МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ / METALLURGICAL TECHNOLOGIES



Оригинальная статья

УДК 669:621.745.56 **DOI** 10.17073/0368-0797-2022-5-333-343 https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2308



К ВОПРОСУ О СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ И ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШАХ НА ЭТАПЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

С. К. Вильданов^{1, 2}, Д. Ю. Бондарев²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4) ² ООО «ОгнеупорТрейдГрупп» (Россия, 125080, Москва, ул. Сурикова, 24)

Аннотация. Методами корреляционного анализа проведено исследование теплового состояния жидкого металла на этапе непрерывной разливки стали в предположении, что измеримые объекты являются случайными величинами. Тепловое состояние металлического расплава характеризуется значениями температуры металла T_n на данной стадии и длительностью протекания стадий т_n и описывается интегральным показателем – скоростью охлаждения W_n . Скорость охлаждения представляет собой отношение разности температур жидкого металла в начале и конце стадии к длительности данной стадии. Вычислены скорости охлаждения металла на различных стадиях этапа непрерывной разливки стали. Первая стадия включает период времени от завершения обработки металла на агрегате комплексной обработки стали до начала вакуумирования. Вторая стадия включает период от начала вакуумирования до его завершения. Третья стадия включает период от момента завершения вакуумирования до первого измерения температуры в промежуточном ковше. И далее идут периоды последовательных измерений температуры в промежуточном ковше. Установлено, что скорости охлаждения металла варьируются в значительных пределах в зависимости от технологических стадий. Абсолютные значения скорости охлаждения отличаются более, чем на порядок. Минимальная скорость охлаждения металла зафиксирована в промежуточном ковше. Ее значение составляет 0,09 °С/мин. Максимальная скорость охлаждения металла выявлена при выпуске металла из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш, при этом скорость охлаждения составляет 1,43 °С/мин. Определены основные факторы, влияющие на скорость охлаждения металла. К этим факторам относятся начальная температура жидкого металла после завершения обработки на агрегате комплексной обработки стали, температура жидкого металла после завершения вакуумирования, наличие на поверхности жидкого металла оксидного раствора, образованного шлакообразующими смесями, наличие и эффективность теплоизолирующих смесей, а также теплоизолирующие характеристики огнеупорных футеровок. При вакуумировании скорость охлаждения металла существенным образом определяется конвективными потерями энергии и потерями энергии с на нагрев инертного газа. После стадии вакуумирования скорость охлаждения значительно снижается за счет применения теплоизолирующих смесей. Наибольшая скорость охлаждения металла установлена при его прохождении через сталевыпускной канал и трубу защиты металла при наполнении промежуточного ковша. Наименьшая скорость охлаждения металла характерна при его нахождении в промежуточном ковше, за счет наличия пористого торкрет-слоя, обладающего низкой теплопроводностью.

Ключевые слова: случайная величина, корреляция, выборка, жидкий металл, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, скорость охлаждения металла, время, температура, непрерывная разливка стали

Для цитирования: Вильданов С.К., Бондарев Д.Ю. К вопросу о скорости охлаждения металлического расплава в сталеразливочном и промежуточном ковшах на этапе непрерывной разливки стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 5. С. 333–343. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-333-343

Original article

ON COOLING RATE OF METAL MELT IN STEEL-TEEMING LADLE AND TUNDISH DURING CONTINUOUS STEEL CASTING

S. K. Vil'danov^{1, 2}, D. Yu. Bondarev²

¹National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)
 ²LLC "OgneuporTradeGrupp" (24 Surikova Str., Moscow 125080, Russian Federation)

Abstract. The thermal state of liquid metal at the continuous steel casting stage was studied by methods of correlation analysis under the assumption that measurable objects are random variables. The thermal state of metal melt is characterized by the values of metal temperature T_n at a given stage

and duration of stages τ_n , and is described by the integrated index – cooling rate W_n . The cooling rate is the differential quotient of the liquid metal temperatures at the beginning and end of the stage to the duration of this stage. The metal cooling rate at various stages of continuous steel casting phase was calculated. The first stage includes the period from the end of metal processing at the integrated steel processing unit to the beginning of vacuum degassing. The second stage includes the period from the beginning of vacuum degassing to its completion. The third stage includes the period from the end of vacuum degassing to the first temperature measurement in the tundish. Then there are periods of consecutive temperature measurements in the tundish. The study established that metal cooling rates vary significantly depending on process stages. The absolute values of the cooling rate differ by more than an order of magnitude. The minimum rate of metal cooling was recorded in the tundish. Its value was 0.09 °C/min. The maximum metal cooling rate was detected during tapping from the steel-teeming ladle into the tundish. In this case, the cooling rate was 1.43 °C/min. The main factors affecting the metal cooling rate were determined. These factors include: the initial temperature of liquid metal after the end of processing at the integrated steel processing unit; the temperature of liquid metal after vacuum degassing; the presence on the liquid metal surface of the oxide solution formed by slag-forming mixtures; availability and effectiveness of heat insulating mixtures; as well as the heat insulating properties of refractory linings. During vacuum degassing stage, the cooling rate was essentially decreases due to the use of heat insulating mixtures. The highest rate of metal cooling is achieved when it passes through the steel outlet channel and the metal protection tube during tundish filling. The lowest metal cooling rate was found in the tundish due to the presence of a porous shotcrete layer wit

Keywords: random value, correlation, selection, liquid metal, steel-teeming ladle, tundish, cooling rate of metal, time, temperature, steel continuous casting

For citation: Vil'danov S.K., Bondarev D.Yu. On cooling rate of metal melt in steel-teeming ladle and tundish during continuous steel casting. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2022, vol. 65, no. 5, pp. 333–343. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-333-343

