

УДК 669.184.244.66:658.011.56

СИНЯКОВ Руслан Валерьевич ⁽¹⁾, начальник отдела, кандидат технических наук
ХАРЧЕНКО Александр Викторович ⁽²⁾, доцент, кандидат технических наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОСФОРАЦИИ СТАЛИ В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАВКИ «DESIGNINGMELT»

⁽¹⁾ Технологическая компания Мин Цинь, г. Пекин, КНР

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия

В результате моделирования и промышленных исследований выплавки стали в кислородном конвертере с комбинированным дутьем показано, что на кривой поведения фосфора в металле всегда присутствует один или несколько локальных минимумов. Момент времени, соответствующий минимуму содержания фосфора в металле в начале продувки кислородом, зависит от многих факторов, включающих химический состав чугуна, его температуру, количество введенных материалов и т.д. Поэтому использование технологии с промежуточным скачиванием шлака во время продувки и полным оставлением шлака после его раздувки (ошлакования футеровки) может быть эффективным только при правильном определении момента остановки продувки кислородом, что возможно при наличии адекватной модели технологического процесса.

Ключевые слова: кислородный конвертер, фосфор, кислородная продувка, технология выплавки, моделирование

Введение и состояние вопроса. Факторы, влияющие на поведение фосфора в металле и на его конечное содержание в стали, достаточно хорошо изучены в литературе и подтверждены на практике [1,2]. Однако надежное и предсказуемое удаление фосфора к настоящему моменту возможно только при использовании технологии выплавки стали в двух конвертерах (сначала в одном конвертере выполняют дефосфорацию и десиликонизацию металла, затем в другом проводят обезуглероживание и нагрев) или при выплавке стали с низким содержанием углерода и умеренной температурой металла на выпуске из конвертера. Обе технологии, кроме преимуществ, имеют существенные недостатки: в первом случае большие эксплуатационные расходы и значительное снижение производительности, во втором – снижение выхода годного металла, повышение окисленности шлака, потеря металла в виде оксидов железа, а также снижение стойкости конвертера.

Как отмечают авторы работы [3], перспективным является технологический процесс с промежуточным скачиванием шлака по ходу продувки металла кислородом в конвертере и полным оставлением его после раздувки шлака для следующей плавки. Согласно заявленным результатам, использование представленной технологии может существенно повысить эффективность удаления фосфора и снизить себестоимость стали за счет уменьшения расходов материалов. В то же время на практике не всегда

удается получить заявленный эффект, а в некоторых случаях использование технологии с промежуточным скачиванием шлака даже ухудшает экономические показатели процесса.

Постановка задачи исследования. В работе была поставлена задача исследовать влияние различных факторов на поведение и конечное содержание фосфора в металле, а также выполнить оценку технологии с промежуточным скачиванием шлака с точки зрения дефосфорации.

Методика исследования. Для выполнения поставленной задачи использовали имитационное моделирование, которое выполняли с помощью программного комплекса «*Designing Melt*» [4]. Он представляет собой синтез последних достижений в теории и практике сталеварения, собранных в компактном программном продукте с дружественным интуитивно понятным интерфейсом. Основываясь на термодинамической модели конденсированной фазы, материальном и тепловом (в т.ч. энтальпийном) балансах, а также с учетом кинетики процессов и гидродинамики ванны, комплекс «*DesigningMelt*» позволяет рассчитывать огромное количество параметров выплавки и внепечной обработки стали.

Результаты исследования. Исследование поведения фосфора и технологии его удаления выполняли в условиях конвертерного цеха завода «*РОКСНЕК*» (г. Тяньзинь, КНР). В предлагаемой системе автоматизированного проектирования процесс начинается с предварительного задания длительности технологического

процесса и шага проектирования (моделирования и визуализации).

Затем выбирается сталеплавильный агрегат, в котором предполагается вести запланированный технологический процесс выплавки или обработки стали (что определяет метод выплавки). Назначаются характеристики сталеплавильного агрегата: геометрические размеры внешнего и внутреннего пространства; номинальная масса садки; масса футеровки и ее материал. В данном случае использовали данные о работе 150-тонного конвертера завода «РОКСНЕСК», дополнительно оборудованного донной продувкой инертным газом.

