

**В.П.Пиптюк**, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0002-2915-1756

**А.С.Вергун**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5493-9214

**С.В.Греков**, н.с., ORCID 0000-0003-2848-0999

*Институт чёрной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины*

**С.Е.Самохвалов**, д.т.н., зав. каф., проф., ORCID 0000-0002-7362-213X

**К.С.Красников**, к.т.н., ст. преп., ORCID 0000-0002-4241-0572

*Днепропетровский государственный технический университет*

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ЧУГУНА В 30-т КОВШЕ. ЧАСТЬ 1**

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования процесса науглероживания чугуна с низким содержанием углерода, как попутного продукта производства титанового шлака, для проектируемой установки ковш-печь (УКП) применительно к условиям ПАО «Запорожский титаномагнийевый комбинат». Разработан технологический регламент и проведено численное исследование по науглероживанию металла в 30-т ковше на УКП. Для производства товарного чужкового чугуна используются попутные железосодержащие отходы. Цель работы - выявление факторов влияния внепечной обработки на оптимизацию технологии. Выполнено численное моделирование технология науглероживания жидкого низкоуглеродистого (до 2% углерода) чугуна кусковыми (фракция до 50 мм) графитом и коксиком, вводимых на поверхность ковшовой ванны (без учёта шлакового покрова). Проведены материальный и энергетический балансы процесса, изучены свойства науглероживающих материалов, оценён коэффициент диффузии углерода в жидком металле. Результаты исследований гидродинамических и тепловых условий в ковшовой ванне УКП оценены по контурным диаграммам скорости потоков и температурных полей для разных расходов аргона, подаваемого через донную и погружаемую фурмы. Определены оптимальные фракции содержащих углерод материалов. Показано, что обработка на УКП кусковым графитом требует меньшей продолжительности ( $\approx$  на 45 %) по сравнению с кусковым коксиком. Для ускорения процесса диффузионного растворения углерода необходимо периодически (через каждые 3 порции по 70 кг графита и коксика) нагревать расплав до температуры 1520-1530<sup>0</sup>С. Более эффективному усвоению углерода и уменьшению продолжительности процесса ( $\approx$  на 1/3) способствует инжекционный ввод порошкообразных графита и коксика. Исследования продолжаются в направлении использования порошковой проволоки для науглероживающей обработки чугуна на УКП.

**Ключевые слова:** Графит, коксик, науглероживание чугуна, установка ковш-печь

**Ссылка для цитирования:** Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Вергун А.С., Греков С.В., Красников К.С. Разработка технологического регламента науглероживания чугуна в 30-т ковше. Часть 1. //«*Фундаментальні та прикладні*

**Современное состояние вопроса.** Одной из основных задач на стадии разработки технологического регламента производства металлургической продукции является создание ресурсо- и энергосберегающего процесса, обеспечивающего высокое качество и потребительские свойства на современном комплексе оборудования.

Перед ПАО «Запорожский титаномагнийевый комбинат» (ПАО «ЗТМК») возникла проблема утилизации отходов производства титановых шлаков. С этой целью принято решение строительства линии по производству товарного чугуна из отходов - попутного железосодержащего продукта. Проектирование такой технологической линии выполняло ООО «Титанпроект» (г. Запорожье), по заданию которого сотрудниками ИЧМ НАНУ разработан технологический регламент и описан комплекс необходимого оборудования [1].

Проектируемая технологическая линия должна включать следующие основные участки: внепечной доводки чугуна, его десульфурации, разливки чугуна и подготовительный. Главной задачей участка внепечной доводки чугуна является корректировка его химического состава и температуры. В зависимости от производимой марки чушкового чугуна производится науглероживание попутного железосодержащего продукта рудотермической печи на установке ковш-печь (УКП). В металлургической практике корректировка металла по химическому составу обычно производится не более чем на 0,1-0,2 %. Для производства товарного чугуна необходимо науглероживание на 1-2,5 % в зависимости от исходного содержания углерода в чугуне.

Добавка науглероживающих материалов сопровождается значительным охлаждением металла из-за эндотермического характера процесса их растворения. В связи с этим корректировка чугуна по температуре требует увеличения продолжительности нагрева расплава на УКП, что негативно скажется на стойкости футеровки ковша, повысит расход электроэнергии и износ металлургического оборудования.

Поэтому при проектировании комплекса оборудования и разработке технологического регламента потребовалось предварительно численно исследовать процесс науглероживания.

