

УДК 532.525.6

Гичёв Ю.А. — д.т.н., профессор, Национальная металлургическая академия Украины

Жовтонога Н.Н. — к.э.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ)

Василькив Т.А. — аспирант, ДНУЖТ

Перцевой В.А. — к.т.н., доцент, ДНУЖТ

Абдуразаков Я.Р. — студент, ДНУЖТ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА ТРАНСЗВУКОВЫМИ СТРУЯМИ ВОЗДУХА

Приведена классификация систем охлаждения непрерывнолитых слитков в зоне вторичного охлаждения. Обосновано применение трансзвуковых струй воздуха для охлаждения непрерывнолитого слитка. Выполнено экспериментальное исследование газодинамических характеристик трансзвуковой газовой струи. Экспериментальные данные могут быть использованы при разработке режимов эксплуатации, а также газодинамических и конструктивных параметров системы воздушного охлаждения слитка на МНЛЗ.

Ключевые слова: непрерывнолитой слиток; система охлаждения; трансзвуковая струя; МНЛЗ.

Введение

Эффективность процессов получения непрерывнолитого слитка и последующая его прокатка, в основном, обусловлена способами и режимами охлаждения непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

Охлаждение непрерывнолитого слитка в зоне вторичного охлаждения является одной из основных технологических операций, которая определяет качество поверхности металла. Этот фактор является важным при производстве листового проката для автомобильной промышленности и производстве железнодорожных рельс [1, 2].

Помимо этого, при осуществлении непрерывной разливки стали выход годного увеличивается на $10 \div 20\%$ и может находиться в пределах $98,5 \div 99,5\%$, за счет уменьшения обрезки [3], удельный расход энергии снижается на $40 \div 50\%$, по сравнению с разливкой стали в изложницы, вследствие исключения затрат на парк изложниц, обработку слитков и нагрев слитков в колодцах и печах, капитальные затраты

уменьшаются приблизительно на 30% за счет отсутствия обжимных станков [3 – 5].

Постановка задачи

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

Классификация систем охлаждения непрерывнолитых слитков в зоне вторичного охлаждения приведена на рисунке 1.

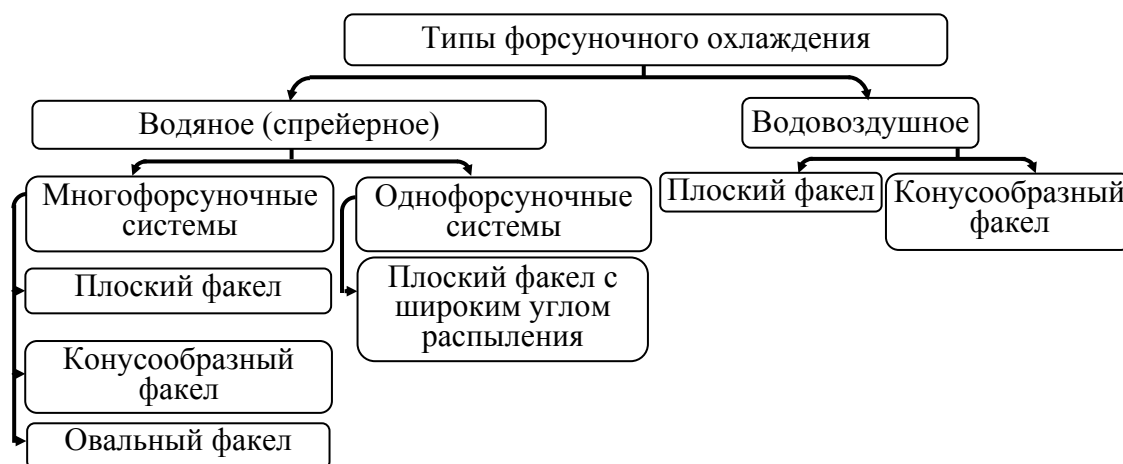


Рис. 1. Классификация существующих систем охлаждения непрерывнолитых слитков в зоне вторичного охлаждения

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.

К основным недостаткам водовоздушного охлаждения относятся необходимость очистки больших объемов воды перед форсунками для предотвращения их засорения, а также формирование трещин вследствие разной плотности распределения охлаждающей воды на поверхности слитка.

В данной работе предлагается использовать трансзвуковые (скорость течения струи близка к звуковой) струи воздуха для охлаждения непрерывнолитого слитка во вторичной зоне охлаждения МНЛЗ, поскольку использование трансзвуковых струй воздуха позволит устранить недостатки, присущие системам водяного и водовоздушного охлаждения.

