

*Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, А.В. Григорьев*

**Сибирский государственный индустриальный университет**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ СТЕНДОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

Разогрев футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава стали является важной технологической операцией. Высокотемпературный нагрев футеровок до 1100 – 1200 °С обеспечивает снижение скорости охлаждения расплава стали и термических напряжений в футеровке, вызванных резким ее нагревом от жидкого металла, способствует повышению стойкости и срока службы кладки. По данным работы [1] повышение температуры разогрева футеровки с 900 до 1200 °С приводит к снижению расхода электроэнергии на установке ковш-печь на 10 % и к увеличению стойкости футеровки на 3 – 5 %. Результаты исследований, проведенных авторами работы [2], показывают, что для ковшей емкостью 30 т повышение температуры футеровки на каждые 100 °С позволяет снизить температуру выпуска металла из дуговой сталеплавильной печи на 11 °С, что соответствует экономии 4 кВт·ч электроэнергии на 1 т жидкой стали.

Отапливаемые газом стенды высокотемпературного разогрева футеровок ковшей различных конструкций характеризуются различными параметрами тепловой эффективности [3 – 8]. Актуальной является научно-практическая задача повышения энерготехнологической и тепловой эффективности стендов. Эта задача представляет определенный интерес с точки зрения экономии энергетических ресурсов и снижения затрат на производство стали.

Температурные режимы разогрева футеровок имеют ряд ограничений на различные параметры, вызванные теплофизическими и физико-химическими свойствами разогреваемого материала, конструктивными особенностями стенда, тепловой мощностью горелочного устройства. В частности, максимальная скорость разогрева футеровки, как правило, лимитирована допустимыми скоростями разогрева огнеупора из условий отсутствия трещинообразования от температурных или фазовых напряжений и тепловой мощностью стенда. Низкая скорость разогрева увеличивает его продолжительность, снижает производительность технологической операции, приводит к увеличению парка ковшей. Для углеродсо-

держащих огнеупоров рабочего слоя, получивших широкое распространение в сталеплавильном производстве, низкая скорость нагрева и более высокая его продолжительность приводят к росту времени нахождения поверхности футеровки при температурах более 600 – 700 °С, а, соответственно, к росту глубины обезуглероженного слоя и повышенному износу огнеупоров [9 – 14].

В настоящей работе проведены исследование влияния температурного режима разогрева футеровки на тепловую эффективность стенда и изучение динамики показателей теплового состояния ковша в процессе разогрева. Для исследований использована математическая модель [15, 16]. В качестве исходных данных принимали конструкцию футеровки, соответствующую сталеразливочным ковшам емкостью ( $E$ ) 90, 350 и 480 т [17]. Рабочий слой выполнен из алюмопериклазоуглеродистого огнеупора [13]. Химический состав природного газа, используемого для отопления стенда, следующий: 91,50 %  $\text{CH}_4$ ; 3,07 %  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 1,73 %  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,9 %  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 2,34 %  $\text{N}_2$ ; 0,45 %  $\text{CO}_2$ ; 0,01 %  $\text{O}_2$ . В рассматриваемой конструкции стенда имеется зазор 250 мм между крышкой и ковшом. Подогрев воздуха отсутствует. При проведении многовариантных расчетов принимали режим разогрева с постоянной скоростью ( $\theta$ ) 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150 и 200 °С/ч (температура среды изменялась по линейному закону) и продолжительностью ( $\tau$ ) разогрева 40, 30, 24, 20, 15, 12, 8 и 6 ч. Конечная температура нагрева поверхности футеровки составляла 1200 °С.

В таблице и на рис. 1 и 2 представлены результаты исследований (где  $t_{\text{ср}}$ ,  $t_{\text{р-а}}$ ,  $t_{\text{кож}}$  – температуры греющей среды, на стыке рабочего и арматурного слоев, кожуха ковша;  $Q$  – объем природного газа, затраченного на разогрев;  $B_{\text{max}}$  – максимальный расход топлива за период разогрева;  $B_{\text{уд}}$  – удельный расход условного топлива на тонну стали [17]; КПД – тепловой коэффициент полезного действия стенда;  $q_{\text{акк}}$ ,  $q_{\text{тер}}$  и  $q_d$  – тепло, аккумулированное кладкой, уходящее с дымом и теряемое теплопроводностью через футеровку в окружающую среду.