**Цель работы.** Проведение численных исследований обработки низкоуглеродистого чугуна на УКП с целью доводки его химического состава до нормативных требований для чушкового передельного или литейного чугуна, а также выявление и оценка технологических факторов по управлению процессом внепечной обработки чугуна.

**Исходные данные и методика исследований.** Исходным материалом для численных исследований являлось техническое задание, а также проектируемое технологическое оборудование с соответствующими характеристиками.

В качестве объекта исследований рассматривалась металлическая ковшовая ванна УКП, аналогичная той, которая должна быть использована на ПАО «ЗТМК». Габариты ванны: верхний диаметр 1,912 м, нижний диаметр 1,892 м, высота – 1,7м. Ёмкость ванны по металлу – 30 т. Совмещённая схема крышки УКП и днища ванны показана на рис. 1



Для модуля нагрева расчётом определена активная мощность трансформатора – 8,4МВт. В численных исследованиях принималось, что тепловые потери в металлической ванне составляли 4°С/мин. Начальная температура нагрева металла принималась 1380°С.

Начальное содержание углерода в железосодержащем продукте - 2% [2].

В качестве науглероживающих материалов-добавок в настоящем исследовании использовали бой графитовых электродов и коксик. Теплофизические свойства науглероживающих добавок и чугуна представлены в табл. 1.

На первом этапе изучили гидродинамическое и тепловое состояния металлической ванны со следующими расходами аргона (л/мин) через донную фурму (ДФ): 0,08М; 0,16М; 0,25М; 0,33М, 0,41М; 0,50М; 1,0М, где М – максимальное в данном исследовании значение величины расхода аргона. На втором этапе изучили продолжительность растворения графита и коксика при вводе в ковш в кусковом виде и методом инжентирования порошкообразных частиц в потоке аргона для производства чушкового

чугуна с содержанием 4,2%[C]. Для этого предварительно оценили коэффициент диффузии углерода.

Таблица 1. Теплофизические свойства науглероживающих материалов-добавок и чугуна [3]

Материал	Температура солидус, К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоёмкость, Дж/кг	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Теплота фазовых превращений, Дж/кг
Графит	2873	2100	1200	25	1810000
Кокс	2873	1900	800	2	1400000
Чугун (2%С) твёрдый	1436	7000	837	20	276000
Чугун (2%С) жидкий	1673	7000	837	25	-

Нагрев металла до температуры 1530°C производили электрической дугой. Порции кусков добавки (фракция 5мм в поперечнике) двух видов принимали массой 70кг. Фиксировали продолжительность плавления намёрзшей корочки, продолжительность растворения добавки, продолжительность гомогенизации до коэффициента вариации по углероду 2%, содержание углерода в чугуне и его температуру. Для каждой порции углеродосодержащей добавки рассчитывали иной коэффициент диффузии углерода и температурные условия её усвоения. После ввода нескольких порций (охлаждение чугуна не ниже 1420°C), нагревали расплав до ≈1530°C. Применительно к кусковым добавкам расход аргона через ДФ составлял 0,25М.

При инжектировании монодисперсных частиц углеродосодержащих материалов (фракция 0,2 мм и 0,1 мм) расход аргона через ПФ составлял – 1,0М, а через ДФ 0,16М или 0,33М при условиях, аналогичных вводу кусковых материалов. После установления квазистационарного гидродинамического режима перемешивания расплава осуществляли продувку через ПФ в течении 60с, а затем с интенсивностью 1 кг/с производили подачу порошкообразного материала. После его ввода осуществляли продувку расплава ещё в течении 60с. Масса порций для графита и коксика составляла до 270 и 315кг соответственно.

На заключительном этапе сопоставляли экспериментальные данные по продолжительности растворения в чугуне графита и коксика, полученные методом горячего физического моделирования, с соответствующими расчётными значениями.

**Изложение основных материалов исследования.** Оценки диффузионных характеристик углерода в железосодержащих расплавах проводили с учётом литературных данных. Установили, что диффузионные характеристики для одних и тех же условий разнятся на несколько порядков [4] и [5], а коэффициенты диффузии имеют значения  $D [C] = 7,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно., а согласно [6] его величина равна  $1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