Введение

Непрерывная разливка стали является особым этапом металлургического передела, характеризующимся тем, что здесь металл меняет свое агрегатное состояние, переходя из жидкой фазы в твердую. В жидкой фазе в сталеразливочном ковше металл поступает на участок непрерывной разливки стали, где через промежуточную металлургическую емкость (промежуточный ковш) происходит дозированная подача металла в один или несколько кристаллизаторов, в которых формируется слиток заданной геометрической формы. На данном этапе и жидкий металл, находящийся в сталеразливочном и промежуточном ковшах, и сами металлургические емкости представляют собой единый, связанный энерготехнологический объект. Источником энергии для осуществления непрерывной разливки является энергия жидкого металла. Важнейшей чертой (в энергетическом смысле), отличающей непрерывную разливку от предшествующих ей этапов выплавки стали в сталеплавильном агрегате (окончательной доводки металла на участке комплексной обработки стали и вакуумирования), является то, что на этом этапе отсутствует возможность повышения температуры жидкого металла. Невозможность нагрева металла в сталеразливочном ковше на стадии разливки обусловлена самой технологией. Для нагрева металла в промежуточном коше предложено несколько вариантов, которые носят характер лишь теоретических разработок [1-4]. Таким образом, металл находится в указанных емкостях в состоянии непрерывного естественного охлаждения. Температура металла при разливке строго регламентирована, поскольку является определяющим фактором в получении качественного конечного слитка. В этой связи предложено несколько моделей для прогнозирования температуры жидкой стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах [5, 6], а также

статистическая модель, учитывающая большой массив данных [7]. При этом сохранение физического тепла металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах при разливке является важной технологической задачей. Уменьшению скорости охлаждения металлического расплава способствуют и шлакообразующие флюсы (смеси), подаваемые на поверхность расплава, например, в промежуточный ковш [8], а также шлакообразующие флюсы, обладающие оптимальной вязкостью в жидкой фазе [9-12]. Условия охлаждения металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах различны, а влияющие на них факторы весьма разнообразны. Поэтому изучение и анализ факторов, влияющих на охлаждение металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах, является актуальной задачей и в части теплоизоляции открытой поверхности расплава специальными смесями [13-15], и в части моделирования распределения температуры металла под теплоизолирующими смесями [16-19].

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются значения температуры жидкого металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах, моменты времени, при которых осуществлены измерения температуры, и периоды времени начала и окончания соответствующих стадий. Температуру расплава измеряли стандартными погружными термопарами, время фиксировали стационарными таймерами, серийно применяемыми в технологическом процессе. Исследования осуществляли, применяя выборочный метод и корреляционный инструментарий. Объем выборки ограничен 14 плавками. Этот объем является минимальным. Дальнейшее уменьшение объема выборки может привести к некорректным выводам. Двумерные выборки анализировали в предположении, что измеримые объекты являются случайными величинами в отношении взаимосвязи между параметрами X и Y, для которых сделано предположение, что их математические ожидания EX и EY связаны линейной (регрессионной) зависимостью EY = aEX + b. Оценки параметров a и b проводили методом наименьших квадратов [20, 21]. Степень линейной взаимозависимости наблюдаемых параметров оценивали с помощью выборочного коэффициента корреляции R.

Экспериментальные данные

В процессе исследования изучали экспериментальные данные значений температуры жидкого металла в сталеразливочном ковше после внепечной обработки на агрегате комплексной обработки стали (АКОС), вакуумирования и непосредственно перед началом разливки. Также исследовали экспериментальные данные значений температуры жидкого металла, полученные при нескольких последовательных измерениях в промежуточном ковше. Кроме того, фиксировали данные моментов времени, при которых произведены замеры соответствующих температур, значения периода времени от момента завершения обработки на АКОС и до начала вакуумирования, а также значения периода времени от замера температуры после вакуумирования и до начала разливки. Полученные для анализа экспериментальные данные сведены в табл. 1.

В табл. 1 данные времени приведены в формате «часы: минуты». В первом столбце указано время τ_0 завершения обработки металла на АКОС. Во втором столбце представлены значения температуры жидкого

металла в сталеразливочном ковше после завершения технологических операций на участке комплексной обработки стали T_0 . В третьем столбце указано время начала вакуумирования τ_1 . Четвертый столбец содержит значения температуры металла в начале вакуумирования T_1 . В пятом столбце приведено время завершения вакуумирования τ_2 . Шестой столбец содержит значения температуры металла после завершения вакуумирования T_2 . В седьмом – шестнадцатом столбцах указаны времена измерения и значения температуры металла в промежуточном ковше, при первом замере, и далее, последовательно, по пятый замер.

Из данных табл. 1 видно, что замеры температуры на этапе разливки проводят в среднем каждые 10 – 20 мин.

Для дальнейшего анализа потребуются некоторые расчетные величины, полученные из экспериментальных данных. Эти величины и их значения приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, расчетные величины представляют собой периоды времени, разности температур и скорости охлаждения металла. Разности температур получены из значений температур в граничных точках соответствующего периода времени, при которых произведен замер. Скорости охлаждения металла вычислены как отношения разности температур к соответствующему периоду времени. Указанные величины характеризуют собой тепловое состояние металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах на последовательных стадиях внепечной обработки и разливки металла. Эти стадии включают обработку металла в сталеразливочном ковше на участке АКОС,

