СТ ККП-0117-151-2023 ООО «ЮГМК». *Обработка стали на установке ковш-печь. Алчевск, 2023. 36 с.*

© Куберский С. В., Подлипенская Л. Е., Крестин Р. В., 2025

© Шапка А. В., 2025

**Рекомендована к печати д.т.н., доц., проф. каф. АУИТ ДонГТУ Кухаревым А. Л.,
начальником патентного отдела ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 20.11.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,

Подлипенская Лидия Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник управления перспективных научных исследований Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Крестин Роман Валерьевич, ассистент каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Шапка Александр Владимирович, начальник бюро оптимизации технологических процессов службы АСУТП кислородно-конвертерного цеха Южный горно-металлургический комплекс,
г. Алчевск, Россия

Kuberskii S. V., Podlipenskaya L. E., *Krestin R. V. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Jacks.m3x@mail.ru), **Shapka A. V.** (Southern Mining and Metallurgical Complex, Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)

DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNOLOGY OF GAS-DYNAMIC REFINING AND HOMOGENIZATION OF LIQUID STEEL IN A LADLE

The advantages and disadvantages of various methods of gas-dynamic steel processing in a ladle have been examined. A method for calculating the surface of the blowing spot during pulsating gas supply is proposed, considering its dynamic changes within each pulse. The dependencies that allow to assess the impact of processing parameters on the intensity of secondary oxidation during steel blowing, on the traditional and new technologies have been obtained. The proposed pulse frequency values at different blow gas flows ensure lower secondary oxidation intensity comparing to the baseline technology. The technological recommendations to enhance the current blowoff station and realize the pulsating blowing in production conditions have been developed.

Key words: secondary steelmaking, steel-pouring ladle, mathematical and physical modeling, blowing, argon, pulsations, blowing spot, secondary oxidation.

References

1. Volkova V. I., Ryabov D. Yu., Shiller P. R. Studying the gas blowing process at secondary steelmaking processing [Issledovanie processa produvki gazom pri vnepechnoj obrabotke stali]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2010. Vol. 12. No. 2. Pp. 64–75. EDN MBHTVJ
2. Vlasov M. A. [et al.] Dependence of the content of non-metallic inclusions in steel on the composition of slag in the «ladle-furnace» installation [Zavisimost' sodержaniya nemetallicheskih vlyuchenij v stali ot sostava shlaka na ustanovke «pech'-kovsh»]. *Theory and Technology of Metallurgical Production*. 2019. No. 29. Pp. 19–23. EDN LXSBIM
3. Rogotovskiy A. N., Shipel'nikov A. A. On the topic of effective argon blowing technology in a steel ladle for homogenization and protection against secondary oxidation of steel [K voprosu ob effektivnoy tekhnologii produvki argonom v stalerazlivochnom kovshe dlya gomogenizacii i zashchity ot vtorichnogo okisleniya stali]. *Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva : sbornik materialov V mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Alchevsk : SEI HPE LPR “DonSTI”. 2020. Pp. 97–102. EDN ULXTUP*
4. Kudrin V. A. *Theory and technology of steel production: a textbook for universities [Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali: uchebnik dlya vuzov]*. M. : Mir ; ACT. 2003. 528 p. EDN QMZYMF
5. Chattopadhyay K. [et al.]. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle a water model study. *Ironmaking and Steelmaking*. 2009. Vol. 36. Iss. 7. Pp. 537–542. DOI: 10.1179/174328109X445732
6. Chichko A. N. [et al.]. Numerical simulation of the hydraulic dynamics of stirring steels in an industrial ladle at various time modes of argon supply [Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki peremeshivaniya stalej v promyshlennom kovshe pri razlichnyh vremennyh rezhimah podachi argona]. *Foundry production and metallurgy*. 2005. No. 4 (36). Pp. 28–31.
7. Kamenev A. A., Kozhuhov A. A., Semin A. E. Studying the process of blowing liquid steel in a steel ladle with inert gas [Issledovanie processa produvki zhidkoj stali v stalerazlivochnom kovshe inertnym gazom]. *XV Kongress staleplavil'shchikov : sbornik trudov. Moskva — Tula : RPK PrintAP. Vol. 1. 2018. Pp. 279–282. EDN BVRNAW*
8. Zazyan A. S., Terletskiy S. V., Shatilo V. A. Experience of mastering the technology of alternating steel blowing in steel-poring ladles at OAO “BMZ” [Opyt osvoeniya tekhnologii al'terniruyushchej produvki stali v stalerazlivochnykh kovshah na OAO «BMZ»]. *Foundry production and metallurgy*. 2013. No. 1 (69). Pp. 14–16. EDN SZHCUR
9. Kuberskii S. V., Romanchuk Ya. A., Saratovskiy R. N. Physical simulation of pulsed metal stirring in steel-poring ladles [Fizicheskoe modelirovanie pul'sacionnogo peremeshivaniya metalla v stalerazlivochnom kovshe]. *Collection of Scientific Papers of DonSTI*. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 47–55. EDN PIMMZN