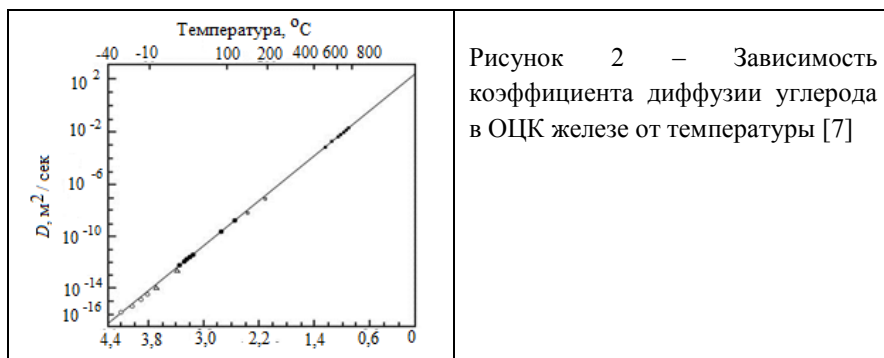


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента диффузии углерода в ОЦК железе от температуры [7]

Авторы [8] приводят экспериментальные данные коэффициентов диффузии углерода в жидких железе, никеле и кобальте при различных температурах и содержаниях углерода и др. элементов в расплавах. С использованием этих данных произвели статистическую обработку и получили уравнение коэффициента диффузии, которое и использовали в данном численном исследовании. Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$D[C] = 1.355 \cdot 10^{-9} \times e^{(0.3915 \cdot [\%C] - \frac{10837}{RT})}, \quad (1)$$

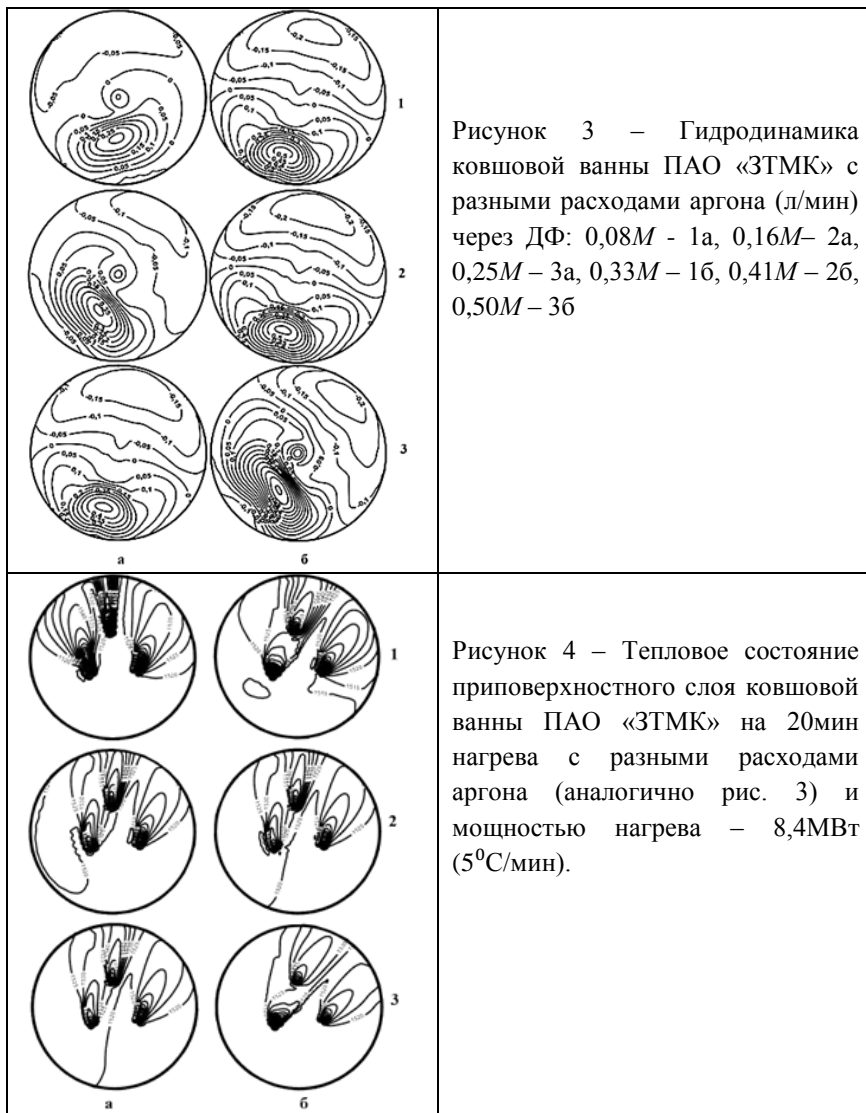
где  $[\%C]$  – содержание углерода в чугуна

$R$  – универсальная газовая постоянная

$T$  – температура чугуна (К)

При помощи программы “Gidrodinamika”, разработанной сотрудниками ДГТУ, на основе математических моделей массопереноса (далее по тексту - массо- и теплообмена) оценивали гидродинамическое состояние металлической ванны по контурным диаграммам усреднённой по высоте вертикальной составляющей скорости расплава (рис.3). Как для ковшей большой и средней ёмкости, так и для ковшей малой ёмкости подтверждено возрастание экстремальных значений вертикальной составляющей скорости с ростом интенсивности донной продувки [9-14].

