

УДК 669.184

НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНО-ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАФИНИРОВАНИЯ

Лубяной Д.А.¹, к.т.н., доцент кафедры экономики и управления (lubjanoy@yandex.ru)

Толстикова Ю.А.², инженер

Маркидонов А.В.^{2,3}, д.ф.-м.н., доцент

Кузин Е.Г.¹, доцент кафедры механики и машиностроения

Буймов Д.В.⁴, ведущий инженер-технолог сталеплавильного производства

¹ Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске

(653033, Россия, Прокопьевск, Кемеровская обл., ул. Ноградская, 19а)

² Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

(654041, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Циолковского, 23)

³ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

⁴ ОАО «ЕВРАЗ - Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

(654042, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., Космическое шоссе, 16)

Аннотация. В настоящее время все более широкое распространение для рафинирования чугуна и стали получает технология резонансно-пульсирующего рафинирования металла. В работе освещены этапы разработки резонансно-пульсирующего рафинирования для повышения качества изделий, представлены результаты физического и математического моделирования рафинирования металла азотом и аргоном. Установлено, что физическое моделирование дает хорошую качественную картину процессов продувки металла в ковше фурмами различной конструкции. Математическое моделирование позволяет количественно рассчитать оптимальные параметры продувки аргоном и азотом в ковшах различной емкости в зависимости от их размеров, диаметра фурмы и пульсатора. Проведена оценка влияния данного типа продувки металла на газосодержание, микроструктуру чугуна, его механические свойства, а также эксплуатационные свойства полученных изделий. Установлено, что прочностные свойства чугуна возросли с 91 – 105 до 130 – 170 МПа, твердость увеличилась с 137 – 150 до 163 – 182 НВ, плотность – с 6890 – 6900 до 7000 – 7200 Кг/м³. Кроме того, необходимо отметить, что применение представленной в работе технологии позволяет значительно снизить вредное влияние фосфора. Эксплуатационная стойкость изделий из доменного чугуна достигла лучших отечественных и зарубежных показателей. Данная технология эффективно показала себя и при непрерывной разливке стали на сортовой МНЛЗ. Разработанные технологии позволили при внедрении достичь наилучших показателей в отрасли с минимальными затратами. Необходимо отметить простоту внедрения данной технологии на существующих агрегатах внепечной обработки стали и на машинах непрерывной разливки стали. Разработанные технологии можно широко использовать в литейных, электросталеплавильных и кислородно-конвертерных цехах.

Ключевые слова: резонансно-пульсирующее рафинирование, фурма для продувки, примесь, расплав, температура, давление, теплота, энтальпия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-218-224

В последние годы на АО «Евраз ЗСМК» получило широкое развитие технология резонансно-пульсирующего рафинирования [1]. Эта технология позволила соединить в себе комплекс технологий, включающей пульсационную, ультразвуковую обработку с продувкой расплава инертным газом. Для отработки технологии использовали как физическое и математическое моделирование, методы промышленного эксперимента, так и современное диагностическое оборудование. Для сопоставления режимов продувки фурмами различных типов провели физическое моделирование процессов продувки. Установка для физического моделирования состояла из прозрачного сосуда, имитирующего чугуно-разливочный 10-т ковш в масштабе 1:5. Воздух на установку подавали из сетевого воздухопровода централь-

ной заводской лаборатории. Расход воздуха определяли расходомером РМО 63 ГУЗ и варьировали в пределах 0,012 – 0,680 м³/ч. Моделирующие жидкости – воду (металл) и вакуумное масло (шлак) продували воздухом через фурму с цилиндрическим и серповидным соплами, а также через фурму с цилиндрическим газодинамическим пульсатором конструкции, представленной на рис. 1 [1].