Далее выбирают оборудование, которым оснащен сталеплавильный агрегат и задают ограничения на режимы работы, ввода материалов и энергоносителей. Окончанием процедуры является структурный синтез собственно технологического процесса: выбираются технологические периоды процесса; устанавливается их последовательность и предварительная длительность каждого технологического периода плавки. В результате получили виртуальный сталеплавильный агрегат и технологический процесс выплавки стали, соответствующие своему реальному аналогу (рис. 1,а).

На следующем шаге выполняют верификацию проектного решения. Для этого необходимо задать или рассчитать значения параметров процесса, то есть выполнить параметрический синтез.

На этом этапе для каждого периода устанавливаются критерии окончания (по температуре, по времени, по расходу материала или энергоносителя). Назначаются конечные параметры технологического процесса и исходные условия: химический состав металла и шлака; температура системы; исходные массы фаз; состояние футеровки. Задаются дополнительные ограничения на использование материалов и оборудования: наличие на складе или лимит на плавку; при наличии нескольких устройств – общий расход на все устройства; минимальная и максимальная интенсивности расхода материалов и энергоносителей. Вводятся фактические данные о реальном технологическом процессе выплавки стали в кислородном конвертере и по заданным интенсивностям ввода материалов и энергоносителей, с учетом полного материального и энергетического балансов, термодинамического расчета и кинетической коррекции (скорость поступления реагентов, растворение, скорость усреднения ванны по химическому составу и темпе-

ратуре), имитируется плавка с заранее заданным (достаточно малым) шагом по времени.

Результатами параметрического синтеза являются (рис. 1,б):

- расчет химического состава металла, шлака и газа по ходу процесса;
- расчет массы металла, шлака и газа по ходу процесса;
- расчет температуры системы, средней температуры с учетом нерасплавленной шихты и температуры футеровки;
- расчет кинетики взаимодействия фаз;
- расчет материального и теплового балансов.

Среднестатистический технологический процесс получения полупродукта в 150-тонном конвертере, представленный на рис. 1,а, приняли за базовый, а полученную базовую плавку, в дальнейшем использовали для оценки влияния различных исходных данных на поведение фосфора по ходу процесса.

В качестве факторов, влияющих на конечное содержание фосфора в металле, приняли исходное содержание углерода, кремния, марганца и фосфора в жидком чугуна, а также его температуру (табл. 1).

Технологический процесс выплавки стали в кислородном конвертере состоит из последовательности операций во времени. Совокупность однотипных операций собрана в периоды. Их можно разделить на организационные периоды, в которых основным параметром является время, и технологические, в которых воздействуют на систему с целью получения заданного химического состава и температуры металла.

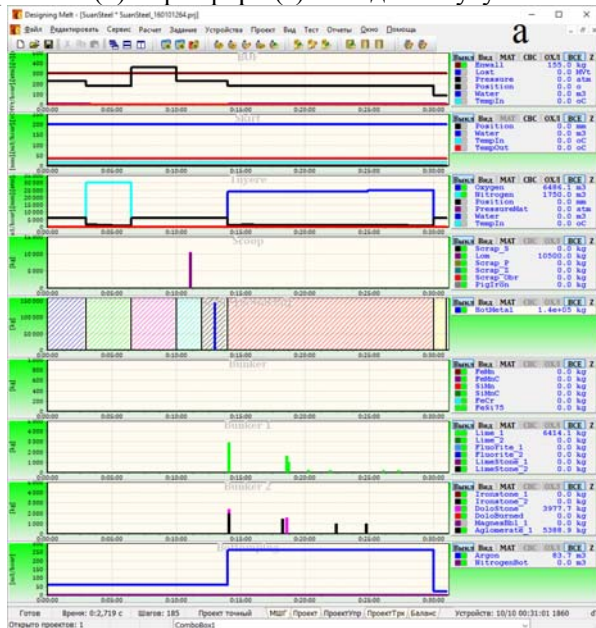
Поэтому при моделировании длительности организационных периодов не изменяли, принимая, что они не зависят от исходных условий.

Имитацию выполняли с использованием оптимизации, одним из критериев которой являлось одновременное получение в конце плавки заданного содержания углерода в металле 0,10-0,12 % и температуры ванны 1660-1670 °С. В качестве дополнительных использовали ограничения на конечную основность шлака, находящуюся в диапазоне 3,2-3,4, и содержание оксида магния в шлаке в пределах 9-10 %.

Исходные массы чугуна и металлолома не оптимизировали, поэтому их приняли одинаковыми для всех исследуемых вариантов.

