

Н.И. Захаров /д.т.н./, И.В. Тупилко, Е.В. Сапронова, И.В. Зябров  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕЖИМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

*Проблема энергосбережения решается применительно к технологии обработки стали порошковой проволокой (ПП) с силикокальциевым наполнителем. Использован метод компьютерного моделирования на основе математической модели процессов теплообмена. Модель согласуется с данными экспериментальных исследований. На основании результатов компьютерного моделирования проанализированы стадии плавления ПП с силикокальциевым наполнителем. Показано, что уменьшение ее диаметра при фиксированном массовом расходе силикокальция приводит к увеличению как раскисляющего воздействия кальция на металл, так и значения оптимальной (рациональной) скорости ввода ПП в расплав, существование которой показано на основе компьютерного моделирования. Количественно исследованы зависимости времени плавления оболочки ПП от плотности теплового потока и степени усвоения наполнителя ПП от скорости ее ввода в расплав стали. Разработана полуэмпирическая формула, которая определяет энергосберегающий режим интенсификации технологии.*

**Ключевые слова:** порошковая проволока, расплав стали, окисные включения, энергосбережение, теплообмен.

### Постановка проблемы

Проблема энергосбережения в ДНР, вследствие высокого удельного расхода материальных и энергоресурсов при интенсификации различных технологий, является одной из самых актуальных. Разработка энергосберегающих режимов интенсификации металлургических технологий на основе методологии подобия связана с необходимостью обеспечить равенство одноименных критериев подобия лабораторной модели и реального металлургического агрегата. Для многопараметрической технологии количество критериев подобия возрастает и возможность использования этой методологии, как известно, затруднительна.

### Анализ последних исследований и публикаций

Перспективным способом раскисления стали является ее обработка порошковой проволокой с силикокальциевым наполнителем, который в 1,5 раза дешевле продувки CaSi смесью в потоке аргона, при этом меньше выделяется дыма и ниже потери тепла [1]. Известно, что процесс обработки жидкой стали кальцийсодержащей порошковой проволокой для ее раскисления состоит из следующих стадий: плавление оболочки, взаимодействие наполнителя ПП с компонентами расплава, образование и рост комплексных окисных включений, удаление их из расплава

при раскислении стали продувкой аргоном различной интенсивности.

Важнейшим технологическим параметром интенсификации рассматриваемой технологии является скорость ввода ПП в жидкую ванну, рациональный выбор которой обеспечивает расплавление оболочки ПП ближе к днищу ковша. В этом случае жидкие капли легкоплавкого наполнителя ПП, всплывая в расплаве стали, максимально усваиваются им [2]. На существование рациональной скорости  $V_p$  ввода порошковой проволоки в жидкий металл со шлаком на его поверхности указывают экспериментальные исследования [3-5].

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является разработка энергосберегающих режимов интенсификации технологии, которые обеспечивают экономное расходование дорогостоящей порошковой проволоки.

### Основной материал исследования

Одним из методов разработки энергосберегающих режимов рассматриваемой технологии является компьютерное моделирование на основе детерминированных математических моделей [6,7].

С учетом специфики тепловой задачи, ее математическую постановку можно описать следующим уравнением:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho_i C_i r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r F_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \quad (1)$$

краевые условия к уравнению (1) имеют вид:  
– начальные условия:

$$T = T_3 = T_0; \quad R_1(0) = R_2(0) = R; \quad R_3(0) = R + \delta, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды;  $R$  – радиус области, занимаемой наполнителем ПП в начальный момент времени;  $\delta$  – толщина стальной оболочки в этот момент.

Диапазон изменения радиальной координаты  $r$  в каждой из областей:

$$i=1: 0 \leq r \leq R_1(\tau) = R + \Delta R_1(\tau), \quad \Delta R_1 < 0;$$

$$i=2: R_1(\tau) \leq r \leq R = R;$$

$$i=3: R \leq r \leq R_3(\tau) = R + \Delta R_3(\tau), \quad \Delta R_3(0) = \delta,$$

где  $R_1(\tau)$  – граница твердой фазы этого наполнителя;  $R_2$  – граница жидкой его фазы;  $R_3(\tau)$  – внешняя граница стальной оболочки проволоки.