Продувка металла фурмой с газодинамическим пульсатором, как показало проведенное физическое моделирование, отличается особым характером истечения газа в жидкость. Отмечено, что глубина внедрения струи газа значительно меньше, чем при продувке серповидной фурмой (высокоскоростная продувка), но больше, чем при продувке через цилиндрические сопла. Объ-

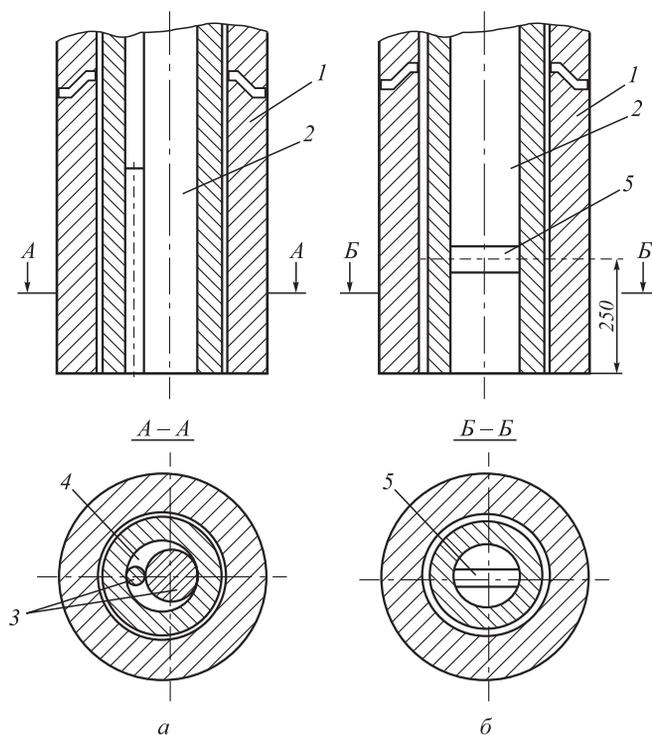


Рис. 1. Схема фурм с серповидным соплом (а) и соплом с цилиндрическим пульсатором (б):

- 1 – огнеупорная труба; 2 – стальная труба для подачи газа;
- 3 – фурменный наконечник со стержнем; 4 – серповидная щель;
- 5 – цилиндрический пульсатор

Fig. 1. Scheme of tuyeres with a sickle-shaped nozzle (a) and a nozzle with a cylindrical pulsator (b):

- 1 – refractory pipe; 2 – steel pipe for gas supply; 3 – tuyere tip with a rod;
- 4 – sickle-shaped gap; 5 – cylindrical pulsator

ясняется это тем, что при продувке в пульсирующем режиме колебания возникают благодаря пульсатору, установленному в фурме, который уменьшает проходное сечение фурмы и, тем самым, увеличивает скорость истечения газа. Однако эта скорость меньше, чем при продувке серповидной фурмой. Исследования показали, что при одинаковом расходе газа и глубине погружения фурмы диаметр зоны барботажа различен при продувке серповидной фурмой и фурмой с газодинамическим пульсатором [1]. Однако при высокоскоростной продувке и продувке пульсирующим потоком есть значительные различия, вызванные, в основном, видом истечения газа в жидкость и способом образования мелкодисперсной газовой фазы. Высокоскоростная струя, как показали результаты моделирования, вследствие большой кинетической энергии оказывает наиболее сильное динамическое воздействие на жидкость, что ведет к интенсивному перемешиванию металла и шлака и затягиванию частиц шлака в объем металла. В реальном ковше это приводит к вторичному окислению металла окислами шлака.

При продувке металла соплом в виде полой трубы также наблюдается затягивание частиц шлака в металл.