**Показатели тепловой работы стенов при различных режимах разогрева футеровок**

$E, \text{ т}$	$\theta, \text{ }^\circ\text{C/ч}$	$\tau, \text{ ч}$	$t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{р-а}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{кож}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q, \text{ м}^3$	$B_{\text{паш}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$B_{\text{уд}}, \text{ кг у.т./т}$	КПД, %	$q_{\text{акк}}, \text{ \%}$	$q_d, \text{ \%}$	$q_{\text{тер}}, \text{ \%}$
90	30	40	1239	1110	341	3655	207	51,8	29,4	28,9	40,5	11,0
90	40	30	1245	1088	326	3111	226	44,1	33,7	33,2	40,9	8,4
90	50	24	1257	1066	309	2799	247	39,6	36,7	36,1	41,4	6,5
90	60	20	1268	1038	290	2564	267	36,3	38,9	38,3	41,9	5,1
90	80	15	1290	991	256	2299	312	32,6	41,3	40,7	43,3	3,3
90	100	12	1310	971	224	2132	362	30,2	42,3	41,8	44,4	2,2
90	150	8	1355	851	163	1905	496	27,0	42,5	42,0	47,4	1,0
90	200	6	1394	776	123	1776	634	25,2	41,6	41,2	49,8	0,5
350	30	40	1234	1071	201	7546	354	27,5	41,4	40,6	39,0	5,2
350	40	30	1245	1030	180	6726	409	24,5	44,6	43,7	39,5	3,3
350	50	24	1257	995	161	6274	470	22,9	46,1	45,3	40,3	2,3
350	60	20	1268	960	142	5937	532	21,6	46,9	46,1	41,1	1,5
350	80	15	1290	896	111	5474	652	19,9	47,3	46,6	42,6	0,8
350	100	12	1310	838	87	5140	782	18,7	47,1	46,5	43,8	0,4
350	150	8	1355	724	53	4604	1102	16,8	45,8	45,3	46,5	0,1
350	200	6	1394	639	38	4277	1427	15,6	44,3	43,9	48,7	0
480	30	40	1240	1018	180	10270	461	27,3	44,6	43,8	39,1	3,9
480	40	30	1255	969	157	9364	541	24,9	46,6	45,8	40,1	2,4
480	50	24	1263	918	134	8639	636	22,9	47,7	47	40,8	1,5
480	60	20	1276	875	114	8185	728	21,7	48,0	47,4	41,6	1,0
480	80	15	1300	799	85	7529	899	20,0	47,9	47,3	43,2	0,5
480	100	12	1310	734	65	7027	1074	18,7	47,4	46,9	44,4	0,2
480	150	8	1362	608	39	6193	1488	16,4	46,0	45,5	46,9	0,1
480	200	6	1397	519	29	5690	1889	15,1	44,5	44,1	48,9	0

Анализ полученных результатов показывает наличие характерной зависимости КПД от скорости разогрева: зависимость имеет экстремальный характер, причем для ковшей различной емкости экстремум имеет различное значение. При увеличении скорости разогрева от 30 до 80 – 150 °C/ч (в зависимости от емкости ковша) (рис. 1) наблюдается рост КПД, далее, при более высоких скоростях разогрева КПД снижается.