Стальная оболочка в общем случае включает как первоначальную оболочку, так и намороженную на нее твердую корочку стали.

Очевидно, что  $R_3 > R_2 \geq R_1$ . При этом:  $\Delta R_3 > 0$  для налипания корочки и  $\Delta R_3 < 0$  – при плавлении оболочки ПП с корочкой.

– граничные условия:

а) ось симметрии ( $r=0$ ):

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

б) стык наполнителя и стальной оболочки ( $r=R$ ):

$$T_2 = T_3; \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad (5)$$

в) граница  $r=R_1$ :

$$T_1 = T_2, \text{ если } T_2 < T_n^H; \quad (6)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} + \rho_1 \cdot L_1 \cdot \dot{R}_1,$$

$$\text{если } T_2 = T_n^H, \quad (7)$$

г) граница  $r=R_3$ :

$$T_3 = T_c, \text{ если } T_3 < T_n^c; \quad (8)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} + \rho_3 \cdot L_3 \cdot \dot{R}_3 = \alpha(T_c^o - T_n^c),$$

$$\text{если } T_3 = T_n^c, \quad (9)$$

где  $T_n^H, T_n^c$  – температуры ликвидуса наполнителя ПП и стали;  $T_c^o, T_c$  – температура стали в объеме ковша и при  $r=R_3$ ;  $\rho_1, \rho_3$  – плотности наполнителя и стали;  $L_1, L_3$  – удельные теплоты фазовых переходов;  $\dot{R}_1, \dot{R}_3$  – скорости перемещения границ  $r=R_1$  и  $r=R_3$ .

Уравнение (1) с краевыми условиями решалось методом конечных разностей с явным выделением подвижных границ фазового перехода.

Стадии плавления ПП с силикокальциевым, т.е. легкоплавким, наполнителем имеют последовательность, показанную на рис. 1.