Объясняется это тем, что при прорывах через слой шлака крупных пузырей, наблюдаемых только при данной фурме, на слой шлака в месте прорыва оказывается локальное динамическое воздействие и частицы шлака только в этой зоне погружаются в металл. Для фурмы с соплом с цилиндрическим пульсатором характерно минимальное погружение частиц шлака в объем металла. На взгляд авторов, это вызвано следующим. Интенсификатором перемешивания в данном случае является не только струя газа на срезе фурмы, как при высокоскоростной продувке, а и сама фурма, собственная частота колебания которой, как будет показано ниже, стремится к собственной частоте колебания металла в ковше. Кроме того, частота схода вихрей с цилиндрического пульсатора, расположенного в самой фурме, также стремится к совпадению с собственной частотой колебания металла в ковше. Характер взаимодействия газа с жидкостью, как свидетельствуют исследования авторов, также принципиально иной. Ввиду этого, влияние данной продувки на металл более «объемно» вследствие того, что динамическое воздействие на металл с использованием эффекта резонанса передается от всей поверхности фурмы, погруженной в металл. Таким образом, как показало физическое моделирование, пульсирующая продувка имеет значительные преимущества не только по сравнению с продувкой через полое цилиндрическое сопло, но и по сравнению с высокоскоростной продувкой через серповидное сопло (резонансно-пульсирующее рафинирование). Однако физическое моделирование, как показывают и литературные данные, позволяет выявить закономерности в основном только на качественном уровне [1]. Для того, чтобы более точно подойти к разработке конструкций дутьевых устройств в ковшах различной емкости для обработки чугуна и стали, было необходимо разработать методы расчета для продувки чугуна через фурмы данной конструкции. Оптимизация этих дутьевых устройств может быть осуществлена с применением методов математического моделирования [1]. Интенсификация процесса перемешивания значительно увеличивается при наложении низкочастотных колебаний на металл путем подачи пульсирующего дутья, в спектре колебаний которого имеется низкочастотная составляющая, совпадающая с собственной частотой колебаний жидкости в самом ковше. Собственную частоту колебаний жидкости в цилиндре (ковше) высотой h и радиусом горизонтального основания r определяли по формуле

$$\omega_{mn}^2 = g\alpha_{mn}th(\alpha_{mn}h) \quad (1)$$

или

$$\omega_{mn}^2 = \eta_{mn}th\left(\eta_{mn}\frac{h}{r}\right), \quad (2)$$

где $\omega_{mn} = 2\pi f_{mn}$ – циклическая частота собственных колебаний, c^{-1} ; $\eta_{mn} = \alpha_{mn}r$ – корни первой производ-

ной функции Бесселя; α_{mn} – собственные числа задачи о главных колебаниях жидкости; g – ускорение свободного падения; $th(\alpha_{mn}h) = thx = e^x - \frac{e^{-x}}{e^x} + e^{-x}$ – гиперболический тангенс аргумента.

Тогда

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2}{D} g \eta_{mn} th \left(2\eta_{mn} \frac{h}{D} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

После определения собственной частоты колебаний металла в ковше с жидким металлом разработали конструкцию дутьевого устройства, генерирующего низкочастотную составляющую. В качестве источника колебаний использовали газодинамические цилиндрические пульсаторы. Сущность их работы состоит в следующем: в потоке газа находится плохо обтекаемое тело, например цилиндр, за ним образуется вихревой след, причем вихри сбегают с определенной периодичностью, зависящей от формы и размеров конструкции, а также от скорости потока. Отмечено, при обтекании цилиндра образуется вихревая дорожка Кармана. Направление вихрей попеременно меняется, угловая частота отделения вихрей определяется по формуле

$$w = \frac{0,22v}{2\pi K} \quad (4)$$

где v – скорость потока газа, м/с; $K = 0,016$ м – диаметр цилиндра в сопле фурмы; 0,22 – число Струхала.

Тогда скорость потока v будет определяться по формуле

$$v = \frac{4\pi^2 fK}{0,22} \quad (5)$$

а расход вдуваемого газа V , м³/ч, по уравнению

$$V = v(S_1 - S_2)3600, \quad (6)$$

где v – скорость потока газа, м/с; S_1 – площадь сечения сопла фурмы, м²; S_2 – площадь сечения пульсатора, м².

Решая совместно уравнения (1) – (6), определяют оптимальные параметры продувки (V_{01} – расход газа для соответствующей частоты) для соответствующих параметров ковша (где D – диаметр ковша, h – высота ковша) от размеров пульсатора.

Математическая модель по управлению режимами внепечной обработки металла методом резонансно-пульсирующего рафинирования представлена на рис. 2.

Математическая модель реализована в среде Excel. Подставив в математическую модель реальные размеры 60- и 10-т ковшей, получили результаты, представленные в табл. 1, 2.

Данные параметры продувки, определенные с помощью математического моделирования, включены в действующую в цехе технологическую инструкцию. Применяя математическое моделирование, разработали конструкции дутьевых устройств для продувки чугуна азотом или аргоном.