Таблица 1

Table 1. Experimental data															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
τ_0	T_0	τ ₁	T_1	τ2	T_2	τ ₃	T ₃	τ ₄	T_4	τ ₅	T_5	τ ₆	T_6	τ ₇	T_7
18:41	1601	18:55	1592	19:46	1552	20:11	1514	20:27	1516	20:43	1519	20:59	1515	21:09	1515
20:27	1590	20:36	1586	21:07	1551	21:31	1516	21:47	1516	22:03	1519	22:18	1518	22:32	1512
21:51	1596	21:58	1589	22:34	1550	22:53	1513	21:09	1516	23:25	1514	23:40	1511	23:52	1508
23:02	1595	23:25	1584	23:52	1553	0:10	1519	0:26	1520	0:42	1517	0:58	1513	1:14	1513
0:25	1595	0:33	1586	1:08	1550	1:36	1516	1:52	1518	2:08	1515	2:24	1507	2:36	1508
1:51	1590	1:58	1586	2:31	1552	2:58	1513	3:14	1515	3:30	1514	3:46	1513	4:00	1512
3:10	1590	3:18	1587	4:04	1551	4:24	1518	4:40	1513	4:56	1517	5:12	1512	5:28	1510
4:33	1592	4:53	1583	5:28	1552	5:53	1509	6:04	1512	6:19	1513	6:35	1512	6:52	1507
6:06	1588	6:21	1577	7:07	1551	7:18	1516	7:33	1516	7:49	1513	8:03	1508	8:15	1505
0:45	1594	0:52	1586	1:06	1551	2:14	1522	2:31	1516	2:48	1514	2:59	1514	-	_
1:46	1583	2:04	1582	2:45	1544	3:19	1511	3:31	1516	3:46	1515	3:59	1514	_	_
2:52	1582	3:07	1580	3:49	1545	4:24	1516	4:41	1515	5:00	1512	5:16	1506	_	_
4:25	1582	4:32	1576	4:58	1541	5:33	1515	5:48	1515	6:02	1510	6:10	1512	-	_
6:24	1587	6:36	1580	7:13	1544	7:39	1516	7:56	1512	8:13	1512	8:28	1506	_	_

Экспериментальные данные

21	$\frac{T_3 - T_7}{\tau_7 - \tau_3}$	0,45	0,46	0,54	0,49	0,48	0,45	0,49	0,54	0,68			1		I
20	$T_3 - T_7$	37	39	42	40	42	40	41	45	46					I
19	$\mathfrak{r}_7-\mathfrak{r}_3$	83	85	78	82	88	89	84	84	68		I	I		I
18	$\frac{T_3 - T_6}{\tau_6 - \tau_3}$	0,51	0,46	0,59	0,61	0,57	0,52	0,57	0,60	0,77	0,33	0,41	0,57	0,40	0,54
17	$T_3 - T_6$	37	33	39	40	43	39	39	40	43	37	30	39	29	38
16	$ au_6- au_3$	73	71	66	66	76	75	68	67	56	113	74	69	72	70
15	$\frac{T_3 - T_5}{\tau_5 - \tau_3}$	0,58	0,57	0,71	0,72	0,58	0,64	0,65	0,76	06,0	0,36	0,48	0,46	0,48	0,53
14	$T_3 - T_5$	33	32	36	36	35	38	34	39	38	37	29	33	31	32
13	$ au_5- au_3$	57	56	51	50	60	59	52	51	42	102	61	71	64	60
12	$\frac{T_3 - T_4}{\tau_4 - \tau_3}$	0,88	0,88	0,97	0,97	0,73	0,86	1,06	1,11	1,35	0,51	0,61	0,58	0,52	0,74
11	$T_3 - T_4$	36	35	34	33	32	37	38	40	35	43	28	30	26	32
10	$\tau_4-\tau_3$	41	40	35	34	44	43	36	36	26	85	46	52	50	43
6	$\frac{T_2 - T_3}{\tau_3 - \tau_2}$	1,52	1,46	1,95	1,89	1,21	1,44	1,65	1,72	3,18	0,43	0,97	0,83	0,74	1,08
~	$T_2 - T_3$	38	35	37	34	34	39	33	43	35	29	33	29	26	28
2	$\tau_3-\tau_2$	25	24	19	18	28	27	20	25	11	68	34	35	35	26
9	$\frac{T_1 - T_2}{\tau_2 - \tau_1}$	0,78	1,13	1,08	1,15	0,09	1,03	0,78	0,89	0,57	0,86	0,98	0,83	1,35	0,03
5	$T_1 - T_2$	40	35	39	31	ŝ	34	36	31	26	12	40	35	35	1
4	$ au_2 - au_1$	51	31	36	27	35	33	46	35	46	14	41	42	26	37
3	$\frac{T_0 - T_1}{\tau_1 - \tau_0}$	0,64	0,44	1,00	0,48	1,13	0,57	0,38	0,45	0,73	1,14	0,06	0,13	0,86	0,54
2	T_0-T_1	6	4	7	11	6	4	ю	6	11	8	1	2	9	7
1	$\mathfrak{r}_1-\mathfrak{r}_0$	14	6	7	23	8	7	8	20	15	7	18	15	7	13

Table 2. Calculated values of time periods, temperature difference and metal cooling rate

Расчетные значения периодов времени, разности температур и скорости охлаждения металла

Таблица 2

вакуумирование, разливку и тепловое состояние металла в промежуточном ковше, а также стадию его транспортировки.

Дальнейший анализ удобно проводить, оперируя интегральным показателем — скоростью охлаждения металла *W* [14, 22] и его связью с температурой на рассматриваемых стадиях.

На рис. 1 приведена диаграмма рассеяния, построенная в координатах «температура металла в сталеразливочном ковше после обработки на участке АКОС T_0 – скорость охлаждения $\frac{T_0 - T_1}{\tau_1 - \tau_0}$ ». Скорость охлаждения рассчитана за период времени от момента завершения обработки на участке АКОС τ_0 до момента времени начала вакуумирования τ_1 . Указанные параметры наиболее полно характеризуют тепловое состояние жидкого металла, находящегося в сталеразливочном ковше на этой стадии.