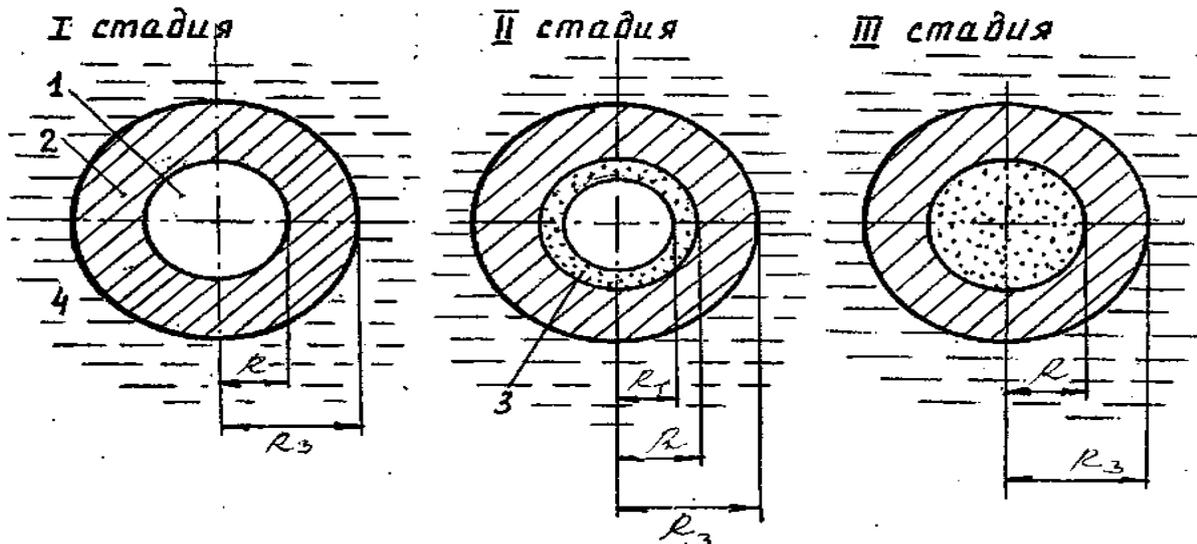


Рис. 1. Стадии плавления ПП с силикокальциевым наполнителем

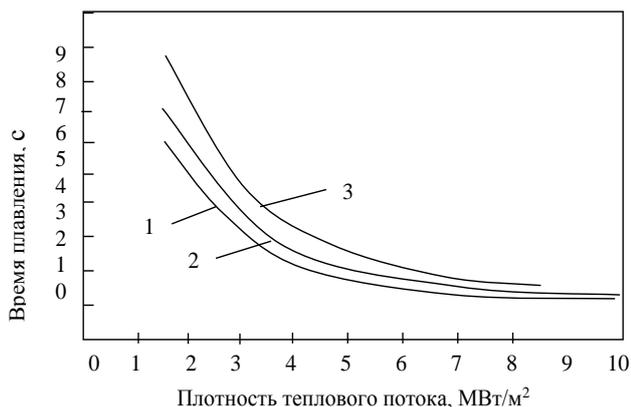


Рис. 2. Время расплавления оболочки ПП и корки стали, намерзшей на ПП, с силикокальцием в зависимости от плотности теплового потока, направленного на поверхность ПП: 1 – диаметр 8 мм; 2 – диаметр 10 мм; 3 – диаметр 13 мм

В начальные моменты времени, на стадии I, геометрия сечения ПП характеризуется двумя областями: 1 – твердый наполнитель ПП и 2 – стальная оболочка ПП с намерзшей на ней коркой стали (на рис. не показана).

Затем, на стадии II, по мере плавления наполнителя формируется третья область – расплав наполнителя ПП. И наконец, по завершению расплавления наполнителя, снова возвращаемся к двум областям, одна из которых, вместо твердой фазы наполнителя ПП, превращается в жидкое его состояние.

Численное параметрическое исследование на ПЭВМ проводилось для силикокальциевой проволочки на базе СК30 температуры расплава в сталеразливочном ковше 1590 °С, глубины жидкой ванны 6 м.

Как следует из рис. 2, зависимость времени плавления оболочки ПП с коркой стали от плотности теплового потока носит убывающий характер. Отсюда следует необходимость увеличивать скорость ввода ПП меньшего диаметра в расплав стали.

Количественная зависимость от параметров процесса степени усвоения кальция жидкой ванной, рассчитанная по методике [1], показана на рис. 3. Один из этих параметров – скорость ввода ПП в ковш. Как следует из рис. 3, при скорости ввода ПП как фактора интенсификации технологии, превышающей оптимум, происходит снижение степени усвоения кальция расплавом стали и раскисляющего воздействия кальция на металл, что согласуется с результатами экспериментальных исследований [3,4].

На рис. 4 при отмеченных выше базовых параметрах технологии показана зависимость сте-

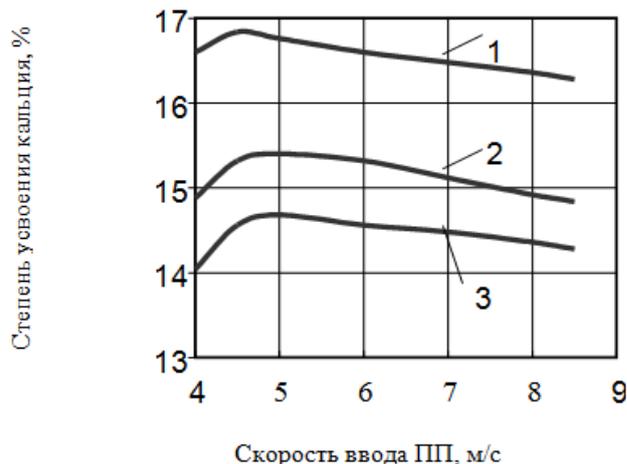


Рис. 3. Зависимость степени усвоения кальция от скорости ввода ПП и относительного содержания Са в наполнителе ПП: 1– $\theta=0$ ; 2– $\theta=0,1$ ; 3– $\theta=0,15$