Продувка расплава в ковше происходит через погружаемые фурмы аргоном или азотом. За основу была взята обычная фурма «ложный стопор». Фурма представляет собой стальную толстостенную трубу длиной

Таблица 1

Параметры продувки (диаметр пульсатора 16 мм)

Table 1. Blowing parameters (pulsator diameter – 16 mm)

Ковш	D	h	f_{01}	f_{11}	f_{21}	V_{01}	V_{11}	V_{21}
60 т	2,45	2,50	0,611	0,787	0,882	7,746	9,981	11,179
10 т	1,30	1,35	0,839	1,080	1,210	10,634	13,701	15,347
Малый	1,00	1,00	0,956	1,232	1,380	12,123	15,622	17,498
Конвертерный	3,00	3,00	0,552	0,771	0,797	6,999	9,019	10,103

Таблица 2

Параметры продувки (диаметр пульсатора 20 мм)

Table 2. Blowing parameters (pulsator diameter – 20 mm)

Ковш	D	h	f_{01}	f_{11}	f_{21}	V_{01}	V_{11}	V_{21}
60 т	2,45	2,50	0,611	0,787	0,882	8,072	10,401	11,651
10 т	1,30	1,35	0,839	1,080	1,210	11,082	14,279	15,994
Малый	1,00	1,00	0,956	1,232	1,380	12,634	16,28	18,236
Конвертерный	3,00	3,00	0,552	0,711	0,797	7,294	9,399	10,529

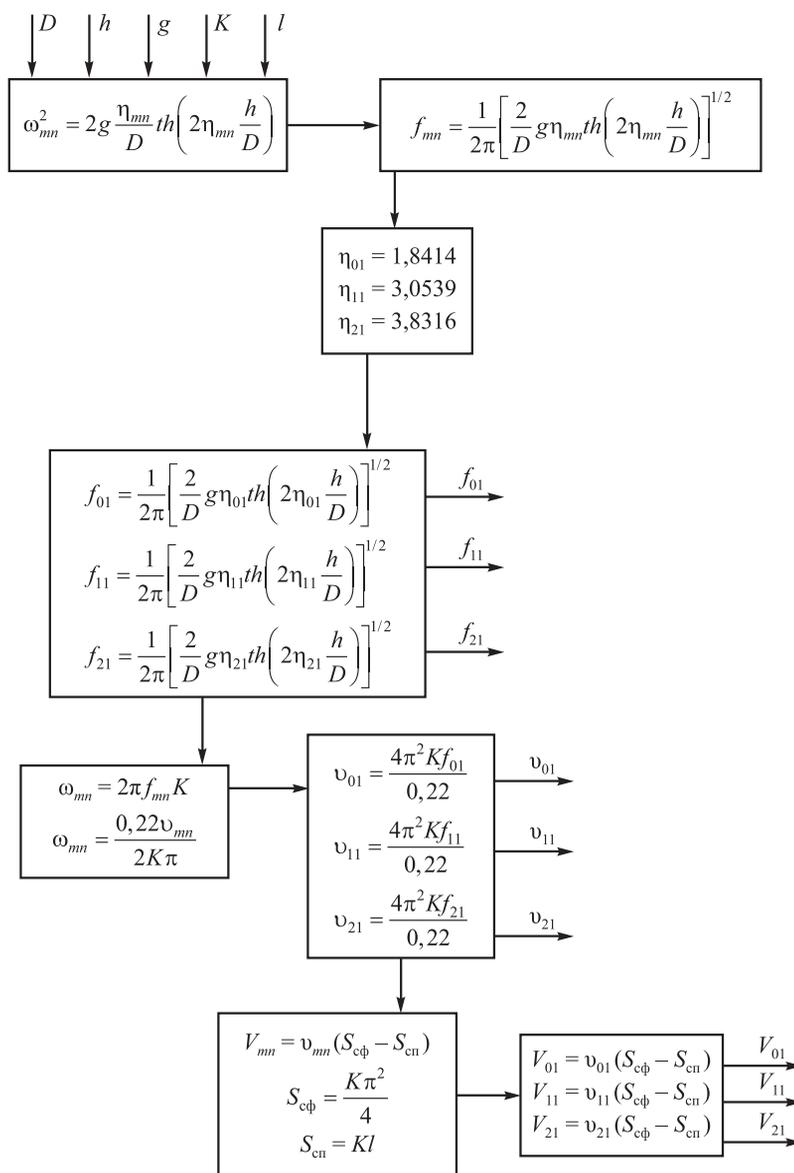


Рис. 2. Математическая модель резонансно-пульсирующего рафинирования доменного чугуна

Fig. 2. Mathematical model of resonant-pulsating refining of blast furnace cast iron

около трех метров, футерованную стопорными огнеупорными кольцами.