Как видно из рис. 1, наблюдается определенная тенденция в совместном изменении экспериментальных данных, в соответствии с которой эти данные группируются около некоторой прямой, рассчитанной, исходя из минимизации суммы квадратов отклонений случайных величин Y_j от $aX_j + b, j = 1, ..., 14$. Уравнение регрессии, связывающее ожидаемые значения наблюдаемых величин, оценки параметров регрессии *a* и *b* и степень взаимозависимости наблюдаемых величин (выборочный коэффициент корреляции *R*) приведено ниже:

$$W_1 = 0.03T_0 - 45.78; R = 0.49.$$
 (1)

Рис. 2 представляет собой диаграмму рассеяния экспериментальных данных, полученных на следующей стадии обработки металла – стадии вакуумирования в сталеразливочном ковше. Температура жидкого метала, измеренная в начале вакуумирования T_1 , скорость охлаждения расплава W, вычисленная как отношение $\frac{T_1-T_2}{\tau_2-\tau_1}$ и температура, измеренная в конце вакуумирова-

ния T_2 , полностью характеризуют тепловое состояние жидкого металла на данной стадии.

Как видно из рис. 2, экспериментальные данные обнаруживают выраженную линейную регрессионную зависимость. Параметры регрессии:

$$W_2 = 0.02T_1 - 34.41; R = 0.76.$$
 (2)

Следующей стадией этапа транспортировки и разливки металла является стадия, началом которой служит момент окончания вакуумирования, т. е. момент замера температуры T2, а завершением – момент первого замера температуры в промежуточном ковше Т₃. Следует отметить, что определение таким образом стадии не представляется строго корректным. Некорректность возникает в том, что момент замера температуры T_3 относится уже к другому металлургическому агрегату – промежуточному ковшу. Эта вынужденная некорректность обусловлена технической невозможностью измерения температуры в сталеразливочном ковше перед открытием шиберного затвора и началом разливки. Как будет показано ниже, именно эта стадия является главной с точки зрения теплового состояния металла, определяющей тепловую стабильность разливки. Скорость охлаждения металла при этом рассчитана теоретически.

На рис. 3 представлена диаграмма рассеяния экспериментальных данных значений температуры металла после завершения вакуумирования T_2 и скорости охлаждения металла, рассчитанной по данным первого замера температуры в промежуточном ковше T_3 за соответствующий период времени.

Как видно из рис. 3, и в этом случае наблюдается положительная линейная регрессионная зависимость между экспериментальными значениями. Параметры регрессии:



Рис. 1. Диаграмма рассеяния значений скорости охлаждения металла и его температуры после обработки на АКОС

Fig. 1. Scatter diagram of the values of metal cooling rate and its temperature after processing in the unit of complex steel processing



Рис. 2. Диаграмма рассеяния скорости охлаждения металла и его температуры на стадии вакуумирования

Fig. 2. Scatter diagram of the metal cooling rate and its temperature at the stage of vacuum treatment



Рис. 3. Диаграмма рассеяния скорости охлаждения металла и его температуры на стадии разливки

Fig. 3. Scatter diagram of the metal cooling rate and its temperature at the casting stage

$$W_3 = 0,09T_2 - 138,73; R = 0,51.$$
 (3)

Для оценки теплового состояния жидкого металла в промежуточном ковше поступим следующим образом. Будем считать входными начальными параметрами значения температуры жидкого металла, полученные после завершения вакуумирования. Конечными параметрами будут значения температуры жидкого металла в промежуточном ковше при первом и последующих измерениях. Последовательные замеры температуры произведены через каждые 14 – 20 мин. Далее, по соответствующим диаграммам рассеяния проследим, как будут изменяться регрессия и ее параметры.

На рис. 4 – 8 приведены диаграммы рассеяния температур жидкого металла после завершения вакуумирования при первом и последующих замерах в промежуточном ковше.





Fig. 4. Scatter diagram of the metal temperatures after vacuum treatment and in the tundish at the first measurement

Как видно из рис. 4, экспериментальные данные представляют собой область с весьма незначительной линейной регрессионной зависимостью. Параметры регрессии:

$$T_3 = 0,12T_2 + 1331; R = 0,14.$$
 (4)

Как видно из рис. 5, экспериментальные данные представляют собой область с более выраженной линейной регрессионной зависимостью по сравнению с предыдущим случаем. Параметры регрессии:

$$T_4 = 0,07T_2 + 1400; R = 0,28.$$
 (5)

Рис. 6 представляет диаграмму рассеяния экспериментальных данных значений температуры жидкого металла после вакуумирования и температуры расплава в промежуточном ковше при третьем замере.

Как видно из рис. 6, экспериментальные данные представляют собой область с еще более выраженной линейной регрессионной зависимостью по сравнению с двумя предыдущими замерами. Параметры регрессии:

$$T_5 = 0,44T_2 + 837,70; R = 0,63.$$
(6)

Следующая группа экспериментальных данных, полученная при четвертом замере температуры в промежуточном ковше, приведена на диаграмме рассеяния рис. 7.

Как видно из рис. 7, при данном замере температуры экспериментальные данные связаны четко выраженной линейной регрессионной зависимостью. Уравнение и параметры регрессии приведены ниже:

$$T_6 = 0.33T_2 + 1004,00; R = 0.35.$$
(7)



Рис. 5. Диаграмма рассеяния температуры металла после вакуумирования и температуры металла в промежуточном ковше при втором замере

Fig. 5. Scatter diagram of the metal temperatures after vacuum treatment and in the tundish at the second measurement



Рис. 6. Диаграмма рассеяния температуры металла после вакуумирования и температуры металла в промежуточном ковше при третьем замере



Завершает иллюстрацию экспериментальных данных, полученных при последовательных измерениях температуры в промежуточном ковше, диаграмма рассеяния (рис. 8).