Тепловое состояние металлической ванны также оценивали по контурным диаграммам (рис. 4), на которых показаны изотермы приповерхностного слоя чугуна. Такой выбор связан с тем, что именно в этом слое происходит плавление (растворение) легковесных ферросплавов и науглероживающих материалов.

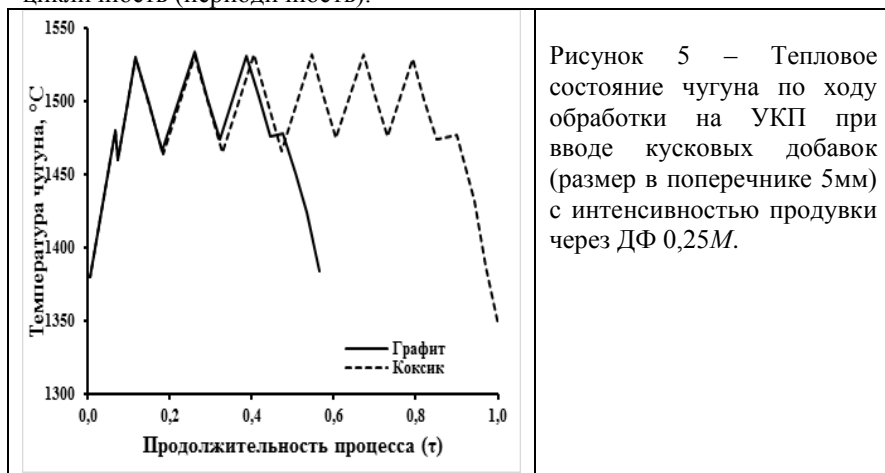


Установлено, что с ростом интенсивности продувки через ДФ наблюдалась тенденция постепенного снижения максимальной температуры (в местах воздействия электрических дуг) в приповерхностном слое расплава. При этом минимальная температура в этом слое практически не изменялась. Это явление, вероятно, можно объяснить возрастанием мощности перемешивания с ростом интенсивности продувки при постоянных тепловых стоках, которые обеспечивают охлаждение чугуна у стенок с большей скоростью, чем при принудительных конвективных потоках. Следует отметить, что с ростом интенсивности продувки расплава после отключения модуля нагрева происходит уменьшение продолжительности его гомогенизации по температуре как в объёме, так и в отдельных слоях ковшовой ванны (например, в приповерхностном слое градиент температур металла сначала перед отключением нагрева составлял 75°C и снизился до 3°C за 2 мин после его отключения при интенсивности продувки 0,25М).

Оценку эффективности производства товарного чугуна осуществляли по продолжительности усвоения науглероживающих добавок (использовали программу «Kinematica», ДГТУ) и продолжительности последующего нагрева расплава без учёта времени на технологические операции (замер температуры, отбор проб и ожидание результатов химического анализа). Для этого предварительно составили материальный и энергетические балансы. Определено, что при вводе кусковых добавок требуется 11 и 20 порций (по 70кг каждая) для графита и коксика соответственно. Увеличенное число порций для коксика объясняется, вероятнее всего, сравнительно малым коэффициентом усвоения углерода металлом. Предварительно численно рассчитали продолжительность растворения науглероживающих добавок при одинаковых условиях (продувка аргоном составляла 0,25М, температура и химический состав металла, место ввода), для разного фракционного состава (размер в поперечнике от 2мм до 50мм) и определили оптимальный фракционный состав кусковой добавки (размер в поперечнике 5мм) при ориентировочном объёме производства с цикличностью плавов через 6-8 часов. Более крупные куски коксика или графита увеличивали продолжительность обработки на УКП, а более мелкие оседали на шлаке. При этом усвоение углерода из них понижалось.

За время обработки на УКП коэффициент диффузии, рассчитанный по формуле (1) изменялся от  $1,50 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  при 2,10% [C] и  $T=1530^\circ\text{C}$  до  $3,18 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  при 4,11% [C] и  $T=1450^\circ\text{C}$  для графита, а для коксика изменялся от  $1,47 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  при 2,05% [C] и  $T=1530^\circ\text{C}$  до  $3,19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  при 4,14% [C] и  $T=1432^\circ\text{C}$ .