Применение фурмы с серповидным соплом (см. рис. 1, а) и пульсатором (см. рис. 1, б), как показали исследования на ковшах малой и средней емкости, при продувке чугуна с одинаковым расходом газа и глубиной погружения приводят к образованию в расплаве областей, насыщенных мелкими газовыми пузырями. При этом на поверхности металла не образуется крупных выплесков и бурунов. Однако сравнительный анализ влияния конструкции вышеуказанных фурм на процессы, происходящие в расплаве при продувке, как показало физическое моделирование и промышленные эксперименты, указывает на некоторые различия. Продувка фурмой с серповидным соплом (высокоскоростная продувка) характеризуется, как было выявлено на физическом моделировании, более сильным внедрением

ем струи газа в слой жидкости. При этом наблюдается более сильное перемешивание жидкости в объеме ковша, а также в области раздела металл – шлак, что приводит к затягиванию частиц шлака в металл, способствуя протеканию окислительно-восстановительных реакций в системе металл – шлак.

Продувка расплава чугуна через фурмы с наконечником с цилиндрическим пульсатором (см. рис. 1, б) обладает другим характером истечения газа, отличающимся от высокоскоростной продувки через серповидную фурму. Глубина внедрения данной струи газа в металл значительно меньше, чем при продувке серповидной фурмой. Наличие пульсатора не приводит к значительному увеличению скорости истечения газа и внедрению струи газа в жидкость на более значительную глубину, однако способствует получению высокодисперсной газовой фазы в виде пузырьков.

При погружении самой фурмы в расплав она служит мощным вибратором для самого ковша с металлом.

Расчет дутьевых параметров продувки промышленных фурм по модели (см. рис. 2) проводили, исходя из необходимости получения в потоке низкочастотной составляющей, совпадающей с собственной частотой колебания ковша. Анализируя частотные характеристики, полученные в эксперименте с применением промышленной установки и использованием импульсного прецизионного шумометра RFG00017, пришли к выводу, что наибольший уровень звукового давления приходится на частоты 63 – 250 Гц, что соответствует расходу газа 8 – 30 м³/ч и минимальному размеру неразрушившегося газового ядра. На практике это подтверждается отсутствием «пробойных режимов» и ярко выраженного пятна бурления в ковше, что свидетельствует об оптимальности заданных дутьевых режимов и с точки зрения подавления вторичного окисления металла. Представляет несомненный интерес оценить влияние данного типа продувки на газосодержание, микроструктуру чугуна, его механические свойства и эксплуатационные свойства изделий из него. В настоящее время в металлургии стоит задача находить способы снижения в металле или нейтрализации вредного влияния фосфора [2 – 16]. Необходимо отметить, что применение представленной в работе технологии позволяет значительно снизить вредное влияние фосфора [17 – 20].

Выводы. Установлено, что прочностные свойства чугуна возросли с 91 – 105 до 130 – 170 МПа, твердость увеличилась с 137 – 150 до 163 – 182 НВ, плотность – с 6890 – 6900 до 7000 – 7200 Кг/м³. Кроме того, необходимо отметить, что применение представленной в работе технологии позволяет значительно снизить вредное влияние фосфора. Эксплуатационная стойкость изделий из чугуна [21 – 25] достигла лучших отечественных и зарубежных показателей [1]. Данная технология эффективно показала себя и при непрерывной разливке стали на сортовой МНЛЗ. Разработанные технологии позволили при внедрении достичь наилучших показателей в отрасли с минимальными затратами. Необходимо отметить простоту внедрения данной технологии на существующих агрегатах внепечной обработки стали и на машинах непрерывной разливки стали. Разработанные технологии можно широко использовать в литейных, электросталеплавильных и кислородно-конвертерных цехах.