Такая зависимость КПД от скорости разогрева объясняется особенностями процессов внешнего и внутреннего теплообмена. При медленном и продолжительном разогреве температура среды значительно ниже, чем при скоростном форсированном. В частности, при разогреве со скоростью 30 °C/ч

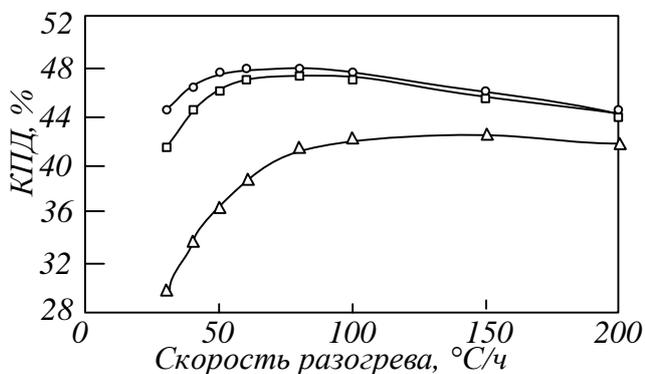


Рис. 1. Зависимость КПД стенов от скорости разогрева при емкости ковша 90 т (Δ), 350 т (□) и 480 т (○)

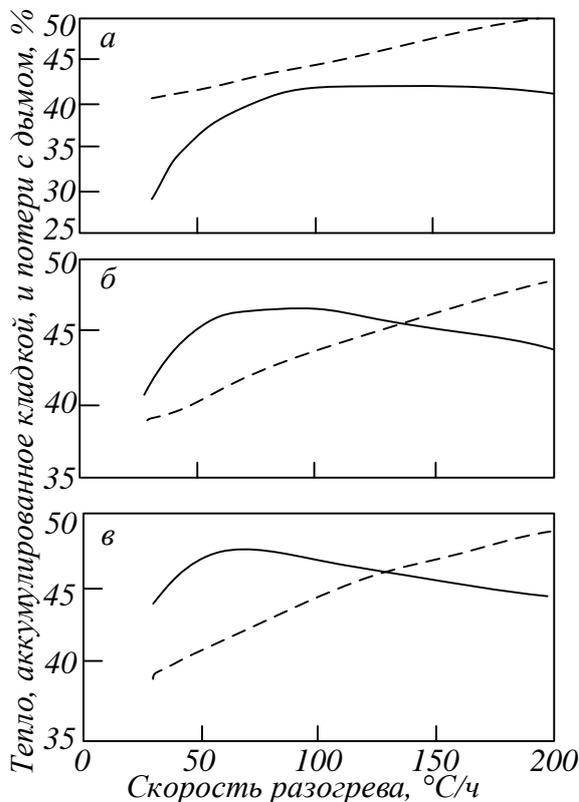


Рис. 2. Зависимости количества тепла, аккумулированного футеровкой (—), и потерь тепла с дымом (---) от скорости разогрева футеровки для ковшей емкостью 90 т (а), 350 т (б) и 480 т (в)

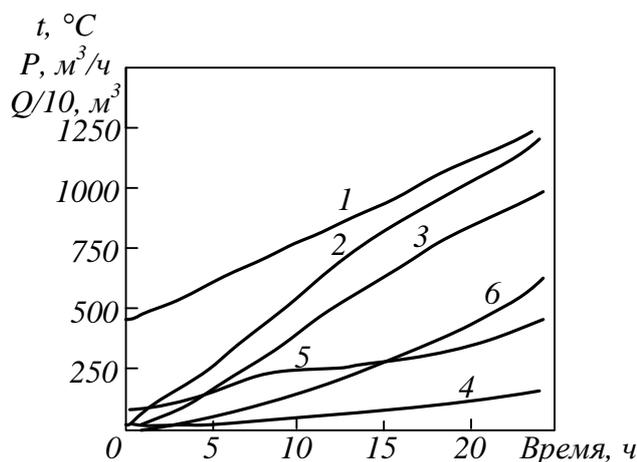


Рис. 3. Температурный режим разогрева ковша:  
 1 – 4 – температуры греющей среды ( $t_{гр}$ ), поверхности рабочего слоя, на стыке рабочего и арматурного слоев ( $t_{р-а}$ ) и кожуха ( $t_{кож}$ ) соответственно; 5 – расход  $P$  природного газа,  $m^3/h$ ; 6 –  $Q, m^3$