Результаты по усвоению углерода из кусковых добавок при принятом полном отсутствии шлака представлены на рис. 5. Порционный ввод значительных количеств материалов-добавок отражается на тепловом состоянии расплава, который становится индикатором ведения технологического процесса науглероживания и характеризует его цикличность (периодичность).



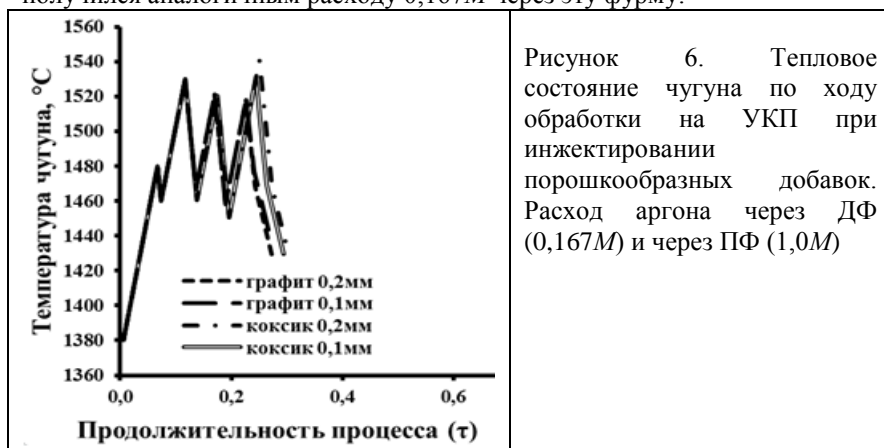
На этом рисунке и ниже за 1 (τ) принималась продолжительность обработки на УКП при науглероживании чугуна кусковым коксиком. Часть ломанной линии графика восходящей направленности обозначает нагрев, а нисходящей, охлаждение расплава за счёт ввода добавки совместно с потерями тепла через стенки и дно ковша и через свободную поверхность металла, либо потери без ввода таковой. Нагрев чугуна осуществлялся электрической дугой через каждые 3 порции подачи кусковых материалов-добавок. Такой регламент ведения технологии обеспечивает наиболее быструю скорость растворения науглероживающих материалов (если не происходит нагрева после 3-ей порции коксика, то его 4-ая порция растворяется почти в 2 раза медленнее 1-ой порции из-за более низкой температуры чугуна). Ввод науглероживающих кусковых материалов при работающем модуле нагрева чугуна по мнению авторов нежелателен, т.к. возможно их воспламенение и снижение уровня усвоения углерода. После ввода каждой порции добавок (кроме периода нагрева) в течении 5 мин осуществлялась гомогенизация металла по химическому составу. После последней порции добавок осуществлялась ещё 10-ти минутная гомогенизация, а полученная конечная температура чугуна при обработке



на УКП обеспечивала достаточный запас тепла жидкого металла для дальнейшей обработки (десульфурация магнием и разливка). В целом определено, что кусковый графит усваивается на  $\approx 45\%$  быстрее кускового коксика за счёт меньшего количества вводимых порций.

Следует отметить, что затраты электроэнергии для непосредственного нагрева чугуна на УКП, при выбранном технологическом регламенте, достаточно велики, а их величина в формировании себестоимости на единицу продукции может быть соизмерима с аналогичными затратами в ферросплавном производстве.

Одним из наиболее перспективных способов ввода добавок является инжестирование порошкообразных частиц в расплав. Результаты численного моделирования по этому способу ввода добавок представлены на рис. 6. Отмечено, что для расхода аргона  $0,33M$  через ДФ характер зависимости температуры чугуна от продолжительности процесса получился аналогичным расходу  $0,167M$  через эту фурму.



При этом влияние интенсивности продувки через ДФ несущественно для каждого вида науглероживающих материалов, т. к. преваляющую роль играет продувка через ПФ несущим инертным газом. Разница продолжительности усвоения порошкообразного коксика и графита находится в пределах нескольких секунд.

Экспериментальные исследования по продолжительности растворения науглероживающих добавок выполнялись методом горячено физического моделирования для различного химического и фракционного состава материалов в лабораторных условиях. Проверена адекватность результатов численных и экспериментальных исследований по вводу кусковых науглероживающих добавок [15]. Отклонение составило не более 15%, что приемлемо для металлургической практики.