На рис. 2 –представлены результаты моделирования технологического процесса выплавки стали в кислородном конвертере при разных исходных содержаниях углерода (а), марганца (б),

кремния (в) и фосфора (г) в жидком чугуна и его



температуры (д).

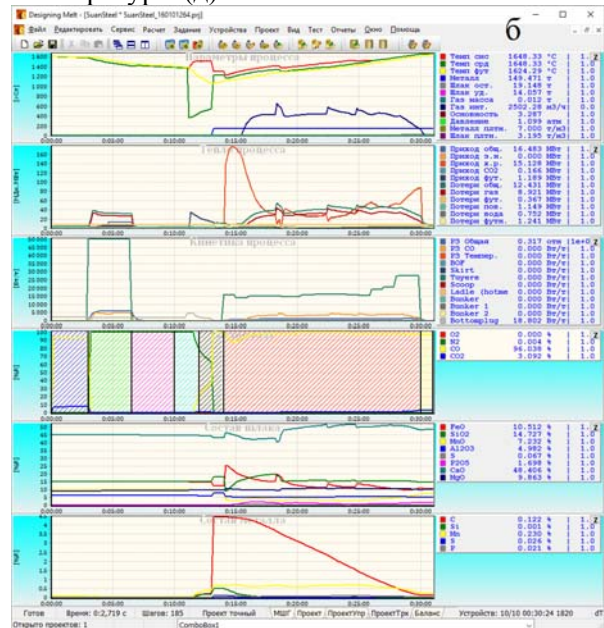


Рисунок 1 – Схема технологического процесса выплавки базовой конвертерной плавки в окне комплекса «DesigningMelt» (фрагмент): а – управляющие воздействия (ввод материалов, энергоносителей), б – траектория технологического процесса (расчетные параметры, качественно и количественно отражающие процесс)

Таблица 1 – Параметры жидкого чугуна

Параметры	Химический состав, %								Температура, °C
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ti	Cu	
Исходное значение	4,50	0,50	0,65	0,03	0,12	0,30	0,12	0,08	1290
Интервал исследования	3,9-4,7	0,2-1,2	0,2-1,2	-	0,04-0,16	-	-	-	1200-1360

Содержание элементов и температуру варьировали в пределах, представленных в табл. 1. Изменение каждого элемента и оценку его влияния на поведение фосфора выполняли при неизменных остальных параметрах жидкого чугуна, соответствующих базовой плавке. Расходы материалов (известь, доломит, агломерат) изменялись из-за оптимизации окончания продувки согласно условиям, описанным выше.

Анализ результатов моделирования (рис. 2 –) показал, что на кривой содержания фосфора в металле всегда присутствует один или несколько локальных минимумов. Это связано с особенностями поведения фосфора в металле, которое зависит от химического состава шлага, его основности, температуры системы, окисленности металла. На возможность такого поведения фосфора по ходу продувки металла кислородом указывали авторы работ [2,5].

Как видно из рис. 2 – , момент времени, при котором в начале продувки наблюдается экстремальное (минимальное) содержание фосфора

в металле, зависит от многих факторов и постоянно смещается во времени. Именно этот момент времени является оптимальным для остановки продувки и скачивания шлага. Очевидно, что определить его, исходя из опыта или наблюдений, достаточно сложно, а смена процессов дефосфорации на рефосфорацию происходит в достаточно узком временном диапазоне.

Для оценки одновременного влияния нескольких факторов на положение точки минимальной концентрации фосфора на кривой его содержания в металле, выполнили моделирование для нескольких экстремальных вариантов состава чугуна и его температуры (табл. 2).

Анализ влияния многофакторного изменения свойств исходного жидкого чугуна на поведение фосфора в металле показал (рис. 3), что момент времени, соответствующий минимальному содержанию фосфора в металле в начале кислородной продувки, варьируется в более широких пределах, чем было определено ранее, и составляет от 2,5 до 5,5 мин.