Как видно из рис. 8, и здесь прослеживается четкая корреляционная связь между экспериментальными данными. Регрессионное уравнение и его параметры приведены ниже:

$$T_7 = 1,75T_2 - 1204,00; R = 0,54.$$
 (8)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведен анализ теплового состояния жидкого металла на этапе транспортировки и разливки металла. На данном этапе выделены стадии, на которых условия охлаждения металла существенно различаются. Эти различия обусловлены начальными температурами жидкого металла после окончания обработки на АКОС, температурами металла после завершения вакуумирования, периодами времени между стадиями, наличием на поверхности металлического расплава слоя шлака и слоя теплоизолирующей смеси. Влияние указанных факторов может быть охарактеризовано интегральным показателем – скоростью охлаждения металла *W*.

На первой стадии (см. рис. 1) наблюдаем положительную регрессию, т. е. повышение температуры металла после обработки на АКОС приводит к увеличению скорости охлаждения W_1 . Этот результат находится в полном согласии с физической картиной охлаждения металла в сталеразливочном ковше на данной стадии. Дело в том, что за счет теплоотдачи излучением с открытой поверхности расплава теряется основная доля энергии жидкого металла. Теплопотери, связанные с излучением, пропорциональны четвертой степени температуры. Именно поэтому зависимость скорости



Рис. 7. Диаграмма рассеяния температуры металла после вакуумирования и температуры металла в промежуточном ковше при четвертом замере

Fig. 7. Scatter diagram of the metal temperatures after vacuum treatment and in the tundish at the fourth measurement



Рис. 8. Диаграмма рассеяния температуры металла после вакуумирования и температуры металла в промежуточном ковше при пятом замере

Fig. 8. Scatter diagram of the metal temperatures after vacuum treatment and in the tundish at the fifth measurement

охлаждения от температуры металла после обработки на АКОС имеет столь выраженный характер. Скорость охлаждения металла на данной стадии была бы еще более высокой, если бы не наличие на поверхности металлического расплава слоя, наведенного в результате подачи извести, раскислителей и иных шлакообразующих материалов. Высокоосновный шлак предотвращает ускоренное охлаждение металлического расплава.

Аналогичная ситуация выявлена и при следующей стадии внепечной обработки – вакуумировании (см. рис. 2). Скорость охлаждения жидкого металла возрастает с увеличением температуры металла в начале вакуумирования. По сравнению с предыдущей стадией, наклон регрессионной прямой более крутой и скорость охлаждения металла выше. Более высокая скорость охлаждения обусловлена существенной нестационарностью процесса вакуумирования. Если на предыдущей стадии жидкий металл в сталеразливочном ковше находился в состоянии естественного охлаждения, то при вакуумировании, помимо теплопотерь на излучение, возникают дополнительные теплопотери. Они связаны с возрастающим конвективным теплопереносом и потерей энергии жидкого металла при его продувке инертным газом.

Необходимо отметить, что после завершения вакуумирования отсутствует техническая возможность измерения температуры жидкого металла в сталеразливочном ковше непосредственно перед началом разливки. Отсутствие такой возможности обусловлено тем, что, во-первых, ковш с металлом накрывают крышкой, и, во-вторых, он находится на высоте на разливочном поворотном столе. Оказывается, что данная стадия является весьма информативной для анализа теплового состояния жидкого металла. Интуитивно ясно, что скорость охлаждения металла на этой стадии должна быть существенно более низкой, чем на предыдущих стадиях. Это связано с тем, что после завершения вакуумирования на поверхность расплава в ковше подают теплоизолирующую смесь и закрывают ковш крышкой, что приводит к кардинальному снижению теплопотерь с открытой поверхности расплава излучением и конвекцией. Для оценки скорости охлаждения металла использованы результаты, полученные в работах [15, 23], расчет производился по уравнению

$$W = \left(\ln T_0'\right)^{0.75} - \left(\ln M\right)^{0.64} - \left(\ln T_2'\right)^{0.10} + \left(\ln N\right)^{0.53}, \quad (9)$$

где T'_0 – температура металла на выпуске из сталеплавильного агрегата; M – вес металла в сталеразливочном ковше; T'_2 – температура огнеупорной футеровки сталеразливочного ковша на разогреве; N – количество наливов металла в сталеразливочный ковш.

Отметим, что первое слагаемое в соотношении (9) получено для условий, когда поверхность жидкого металла в сталеразливочном ковше полностью открыта, т. е. отсутствуют и теплоизолирующая и шлакообразующая смесь на поверхности расплава. При наличии теплоизолирующей смеси и крышки показатель степени логарифма в первом слагаемом уменьшается и становится равным 0,35. Остальные слагаемые являются константами и могут быть без каких-либо ограничений использоваться в расчетах. Полученные результаты доказательно опровергают выводы, приведенные в работе [5] о том, что толщина слоя жидкого шлака в сталеразливочном ковше, температура выпуска жидкой стали из сталеплавильного агрегата в ковш и срок службы ковша, т. е. износ футеровки сталеразливочного ковша, не оказывают значительного влияния на охлаждение металла в ковше. Для расчета примем температуру на выпуске из сталеплавильного агрегата 1640 °C, вес металла в ковше 138 т, температуру огнеупорной футеровки сталеразливочного ковша на разогреве 870 °С, количество наливов 80. В результате расчета получаем:

$$W = (\ln 1640)^{0.35} - (\ln 138)^{0.64} - (\ln 870)^{0.10} +$$

+ $(\ln 80)^{0.53} = 2,02 - 2,78 - 1,21 + 2,19 = 0,22$ °С/мин.