В дальнейшем численные исследования будут продолжены в направлении использования технологического регламента науглероживания металла за счёт ввода порошковой проволоки, а также с использованием шлакового покрова в чугунной ковшовой ванне при обработке расплава на УКП.

### **Выводы**

1. Проведено численное моделирование гидродинамических и тепловых условий при обработке расплава на УКП в ковше малой ёмкости. Подтверждены закономерности, присущие аналогичным параметрам в ковшах средней и большой ёмкости.

2. Определено, что из рассмотренных вариантов более предпочтительным с точки зрения эффективности науглероживания чугуна является технологический регламент с использованием инжектирования графита с крупностью порошкообразных частиц 0,1 мм.

### **Библиографический список:**

1. Технологический регламент "Сквозная технология производства товарного чугуна из попутных железосодержащих отходов производства титановых шлаков". ИЧМ НАНУ, ООО «ТитанПроект», 2012. – 85с.
2. ООО "ЗТМК" – Запорізький титано-магнієвий комбінат. Retrieved from [sitiz@ztmc.zp.ua](mailto:sitiz@ztmc.zp.ua)
3. Теплофизические свойства промышленных материалов /Ильченко К.Д., Чеченев В.А., Иващенко В.П., Терещенко В.С. / Справочник. Днепропетровск, Сич. - 1999. -152с.
4. [Steelltime.ru](http://Steelltime.ru)
5. [www.helpw.ru](http://www.helpw.ru)
6. В.Ф. Мороз, Э.В. Приходько. Коэффициент диффузии элементов в расплавах и сплавах/ Сб. науч. тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии», ИЧМ НАН Украины. -№ 9, - 2004. - С. 161-169.
7. [works.doklad.ru](http://works.doklad.ru)
8. Диффузия элементов в жидких металлах группы железа. Лепинских Б.Н., Кайбичев А.В., Савельев Ю.А. – Наука. - 1984. – 192с.
9. Массо-, теплоперенос в ванне емкостью 140т установки ковш-печь переменного тока / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Павлюченков И.А. и др. // Сталь, 2007, №11. -С47-50.
10. Исследование гидродинамики 350-ти тонной ковшовой ванны при обработке стали на установке ковш-печь / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е. и др. // Металлург. - 2009. - №11. – С.47-50.
11. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е. и др. // Металлург. – 2011. – №7 – С. 50-53.
12. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей гидродинамики и массопереноса для условий обработки на установке ковш-печь / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Павлюченков И.А. и др. // Металлург. – 2013. - №3. – С.50-53.

13. Влияние усиления футеровки в бойной части сталеразливочного ковша на параметры перемешивания расплава / Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Логозинский И.Н. и др. // *Металлург.* – 2013. - №7. – С.29-34.
14. Рациональная компоновка продувочного узла 250т сталеразливочного ковша / Пиптюк В.П., Мосьпан В.В., Моцный В.В. и др. // *Металлург.* – 2016. - №4. – С.35-38.
15. Проверка адекватности исследований эффективности использования ферросплавов на основе компьютерного моделирования и промышленных экспериментов / Пиптюк В.П., Греков С.В., Андриевский Г.А. и др. // *Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в металлургии и машиностроении».* ITMM 2018. 27.03.18-29.03.18, Дніпро. - 2018. Секция 3, с. 88

