



## Моделирование процесса воздушного охлаждения непрерывнолитого слитка

Цель исследования – разработка эффективных режимов охлаждения непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ путем применения трансзвуковых струй воздуха. Предмет исследования – влияние геометрических и энергетических характеристик трансзвуковых струй воздуха на эффективность охлаждения непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ. С применением каких технических и метрологических средств выполнены исследования – экспериментальное исследование взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с тупиковым каналом, который имитирует поверхность непрерывнолитого слитка и поддерживающие ролики. Математическое моделирование газодинамических процессов взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с поверхностью непрерывнолитого слитка с использованием ПЭВМ. Получено уравнение подобия, которое может быть использовано для определения давления воздуха, а, следовательно, и коэффициента теплоотдачи на поверхности непрерывнолитого слитка при конструктивных расчетах системы воздушного охлаждения слитка на МНЛЗ. Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** непрерывнолитой слиток, зона вторичного охлаждения, МНЛЗ, трансзвуковая струя, тупиковый канал, уравнение подобия

*The purpose of exploration - development of effective cooling conditions of continuous casting ingot in a zone of secondary cooling of CCM by application of transonic jets of air. Object of research - influence of geometrical and energetic characteristics of transonic jet of air on efficiency of cooling of continuous casting ingot in a zone of secondary cooling of CCM. Usage of technical and metrological resources - an experimental research of interacting of a transonic jet of air with the deadlock channel which simulates a surface of cooling of continuous casting ingot and supporting rolls is executed. Mathematical modelling of gasdynamic processes of interacting of a transonic jet of air with a surface of continuous casting ingot with usage of computer. The equation of similitude that can be used for definition of pressure of air, and, hence, heat transfer coefficient on a surface of continuous casting ingot at constructive calculations of system of an air cooling of ingot on CCM is obtained.*

**Keywords:** continuous casting ingot, secondary cooling zone, CCM, transonic jet, deadlock channel, equation of similitude

Одним из перспективных направлений развития отечественной металлургии является усовершенствование процесса непрерывной разливки стали. Разливка стали на МНЛЗ приводит к повышению прочности и пластических свойств непрерывнолитого слитка, а также к увеличению ударной вязкости и сопротивления усталостным нагрузкам по сравнению со сталью, разлитой в изложницы.

Качество проката зависит от ряда факторов, к которым, в первую очередь, относится гладкость поверхности непрерывнолитого слитка. Одним из эффективных мероприятий, которое направлено на повышение качества поверхности слитка, является усовершенствование системы охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

На МНЛЗ отечественных металлургических предприятий в зоне вторичного охлаждения используются системы охлаждения двух типов: водяное (спрейерное) и водовоздушное охлаждение непрерывнолитых слитков. Эти системы охлаждения обладают рядом недостатков.

Одним из основных недостатков водяного охлаждения является образование поперечных трещин на поверхности слитка и, в особенности, на его гранях. Помимо этого наблюдается термоциклирование поверхности слитка. Перепад температур на отдельных

участках слитка может достигать 150-200 °С.

К основным недостаткам водовоздушного охлаждения относятся:

- необходимость очистки больших объемов воды перед форсунками для предотвращения их засорения;
- формирование трещин вследствие разной плотности распределения охлаждающей воды на поверхности слитка.

В условиях необходимости очистки воды после зоны вторичного охлаждения МНЛЗ в замкнутых бессточных системах охлаждения, доля капитальных затрат может достигать 30 %. Учитывая все указанные выше факторы перспективным на наш взгляд является использование воздуха в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ [1].