Таким образом, скорость охлаждения металла в сталеразливочном ковше на данной стадии наименьшая.

Рис. 3 показывает, что скорость охлаждения металла, рассчитанная по данным первого измерения температуры в промежуточном ковше, также увеличивается при увеличении температуры металла после завершения вакуумирования. Абсолютные значения скорости охлаждения на этой стадии оказываются наибольшими. Этот результат, на первый взгляд, кажется не очевидным, если принять во внимание данные, полученные при анализе зависимости температуры металла в промежуточном ковше при последовательных измерениях (см. рис. 4 – 8). За начальные температуры были взяты значения, измеренные после завершения вакуумирования.

Анализ данных, приведенных на рис. 4 – 8, показывает, что степень взаимозависимости параметров при последовательных замерах температуры в промежуточном ковше системно возрастает. Такая закономерность обусловлена тем, что теплопотери в промежуточном ковше оказываются чрезвычайно низкими. Разница между температурами металла при первом и втором замерах сопоставима с точностью измерения погружной термопарой (см. рис. 4, 5). Заметное различие в значениях температур проявляется лишь на третьем, четвертом и пятом замерах, что находит отражение в значительном возрастании выборочного коэффициента корреляции (см. рис. 6 – 8). Как видно из приведенных рисунков, скорость охлаждения металла в промежуточном ковше оказывается самой низкой. Представляет интерес проведение оценки скорости охлаждения металла в промежуточном ковше. Для этого рассчитаем средние значения скорости охлаждения из отношения

 $\left(\frac{T_3 - T_7}{\tau_7 - \tau_3}\right)_{cp}$. Средняя скорость равна 0,09 °С/мин. Столь

низкая скорость охлаждения металла в промежуточном ковше обусловлена следующими причинами. Поверхность металлического расплава в промежуточном ковше защищена слоями шлакообразующей, теплоизолирующей смеси и футерованной крышкой. Поэтому оказываются минимизированными теплопотери, связанные с излучением и конвекцией. Но главное отличие от теплового состояния жидкого металла, находящегося в сталеразливочном ковше, заключается в том, что рабочая футеровка промежуточного ковша выполнена из пористого магнезиального торкрет-слоя, имеющего значительно более низкую теплопроводность относительно теплопроводности рабочего периклазоуглеродистого слоя сталеразливочного ковша. Именно этим обстоятельством обусловлена наиболее низкая скорость охлаждения металла в промежуточном ковше.

Ниже приведены средние скорости охлаждения жидкого металла на исследуемых стадиях транспортировки и разливки металла:

Стадия	Скорость охлажде- ния металла, °С/мин
Завершение обработки на АКОС – начало вакуумирования	0,60
Вакуумирование	0,82
Завершение вакуумирования – начало разливки (теоретический расчет)	0,22
Завершение ваккумирования – первый замер в промежуточном ковше	1,43
Металл в промежуточном ковше	0,09

На данном этапе становится ясной природа скачка скорости охлаждения на стадии завершения вакуумирования – первый замер в промежуточном ковше (см. рис. 3). Дело заключается в том, что жидкий металл подвержен здесь интенсивному охлаждению в период прохождения сталевыпускного канала сталеразливочного ковша, канала шиберного затвора и трубы защиты металла при разливке. Именно этим обстоятельством обусловлен скачок скорости охлаждения.

Отметим, что полученные результаты являются характерными для тех предприятий, где в технологическом цикле предусмотрена стадия вакуумирования стали. Исходные данные могут быть различными. Установленные закономерности сохраняются и в том случае, когда стадия вакуумирования отсутствует, и в общем виде распространяются и на различные способы непрерывной разливки. Очевидно, что могут меняться конкретные значения температур жидкого металла и периоды стадий, но скорости охлаждения металла на выделенных стадиях будут приблизительно одинаковыми при выполнении описанных условий. В данной работе не указаны конкретные марки разливаемых сталей и наименования предприятий. Приведенные данные получены и обобщены при использовании в качестве теплоизолирующей и шлакообразующей смеси материала «Изотерм-1600» [23, 24], применяемом на различных предприятиях.

Выводы

Проанализированы особенности охлаждения жидкого металла, находящегося в сталеразливочном и промежуточном ковшах, на этапе, ограниченном моментом завершения обработки металла на участке АКОС и его непрерывной разливки. На указанном этапе выделены наиболее важные стадии, которые охарактеризованы интегральным показателем – скоростью охлаждения металла. Показано, что скорость охлаждения металла на указанных стадиях меняется в широких пределах и отличается более, чем на порядок. Установлены наиболее значимые факторы, влияющие на скорость охлаждения металла. К этим факторам относятся начальная температура жидкого металла после завершения обработки на АКОС, температура жидкого металла после завершения вакуумирования, наличие на поверхности жидкого металла оксидного раствора, образованного шлакообразующими смесями, наличие и эффективность теплоизолирующих смесей, а также теплоизолирующие характеристики огнеупорных футеровок.