пени усвоения кальция расплавом стали от диаметра и скорости вводимой ПП. Как следует из этого рисунка, уменьшение диаметра ПП при фиксированном массовом расходе силикокальция приводит к увеличению как раскисляющего воздействия кальция на металл, так и значения рациональной скорости ввода ПП.

На основании результатов компьютерного моделирования обобщим формулу работы [8] в виде:

$$V_p = \frac{KH}{17,3 - 0,01 \cdot T} \cdot e^{+\gamma(\delta/D)}, \quad (10)$$

где  $\gamma$  – положительный коэффициент настройки этой полуэмпирической формулы на условия реальной технологии, безр.;  $T$  – температура стали, °С;  $H$  – высота расплава в ковше, м;  $\delta, D$  – толщина оболочки и диаметр ПП, м;  $K=1$ , град/с.

При использовании формулы (10) (следуя концепции математических моделей смешанного типа [9]) сначала проводят статистические исследования серии плавок одной и той же марки стали с обработкой ПП одинаковой толщины ее оболочки и видом наполнителя. Определяют скорость ( $V_p$ ) ввода ПП в ковш, которая соответствует максимальному усвоению наполнителя. Коэффициент  $\gamma$  определяют по формуле:

$$\gamma = (D/\delta) \cdot \ln[V_p \cdot (17,3 - 0,01 \cdot T) / KH].$$

В соответствии с опытно-промышленными данными [5], при использовании ПП СК30 диаметром 10 мм, толщиной оболочки  $\delta=0,4$  мм при вводе в ковш со сталью марки 09Г2 при температуре 1600 °С и глубиной наполнения ковша 6 м скорость ввода ПП, соответствующая

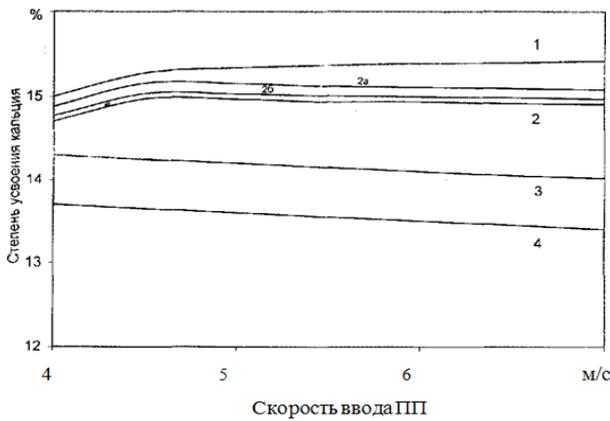


Рис. 4. Зависимость степени усвоения кальция от скорости ввода ПП и ее диаметра:  
1: d=8 мм; 2: d=10 мм; 3: d=13 мм; 4: d=15 мм; 2a, 2б – первое и второе приближения

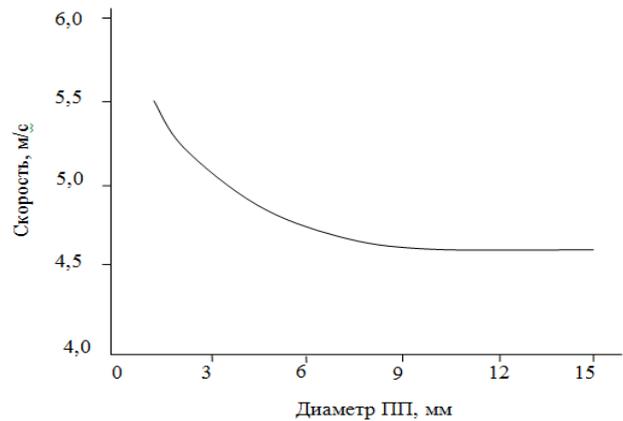


Рис. 5. Зависимость рациональной скорости ввода ПП в расплав стали от диаметра ПП:  
 $H=6,0$  м;  $T=1590$  °С;  $\delta=0,4$  мм;  $\gamma=0,454$