Результаты первых попыток разработки систем воздушного охлаждения непрерывнолитых слитков в зоне вторичного охлаждения представлены в литературе [2]. Экспериментальные исследования проводились при дозвуковых значениях скорости воздуха на срезе сопла, которая составляла 10-125 м/с. При таких значениях скорости воздуха коэффициент теплоотдачи не превышал 100 Вт/м<sup>2</sup>·К, что в условиях действующей МНЛЗ приводило к увеличению длины зоны вторичного охлаждения и ухудшению качества непрерывнолитого слитка. Авторы [2, 3] указывают

на нецелесообразность использования воздуха в качестве охлаждающей среды для непрерывнолитого слитка вследствие необходимости выработки большого количества сжатого воздуха. Так, по данным [2, 3] при охлаждении слитка компрессорным воздухом с абсолютным давлением 0,4 МПа коэффициент теплоотдачи находился в диапазоне 175-200 Вт/м<sup>2</sup>·К, а расход воздуха составлял  $0,005 \frac{M_3}{c}$ . При охлаждении слитка воздухом от воздухоудувки с абсолютным давлением 0,105-0,11 МПа коэффициент теплоотдачи находился в пределах 71-123 Вт/м<sup>2</sup>·К, а расход воздуха составлял  $0,007 \div 0,01 \frac{M_3}{c}$ .

В данной работе предлагается использовать трансзвуковые струи воздуха (скорость течения струи близка к звуковой) для охлаждения непрерывнолитого слитка во вторичной зоне охлаждения МНЛЗ.

Использование трансзвуковых струй воздуха для охлаждения слитка позволит:

- значительно снизить диссипацию энергии струи воздуха между соплом и поверхностью слитка, а, следовательно, снизить расход воздуха, необходимого для охлаждения слитка;
- получить величину коэффициента теплоотдачи и площадь пятна контакта струи с поверхностью слитка, сопоставимые с «мягким» режимом водовоздушного охлаждения слитка.

Кроме того, для достижения струей трансзвуковой скорости достаточно повысить давление воздуха перед соплом до 0,2 МПа. Таким образом, можно сделать вывод о том, что известные результаты экспериментальных исследований [2, 3] охлаждения непрерывнолитого слитка дозвуковыми струями воздуха необходимо дополнить исследованиями газодинамики и теплообмена при взаимодействии трансзвуковой струи с поверхностью слитка. В связи с этим необходимо проведение дополнительного экспериментального исследования взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с поверхностью непрерывнолитого слитка.

Авторами проведено экспериментальное исследование процесса взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с тупиковым каналом, днище которого

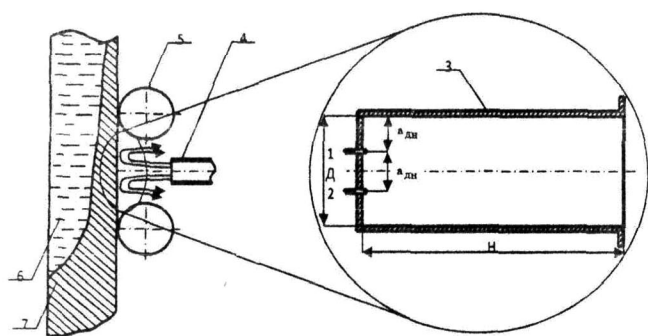


Рисунок. Схема взаимодействия струи воздуха с поверхностью слитка: 1 и 2 - дренажные отверстия импульсных линий; 3 - тупиковый канал; 4 - сопло для подвода воздуха; 5 - поддерживающие ролики; 6 - жидкая фаза слитка; 7 - твердая фаза слитка; - шаг дренажных отверстий вдоль днища тупикового канала; H - глубина тупикового канала; D - диаметр тупикового канала

имитировало поверхность слитка, а боковая поверхность канала имитировала поддерживающие ролики (рисунок). Такая имитация является вполне приемлемой, поскольку расстояние между поддерживающими роликами превышает диаметр сопла для подвода воздуха [3].

Суть эксперимента заключалась в измерении давления на днище канала при натекании на него трансзвуковой струи воздуха. Для этого в тупиковом канале выполнены дренажные отверстия, которые соединены через импульсные трубки с групповым манометром, который содержит 20 рычажных сильфонных манометров. Для данного эксперимента использовались 2 рычажных манометра в соответствии с числом дренажных отверстий, выполненных в тупиковом канале.