Список литературы References

- Пат. 2007109669 РФ. Способ нагрева металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах МНЛЗ / А.И. Косырев, М.В. Шишимиров, А.М. Якушев; заявлено 16.03.2007; опубликовано 27.09.2008, Бюл. № 27.
- Пат. 2011153544 РФ. Промежуточный ковш для плазменного подогрева металла / Ю.А. Пак, Г.А. Филиппов, В.А. Углов, М.В. Глухих, М.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, В.В. Галкин, С.В. Прохоров, Б.А. Сарычев, Б.В. Юречко, Д.И. Юсупов, Н.Н. Ромашева; заявлено 28.12.2011; опубликовано 27.03.2013, Бюл. № 9.
- Пат. 2011147494 РФ. Промежуточный ковш для разливки стали с камерами для нагрева жидкого металла / В.В. Галкин, М.В. Глухих, М.Х. Исакаев, Ю.А. Пак, С.В. Прохоров, А.С. Тюфтяев, В.А. Углов, Г.А. Филиппов, Д.В. Юречко, Д.И. Юсупов; заявлено 23.11.2011; опубликовано 10.03.2013, Бюл. № 7.
- 4. Кузин В.И. Способы повышения энергоэффективности футеровок тепловых агрегатов // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 5–8.
- Tripashi A., Saha J.K., Singh J.B., Ajmani S.K. Numerical simulation of heat transfer phenomenon in steelmaking ladle // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No 9. P. 1591–1600. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1591
- 6. Okura T., Ahmad I., Kano M., Hasebe I.Sh., Kitada H., Murata N. High-performans prediction of molten steel temperature in tundish

- Kosyrev A.I., Shishimirov M.V., Yakushev A.M. Method of metal heating in steel-pouring and tundish ladle of CCM. Patent RF no. 2007109669. Bulleten' izobretenii. 2008, no. 27. (In Russ.).
- Pak Yu.A., Filippov G.A., Uglov V.A., Glukhikh M.V., Isakaev M. Kh., Tyuftyaev A.S., Galkin V.V., Prokhorov S.V., Sarychev B.A., Yurechko B.V., Yusupov D.I., Romasheva N.N. *Tundish for plasma heating of metal*. Patent RF no. 2011153544. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 9. (In Russ.).
- Galkin V.V., Glukhikh M.V., Isakaev M.Kh., Pak Yu.A., Prokhorov S.V., Tyuftyaev A.S., Uglov V.A., Filippov G.A., Yurechko D.V., Yusupov D.I. *Tundish for pouring steel with chambers for liquid metal heating*. Patent RF no. 2011147494. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 7. (In Russ.).
- Kuzin V.I. Ways to improve the energy efficiency of thermal units' linings. *Novye ogneupory*. 2014, no. 11, pp. 5–8. (In Russ.).
- Tripashi A., Saha J.K., Singh J.B., Ajmani S.K. Numerical simulation of heat transfer phenomenon in steelmaking ladle. *ISIJ International*. 2012, vol. 52, no 9, pp. 1591–1600. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1591
- Okura T., Ahmad I., Kano M., Hasebe I.Sh., Kitada H., Murata N. High-performans prediction of molten steel temperature in tundish

through gray-box model // ISIJ International. 2013. Vol. 53. No 1. P. 76–80. https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.76

- Sonada Sh., Murata N., Hino K., Kitada H., Kano M. A statistical model for predicting the liquid steel temoerature in ladle and tundish by bootstap filter // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No 6. P. 1086–1091. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1086
- Bessho N., Yamasaki H., Fujii T. Removal of inclusions from molten steel in continuous casting tundish // ISIJ International. 1992. Vol. 32. No 1. P. 157–163.
 - https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.157
- Аникеев В.В. Свойства теплоизолирующих шлакообразующих смесей и их влияние на качество стальных слитков при полунепрерывном литье // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(5). С. 1188–1193.
- Iida T. Equation for estimating viscosityes of industrial mould fluxes // High Temperature Materials and Processes. 2000. Vol. 19. No. 3–4. P. 155–164. https://doi.org/10.1515/HTMP.2000.19.3-4.153
- Li H., San L., Ai L. The mould flux viscosity designing of high carbon steel for thin slab continuous casting // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1022. P. 48–51.
 - https://www.scientific.net/AMR.1022.48
- Brandalez E. Mould fluxes in the steel continuous casting processes // Science and Technology of Casting Processes. 2012. No. 9. P. 205–233.
- Пат. 2005127189 РФ. Способ теплоизоляции жидкого металла и термостат – сталеразливочный ковш для его осуществления / А.Н. Крюков; заявлено 29.08.2005; опубликовано 10.09.2007, Бюл. № 12.
- Аксельрод Л.М., Мизин В.Г., Филяшин М.К., Шуляков Г.И. Сталеразливочный ковш – объект энергосбережения // Новые огнеупоры. 2002. № 3. С. 52–55.
- 15. Вильданов С.К., Рогалева Л.В., Пыриков А.Н. О некоторых критериях эффективности комплексных теплоизолирующих и шлакообразующих смесей // Новые огнеупоры. 2020. № 5. С. 16–22. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-5-16-22
- 16. Трунов С.В., Конев М.В., Сарычев И.С., Чмырев И.Н. К выбору теплоизолирующей смеси для непрерывной разливки // Новые огнеупоры. 2020. № 10. С. 6–8.
- 17. Ботников С.А., Хлыбов О.С., Костычев А.Н. Разработка модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах в литейно-прокатном комплексе // Сталь. 2019. № 10. С. 7–13.
- Grip C.-E. Simple model for prediction of temperatures in an l-shaped-tundish verification by continuous temperature measurements // ISIJ International. 1998. Vol. 38. No. 7. P. 704–713. https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.704
- Fan C.-M., Hwang W.-S. Mathematical modeling of fluid flow phenomena during tundish filling and subsequent initial casting operation in steel continuous casting process // ISIJ International. 2000. Vol. 40. No. 11. P. 1105–1114.
 - https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.1105
- Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 609 с.
- Бочаров П.П., Печинкин А.В. Математическая статистика. Москва: Издательство Российского университета дружбы народов, 1994. 164 с.
- 22. Вильданов С.К. Оценка эффективности применения огнеупорной теплоизолирующей смеси в сталеразливочном ковше // Огнеупоры и техническая керамика. 2021. № 5-6. С. 12-18.
- 23. Вильданов С.К. Исследование воздействия температуры, веса металла и огнеупорной футеровки на скорость охлаждения расплава в сталеразливочном ковше при использовании выборок ограниченного объема // Огнеупоры и техническая керамика. 2021. № 7-8. С. 28-34.
- Вильданов С.К. Разработка и внедрение теплоизолирующих и шлакообразующих материалов серии «Изотерм-1600» // Сталь. 2018. № 9. С. 17–22.

