



Пиптюк В.П. /к.т.н./, Павлов С.Н.,
Андриевский Г.А.
ИЧМ НАНУ

Мощный В.В., Гордиенко О.А
ПАО «ДМК им. Ф.Э. Дзержинского»

Самохвалов С.Е. /д.т.н./
Днепродзержинский ГТУ

Оценка достоверности результатов моделирования теплового состояния ковшовой ванны

Приведены результаты экспериментальной проверки адекватности математических моделей тепло-, массообмена при доводке стали по температуре на установке ковш-печь. Определена сходимость и адекватность экспериментальных и расчетных результатов. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: численное моделирование, экспериментальная проверка, адекватность, установка печь-ковш, электродуговой нагрев, тепло-, массообмен

The results of the experimental verification of the adequacy of mathematical models of heat and mass transfer in fine-tuning the temperature began to ladle furnace. Defined convergence and value of experimental and computational results.

Keywords: numerical modeling, experimental testing, adequacy, ladle furnace, electric heating, heat.

Введение

Увеличение масштабов использования установок ковш-печь (УКП) при внепечной обработке стали и мировая тенденция повышения цен на материальные и энергетические ресурсы обосновывают необходимость поиска новых решений и рациональных режимов ковшовой обработки. Сложность, а в ряде случаев невозможность проведения экспериментов характера в этом направлении, определила математическое моделирование как один из основных методов исследований. Численное исследование теплового состояния ковшовой ванны при обработке на УКП с учетом дугевого нагрева по имеющимся исходным данным проведено в ИЧМ НАНУ [1, 2], с помощью разработанных в ДГТУ трехмерных математических моделей тепло-, массообмена [3, 4], реализованных в программной среде DELPHI. Представленные в настоящей статье данные являются продолжением проведенных ранее исследований [5] достоверности математических моделей.

Цель работы – проверка достоверности математических моделей и результатов численного исследования процессов тепло-, массообмена для условий обработки расплава на УКП.

Основная часть

Объектом исследований выбрана УКП-1 в конвертерном цехе ПАО «ДМК им. Ф.Э. Дзержинского» («ДМКД»), для которой ранее были осуществлены численные расчеты процессов, имеющих место при внепечной обработке стали [6, 7]. Оценочным критерием выбрана температура металла.

Указанная выше модель позволяет определять как прирост температуры расплава после дугевого

нагрева, так и снижение температуры во время гомогенизирующего перемешивания. При нагреве металлической ванны электродугой, имеющей температуру порядка 5000–6000 °С, происходит перегрев ее поверхности, что требует перемешивания расплава. В настоящих исследованиях температура металла определялась после дугевого нагрева в верхней зоне ковшовой ванны, с учетом перемешивания расплава ванны аргоном. С целью контроля параметров, влияющих на тепловое состояние ванны, и последующего их учета при численном определении температуры была разработана специальная методика экспериментального замера температуры. При экспериментальном определении температуры ковшовой ванны предусматривался следующий порядок операций: 1) предварительный замер температуры металла на глубине 0,5-0,8 м; 2) нагрев расплава электродугой; 3) замер температуры с интервалом 15–45 с на протяжении 2–3 мин. Обязательным условием являлся нагрев металла без изменения ступени трансформатора и контролируемый неизменный режим продувки в течение всего времени осуществления замеров температуры, а также исключение ввода в ванну каких-либо добавок в период нагрева и гомогенизации металла. На протяжении нагрева металла и его гомогенизации по температуре секундомером фиксировалось время проведения каждой операции относительно электродугового нагрева. Экспериментальные замеры температуры металла осуществляли в соответствии с действующей в ПАО «ДМКД» ТИ 230-С456-2010 на этапе доводки стали на УКП-1 плавков текущего производств. Схема проведения экспериментальных замеров температуры представлена на рис. 1.