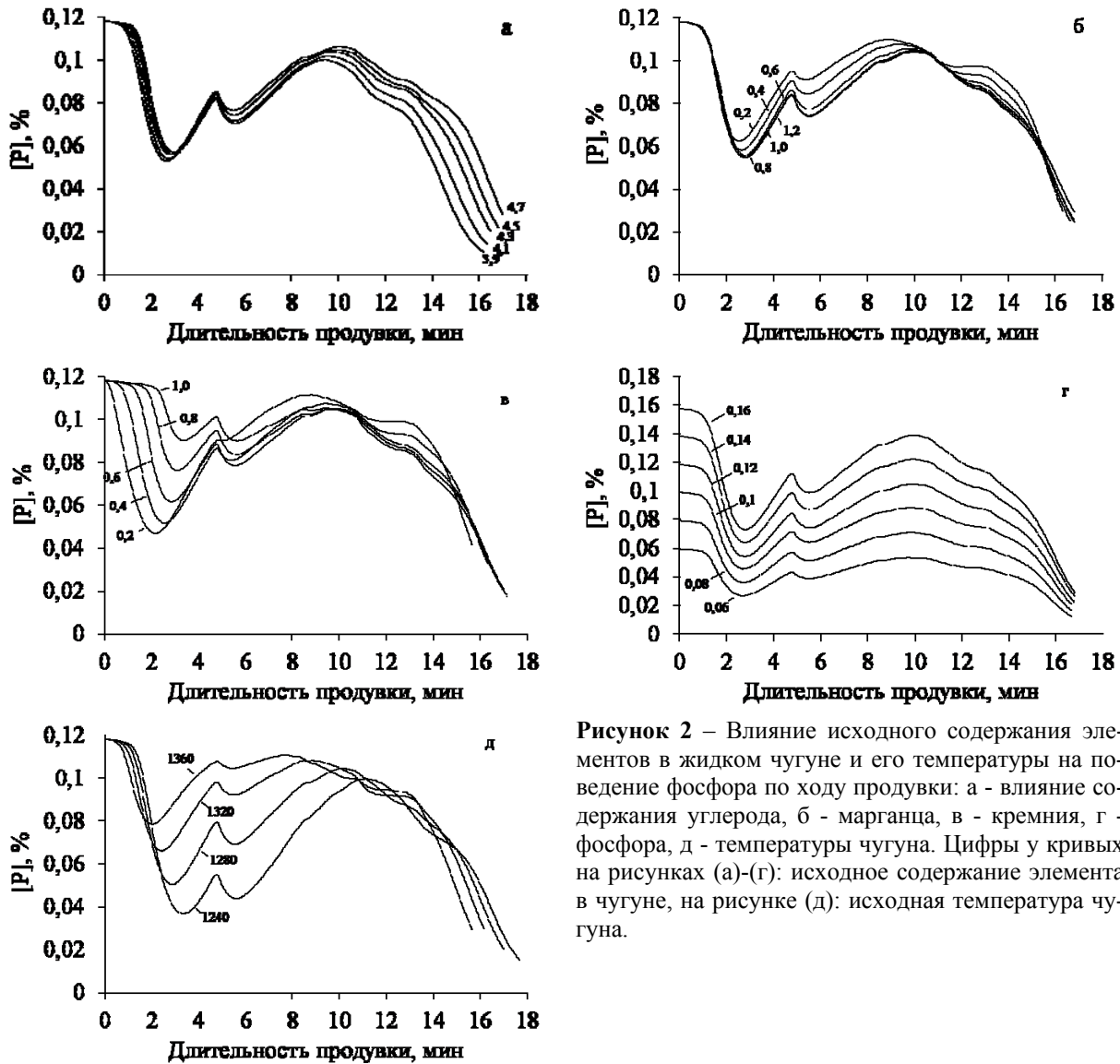


Рисунок 2 – Влияние исходного содержания элементов в жидком чугуна и его температуры на поведение фосфора по ходу продувки: а - влияние содержания углерода, б - марганца, в - кремния, г - фосфора, д - температуры чугуна. Цифры у кривых на рисунках (а)-(г): исходное содержание элемента в чугуна, на рисунке (д): исходная температура чугуна.

Таблица 2 – Варианты исходных параметров жидкого чугуна

Вариант	Химический состав, %								Температура, °С
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	
1	4,50	0,50	0,65	0,03	0,12	0,30	0,12	0,08	1290
2	4,50	0,50	0,65	0,03	0,12	0,30	0,12	0,08	1240
3	4,50	1,00	0,65	0,03	0,12	0,30	0,12	0,08	1240
4	4,50	0,20	0,65	0,03	0,12	0,30	0,12	0,08	1360

Результаты промышленных исследований поведения фосфора в металле в начальный период продувки, выполненный в 150-тонном конвертере в условиях конвертерного цеха завода «ROCKNECK», хорошо согласуется с расчетными данными.