максимальному усвоению кальция, равна 4,7 м/с. В этом случае:

$$\gamma = \frac{10}{0,4} \cdot \ln \left[ \frac{4,7(17,3-16)}{6} \right] = 0,454.$$

Рис. 5 иллюстрирует зависимость рационального выбора скорости ввода ПП в расплав стали марки 09Г2 от диаметра проволоки. Как следует из этого рисунка, для диаметров ПП в диапазоне 8-15 мм рассматриваемая зависимость слабая и ею можно пренебречь. Вместе с тем, с целью интенсификации массообменных процессов и повышения производительности агрегата внепечной обработки стали путем одновременного ввода нескольких проволок меньшего диаметра [10,11] (при фиксированном массовом расходе их наполнителей одного состава) зависимость  $V_p(d)$  более выражена, и ее целесообразно учитывать.

Опытно-промышленные исследования проведены в конвертерном цехе МК «Азовсталь» для ПП с наполнителем СК30. Обрабатывали расплавы стали марки 09Г2 (с повышенными требованиями по их чистоте) на установке доводки металла (УДМ). Трайб-аппарат позволял вводить ПП по направляющей, близкой к вертикальной оси сталеразливочного ковша, со скоростью от 0,1 м/с до 6,5 м/с.

Результаты анализа проб на содержание Са приведены в табл. 1, из которой видно, что наибольшая степень усвоения Са наблюдается при скорости 4 м/с.

В этих условиях температура стали той же марки равна 1590 °С, толщина оболочки ПП и ее диаметр равны соответственно 0,4 мм и 13 мм. Глубина жидкой ванны – 6 м.

Использование формулы (10) с найденным значением  $\gamma$  дает:  $V_p=4,3$  м/с, что лишь

Табл. 1. Остаточное содержание Са в стали и степень его усвоения при различных скоростях ввода ПП СК30 в ковш на УДМ

Скорость ввода ПП, м/с (кол-во плавок)	Содержание Са, мас, %		Процент усвоения Са
	2-1	2-2	
1	2	3	4
2(15)	<0,0005	<u>0,0022-0,0032</u> 0,0027	<u>9,2-11,9</u> 10,6
3 (17)	<0,0005	<u>0,0025-0,0035</u> 0,0030	<u>10,4-13,0</u> 11,7
4 (20)	<0,0005	<u>0,0030-0,0050</u> 0,0040	<u>12,5-18,5</u> 15,5
5 (18)	<0,0005	<u>0,0028-0,0040</u> 0,0034	<u>11,7-14,8</u> 13,2
6 (19)	<0,0005	<u>0,0023-0,0033</u> 0,0028	<u>9,5-12,2</u> 10,9

Примечание: 2-1 – проба из сталковша на УДМ после первой усреднительной продувки аргоном (до ввода в расплав ПП); 2-2 – проба из сталковша на УДМ после второй усреднительной продувки (после ввода в расплав ПП).

Табл. 2. Загрязненность стали 09Г2ФБ комплексными кислородосодержащими включениями

Скорость ввода ПП, м/с	Загрязненность, балл средний			
	Осевая зона листа		1/3 толщины листа	
	Общ. объем, %	$\Sigma L / S, \text{ см/см}^2$	Общ. объем, %	$\Sigma L / S, \text{ см/см}^2$
2	0,0140	1,29	0,0111	0,79
4	0,0108	0,54	0,0080	0,14
6	0,0137	1,23	0,0094	0,68

незначительно расходится с опытно-промышленным значением (4,0 м/с).