10. Kuberskii S. V., Krestin R.V., Saratovskiy R. N., Servitovskiy Ya. Yu. Enhancing the physical model for pulsed melting in a steel hopper [Uovershenstvovanie fizicheskoy modeli pul'sacionnogo peremeshivaniya rasplava v stalerazlivochnom kovshe]. *Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building*. 2023. No. 2 (76). Pp. 21–29. EDN KWLRVM

11. Kukharev A. L., Mokrickiy M. I., Sbitnev S. A., Yakovenko T. V. Simulation of electromagnetic forces and electrocooling currents in the «ladle-furnace» installation [Modelirovanie elektromagnitnyh sil i elektrovihreyih techenij v ustanovke «kovsh-pech'»]. *Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building*. 2024. No. 5 (79). Pp. 49–55. EDN MQVUOE

12. Shipel'nikov A. A., Bobyleva N. A., Konevzerova A. D. Simulating the argon steel blowing in a steel-pouring ladle [Modelirovanie produvki stali argonom v stalerazlivochnom kovshe]. *Upravlenie kachestvom na etapah zhiznennogo cikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem: sbornik nauchnyh trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Main editor. Pavlov E. V. Kursk : SWSU. 2020. Pp. 288–291. EDN KTEWJY

13. Tyulenev E. N. [et al.]. Studying the argon steel blowing in a steel-pouring ladle [Issledovanie produvki stali argonom v stalerazlivochnom kovshe]. *Metallurg*. 2020. No. 3. Pp. 58–63. EDN YTRHBJ

14. Cao Q., Nastac L. Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 45. Iss. 10. Pp. 984–991. DOI: 10.1080/03019233.2018.1426697

15. Sheng D-Y. Study on steel/slag interaction in a gas stirring ladle by numerical simulation and physical modelling experiment. *Clean Steel : 7th International Conference on Clean Steel, Balatonfüred, HU, 04–06 Juny 2007*. Pp. 183–192.

16. Krishnakumar K., Irons G. A. A model study of slag eye formation during gas purging at the surface of a metal bath. *ICS 2005 : 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, US, 9–12 May 2005*. Vol. 1. Pp. 833–844.

17. Dayal P., Beskow K., Björkvall J., Sichen Du. Study of slag/metal interface in ladle treatment. *Ironmaking and Steelmaking*. 2006. Vol. 33. Iss. 6. Pp. 454–464. DOI: 10.1179/174328106X149842

18. TI 229-ST KKP-0117-151-2023 OOO «YuGMK». Steel processing in the ladle-furnace installation [Obrabotka stali na ustanovke kovsh-pech']. *Alchevsk*. 2023. 36 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuberskii Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University?
Alchevsk, Russia

Podlipenskaya Lidiia Evgenievna, Leading Researcher of the Advanced Scientific Research
Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Krestin Roman Valer'evich, Assistant Lecturer of the Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Shapka Aleksandr Vladimirovich, Head of the Process Optimization Bureau of the ACS TP Service of
the Oxygen-Converter Shop
Southern Mining and Metallurgical Complex,
Alchevsk, Russia