в течении 40 ч температура среды не превышает  $1240\text{ }^\circ\text{C}$ , а при скорости  $200\text{ }^\circ\text{C}/ч$  и времени всего 6 ч для достижения необходимой температуры поверхности футеровки необходимо иметь в конце разогрева температуру среды  $1397\text{ }^\circ\text{C}$ . Увеличение скорости разогрева приводит к ухудшению прогрева кладки и к меньшим значениям температур кожуха, а соответственно, к потерям тепла теплопроводностью в окружающую среду. Увеличение температуры греющей среды приводит к монотонному росту потерь тепла с уходящим дымом (рис. 2). Таким образом, увеличение количества аккумулированного кладкой тепла сопровождается ростом потерь тепла через футеровку. Соответственно, взаимное влияние этих статей теплового баланса предопределяет установленный характер влияния скорости разогрева на КПД стенда.

Рассмотренные параметры разогрева исследованы теоретически. На практике имеется целый ряд ограничений (в таблице возможные значения параметров выделены жирным шрифтом). Например, по условиям отсутствия трещинообразования скорость разогрева алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров не должна превышать  $60 - 100\text{ }^\circ\text{C}/ч$ ; при первом разогреве футеровки температура на стыке рабочего и арматурного слоев должна составлять не менее  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , температура кожуха не менее  $100\text{ }^\circ\text{C}$  и не более  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ; расходы топлива горелочных устройств стендов обычно не превышают  $500\text{ }m^3/h$  [6].

На рис. 3 представлен температурный режим разогрева футеровки ковша емкостью 350 т с постоянной скоростью  $50\text{ }^\circ\text{C}/ч$ .

На рис. 4 и 5 представлена динамика расхода тепла при реализации температурного режима, представленного на рис. 3.

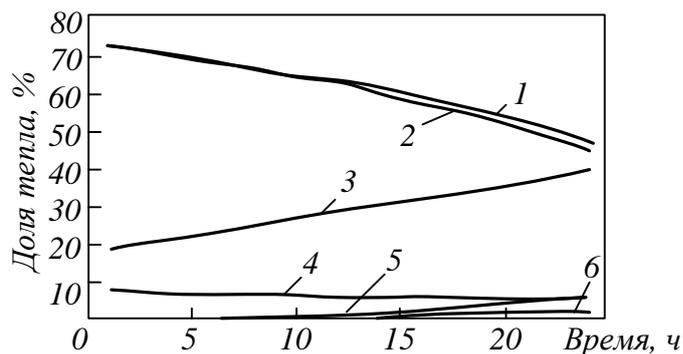


Рис. 4. Динамика расхода тепла:  
 1 – коэффициент полезного действия; 2 – тепло, аккумулированное футеровкой; 3 – потери тепла с уходящими продуктами сгорания; 4 – неучтенные потери; 5 – потери тепла излучением через технологические отверстия и зазоры; 6 – потери тепла теплопроводностью через кладку

Анализ полученных результатов (рис. 3 – 5) показывает, что коэффициент полезного действия стенда в процессе разогрева фактически монотонно снижается с 72 до 46 %. Основное влияние на КПД оказывают две расходные статьи: тепло, аккумулированное кладкой, и потери тепла с уходящими продуктами сгорания. В начале разогрева футеровка интенсивно аккумулирует тепло, температура уходящих продуктов сгорания и их расход относительно невелики. С увеличением времени разогрева рост температуры греющей среды и температуры футеровки сопровождается опережающим увеличением потерь тепла с уходящими продуктами сгорания. При этом тепловая волна, дошедшая до кожуха, приводит к росту тепловых потерь в окружающую среду теплопроводностью. С ростом температуры греющей среды возрастают потери через технологические отверстия и зазоры. Все эти факторы приводят к снижению КПД стенда и к росту расхода