Для оценки степени загрязненности металла комплексными кислородосодержащими включениями (по завершении гомогенизации жидкой ванны продувкой аргоном) проводили металлографические исследования образцов, взятых от штрипсов плавок (брали по 4 шлифа для каждой плавки: 2 – по осевой зоне и 2 – на расстоянии 1/3 толщины листа).

В качестве показателя эффективности технологии использовали величину, характеризующую суммарную длину этих включений в единице площади шлифа  $L_o/S_o$  см/см<sup>2</sup>,  $L_o$  – суммарная длина включений;  $S_o$  – площадь шлифа. Результаты металлографических исследований приведены в табл. 2.

Оценка степени загрязненности металла комплексными кислородосодержащими включениями с различными режимами ввода ПП (см. табл. 2) показала, что при  $V_p$  снижение количества этих включений и их суммарной длины в единице площади шлифа наиболее существенно.

Для повышения эффективности раскисления стали используют порошковую проволоку с алюмокальциевым наполнителем [12,13].

**Выводы**

Формула (10), определяющая рациональную скорость ввода ПП в расплав стали, при которой наполнитель проволоки максимально усваивается металлом, обобщает эмпирическую формулу работы [8] за счет дополнительного учета диаметра ПП, который может отличаться на разных заводах. Эта формула, будучи полуэмпирической, допускает настройку на конкретные условия технологии путем определения параметра идентификации  $\gamma$ , что требует меньших затрат, чем получение новых эмпирических формул каждый раз при изменении этих условий.

Разработанная полуэмпирическая формула определяет энергосберегающий режим интенсификации процессов тепломассопереноса технологии обработки стали ПП с силикокальциевым наполнителем.

**Список литературы**

1. Rozman, A. Some operating result by introducing the steel treatment with Ca-Si cored wire in Slovenian steelworks // 1st Int. Calcium Treat. Symp. – London. – 1988. – P. 53-60.
2. Пеликани, Ф. Основы обработки стали кальцием и состояние усвоенного ею кальция / Ф. Пеликани, Б. Дюран, А. Гессье // Обработка стали кальцием. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. – С. 45-58.
3. Лю, Д. Исследование кинетики ввода кальцийсодержащей проволоки в сталь / Д. Лю, Д. Айронс, В. Лю // Обработка стали кальцием. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. – 1985. – С. 59-74.
4. Дюдкин, Д. А. Прецизионная обработка металлургических расплавов / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, И. А. Павлюченков. – М.: Тепло-техник, 2007. – 424 с.
5. Martiner, R. The role of slog CaSi wire injection in metal // Proc. 6 th Int. Iron and Steel Congr. – То-куо. – 1990. – P. 504-511.
6. Яковлев, Ю. Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов / Ю. Н. Яковлев // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства. – Днепрпетровск: Национальная металлургическая академия, 1991. – С. 32-44.
7. Рябов, А.В. Математическое моделирование обработки расплава порошковой проволокой / А.В. Рябов, Д.М. Неволин, В.И. Потапов // Вестник Южно-Уральского госуд. ун-та. – 2013. – Вып. 1. – Т. 13. – С. 17-21.
8. Пат. 2102500 Россия, МКИ С 21 С 7/06. Способ раскисления стали / Д. А. Дюдкин [и др.] // ОАО Завод «Универсальное оборудование». – № 97104998/02; заявл. 13.02.96; опубл. 20.01.1998.
9. Захаров, М.І. Математичні методи розрахунку та комп'ютерне моделювання металургійних процесів: навчальний посібник для металургійних спеціальностей вузів / М.І. Захаров, А.І. Троцан. – Донецьк – Маріуполь: Донбас, 2011. – 99 с.
10. Ylönen, H. Steel composition adjustment by wire feeding at Rautaruukki Oy Raahe Steel Works / H. Ylönen, J. Mikkola // Scandinavian Journal of Met-