Таким образом, по ходу кислородной продувки металла существует оптимальный момент

для выполнения операции промежуточного скачивания шлака. Очевидно, отклонение от этого времени снижает эффективность рассматриваемого процесса. Учитывая изменчивость исходных данных от плавки к плавке, определение оптимального момента остановки продувки становится трудновыполнимой задачей.

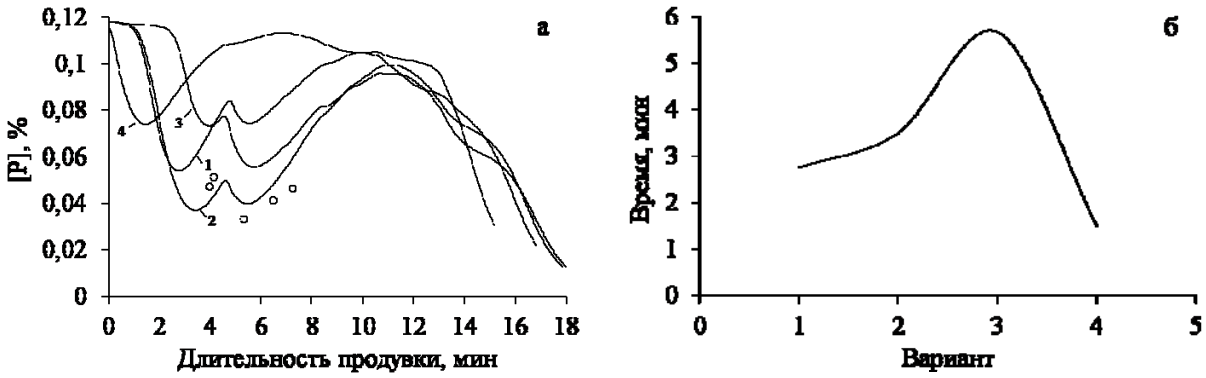


Рисунок 3 – Влияние исходного содержания элементов в жидком чугуна и его температуры на: а - поведение фосфора по ходу продувки и б - координаты оптимального содержания фосфора в металле. Цифры у кривых и значения оси абсцисс на рисунке б – вариант состава жидкого чугуна. Точки - фактические данные о процессе

В этом случае необходимо использовать адекватную модель технологического процесса, позволяющую по ходу плавки прогнозировать химический состав, массу и температуру металла, шлака и газа, а затем на основе получаемых результатов расчета определять оптимальную точку остановки продувки.

Для исследования технологии с промежуточным скачиванием шлака и оценки влияния различных параметров технологии на эффективность удаления фосфора использовали базовую

плавку. При этом заменили скачивание шлака после раздувки шлака на его скачивание после 2-4 мин. от начала продувки металла кислородом. Условия окончания плавки приняли аналогичными представленным ранее.

Базовая плавка получения стали в 150-тонном кислородном конвертере комбинированного дутья с промежуточным скачиванием шлака в период продувки для одного из вариантов моделирования представлена на рис. 4.