Оценка точности измерения избыточного давления, а также расчет времени демпфирования волновых процессов в импульсных трубках проводились в соответствии с известными методиками [4]. Теплофизические и механические свойства сред и материалов взяты из [5].

Размеры тупикового канала и сопла приняты в соответствии с геометрическим подобием технологическим и конструктивным параметрам зоны вторичного охлаждения МНЛЗ.

Эксперимент по фронтальному натеканию струи на тупиковый канал охватывал следующие значения газодинамических и геометрических параметров струи и тупикового канала:

- диаметр выходного отверстия сопла

$$d_0 = 0,012; 0,016; 0,020; 0,022; 0,024; 0,027 \text{ м};$$

- диаметр тупикового канала  $D = 0,04; 0,05; 0,06; 0,08 \text{ м};$

- глубина тупикового канала  $H = 0,12; 0,15; 0,18; 0,24 \text{ м},$   
т.е.  $H = 3 \cdot D$ ;

- дренажные отверстия вдоль днища тупикового канала расположены с шагом  
 $a_{ди} = 0,013; 0,017; 0,020; 0,027 \text{ м};$

$\bar{d} = \frac{d_0}{D}$ , относительный диаметр тупикового канала

- угол между осью сопла и осью канала  $\phi = 0^\circ$ ;

- относительное расстояние от выходного отверстия сопла до днища тупикового канала  $\left( \bar{h}_{np} = \frac{h_{np}}{d_0} \right)$   
изменялось в пределах 4,44-20,30;

- абсолютное давление воздуха перед соплом  $P_{с0} = 0,24-2,12 \text{ МПа};$

- число Маха на срезе сопла  $M_0 = 1,0$ .

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования фронтального натекания трансзвуковой струи на тупиковый канал. Представлены значения давления воздуха  $P_{абс0}$  в дренажных отверстиях № 1 и № 2 при различных значениях давления воздуха перед соплом  $P_{с0}$ , различном

значении относительного диаметра тупикового канала  $\bar{d} = \frac{d_0}{D}$  и относительном расстоянии от плоскости среза сопла до плоскости входного отверстия тупикового канала  $\bar{h} = 0,26$ .

**Таблица 1. Результаты экспериментального исследования фронтального натекания трансзвуковой струи на тупиковый канал**

$\bar{d} = 0,33$		$\bar{d} = 0,30$		$\bar{d} = 0,25$		$\bar{d} = 0,20$	
$\bar{P}_{c0}$	$\bar{P}_{абс\delta}$	$\bar{P}_{c0}$	$\bar{P}_{абс\delta}$	$\bar{P}_{c0}$	$\bar{P}_{абс\delta}$	$\bar{P}_{c0}$	$\bar{P}_{абс\delta}$
5,04	1,70	7,07	1,82	9,08	1,81	11,07	1,63
7,09	1,93	9,02	2,09	11,16	2,04	13,09	1,77
9,05	2,21	11,07	2,41	13,14	2,24	15,08	1,97
11,10	2,50	13,08	2,63	15,06	2,50	19,12	2,17
13,13	2,72	13,78	2,70	19,10	2,90	21,12	2,28

Для обобщения экспериментальных данных и получения зависимостей, связывающих геометрические и динамические характеристики сопла и газовой струи в виде критериальных уравнений использовалась теория подобия. Это позволяет использовать результаты эксперимента в конструкторских расчетах.

В соответствии с [6] общая критериальная зависимость газодинамического подобия течения сжимаемых газовых потоков имеет следующий вид

$$f(M_0, k, \bar{\rho}, \bar{l}_1, \dots, \bar{l}_n) = 0, \quad (1)$$

— где  $k$  - число Пуассона (показатель адиабаты);  $\bar{\rho}$  - симплекс, учитывающий разность температур потока и окружающей среды,  $\bar{l}_1, \dots, \bar{l}_n$  - симплексы, учитывающие особенности данной модели.