Многолетний опыт использования данной технологии на АО «Евраз ЗСМК» показал ее эффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лубяной Д.А., Переходов В.Г., Фойгт Д.Б., Буймов Д.В. Опыт применения резонансно-пульсирующего рафинирования в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черные металлы. 2019. № 6. С. 9 – 14.
2. Дауд А.Д., Семин А.Е., Котельников Г.И., Щукина Л.Е. Дефосфорация хромистых расплавов с использованием оксидов редкоземельных металлов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 54 – 59.
3. Робей Р., Уайтхед М. Внедоменная обработка чугуна с учетом конкретных производственных условий // МРТ. Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 2014. № 1. С. 16 – 24.
4. Георгадзе А.Г., Гернер В.И., Елашвили М.И. и др. Условия дефосфорации жидкого металла в разливочном ковше // Литье и металлургия. 2012. № 3(67). С. 117 – 119.
5. Levada A.G., Makarov D.N., Zakharov V.B. etc. Phosphorus removal from high-phosphorus hot metal in the converter // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 3. P. 228 – 230.
6. Бабенко А.А. Термодинамика и макрокинетика дефосфорации металла на заключительных стадиях окислительного рафинирования фосфористых чугунов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 33 – 35.
7. Краснянская И.А., Подгородецкий Г.С. Экспериментальное изучение механизма удаления фосфора из оксидных расплавов системы CaO – SiO₂ – MgO – Al₂O₃ – P₂O₅ в газовую фазу // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 41 – 46.
8. Грошкова А.Л., Полулях Л.А., Травянов А.Я. и др. Распределение фосфора между фазами при выплавке высокоуглеродистого ферромарганца в доменной печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 11. С. 12 – 16.
9. Laukart V.E., Chukvulebe B.O., Dobromilov A.A. etc. Converter processing of high-phosphorus hot metal for continuous casting // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. No. 8. P. 690 – 692.
10. Мухтар А.А., Мухамбекова М.К., Макашев А.С. и др. Термомагнитное обогащение и дефосфорация бурожелезняковых руд и концентратов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 708 – 713.
11. Aizatulov R.S., Pak Y.A., Sokolov V.V. etc. Conversion of high-phosphorus low-silicon pig iron with scrap preheating in oxygen converters // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 3 – 4. P. 109 – 112.
12. Aizatulov R.S., Pak Y.A., Sokolov V.V. etc. Use of low-silicon high-phosphorus pig iron in converter steelmaking // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 20 – 22.
13. Chernousov P.I., Golubev O.V., Petelin A.L. Phosphorus, lead, and arsenic in blast-furnace smelting // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 4. P. 44 – 49.
14. Goritskii V.M. On a Possible mechanism of the influence of phosphorus on the resistance of structural steels to brittle fracture // Metal Science and Heat Treatment. 2001. Vol. 43. No. 3 – 4. P. 120 – 123.
15. Sidorov V.V., Rigin V.E., Min P.G. etc. Effect of phosphorus and silicon on structure and properties of highly refractory cast alloys and development of effective methods for eliminating their unfavorable effect // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57. No. 5 – 6. P. 364 – 368.
16. Dub V.S., Dub A.V., Makarycheva E.V. Role of impurity and process elements in the formation of structure and properties of structural steels // Metal Science and Heat Treatment. 2006. Vol. 48. No. 7. P. 279 – 286.
17. Лубяной Д.А., Софрошенков А.Ф., Синявский И.А. и др. Технология нейтрализации вредного влияния фосфора в чугуне термостойких отливок // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 10. С. 47 – 50.
18. Lubyanoi D.A., Gorkavenko V.V., Makarov E.S. etc. Phosphorous cast iron for heat-resistant castings // Metal Science and Heat Treatment. 2002. Vol. 44. P. 452 – 453.
19. Andreev V.V., Lubyanoi D.A., Samsonov Y.N. etc. Development of extra-furnace treatment technology for blast-furnace iron in order to manufacture replacement metallurgical equipment with improved operating life // Metallurgist. 2014. Vol. 58. P. 492 – 495.
20. Valeev D., Zinovveev D., Kondratiev A. etc. Reductive smelting of neutralized red mud for iron recovery and produced pig iron for heat-resistant castings // Metals. 2020. Vol. 10. Article 32.