Помимо этого, использование трансзвуковых струй воздуха для охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения позволит значительно снизить диссипацию энергии струи воздуха между соплом и

поверхностью слитка, а также получить величину коэффициента теплоотдачи в диапазоне $175 \div 300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ и площадь пятна контакта струи с поверхностью слитка в пределах $150 \div 650 \text{ мм}$, что сопоставимо с режимами водовоздушного охлаждения слитка.

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что известные результаты экспериментальных исследований [6, 7] охлаждения непрерывнолитого слитка дозвуковыми струями воздуха необходимо дополнить исследованиями газодинамики и теплообмена при взаимодействии трансзвуковой струи с поверхностью слитка.

Методика исследования

Данная работа является продолжением исследования фронтального натекания струи на тупиковый канал и представляет собой исследование бокового натекания струи на тупиковый канал.

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

- относительный диаметр тупикового канала $\bar{d} = \frac{d_0}{D} = 0,20; 0,40;$
- угол между осью сопла и осью канала $\varphi = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ;$
- относительное расстояние от выходного отверстия сопла до плоскости входного отверстия тупикового канала $\left(\bar{h} = \frac{h}{d_0} \right)$ изменялось в пределах $12,10 \div 28,83;$
- абсолютное давление воздуха перед соплом $P_{c0} = 0,7 \div 2,1 \text{ МПа};$
- число Маха на срезе сопла $M_0 = 1,0.$

Авторами проведено экспериментальное исследование процесса взаимодействия трансзвуковой струи воздуха с тупиковым каналом, днище которого имитировало поверхность слитка, а боковая поверхность канала имитировала поддерживающие ролики. Такая имитация является вполне приемлемой, поскольку расстояние между поддерживающими роликами превышает диаметр сопла для подвода воздуха.

Суть эксперимента заключалась в измерении давления на днище канала в дренажных отверстиях № 1 и № 2 при натекании на него трансзвуковой струи воздуха. Оценка точности измерения избыточного давления, а также расчет времени демпфирования волновых процессов в импульсных трубках проводились в соответствии с известными методиками [8, 9]. Теплофизические и механические свойства сред и материалов взяты из работ [10, 11].

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

Детальное описание методики проведения экспериментальных исследований приведено в [12]. Тупиковый канал с дренажными отверстиями № 1 и № 2 схематически изображен на рисунке 2.

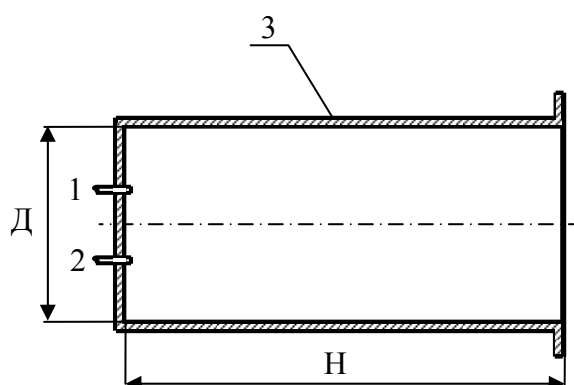


Рис. 2. Схема взаимодействия струи воздуха с поверхностью слитка:
1 и 2 – дренажные отверстия импульсных линий; 3 – тупиковый канал;
 $a_{\text{дн}}$ – шаг дренажных отверстий вдоль днища тупикового канала;
Н – глубина тупикового канала; Д – диаметр тупикового канала

В качестве примера в таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования бокового натекания трансзвуковой струи на тупиковый канал. Представлены значения давления воздуха $\bar{P}_{\text{абс д}}$ в дренажных отверстиях № 1 и № 2 при различных значениях давления воздуха перед соплом $\bar{P}_{\text{с0}}$, различном расстоянии от выходного отверстия сопла до плоскости входного отверстия тупикового канала $\bar{h}$ и относительном диаметре тупикового канала $\bar{d} = 0,4$.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования
фронтального натекания трансзвуковой струи на тупиковый канал