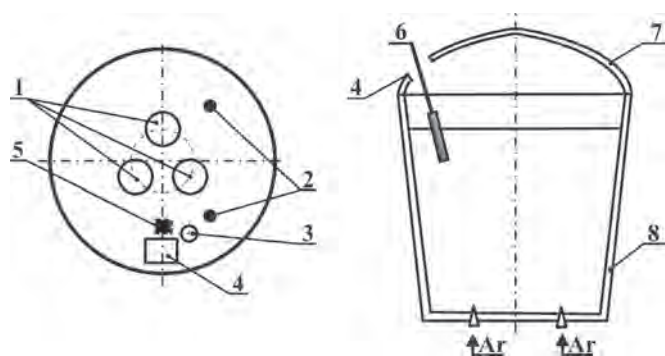


Рис. 1. Схема экспериментального замера температуры металла в ванне УКП-1: 1 – электроды модуля нагрева; 2 – донные продувочные фурмы; 3 – место ввода аварийной фурмы; 4 – рабочее окно; 5 – место замера температуры; 6 – термопара; 7 – крышка; 8 – ковш

Расчет теплового состояния ковшовой ванны выполняли для номинального конструктивно-компоновочного варианта [5] и соответствующих фактическим технологических условий с использованием следующих параметров: теплоемкость стали 792 Дж/кг·К, плотность жидкой стали 6940 кг/м³.

Таблица. Результаты экспериментальной проверки температуры металла после дугового нагрева

Номер эксперимента	Степень трансформатора	Продолжительность нагрева, мин	Фактический режим продувки аргоном ^{*)} (Ф1/Ф2), л/мин	Температура металла перед нагревом, °С	Время замера относительно окончания нагрева, мин:с	Температура металла после нагрева, °С	Расчетная температура металла после нагрева, °С	Отклонение расчетной температуры от фактической, °С
1	10	9,0	400/400	1536,4	00:22,5	1568,7	1571,3	2,6
					00:48,3	1568,2	1571,5	3,3
					01:12,9	1568,8	1571,5	2,7
					01:37,6	1567,8	1571,5	3,7
2	8	5,0	400/400	1606,9	00:09,2	1623,1	1618,9	4,2
					00:37,7	1620,5	1619,5	1,0
					01:05,6	1621,3	1619,5	1,8
4	9	2,0	0/200	1564,2	01:38,7	1621,2	1619,4	1,8
					00:38,1	1563,9	1561,6	2,3
					01:01,7	1563,4	1562,2	1,2
5	7	3,5	0/200	1559,2	01:28,6	1563,7	1562,6	1,1
					02:00,7	1561,1	1562,7	-1,6
					00:34,7	1563,9	1565,1	-1,2
6	9	6,1	100/400	1579,7	01:09,6	1563,4	1565,8	-2,4
					01:58,9	1563,7	1566,2	-2,5
					03:10,2	1561,1	1566,1	-5,0
					00:30,9	1599,2	1600,5	-1,3
7	8	10,1	400/400	1578,0	01:06,7	1603,2	1600,6	2,6
					02:02,4	1603,5	1600,4	3,1
					03:53,2	1600,8	1600,0	0,8
					01:06,0	1617,3	1613,5	3,8
8	3	6,0	250/400	1584,0	01:41,0	1615,8	1613,4	2,4
					02:16,0	1615,1	1613,4	1,7
					03:27,0	1614,6	1613,2	1,4
					00:19,6	1587,1	1585,8	1,3
9	9	3,6	300/200	1590,0	00:51,0	1588,0	1585,7	2,3
					01:28,0	1588,0	1585,6	2,4
					02:05,3	1586,4	1585,5	0,9
10	9	3,7	300/200	1591,3	00:20,8	1600,5	1601,7	-1,2
					00:37,6	1600,1	1601,8	-1,7
					01:00,5	1601,5	1601,8	-0,3
					01:58,3	1601,7	1601,7	0,0
10	9	3,7	300/200	1591,3	00:19,5	1598,2	1597,2	1,0
					01:25,8	1600,7	1597,1	3,6
					02:18,9	1601,4	1597,1	4,3
					03:16,4	1600,4	1596,9	3,5

^{*)} фактический режим продувки определялся с учетом показаний АСУТП, а также площади оголенного зеркала металла и размера «буруна»