### Reference

1. *Skvoznaia tekhnologiya proizvodstva tovarnogo chuguna iz poputykh zhelezosoderzhashchikh otkhodov proizvodstva titanovykh shlakov [Through technology for the production of commercial iron from associated iron-containing waste products of titanium slag production].* (2012). Tekhnologicheskii reglament ICHM NANU, ООО «TitanProyekt» [ISI NASU, LLC TitanProekt], 2012, 85p. (In Russian).
2. ООО "ZTMK" – Zaporiz'kyy tytano-mahniyevyy kombinat [LLC "ZTMK" - Zaporozhye titanium-magnesium plant]. Retrieved from sitiz@ztmc.zp.ua
3. Pichenko K.D., Chechenev V.A., Ivaschenko V.P. & Tereshchenko V.S. (1999). *Teplofizicheskiye svoystva promyshlennykh materialov [Thermophysical properties of industrial materials].* Reference. Dnepropetrovsk: Sich, 1999, 152p. (In Russian).
4. Retrieved from [Stelltime.ru](http://Stelltime.ru)
5. Retrieved from [www.helpw.ru](http://www.helpw.ru)
6. Moroz V.F. & Prikhodko E.V. (2004). Koeffitsiyent diffuzii elementov v rasplavakh i splavakh [The diffusion coefficient of elements in melts and alloys]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb.nauchn.tr.ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Sat. scientific tr. ISI NAS of Ukraine],* 2004, 9, 161-169. (In Russian).
7. Retrieved from [works.doklad.ru](http://works.doklad.ru)
8. Lepinsky B.N., Kaybichev A.V. & Saveliev Yu.A. (1984). *Diffuziya elementov v zhidkikh metallakh gruppy zheleza [Diffusion of elements in liquid metals of the iron group].* Nauka, 1984, 192p. (In Russian).
9. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E. & Pavlyuchenkov I.A. et al. (2007). Masso-, teploperenos v vanne yemkost'yu 140t ustanovki kovsh-pech' peremennogo toka [Mass and heat transfer in a bathtub with a capacity of 140 tons of an AC ladle-furnace installation]. *Stal' [Steel],* 2007, 11, P.47-50. (In Russian).
10. Piptyuk V.P., Polyakov V.F. & Samokhvalov S.E. et al. (2009). Issledovaniye gidrodinamiki 350-ti tonnoy kovshevoy vannы pri obrabotke stali na ustanovke kovsh-pech' [The study of the hydrodynamics of a 350-ton ladle bath during steel processing at a ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist],* 2009, 11, 47-50. (In Russian).

11. Piptyuk V.P., Polyakov V.F. & Samokhvalov S.E. et al. (2011). Izucheniye teplovogo sostoyaniya vanny ustanovki kovsh-pech' [The study of the thermal state of the bath of the ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2011, 7, 50-53. (In Russian).
12. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E. & Pavlyuchenkov I.A. et al. (2013). Eksperimental'naya proverka adekvatnosti matematicheskikh modeley gidrodinamiki i massoperenosa dlya usloviy obrabotki na ustanovke kovsh-pech' [Experimental verification of the adequacy of mathematical models of hydrodynamics and mass transfer for processing conditions at the ladle-furnace installation]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, 3, 50-53. (In Russian).
13. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E. & Logozinsky I.N. et al. (2013). Vliyaniye usileniya futerovki v boynoy chasti stalerazlivochnogo kovsha na parametry peremeshivaniya rasplava [The effect of reinforcing the lining in the bottom of the steel pouring ladle on the parameters of melt mixing]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, 7, 29-34. (In Russian).
14. Piptyuk V.P., Mospan V.V. & Motsny V.V. et al. (2016). Ratsional'naya komponovka produvochnogo uzla 250t stalerazlivochnogo kovsha [The rational layout of the blowing unit 250t steel pouring ladle]. *Metallurg [Metallurgist]*, 2016, 4, 35-38. (In Russian).
15. Piptyuk V.P., Grekov S.V. & Andrievsky G.A. et al. (2018). Proverka adekvatnosti issledovaniy effektivnosti ispol'zovaniya ferrosplavov na osnove kompyuternogo modelirovaniya i promyshlennykh eksperimentov [Verification of the adequacy of studies on the efficiency of using ferroalloys based on computer modeling and industrial experiments]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Informatsionnyye tekhnologii v metallurgii i mashinostroyeniі». ITMM (27.03.18-29.03.18) [International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering". ITM]*, Dnipro, 2018, 3, 88. (In Russian).

**В.П.Піптюк**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2915-1756,

**О.С.Вергун**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5493-9214,

**С.В.Греков**, н.с., ORCID 0000-0003-2848-0999,

*Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України*

**С.С.Самохвалов**, д.т.н., зав.каф., проф. ORCID 0000-0002-7362-213X,

**К.С.Красніков**, к.т.н., ст. вик., ORCID 0000-0002-4241-0572

*Дніпровський державний технічний університет (ДДТУ, м. Кам'янське)*

### **Розробка технологічного регламенту навуглицювання чавуну у 30т ковші. частина 1**

**Анотація.** Представлено результати чисельного моделювання процесу навуглицювання чавуну з низьким вмістом вуглецю, як попутного продукту виробництва титанового шлаку, для проектованої установки ківш-піч (УКП) з урахуванням умов ПАТ «Запорізький титаномагнієвий комбінат». Розроблено технологічний регламент і проведено чисельне дослідження навуглицювання металу в 30-т ковші на УКП. Для виробництва товарного чушкового чавуну використовуються попутні залізовмісні відходи. Мета роботи - виявлення

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2019. - Вып.33*

*«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33*  
 ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