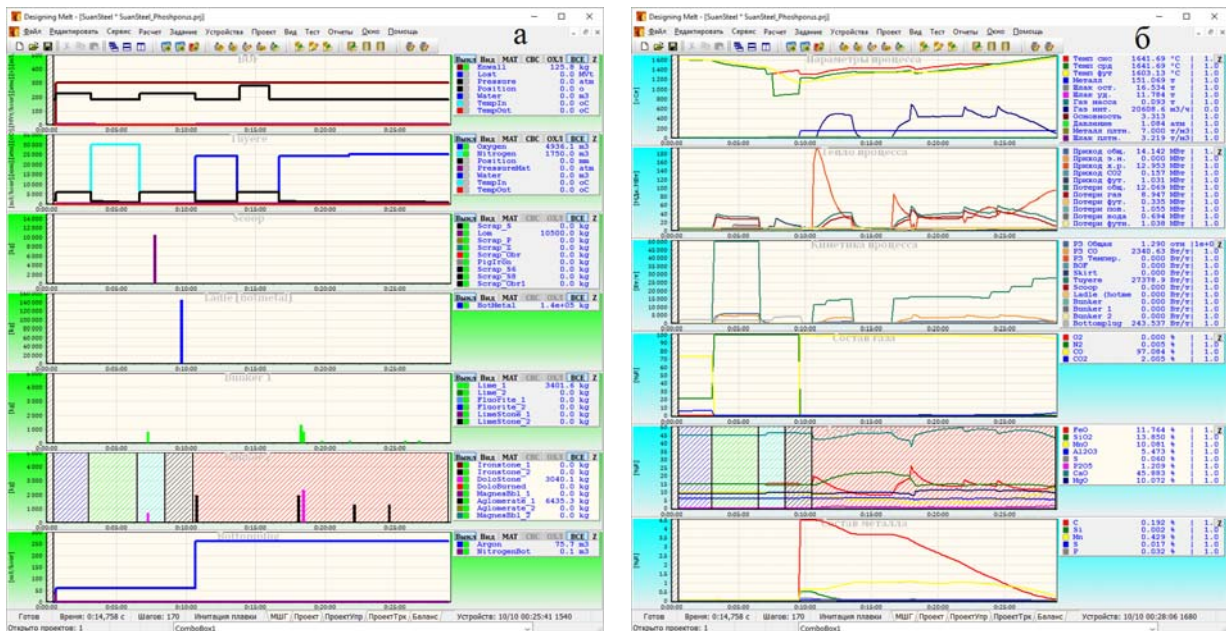


Рисунок 4 – Схема технологического процесса выплавки стали в кислородном конвертере с промежуточным скачиванием шлака. Обозначения - см. рис. 1

Время остановки τ выбирали так, чтобы отклонение от оптимального времени $\tau_{оп}$, соответствующего минимальному содержанию фосфора в металле, составляло от 10 до 120 секунд. Как

видно, степень удаления фосфора (рис. 5,б) снижается с увеличением отклонения от оптимального момента времени для промежуточного скачивания шлака.

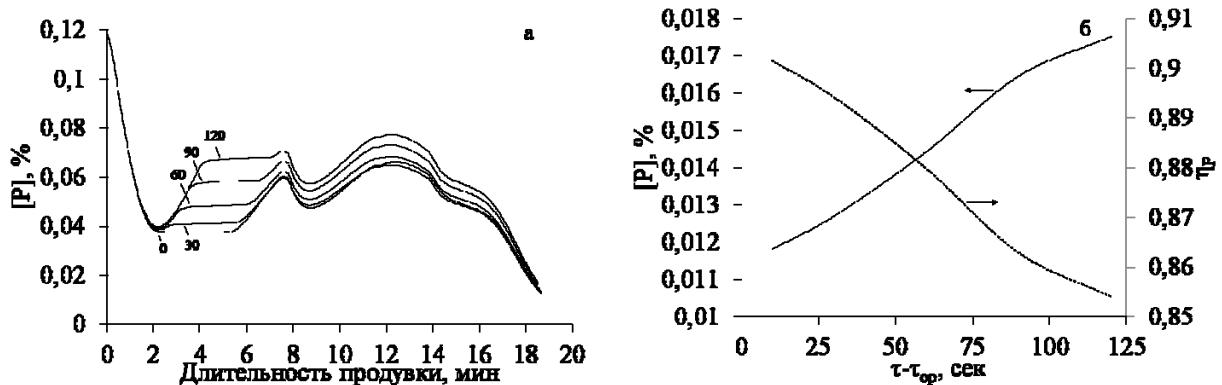


Рисунок 5 – Влияние ошибки определения оптимального момента времени остановки продувки на: а - поведение фосфора по ходу продувки, б - конечное содержание фосфора в металле. Цифры на рисунке (а) – отклонение от оптимального времени, с

Выполненные оценки технологического процесса показали, что необходимо скачивать не менее 40-50 % шлака, что позволяет получать конечный фосфор в металле на уровне 0,012-0,014 %, при содержании углерода в интервале 0,09-0,11 %. Скачивание большего количества шлака несколько уменьшает степень дефосфорации, и уже при более 60 % эффективность процесса снижается значительно, что связано с дальнейшими трудностями наводки жидкоподвижного шлака, способного ассимилировать фосфор.

Полученные результаты, отражающие рациональную массу удаленного шлака, не учитывают требования по марочному содержанию фосфора в готовой стали. При менее жестких условиях количество удаляемого шлака может быть пересмотрено в ту или иную сторону.