through gray-box model. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no 1, pp. 76–80. https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.76

- Sonada Sh., Murata N., Hino K., Kitada H., Kano M. A statistical model for predicting the liquid steel temoerature in ladle and tundish by bootstap filter. *ISIJ International.* 2012, vol. 52, no 6, pp. 1086–1091. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1086
- Bessho N., Yamasaki H., Fujii T. Removal of inclusions from molten steel in continuous casting tundish. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 157–163. https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.157
- 9. Anikeev V.V. Properties of heat-insulating slag-forming mixtures and their influence on the quality of steel ingots at semi-continuous casting. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1188–1193. (In Russ.).
- Iida T. Equation for estimating viscosityes of industrial mould fluxes. *High Temperature Materials and Processes*. 2000, vol. 19, no. 3–4, pp. 155–164. https://doi.org/10.1515/HTMP.2000.19.3-4.153
- Li H., San L., Ai L. The mould flux viscosity designing of high carbon steel for thin slab continuous casting. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1022, pp. 48–51. https://www.scientific.net/AMR.1022.48
- Brandalez E. Mould fluxes in the steel continuous casting process. Science and Technology of Casting Processes. 2012, no. 9, pp. 205–233.
- 13. Kryukov A.N. A method of thermal insulation of liquid metal and a thermostat – steel ladle for its implementation. Patent RF no. 2005127189. Bulleten' izobretenii. 2007, no. 12. (In Russ.).
- Aksel'rod L.M., Mizin V.G., Filyashin M.K., Shulyakov G.I. Steelpouring ladle as an energy-saving object. *Novye ogneupory*. 2002, no. 3, pp. 52–55. (In Russ.).
- Vil'danov S.K., Rogalyova L.V., Pyrikov A.N. Selected performance criteria of complex heat-insulating and slag-forming mixtures. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020, vol. 61, no. 3, pp. 253–259. https://doi.org/10.1007/s11148-020-00467-3
- Trunov S.V., Konev M.V., Sarychev I.S., Chmyrev I.N. Selection of heat-insulating mixture for continuous casting. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021, vol. 61, no. 5, pp. 481–483. https://doi.org/10.1007/s11148-021-00506-7
- Botnikov S.A., Khlybov O.S., Kostychev A.N. Development of a steel temperature prediction model in a steel ladle and tundish in a casting and rolling complex. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 10, pp. 688–694. https://doi.org/10.3103/S096709121910005X
- Grip C.-E. Simple model for prediction of temperatures in an l-shaped-tundish verification by continuous temperature measurements. *ISIJ International*. 1998, vol. 38, no. 7, pp. 704–713. https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.704
- Fan C.-M., Hwang W.-S. Mathematical modeling of fluid flow phenomena during tundish filling and subsequent initial casting operation in steel continuous casting process. *ISIJ International*. 2000. vol. 40, no. 11, pp. 1105–1114. https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.1105
- Johnson Norman L., Leone Fred C. Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences. New York, etc.: John Wiley, 1977.
- **21.** Bocharov P.P., Pechinkin A.V. *Mathematical Statistics*. Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 1994, 164 p. (In Russ.).
- **22.** Vil'danov S.K. Evaluation of effectiveness of the use of a refractory heat-insulating mixture in a steel-pouring ladle. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika.* 2021, no. 5–6, pp. 12–18. (In Russ.).
- **23.** Vil'danov S.K. Investigation of the effect of temperature, weight of metal and refractory lining on the rate of melt cooling in a steel-pouring ladle using samples of a limited volume. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika.* 2021, no. 7–8, pp. 28–34. (In Russ.).
- **24.** Vil'danov S.K. Development and implementation of heat-insulating and slag-forming materials of Isotherm-1600 series. *Stal*[']. 2018, no. 9, pp. 17–22. (In Russ.).

Сведения об авторах	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Сергей Касимович Вильданов, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», за- меститель генерального директора, ООО «ОгнеупорТрейдГрупп» <i>E-mail:</i> vildanov@ogneupor.net	Sergei K. Vil'danov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., National Univer- sity of Science and Technology "MISIS", Deputy General Director, LLC "OgneuporTradeGrupp" E-mail: vildanov@ogneupor.net
Дмитрий Юрьевич Бондарев, инженер, ведущий специалист, 000 «ОгнеупорТрейдГрупп» E-mail: dbondarev1971@mail.ru	<i>Dmitrii Yu. Bondarev, Engineer, Leading Specialist,</i> LLC "Ogneupor- TradeGrupp" <i>E-mail:</i> dbondarev1971@mail.ru
Вклад авторов 🖉	CONTRIBUTION OF THE AUTHORS
<i>С. К. Вильданов</i> – формирование основной концепции иссле- дования, проведение расчетов, анализ результатов, подготовка текста, формирование выводов. <i>Д. Ю. Бондарев</i> – получение экспериментальных данных, их классификация, графическое представление.	 S. K. Vil'danov – formation of the main concept of the study, calculations, analysis of the results, preparation of the text, formation of conclusions. D. Yu. Bondarev – obtaining experimental data, their classification, graphical representation.
Поступила в редакцию 02.03.2022 После доработки 23.03.2022 Принята к публикации 25.04.2022	Received 02.03.2022 Revised 23.03.2022 Accepted 25.04.2022