факторів впливу позапічної обробки на оптимізацію технології. Виконано чисельне моделювання технологія навуглецювання рідкого низьковуглецевого (до 2% вуглецю) чавуну кусковими (фракція до 50 мм) графітом і коксиком, що вводяться на поверхню ковшового ванни (без урахування шлакового покриву). Проведено матеріальний і енергетичний баланс процесу, вивчені властивості вуглецьмісних матеріалів, оцінено коефіцієнт дифузії вуглецю у рідкому металі. Результати досліджень гідродинамічних і теплових умов у ковшового ванні УКП оцінені по контурним діаграмам швидкості потоків і температурних полів для різних витрат аргону, що подається через донні фурми. Визначено оптимальні фракції матеріалів, що містять вуглець. Показано, що обробка на УКП кусковим графітом вимагає меншої тривалості ( $\approx$  на 45%) у порівнянні з кусковим коксиком. Для прискорення процесу дифузійного розчинення вуглецю необхідно періодично (через кожні 3 порції по 70 кг графіту і коксика) нагрівати розплав до температури 1520-1530 $^{\circ}$ C. Більш ефективному засвоєнню вуглецю і зменшенню тривалості процесу ( $\approx$  на 1/3) сприяє інжекційне введення порошкоподібних графіту і коксика. Дослідження тривають в напрямку використання порошкового дроту для насичування вуглецем чавуну на УКП.

**Ключові слова:** графіт, коксик, навуглецювання чавуну, установка ковш-піч,

**V.P. Piptyuk**, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0002-2915-1756,  
**A.S. Vergun**, Dr. Sci., (Engin.), Senior Research Scientist, ORCID 0000-0001-5493-9214,

**S.V. Grekov**, Research Scientist, ORCID 0000-0003-2848-0999,  
*Iron and steel Institute NAS Ukraine by Z.I.Nekrasov*

**S.E. Samohvalov**, Dr. Sci., (Engin.), prof., head of dep., ORCID 0000-0002-7362-213X,

**K.S. Krasnikov**, PhD (Engin.), Senior teacher, ORCID 0000-0002-4241-0572  
*Dnieper State Technical University (DSTU, Kamenskoe)*

**Development of technological regulation for carbon ironing of iron in 30t ladle.**

### Part 1

**Summary.** The results of numerical simulation of the carbonization of low-carbon iron as a by-product of the production of titanium slag for the designed unit ladle-furnace (LF) installation as applied to the conditions of PJSC Zaporizhzhya Titanium-Magnesium Combine are presented. The technological regulations have been developed and a numerical study has been carried out on the carburization of metal in a 30-ton ladle at the LF. For the production of commercial pig iron, associated iron-containing waste is used. The purpose of the work is to identify factors of the influence of out-of-furnace processing on technology optimization. A numerical simulation was performed of the carburization technology of liquid low-carbon (up to 2% carbon) cast iron with lump (fraction up to 50 mm) graphite and coke introduced onto the surface of a ladle bath (excluding slag cover). The material and energy balances of the process were carried out, the properties of carburizing materials were studied, and the diffusion coefficient of carbon in a liquid metal was estimated. The results of studies of the hydrodynamic and thermal conditions in the bucket bath of the LF are estimated from the contour diagrams of the flow rates and temperature fields for different flow rates of

argon supplied through the bottom and submerged tuyeres. The optimal fractions of carbon-containing materials were determined. It has been shown that treatment on LF with lump graphite requires a shorter duration ( $\approx 45\%$ ) compared with lump coke. To accelerate the process of diffusion dissolution of carbon, it is necessary to periodically (every 3 portions of 70 kg of graphite and coke) heat the melt to a temperature of 1520-1530 ° C. Injection of powdered graphite and coke contributes to a more efficient absorption of carbon and a decrease in the duration of the process ( $\approx$  by 1/3). Research continues in the direction of using flux-cored wire for carburizing cast iron at LF.

**Keywords:** graphite, coke, carburization of cast iron, ladle furnace

**For citation:** *Piptyuk V.P., Samokhvalov S.Ye., Vergun A.S., Grekov S.V., Krasnikov K.S. Razrabotka tekhnologicheskogo reglamenta nauglerozhivaniya chuguna v 30-t kovshe. Chast' 1. [Development of technological regulations for the carburizing of cast iron in a 30-ton ladle. Part 1.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy ] 2020, 34. 129-142. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-123-142*

*Статья поступила в редакцию сборника 17.06.2019 года,  
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания  
редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)*