$\bar{P}_{\text{с0}} = 0,7$		$\bar{P}_{\text{с0}} = 0,9$		$\bar{P}_{\text{с0}} = 1,1$		$\bar{P}_{\text{с0}} = 1,3$	
$\bar{h}$	$\bar{P}_{\text{абс д}}$	$\bar{h}$	$\bar{P}_{\text{абс д}}$	$\bar{h}$	$\bar{P}_{\text{абс д}}$	$\bar{h}$	$\bar{P}_{\text{абс д}}$
12,67	1,63	12,62	1,92	12,62	2,00	12,64	2,23
15,09	1,47	15,06	1,75	15,06	1,83	15,06	2,04
18,07	1,32	18,04	1,62	18,05	1,65	17,98	1,84
22,00	1,22	21,99	1,46	21,98	1,50	21,93	1,63
28,26	1,13	28,27	1,28	28,33	1,31	28,24	1,42

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

В соответствии с [13, 14] 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 $\bar{P}_{абс д}$, $\bar{P}_{с0}$, $\bar{d}$, $\bar{h}$ и φ .

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

$$\bar{P}_{абс д} = \frac{P_{атм} + P_{абс д}}{P_{атм}}; \quad (2)$$

$$\bar{P}_{с0} = \frac{P_{атм} + P_{с0}}{P_{атм}}. \quad (3)$$

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

$$\bar{P}_{абс д} = c \cdot \bar{P}_{с0}^n \cdot \bar{d}^m \cdot \bar{h}^k \cdot \varphi^q. \quad (4)$$

Коэффициенты c, n, m, k, L и q в уравнении (1) вычислены на основании экспериментальных данных и представлены в таблице 2.

Полученное с помощью теории подобия уравнение (4) описывает экспериментальные значения давления воздуха на днище тупикового канала с точностью $\pm 25\%$ [15].

Таблица 2

Коэффициенты критериального уравнения при боковом натекании струи

Значения критерия Рейнольдса \ Коэффициенты	c	n	m	k	q
$2,33 \cdot 10^5 < Re < 4,67 \cdot 10^5$	11,38	0,99	0,82	-0,43	-0,37

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 таблице 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 рассматривать математическое моделирование процесса взаимодействия трансзвуковых струй воздуха с поверхностью слитка и поддерживающими роликами.

Список литературы

1. Бродский С. С. Новые технологические процессы и оборудование многоручьевых сортовых МНЛЗ [Текст] / С. С. Бродский. – Мн. : Беларуская навука, 1998. – 128 с.
2. Обманов Ю. Б. Водовоздушное охлаждение установок непрерывной разливки стали [Текст] / Ю. Б. Обманов, А. П. Шкирмонта, В. А. Гузенков // Обзор по системе “Информсталь”. Бюллетень ин-та “Черметинформация”. – 1989. – Вып. 12 (345). – 49 с.
3. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк : Издательство ДонНТУ, 2011. – 482 с.
4. Дюдкин Д. А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки [Текст] / Д. А. Дюдкин. – К. : Техника, 1988. – 253 с.
5. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок [Текст] / В. А. Емельянов. – М. : Metallurgia, 1988. – 143 с.
6. Освоение непрерывной разливки стали [Текст] / А. Д. Акименко, К. П. Коротков, Н. П. Майоров [и др.]. – Л. : Судпромгиз, 1960. –

228 с.

7. Скворцов А. А. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки [Текст] / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко. – М. : Metallurgiya, 1966. – 191 с.

8. Браславский Д. А. Точность измерительных устройств [Текст] / Д. А. Браславский, В. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.

9. Брянский Л. Н. Краткий справочник метролога: справочник [Текст] / Л. Н. Брянский, А. С. Дойников. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 79 с.

10. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: справочник [Текст] / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

11. Енохович А. С. Справочник по физике: справочник [Текст] / А. С. Енохович. – М. : Просвещение, 1990. – 384 с.

12. Васильків Т. А. Застосування теорії подоби для узагальнення експериментальних досліджень взаємодії трансзвукової струмینی повітря з тупиковим каналом [Текст] / Т. А. Васильків, В. О. Перцевий // “Енергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности”: материалы IV международной научно-практической конференции, 11 июня – 14 июня 2013 г. – Днепропетровск, ДНУЗТ, 2013. – С. 24.

13. Гречко А. В. Практика физического моделирования на металлургическом заводе [Текст] / А. В. Гречко, Р. Д. Нестеренко, Ю. А. Кудинов. – М. : Metallurgiya, 1976. – 224 с.

14. Максимов Ю. М. Математическое моделирование металлургических процессов [Текст] / Ю. М. Максимов, И. М. Рожков, М. А. Саакян. – М. : Metallurgiya, 1976. – 288 с.

15. Крейт Ф. Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.

Рукопись поступила 17.07.2013 г.