Из критериальной зависимости (1) исключен критерий Маха, поскольку экспериментальные исследования выполнены при одном и том же значении этого критерия, равного  $M_0 = 1$ . Экспериментальные исследования проводились с изотермической газовой струей, следовательно, из уравнения (1) исключен симплекс  $\bar{\rho}$ . Использование воздуха, в качестве газа, взаимодействующего с тупиковым каналом при экспериментальных исследованиях, позволяет исключить из критериальной зависимости (1) число Пуассона.

Вместе с тем, в критериальную зависимость (1) вводятся симплексы  $\bar{P}_{абс\delta}$ ,  $\bar{P}_{c0}$ ,  $\bar{d}$  и  $\bar{h}$ .

Симплексы, характеризующие относительное давление воздуха на днище тупикового канала и давление воздуха перед соплом, определяются по формулам:

$$\bar{P}_{абс\delta} = \frac{P_{атм} + P_{абс\delta}}{P_{атм}}, \quad \bar{P}_{c0} = \frac{P_{атм} + P_{c0}}{P_{атм}} \quad (2, 3)$$

Таким образом, критериальную зависимость газодинамического подобия предлагается представить следующим образом:

$$\bar{P}_{абс\delta} = c \cdot \bar{P}_{c0}^n \cdot \bar{d}^m \cdot \bar{h}^k, \quad (4)$$

Коэффициенты  $c$ ,  $n$ ,  $m$  и  $k$  в уравнении (4), вычисленные по результатам экспериментальных данных, представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Коэффициенты критериальных уравнений при фронтальном натекании струи**

Значения критерия Рейнольдса	Коэффициенты			
	$c$	$n$	$m$	$k$
$2,33 \cdot 10^5 < Re < 5,26 \cdot 10^5$	5,36	0,44	0,79	0,78

Полученное с помощью теории подобия уравнение (4) описывает экспериментальные значения давления воздуха на днище тупикового канала с точностью  $\pm 25\%$  [7].

Определив величину давления воздуха на поверхность непрерывнолитого слитка можно рассчитать значения скорости вдоль поверхности слитка, что в свою очередь, необходимо для определения коэффициента теплоотдачи от поверхности слитка к струе охлаждающего воздуха при трансзвуковых скоростях его течения вдоль поверхности слитка.

### Выводы

Уравнение (4) с учетом значений коэффициентов, представленных в табл. 2, может быть использовано для определения давления воздуха, а, следовательно, коэффициента теплоотдачи на поверхности непрерывнолитого слитка при определении газодинамических и конструктивных параметров системы воздушного охлаждения слитка на МНЛЗ.

В качестве перспективы для дальнейших исследований следует отметить следующие направления: экспериментальное исследование бокового натекания струи на поверхность непрерывнолитого слитка, а также математическое моделирование процесса взаимодействия трансзвуковых струй воздуха с поверхностью слитка и поддерживающими роликами.

### Библиографический список

1. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. - Донецк: Издательство ДонНТУ, 2011. - 482 с.
2. Освоение непрерывной разливки стали / А.Д. Акименко, К.П. Коротков, Н.П. Майоров и др. - Л.: Судпромгиз, 1960. - 228 с.
3. Исследование тепло- и массообмена при сопловой сушке / В.В. Красников, В.А. Данилов // Инженерно-физический журнал. - 1965. - Т. 9. - № 5. - С. 632-639.
4. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник. - М.: Наука, 1972. - 720 с.
6. Практика физического моделирования на металлургическом заводе / А.В. Гречко, Р.Д. Нестеренко, Ю.А. Кудинов. - М.: Металлургия, 1976. - 224 с.
7. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. - М.: Мир, 1983. - 512 с.

Поступила 03.10.13