21. Kurylo P. Modernization and optimization of phosphoric cast iron casting // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 10. Article 1060.
22. Cai Q., Wei B. Recent development of ductile cast iron production technology in China // *China Foundry*. 2008. Vol. 5. No. 2. P. 82 – 91.
23. Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking // *The Member Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2001. Vol. 53. No. 10. P. 20 – 23.
24. Olawale J.O., Ibitoye S.A., Oluwasegun K.M. Processing techniques and productions of ductile iron: A review // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7. No. 9. P. 397 – 423.
25. Tiedje N.S. Solidification, processing and properties of ductile cast iron // *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. No. 5. P. 505 – 514.

Поступила в редакцию 5 марта 2020 г.
 После доработки 5 марта 2020 г.
 Принята к публикации 12 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 3-4, pp. 218–224.

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL BASES OF LADLE PROCESSING BY RESONANT-PULSATING REFINING

*D.A. Lubyanoi¹, Yu.A. Tolstikova², A.V. Markidonov^{2,3},
 E.G. Kuzin¹, D.V. Buimov⁴*

¹ Prokopyevsk Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Prokopyevsk, Kemerovo Region, Russia

² Novokuznetsk Branch of Kemerovo State University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

³ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

⁴ JSC “EVRAZ - Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Currently, the technology of resonant-pulsating metal refining (RPR) becomes more widely used for refining cast iron and steel. The paper highlights the stages of development of resonant-pulsating refining to improve the quality of products and presents the results of physical and mathematical modeling of metal refining with nitrogen and argon. It is established that physical modeling gives a good qualitative picture of the processes of metal blowing in the ladle by tuyeres of various designs. Mathematical modeling allows us to quantify the optimal parameters of blowing with argon and nitrogen in ladles of different capacities, depending on the ladle size and on diameters of tuyere and pulsator. The influence of this type of metal blowing on gas content, microstructure of cast iron, its mechanical and performance properties of products made of it was evaluated. It was found that the strength properties of cast iron increased from 91 – 105 to 130 – 170 MPa, the hardness increased from 137 – 150 to 163 – 182 HB, and the density also increased from 6890 – 6900 to 7000 – 7200 Kg/m³. In addition, it should be noted that the use of the presented technology can significantly reduce the harmful effects of phosphorus. The operational stability of products made of blast-furnace cast iron has reached the best domestic and foreign indicators. This technology has also proved to be effective in continuous casting of steel on high-grade casters. It made it possible to achieve the best performance in the industry with minimal costs during implementation. The developed technology is easy to implement on existing steel non-furnace processing units and on continuous steel casting machines. It can be widely used in foundries, electric steelmaking and oxygen-converter shops.

Keywords: resonant-pulsating refining, lance blowing, impurity, melt, temperature, pressure, heat, enthalpy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-218-224