Выводы. На основе результатов моделирования и промышленных исследований выплавки стали в кислородном конвертере с комбинированным дутьем показано, что на кривой поведения фосфора в металле всегда присутствует один или несколько локальных минимумов.

Использование технологии с промежуточным скачиванием шлака может быть эффективным при правильном определении момента остановки продувки. Как показали результаты исследования, оптимальное время, соответствующее минимуму содержания фосфора в металле в начале продувки кислородом, зависит от многих факторов, включающих химический состав чугуна, его температуру, количество введенных материалов и т.д. Поэтому момент, соответствующий началу скачивания шлака, определить визуально или из опыта затруднительно. В этом случае необходимо использовать адекватную модель технологического процесса, позволяющую по ходу плавки прогнозировать химический состав, массу и температуру металла, шлака и газа.

Эффективность рассматриваемой технологии зависит от количества скачиваемого шлака и количества циклов плавки, выполненных с промежуточным скачиванием шлака. Имитационное моделирование показало, что скачивать необходимо от 40 до 60 % начального шлака.

Библиографический список

1. **Бойченко, Б. М.** Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология: Учебник [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск : РВА «Днипро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
2. **Баптизмандский, В. И.** Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов [Текст] / В. И. Баптизмандский, М. Я. Меджибожский, В. Б. Охотский. – Киев – Донецк : Вища школа. Головное изд-во, 1984. – 343 с.
3. **Pat. CN102212640 People's Republic of China, IPC C21C 5/28.** Converter steelmaking method capable of reducing slag quantity / Shougang Co., Ltd. – No 201110146021.0; appl. 01.06.2011; publ. 12.10.2011.
4. **Синяков, Р. В.** Разработка технологии выплавки и внепечной обработки стали с использованием программного комплекса «DesigningMelt» [Текст] / Р. В. Синяков // Современная электрометаллургия. – 2011. – № 2. – С. 34-37.
5. **Арсентьев, П. П.** Конвертерный процесс с комбинированным дутьем [Текст] / П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, С. В. Комаров. – М. : Metallurgy, 1991. – 176 с.

СІНЯКОВ Руслан Валерійович, кандидат технічних наук, начальник відділу, технологічна компанія «Мін Цинь» (Пекін, КНР). E-mail: rvsr@ukr.net

ХАРЧЕНКО Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: odds@i.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОСФОРАЦІЇ СТАЛІ У КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ПЛАВКИ «DESIGNINGMELT»

В результаті моделювання та промислових досліджень виплавки сталі в кисневому конвертері з комбінованим дуттям показано, що на кривій поведінки фосфору в металі завжди є присутніми один або декілька локальних мінімумів. Момент часу, що відповідає мінімуму вмісту фосфору в металі на початку продування киснем, залежить від багатьох факторів, які включають хімічний склад чавуну, його температуру, кількість введених матеріалів і т.д. Тому використання технології з проміжним скачуванням шлаку під час продування та повним залишенням шлаку після його роздувки (ошлакування футерівки) може бути ефективним тільки за правильним визначенням моменту остановки продування киснем, що можливо за наявності адекватної моделі технологічного процесу.

Ключові слова: кисневий конвертер, фосфор, кисневе продування, технологія виплавки, моделювання

SINYAKOV Ruslan, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Ming Xing Technology Company (Beijing, PRC). E-mail: rvsr@mail.ru

KHARCHENKO Olexander, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: odds@i.ua

STUDY OF THE FEATURES OF STEEL DEPHOSPHORIZATION IN THE OXYGEN CONVERTER WITH THE USE OF MELT DESIGNING SYSTEM «DESIGNINGMELT»

As a result of modeling and industrial studies of the smelting of steel in an oxygen converter with combined blowing, it has been shown that the curve of the behavior of phosphorus in the metal always contains one or more local minima. The time that corresponds to the minimum content of phosphorus in the metal at the beginning of the oxygen blowing, depends on many factors including chemical composition of the iron, its temperature, the amount of added materials, and so on. Therefore the use of technology with intermediate slag downloads during blowing and complete slag retention after blasting (slagging of the lining) can only be effective if the timing of the termination of oxygen blowing is correctly determined, which is possible with an adequate process model.

Key words: oxygen converter, phosphorus, oxygen blowing, smelting technology, modeling

Стаття надійшла до редакції 21.10.2017 р.
Рецензент, проф. С.О. Гаврилко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>