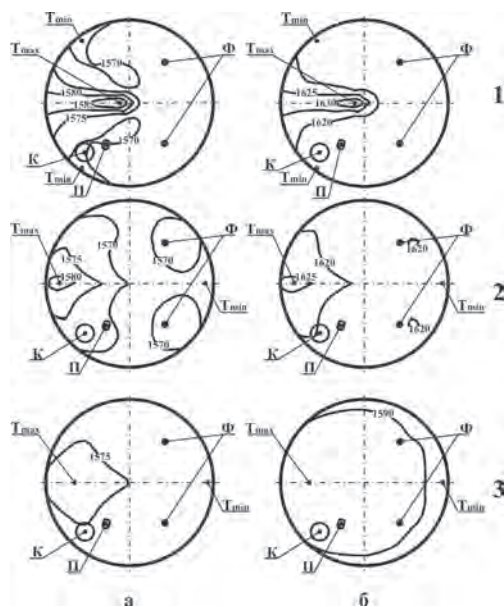


Рис. 2. Распределение температурных зон в ковшовой ванне УКП-250 после нагрева: эксперименты № 1 (а) и № 2 (б) в приповерхностном (1), на 0,5 глубины (2) и в придонном (3) горизонтальных сечениях; цифры на изолиниях – значения температуры (°С); T_{\min} и T_{\max} – точки с минимальными и максимальными значениями температуры расплава в слое; Ф, К и П – расположение фурм, мест ввода кусковых и проволочных добавок, соответственно

На рис. 2 представлены некоторые из результатов численных исследований. Анализом полученных данных установлено, что по окончании нагрева на 7-10 ступенях разница температур между верхним и нижним слоем расплава в зависимости от интенсивности продувки колеблется от 17,1 до 47,5 °С, что подтверждает необходимость сопоставления расчетной температуры с экспериментальной в одинаковых зонах.

Во время экспериментальной проверки проводилось от 4 до 6 замеров температуры, результаты приведены в таблице. Сопоставление полученных данных представлено на рис. 3.

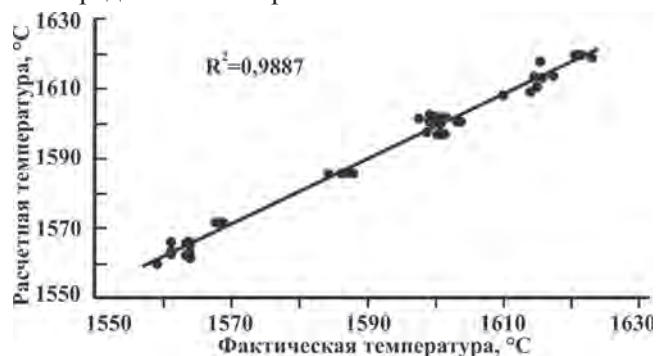


Рис. 3. Сравнение расчетной и фактической температур металла

Найдено, что используемая для численных исследований математическая модель, несмотря на ряд принятых допущений, позволяет достаточно точно прогнозировать температуру металла после дугового нагрева. Установлено, что отклонение расчетных данных от экспериментальных результатов составляет до $\pm 5,0$ °С, благодаря учету основных параметров нагре-

ва и гомогенизирующей продувке.

Полученные результаты подтверждают достоверность разработанных математических моделей и целесообразность их использования для прогнозирования теплового состояния ванны при обработке на УКП.

Выводы

На УКП-1В конвертерного цеха ПАО «ДМКД» проведена экспериментальная проверка достоверности результатов моделирования тепло-, массообмена.

Отклонение расчетных данных от фактических составляет до $\pm 5,0$ °С. Подтверждена возможность использования ранее разработанных математических моделей и программного продукта для прогноза температуры металла в ковшовой ванне УКП после дугового нагрева.

Библиографический список

1. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь, В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, С.Е. Самохвалов и др. // *Металлург.* – 2011. – № 7. – С. 50-53.
2. Моделирование теплового состояния ковшовой ванны установки ковш-печь мощностью 35 МВ·А / В.П. Пиптюк, И.Д. Буга, С.Е. Самохвалов и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ, 2011. – Вып. 23. – С. 137-141.
3. Исследование тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Ч. 1. Математическая модель / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. // *Теория и практика металлургии.* – 2008. – № 3. – С. 3-5.
4. Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Ч. 2. Модель массопереноса / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. // *Теория и практика металлургии.* – 2007. – № 4-5. – С. 14-17.
5. Экспериментальная проверка адекватности математических моделей гидродинамики и массопереноса для условий обработки расплава на установке ковш-печь / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. // *Металлург.* – 2013. – № 3. – С. 50-53
6. Моделирование теплового состояния ковшовой ванны установки ковш-печь мощностью 35 МВ·А / В.П. Пиптюк, И.Д. Буга, С.Е. Самохвалов и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ, 2011. – Вып. 23. – С. 137-141.
7. Численное исследование режимов комбинированной продувки на установке ковш-печь большой мощности / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, В.Ф. Поляков и др. // *Сучасні проблеми металургії.* – 2011. – Вып. № 14. – С. 78-84.

Поступила 19.04.2013