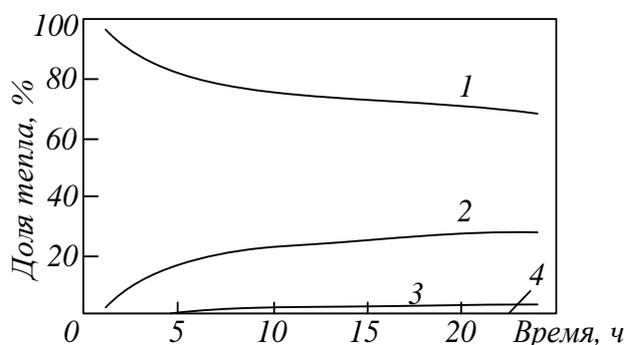


Рис. 5. Изменение количества тепла, аккумулированного футеровкой и кожухом ковша:  
 1, 2, 4 – тепло, аккумулированное рабочим, арматурным и теплоизоляционным слоем футеровки соответственно; 3 – тепло, аккумулируемое кожухом ковша

топлива. В частности, расход топлива в процессе разогрева в течение 24 ч увеличивается почти в 5,5 раз: с 86 до 470 м<sup>3</sup>/ч.

**Выводы.** Температурные режимы разогрева футеровки ковшей влияют на тепловую эффективность работы стенов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строганов К.В., Попов С.К., Абакин Д.А. Энергосбережение при сушке и нагреве футеровки сталеразливочных ковшей // Промышленная теплоэнергетика. 2014. № 1. С. 7 – 10.
2. Краснянский М.В., Кац Я.Л. Совершенствование теплового режима эксплуатации сталеразливочных ковшей // Электromеталлургия. 2016. № 4. С. 2 – 10.
3. Чайкин Б.С., Марьянич Г.Е., Панов Е.М. и др. Современные установки для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей // Новые огнеупоры. 2006. № 10. С. 21 – 25.
4. Лоренц В., Локтев А., Гартен В., Бехманн Д. Современные пути решения технологических и технических проблем сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей // Сталь. 2007. № 11. С. 74 – 77.
5. Лоренц В., Локтев А., Гартен В., Бехманн Д. Фирма «Марек» на мировом рынке оборудования для сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей и желобов доменных печей // Новые огнеупоры. 2007. № 12. С. 19 – 27.
6. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение. 2013. № 15. С. 128 – 134.
7. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е., Матвеев М.В. Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 3 – 7.
8. Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Стерлигов В.В., Темлянцева Е.Н., Дегтярь В.А. Повышение энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок металлургических ковшей // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2014. № 33. С. 38 – 44.
9. Матвеев М.В., Темлянцев М.В. Исследование обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 38 – 40.
10. Матвеев М.В., Темлянцев М.В. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей // Metallurg. 2010. № 8. С. 60 – 62.
11. Темлянцев М.В., Матвеев М.В., Костюченко К.Е. и др. Исследование кинетики выгорания углерода в периклазоуглеродистых ковшевых огнеупорах // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2011. Вып. 27. С. 85 – 90.
12. Темлянцев М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 32 – 36.
13. Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Zapol'skaya E.M., Maksakova K.E., Degtyar V.A. High-temperature decarburization of alumina-periclase-carbon ladle refractories // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 12. С. 879 – 882.
14. Темлянцев М.В., Матвеев М.В., Костюченко К.Е., Лосицкая М.Ю. Анализ особенностей тепловой обработки периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение. 2012. Вып. 14. С. 137 – 142.
15. Запольская Е.М., Феоктистов А.В., Темлянцев М.В., Бухмиров В.В., Бушуев Е.Н. Разработка детерминированной математической модели процессов тепломассообмена при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 1. С. 25 – 33.
16. Матвеев М.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Костюченко К.Е. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2013. № 31. С. 31 – 44.
17. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 2 (4). С. 28 – 32.

© 2019 г. Е.М. Запольская, М.В. Темлянцев,  
А.В. Григорьев  
Поступила 18 мая 2019 г.