REFERENCES

1. Lubyanoi D.A., Perekhodov V.G., Foigt D.B., Buimov D.V. Experience with the use of resonant-pulsating refining at JSC “EVRAZ ZSMK”. *Chernye metally*. 2019, no. 6, pp. 9–14. (In Russ.).
2. Daud A.D., Semin A.E., Kotel’nikov G.I., Shchukina L.E. Dephosphorization of high-chromium steels by using rare earth oxides. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.).
3. Robei R., Uaitkhed M. Ladle cast iron processing tailored to specific production conditions. *MRT. Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov*. 2014, no. 1, pp. 16–24. (In Russ.).
4. Georgadze A.G., Gerner V.I., Elashvili M.I. etc. Conditions of liquid metal dephosphorization in a casting ladle. *Lit’ye i metallurgiya*. 2012, no. 3(67), pp. 117–119. (In Russ.).
5. Levada A.G., Makarov D.N., Zakharov V.B. etc. Phosphorus removal from high-phosphorus hot metal in the converter. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 3, pp. 228–230.
6. Babenko A.A. Thermodynamics and macrokinetics of the metal dephosphorization in the final stages of oxidizing refining of phosphorus cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 33–35. (In Russ.).
7. Krasnyanskaya I.A., Podgorodetskii G.S. Experimental investigation of phosphorus behaviour in CaO – SiO₂ – MgO – Al₂O₃ – P₂O₅ oxide system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 41–46. (In Russ.).
8. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Y., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases at smelting of high-carbon ferromanganese in a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 11, pp. 12–16. (In Russ.).
9. Laukart V.E., Chukvulebe B.O., Dobromilov A.A. etc. Converter processing of high-phosphorus hot metal for continuous casting. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 8, pp. 690–692.
10. Mukhtar A.A., Mukhymbekova M.K., Makashev A.S., Savin V.N. Thermomagnetic concentration and dephosphorizing of brown clay iron ore and concentrates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 708–713. (In Russ.).
11. Aizatulov R.S., Pak Y.A., Sokolov V.V. etc. Conversion of high-phosphorus low-silicon pig iron with scrap preheating in oxygen converters. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 3-4, pp. 109–112.
12. Aizatulov R.S., Pak Y.A., Sokolov V.V. etc. Use of low-silicon high-phosphorus pig iron in converter steelmaking. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 1, pp. 20–22.
13. Chernousov P.I., Golubev O.V., Petelin A.L. Phosphorus, lead, and arsenic in blast-furnace smelting. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 4, pp. 44–49.
14. Goritskii V.M. On a possible mechanism of the influence of phosphorus on the resistance of structural steels to brittle fracture. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001, vol. 43, no. 3-4, pp. 120–123.
15. Sidorov V.V., Rigin V.E., Min P.G. etc. Effect of phosphorus and silicon on structure and properties of highly refractory cast alloys and development of effective methods for eliminating their unfavorable effect. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015, vol. 57, no. 5-6, pp. 364–368.
16. Dub V.S., Dub A.V., Makarycheva E.V. Role of impurity and process elements in the formation of structure and properties of structural steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 7, pp. 279–286.
17. Lubyanoi D.A., Sofroshenkov A.F., Sinyavskii I.A., Makarov E.S., Gorkavenko V.V. Technology of neutralizing the harmful effect of

- phosphorus in cast iron of heat-resistant castings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1999, no. 10, pp. 47–50. (In Russ.).
18. Lubyanoi D.A., Gorkavenko V.V., Makarov E.S., Kaminskaya I.A., Frolov A.G., Yakovenko N.A. Phosphorous cast iron for heat-resistant castings. *Metal Science and Heat Treatment*. 2002, vol. 44, pp. 452–453.
 19. Andreev V.V., Lubyanoi D.A., Samsonov Y.N., Kaminskaya I.A., Lubyanyaya S.V. Development of extra-furnace treatment technology for blast-furnace iron in order to manufacture replacement metallurgical equipment with improved operating life. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, pp. 492–495.
 20. Valeev D., Zinovveev D., Kondratiev A., Lubyanoi D., Pankratov D. Reductive smelting of neutralized red mud for iron recovery and produced pig iron for heat-resistant castings. *Metals*. 2020, vol. 10, article 32.
 21. Kurylo P. Modernization and optimization of phosphoric cast iron casting. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 10, article 1060.
 22. Cai Q., Wei B. Recent development of ductile cast iron production technology in China. *China Foundry*. 2008, vol. 5, no. 2, pp. 82–91.
 23. Manning C.P., Fruehan R.J. Emerging technologies for iron and steelmaking. *The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2001, vol. 53, pp. 20–23.
 24. Olawale J.O., Ibitoye S.A., Oluwasegun K.M. Processing techniques and productions of ductile iron: A review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016, vol. 7, no. 9, pp. 397–423.
 25. Tiedje N.S. Solidification, processing and properties of ductile cast iron. *Materials Science and Technology*. 2010, vol. 26, no. 5, pp. 505–514.

Information about the authors:

D.A. Lubyanoi, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Economics and Management* (lubyanoi@yandex.ru)

Yu.A. Tolstikova, *Engineer*

A.V. Markidonov, *Dr. Sci. (Phys.-math), Assist. Professor*

E.G. Kuzin, *Assist. Professor of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering*

D.V. Buimov, *Leading Engineer-Technologist of Steelmaking Shop*

Received March 5, 2020

Revised March 5, 2020

Accepted March 12, 2020