- allurgy. – Vol.19. – No. 3. –1989. – P. 142-145.
11. Захаров Н.И. Об одном подходе к математическому моделированию процессов тепломассообмена в металлургических системах // Математичне моделування. – 2006. – № 1, 2 (15). – С. 30-33.
12. Пат. 74435 Україна, С21С 7/00. Дріт для позапичної обробки металургійних розплавів / Дю-

- дкін Дмитро Олександрович, Кисіленко Володимир Васильович. – № у 2012 04866; заявл. 18.04.2012; опубл. 25.10.2012, бюл. № 20.
13. Пат. 77067 Україна, С21С 7/00. Дріт для комплексної обробки металургійних розплавів / Кисіленко Володимир Васильович, Дюдкін Дмитро Олександрович. – № у 2012 08882; заявл. 18.07.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. № 2.

**N.I. Zaharov /Dr. Sci. (Eng.)/, I.V. Tupilko, E.V. Sapronova, I.V. Zyabrev**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**ENERGY-SAVING INTENSIFICATION MODE OF HEAT AND MASS TRANSFER  
 IN PROCESSING OF MOLTEN STEEL WITH POWDER WIRE**

**Background.** *The development of energy-saving modes of an intensification of metallurgical technologies on the basis of the similarity methodology is associated with the need to ensure equality of the same-name similarity criteria of a laboratory model and the real metallurgical unit. For multivariable technology, the number of criteria of similarity increases and the possibility of using this methodology is hampered.*

**Materials and/or methods.** *It is shown that a promising method of solving the problem of energy saving in metallurgical heat power at the intensification of technologies of the molten steel processing with powder wire (PW) is the combination of the results of computer modeling of processes of convective heat and mass transfer and pilot studies. The mathematical model is given for the problem of the powder wire – molten steel heat exchange in the ladle deoxidation process. A computer program for implementing this model is developed.*

**Results.** *Based on the results of computer simulation are analyzed stages of melting of PW with silicocalcium filler have been analyzed. The dependence obtained of the melting time of the PW sheath on the density of the heat flow directed to the surface of the wire. Using the obtained results of computer simulation and known calculation methods to determine the extent of calcium absorption by the molten steel a graph is built of its dependence on the PW input speed into a liquid bath and the PW diameter. It is shown that the decrease of its diameter at a fixed mass flow of silicocalcium leads to an increase of the degree of calcium impact on the metal as well as the value of the optimal (rational) input rate of PW in the melt, the existence of which is shown based on computer modeling. The semi-empirical formula is proposed for the rational input speed of the powder wire into the molten steel for maximum absorption of the PW filler by the metal.*

**Conclusion.** *The pilot studies have confirmed the low error when using the formula to determine rational input speed of PW into a liquid bath. Recommendations are given for the efficient use of the wire in the process of ladle treatment of steel by reducing the real speed to the level of rational values that contributes to the solution of the problem of energy saving.*

**Keywords:** *powder wire, molten steel, oxide inclusions, energy saving, heat and mass transfer.*

**Сведения об авторах**

**Н.И. Захаров**

SPIN-код: 8653-7169  
 Scopus ID: 8947869000  
 Orcid ID: 0000-0002-1560-6561  
 Телефон: +380 (62) 301-08-61  
 Эл. почта: teplofizika@yandex.ru

**И.В. Тупилко**

Телефон: +380 (50) 618-38-33  
 Эл. почта: irishhka89@gmail.com

**Е.В. Сапронова**

SPIN-код: 9994-8274  
 Orcid ID: 0000-0002-7554-8260  
 Телефон: +380 (62) 301-08-65  
 +380 (50) 603-87-10  
 Эл. почта: sapronova@list.ru

**И.В. Зябрев**

Телефон: +380 (99) 704-44-83  
 Эл. почта: zyabrev555@gmail.com

*Статья поступила 29.04.2017 г.*

*© Н.И. Захаров, Е.В. Сапронова, И.В. Тупилко, И.В. Зябрев, 2017  
 Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков*